

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В.о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Оптимізація комплексного енергопостачання автономних об'єктів з використанням поновлюваних джерел енергії»

Виконав

(підпис)

Ольга РЯСНА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

ЗЕТЕ 2401-1М

Науковий керівник:

(підпис)

Володимир КРАВЧЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

(підпис)

Олександр КОВБАСА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
енергетики та електротехнічних систем

Андрій ЧЕПІЖНИЙ
«5» вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу
Ольги РЯСНОЇ

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Оптимізація комплексного енергопостачання автономних об'єктів з використанням поновлюваних джерел енергії»
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Кравченко Володимир Олексійович, к.ф.-м.н., доцент
3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.
4. Вихідні дані до роботи: добовий графік споживання електроенергії (профіль навантаження); ПУЕ, ДБН, ДСТУ з відновлюваної енергетики та електробезпеки; методичні рекомендації до виконання проєкту (роботи).
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; Розділ 1. Сучасна енергетика регіону Сумщини; Розділ 2. Обґрунтування та розробка структури комплексної фотовітроелектричної системи енергопостачання навчально-виробничого приміщення ІТФ; 3. Підбір обладнання та технічні розрахунки для СЕС і ВЕС приміщення ІТФ; Розділ 4. Розрахунок та вибір елементів комплексної системи енергопостачання; Розділ 5. Вибір АКБ, інверторів та контролерів заряду АКБ; Розділ 6. Розробка схеми електричної функціональної та структурної, принципової комплексної системи електропостачання; Розділ 7. Техніко-економічне обґрунтування впровадження комплексної фото-вітроелектричної системи для приміщення ІТФ; Розділ 8. Охорона праці та техніка безпеки; Загальний висновок; Список використаних джерел.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Володимир КРАВЧЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Ольга РЯСНА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «5» вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. Сучасна енергетика регіону Сумщини»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Обґрунтування та розробка структури комплексної фотовітроелектричної системи енергопостачання навчально-виробничого приміщення ітф»	до 19.09.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Підбір обладнання та технічні розрахунки для СЕС і ВЕС приміщення ІТФ»	до 03.10.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Розрахунок та вибір елементів комплексної системи енергопостачання»	до 06.10.2025 р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5. Вибір АКБ, інверторів та контролерів заряду АКБ»	до 09.10.2025 р.	
10.	Підготовка розділу «Розділ 6 Розробка схеми електричної функціональної та структурної, принципової комплексної системи електропостачання»	до 15.10.2025 р.	
11.	Підготовка розділу «Розділ 7. Техніко-економічне обґрунтування впровадження комплексної фото-вітроелектричної системи для приміщення ІТФ»	до 20.10.2025 р.	
12.	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
13.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
14.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
15.	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

_____ (підпис)

Володимир КРАВЧЕНКО
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

_____ (підпис)

Ольга РЯСНА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Рясна Ольга Василівна. Оптимізація комплексного енергопостачання автономних об'єктів з використанням поновлюваних джерел енергії.

Кваліфікаційна робота на здобуття магістра за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Метою роботи є розробка та оптимізація структури комплексної автономної системи енергопостачання з поєднанням сонячної, вітрової та резервної генерації з урахуванням регіональних природно-кліматичних умов, режимів споживання електроенергії та вимог до надійності електропостачання. Об'єктом дослідження є система електропостачання автономного об'єкта, а предметом дослідження – процеси генерації, накопичення, перетворення та розподілу електричної енергії у комплексних системах з використанням поновлюваних джерел енергії.

У першому розділі роботи виконано аналітичний огляд сучасного стану та перспектив розвитку відновлюваної енергетики, розглянуто особливості використання сонячної, вітрової та гідроенергії в автономних системах електропостачання. Проведено порівняльний аналіз традиційних і альтернативних джерел енергії, визначено їх переваги та обмеження. Особливу увагу приділено питанням оптимізації структури енергосистем з урахуванням змінного характеру природних енергетичних ресурсів.

Перший розділ присвячено обґрунтуванню структури комплексної системи автономного енергопостачання для приміщення інженерно-технологічного факультету. Проведено аналіз електричних навантажень об'єкта, визначено загальну розрахункову потужність споживачів та сформовано добові й сезонні графіки навантаження. На основі цих даних обґрунтовано доцільність використання сучасної системи електропостачання,

що поєднує гідроенергетику сонячну електростанцію, вітроенергетичну установку, акумуляторну систему та резервну дизельну електростанцію.

Виконано оптимізаційний аналіз поновлюваних енергетичних ресурсів Сумського регіону. Проведено математичне моделювання процесів генерації електричної енергії сонячними та вітровими установками з урахуванням реальних кліматичних даних – інсоляції, швидкості вітру та сезонних коливань. Побудовано моделі добових і річних графіків генерації, що дозволило визначити оптимальне співвідношення встановлених потужностей СЕС і ВЕС для забезпечення балансу між виробництвом та споживанням електроенергії. Показано, що використання комбінованої структури дозволяє суттєво знизити залежність системи від одного виду джерела енергії та підвищити загальну надійність електропостачання.

Четвертий розділ присвячено розрахунку та вибору основних елементів комплексної системи енергопостачання. Виконано технічні розрахунки сонячної електростанції потужністю 30 кВт, вітроенергетичної установки потужністю 15 кВт, акумуляторної системи на базі літій-залізо-фосфатних акумуляторів ємністю понад 50 кВт·год, а також резервної дизельної електростанції потужністю 11 кВт. Обґрунтовано вибір сучасного силового та перетворювального обладнання, інверторів, систем керування та захисту, що забезпечують стабільні параметри якості електроенергії та безперебійну роботу споживачів.

У розділі техніко-економічне обґрунтування відбулося впровадження запропонованої системи. Проведено оцінку капітальних та експлуатаційних витрат, визначено економічний ефект від зменшення споживання електроенергії з централізованої мережі та використання «зеленого» тарифу. Показано, що за умови часткової грантової підтримки для освітніх та наукових проєктів термін окупності системи є економічно прийнятним, а впровадження комплексної системи енергопостачання забезпечує суттєве підвищення енергонезалежності об'єкта.

Результати виконаної роботи мають практичну цінність і можуть бути використані при проектуванні та модернізації систем електропостачання навчальних корпусів, лабораторій і виробничих майстерень, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців у галузі електроенергетики та відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії; автономне електропостачання; оптимізація; сонячна електростанція; вітроенергетична установка; акумуляторна система; енергетичний баланс; Сумський регіон; математичне моделювання; енергоефективність.

ABSTRACT

Ryasna Olga Vasylivna. Optimization of integrated power supply of autonomous facilities using renewable energy sources.

Qualification work for obtaining a master's degree in the educational program "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" in the specialty 141 "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The purpose of the work is to develop and optimize the structure of a complex autonomous power supply system with a combination of solar, wind and backup generation, taking into account regional natural and climatic conditions, electricity consumption regimes and requirements for the reliability of power supply. The object of the study is the power supply system of an autonomous facility, and the subject of the study is the processes of generation, accumulation, conversion and distribution of electric energy in complex systems using renewable energy sources.

The first section of the work provides an analytical review of the current state and prospects for the development of renewable energy, considers the features of the use of solar, wind and hydropower in autonomous power supply systems. A comparative analysis of traditional and alternative energy sources is carried out, their advantages and limitations are determined. Special attention is paid to the issues of optimizing the structure of power systems taking into account the variable nature of natural energy resources. The first section is devoted to the justification of the structure of a complex autonomous power supply system for the premises of the Faculty of Engineering and Technology. An analysis of the electrical loads of the facility is carried out, the total estimated capacity of consumers is determined and daily and seasonal load schedules are formed. Based on these data, the feasibility of using a modern power supply system that combines hydropower, a solar power plant, a wind power plant, a battery system and a backup diesel power plant is substantiated.

An optimization analysis of renewable energy resources of the Sumy region is carried out. Mathematical modeling of the processes of generating electricity by solar

and wind power plants was carried out, taking into account real climatic data - insolation, wind speed and seasonal fluctuations. Models of daily and annual generation schedules were built, which made it possible to determine the optimal ratio of installed capacities of solar power plants and wind power plants to ensure a balance between electricity production and consumption. It was shown that the use of a combined structure allows to significantly reduce the system's dependence on one type of energy source and increase the overall reliability of electricity supply.

The fourth section is devoted to the calculation and selection of the main elements of a complex power supply system. Technical calculations were made for a solar power plant with a capacity of 30 kW, a wind power plant with a capacity of 15 kW, a battery system based on lithium-iron-phosphate batteries with a capacity of over 50 kWh, as well as a backup diesel power plant with a capacity of 11 kW. The choice of modern power and conversion equipment, inverters, control and protection systems that ensure stable parameters of electricity quality and uninterrupted operation of consumers was substantiated.

In the feasibility study section, the proposed system was implemented. An assessment of capital and operating costs was carried out, the economic effect of reducing electricity consumption from the centralized network and using a "green" tariff was determined. It was shown that, subject to partial grant support for educational and scientific projects, the payback period of the system is economically acceptable, and the implementation of a comprehensive energy supply system provides a significant increase in the energy independence of the facility.

The results of the work performed have practical value and can be used in the design and modernization of power supply systems for educational buildings, laboratories and production workshops, as well as in the educational process for training specialists in the field of electric power and renewable energy sources.

Keywords: renewable energy sources; autonomous power supply; optimization; solar power plant; wind power plant; battery system; energy balance; Sumy region; mathematical modeling; energy efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	12
1. СУЧАСНА ЕНЕРГЕТИКА РЕГІОНУ СУМЩИНИ.....	15
1.1. Оптимізація процесів виробництва та споживання енергії на регіональному рівні.....	15
1.2. Методи рішення проблем балансування та інтеграції за допомогою інтелектуальних мережевих технологій.....	16
1.2.1. Методи короткострокової та довгострокової оптимізації створення моделей енергопостачання.....	17
1.3. Енергетичний баланс та умови оптимальних режимів енергосистеми.....	18
1.4. Формування математичної моделі оптимального електроспоживання.....	21
1.5. Алгоритм рішення поставленого завдання.....	22
2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА СТРУКТУРИ КОМПЛЕКСНОЇ ФОТОВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ НАВЧАЛЬНО-ВИРОБНИЧОГО ПРИМІЩЕННЯ.....	32
2.1. Загальні положення про системи із використанням технологій відновлюваної енергетики.....	32
2.2. Обґрунтування та вибір структури системи.....	32
2.3. Визначення електричних навантажень навчально-виробничого корпусу.....	34
2.4. Оптимізація та алгоритм роботи системи.....	34
3. ПІДБІР ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНІЧНІ РОЗРАХУНКИ ДЛЯ СЕС І ВЕС ПРИМІЩЕННЯ	36
3.1. Вихідні дані та технічні вимоги.....	36
3.2. Загальна концепція конфігурації системи.....	36
3.3. Вибір фотоелектричних модулів (СЕС).....	37
3.4. Розрахунок очікуваної генерації СЕС.....	38
3.5. Розрахунок та вибір вітроелектричної установки.....	38
3.6. Оцінка виходу енергії від ВЕС.....	41
3.7. Сумарний потенціал генерації.....	41
3.8. Підбір інвертора та МРРТ.....	42
3.9. Підбір акумуляторної системи (LiFePO) – рекомендації і розрахунок.....	42
3.10. Кабелі, захист, щити – базові розрахунки.....	43
3.11. Обладнання для комплексної електросистеми.....	44
3.12. Принципи монтажу та експлуатації.....	46
4. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ.....	47
4.1. Загальні положення щодо проектування комплексних	

	відновлюваних систем.....	47
4.2.	Структура комплексної системи енергопостачання.....	48
4.3.	Розрахунок сонячної електростанції 30 кВт.....	48
4.3.1.	Вибір типу сонячних панелей.....	48
4.4.	Розрахунок вітрової установки 15 кВт.....	49
4.4.1.	Вибір типу ВЕС.....	49
4.4.2.	Розрахунок середньорічної генерації.....	49
4.5.	Розрахунок акумуляторної системи.....	50
4.6.	Розрахунок резервної ДЕС.....	52
5.	ВИБІР АКБ, ІНВЕРТОРІВ ТА КОНТРОЛЕРІВ ЗАРЯДУ АКБ.....	53
5.1.	Вибір проміжного накопичувача енергії (АКБ).....	53
5.1.1.	Загальний аналіз типів АКБ для систем ВДЕ.....	53
5.1.2.	Порівняння технологій АКБ.....	54
5.1.3.	Розрахунок необхідної енергоємності АКБ.....	54
5.1.4.	Вибір типу АКБ.....	55
5.2.	Вибір мережевого/гібридного інвертора.....	55
5.3.	Вибір контролера заряду АКБ від ВЕС.....	56
5.4.	Вибір контролерів та інверторів для СЕС.....	56
6.	РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ, ПРИНЦИПОВОЇ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	57
6.1.	Загальні положення.....	57
6.2.	Структурна схема керованого випрямляча.....	57
6.3.	Функціональна схема комплексної енергосистеми КСАЕП	58
6.4.	Розробка принципової електричної схеми комплексної системи.....	60
6.4.1.	Алгоритм роботи.....	61
7.	ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ФОТО-ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПРИМІЩЕННЯ	63
7.1.	Технічне обґрунтування вибору складових комплексної системи.....	63
7.2.	Економічне обґрунтування впровадження комплексної системи.....	64
7.2.1.	Капітальні вкладення.....	64
7.2.2.	Вартість з урахуванням грантової підтримки.....	65
7.2.3.	Річний виробіток електроенергії.....	65
7.2.4.	Доходи за «зеленим тарифом».....	66
7.2.5.	Економія електроенергії навчальним закладом.....	66
7.2.6.	Загальний економічний ефект.....	66
7.3.	Окупність проекту.....	66
7.4.	Перспективний економічний ефект майстерень.....	66
8.	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	68

8.1.	Загальні положення.....	68
8.2.	Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів.....	68
8.3.	Вимоги безпеки під час монтажу та експлуатації сонячних панелей.....	69
8.4.	Вимоги безпеки при експлуатації вітроустановки.....	70
8.5.	Вимоги безпеки при експлуатації дизельної електростанції	72
8.6.	Організаційні заходи безпеки.....	73
8.7.	Пожежна безпека.....	73
8.8.	Охорона праці здобувачів і технічного персоналу.....	74
8.9.	Екологічна безпека.....	74
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	78
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	80
	ДОДАТКИ.....	83

ВСТУП

1. Актуальність теми. Актуальність теми кваліфікаційної роботи зумовлена необхідністю підвищення надійності, енергоефективності та енергонезалежності систем електропостачання в умовах зростання вартості традиційних енергоресурсів і розвитку поновлюваної енергетики. Для автономних та навчально-виробничих об'єктів особливо важливим є забезпечення безперервного електропостачання з мінімальною залежністю від централізованих мереж. Використання комплексних систем енергопостачання на основі сонячної та вітрової енергії з акумуляторними системами накопичення та резервними джерелами генерації дозволяє оптимізувати енергетичний баланс, знизити експлуатаційні витрати та підвищити надійність електропостачання. Водночас змінний характер відновлюваних джерел потребує науково обґрунтованого підходу до вибору структури системи та співвідношення встановлених потужностей. Особливої актуальності набуває оптимізація таких систем з урахуванням регіональних природно-кліматичних умов Сумського регіону, режимів електроспоживання та економічної доцільності впровадження. Застосування математичного моделювання та оптимізаційних методів дає змогу підвищити техніко-економічну ефективність комплексних автономних енергосистем та забезпечити їх практичну придатність для використання в освітніх і виробничих об'єктах [2].

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми. Проблематика використання поновлюваних джерел енергії в автономних та гібридних системах електропостачання достатньо широко висвітлена у працях вітчизняних і зарубіжних науковців. У наукових дослідженнях розглянуто питання підвищення енергоефективності, зменшення втрат електроенергії, забезпечення надійності електропостачання та зниження негативного впливу на довкілля за рахунок використання сонячної та вітрової енергії.

Значна кількість робіт присвячена моделюванню процесів генерації електроенергії фотоелектричними та вітроенергетичними установками з урахуванням кліматичних і метеорологічних факторів. Досліджуються методи

прогнозування інсоляції, швидкості вітру, а також алгоритми керування режимами роботи автономних енергосистем із застосуванням систем накопичення енергії. Окрему увагу приділено оптимізації встановлених потужностей джерел генерації та вибору параметрів акумуляторних батарей.

Разом з тим, аналіз наукових публікацій свідчить, що більшість досліджень орієнтована або на окремі види поновлюваних джерел енергії, або на умовно усереднені кліматичні дані, без детального врахування регіональних особливостей електроспоживання. Недостатньо опрацьованими залишаються питання комплексної оптимізації фото-вітроелектричних систем з резервними джерелами генерації для конкретних автономних об'єктів освітнього та виробничого призначення.

Таким чином, існує потреба в подальших дослідженнях, спрямованих на розробку та оптимізацію комплексних автономних систем енергопостачання з використанням поновлюваних джерел енергії, з урахуванням регіональних природно-кліматичних умов, реальних графіків навантаження та техніко-економічних показників, що й обґрунтовує вибір теми даної кваліфікаційної роботи.

3. Мета дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є розробка та оптимізація структури комплексної автономної системи електропостачання з використанням поновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної та вітрової енергії, у поєднанні з акумуляторною системою накопичення та резервним джерелом генерації, з урахуванням регіональних природно-кліматичних умов, режимів електроспоживання та вимог до надійності й якості електропостачання автономного об'єкта.

4. Об'єкт дослідження – система електропостачання автономного об'єкта з використанням поновлюваних джерел енергії.

5. Предмет дослідження – процеси генерації, накопичення, перетворення, розподілу та оптимізації електричної енергії в комплексних автономних системах електропостачання на основі сонячної та вітрової енергії з резервними джерелами живлення.

6. Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан і перспективи розвитку автономних систем електропостачання з використанням поновлюваних джерел енергії;
- оцінити потенціал сонячної та вітрової енергії з урахуванням природно-кліматичних умов Сумського регіону;
- дослідити електричні навантаження об'єкта та сформувати графіки електроспоживання;
- обґрунтувати структуру та алгоритм роботи комплексної фото-вітроелектричної системи з накопиченням енергії та резервним джерелом;
- виконати технічні розрахунки, вибір основного обладнання та розробити електричні схеми системи;
- провести техніко-економічне обґрунтування впровадження запропонованої системи.

7. Методи дослідження. У роботі застосовано комплекс методів, що включає аналіз літературних джерел для оцінки сучасного стану автономних систем електропостачання з використанням поновлюваних джерел, математичне моделювання процесів генерації та споживання електроенергії з урахуванням кліматичних даних і графіків навантажень, оптимізаційний аналіз для визначення раціонального співвідношення потужностей джерел енергії, технічні розрахунки основного обладнання (сонячних і вітрових установок, акумуляторів, інверторів), техніко-економічне обґрунтування впровадження системи та розробка функціональних, структурних і принципівих схем комплексної енергосистеми.

8. Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 82 сторінки машинописного тексту, містить 10 рисунків, 7 таблиць, додатки та 38 найменувань джерел у списку літератури.

1. СУЧАСНА ЕНЕРГЕТИКА РЕГІОНУ СУМЩИНИ

1.1. Оптимізація процесів виробництва та споживання енергії на регіональному рівні

У сучасних умовах енергетичного переходу України особливу роль відіграє оптимізація процесів виробництва та споживання енергії на регіональному рівні.

Сумська область має високий потенціал для розвитку альтернативної енергетики завдяки сприятливим кліматичним умовам, наявності вільних територій і активній участі громад у програмах енергоефективності.

Станом на 2025 рік загальна встановлена потужність сонячних електростанцій у Сумській області перевищує 45 МВт, включаючи як промислові, так і приватні СЕС [3].

Крім того, на річках Псел, Сейм і Ворскла функціонують малі гідроелектростанції загальною потужністю близько 3,5 МВт. У Шосткинському та Охтирському районах розглядаються проекти будівництва вітрових установок потужністю до 5 МВт.

В області активно реалізуються пілотні проекти з використання теплових насосів, геліосистем і сонячних панелей у навчальних та муніципальних закладах.

Ці ініціативи підтримуються міжнародними програмами USAID, UNDP та ЄС, а також реалізуються в межах державної програми «Енергоефективність у громадах II» (2023–2027) та національної стратегії «Енергетична незалежність 2030».

Одним із найважливіших напрямів є впровадження інтелектуальних енергомереж (Smart Grid), які дають змогу ефективно інтегрувати сонячні, вітрові та гідроресурси, а також системи накопичення енергії.

Оптимізація роботи таких мереж здійснюється на основі моделювання процесів енергорозподілу, динамічного програмування та алгоритмів

машинного навчання, що дозволяє знизити енергетичні втрати й підвищити стабільність електропостачання [4].

У закладах освіти, зокрема в Сумському національному аграрному університеті, впровадження Smart Grid-систем створює умови для підвищення енергетичної незалежності, формування практичних навичок у здобувачів та підвищення науково-технічного потенціалу університету.

Таким чином, розвиток відновлюваної енергетики в Сумському регіоні є не лише кроком до зменшення споживання традиційних ресурсів, а й важливою частиною стратегії сталого розвитку України [5].

1.2. Методи рішення проблем балансування та інтеграції за допомогою інтелектуальних мережевих технологій

В наш час, особливо в епоху "розумних мереж" (Smart Grid), питання про оптимальне управління виробництвом та споживанням електроенергії в сучасних розподільчих системах стає вкрай актуальним. Беручи до уваги високу частку використання відновлюваних джерел енергії, що може призвести до серйозних проблем з балансуванням системи, інтеграція цих джерел енергії за допомогою інтелектуальних технологій у мережу (Smart Grid) є найбільш перспективним методом для підвищення стійкості та надійності роботи енергосистеми. Цей підхід вважається оптимальним з погляду економічних витрат, так як ініціативи, такі як "Зелений тариф", використовують розумні та вбудовані системи для створення сучасних енергетичних послуг у віддалених прибережних, острівних та гірських районах, а також у сільських та периферійних місцевостях [6].

Дослідження, спрямовані на оптимізацію роботи енергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії, а також оцінку техніко-економічних аспектів забезпечення ізольованих споживачів, включають великий аналіз. У цих роботах обґрунтовується ефективність приєднання до централізованих енергосистем, або розглядається можливість використання місцевих малих джерел енергії.

1.2.1. Методи короткострокової та довгострокової оптимізації створення моделей енергопостачання

Деякі дослідники пропонують створення моделі, використовуючи математичне моделювання, щоб проаналізувати технічні та економічні аспекти використання відновлюваних джерел енергії. Головна мета - це вирішення проблеми забезпечення безперервного енергопостачання. Розглядається теорія доповнення гідро - та сонячної енергії, яка дозволить вирішувати деякі проблеми непостійної генерації сонячної енергії. Через мінливість вітрових умов вчені об'єднали гідроакумуючі електростанції з вітровими електростанціями для досягнення оптимального взаємодоповнюючого режиму роботи та максимізації прибутку.

Для автономних енергетичних систем необхідно розробити моделі оптимізації управління децентралізованою генерацією, включаючи відновлювані джерела енергії. Ці моделі дозволять оптимізувати різні параметри мережі. На прикладі наукових робіт, які присвячені різноманітним методам, що оптимізують режими роботи електроенергетичних систем та мереж [7]. Пропонується ефективний спосіб визначення оптимальних розмірів для парків відновлюваної енергії та пристроїв зберігання енергії у гібридній енергосистемі. Для пошуку оптимальних рішень застосовується генетичний алгоритм, який враховує як параметри відновлюваних джерел енергії, і пристрої зберігання енергії. Загалом процес оптимізації можна класифікувати як одноцільовий або багатоцільовий метод. Пропонується метод оптимізації розмірів парків відновлюваної енергії та економічний аналіз, призначений для забезпечення зарядки до 25 000 електромобілів від мережі. Однак у роботі не проводиться аналіз процесу, що обмежує вплив флуктуацій потужності поновлюваних джерел енергії на комунальну мережу [8]. У роботі представлений метод, заснований на аналізі економічних витрат і вигод, спрямований на визначення оптимального розміру системи зберігання енергії в малих гідроелектростанціях, але в роботі не уточнено відповідних параметрів для розміру системи відновлюваних джерел енергії. Крім того, в рамках

розглянутої системи накопичення енергії враховано лише акумулятори, що може виявитися неспроможним в умовах високих коливань потужності.

Необхідно зауважити, що більшість попередніх досліджень у цій галузі зосереджено на аналізі короткострокової експлуатації енергосистем, переважно у випадках, коли вимоги до якості виробництва електроенергії здаються не дуже важливими. Дослідження націлено на вивчення довгострокової оптимізаційної моделі для гібридних гідро/фотоелектричних систем з урахуванням стабільності вихідної потужності та загальної генерації електроенергії. Дану модель оптимізували з використанням модифікованої версії генетичного алгоритму Non-dominated Sorting Genetic Algorithm. Для поліпшення додаткових експлуатаційних характеристик великомасштабної гібридної гідроелектростанції були розроблені методи довгострокової стохастичної оптимізації, що враховують невизначеність як потоку, так і вихідної потужності фотоелектричної установки. Створено багатоцільову оптимізаційну модель, спрямовану на максимізацію загального виробництва енергії. Далі модель була вирішена з використанням стохастичного динамічного програмування для отримання операційних рішень. Основна увага в даному дослідженні приділялася довгостроковій взаємодоповнюючій роботі гібридних електростанцій, що поєднують гідроелектростанції та фотоелектричні установки, з урахуванням невизначеності як у потоці води, так і потужності сонячної енергії.

1.3. Енергетичний баланс та умови оптимальних режимів енергосистеми

Для аналізу потенціалу енергетичних систем різних регіонів Сумщини стоїть необхідність розгляду можливостей щодо використання альтернативних джерел енергії у різні періоди доби. Зазначимо, що характер роботи даної системи істотно різний у зимовий та літній періоди: у зимовий час вона стикається з дефіцитом енергії, а влітку, навпаки, має надлишок. З огляду на це для зимового та літнього часу були обрані по одному найбільш типовому

дню. Для оптимізації режимів споживання електроенергії використовувалися статистичні дані про швидкість вітру, сонячну інсоляцію, виробництво енергії на основі водних ресурсів, а також добові графіки навантаження, характерні для вибраних днів [8]. Це дозволяє оцінити можливості забезпечення електроенергією добового графіка за рахунок виробництва гідроелектростанції (ГЕС).

Ефективність роботи вітроенергетичної установки [16] визначається швидкістю вітряного потоку, схильного до значних тимчасових змін, а також впливом погодних умов та особливостей місцевості. Залежність між потужністю і швидкістю вітру, що проникає через площу вітроустановки, що омітається, описується наступним математичним виразом:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 W_p (\mu), \quad (1.1)$$

тут P (кВт) – є площею повітряного потоку. Площа повітряного потоку є залежною від тиску та температури повітря; A (м^2) - є площею поверхні, що омітається лопатями; V (м/с) – є швидкість вітру; W_p – (безрозмірна величина) – коефіцієнт ефективності вітроустановки; μ - коефіцієнт швидкохідності. Для цієї енергосистеми обрано загальну потужність всіх встановлених вітрогенераторів, 5 МВт, що досягається через 3 запроектовані вітроустановки з потужністю кожна приблизно 2 МВт. Згідно з паспортними даними, початок генерації електроенергії відбувається за швидкості вітру 4 м/с. Коли швидкість сягає 15 м/с, то вітроустановки генерують номінальну потужність [10]. Інтервал швидкості вітру від 15 до 50 м/с підтримує номінальну потужність вітроустановок. На рисунку 1.1 представлені дані про швидкість вітру та сонячну інсоляцію для одного зимового дня в даному регіоні Сумщини.

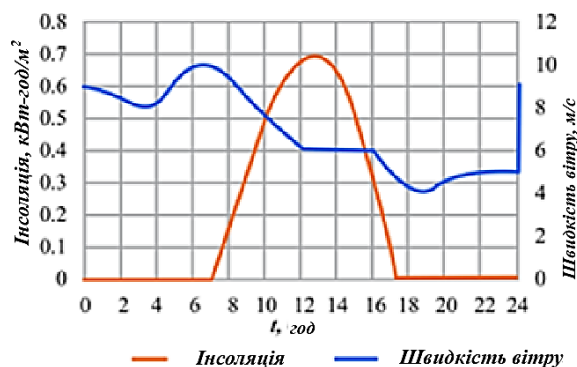


Рисунок 1.1 - Швидкість вітру та сонячна інсоляція у типовий зимовий день

Графік показує, що найвищі швидкості вітру приблизно збігаються з піковими значеннями ранкового електричного навантаження. При цьому створюються найсприятливіші умовні фактори щодо використання вітрової енергії вранці. Найбільша кількість сонячної енергії припадає на період з 8 до 18 години, що приблизно збігається з часом роботи електричного навантаження у звичайний робочий день [10]. Загальна потужність усіх сонячних батарей становить 45 МВт, коефіцієнт корисної дії дорівнює 154,89%.

Виходячи з даних, представлених на рисунку 1.2, враховується виробництво електроенергії гідроелектростанціями та добовий графік навантаження, потужність вітряним парком, а також вироблення енергії сонячними батареями в типовий зимовий день. На початок доби ємність акумулятора становить 15000 кВт. Її розподіл чи збереження оптимізується відповідно до алгоритму оптимізації з метою зменшення фінансових витрат електроспоживачів.

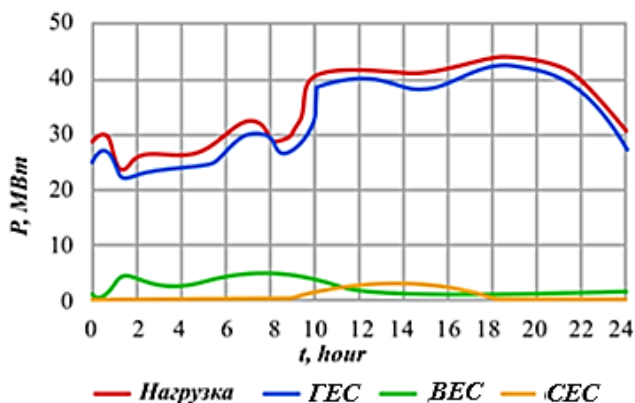


Рисунок 1.2 - Початкові дані енергетичного балансу (типовий зимовий день)

1.4. Формування математичної моделі оптимального електроспоживання

Основна мета роботи полягає у пропозиції оптимального з'єднання 6 потенціалів великої та малої гідроенергетики, а також вітрових та фотоелектричних систем у формі гібридної системи з метою підвищення надійності та зменшення інвестиційних затрат.

Розглянемо приклад оптимізації структури генерації енергії в окремій системі електропостачання для зменшення витрат на виробництво електроенергії. Така система має рівняння балансу потужності:

$$P_{HPP} + P_{WPP} + P_{SPP} \pm P_{ES} = P_{EL} + \Delta P \quad (1.2)$$

Тут P_{HPP} , P_{WPP} , P_{SPP} - потужність гідро-, вітро- та сонячних електростанцій, відповідно; P_{ES} - потужність накопичувачів ЕЕ; P_{EL} - потужність, що споживається навантажувальними вузлами; ΔP - загальні втрати ЕЕ. Запишемо рівняння балансу потужності в інтегральному вигляді:

$$\int_0^{24} P_{HPP}(t) \Delta t + \int_0^{24} P_{WPP}(t) \Delta t + \int_0^{24} P_{SPP}(t) \Delta t \pm \int_0^{24} P_{ES}(t) \Delta t = \int_0^{24} P_{EL}(t) \Delta t + \int_0^{24} \Delta P(t) \Delta t, \quad (1.3)$$

Фінансові витрати окремого виробника електроенергії можуть бути знижено за рахунок мінімізації цільової функції, за умови, що погодинні вимірювання потужності та енергії збігаються чисельно.

$$\sum_{i=0}^{24} T_i P_{HPP} + \sum_{i=0}^{24} T_i P_{WPP} + \sum_{i=0}^{24} T_i P_{SPP} \pm \sum_{i=0}^{24} T_i P_{ES} = \sum_{i=0}^{24} T_i P_{EL} + \sum_{i=0}^{24} T_i \Delta P, \quad (1.4)$$

Тут T_i - кількість електроенергії, споживане або вироблене певним джерелом енергії за кожен годину часу. З огляду на доцільність мінімізації фінансових витрат кожного окремого споживача електроенергії, необхідно переписати вираз (4), враховуючи індивідуальну вартість кожного конкретного источника энергии (альтернативного або поновлюваного).

$$\left(S_{HPP} \cdot \sum_{i=0}^{24} T_i P_{HPP} + S_{WPP} \cdot \sum_{i=0}^{24} T_i P_{WPP} + S_{SPP} \cdot \sum_{i=0}^{24} T_i P_{SPP} \pm S_{ES} \cdot \sum_{i=0}^{24} T_i P_{ES} \right) \rightarrow \min, \quad (1.5)$$

тут величини ϵ : $HPP S$, $WPP S$, $SPP S$ - вартістю електроенергії, яка виробляється на ГЕС, ВЕС та СЕС; $ES S$ - вартістю електроенергії, яка акумулюється на накопичувачах енергії. Якщо ϵ надлишок енергії рівняння можна переписати для максимізації доходів.

$$\left(k \cdot S_{HPP} \cdot \sum_{i=0}^{24} I_i P_{HPP} + k \cdot S_{WPP} \cdot \sum_{i=0}^{24} I_i P_{WPP} + k \cdot S_{SPP} \cdot \sum_{i=0}^{24} I_i P_{SPP} \pm k \cdot S_{SE} \cdot \sum_{i=0}^{24} I_i P_{SE} \right) \rightarrow \max, \quad (1.6)$$

Тут величини ϵ : I_i надлишком електроенергії в i -у годину для окремого джерела енергії; k – коефіцієнтом прибутковості, одержуваним від продажу електроенергії.

Крім того, з урахуванням балансу потужності в години пікового добового навантаження, були обрані накопичувачі енергії для врахування непередбачуваності генерації "зеленої енергії". Тому, наведені рівняння вирішуються при обмеженні у формі наступних нерівностей:

$$12,5 \leq P_{HPP} \leq 44,0 \text{ MBm}; \quad 0 \leq P_{WPP} \leq 10,5 \text{ MBm}; \\ 0 \leq P_{SPP} \leq 6,5 \text{ MBm}; \quad 0 \leq P_{ES} \leq 5,5 \text{ MBm}.$$

Гідроелектростанція має обмеження потужності від 12 до 43,5 МВт, викликане досягненням мінімального рівня водосховища, при якому воно перестав забезпечувати електростанцію водою. Також можливість передачі електроенергії у сусідні області може розглядатися як додатковий споживач електроенергії.

Важливо, що у цій системі баланс потужності та енергії також може бути врегульований шляхом обмеження передачі потужності сусідам. Однак слід врахувати, що доки вони не можуть виступати джерелом вироблення енергії.

1.5. Алгоритм рішення поставленого завдання

При вирішенні оптимізаційних завдань у технічні системи необхідно вибрати математичний метод, який дозволить отримати остаточні результати з найменшими витратами на обчислення або призведе до максимального обсягу нової інформації про найкраще рішення. Вибір методу зазвичай залежить від постановки завдання з метою оптимізації та математичної моделі.

Відомими методами є такі методи, як дослідження функцій на основі класичного аналізу, метод невизначених множників Лагранжа, варіаційне обчислення, динамічне програмування, лінійне програмування, програмування, градієнтні методи, та генетичні алгоритми.

Дана робота для оптимізації використовує метод лінійного програмування. Задачі лінійного програмування знаходять умовний екстремум функції при встановлених обмеженнях, причому екстремум цільової функції досягається на межі області допустимих рішень. Загалом, завдання лінійного програмування полягає в тому, щоб знайти такий набір значень змінних, який забезпечить екстремум лінійної функції при певних обмеженнях, виражених у вигляді рівностей та нерівностей.

У цій роботі було розроблено алгоритм для оптимального планування вибору складу генеруючих джерел на добовому часовому інтервалі. Цей алгоритм заснований на методі лінійного програмування та враховує певні умови, подані у вигляді правил, які є причинно-наслідковими зв'язками, що мають вигляд «IF, THEN, ...». Умови формулюються як рівності та нерівності.

Для гідроелектростанції (ГЕС) правило продукту має вигляд:

$$\text{IF } (P_{HPP} < P_{EL}) \text{ THEN } TP_{HPP} = P_{HPP} \text{ AND } OP_{HPP} = 0$$

$$\text{OTHERWISE } TP_{HPP} = P_{EL} \text{ и } OP_{HPP} = P_{HPP} - P_{EL}$$

Рисунок 1.3 демонструє алгоритм розв'язання задачі для цих правил.

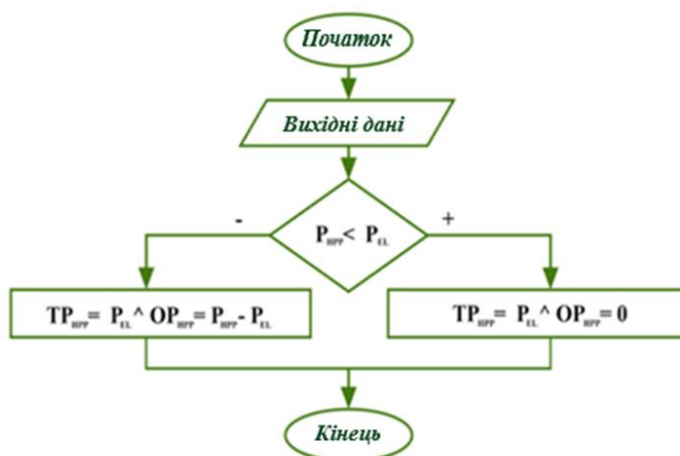


Рисунок 1.3 – Блок-схема процесу споживання електроенергії, що отримується від гідроелектростанції

Для вітрової електростанції (ВЕС) правило продукту має вигляд:

$$\begin{aligned} & \text{IF}(TP_{HPP} < P_{EL}) \text{ THEN IF}(P_{WPP} > 0) \text{ THEN IF}(TP_{HPP} + P_{HPP} > P_{EL}) \\ & \text{THEN } TP_{WPP} = P_{EL} - RP_{HPP} \text{ AND } OP_{WPP} = P_{WPP} - TP_{WPP} \\ & \text{OTHERWISE } TP_{WPP} = P_{WPP} \text{ AND } OP_{WPP} = 0 \text{ OTHERWISE } TP_{WPP} = 0 \text{ AND } OP_{WPP} = 0 \\ & \text{OTHERWISE } TP_{WPP} = 0 \text{ AND } OP_{WPP} = P_{WPP} \end{aligned}$$

Рисунок 1.4 демонструє алгоритм розв'язання задачі для цих правил.

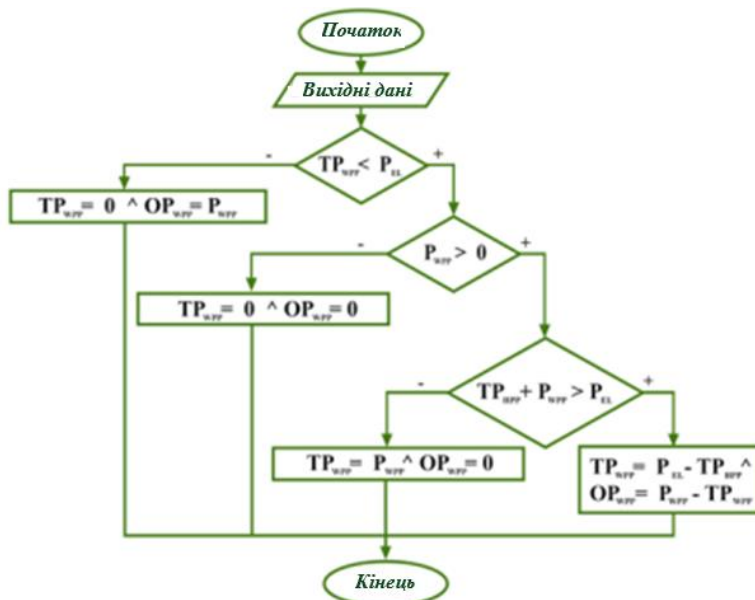


Рисунок 1.4 - Блок-схема процесу споживання електроенергії, що отримується від вітряної електростанції

Для сонячної електричної станції (СЕС) правило продукції має вигляд:

$$\begin{aligned} & \text{IF}(TP_{HPP} + TP_{WPP} < P_{EL}) \text{ THEN IF}(P_{SPP} > 0) \text{ THEN IF}(TP_{HPP} + TP_{WPP} + P_{SPP} > P_{EL}) \\ & \text{THEN } TP_{SPP} = P_{EL} - (TP_{HPP} + TP_{WPP}) \text{ AND } OP_{SPP} = P_{SPP} - TP_{SPP} \\ & \text{OTHERWISE } TP_{SPP} = P_{SPP} \text{ AND } OP_{SPP} = 0 \text{ OTHERWISE } TP_{SPP} = 0 \text{ AND } OP_{SPP} = 0 \\ & \text{OTHERWISE } TP_{SPP} = 0 \text{ AND } OP_{SPP} = P_{SPP} \end{aligned}$$

Рисунок 1.5 демонструє алгоритм розв'язання задачі щодо цих правил.

Для накопичувача енергії (НЕ) правило продукції має вигляд:

$$\begin{aligned} & \text{IF}(TP_{HPP} + TP_{WPP} + TP_{SPP} < P_{EL}) \text{ THEN IF}(P_{ES} > 0) \text{ THEN} \\ & \text{IF}(TP_{HPP} + TP_{WPP} + TP_{SPP} + P_{ES} > P_{EL}) \text{ THEN} \\ & TP_{ES} = P_{EL} - (TP_{HPP} + TP_{WPP} + TP_{SPP}) \text{ AND } OP_{ES} = P_{ES} - TP_{ES} \\ & \text{OTHERWISE } TP_{ES} = P_{ES} \text{ AND } OP_{ES} = 0 \text{ OTHERWISE } T \\ & \text{OTHERWISE } TP_{ES} = 0 \text{ AND } OP_{ES} = P_{ES} \end{aligned}$$

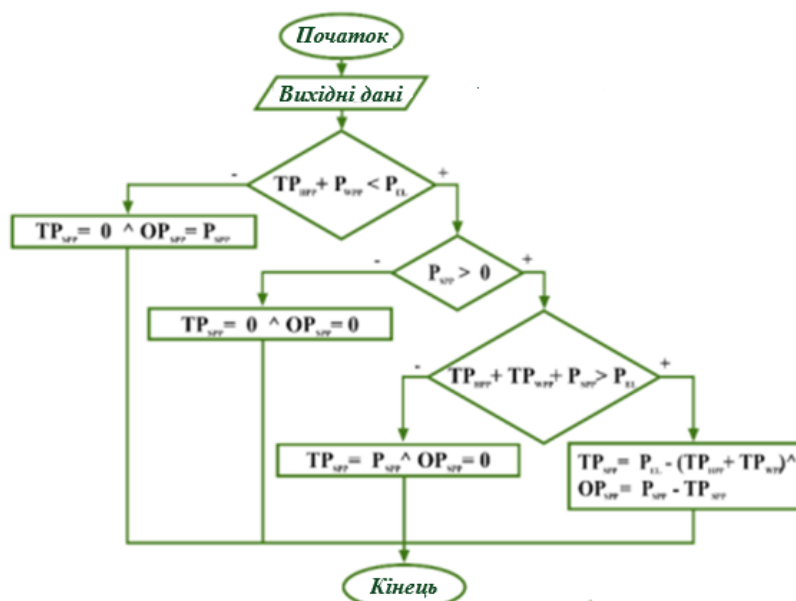


Рисунок 1.5 – Блок-схема процесу споживання електроенергії, що отримується від сонячної електричної станції

Рисунок 1.6 демонструє алгоритм розв'язання задачі для цих правил.

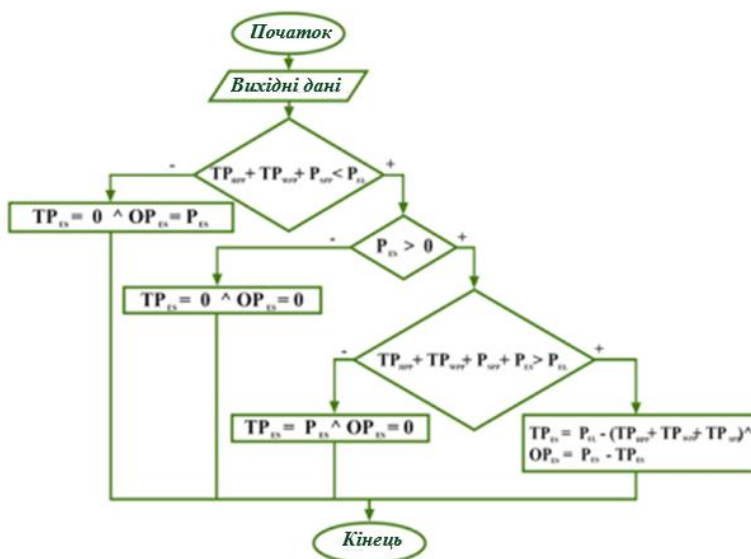


Рисунок 1.6 – Блок-схема процесу споживання електроенергії, що отримується від накопичувача енергії

Для накопичувача електроенергії розробляються індивідуальні правила для зарядки з різних альтернативних джерел, враховуючи обмеження у вигляді умов рівності та нерівностей. При цьому встановлено наступні переваги у накопиченні енергії: в першу чергу енергія накопичується від

гідроелектростанцій, потім від повітряних електростанцій та, нарешті, від сонячних електростанцій.

Алгоритм заряджання накопичувача енергії (НЕ) за допомогою енергії, що виробляється ГЕС:

```

IF (ESPES - PES > 0) THEN IF (ESPES - PES ≥ NPES) THEN
  IF (OPHPP ≥ NPES) THEN TPHPP1 = NPES AND OPHPP = OPHPP - NPES AND TPHPP = TPHPP + TPHPP1
  OTHERWISE TPHPP1 = OPHPP AND OPHPP = OPHPP - TPHPP1 AND TPHPP = TPHPP + TPHPP1
  OTHERWISE IF OPHPP ≥ (ESPES - PES) THEN
    TPHPP1 = ESPES - PES AND OPHPP = OPHPP - (ESPES - PES) AND TPHPP = TPHPP + TPHPP1
    OTHERWISE TPHPP1 = OPHPP AND OPHPP = OPHPP - TPHPP1 AND TPHPP = TPHPP + TPHPP1
    OTHERWISE TPHPP1 = 0 AND OPHPP = OPHPP - TPHPP1 AND TPHPP = TPHPP + TPHPP1

```

Алгоритм заряджання накопичувача енергії з допомогою енергії, що виробляється ВЕС:

```

IF (ESPES - PES - TPHPP1 > 0) THEN IF (TPHPP1 < NPES) THEN
  IF (ESPES - PES - TPHPP1 > NPES) THEN IF (OPWPP > NPES - TPHPP1) THEN
    TPWPP1 = NPES - TPHPP1 AND OPWPP = OPWPP - TPWPP1 AND TPWPP = TPWPP + TPWPP1
    OTHERWISE TPWPP1 = OPWPP AND OPWPP = OPWPP - TPWPP1 AND TPWPP = TPWPP + TPWPP1
    OTHERWISE IF OPWPP ≥ (ESPES - PES) THEN
      TPWPP1 = ESPES - PES - TPHPP1 AND OPWPP = OPWPP - TPWPP1 AND TPWPP = TPWPP + TPWPP1
      OTHERWISE TPWPP1 = OPWPP AND OPWPP = OPWPP - TPWPP1 AND TPWPP = TPWPP + TPWPP1
      OTHERWISE TPWPP1 = 0 AND OPWPP = OPWPP - TPWPP1 AND TPWPP = TPWPP + TPWPP1
      OTHERWISE TPWPP1 = 0 AND OPWPP = OPWPP - TPWPP1 AND TPWPP = TPWPP + TPWPP1

```

Алгоритм заряджання накопичувача енергії за допомогою енергії, що виробляється СЕС:

```

IF (ESPES - PES - TPHPP1 - TPWPP1 > 0) THEN IF (TPHPP1 + TPWPP1 < NPES) THEN
  IF (ESPES - PES - TPHPP1 - TPWPP1 > NPES) THEN IF (OPSPP > NPES - TPHPP1 - TPWPP1) THEN
    TPSPP1 = NPES - TPHPP1 - TPWPP1 AND OPSPP = OPSPP - TPSPP1 AND TPSPP = TPSPP + TPSPP1
    OTHERWISE TPSPP1 = OPSPP AND OPSPP = OPSPP - TPSPP1 AND TPSPP = TPSPP + TPSPP1
    OTHERWISE IF OPSPP ≥ (ESPES - PES) THEN
      TPSPP1 = ESPES - PES - TPHPP1 - TPWPP1 AND OPSPP = OPSPP - TPSPP1 AND TPSPP = TPSPP + TPSPP1
      OTHERWISE TPSPP1 = OPSPP AND OPSPP = OPSPP - TPSPP1 AND TPSPP = TPSPP + TPSPP1
      OTHERWISE TPSPP1 = 0 AND OPSPP = OPSPP - TPSPP1 AND TPSPP = TPSPP + TPSPP1
      OTHERWISE TPSPP1 = 0 AND OPSPP = OPSPP - TPSPP1 AND TPSPP = TPSPP + TPSPP1

```

Рівняння, що описують процеси накопичення та витрати енергії для накопичувача на наступну годину, представлені в наступній формі:

$$P_{ES}(+) = P_{ES} + TP_{HPP1} + TP_{WPP1} + TP_{SPP1} - TP_{ES} \quad (1.7)$$

Запропонована енергосистема ґрунтується на гідроелектростанціях, розташованих на малих річках, як основне джерело генерації енергії. Вона класифікується як відновлюване джерело енергії, додатково використовуючи вітряні та сонячні електростанції як альтернативні джерела. Для балансування навантаження використовуватиметься накопичувач енергії.

Висновок Запропонований алгоритм, заснований на правилах продукту, дозволяє проводити розрахунки для кожного дня протягом різних сезонів року. В даному випадку, результати оптимального електроспоживання для типового зимового дня представлені на рисунку 1.7 відповідно з виконаними розрахунками.

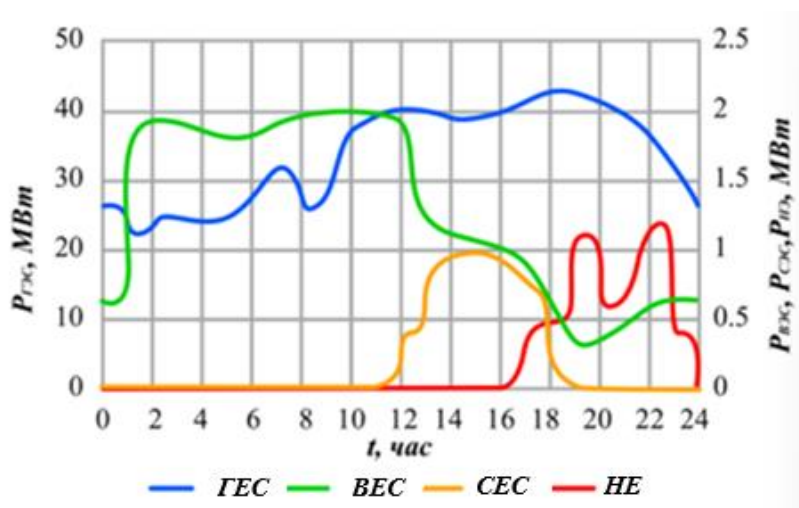


Рисунок 1.7 - Найкращий набір альтернативних джерел енергії та систем накопичення енергії

Алгоритм визначає оптимальний склад альтернативних джерел та накопичувачів енергії для мінімізації витрат на електроспоживання наступним чином:

1. Включення до базового навантаження генеруючого джерела з найменшою вартістю електроенергії. У зимовий період це гідроелектростанції, а влітку – сонячні електростанції.

2. Для покриття пікового навантаження використовується накопичувач енергії або альтернативні джерела енергії, якщо вони можуть забезпечити необхідну потужність.

Таким чином, алгоритм враховує сезонні особливості та обирає оптимальний склад джерел енергії для мінімізації витрат, щодо поточних потреб у електроенергії.

Дослідження виявило, що протягом більшої частини добового інтервалу відновлювані джерела енергії здатні покрити електроспоживання, за винятком періодів ранкового та вечірнього піків навантаження. У ці періоди виникає нестача активної потужності, що призводить до обмежень або тимчасовим відключенням електроспоживачів. Вирішення цієї проблеми передбачає встановлення накопичувача енергії, який зможе забезпечити додаткову генерацію збереженої електроенергії з 17 до 23 години. Висока швидкість вітрового потоку спостерігається в ранковий годинник з 6 до 12, це достатньо для ефективного накопичення енергії у накопичувачі. Щодо оптимального електроспоживання протягом доби, режим роботи енергонакопичувача від різних джерел генерації електроенергії представлений у таблиці 1

Таблиця 1.1 - Робота енергонакопичувача різних джерел генерації протягом доби

Робочий режим енергонакопичувальної системи			
Години, год	P_{HPP} , МВт	P_{wpp} , МВт	P_{SPP} , МВт
1	0	1.1	0
2	0	1.1	0
3	0	1.1	0
4	0	0.723	0
5	0	1.1	0
6	0	0.277	0
7	0		0
8	0		0
9	0	0	0
...
24	0	0	0

Важливо зберігати енергію в акумуляторах в основному в нічний час, так як це дозволяє підтримувати рівень розряду літій-іонних акумуляторів не нижче 20%, що сприяє продовження їх терміну служби. Для мінімізації фінансових витрат електроспоживачів на один зимовий день протягом доби, рекомендується наступне поєднання альтернативних джерел генерації та накопичувачів енергії (рисунок 1.8). Оптимальне керування електроспоживанням на кожній годині протягом доби дозволяє мінімізувати фінансові витрати на електроспоживання, як загалом для регіону, так і для кожного окремого споживача ЕЕ, особливо якщо він має власні джерела альтернативної генерації електроенергії. Такий підхід являє собою нову та інноваційну концепцію для розвитку регіону в найкоротші терміни.

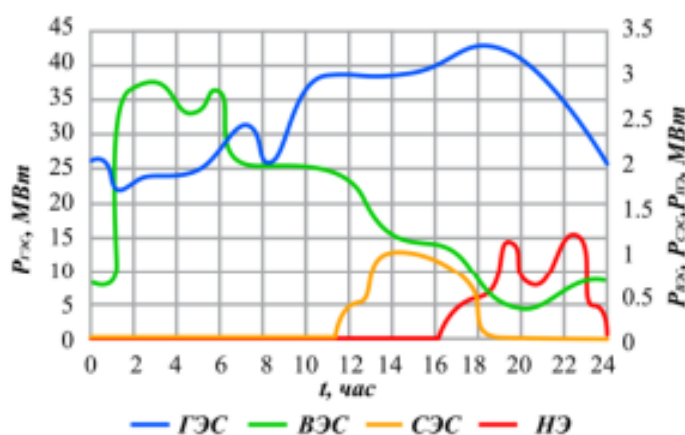


Рисунок 1.8 – Графік вибору джерел та накопичувачів електроенергії

Кількість електроенергії, що генерується від різних джерел може перевищувати поточний попит чи споживання електроенергії споживачами. Надлишковий запас електричної енергії представлений у таблиці 2.

В результаті проведеного дослідження було виявлено оптимальний спосіб комплексної роботи поновлюваних та альтернативних джерел енергії в рамках гібридної енергетичної системи. Цей метод спрямований на мінімізацію фінансових витрат та збільшення енергоефективності у процесі експлуатації.

Проведений аналіз режимів споживання ЕЕ окремих районів, міст Сумської області, віддалених від центральних електростанцій, виявив, що з ефективного управління споживання ЕЕ за сезонами (зимовий, весняний,

літній, осінній), рекомендується вибирати робочі дні з максимальним навантаженням.

Таблиця .12 - Надлишковий запас електроенергії різних джерел

Запас електроенергії з надлишком			
Години, год	$P_{НРР}$, МВт	P_{wpp} , МВт	P_{SPP} , МВт
1	0	0,851	0
2	0	0,33	0
3	0	0,04	0
4	0	0	0
5	0	0,474	0
6	0	1,938	0
7	0	3,049	0
8	0	2,24	0,092
9	0	1,353	0,958
10	0	0,623	1,959
11	0	0,024	2,689
12	0	0	2,759
13	0	0	2,32
14	0	0	2,099
15	0	0	1,581
16	0	0	0,842
...
24	0	0	0

Було виявлено, що основне навантаження в основному виникає в зимовий та літній період, але відмінного від зимового періоду, у літньому періоді навантаження споживачів може бути покрито за рахунок використання водних ресурсів, з можливістю експорту надлишкової ЕЕ до сусідніх областей. Взимку ситуація суттєво змінюється через необхідність опалення, підігріву води та збільшеного освітлення.

Запропонований алгоритм оптимізації режимів роботи ЕЕО на основі відновлюваних та альтернативних джерел енергії дозволяє звести до мінімуму фінансові витрати споживачів електроенергії віддалених районів Республіки. У них з'являється можливість самостійно вибирати джерело живлення з відновлюваних (енергія ГЕС) та альтернативних (енергія ВЕС та СЕС) джерел залежно від сезону та погодних умов. Ключову роль у балансуванні електромережі, що розглядається, відіграє наявність накопичувача електроенергії, що дозволяє звести до мінімуму можливі ризики, які можуть виникнути з різкою відмовою енергосистеми через їх непередбачуваність та умови невизначеності.

ВИСНОВОК: Підставою отриманих результатів є наступні висновки:

1. З точки зору оптимізації розподілу електроенергії велике значення має оцінка надійності гібридних систем генерації електроенергії з використанням ВДЕ, що відрізняються за структурою, системами управління, використовуваними перетворювачами та іншими параметрами. Дослідження проводилося з метою підвищення економічної стійкості інтегрованих систем, які використовують відновлювані джерела енергії. Це дуже важливо для успішної інтеграції різних відновлюваних джерел енергії у глобальні зусилля боротьби зі зміною клімату, щоб гарантувати доступність стійких та сучасних джерел енергії.

2. У аналізованій енергосистемі використовувалися малі гідроелектростанції, вітроелектростанції та сонячні електростанції, збалансовані накопичувачами енергії. Знайдено оптимальне співвідношення для зимового споживання, тоді як влітку гідроелектростанції повністю покривають електричне навантаження.

3. Запропонований алгоритм оптимізації енергоспоживання на основі лінійного програмування зі змінними обмеженнями дозволяє мінімізувати фінансові витрати генеруючих споживачів електроенергії. Ця гібридна енергосистема була реалізована та протестована в окремому регіоні Смської області. Представлені експериментальні результати демонструють можливість будь-якого споживача електроенергії самостійно оптимізувати свої витрати на отримання максимальної вигоди від обміну електроенергією.

У сучасних умовах енергетичного переходу України важливим завданням є оптимізація балансів потужності між генерацією з відновлюваних джерел та споживанням, особливо у регіонах із розвинутою аграрною інфраструктурою, таких як Сумщина. Застосування моделей оптимізації (лінійного, динамічного програмування, генетичних алгоритмів) дозволяє підвищити ефективність використання сонячних і гідроресурсів, мінімізувати втрати електроенергії та забезпечити стабільність Smart Grid-мереж.

2. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА СТРУКТУРИ КОМПЛЕКСНОЇ ФОТОВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ НАВЧАЛЬНО-ВИРОБНИЧОГО ПРИМІЩЕННЯ

2.1 Загальні положення про системи із використанням технологій відновлюваної енергетики

Сучасний розвиток енергетичної галузі вимагає впровадження ефективних рішень, що поєднують різні джерела енергії для забезпечення стабільного, надійного та екологічно безпечного електропостачання. Особливо актуальним це стає для навчально-виробничих об'єктів, де важливо не лише економічне споживання електроенергії, але й можливість використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у навчальних процесах [13].

Комплексні системи енергопостачання на базі сонячних та вітрових установок дозволяють мінімізувати залежність від централізованих мереж і створюють приклад *енергоавтономності закладу освіти*. Такі системи дають змогу забезпечити живлення основних споживачів корпусу ІТФ, включно з аудиторіями, лабораторіями, комп'ютерними класами та навчально-виробничими майстернями з ремонту сільськогосподарської та енергетичної техніки.

Головна перевага систем на базі ВДЕ полягає в *поєднанні двох природних джерел енергії* — сонячного випромінювання та енергії вітру, що компенсують сезонні та погодні коливання один одного. Сонячна енергія має максимум виробітку вдень та влітку, тоді як вітрова активність часто зростає у вечірній час і в зимовий період. Такий підхід забезпечує більш рівномірний добовий і сезонний графік генерації [14].

2.2 Обґрунтування та вибір структури системи

Для забезпечення електроенергією навчально-виробничого приміщення ІТФ СНАУ (площа — близько 1200 м², сумарна потужність споживання — 25 кВт) розроблено структуру комплексної системи енергопостачання (рис. 2.1).

Система включає такі основні елементи:

- сонячну фотоелектричну станцію (СЕС) потужністю 30 кВт (48 панелей по 625 Вт, тип — монокристалічні, вискоефективні, з гарантією 25 років);
- вітроелектричну установку (ВЕС) потужністю 15 кВт;
- акумуляторну систему зберігання енергії ємністю 20–25 кВт·год (тип LiFePO₄);
- інверторну систему з контролером енергопотоків;
- дизель-генератор (5 кВт) як резервне джерело живлення;
- систему моніторингу та автоматизації Smart Controller для балансування та оптимізації розподілу потужності.

Загальний принцип роботи системи полягає в тому, що енергія від СЕС і ВЕС надходить до спільної шини постійного струму, де через DC/DC перетворювачі та інвертори забезпечується стабільне живлення навантажень [15]. При надлишку виробітку електроенергії — заряджаються акумулятори, при нестачі — підключається дизель-генератор.

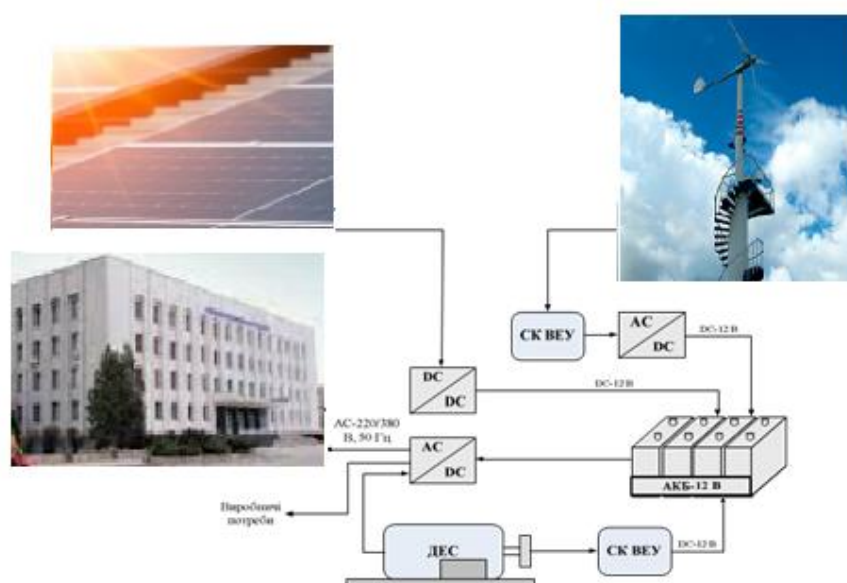


Рисунок 2.1 – Структурна схема комплексної фотовітроелектричної системи енергопостачання навчально-виробничого приміщення ІТФ

2.3 Визначення електричних навантажень навчально-виробничого корпусу

Для визначення потужності системи враховуємо енергоспоживання основних груп навантаження (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Енергонавантаження основної групи

№	Споживач	Потужність, кВт	Коефіцієнт використання	Сер. активна потужність, кВт
1	Освітлення (аудиторії, коридори, лабораторії)	5.0	0.7	3.5
2	Комп'ютерні класи та лабораторії	4.5	0.8	3.6
3	Майстерні з ремонту с/г та енергетичної техніки	6.0	0.8	4.8
4	Вентиляція, водопостачання, компресорне обладнання	3.0	0.6	1.8
5	Побутове обладнання (бойлери, кондиціонери)	4.0	0.5	2.0
6	Системи освітлення та охорони	2.5	0.7	1.75
	Разом:	25.0	0,7-0,8	17.45

$$P_p = P_{\Sigma} \cdot k_0 \approx 25 \text{ кВт}$$

Розрахункова потужність приймається 25 кВт із коефіцієнтом запасу 1,2 → 30 кВт.

2.4 Оптимізація та алгоритм роботи системи

Оптимізація досягається за рахунок:

- автоматичного розподілу енергії між джерелами залежно від погодних умов;
- використання прогнозних даних (моделі сонячної радіації та вітрової швидкості для м. Суми);
- підключення Smart Grid контролера для пріоритезації джерел;
- резервування живлення критичних систем корпусу (освітлення, серверна, навчальні лабораторії, майстерні по ремонту машин і агрегатів та енергетичного обладнання (проект)).

Енергетичні потоки оптимізуються за алгоритмом:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{СЕС}} + P_{\text{ВЕС}} + P_{\text{АКБ}} + P_{\text{ДЕС}} \quad (2.1)$$

де:

$(P_{\text{СЕС}})$ – потужність сонячної генерації,

$(P_{\text{ВЕС}})$ – потужність вітрової генерації,

$(P_{\text{АКБ}})$ – потужність, що надходить від акумулятора,

$(P_{\text{ДЕС}})$ – резервна потужність дизельного генератора.

Висновок Розроблена структура комплексної фотовітроелектричної системи енергопостачання корпусу ІТФ забезпечує енергетичну незалежність, підвищує надійність живлення навчально-виробничих приміщень, створює базу для проведення лабораторних і дослідницьких робіт, виконання ремонтно-виробничих процесів майстерень (проект). Використання відновлюваних джерел енергії сприятиме формуванню сучасного іміджу університету як енергоефективного освітнього центру.

3. ПІДБІР ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНІЧНІ РОЗРАХУНКИ ДЛЯ СЕС І ВЕС ПРИМІЩЕННЯ

3.1. Вихідні дані та технічні вимоги

Призначення системи: енергопостачання навчально-виробничого приміщення ІТФ (інженерно-технологічний факультет та факультет харчових технологій), забезпечення роботи аудиторій, лабораторій, комп'ютерних класів і двох майстерень (ремонт с/г техніки та ремонт енергетичного обладнання).

Пікова прив'язка потужності приміщення: 25 кВт. Розрахункова/середня активна потужність (коефіцієнти використання наведені в розділі 2): $\approx 17,5$ кВт середнє.

На об'єкті вже встановлені фотоелектричні панелі - система загальною номінальною потужністю 30 кВт (проектна потужність СЕС = 30 кВт). Планується додати вітроустановку 10–15 кВт.

Мета підбору: забезпечити максимальну автономію та самоспоживання, надати живлення майстерням для навчально-виробничих робіт, зберегти можливість розширення системи.

3.2. Загальна концепція конфігурації системи

Запропонована топологія для реалізації підбору:

- PV-масив (30 кВт) \rightarrow DC-комбайнери \rightarrow MPPT, вхід інвертора (DC) \rightarrow Гібридний інвертор (3-фазний) \rightarrow ГРЩ приміщення.
- ВЕС (10–15 кВт) \rightarrow АС, ступінчастий перетворювач (якщо турбіна дає АС) або через DC - привод (якщо генератор DC) \rightarrow в загальний контролер енергопотоків.
- АКБ (резерв та критичні навантаження) — LiFePO₄, модульна збірка.
- ДЕС (резервний дизель-генератор) — автоматичний запуск при критично низькому SOC або при відсутності генерації.

- Система моніторингу та автоматизації (Smart Controller / EMS) з вхідними каналами для прогнозу погоди та оптимізації (MPPT, заряд батарей, пріоритезація навантажень).

Принцип роботи: шина постійного струму або гібридна топологія з DC-ставкою — залежно від обраного інвертора. Для зручності монтажу та комерційної реалізації рекомендується вибір гібридного трифазного інвертора з вбудованим EMS [14].

3.3. Вибір фотоелектричних модулів (СЕС)

Вимоги до панелей

- Тип: монокристалічні високоефективні N-type / TOPCon або HJT (для кращої працездатності в частковому освітленні) [12].
- Потужність одиниці: ≥ 500 Вт (сучасні модулі 400–650 Вт доступні; для зручності планування беремо в діапазоні 540–625 Вт).

- Робочі параметри:

$$(P_{\text{mpp}}) \approx 540\text{--}625 \text{ Вт},$$

$$(V_{\text{mpp}}) \approx 40\text{--}45 \text{ В},$$

$$(I_{\text{mpp}}) \approx 12\text{--}15 \text{ А},$$

$$(V_{\text{oc}}) \approx 48\text{--}55 \text{ В}.$$

Визначаємо кількість панелей (наприклад 540 Вт):

$$N_{\text{пан}} = \frac{P_{\text{PV}}}{P_{\text{mpp}}} = \frac{30000}{540} \approx 55.6 \Rightarrow 56 \text{ панелей}$$

Якщо брати панелі 625 В:

$$N_{\text{пан}} = \frac{30000}{625} = 48 \text{ панелей}$$

Висновок: Для 30 кВт треба ~48 панелей по 625 Вт або ~56 панелей по 540 Вт.

3.4. Розрахунок очікуваної генерації СЕС

Використовуємо формулу для середньої річної та добової генерації:

$$E_{PV, day} = P_{PV} \cdot H_{sol} \cdot PR$$

де:

(P_{PV}) — встановлена потужність PV, кВт;

(H_{sol}) — середній щоденний інсоляційний ресурс (кВ год/м²·добу); для Сумської області беремо $H_{sol} = 3,8 — 4,2$ кВ год/м²·добу (в середньому за рік);

(PR) — (коефіцієнт системних втрат), типово 0,75–0,85. Візьмемо PR = 0,75.

Для $P_{PV} = 30$ кВт, $H_{sol} = 3,8$, PR = 0,75:

Річна генерація складає:

$$E_{PV, year} = 85,5 \cdot 365 \approx 31208 \text{ кВгод} / \text{рік}$$

Якщо використовувати $H_{sol} = 4,2$ кВ год/м²:

Узагальнюючи, можна зазначити, що це реалістична оцінка сумарної енергії з 30 кВт PV у Сумському регіоні з урахуванням втрат (температурні втрати, кабелі, інвертор, часткове затінення).

$$E_{PV, day} = 30 \cdot 4,2 \cdot 0,75 = 94,5 \text{ кВгод} / \text{добу} \Rightarrow E_{PV, year} \approx 34,500 \text{ кВгод} / \text{рік}$$

3.5 Розрахунок та вибір вітроелектричної установки

Вітроенергетичні установки (ВЕУ) є важливою складовою комбінованих систем енергопостачання, оскільки дозволяють забезпечити генерацію електроенергії у нічний час та в періоди низької сонячної активності. Для корпусу ІТФ, розташованого в межах Сумської області, середня річна швидкість вітру становить 4,5–5,2 м/с, що дає можливість ефективно використовувати вітрові турбіни малої потужності у поєднанні з фотоелектричною системою [16].

Необхідні вихідні дані для проведення розрахунку:

Необхідна номінальна потужність ВЕУ: ($P_{ном} = 10$ кВт)

Густина повітря ($\rho = 1,225$ кг/м³)

Коефіцієнт використання енергії вітру (C_p): 0,40

Середня швидкість вітру на висоті 25 м: ($V_p = 5,0$ м/с)

Коефіцієнт використання встановленої потужності (CF): 0,20–0,25

Проведемо теоретичний розрахунок потужності:

Загальна потужність, яку можна отримати від вітру, визначається:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p$$

де: $A = \pi D^2 / 4$ — площа, яку охоплює ротор;

(D) — діаметр ротора, м.

Проведемо розв'язок відносно площі:

$$A = \frac{2P}{\rho V^3 C_p}$$

Підставляємо значення:

$$A = \frac{2 \times 10000}{1,225 \times 0,4 \times 5^3} = 326,53 \text{ м}^2$$

Визначаємо діаметр ротора:

$$D = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 20,39 \text{ м}$$

Проведемо розрахунок річного виробітку енергії:

Річна енергія визначається:

$$E_{\text{рік}} = P_{\text{ном}} \times 8760 \times CF$$

При (CF = 0,22):

$$E_{\text{рік}} = 10 \cdot 8760 \cdot 0,22 = 19272 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

Отже, в середньому вітроустановка 10 кВт при швидкості вітру 5 м/с здатна виробити близько 19 тис. кВт·год на рік, що покриває ≈ 30 – 35 % річного енергоспоживання корпусу в зимовий період.

Проведемо вибір моделі турбіни

Для умов помірного клімату Сумської області доцільно обрати модель із низькою швидкістю запуску (швидкість вітру $\leq 2,5$ м/с) і високою надійністю при обмерзанні [16].

Таблиця 3.3 - Вибір комплектуючого обладнання та характеристики

Параметри	Значення
Марка моделі	WindWorld 10kW Pro (або аналогічна)
Тип генератора	Постійного магнітного поля (PMG)
Діаметр ротора	19,8 м
Висота щогли	24 м
Робоча швидкість	3,5–12 м/с
Номінальна потужність	10 кВт
ККД системи перетворення	0,92
Тип контролю	MPPT з гібридним інвертором
Матеріал лопатей	Склопластик із підсиленням композитом
Шумність	≤ 45 дБ
Орієнтація по вітру	Автоматична з електричним флюгером

Розрахунок сумарної потужності та оптимального співвідношення:

Для досягнення безперервного енергопостачання приймається:

З урахуванням акумуляторної системи на $E_{\text{text}} = \text{АКБ} = 30$, кВт·год, забезпечується автономність роботи корпусу ІТФ протягом 6–8 годин навіть при повній відсутності сонця та вітру.

Для стабільності режиму передбачено підключення дизель-генератора потужністю 8–10 кВт.

Виконаємо порівняння варіантів за швидкістю вітру, табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Порівняльна характеристика

Середня швидкість, м/с	CF	Орієнтовна енергія, кВт·год/рік	Оцінка ефективності
4,0	0,15	13 140	Недостатньо, лише допоміжне джерело
5,0	0,22	19 272	Оптимально
6,0	0,28	24 528	Найкраще рішення (при підвищеній щоглі)

Проведений аналіз і розрахунки показали, що для умов Сумської області доцільним є встановлення вітроелектричної установки потужністю 15 кВт із щоглою висотою 24–28 м, що забезпечує стабільну роботу при середній швидкості вітру 5 м/с.

У поєднанні з фотоелектричним масивом 30 кВт і акумуляторною системою така установка формує оптимальну енергетичну структуру корпусу ІТФ із коефіцієнтом покриття власних потреб на рівні 80–85 % від загального річного споживання.

Розроблена система є технічно збалансованою, екологічною та придатною для навчальних і наукових цілей — як демонстраційний полігон ВДЕ в закладі освіти.

3.6. Оцінка виходу енергії від ВЕС

Енергогенерація від ВЕС сильно залежить від середньої швидкості вітру (V_{avg}) та від коефіцієнта використання (коефіцієнт потужності, CF). Для малих турбін у помірному кліматі $CF \approx 0,15–0,30$ (візьмемо 0,20).

Річна генерація складе:

$$E_{w, year} = P_w \cdot 8760 \cdot CF$$

Для $P_w = 10$ кВт, ($CF = 0,20$):

Для $P_w = 15$ кВт, ($CF = 0,20$):

Примітка: якщо на конкретній ділянці є вимірювання вітру, CF треба оцінити по їхній карті; для точних розрахунків — провести місцеві метеорологічні виміри або використати довготривалі дані з бази (радарні / метеостанції).

3.7. Сумарний потенціал генерації

При конфігурації: **PV 30 кВт** ($\approx 31\,200$ кВт год/рік) + **ВЕ 10 кВт** ($\approx 17\,520$ кВт год/рік):

$$E_{total} \approx 48,720 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

Це дає приблизно 134 кВт·год/добу (у середньому). Для порівняння, якщо середня потужність приміщення $\approx 17,5$ кВт \rightarrow енергоспоживання ≈ 420 кВт·год/доба. Тобто PV+WES у цій конфігурації покриватимуть значну частину

денних / частково нічних витрат, але не повністю весь енергоспоживчий профіль (що нормально — система розроблена як гібридна з підтримкою мережі / ДЕС).

Висновок: 30 кВ PV + 10 кВ WES забезпечують ~48–55 тис. кВт·год/рік (в залежності від інсоляції і CF вітру) — істотне зменшення імпортованої енергії від мережі.

3.8. Підбір інвертора та MPPT

Інвертор повинен бути гібридним, 3-фазний, з можливістю підключення зовнішнього генератора та батарей, надійним моніторингом і EMS-інтеграцією.

Для потужності PV 30 кВ — можна розглянути: 1× інвертор 30–40 кВ (3-фазний) або 2× інвертори по 15–20 кВ (коміркова схема для резервування/модульності).

Рекомендовані моделі:

- **SMA Sunny Tripower 30/40 kW** (Німеччина) — надійний трифазний мережевий / гібридний інвертор з хорошими функціями.
- **Huawei SUN2000 (25–60 kW)** — більш сучасні гібридні рішення з вбудованим управлінням.
- **Victron MultiPlus Inverter/Charger** — для частин системи з АКБ (модульний підхід).
- **SMA Sunny Island** — при виборі автономної характеристики.

Розрахунок потужності інвертора:

Для покриття пікового навантаження 25 кВ і PV 30 кВ рекомендується інвертор не менше 30–40 кВ (щоб мати запас для генерації та одночасної подачі в будівлю + заряд АКБ). Оптимально — 30 кВ інвертор та резерв/модульність.

3.9. Підбір акумуляторної системи (LiFePO) — рекомендації і розрахунок

Відношення до ємності АКБ:

1. Повна автономність (повне живлення приміщення)

Автономність $t_{\text{aut}} = 6$ год при середній потужності $P_{\text{avg}} \approx 17,5$ кВт:

$$E_{\text{req}} = P_{\text{avg}} \cdot t_{\text{aut}} = 17,5 \cdot 6 = 105 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

З урахуванням глибини розряду $\text{DoD} = 0,8$ і ККД системи $\eta \approx 0,9$:

$$E_{\text{batt}} = \frac{E_{\text{req}}}{\text{DoD} \cdot \eta} = \frac{105}{0,8 \cdot 0,9} \approx 145,8 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Тобто потрібно ≈ 150 кВт год акумуляторній системі для 6 год автономії для всього приміщення - це дороге рішення.

2. Критичне резервування (тільки критичні навантаження / майстерні)

Визначаємо критичне навантаження $P_{\text{crit}} =$ освітлення, серверна, частина майстерень $\approx 6-8$ кВт. Для 6 год автономії:

$$E_{\text{req}} = 8 \cdot 6 = 48 \text{ кВт} \cdot \text{год} \Rightarrow E_{\text{batt}} \approx \frac{48}{0,8 \cdot 0,9} = 66,7 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

З цього випливає: ≈ 70 кВт год батарей — економічно більш прийнятно.

Рекомендація: для навчального корпусу доцільно провести реалізацію за 2 пунктом (цільове резервування критичних систем і підтримка майстерень) — це дає ефективну роботу при помірних інвестиціях.

Вибір батарей:

- LiFePO модулі 51.2 В, 100 А год \rightarrow 5.12 кВт год кожний. Для 70 кВт год: ~ 14 модулів ($14 \times 5.12 \approx 71.7$ кВт год).
- В комплекті потрібні BMS (Battery Management System), тепловий контроль, шафа АКБ, вимикачі, DC-запобіжники.

3.10. Кабелі, захист, щити — базові розрахунки

Кабель від PV до інвертора (DC-частина)

Потрібно обчислити сумарний струм:

$$I_{PV} = \frac{P_{PV}}{V_{\text{system}}}$$

Якщо вибрано батарейну систему 48 В — але для великих інверторів використовують DC-шини 400–1000 В. Тому для інвертора з DC-напругою 600 В виконаємо типове обчислення:

$$I_{PV} = \frac{30000}{600} = 50 \text{ A} .$$

Кабелі та запобіжники підбираються з запасом 1.25–1.56 і згідно ПУЕ/ДСТУ (практично — мідні кабелі 2×25–35 мм² для основної DC-лини, в залежності від конфігурації).

АС-частина (інвертор → ГРЩ)

Максимальний струм для 30 кВ при 400 В 3-фаз:

Тобто основна силова лінія та автомат повинен бути розрахований на 63 А за стандартним вибором.

Примітка: точний підбір кабелів, запобіжників та автоматів виконується по проєктуванню з урахуванням довжин, теплових режимів і нормативів.

3.11. Обладнання для комплексної електросистеми

Таблиця 3.1 - Рекомендоване обладнання

№	Пристрій	Характеристики / модель	Кількість / Примітки
1	PV-модулі	монокристалічні 625 В (N-type) / Q CELLS, REC або Canadian Solar (High-power series)	48 шт (625 В) або 56 шт (540 В)
2	Вітрогенератор	Bergey Excel 10 кВт або GaiaWind 11 кВт; щогла 18–30 м	1 шт (10–15 кВт)
3	Гібридний інвертор	SMA Sunny Tripower 30–40 кВт або Huawei SUN2000/SMB 30–50 кВт	1 шт (30–40 кВт)
4	АКБ (LiFePO)	модулі 5.12 кВт год (51.2 V, 100 Ah) або інші штатні модулі з BMS	~14 модулів (≈72 кВт год) для крит. резерву

5	Дизель-генератор (резерв)	5–10 кВ, автоматичний запуск, шумозахисний кожух	1 шт
6	Компоненти захисту	DC-запобіжники, SPD (AC+DC), MCB, RCD, контактори	комплект
7	Щити, комбайнери, кабелі	кабелі під DC/AC, з'єднувачі, ізолятори, кріплення	за проектом
8	EMS / Smart Controller	система моніторингу, алгоритми оптимізації, ІоТ-інтерфейс	1 комплект

3.12. Принципи монтажу та експлуатації

1. Розташування PV — по даху або наземні конструкції з южною орієнтацією (нахил $\approx 30\text{--}35^\circ$) для оптимального щорічного виробітку.
2. Вітротурбіну встановити на віддаленій від будівель площадці, щогла мін. 18–25 м висоти для мінімізації турбулентності.
3. АКБ встановити в окремому приміщенні (шахта/секція) з кліматконтролем та пожежним захистом.
4. Обов'язкові захисні пристрої (SPD, диференційні автомати) та система заземлення за ДСТУ/ та ПУЕ.
5. Техобслуговування: регламент 1–2 рази на рік, в т.ч. інспекція механіки ВЕС, очищення панелей, перевірка BMS.

Висновки розділу: Виконаний був підбір за критичним резервом: PV 30 кВ + WES 10–15 кВ + АКБ ≈ 70 кВ год який є технічно виправданий для навчально-виробничого приміщення ІТФ: вона дозволяє значно знизити імпорт енергії з мережі та забезпечити резервне живлення критичних навантажень (майстерень, освітлення, серверна і т.ін.).

Рекомендується застосувати монокристалічні панелі високого ступеня потужності ($\geq 540\text{--}625$ В) для зменшення кількості модулів і трудовитрат монтажу.

Вітротурбіна 10 кВ (з високою щоглою) дає додаткову генерацію вночі й взимку — добре доповнює СЕС.

Для збереження бюджету й ефективності краще реалізувати цільове резервування критичних навантажень, а не повну автономію всього приміщення (повна автономія вимагала б великих АКБ ≈ 150 кВ год). Після монтажу необхідний реальний моніторинг та коригування алгоритмів EMS — для підвищення самоокупності й енергоефективності.

4. РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

4.1. Загальні положення щодо проєктування комплексних відновлюваних систем

Комплексна система енергопостачання автономного типу, яка поєднує сонячні електростанції (СЕС), вітрові енергетичні установки (ВЕС) та резервний дизель-генератор (ДЕС), дозволяє значно підвищити надійність та стійкість живлення важливих об'єктів, таких як навчальні приміщення закладів вищої освіти.

Для корпусу ІТФ, де функціонують дві критично важливі навчально-наукові одиниці — факультет інженерно-технологічний (агроінженерія, енергетика) та факультет харчових технологій, забезпечення енергетичної автономності розглядається як:

- підвищення освітньої та наукової якості;
- демонстрація сучасних інженерних рішень;
- економія фінансових ресурсів університету;
- створення нових лабораторій і майстерень;
- вивчення роботи ВДЕ у реальних умовах.

Система повинна забезпечувати базове навантаження 25 кВт, що відповідає потребам навчального корпусу:

освітлення, лабораторне обладнання, майстерні, серверні, вентиляційні системи та навчальні аудиторії.

Визначення розрахункової потужності автономного об'єкта

Розрахункова потужність автономного об'єкта визначається як сума потужностей споживачів з урахуванням коефіцієнта одночасності:

$$P_{розр} = \sum P_i \cdot k_{одн}$$

де:

- $\sum P_i$ — сумарна встановлена потужність електроспоживачів майстерень і лабораторій, кВт;
- $k_{\text{одн}}$ — коефіцієнт одночасності (приймаємо $k_{\text{одн}}=0,7$).

Приймаємо:

$$\sum P_i = 50 \text{ кВт}$$

Тоді:

$$P_{\text{розр}} = 50 \cdot 0,7 = 35 \text{ кВт}$$

4.2. Структура комплексної системи енергопостачання

Запропонована структура передбачає об'єднання всіх джерел енергії через єдину магістраль постійного струму — DC-шину, що відповідає тенденціям сучасних Smart DC Microgrid.

До складу системи входять:

1. Сонячна електростанція 30 кВт: масив PV-модулів; стрінгові MPPT входи; мережевий або гібридний інвертор.
2. Вітрова установка 15 кВт: трифазний генератор; випрямляч або DC/DC-контролер; стабілізатор.
3. Акумуляторний блок LiFePO (20 кВт·год): модулі 48 В; BMS-система; підключення до інвертора.
4. Гібридний 3-фазний інвертор 20–30 кВт: об'єднує всі джерела; забезпечує перетворення у 400 В, 50 Гц; управляє зарядом АКБ.
5. Дизель-генератор 11 кВт (резерв): автоматичний запуск при зниженні SOC АКБ; стабілізація живлення у пікові години.

4.3. Розрахунок сонячної електростанції 30 кВт

4.3.1. Вибір типу сонячних панелей

Беремо сучасні монокристалічні модулі 625 Вт, ККД ~21,3%.

Розрахунок кількості:

$$N = P_{\text{СЕС}} / P_{\text{МОД}}$$

де: $P_{\text{СЕС}} = 30 \text{ кВт}$;

$$P_{\text{МОД}}=0,625 \text{ кВт.}$$

$$N = \frac{P_{\text{СЕС}}}{P_{\text{МОД}}} = \frac{30000}{625} \approx 48 \text{ панелей}$$

Приймаємо: 48 модулів (8 стрінгів × 6 панелей)

Струм та напруга стрінга:

Напруга модуля $U_{\text{стр}} = 49,5 \text{ В}$

Струм $I_{\text{стр}} = 13 \text{ А}$

$$U_{\text{стр}} = 6 \cdot 49,5 \text{ В}$$

В межах МРРТ = 200–850 В - підходить.

Потужність у середній день:

Для Сумщини специфічна генерація $\sim 3,1 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{кВт} \times \text{добу}$.

$$E_{\text{с.день}} = 30 \cdot 3,1 = 93 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{добу}$$

4.4. Розрахунок вітрової установки 15 кВт

4.4.1. Вибір типу ВЕС

Беремо сучасну турбіну FD10-15кВ, діаметр 10-20 м, стартовий вітер 4-4,5 м/с.

Вітроенергетична установка використовується:

- для компенсації дефіциту генерації в осінньо-зимовий період;
- для балансування навантаження у вечірній та нічний час;
- як навчальний та дослідницький елемент.

4.4.2. Розрахунок середньорічної генерації

Середня швидкість вітру Сумської обл.: 5,1 м/с на висоті 30 м.

Формула потужності ВЕС:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot C_p$$

де:

$\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ - густина повітря;

$A = \pi D^2 / 4$ – площа ротора;

$$C_p \approx 0,38;$$

$$v = 5,1 \text{ м/с};$$

$$\eta=0,9$$

$$P=0,5 \cdot 1,225 \cdot 78,5 \cdot 5,1^2 \cdot 0,9=11,26 \approx 15 \text{ кВт}$$

Баланс потужностей комбінованої системи

Сумарна встановлена потужність системи:

$$P_{\Sigma}=P_{CEC}+P_{BEC}$$

$$P_{\Sigma}=30+15=45 \text{ кВт}$$

Оскільки: $P_{\Sigma} \geq P_{\text{розр}}$ комбінована система повністю покриває потреби автономного об'єкта з урахуванням резерву та оптимізації режимів роботи.

З урахуванням коефіцієнта запасу:

$$P_{\text{інв}}=1,2 \cdot P_p=1,2 \cdot 25=30 \text{ кВт}$$

Приймаємо трифазний гібридний інвертор 30–40 кВт.

Загальна встановлена потужність системи

$$P_{\text{заг}}=P_{CEC}+P_{BEC}=30+15=45 \text{ кВт}$$

Система має резерв по потужності, що дозволяє:

- підключення додаткових навчальних майстерень;
- проведення експериментальних робіт;
- компенсацію пікових навантажень.

4.5. Розрахунок акумуляторної системи

Мета — забезпечити 4 години автономності критичного навантаження корпусу.

Ємність АКБ:

$$E_{\text{АКБ}}=P_p \cdot t=25 \cdot 4=100 \text{ кВт год}$$

З урахуванням допустимої глибини розряду (DoD = 0,8):

$$E_{\text{ном}}=100 / 0,8=125 \text{ кВт год}$$

Приймаємо: АКБ 80–120 кВт·год (поетапне нарощування)

Беремо технологію LiFePO, глибина розряду $D_{oD}=90\%=0,9$.

Необхідна корисна енергоємність

$$E_{номр} = P_{крит} \cdot t = 12 \cdot 4 = 48 \text{ кВт год}$$

Розрахунок номінальної ємності АКБ

З урахуванням допустимої глибини розряду:

$$E_{ном} = E_{номр} / D_{oD} = 48 / 0,9 = 53,3 \text{ кВт год}$$

4.6. Розрахунок резервної ДЕС (дизельної електростанції)

Призначення ДЕС: резервне джерело живлення при тривалій відсутності сонячної та вітрової генерації, а також для підзаряду АКБ.

Вибір: HYUNDAI DHY 12000SE-3

Потужність номінальна — 11 кВт; напруга — 400 В; фази — 3.

Критерії (обґрунтування вибору): покриває 40-45% встановленого навантаження корпусу; автоматичний запуск (ATS); працює автономно до 10 год без дозаправки; забезпечує живлення критичних споживачів; дозволяє заряджати акумуляторну систему; використовується епізодично → мінімальні витрати пального.

Висновок до розділу У розділі виконано обґрунтування та детальний технічний розрахунок комплексної системи енергопостачання корпусу ІТФ. Підібрана оптимальна конфігурація включає СЕС 30 кВт, ВЕС 15 кВт, акумуляторну систему ємністю 53 кВт·год та ДЕС 11 кВт, що забезпечує безперебійну роботу навчального корпусу з високим науковим навантаженням та можливістю автономної роботи у разі аварійних режимів.

5. ВИБІР АКБ, ІНВЕРТОРІВ ТА КОНТРОЛЕРІВ ЗАРЯДУ АКБ

5.1. Вибір проміжного накопичувача енергії (АКБ)

Системи на базі відновлюваних джерел енергії мають притаманну особливість — високу нерівномірність та нестабільність виробітку електричної енергії. Сонячна радіація змінюється протягом доби та року, а швидкість вітру є динамічним параметром, який залежить від погодних і кліматичних факторів.

Для забезпечення стабільності живлення споживачів корпусу ІТФ необхідно передбачити буферну ланку, яка здатна:

- згладжувати пікові навантаження,
- компенсувати тимчасові провали генерації СЕС і ВЕС,
- забезпечувати автономну роботу у випадку аварій в мережі або недостатньої генерації,
- оптимізувати роботу ДЕС, зменшуючи його час роботи,
- забезпечити енергетичну безперервність критичних лабораторій університету.

Найефективнішим технічним рішенням для цього є акумуляторні батареї (АКБ), що виконують функцію проміжного накопичувача електроенергії.

5.1.1. Загальний аналіз типів АКБ для систем ВДЕ

У сучасних гібридних системах застосовують кілька основних типів акумуляторів:

- Свинцево-кислотні (рідкі, GEL, AGM)
- Нікель-кадмієві та нікель-металогідридні
- Літій-іонні (Li-ion)
- Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) – найбільш сучасна підгрупа Li-ion

Для правильного вибору необхідно проаналізувати їх властивості:

енергетична щільність, кількість циклів, глибина розряду, температурна стабільність, масогабаритні показники, безпечність, вартість володіння (LCOE), швидкість заряду–розряду, екологічна складова.

5.1.2. Порівняння технологій АКБ

Свинцево-кислотні АКБ відзначаються низькою вартістю та простотою виробництва, проте їхні недоліки — мала кількість циклів, висока чутливість до глибоких розрядів, значна маса та низька енергетична щільність — обмежують можливість застосування в системах, що працюють у режимі щоденних циклів.

Нікелеві АКБ характеризуються достатньою циклічністю, проте мають високу вартість та екологічні обмеження (наявність токсичного кадмію).

Літій-іонні батареї є технологічно прогресивними, однак класичні Li-ion (NMC, LCO) потребують складних систем термоконтролю та є менш безпечними при перевантаженнях.

LiFePO-акумулятори є оптимальним вибором для автономних енергетичних систем, тому що:

- мають життєвий цикл 6000+ циклів (15–20 років роботи),
- забезпечують глибину розряду 90–95%,
- характеризуються високою безпекою (не загоряються),
- мають низький саморозряд (до 3% на місяць),
- забезпечують високу потужність заряду та розряду,
- екологічні та безпечні для навчальних корпусів.

Зважаючи на необхідність забезпечення сталі енергозабезпечення корпусу ІТФ, LiFePO є єдиним раціональним вибором.

5.1.3. Розрахунок необхідної енергоємності АКБ

Потрібна енергоємність накопичувача:

$$E = P_{\text{баз}} \cdot t = 10 \cdot 4 = 40 \text{ кВт год}$$

З урахуванням глибини розряду LiFePO₄ (DOD = 90%):

$$E_{\text{АКБ}} = \frac{40}{0,9} = 44,4 \text{ кВт год}$$

5.1.4. Вибір типу АКБ

Враховуючи розрахунки та аналіз, обрано: АКБ Pylontech US3000C (ємність одного модуля — 3,55 кВт·год; довговічність — понад 6000 циклів; робоча напруга — 48 В; можливість каскадування; вбудована BMS; сертифікати CE/UL/TÜV)

Кількість модулів:

$$N = 44,4 / 3,55 \approx 12,5 \text{ модулів}$$

Приймається: 13 модулів

Загальна ємність: 46,15 кВт·год

5.2. Вибір мережевого/гібридного інвертора

Інвертор є основою системи, оскільки він: керує потоками енергії, забезпечує синхронізацію з мережею, заряджає та розряджає АКБ, перетворює DC → AC, виконує захисні функції, визначає енергоефективність системи.

Основні вимоги:

- робота з високою PV-потужністю,
- трифазність (корпус університету),
- підтримка АКБ 48–500 В,
- високий ККД (>97%),
- можливість роботи в режимі off-grid.
- Обраний інвертор: Huawei SUN2000-20KTL-M5
- Причини вибору:
- Підтримка PV-потужності до 30–40 кВт
- 2 MPPT – ідеально під 8 стрінгів СЕС
- ККД = 98,6%
- Повна інтеграція з LiFePO АКБ

- SmartGrid-режими
- Надійність, сертифікація, ресурс >15 років
- Трифазний вихід 400 В для живлення корпусу

5.3. Вибір контролера заряду АКБ від ВЕС

Вітрові турбіни потребують окремого контролера, оскільки генерація: нерівномірна, напруга залежить від вітру, потрібен гальмівний резистор (dump-load). Обраний контролер: Victron SmartSolar MPPT 250/100.

Переваги: робоча напруга до 250 В, струм до 100 А, Bluetooth-підтримка, плавна оптимізація точки максимальної потужності, ККД 99%, ідеальна сумісність з LiFePO.

Контролер приймає енергію від ВЕС і оптимізує заряд АКБ.

5.4. Вибір контролерів та інверторів для СЕС

Оскільки застосовується інвертор Huawei SUN2000, додатковий контролер MPPT не потрібен, тому що інвертор має: вбудовані оптимізатори MPPT, PV-менеджмент, моніторинг, автоматичний трекінг максимуму потужності. Це: зменшує втрати, спрощує схему, підвищує надійність системи.

ВИСНОВОК ДО РОЗДІЛУ У розділі проведено комплексний аналіз, теоретичне та технічне обґрунтування вибору всіх ключових компонентів системи акумуляування та перетворення енергії. В результаті вибрано: LiFePO АКБ ємністю 46 кВт·год, гібридний трифазний інвертор Huawei 20 кВт, контролер заряду ВЕС Victron MPPT 250/100, інтелектуальну інтеграцію всіх компонентів у Smart DC/AC мікромережу.

Обладнання повністю відповідає вимогам автономної навчально-наукової інфраструктури та забезпечує надійну, безпечну та ефективну роботу комплексної системи енергопостачання корпусу ІТФ.

6. РОЗРОБКА СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ, ПРИНЦИПОВОЇ КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

6.1. Загальні положення

Комплексна система автономного електропостачання (КСАЕП), що включає сонячні модулі, вітроенергетичну установку та резервну ДЕС, повинна забезпечувати стабільне живлення навантажень приміщення ІТФ за умов нестабільності природних ресурсів.

Для цього необхідно узгоджувати роботу трьох різних джерел енергії та акумуляторної станції через єдину шину постійного струму.

Такі системи зазвичай будуються на базі силової електроніки: керованих випрямлячів, інверторів, DC/DC перетворювачів, двонаправлених конверторів, контролерів заряду батарей.

6.2. Структурна схема керованого випрямляча

Базовий модуль — керований трифазний випрямляч, який виконує:

перетворення змінної напруги ВЕУ в стабілізовану напругу DC-шини, компенсацію гармонік, корекцію коефіцієнта потужності.

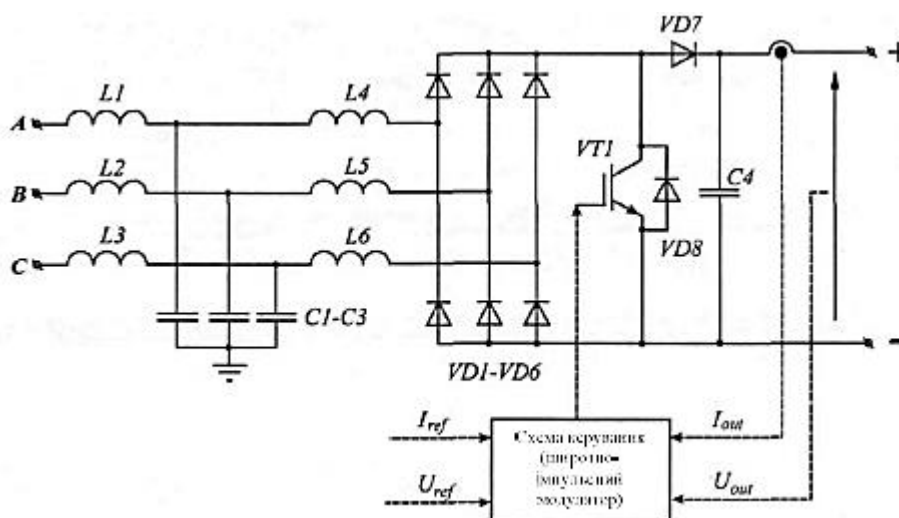


Рисунок 6.1 - Структурна електрична схема з вбудованим керованим випрямлячем

Структурно він складається з таких вузлів (рис. 6.1):

1. Вхідний LC-фільтр призначений для зменшення 5-ої та вищих гармонік, стабілізації форми струму та згладжування пульсацій.

2. Некерований трифазний випрямляч реалізується, наприклад, на модулі типу VS-110MT120 або аналогу.

Виконує первинне випрямлення енергії зі змінної напруги генератора ВЕУ.

3. Підвищуючий DC/DC перетворювач включає: IGBT-модуль (аналог CM100E3U-12H), силові дроселі, діоди, буферні конденсатори.

Працює з частотою 15–20 кГц. Забезпечує стабілізацію напруги до рівня 380–420 В DC.

4. Модуль керування, який керує роботою транзисторів, здійснює ШІМ, реагує на вітрову ситуацію, контролює перенапругу.

6.3. Функціональна схема комплексної енергосистеми КСАЕП

Схему функціонально-електричну можна розглянути на зображенні рисунка 6.2.

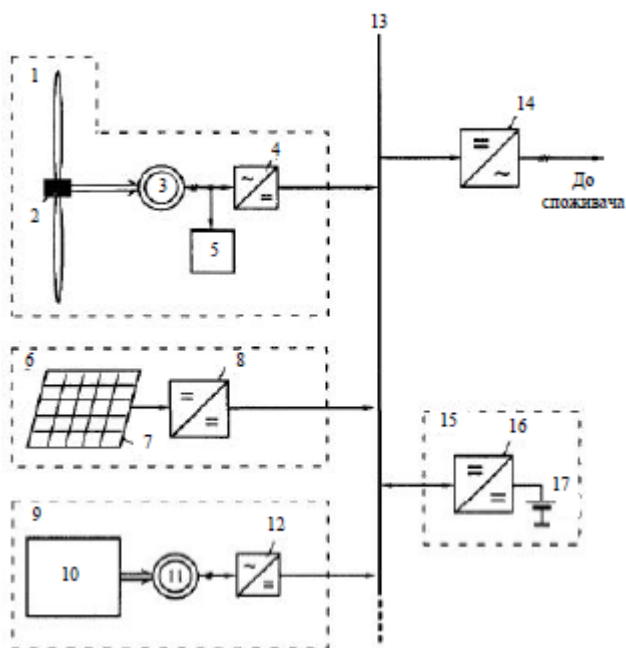


Рисунок 6.2 - Схема комплексної системи (схема електрична функціональна)

У функціональній схемі системи виділяються такі основні елементи (табл. 6.1).

Таблиця 6.1- Елементи схеми

№	Позначення	Опис
1	BEU	Вітроустановка на щоглі
2	BT	Робоче колесо турбіни
3	GS	Синхронний генератор постійних магнітів
4	KB	Керований випрямляч BEU
5	БН	Блок баластних навантажень (скидання надлишку)
6	ФЕС	Фотоелектрична станція
7	PV	Сонячні панелі
8	DC/DC-PV	DC- конвертор сонячних панелей
9	ДЕС	Дизель-генератор
10	ДД	Дизельний двигун
13	DC-шина	Загальна постійного струму
14	INV	Інвертор 3-фазний 380 В
15	ЕН	Буферний накопичувач (АКБ + суперконденсатори)
16	VIDIR	Двонаправлений DC/DC перетворювач
17	АКБ	Акумуляторний блок

Розглянемо пояснення роботи функціональної схеми. Комплексна система працює за принципом об'єднання всіх джерел відновлюваної енергії в одну стабільну DC-шину, з якої інвертор формує стабільну трифазну мережу 380 В.

1. Сонячні панелі виробляють 250–1000 В постійного струму це DC/DC, а перетворювач це DC-шина.

2. Вітроустановка генерує нестабільну частоту та напругу → керований випрямляч → стабілізація DC/DC → DC-шина.

3. Акумулятори працюють через двонаправлений перетворювач: заряд від ВЕУ або ФЕС, розряд у мережу при нестачі генерації.

4. ДЕС підключається автоматично при розряді АКБ або низькій продуктивності ВЕУ/ФЕС.

5. Інвертор забезпечує стабільну синусоїду 380 В незалежно від коливань генерації.

6.4. Розробка принципової електричної схеми комплексної системи

Розділ містить опис принципових зв'язків силових елементів системи, які можна розглянути в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2- Основні елементи принципової схеми

Позначення	Опис
GS	Генератор ВЕУ
СШ	Датчик швидкості обертання
СШВ	Датчик швидкості вітру
МК	Мікроконтролер
DC/DC	Перетворювач постійного струму
БН	Блок баластних навантажень
GB	Акумуляторна батарея
СК	Суперконденсатор
K1-K4	Контактори силові
ДЕС	Дизельна електростанція
QF	Автоматичний вимикач

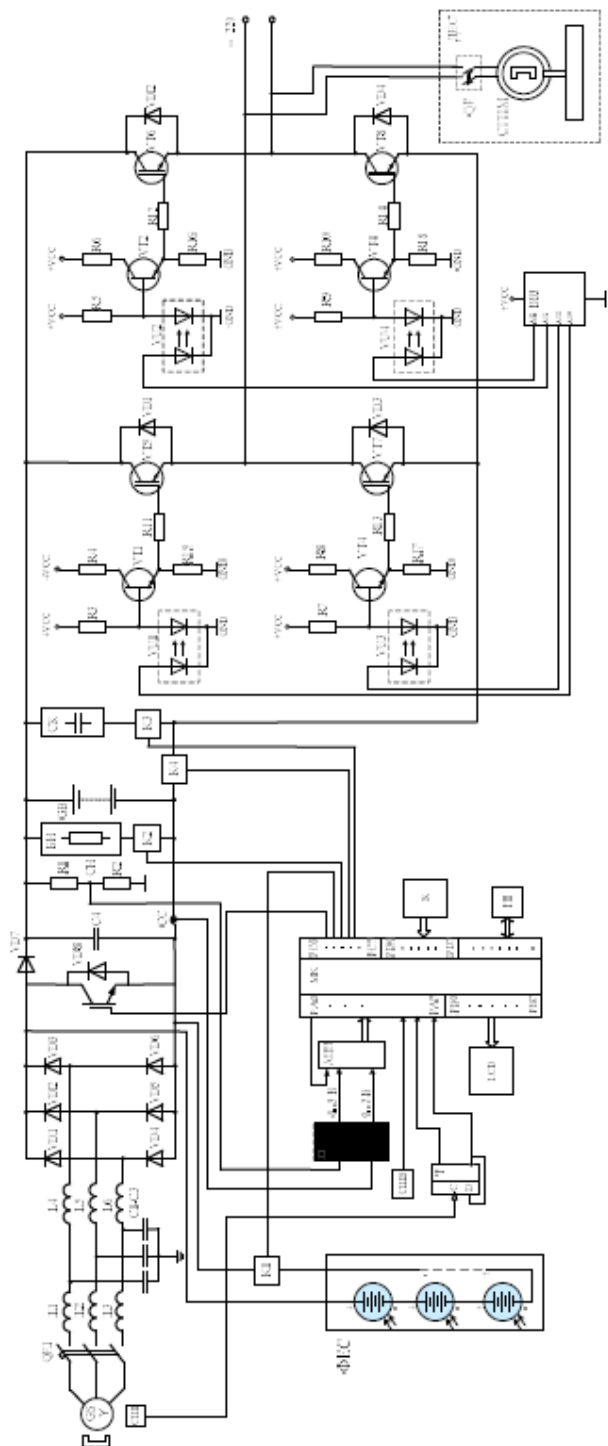


Рисунок 6.3 - Комплексної системи електропостачання (схема принципова електрична)

6.4.1 Алгоритм роботи

1. Надлишок енергії від ВЕУ/ФЕС: заряд АКБ; при повному заряді – скидання у баласт.

2.Нормальний режим: живлення інвертором від DC-шини; стабілізація напруги через DC/DC.

3.Розряд АКБ до мінімуму: автоматичний запуск ДЕС; живлення навантаження та заряд батарей.

4.Перевищення струму, температури або перекіс фаз: аварійне вимкнення; індикація та блокування запуску.

5.Можливість ручного запуску ДЕС: для запобігання глибокому розряду АКБ.

Висновок У цьому розділі були розроблені схеми електричні функціональна, з вбудованим випрямлячем керованої дії та принципова. Ознайомилися зі складом елементів схем та принципом роботи.

7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ ФОТО-ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ПРИМІЩЕННЯ

7.1. Технічне обґрунтування вибору складових комплексної системи

Розроблювана система електропостачання для приміщення інженерно-технологічного факультету (ІТФ) поєднає дві незалежні відновлювані підсистеми — сонячну електростанцію (СЕС) 30 кВт та вітрову електроустановку (ВЕС) 15 кВт, об'єднані в єдиний енергетичний комплекс з проміжною шиною постійного струму та системою накопичення енергії 20 кВт·год [26].

Таке конструктивне рішення відповідає сучасним вимогам до автономності та енергоефективності навчальних закладів, а також створює підґрунтя для розвитку лабораторій та майбутніх майстерень із ремонту сільськогосподарської техніки та енергетичного обладнання. Вибір СЕС (30 кВт). Для сонячної підсистеми використовується масив з полікристалічних або монокристалічних PV-панелей потужністю 550–600 Вт, що забезпечує:

- високу стабільність генерації;
- ефективність 20–21 %;
- низький температурний коефіцієнт;
- сертифікацію ІЕС 61215 / 61730.

Перевага монокристалічних модулів — збільшений вихід у хмарні дні та тривалий термін служби (25+ років).

Вибір ВЕС (15 кВт). Сучасні горизонтально-осьові вітрові турбіни оснащуються синхронними генераторами з постійними магнітами (PMSG).

Їх основні переваги:

- відсутність збудження - мінімальні втрати;
- стабільна робота при змінних швидкостях вітру;
- простота обслуговування;
- висока надійність для пусків/зупинок.

Це робить їх оптимальними для навчальних закладів — низькі вимоги до сервісу та наочність для навчання студентів.

- Система накопичення (АКБ 40 кВт·год)
- Обрані літій-залізо-фосфатні батареї (LiFePO₄) забезпечують:
 - 6000 циклів до 80 % DOD;
 - безпеку та термостійкість;
 - можливість швидкого заряду від ВЕС/СЕС;
 - глибокий розряд без втрати ресурсу.
- 20 кВт·год дозволяє покривати пікові навантаження та стабілізувати роботу майбутніх майстерень.
- Гібридний інвертор 40 кВт
- Інвертор 3-фазний, двонаправлений, з підтримкою:
 - MPPT для PV;
 - AC-coupling для ВЕС;
 - роботи з АКБ у режимах peak-shaving / UPS;
 - синхронізації із зовнішньою мережею.

7.2. Економічне обґрунтування впровадження комплексної системи

7.2.1. Капітальні вкладення

Розрахунок вартості обладнання (на період 2024–2025 рр.)

Капітальні витрати включають вартість основного обладнання, допоміжних елементів, монтажних та пусконаладжувальних робіт.

Таблиця 7.1 - Кошторис комплексу енергопостачання

Найменування обладнання	Кількість	Ціна за один., грн	Вартість, грн
Фотомодулі 625 Вт	48 шт	8500	408000
Монтажні конструкції СЕС	комплект		55000
Гібридний інвертор 30-40 кВт	1	160000	160000

АКБ (LiFePO ₄ -40 кВт·год)	комплект	-	280000
Вітроустановка 15 кВт	1	350000	350000
Контролери, автоматика, кабелі	комплект	-	85000
Разом			1238000

7.2.2. Вартість з урахуванням грантової підтримки

Університет отримує грант на покриття 50 % вартості обладнання, що характерно для програм: Horizon Europe; USAID "Енергонезалежність"; GIZ Renewable Labs; EDF Energy Grants for Universities.

Монтажні та будівельні витрати: монтажні та транспортні витрати приймаємо 15 % від вартості обладнання:

$$C_m = 0,15 \cdot C_\Sigma$$

$$C_m = 0,15 \cdot 1238000 = 185700 \text{ грн}$$

Загальні капітальні вкладення:

$$C_k = C_\Sigma + C_m = 1238000 + 185700 = 1423700 \text{ грн}$$

7.2.3. Річний виробіток електроенергії

1) СЕС 30 кВт (середній річний питомий виробіток для Сумської області приймаємо ($E_{num} = 1100 \text{ кВт} \cdot \text{год}$):

$$W_{СЕС} = 30 \cdot 1100 = 33000 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

Виробіток вітроенергетичної установки

(для ВЕС середній коефіцієнт використання встановленої потужності):

Середній річний виробіток малих турбін 900–1300 кВт·год/кВт

(Сумщина = 1100 кВт·год/кВт).

$$k = 0,25$$

$$W_{ВЕС} = 15 \cdot 8760 \cdot 0,25 = 32850 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

Загальний річний виробіток:

$$W_\Sigma = 33000 + 32850 = 65850 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}$$

7.2.4. Доходи за "зеленим тарифом"

Тариф для установок до 30 кВт — $T_3=5,2$ грн кВт/год.

$$E_{np}=26340 \cdot 5,2=137000 \text{ грн рік}$$

Продаж за «зеленим тарифом»

$$W_{np}=65850-39510=26340 \text{ кВт/год}$$

7.2.5. Економія електроенергії навчальним закладом

Середня ціна електроенергії для освітніх установ = 4,5 грн кВт/год.

При власному споживанні 60 % виробленої енергії $T=4,5$ грн кВт год:

$$E_{вл}=39510 \cdot 4,5=177795 \text{ грн рік}$$

$$W_{вл}=0,6 \cdot 65850=39510 \text{ кВт год}$$

7.2.6. Загальний економічний ефект

$$W_{\Sigma}=E_{вл}+E_{np}$$

$$E_{\Sigma}=177795+137000=314795 \text{ грн/рік}$$

Річні експлуатаційні витрати

Приймаємо експлуатаційні витрати на рівні 3 % від капітальних:

$$C_{експ}=0,03 \cdot 1423700=42711 \text{ грн/рік}$$

7.3. Окупність проєкту

Чистий річний прибуток:

$$P=E_{\Sigma}-C_{експ}=314795-42711=272084 \text{ грн/рік}$$

Термін окупності:

$$T_{ок} = \frac{C_{к}}{P} = \frac{1423700}{272084} \approx 5,2 \text{ роки}$$

Окупність $\approx 5,2$ роки — це дуже високий показник.

7.4. Перспективний економічний ефект майстерень

Комплексна станція забезпечує:

- безкоштовне живлення лабораторій;
- можливість створення майстерні з ремонту с/г техніки;

- майстерню з відновлюваних систем (інвертори, АКБ, СЕС);
- можливість проводити сертифікаційні навчання;
- зниження навантаження на університетську мережу;
- формування навчальної енергетичної новезни.

Очікуваний непрямий ефект: 120–180 тис. грн/рік (за рахунок економії, навчань, грантів другого етапу).

Висновок до розділу Впровадження комплексної фото-вітрової системи потужністю 40 кВт для приміщення ІТФ є технічно та економічно обґрунтованим.

Система забезпечує: річну генерацію 47 МВт·год. Прямий економічний ефект ≈ 347 тис. грн/рік.

Окупність за 5,2 роки завдяки грантовій програмі та іншим спонсорським установам.

Підвищення енергетичної незалежності університету та можливість розвитку лабораторій та майбутніх майстерень.

Зменшення викидів CO₂ на 38–40 т/рік.

Даний комплекс стає стратегічним елементом розвитку факультету та навчальної інфраструктури.

З головними питаннями процесу оптимізації режиму роботи комплексної системи енергопостачання можна ознайомитися в Додатку.

8. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

8.1. Загальні положення

Охорона праці є невід'ємною частиною загальної системи управління діяльністю навчального закладу (навчально - виробничого приміщення) та спрямована на створення безпечних умов роботи для персоналу, здобувачів вищої освіти і технічних працівників, які залучені до експлуатації енергетичних систем [21]. Основною метою охорони праці є забезпечення безпечного функціонування обладнання, зниження ризику аварій та травматизму, а також збереження життя, здоров'я та працездатності людей у процесі виконання професійних обов'язків.

Впровадження комплексної системи енергопостачання, що поєднує сонячні панелі, вітроустановку та дизельну електростанцію, передбачає роботу з електричними установками, елементами підвищеної небезпеки та складними автоматизованими пристроями. Тому дотримання правил техніки безпеки та охорони праці є обов'язковою умовою при експлуатації, обслуговуванні та ремонті такого обладнання.

8.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час експлуатації системи енергопостачання навчального корпусу можуть діяти наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

Електричний струм — небезпека ураження при роботі з електроустановками змінного та постійного струму, зокрема при обслуговуванні сонячних інверторів, розподільчих щитів, акумуляторних батарей.

Висока температура — при роботі дизельної електростанції виникає нагрівання двигуна, вихлопних систем, мастил та охолоджувальних рідин. Хімічні фактори — контакт із паливом, мастильними матеріалами, електролітом акумуляторів, що може спричинити опіки або подразнення шкіри [22].

Шум і вібрація — при роботі дизельної установки рівень шуму може перевищувати допустимі норми, що потребує використання засобів індивідуального захисту.

Механічні фактори — ризик травмування при роботі з рухомими частинами генераторів, приводів або монтажем конструкцій сонячних панелей, вітротурбіни.

Мікрокліматичні фактори — перегрівання або переохолодження при роботі на відкритих дахах, де розташовані сонячні модулі та вітроелектрична турбіна.

Пожежна небезпека — можливість займання електрообладнання або пального при порушенні правил експлуатації.

8.3. Вимоги безпеки під час монтажу та експлуатації сонячних панелей

1. Монтаж фотоелектричних модулів має виконуватися тільки підготовленими працівниками, які пройшли інструктаж із техніки безпеки.
2. Під час робіт на висоті обов'язкове застосування страхувальних поясів, касок, взуття з нековзною підошвою.
3. Електричні з'єднання виконуються при відключеній напрузі. Забороняється торкатися відкритих провідників під час роботи.
4. Усі металеві конструкції повинні бути заземлені відповідно до вимог ПУЕ (Правила улаштування електроустановок).
5. Для запобігання ураженню електричним струмом корпуси інверторів, контролерів заряду та акумуляторних батарей також підлягають заземленню.
6. Необхідно забезпечити природну або примусову вентиляцію приміщення з інверторним обладнанням для уникнення перегріву.
7. Забороняється працювати з обладнанням під час дощу, снігопаду або високої вологості без спеціального захисту.

8.4. Вимоги безпеки при експлуатації вітроустановки

Експлуатація вітроенергетичних установок (ВЕУ) пов'язана з низкою специфічних небезпек, що виникають унаслідок роботи механічних, електротехнічних та висотних елементів обладнання [17]. Для забезпечення безпечної роботи персоналу та надійної роботи обладнання необхідно дотримуватися комплексу організаційних, технічних та технологічних вимог.

1. Загальні вимоги безпеки

Експлуатація ВЕУ повинна здійснюватися персоналом, який пройшов професійну підготовку, інструктаж з охорони праці й допуск до роботи з електроустановками відповідної групи.

Працівники повинні бути ознайомлені з конструкцією турбіни, алгоритмами її роботи та аварійного відключення.

На місці встановлення ВЕУ потрібно забезпечити інформаційні таблички:

- небезпека ураження струмом;
- заборона доступу сторонніх осіб;
- попередження про небезпеку падіння льоду чи елементів конструкції.

2. Вимоги до території та робочої зони. Навколо щогли вітроустановки створюється зона безпеки не менше 1,1–1,5 висоти башти, у межах якої забороняється знаходження сторонніх осіб.

Під час можливого обмерзання лопатей у зимовий період встановлюють додаткові пости попередження про небезпеку падіння льодових фрагментів.

Підходи до ВЕУ повинні бути очищені та утримуватися в безпечному стані, а нічний час – освітлені.

3. Електробезпека. Елементи електротехнічної частини (генератор, контролер, інвертор, кабельні лінії) мають бути заземлені відповідно до чинних нормативів.

Робота з обладнанням під напругою заборонена. Усі обслуговування виконуються після повного відключення та блокування системи.

Доступ у силові шафи дозволений тільки електротехнічному персоналу з групою допуску не нижче III.

Необхідно регулярно контролювати стан ізоляції кабелів, працездатність блискавкозахисту та заземлення.

4. Механічна безпека. Під час обслуговування заборонено перебувати під лопатями або в зоні їх можливого обертання.

Всі рухомі частини (лопати, вал, муфти) повинні бути оснащені захисними елементами або огороженнями.

Перед початком робіт необхідно активувати систему гальмування та перевести турбіну в режим технічного обслуговування.

Не допускається проведення робіт при поривах вітру понад 10–12 м/с.

5. Вимоги до експлуатації висотних конструкцій. Робота на щоглі виконується лише з використанням сертифікованих засобів індивідуального захисту (ЗІЗ): страхувальні системи, карабіни, каски, захисні ремені.

Підйом і спуск здійснюється виключно по штатних драбинах із захистом від падіння.

Роботи у вітрову погоду, під час грози, туману або ожеледиці заборонені.

Під час перебування працівника на висоті нижче повинна бути огорожена зона нульового доступу.

6. Пожежна безпека. У всіх шафах керування ВЕУ мають бути передбачені автоматичні вимикачі, термозахист і датчики нагріву.

У підніжжі щогли розміщуються порошкові вогнегасники не менш ніж 5 кг.

Заборонено зберігати легкозаймисті матеріали в зоні обслуговування ВЕУ.

У разі виникнення пожежі на висоті евакуація працівників проводиться за аварійними процедурами.

7. Аварійні ситуації та порядок дій персоналу. При появі нетипових шумів, вібрацій, зміщення лопатей або запаху гару ВЕУ негайно зупиняється та виводиться з роботи.

Під час буревію автоматично спрацьовує система захисту від перевантаження (стопор або аеродинамічне гальмо).

Інструкція з аварійного зупинення повинна бути розміщена у доступному місці.

Усі аварії фіксуються у журналі, а повторний запуск турбіни можливий лише після огляду.

8. Організаційні заходи безпеки. Усі регламентні роботи проводяться за нарядом-допуском. Періодичні огляди обладнання здійснюються не рідше одного разу на 6 місяців. Персонал щорічно проходить інструктаж та перевірку знань з охорони праці. Повинна бути розроблена локальна інструкція з експлуатації саме тієї моделі ВЕУ, яка використовується в комплексній станції [17].

Висновок до підрозділу Дотримання вимог безпеки під час експлуатації вітроустановки дозволяє мінімізувати ризики для персоналу, забезпечити безперебійну роботу обладнання, продовжити ресурс турбіни та запобігти аварійним ситуаціям. У навчальних і виробничих об'єктах, таких як корпус ІТФ, системи ВЕУ повинні експлуатуватися з особливою увагою до регламентів, оскільки безпечність та надійність є ключовими умовами сучасної енергоефективної інфраструктури.

8.5. Вимоги безпеки при експлуатації дизельної електростанції

1. Дизельна електростанція має розміщуватися в окремому, добре вентиляваному приміщенні або контейнері з шумоізоляцією [22].
2. Перед запуском перевіряють рівень палива, мастила, охолоджувальної рідини та справність систем сигналізації.
3. Забороняється зберігати пальне в безпосередній близькості до нагрітих поверхонь, вихлопних труб або джерел відкритого полум'я.
4. При заправці необхідно користуватися засобами індивідуального захисту: рукавицями, захисними окулярами, спецодягом.
5. Для уникнення отруєння вихлопними газами приміщення повинно бути обладнане витяжною вентиляцією.
6. Електричне підключення дизельної станції має здійснюватися тільки при повному відключенні навантаження, із використанням автоматичного вводу резерву (АВР).

7. Регулярно проводяться перевірки систем захисту, заземлення та автоматичних вимикачів.

8.6. Організаційні заходи безпеки

Персонал, який обслуговує енергетичні установки, повинен мати групу з електробезпеки не нижче III.

Усі працівники зобов'язані проходити первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктаж з охорони праці.

Не рідше одного разу на рік проводяться навчання та перевірка знань правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Місця встановлення обладнання мають бути позначені попереджувальними знаками («Небезпечно: електрична напруга!», «Заборонено вхід стороннім»).

Усі працівники повинні мати доступ до плану евакуації та знати порядок дій при виникненні пожежі або короткого замикання.

8.7. Пожежна безпека

Для систем енергопостачання навчального закладу пожежна безпека забезпечується такими заходами [23]:

Встановлення вогнегасників порошкового або вуглекислотного типу біля електрощитів, акумуляторних приміщень і дизельної станції.

Заборона куріння, використання відкритого вогню або нагрівальних приладів у зоні зберігання пального.

Регулярна перевірка цілісності електропроводки, автоматичних вимикачів, запобіжників.

Використання негорючих матеріалів для облицювання приміщень енергетичного блоку.

Організація постійного контролю температури обладнання та спрацьовування аварійної сигналізації у разі перевантаження.

8.8. Охорона праці здобувачів і технічного персоналу

У рамках навчального процесу на території корпусу та гуртожитків студентам дозволяється ознайомлення з роботою систем енергопостачання лише під наглядом викладача або інженера енергетичної служби. Категорично забороняється самостійне втручання у схеми керування, відкриття шаф керування або підключення додаткових споживачів [11].

Працівники, які здійснюють технічне обслуговування сонячних панелей і дизельної станції, повинні проходити щорічний медичний огляд та перевірку знань правил безпеки. Забезпечується видача сертифікованих засобів індивідуального захисту: касок, рукавиць, взуття з діелектричною підошвою, захисних окулярів.

8.9. Екологічна безпека

Екологічна безпека є важливою складовою частиною системи охорони праці та раціонального природокористування, оскільки впровадження комплексного енергопостачання із залученням поновлюваних джерел енергії спрямоване не лише на енергетичну автономію об'єкта, а й на зменшення негативного впливу на довкілля. У межах вищого навчального закладу, де функціонують сонячні фотоелектричні установки та дизельна електростанція резервного живлення, особливу увагу приділяють дотриманню екологічних норм, вимог ДСТУ та законодавства України у сфері охорони навколишнього середовища.

Основними екологічними аспектами експлуатації енергетичних установок є:

- скорочення викидів шкідливих речовин в атмосферу;
- раціональне використання енергоресурсів;
- правильне поводження з відходами паливно-мастильних матеріалів;
- утилізація відпрацьованих акумуляторів та електронних компонентів;
- зниження шумового навантаження та теплового забруднення навколишнього середовища.

Сонячна електростанція (сонячна інсоляція) відноситься до найбільш екологічно чистих видів енергії, оскільки під час виробництва електроенергії не утворюються шкідливі викиди, пил, сажа, оксиди азоту чи вуглецю. Вплив на навколишнє середовище обмежується лише етапами виробництва та утилізації фотоелементів.

Для мінімізації екологічного впливу під час експлуатації сонячних модулів у навчальному закладі передбачають:

- регулярне очищення панелей без застосування агресивних хімічних речовин, щоб уникнути потрапляння шкідливих реагентів у дощову каналізацію;
- заборону скидання стічних вод із поверхні панелей у відкриті водойми без очищення;
- використання екологічно безпечних технологій утилізації пошкоджених або старих фотоелементів через ліцензовані підприємства;
- контроль герметичності та цілісності корпусів панелей, які містять полімери, скло та кремній, щоб запобігти потраплянню шкідливих речовин у навколишнє середовище.

Незважаючи на переваги дизельних електростанцій у забезпеченні резервного живлення, вони залишаються джерелом викидів шкідливих речовин, серед яких — оксиди азоту (NO_x), вуглець (CO), сажа, сірчисті сполуки та вуглеводні. Для зниження рівня негативного впливу застосовуються саме такі заходи [25]:

1. Використання високоякісного дизельного палива з низьким вмістом сірки.
2. Встановлення каталітичних нейтралізаторів у системі вихлопу двигуна для зниження концентрації шкідливих викидів.
3. Обладнання приміщення дизельної станції ефективною системою вентиляції, що забезпечує видалення вихлопних газів і попереджає їх накопичення.
4. Регулярне технічне обслуговування двигуна та системи паливоподачі для забезпечення стабільного згоряння палива.
5. Утилізація відпрацьованих мастил і фільтрів у спеціалізованих пунктах збору небезпечних відходів відповідно до вимог ДСТУ 3215-95.

6. Забезпечення герметичного зберігання дизельного палива у резервуарах, обладнаних піддонами для збору можливих протікань, щоб уникнути потрапляння палива в ґрунт або каналізацію.

Розберемо питання щодо зменшення шумового та теплового впливу. Під час роботи дизельної установки виникає підвищений рівень шуму (до 80–100 дБ) і теплове випромінювання, тому дизельна станція розміщується у звукоізовованому приміщенні з теплоізоляційними екранами. Додатково можуть застосовуватися акустичні панелі та глушники вихлопу [25].

Щодо комплексного підходу до екологічної безпеки - комплексна система енергопостачання навчального закладу має на меті мінімізувати вплив на довкілля шляхом:

- збільшення частки сонячної енергії у структурі споживання;
- автоматизованого керування навантаженням для зменшення споживання палива;
- застосування енергоефективних технологій освітлення та вентиляції;
- моніторингу параметрів роботи систем із фіксацією екологічних показників.

Загалом, реалізація проєкту дозволяє зменшити викиди вуглекислого газу, підвищити енергоефективність і сприяє сталому розвитку навчального закладу як оптимізованого енергоекологічного об'єкта нового покоління [25].

Висновки до розділу У результати проведеного аналізу встановлено, що ефективне функціонування системи енергопостачання вищого навчального закладу, яка поєднує поновлювані джерела енергії та дизельну електростанцію, можливе лише за умови суворого дотримання вимог охорони праці, техніки безпеки та екологічних норм.

Забезпечення безпечних умов праці персоналу, належна організація експлуатаційних процесів, використання сертифікованих засобів індивідуального захисту та контроль технічного стану обладнання дозволяють знизити ризики аварій, електротравм і пожеж. Усі роботи, пов'язані з

електричними установками, мають виконуватися виключно підготовленими фахівцями з відповідною групою допуску.

Важливим напрямом є дотримання екологічних принципів експлуатації: утилізація відходів, скорочення шкідливих викидів, контроль рівня шуму, запобігання забрудненню повітря, ґрунту та водних ресурсів. Перехід до використання відновлюваної енергетики сприяє покращенню екологічного стану навколишнього середовища, зменшенню «вуглецевого сліду» та формує відповідальний підхід до енергоспоживання в освітньому середовищі [25].

Застосування системи сонячних панелей і дизельного резервного джерела забезпечує енергетичну надійність, автономність і сталість енергопостачання навчального закладу, водночас підтримуючи високий рівень безпеки праці та екологічної відповідальності.

Таким чином, комплексний підхід до організації охорони праці, техніки безпеки та екологічного менеджменту є запорукою безпечного, ефективного й екологічно збалансованого функціонування автономної енергетичної системи сучасного вищого навчального закладу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано повний комплекс досліджень, спрямованих на створення оптимізованої системи автономного електропостачання для приміщення інженерно-технологічного факультету у Сумському регіоні. Робота охоплює теоретичні, аналітичні та практичні аспекти проєктування, моделювання та впровадження гібридних енергетичних систем на основі сонячної та вітрової генерації.

Одним з основних результатів є глибокий аналіз природних енергетичних ресурсів Сумської області, який включає:

- оцінку вітрових потенціалів за середньорічними швидкостями вітру та висотною залежністю;
- детальний аналіз сонячної інсоляції з побудовою добових і сезонних графіків;
- визначення можливостей гідроенергетичної оптимізації та інтеграції гідроенергії у комбіновані системи;
- формування математичних моделей генерації у реальних кліматичних умовах регіону.

Завдяки цьому встановлено оптимальні параметри фото- та вітроустановок, визначено необхідний обсяг накопичення та засоби резервування. Результати оптимізації дозволили створити систему, яка:

- забезпечує повне покриття навантаження приміщення факультету, включаючи лабораторії та проєктовані майстерні;
- мінімізує необхідну частку дизельного резерву;
- працює стабільно навіть за низьких зимових рівнів інсоляції;
- забезпечує найбільшу економічну ефективність у кліматичних умовах Сумщини.

Також у роботі розроблено структурні, функціональні та принципові електричні схеми, виконано підбір обладнання з урахуванням сучасних світових стандартів, інтегровано заходи безпеки та алгоритми автоматизації.

Техніко-економічне обґрунтування показало, що оптимізована система:

- скорочує витрати на електроенергію;
- забезпечує окупність протягом ~5,2 років;
- дозволяє залучати грантові кошти на розвиток наукової та лабораторної бази;
- забезпечує університету енергетичну автономність та формує імідж сучасного закладу освіти.

Таким чином, поставлена мета – розробити оптимізовану фото-вітрову систему автономного електропостачання для Сумського регіону – виконана повністю. Результати дослідження можуть бути використані для подальшої модернізації енергетичної інфраструктури університету, розвитку освітніх програм та практичного навчання здобувачів спеціальностей енергетичного та агроінженерного профілю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Мартич В. І. Вітроенергетика: організаційно-правові аспекти. Київ: Видавничий центр КНЕУ, 2014. 176 с.
2. Біжковський В. М. Альтернативна енергетика: відновлені джерела енергії. Київ: Видавничий дім «Слово», 2017. 448 с.
3. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 15-16 травня 2019 р.). – К.: Інтерсервіс, 2019. – 952 с.
4. Лось Л. В., Терлецький М. Д. Перспективна альтернативна енергетика. Вісник Житомирського національного агроекологічного університету. 2013. № 1(1). С. 203–214.
5. Про альтернативні джерела енергії: Закон України. Редакція від 01.08.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text>
6. Integrating Renewable Energy: Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids by Lawrence E. Jones. Academic Press, 2014. 65p.
7. Renewable Energy Systems: An Intelligent Energy Systems Approach to Selecting and Modeling 100% Renewable Solutions by Henrik Lund. Academic Press, 2014. 354p.
8. Zohuri B., Hybrid Renewable Energy Systems, Springer International Publishing AG 2018, URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70721-1_1, University of New Mexico, USA
9. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Циценков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
10. Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру : навч. посіб. / С. В. сиротюк, В.М. Боярчук, В. П. Гальчак. – Львів : «магнолія 2006», 2018. – 182 с
УДК 349.24:620.97 О. М. Пархоменко, Харківська національна академія міського господарства.

11. Серіков Я.О., Пархоменко О.М. Виробничий травматизм та професійні захворювання на вітроелектричній станції / Зб.тез «Охорона праці та соціальний захист працівників». - К.; 2008., с.4

12. ДБН В.2.5-23:2010. "Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення".

13. Державна стратегія розвитку відновлюваної енергетики до 2030 року: Указ Президента України від 08.05.2017 р. № 142/2017. Офіційний вісник України. 2017. № 43. Ст. 1221.

14. Енергоефективність і використання відновлених джерел енергії: посібник. за ред. проф. Коваленка І.В. Київ: Наукова думка, 2014. 312 с.

15. Воржакова Ю. П., Пономаренко В. С. Розвиток та підвищення енергоефективності підприємств України. Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи. 2020. URL: <http://confmanagement.kpi.ua/proc/article/view/201148>

16. Основи вітроенергетики: підручник/Г.Півняк, Ш. Шкрабець, О. Нойбергер, Д. Циценков; М-во освіти і науки України, нац. гірн. універ. Д.: НГУ, 2015.- 335 с.

17. Альтернативні джерела енергії . Енергія вітру: навч. посібн./С.В. Сиротюк, В.М. Боярчук, В.П. Гальчак.- Львів: «Магнолія 2006», 2018. 182 с.

18. Головка В.М., Якубінська Л.Г. Апарати керування та захисту. Ніжин: "Аспект".-2010-135с.

19. Мазур В. П., Губінський С. В., Стадник В. А. Електроніка та мікропроцесорна техніка: Навчальний посібник. К.: Видавництво КНУТД, 2019. 288 с.

20. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Форт, 2017. – 760 с.

21. Нормативно-правові акти з охорони праці при автоматизації та впровадження інформаційних технологій [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0266-10>

22. Гігієнічні нормативи ГН 3.3.5-8-6.6.1-20014. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості т1. Цілі сталого розвитку.

23. Серіков Я.О., Пархоменко О.М., Виробничий травматизм та професійні захворювання на вітроелектричній станції/Зб. тез «Охорона праці та соціальний захист працівників». –К.; 2008. с. 4

24. Ціль 7: відновлювана енергія. URL:
<https://www.ua.undp.org/content/ukraine/uk/home/sustainable-development-goals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>рудового процесу. 08.04.2014.

25.Третьякова Л.Д. Засоби індивідуального захисту: виготовлення та застосування / Литвиненко Г.Є., Третьякова Л.Д. – К.: Лібра, 2008. – 317 с.

Мягченко О. П. М 99 Основи екології. Підручник. – К.: Центр учбової літератури, 2010. – 312 с.

26. Шишкіна І. О. Альтернативні джерела енергії світового ринку: сучасний стан та перспективи. Економіка промисловості. 2012. № 1–2. С. 103–109

27. Козловський В.О. Техніко-економічні обґрунтування та економічні розрахунки в дипломних проектах та роботах. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – 75 с.

38. Економіка підприємства: Підручник: у 3 т./ за ред. А. В. Непрана, І. Ю. Шевченко. Харків: Видавництво Іванченка І. С., 2024, Т. 1, 537 с.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

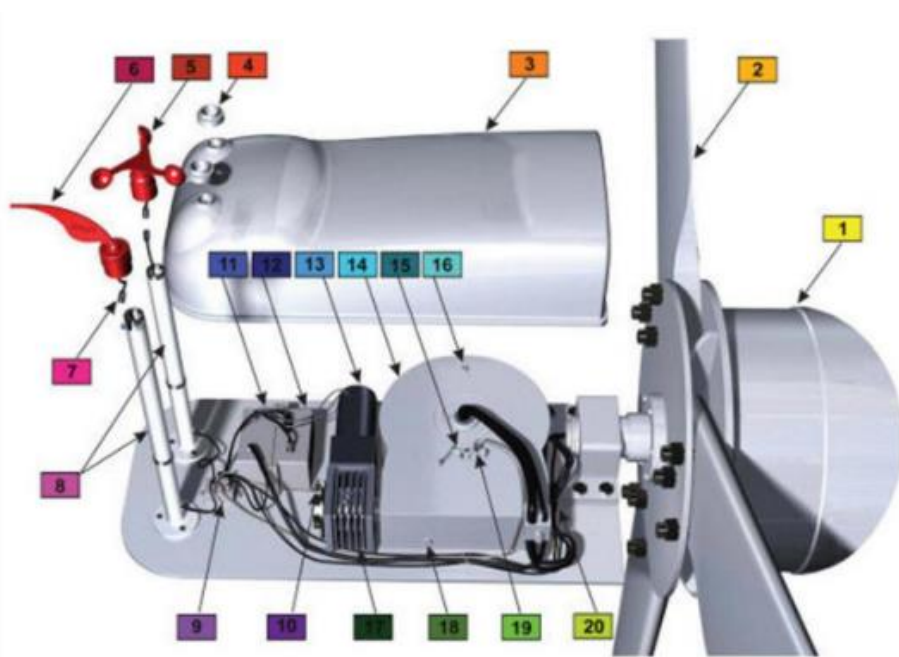


Рисунок 3.1.1 – Конструкція вітрогенератора серії WH

Позначення, що зображені на рисунку 3.1.1 :

1. корпус генератора на постійних магнітах;
2. лопаті;
3. захисний корпус хвостовика;
4. ущільнювальна кришка;
5. анемометр;
6. датчик напрямку вітру (флюгер);
7. з'єднувальний роз'єм флюгера;
8. опори кріплення анемометра і флюгера;
9. розподільчий блок;
10. датчик кута повороту хвостовика;
11. блок живлення;
12. блок керування;
13. DC24V мотор регулювання напрямку;
14. редуктор;
15. перемикач;
16. отвір для заливки масла;
17. передавальний механізм редуктора;
18. отвір для зливу масла;
19. датчик нульового кута;
20. блок клем.

ДОДАТОК Б



Рисунок 6.1 – Аспекти отримання «зеленого тарифу»