

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інженерії та енергетики  
Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної  
екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

**СУКМАНЮК ВЯЧЕСЛАВ ВАСИЛЬОВИЧ**

УДК 621.311.243

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

### **Застосування альтернативних джерел енергії для забезпечення безперебійної роботи транспортної інфраструктури**

(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр  
кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело \_\_\_\_\_

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи  
Денисюк Анатолій Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

## АНОТАЦІЯ

**Сукманюк В.В.** Застосування альтернативних джерел енергії для забезпечення безперебійної роботи транспортної інфраструктури. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

В кваліфікаційній роботі проведений спосіб використання альтернативних джерел енергії. Наведена загальна характеристика сонячних панелей та проведений аналіз конструкцій вітроустановок. Описані перспективи забезпечення автомобільних доріг альтернативними джерелами електричної енергії.

Обґрунтовано використання альтернативної енергії в системі електропостачання та наведено принцип роботи гібридної електроустановки. Здійснений розрахунок параметрів автономного енергоспоживання гібридною енергетичною установкою.

Запропоновано оригінальний спосіб забезпечення енергонезалежності дорожньо-транспортної інфраструктури, що заснований на перетворенні енергії транспортних засобів, що проїжджають повз.

Описана технічна реалізація гібридної енергоустановки. Здійснено порівняльний аналіз ефективності застосування генераторів для заряджання акумуляторних батарей.

**Ключові слова:** гібридна електроустановка, альтернативні джерела, розробка, транспортна інфраструктура.

## ABSTRACT

**Sukmaniuk V.** Supply of alternative energy sources to ensure uninterrupted operation of transport infrastructure. Qualification work for obtaining Master's Degree in specialty 141 - Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics. – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The qualification work presents methods for using alternative energy sources. A general characteristic of solar panels is given and an analysis of wind turbine designs is carried out. The prospects for providing roads with alternative sources of electrical energy are described.

The use of alternative energy in the power supply system is justified and the principle of operation of a hybrid power plant is given. The parameters of autonomous energy consumption by a hybrid power plant are calculated.

An original method of ensuring energy independence of road and transport infrastructure is proposed, which is based on the converted energy of vehicles passing by.

The technical implementation of a hybrid power plant is described. A comparative analysis of the effectiveness of using generators for charging batteries is carried out.

Key words: hybrid power plant, alternative engines, distribution, transport infrastructure.

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	7
1.1. Загальна характеристика сонячних батарей	7
1.2. Аналіз конструкцій вітроустановок	11
1.3. Перспективи забезпечення автомобільних доріг альтернативними джерелами електричної енергії	16
1.4. Висновки по першому розділу	18
РОЗДІЛ 2. ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ В ГІБРИДНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	19
2.1. Принцип роботи гібридної електроустановки	19
2.2. Транспортне навантаження на трасі М-06 (Київ-Чоп, Північний об'їзд м. Житомира)	22
2.3. Розрахунок параметрів автономного енергоспоживання гібридною енергетичною установкою	23
2.4. Висновки по другому розділу	29
РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ	30
3.1. Порівняльний аналіз ефективності застосування генераторів для заряджання акумуляторних батарей	30
3.2. Опис схеми підключення модулів до спільної мережі	33
3.3. Результати розрахунку гібридної енергоустановки	37
3.4. Висновок по третьому розділу	39
ВИСНОВКИ	40
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	41

## ВСТУП

У світі важко уявити життя людини без дорожньо-транспортної інфраструктури. З кожним роком все більше і більше встановлюються та модернізуються системи освітлення, попередження та моніторингу порушень для комфортного та безпечного переміщення по дорогам загального користування. Для всього цього обладнання, забезпечує безперебійне функціонування даних систем потрібно чимало вироблення енергії.

Безумовно, традиційне вироблення енергії негативно діє на природу, що оточує людину. Так само при використанні традиційних методів для вироблення електричної та теплової енергії потрібні корисні копалини (вугілля, нафта, газ), які у свою чергу є вичерпними ресурсами. Інакше кажучи, при використанні традиційних методів вироблення енергії, незабаром люди зіткнуться з проблемою нестачі з корисними копалинами, а відтак енергетичною кризою. Також важливим аспектом для пошуку нових альтернативних джерел є парниковий ефект у зв'язку з проблемою глобального потепління.

Виходячи з цього, виникає потреба для вирішення низки питань та завдань, основним з яких є розробка абсолютно нових джерел альтернативної енергії для забезпечення автономності дорожньо-транспортної інфраструктури.

Розробка нових альтернативних джерел енергії є найбільш вагомим при вирішенні питань забрудненням навколишнього середовища, внаслідок вироблення електричної та теплової енергії.

Альтернативні джерела електричної енергії використовують природні відновлювані джерела енергії, такі як: сонце, вітер, геотермальна енергія (тепло з надр землі), енергія припливів та відливів.

Важливим моментом застосування альтернативних джерел електричної енергії є неможливість або висока утрудненість прокладки ліній електричної передачі через велику віддаленість або різних природних факторів.

Останнім часом дедалі більше альтернативних джерел енергії знаходять своє застосування в дорожній інфраструктурі, для живлення електроприймачів малої потужності. Це пов'язано з тим, що останнім часом встановлення вітрогенератора або сонячної панелі обходиться дешевше, ніж прокладання ліній електропередач.

Отже, **метою даної роботи** є визначення ефективності застосування альтернативних джерел енергії, що створюються потоком транспортних засобів, для забезпечення енергонезалежності дорожньо-транспортної інфраструктури.

Для вирішення цієї мети необхідно виконати низку завдань:

1. Провести аналіз технічних рішень при розробці автономного джерела енергії.
2. Вибрати обладнання, що реалізує принципи автономності живлення електроприймачів.
3. Запропонувати конструкцію автономного джерела енергії.
4. Провести дослідження роботи та їх аналіз конструкції автономного джерела живлення.

**Об'єктом дослідження** автономні джерела енергії для забезпечення енергонезалежності дорожньої інфраструктури.

**Предметом дослідження** ефективність застосування відновлюваних джерел енергії задля забезпечення автономності дорожньо-транспортної інфраструктури.

**Публікації:**

Денисюк А.Ю., Сукманюк В.В. Аналіз конструкцій вітроустановок. Біоенергетичні системи: *Біоенергетичні системи*: матеріали ІХ міжн. наук.-практ. конф. 19-20 листопада 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. С. 48-54.

Сукманюк В.В. Загальна характеристика сонячний батарей. *Наукові читання – 2025*: збірник тез доповідей наук.-практ. конф. за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2. 85 С. 75-79.

Сукманюк В.В. Принцип роботи гібридної електроустановки. *Студентські читання–2025*: матеріали наук.-практ. конф. науково-педагогічних працівників та здобувачів вищої освіти факультету інженерії та енергетики. 30 жовтня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Т2. 85 с. С. 56-60.

Структура кваліфікаційної роботи. Дана робота складається з вступу, 3 розділів, висновків, містить 20 рисунків, 12 таблиць, списку використаних джерел (15 джерела). Основний текст викладено на 42 сторінках.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СПОСОБІВ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ**

На сьогоднішній день виконуються великі роботи, які допомагають забезпечити безпеку дорожнього руху на автомобільних трасах.

Важливою складовою безпеки дорожнього руху, особливо на аварійно-небезпечних ділянках є освітленість дорожнього полотна та прилеглої до неї узбіччя. Передача електричної енергії на аварійнонебезпечні ділянки, що знаходяться на великій відстані від енергетичної системи є великою проблемою з економічної точки зору. Дана проблема часто вирішується встановленням джерел енергії, які використовують відновлювані ресурси енергії.

Сонячна та вітряна енергетика є найбільш затребуваною та часто застосовується серед інших видів альтернативної енергії. У даних джерел, є свої позитивні та негативні якості.

Енергоефективність використання даних видів залежить від природних факторів, клімату, часових поясів та інші. Плюси та мінуси кожного альтернативного джерела електричної енергії індивідуальні, але існують кілька загальних позитивних і негативних властивостей.

Перевагою застосування відновлюваних джерел енергії є: екологічність, невичерпність ресурсів, доступність, широкий спектр поширення, високі перспективи розвитку у майбутньому.

Недоліками застосування відновлюваних джерел енергії є: відсутність стабільності, залежність від кліматичних та природних умов та часу доби, низький ККД (за винятком використання енергії води), висока вартість, мала потужність однієї установки [1-3].

### **1.1. Загальна характеристика сонячних батарей**

Використання сонячної електричної енергії є повною альтернативою енергії, що використовує від вичерпних видів палива, яка в свою чергу буде екологічною, безпечною для використання поблизу проживання людей. Енергія сонця лише 18 сонячних днів на всій поверхні Землі можна порівняти з усіма вичерпними запасами нафти, газу та вугілля. За межами атмосферного шару нашої планети енергія сонця містить близько  $1,3 \text{ кВт/м}^2$ . Третина енергії сонця відбивається шаром атмосфери назад у космос, на відміну від решти світла, яка рухається на поверхню Землі.

Середнє значення енергії щодо всієї поверхні нашої планети є 4200 Вт·год/м<sup>2</sup> за світловий день, це еквівалентно усередненому значенні 1 барелю нафти протягом року.

Функціонування сонячних панелей можна розбити на кілька етапів:

- поглинання кремнієвою поверхнею батареї фотонів сонячного світла;
- взаємодія фотонів з атомами кремнію. При цьому відбувається відрив електронів поверхні, що призводить до появи напруги. Вільні електрони під дією різниці потенціалів починають рухатися, в результаті чого утворюється електричний струм. Сонячна панель є напівпровідником, тому вона впорядковує струм в одному напрямі;

- перетворення отриманого електричного струму на постійний. На даному етапі енергія акумулюється в батареї і прямує до споживача [4].

На сьогоднішній день найбільш використовуваними батареями є полі- та монокристалічні, тонкоплівкові. Дані вироби мають відмінності за ККД, технологією виготовлення та зовнішнім виглядом.

У табл. 1.1 Наведені переваги та недоліки видів сонячних батарей.

Таблиця 1.1. Переваги та недоліки видів сонячних батарей

Плюси/мінуси	Вид сонячних панелей		
	монокристалічні	полікристалічні	тонкоплівочні
переваги	привабливий зовнішній вигляд, високий ККД	дешевизна	компактність, невелика вага, привабливий зовнішній вигляд
недоліки	дороговартісні	відносно низький ККД	відносно низький ККД

Енергоефективність кожного виду сонячних батарей та їх особливості у застосуванні полягає в тому, що кожен фотоелемент виготовляється на основі одного з напівпровідників, відповідального за трансформацію енергії сонця в електричну. Насправді часто використовують кремній. Характерною відмінністю кожного типу панелі є її колір, а саме:

- чорні осередки - монокристалічна панель;
- сині осередки – полікристалічна панель;
- тонкоплівкові панелі існують різних кольорів, їх характерною ознакою є гнучкість.

За конструкцією полі- та монокристалічні сонячні панелі однакові. З кремнієвих фотоелементів складаються ряди, а ті в свою чергу формують

панелі у вигляді прямокутників. Сонячні батареї мають скляний захист, а їх рамка є герметичною (рис. 1.1).

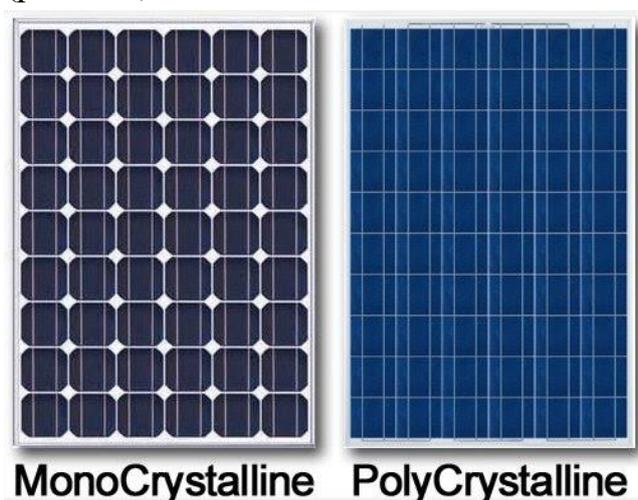


Рисунок 1.1. Вид моно- та полікристалічних сонячних батареї

В обох випадках використовується кремній, але його якість та форми відрізняються. Для монокристалічних панелей застосовують цільний кремнієвий кристал. Полікристалічні елементи збираються з невеликих фрагментів кремнію, переплавлених і спресованих між собою.

У даних випадках застосовується кремній, але його форма та якість відмінні один від одного. При виготовленні монокристалічних сонячних панелей використовують цільний крем'яний кристал, на відміну від полікристалічних, де застосовують спресовані та переплавлені між собою дрібні частинки кремнію.

У виробництві тонкоплівкових сонячних панелей застосовується інша технологія. При даній технології кремній знаходиться в некристалічній, аморфній формі. Далі гнучка основа покривається кремнієм у цій формі, та утворюється готова сонячна панель. Також для виготовлення тонкоплівкових сонячних панелей досить рідко використовуються індій, мідь, галій. На рис. 1.2 зображена тонкоплівкова сонячна панель.

На сьогоднішній день виготовляються оновлені моделі тонкоплівкових сонячних батареї, сировиною для виробництва якої є телурид кадмію, який значно енергоефективніший некристалічного (аморфного) кремнію.



Рисунок 1.2. Тонкоплівкові сонячні панелі

Існують моделі сонячних батарей із високим ККД, але їх вартість набагато дорожча, через застосування при їх виготовленні рідкісних дорогих металів. Але незважаючи на високу вартість, дані виробы присутні на ринку з високими характеристиками у своєму ціновому сегменті.

Але не кожна сонячна панель, виготовлена з дорогих та рідкісних металів здатна видавати високий ККД у порівнянні з кремнієвими сонячних панелей.

Органічні та полімерні фотоелементи є новим видом батарей, що перетворюють енергію сонця (рис. 1.3). Вперше виготовлення даних фотоелементів розпочалося близько 10 років тому. Але непогані результати у вивченні цієї технології вчені вже отримали.

Плівкова рулонна сонячна панель, товщиною всього 1 міліметр, виготовляється з фталоціаніну міді, вуглецевих фулеренів та деяких інших органічних сполук. На цих сонячних панелях ККД складає 14-15%, при цьому вартість даних технологій на порядок нижча ніж виготовлення сонячних панелей, що виготовлені на кристалах.

У тонкоплівкових рулонних сонячних панелей існує не вирішена проблема з деградацією органічних сполук. На даний момент не можна стверджувати про збереження такого ж високого ККД після експлуатації через кілька років.

У органічних сонячних панелей є низка переваг, що полягають у виготовлені їх з екологічних матеріали; легкість та нешкідливість утилізації; відносно дешеве виготовлення та гнучкість виробу.

Недоліком тонкоплівкових органічних сонячних панелей є відносно невисокий ККД та неоднозначний термін функціонування цього виробу.

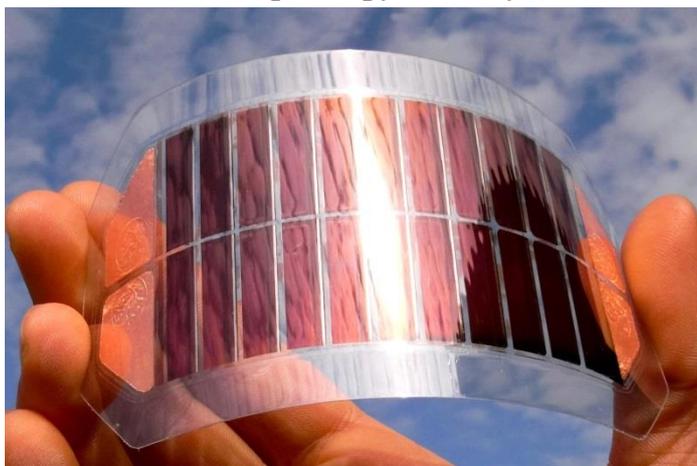


Рисунок 1.3. Органічна та полімерна сонячна батарея

## 1.2. Аналіз конструкцій вітроустановок

Існує два види конструкції вітрогенераторів [4]:

1. Горизонтально-осьові вітрогенератори. Майже всі вони пропелерного типу. Обертаючою силою даних вітроустановок є підйомна сила. Щодо вектора швидкості вітру вітроколеса в робоче положення може розташовуватися перед вежею або після неї. Усі сучасні установки такого виду орієнтовані на вітер.

2. Вертикально-осьові вітрогенератори. Вони не вимагають встановлення відповідно до орієнтації на вітер і в цьому їх суттєва перевага. Друга перевага – відсутня необхідність у спорудженні потужної вежі та можливість розташовувати всі механізми внизу.

До першого виду відносяться такі установки як малолопатеві швидкохідні, багатолопатеві тихохідні та вітрильні.

Малолопатеві вітродвигуни, показані на рис. 1.4. а, б, в, залежно від кількості використовуваних лопатей поділяються на однолопатеві, дволопатеві та трилопатеві.

Однолопатевим вітродвигунам характерна висока швидкість обертання і економічність. Однак незважаючи на те, що такі вітродвигуни мають високу віддачу на лопать, залишається відкритою проблема забезпечення статичного балансу конструкції, не кажучи вже про динамічну. Використання балансиру призводить до появи значного шуму та зниження аеродинамічних характеристик внаслідок аеродинамічного опору.

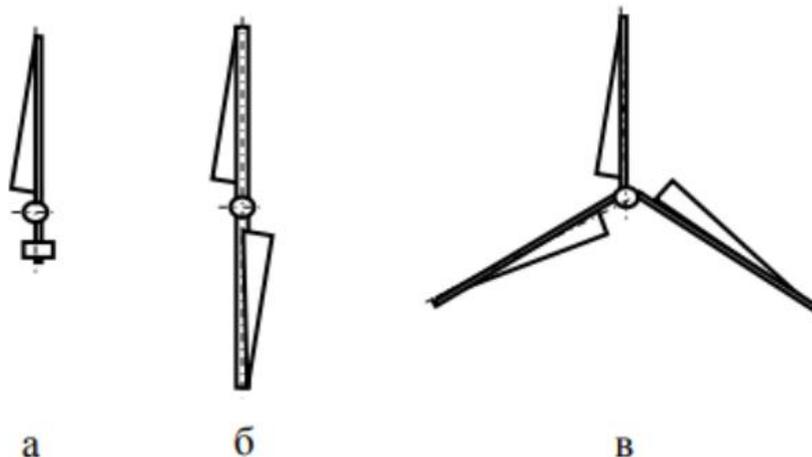


Рисунок 1.4. Малолопатеві ротори: а) однолопатевий (з противагою); б) дволопатевий; в) трилопатевий

Конструкція з двох лопатей так само не може забезпечити динамічний баланс через велику асиметрію, проте статичний баланс в даному випадку зберігається.

Ротор, що складається з трьох лопатей, є оптимальною конструкцією для вітроенергетичної установки [3].

Багатолопатеві установки, представлені на рис. 1.5, мають більше трьох лопатей (від 4 до 50), обертаються набагато повільніше малолопатевих, оскільки через велику кількість лопатей на них діє більший аеродинамічний опір, а швидкість падає. У цьому є їх основний недолік. Такі вітрогенератори мають великий початковий момент та їх застосування обмежено прямим з'єднанням з валом насоса чи інших механічних пристроїв.

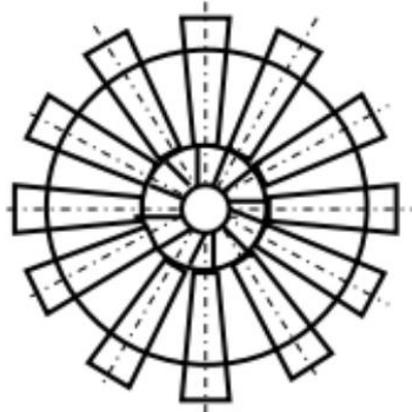


Рисунок 1.5. Багатолопатекий ротор

У вертикально-осьових вітроустановках вісь обертання ротора перпендикулярна вектору швидкості вітрового потоку.

У загальному випадку для вітродвигуна в якості активної поверхні, що сприймає енергію вітрового потоку використовують наступні види роторів:

- ротор Дар'є;
- ротор ортогонального типу (ротор Еванса);
- ротор карусельного типу, у якого неробочі лопаті або прикриваються ширмою, або встановлюються ребром проти вітру (ротор Масгрува);
- ротор Савоніуса.

На роботу вітроустановки з вертикально-осьовим ротором, так само, як і у горизонтально-осьовим ротором, впливають, аеродинамічна тінь опори та взаємне затемнення лопатей.

Обертаний момент на роторі Дар'є (рис. 1.6), створює аеродинамічні сили, що виникають під час обтікання повітряним потоком профіль крила. Вітродвигуни даного типу мають високу швидкохідність (лопаті рухаються в 2-4 рази швидше вітру), що є істотною перевагою при використанні вітроустановки для вироблення електроенергії. Також вони мають низьке значення коефіцієнта затінення (0,3) і досить високий коефіцієнт використання енергії вітру. Істотним недоліком таких вітродвигунів є те, що на не обертовому роторі Дар'є момент початку руху практично дорівнює

нулю, що потребує наявності спеціальних систем запуску. На сьогоднішній день конкурувати з найкращими горизонтально-осьовими роторами можуть лише ротори Дар'я. Вони порівняно прості за конструкцією, не вимагають додаткових механізмів орієнтації на вітер і обмеження розвиваємої потужності при швидкостях перевищують розрахункові. Крім того, при використанні таких вітроустановок для роботи в енергосистемах краще вирішується задача створення машин великого класу потужності [5,7].

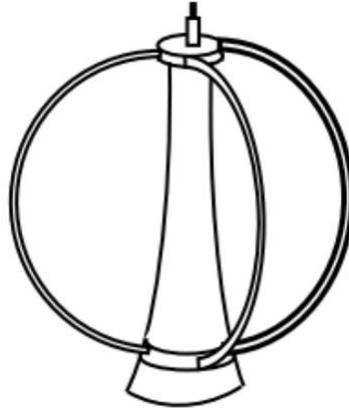


Рисунок 1.6. Ротор Дар'є

Відмінність в аеродинаміці дає карусельним установкам (рис. 1.7) перевагу в у порівнянні з традиційними вітрогенераторами. При збільшенні швидкості вітру вони швидко збільшують силу тяги, після чого швидкість обертання стабілізується. Карусельні вітродвигуни тихохідні, і це дозволяє використовувати прості електричні схеми, наприклад, з асинхронним генератором, без ризику зазнати аварії при випадковому пориві вітру. Тихохідність висуває одну обмежуючу вимогу – використання багатополосного генератора, що працює на малих частотах обертання. Такі генератори не мають широкого поширення, а використання мультиплікаторів неефективне через низький ККД останніх.

Ще більш важливою перевагою карусельної конструкції – це стежити за тим, звідки рухається потік вітру, що дуже суттєво для приземних потоків. Вітродвигуни подібного типу будуються у США, Японії, Англії, ФРН, Канаді.

Карусельний лопатевий вітродвигун найпростіший в експлуатації. Його конструкція забезпечує максимальний момент при запуску вітродвигуна та автоматичне саморегулювання максимальної швидкості обертання у процесі роботи. Зі збільшенням навантаження зменшується частота обертання і зростає крутний момент до повної зупинки.

У вітродвигунах системи Савоніуса, ротор обертається у горизонтальній площині, протікання потоку повітря через поверхні лопаті, відбувається абсолютно інакше, ніж у карусельних вітродвигунів [6].

Потік повітря (рис. 1.8) проходить по опуклій поверхні А і діє повною силою  $F$  на вигнуту поверхню, огинає її, створюючи додаткову силу  $F$ , що обертає ротор. Коефіцієнт використання енергії вітру ротором Савоніуса приблизно вдвічі вищі, ніж у карусельних вітродвигунів.

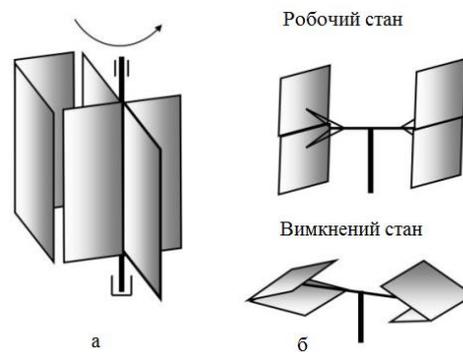


Рисунок 1.7. Схема ротора карусельного типу: а) із ширмою; б) зі складною лопаттю

Ротор Савоніуса придатний для невеликих потужностей (менше 0,7 кВт в одному агрегаті при швидкості вітру до 8 м/с.

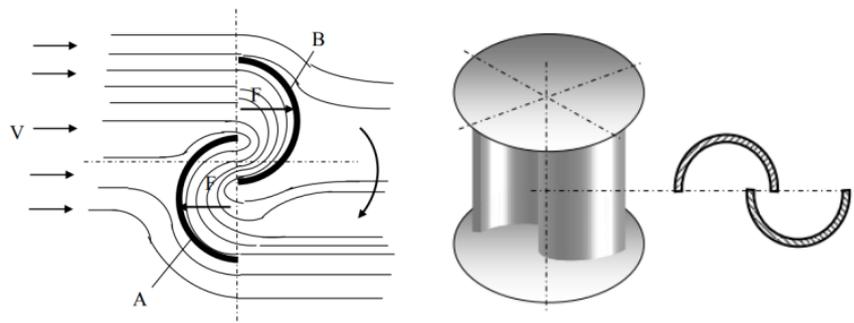


Рисунок 1.8. Ротор Савоніуса

Головною перевагою даної установки в порівнянні з горизонтально-осьовою є відсутність прив'язаності до напрямку вітрового потоку, адже навіть при різких поривчастих змінах напрямку вітру даний вітряк здатний перетворювати кінетичну енергію вітру в електричну. Але в даній установці також існують і недоліки, а саме слабе застосування енергії вітрового потоку, через дуже вузьку робочу площину лопатей (чверть обороту), яка використовує лише одну третину енергії повітряного потоку.

Залежно від способу управління, енергетичної системи, планованої до підключення вітроустановки, мети та умов функціонування вітроустановки поділяються на три класи: А, В, С.

До класу А входять вітроустановки, призначені для автономної роботи з одним генератором, які функціонують окремо від енергетичної системи. Дані установки застосовуються для живлення маяків, систем освітлення та попередження, зв'язку тощо. Потужність таких установок зазвичай не

перевищує 5 кВт. У деяких випадках, наприклад, для систем опалення, можуть використовуватися потужніші агрегати близько 20 кВт. Для функціонування таких систем та підтримання їх автономної роботи, використовують різні типи вітрогенераторів, загальна вартість яких більшою мірою залежить від керуючої системи установки. Якість електричної енергії, що виробляється і подається в таких системах зазвичай досягається шляхом застосування інверторів, на тиристорній або транзисторній основі, що живляться від акумуляторних батарей. Так само іноді підтримання якості електричної енергії може бути досягнуто шляхом застосовуючи електричне або механічне керування лопатями ротора (вітроколеса) для стабілізації його швидкості. Використання електричної стабілізації швидкості більш ефективна, тому що лопаті ротора функціонують у номінальному режимі, підтримуючи його постійну швидкість за рахунок варіювання електричного навантаження на стороні виходу генератора (із застосуванням навантаження у вигляді баласту), а з використанням інноваційних органів управління дана технологія дозволяє забезпечити більшу надійність та дешевизну.

Вітряні електричні установки класу В використовують приблизно однакову частку вітроустановок у співвідношенні з дизельними генераторами. Даний клас найчастіше застосовується для невеликих енергетичних систем у районах, де відсутня центральна енергетична система або прокладання ліній електричної передачі утруднено чи неможливо.

Для досягнення якості електричної енергії вітряні електричні установки використовують ті самі методи, що і в класі А, але також існують інші засоби, наприклад, запасання електричної енергії шляхом АКБ, що гідроакумуляуючих станцій, водневих перетворювачів тощо.

Вітряні енергетичні установки класу С підключені до паралельної роботи із системою, потужність якої значно перевищує вироблену вітроустановкою. Цей клас при розвитку вітряної енергетики в майбутньому вплине на вироблення електроенергії та енергетичний баланс країн зарубіжжя. У даному класі використовують установку великої потужності (1-10 МВт), для створення вітряної електричної станції (ВЕС). Для вітроустановки класу С існує низка проблем через великі габарити установок, що тягнуть за собою найбільше навантаження на обладнання та механізми. Даний клас використовує вітроустановку, що виробляє енергію для подачі її безпосередньо до енергосистеми без накопичення. У енергосистеми частіше використовуються вітряні установки класу С, їх потужність складає 94% від загальної потужності вироблюваними вітрогенераторами всіх класів. При паралельній роботі вітроустановки з енергосистемою досягається збільшення

дешевизни та підтримання якості електричної енергії; збільшення потужності вітроустановки.

### **1.3. Перспективи забезпечення автомобільних доріг альтернативними джерелами електричної енергії**

В останні десятиліття у світовій індустрії відбувається значний розвиток альтернативної енергетики [3, 5].

У зв'язку з цим одним із актуальних завдань будівництва та експлуатації автомобільних доріг є зниження енергоспоживання доріг при їх експлуатації, а також підвищення енергонезалежності інтелектуальних транспортних систем, створення умов використання систем автономного забезпечення об'єктів енергоспоживання дорожньої інфраструктури.

Специфікою енергопостачання автомобільних доріг є те, що вони можуть бути як поблизу традиційних джерел енергії так і у районах, що за десятки кілометрів від них. Тому використання традиційних джерел енергії в даному випадку економічно не виправдано і дуже доцільна їхня заміна на альтернативні відновлювані джерела енергії.

Відповідно до вимог щодо споживаної потужності альтернативні джерела енергії можуть бути використані у таких випадках:

- 1) до 100 Вт – автономні системи освітлення (пішохідні переходи, залізничні переїзди, небезпечні ділянки тощо);
- 2) до 100 кВт – автономне живлення систем управління рухом, систем зв'язку, телеавтоматики, малих та середніх інженерних споруд та інших об'єктів (мости, тунелі тощо);
- 3) до 300 кВт – інтелектуальні системи електро- та теплопостачання малих споживачів (робочі ділянки, тимчасові виробничі об'єкти при будівництві);
- 4) до 1 МВт – інтелектуальні системи електро- та теплопостачання великих споживачів (тимчасові заводи, робочі ділянки з виробничими об'єктами тощо).

Під час вирішення питань вибору ефективних заходів щодо забезпечення автомобільних доріг відновлюваними джерелами енергії необхідно враховувати:

- 1) кліматичні умови (швидкість вітру (м/с), інсоляція кВт/м), наявність природних та штучних водотоків, наявність геотермальних джерел тощо);
- 2) техніко-економічні (ціна обладнання, вартість транспортування та монтажу обладнання, термін експлуатації обладнання, стан енергогенеруючого обладнання, ККД, тарифи на електроенергію за традиційним джерелам енергії тощо);

3) екологічні (вплив на тварин і птахів від обертових лопатей вітроустановки, вплив на морських тварин від електромагнітних полів, розмір шкідливих викидів та парникового ефекту тощо);

4) географічні (віддаленість від централізованої системи енергопостачання, віддаленість від постачальників органічного палива, мінімальна відстань від установки до населених пунктів тощо).

При забезпеченні автомобільних доріг відновлюваними джерелами енергії та підвищення техніко-економічних характеристик пристрою, розміщення та експлуатації об'єктів, які використовують відновлювані джерела енергії, рекомендується керуватися наступними принципами:

- за вітровою енергією: переважно розташовувати вітротурбіни переважно в прибережних та гірських районах з відповідною швидкістю та сталістю вітру, інтегруючи їх у вітропарки при одиничній потужності турбіни не менше 2-5 кВт. У рамках проєкту необхідно забезпечити мінімізацію шуму роботи вітроенергостанцій.

Слід віддавати перевагу вітроенергоустановкам, здатним ефективно працювати при найслабшому вітрі. Крок лопаті гвинта такі установки мають автоматично регулюватися таким чином, щоб постійно забезпечувалося максимально можливе використання енергії вітру, а при дуже великій швидкості вітру лопасті повинні мати можливість автоматично переводитися у флюгерне положення, щоб уникнути аварій. У складних кліматичних умовах має бути передбачений захист лопастей та обладнання від зледеніння.

- за енергією сонця: застосовувати оптимальні конструкції геліоприймачів, що рухаються за максимумом світлового потоку з удосконаленням їх перетворюючих покриттів, у т. ч. на базі нанотехнологій; також інтегрувати такі приймачі в геліопарки;

- по міні-гідроелектростанціям: застосовувати варіанти міні-гідроелектростанцій бездамбового типу; у т. ч., у формі "гірляндних" або занурених генераторів струму;

- з біомаси: у її ресурсній базі орієнтуватися, насамперед, на відходи сільського та лісового господарства та переробку муніципального сміття, що покращує екологію міст.

Енергетичні комплекси, що використовуються при повному забезпеченні відновлюваними джерелами енергії, повинні оснащуватися інтелектуальною системою управління для виконання наступних завдань:

- в реальному часі максимізувати вироблення енергії та здійснювати економію палива при використанні дизельних електростанцій при покритті необхідного навантаження;

- за допомогою апаратно-програмного забезпечення здійснювати дистанційний моніторинг параметрів та режимів роботи енергетичних комплексів відновлювальних джерел енергії, у тому числі у разі аварійних ситуацій;

- стежити за станом обладнання, аналізувати статистику режимів роботи енергетичних комплексів та забезпечувати прогнозування вітрового, інсоляційного та/або гідрологічного режиму для планування графіка роботи, технічного обслуговування, оцінки ризиків та попередження аварійних ситуацій;

- енергетичні комплекси відновлюваних джерел енергії, керовані інтелектуальними системами управління, повинні бути адаптованими та постачати енергію цілодобово, у тому числі при виході з ладу частини генеруючого обладнання (наприклад, при відмові дизельної електростанції).

Критеріями оптимізації при створенні автономного енергетичного комплексу на основі відновлюваних джерел енергії повинні бути прийняті:

- мінімум питомої вартості електроенергії;
- мінімум шкідливих викидів в атмосферу в еквівалентному значенні (при порівнянні з забезпеченням з урахуванням дизельних електростанцій);
- максимум часу автономності (час автономної роботи без технічного обслуговування);
- максимум корисного вироблення енергії.

Вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації має здійснюватися методом ранжування та переведенням критеріїв до одного головного параметра порівняння – еквівалентної вартості електроенергії

#### **1.4. Висновки по першому розділу**

В першому розділі кваліфікаційної роботи було розглянуто альтернативні джерела енергії їх види, вимоги до їх встановлення, методи оцінки ефективності та методи пошуку місця для встановлення для підтримки автономності у дорожньо-транспортній інфраструктурі. Таким чином, враховуючи вищезазначене використання відновлювальних джерел енергії, їх застосування для автомобільних потреб доріг дуже перспективно.

## РОЗДІЛ 2. ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГІЇ В ГІБРИДНІЙ СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

### 2.1. Принцип роботи гібридної електроустановки

На даний момент потік енергії, що утворюється від рухомих транспортних засобів досить рідко знаходить своє застосування. При більш детальному розгляді теорії даного питання стає зрозуміло, що дана можливість дійсно існує, тому що енергію яку витрачає транспортний засіб, перетворюється на інші форми енергії, які у своїй більшості не використовуються.

Енергія вітру є одним із видів енергії, що створюється від транспортного засобу, що проїжджає та здатна перетворюватися на іншу форму енергії. Даний вид енергії вертикально-осьова вітряна енергоустановка перетворює на електричну енергію незалежну від напрямку повітряного потоку, так як її роботи не потрібно встановлювати додаткові пристрої для запуску, також вона може спокійно витримувати сильні пориви повітряного вітряного потоку, працює у досить широкому спектрі кліматичних та погодних умов.

Але використання вітряної установки без додаткового джерела енергії є недоцільним, у зв'язку з дорожньо-транспортною ситуацією (дорожньо-транспортні пригоди, затори), що у свою чергу тягне за собою уповільнення потоку транспортних засобів внаслідок згасання енергії вітру, що створюється від автомобілів. Для досягнення автономності системи електричного постачання електроприймачів слід використовувати кілька джерел живлення, які збираються в одну систему і називаються гібридною енергетичною установкою.

Для розробки гібридної системи електропостачання з метою, забезпечення безперебійної роботи потрібно використовувати кілька видів установок, що працюють на різних джерелах енергії або палива. Для цього потрібно зробити ряд розрахунків, внаслідок якого проводиться вибір пристроїв та приладів для монтажу на енергетичну установку.

Гібридна енергоустановка включає два або більше альтернативних джерел енергії, у зв'язку із забезпеченням безперебійного електричного живлення приймачів, які вимагають використання достатньої енергії природних ресурсів У гібридній системі електричного постачання найбільш популярне використання сонячної та вітряної енергії.

Застосування лише одного із джерел природної енергії буде недостатньо, тому що за відсутності вітру чи сонця живлення електроприймачів та запас енергії в акумуляторних батареях буде припинено.

Дизель-генератори також застосовуються як альтернативні джерела енергії, що забезпечують безперебійність живлення електроприймачів за несприятливих погодних умов.

Енергію повітряного потоку вперше почала застосовувати Туреччина. Для установки використовували вітрогенератор з вертикальною віссю обертання ENLIL, зображену на рис. 2.1, яка функціонувала від вітру, створеного від руху транспортних засобів, що проїжджали повз.

При русі транспортних засобів виникають хвилі тиску та розрядження повітря. Вітрова енергетика займає досить важливе місце у балансі глобальної «зеленої» генерації, але й досі турбіни встановлюються переважно у прибережних зонах, де вітер постійний і сильніший.

Турецька компанія Devesi Tech – принципово змінила підхід до питання, показавши, що збирати вітрову енергію можна прямо на вулицях міст або міжміських трас. Завихрення від великовантажних машин і автобусів, що проходять змушують вітрову установку обертатися ще сильніше, а вертикальне розташування довгих лопатей забезпечує максимальне захоплення потоку.



Рисунок 2.1. Турбіни Enlil, встановлені у Стамбулі

Вітрогенератор Enlil компактний, розташовують його на невеликій ділянці землі, простий в монтажі та обслуговуванні. Зверху розташована сонячна панель, яка дозволяє використовувати екологічну енергію сонця для більшого вироблення енергії. Приблизна потужність даних вітроустановок 1 кВт·год. Вигнута форма напівциліндра лопатей ротора дозволяє використовувати потік повітря невеликої потужності, розкручуючи з наростаючою амплітудою, виробляючи нові завихрення від розкручування своїх же лопатей.

Вітроколесо Enlil з'єднане з валом генератора. Вироблена електрична енергія накопичується в акумуляторних батареях або надходить безпосередньо в мережу, для живлення електроприймачів. Дані установки застосовні до монтажу на іншій місцевості, не тільки поблизу автомагістралей та доріг загального користування. Але розробники рекомендують дану установку розташовувати в безпосередній близькості до дороги з найбільш жвавим трафіком, тому що щільний потік транспортних засобів здатний забезпечити безперебійне вироблення електричної енергії.

Також розробки в галузі альтернативних джерел електроенергії вироблялися у Пакистані Санвалом Муніром. Він так само розробив вітроустановку здатну функціонувати від набігаючого потоку від транспортних засобів, що проїжджають повз. Вітроустановка так само накопичувала енергію в АКБ для подальшого використання споживачами. Габаритні розміри висоти вітроустановки – два з половиною метри. Ротор виготовлявся з вуглецевого волокна. АКБ при повній зарядці здатний накопичувати близько 1 кВт.

Застосування одночасно кількох джерел альтернативної енергії, зібраних в одну систему, дуже вигідно з погляду економічної ефективності. Дана система дозволяє перейти до екологічно чистих альтернативних видів енергії з повною відмовою від центральної енергосистеми. Так само паралельна робота кількох джерел альтернативної енергії, інтегрованих в одну, забезпечує збільшений термін служби кожного елемента системи. При значних витратах на будівництво установки, вона досить швидко окупається.

З метою ефективного використання завихрень повітря, що виникає під час руху транспортних засобів запропоновано встановлювати вітряні генератори над проїзною частиною автомобільної дороги через певний проміжок дороги, що дорівнює довжині міського автобуса. На рис. 2.2 показано пристрій з вітрогенераторами, що встановлені над проїжджою частиною автомобільної дороги.

Вітрогенератор (вітроелектрична установка або скорочено ВЕУ, вітряк – пристрій для перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в механічну енергію обертання ротора з подальшим її перетворенням на електричну енергію.

Вітрогенератори можна розділити на три категорії: промислові, комерційні та побутові (для приватного використання).

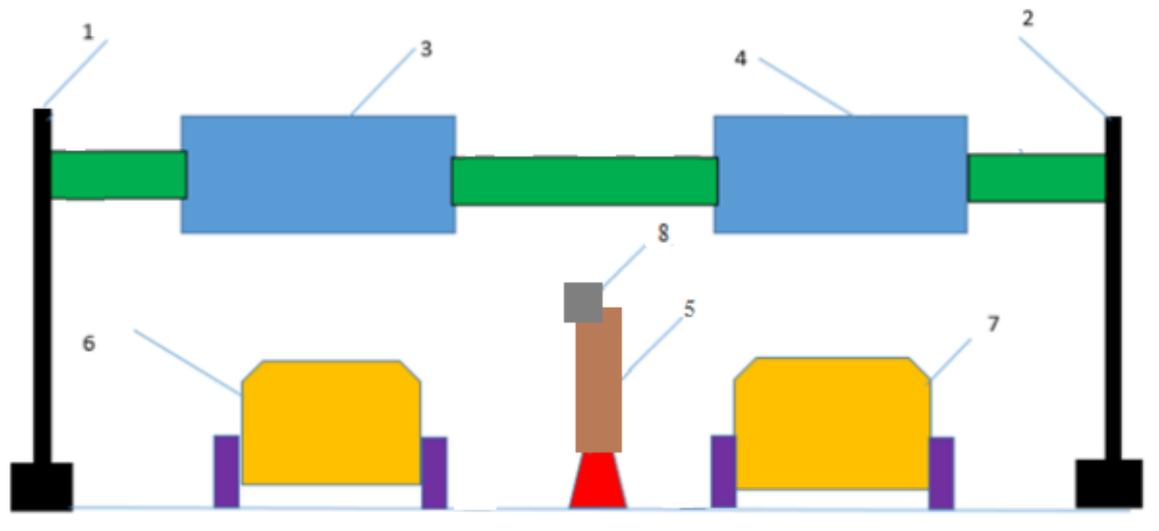


Рисунок 2.2. Вітрогенераторні пристрої, встановлені в проїжджій частині автомобільної дороги: 1 – ліва опора пристрою, 2 – права опора пристрою, 3 – лівий вітрогенератор, 4 – правий вітрогенератор, 5 – турбіна Enlil, 6 – лівосторонній потік автомобілів, 7 – правосторонній потік автомобілів; 8 – сонячні панелі.

## 2.2. Транспортне навантаження на трасі М-06 (Київ-Чоп, Північний об'їзд м. Житомира)

«Траса М-06 Київ – Львів – Чоп, перетинає Україну зі Сходу на Захід - це основний транзитний коридор через територію України, який забезпечує вихід на Угорщину, Словаччину та Польщу. Дорога включена до європейського маршруту Е40, входить до міжнародного транспортного коридору №3 та національного коридору Європа – Азія». [9]

Розрахунок навантаження транспортних засобів на ділянці дорожнього полотна непросте завдання, але необхідне. Для обліку та ведення подібної статистики застосовуються кілька методів, таких як розрахунок, по камерах дорожнього спостереження та моніторингу, інноваційні автоматизовані системи.

З розробкою складних інноваційних систем суттєво збільшилася точність підрахунку, з мінімальною похибкою практично дорівнює нулю. Ці системи дозволяють визначити густину потоку транспортних засобів навіть на утруднених ділянках дороги, де відсутня можливість для монтажу стаціонарних постів для спостереження.

Стало зрозуміло, що щільність потоку транспортних засобів перевищує заплановану на даній трасі. На розширення та реконструкцію траси за державними програмами, розрахованими до 2020 року, було витрачено чимало сил, коштів та часу. Для забезпечення безпеки дорожнього руху

проводилися роботи з ущільнення та вирівнювання ґрунту, додавання бар'єрів (відбійників) та розширення автомагістралі.

Дана ділянка одна з найбільш аварійно-небезпечних ділянок траси, через різкі зміни М-06 щільність потоку залежить не тільки від погодних умов, а також від збільшення транспортних засобів, у тому числі великовантажів (порядку 47% загальної кількості). Значну частину становить легкові транспортні засоби - 22%, наступним за статистикою є середній та легкий вантажний транспорт – 13 та 7% відповідно, далі автобуси – приблизно 11%.

Щільність потоку транспортних засобів протягом всієї автомагістралі різний, на ділянках з найбільшим скупченням автомобілів їх кількість перевищує в 3,5 рази розрахункове навантаження та приблизно дорівнює 20 тисяч автомобілів на добу.

Досить істотна частка транспортних засобів посідає вантажівки (середні, легкі, важкі), тому що в безпосередній близькості від траси на всій її протяжності розташоване велика кількість складів. Дорожньо-транспортні пригоди трапляються досить часто, що ускладнює рух та створює додаткові пробки.

### **2.3. Розрахунок параметрів автономного енергоспоживання гібридною енергетичною установкою**

«Визначити пік промислового споживача енергії не представляє складності, т.к. спочатку відомі потужність та графік роботи кожної одиниці обладнання. Обчислення графіка споживання та піку потужності споживача енергії може бути проведено з тією чи іншою ймовірністю чи прогнозуванням у зв'язку з непередбачуваністю графіка енерговитрат. У зв'язку з цим завдання вирішується завжди індивідуально з відповідними припущеннями та наближеннями» [6].

«Для розрахунку пікової потужності потрібно визначити потужність кожного приладу або електроприймача  $P_i$  (Вт), який може бути використаний на досліджуваному об'єкті. Визначити з відповідними припущеннями просту можливість включення приладу в різний час доби, визначивши миттєву споживану потужність вранці, вдень, увечері та вночі. Скласти дані стовпців потужності  $P_i$  та отримати пікову потужність енергоспоживання РП у конкретний час доби – вранці, вдень, увечері, вночі ( $P_{вр}$ ,  $P_{д}$ ,  $P_{вч}$ ,  $P_{н}$ ). Ці дані використовуються згодом для розрахунку номінальної потужності інвертора  $P_I$ » [10], за формулою:

$$P_i \Rightarrow \max(P_{вр}, P_d, P_{вч}, P_n), \quad (2.1)$$

«З практики відомо, що реальна пікова потужність переважної більшості об'єктів у конкретний час доби менше суми всіх потужностей приладів, що знаходяться на об'єкті, оскільки всі електроприлади, як правило, не включаються одночасно. Тим не менш, можуть бути винятки, які повинні братися до уваги розробником» [7].

«Під час проведення розрахунків допускається формальне збільшення пікової потужності в конкретний час доби з метою створення запасу потужності та прогнозування збільшення енергоспоживання в майбутньому» [7].

«Для розрахунку споживаної енергії потрібно визначити з відповідними припущеннями час роботи кожного приладу в конкретний час доби. Скласти дані стовпців «ранок-день-вечір-ніч» для кожного електроприладу та помножити отримане значення на потужність приладу, отримавши енергоспоживання кожного приладу на добу. Сума енергоспоживання всіх приладів  $E_{доб}$  буде кількістю енергії, споживаної об'єктом на добу» [8], яка визначається за наступною формулою:

$$E_{доб} = P_i \sum T_i. \quad (2.2)$$

«Отримані дані використовуються для розрахунку номінальної потужності вітроенергетичної установки та акумуляторних батарей» [11].

За формулою (5) обчислюється аеродинамічна потужність:

$$P_{а.п.} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot V \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot H \cdot D \cdot v^2}{2}, \quad (2.3)$$

де «  $P_{а.п.}$  – аеродинамічна потужність, Вт;  
 $m$  – вага повітря, що проходить через ротор за 1 с., кг;  
 $v$  – швидкість вітрового потоку до зустрічі з ротором, м/с;  
 $\rho$  – густина повітря, що проходить через ротор (приймається 1,2041 кг/м<sup>3</sup> в сухому повітрі при температурі °С і тиску 101,325 кПа), кг/м<sup>3</sup>;  
 $V$  – об'єм повітря, що проходить через ротор за 1 с., м<sup>3</sup>;  
 $H$  – висота ротора, м;  
 $D$  – діаметр ротора, м» [8].

Електричну потужність вітрогенератора визначаємо за наступною формулою:

$$P_B = k \cdot P_{a.п.}, \quad (2.4)$$

де «  $P_B$  – електрична потужність вітрогенератора, Вт;

$k$  – коефіцієнт використання енергії вітру,  $k = 0,09 \dots 0,48$ » [8].

Миттєва потужність для вітроустановки з вертикальною віссю обертання визначається за наступною формулою:

$$P_M = \frac{v^3}{2 \cdot h^3 \cdot k_{шост}} \cdot \rho \cdot k \cdot k_{уст} \cdot N_B \cdot (D \cdot H \cdot (h + \frac{H}{2}))^{3 \cdot k_{шост}}, \quad (2.5)$$

де « $P_M$  – миттєва потужність вітроенергетичної установки, Вт;

$v$  – швидкість вітрового потоку, м/с;

$\rho$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;

$k_{уст}$  – ККД супутніх пристроїв, %;

$N_B$  – кількість вітроустановок, шт;

$H$  – висота ротора, м;

$D$  – діаметр ротора, м» [8].

$h$  – висота ротора, м;

$k_{шост}$  – коефіцієнт шосткості поверхні, м» [11].

Потужність вітроелектроустановки за добу розраховуємо за наступною формулою:

$$P_{в.д.} = P_M \cdot 24, \quad (2.6)$$

де  $P_{в.д.}$  – потужність вітроустановки за добу, Вт/доб.

Кількість лопастей вітроколеса визначаємо за наступною формулою:

$$n \approx \frac{2\pi}{Ш}, \quad (2.7)$$

де  $n$  – кількість лопастей, шт;

$Ш$  – швидкохідність, модулі» [11].

Число лопатей округляється до найближчого.

«Далі визначаємо частоту обертання ротора, об/хв або Гц» [7] за наступною формулою:

$$\omega = \frac{60 \cdot Ш \cdot v}{\pi \cdot D}, \quad (2.8)$$

де  $\omega$  – частота обертання ротора, об/хв.

«Вироблена електроенергія, має бути використана, тобто якщо відроенергетична установка, яка виробляє енергію, а споживання немає, її необхідно запасати. Крім цього, для покриття короточасних піків енергоспоживання необхідний накопичувач енергії, який запасає надлишки енергії під час мінімального споживання та віддає запасену енергію під час максимального споживання у короткий проміжок часу» [11].

«Накопичувачі енергії представляють собою широке різноманіття. Прикладом найпростішого акумулювання електроенергії може бути звичайна автомобільна акумуляторна батарея»[11].

«Для визначення споживаної потужності об'єкта в періоді максимального енергоспоживання за допомогою знаходження найбільшого енергоспоживання об'єкта та тривалості споживання» [12], визначаємо за наступною формулою:

$$P_{max} = \frac{E_t}{T}, \quad (2.9)$$

де  $P_{max}$  – максимальна потужність споживання, Вт;

$E_t$  – енергоспоживання в години максимального енергозавантаження  
Вт·год;

$T$  – тривалість споживання, год.

Враховуючи напругу постійного струму регулятора  $U_p$  та споживану потужність  $P_{max}$ , визначається струм споживання  $I_{сп}$ » [8] за наступною формулою:

$$I_{сп} = \frac{P_{max}}{U_p}. \quad (2.10)$$

Ємність АКБ з врахуванням втрат знаходимо за наступною формулою:

$$C_{АКБ} = \frac{I_{сп} \cdot T}{C_{гр}}, \quad (2.11)$$

де  $C_{гр}$  – глибина розрядка АКБ, % [12].

Кількість акумуляторів визначаємо за формулою:

$$m = \frac{C_{АКБ}}{C_{АКБн}}, \quad (2.12)$$

де  $m$  – кількість АКБ, шт.;

$C_{АКБн}$  – номінальна ємність АКБ, А·год.

Далі розглядається розрахунок сонячних панелей.

Сонячні панелі є першоджерелом електроенергії для гібридної електростанції. Кількість та потужність сонячних панелей необхідно вибирати, враховуючи частку сонячної радіації на площу найтемнішого місяця року [7].

Середньомісячна кількість пікових сонце-годин, розраховується за наступною формулою:

$$S_{\text{год}} = \frac{S_{\text{сум}}}{31}, \quad (2.13)$$

де  $S_{\text{сум}}$  – місячна сумарна сонячна радіація, кВт·год/м<sup>2</sup>;

$S_{\text{год}}$  – середньомісячна кількість пікових сонце-годин, кВт·год/м<sup>2</sup> [8].

Необхідна потужність сонячної батареї визначається за наступною формулою:

$$P_{\text{б}} = \frac{1,1 \cdot S_{\text{год}} \cdot (E_t - E_{\text{ВЕУ}})}{U_p^2 \cdot k_{\text{вт}}}, \quad (2.14)$$

де  $P_{\text{б}}$  – потрібна потужність сонячної батареї, кВт;

$E_{\text{ВЕУ}}$  – енергія, що вироблена вітроенерго установкою за день, Вт·год;

$k_{\text{вт}}$  – коефіцієнт втрат акумуляторної батареї [8].

Далі визначається кількість модулів сонячних батарей за наступною формулою. Зазвичай дане значення округляється у більшу сторону.

$$N_{\text{б}} = \frac{P_{\text{б}}}{P_{\text{бн}}}, \quad (2.15)$$

де  $P_{\text{бн}}$  – номінальна потужність сонячної батареї, Вт.

Число модулів, з'єднаних послідовно, для забезпечення необхідної вихідної напруги постійного струму знаходиться за наступною формулою:

$$S_{\text{б пс}} = \frac{U_p}{U_{\text{б}}}, \quad (2.16)$$

де  $U_{\text{б}}$  – номінальна напруга фотоелектричного модуля, В;

$S_{\text{б пс}}$  – число модулів, з'єднаних послідовно, для забезпечення потрібної вихідної напруги постійного струму, шт.

Загальна кількість модулів сонячних батарей визначається за наступною формулою:

$$N_{\text{зб}} = N_{\text{б}} \cdot S_{\text{б пс}}, \quad (2.17)$$

де  $N_{\text{зб}}$  – загальна кількість модулів сонячних батарей.

Після проведення розрахунку необхідно зробити перевірку на предмет того, чи зможе вітроенергетична та сонячна установки за попередній період зарядити дані акумулятори до необхідного рівня» [9].

«З цією метою необхідно визначити, яка кількість енергії має надійти від установки за період часу  $T_{i-1}$ , попередній досліджуваному періоду  $T_i$ .

$$E_{\text{ВЕУ-Т}} = P_{\text{М}} \cdot T_{i-1}, \quad (2.18)$$

де  $T_{i-1}$  – період часу, попередній досліджуваному періоду, год.

$$E_{\text{СЕУ-Т}} = P_{\text{б}} \cdot T_{i-1}, \quad (2.19)$$

Загальна енергія  $E_{\text{заг}}$ , що надійшла від установки за період  $T_{i-1}$ , визначається за наступною формулою:

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{ВЕУ-Т}} + E_{\text{СЕУ-Т}}, \quad (2.20)$$

Отримана величина підлягає порівнянню зі споживаною енергією та має її перевищувати» [8]:

$$E_{\text{заг}} \geq E_{\text{сп}}.$$

Далі робиться висновок про застосування акумуляторних батарей для досліджуваного об'єкта. При отриманні незадовільного результату необхідно здійснити відповідні перерахунки. Наприклад, збільшити потужність та/або кількість ВЕУ або СЕУ, знизити енергоспоживання тощо» [10].

Енергія споживання за час роботи освітлення визначається за наступною формулою [10]:

$$E_{\text{сп}} = P_{\text{н}} \cdot t, \quad (2.21)$$

де  $E_{\text{сп}}$  – енергія споживання за час роботи освітлення, Дж;

$P_{\text{н}}$  – номінальна потужність освітлення, Вт;

$t$  – тривалість роботи освітлення для одного транспортного засобі, с.  
[10].

Ємність блоку суперконденсаторів  $C$  розраховується за наступною формулою:

$$C = \frac{2 \cdot E_{\text{сп}}}{U^2}. \quad (2.22)$$

Далі виходячи з потрібної напруги розраховують кількість іоністорів за наступною формулою:

$$n = \frac{U}{U_i}, \quad (2.23)$$

де  $n$  – кількість іоні стрів, шт.;

$U_i$  – номінальна напруга іоністора, В.

«Після всіх виконаних розрахунків потрібно провести перевірку енергетичного балансу. Енергетичний баланс дозволяє побачити різницю між кількостями підведеної та корисно-використаної енергії» [7, 11].

Вироблення енергії ВЕУ на добу з втратою 20% визначається за наступною формулою:

$$P_{врвеу} = \frac{P_{в.д.}}{1,2}, \quad (2.24)$$

де  $P_{врвеу}$  – вироблення ВЕУ за добу з втратою 20%, Вт/доб. [7, 11].

Споживання за добу з запасом 20 % розраховується за формулою:

$$P_{сп} = E_{сп} \cdot 1,2, \quad (2.25)$$

де  $P_{сп}$  – споживання за добу із запасом 20%, Вт/доб. [7, 11].

Вироблення енергії СЕУ на добу з втратою 20% визначається за наступною формулою:

$$P_{врсеу} = \frac{P_{с.д.}}{1,2}, \quad (2.26)$$

де  $P_{врсеу}$  – вироблення СЕУ за добу з втратою 20%, Вт/доб. [7, 11].

Визначення балансу потужності визначаємо за наступною формулою:

$$S_{заг} = (P_{врвеу} + P_{врсеу}) - P_{сп}, \quad (2.27)$$

де  $S_{заг}$  – баланс потужності, Вт/доб. [7, 11, 13].

Якщо баланс потужності виходить негативним, то знижуємо енергоспоживання або збільшуємо генерацію.

#### 2.4. Висновки по другому розділу

В даному розділі кваліфікаційної роботи розглянуто використання альтернативної енергії, що створюється потоком автомобілів у гібридній системі електропостачання. Наведена методика розрахунку вітряної енергетичної установки, сонячної енергетичної установки та проведений аналіз аеродинамічної потужності, що створюється від опору транспортного засобу.

## РОЗДІЛ 3. ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГОУСТАНОВКИ

### 3.1. Порівняльний аналіз ефективності застосування генераторів для заряджання акумуляторних батарей

Метою роботи є порівняльний аналіз ефективності застосування вітрогенераторів. Технічні характеристики наведені у табл. 3.1. генераторів для заряджання акумуляторних батарей.

Таблиця 3.1. Коротка технічна характеристика генераторів

№ п/п	Найменування	Потужність, Вт	Номінальна напруга, В
1	S-300	300	12
2	RC-500Y	500	12
3	RC-600XV	600	24

Вимірювальне та перетворювальне обладнання наведене у табл. 3.2

Таблиця 3.2. - Вимірювальне обладнання

№ п/п	Тип обладнання	Найменування засобів вимірювання	Діапазон вимірювання
1	DMM-800	Опір обмотки генератора (міжфазний)	$\pm 1$ Ом
2	DT-2234B	Частота обертання (безконтактне вимірювання частоти обертання)	$\pm 5$ хв <sup>-1</sup>
3	DMM-800	Напруга постійного струму	$\pm 5$ В
4	PWM DC	Регулятор обертів (потужності) Шунт	0,5
5	VD-600 (6 шт)	Трьохфазний мостовий випрямляч	
6	FW 12/24 SMARAAD	Контролер	

Підключення генератора наведено на схемах (рис. 3.1. та 3.2.).

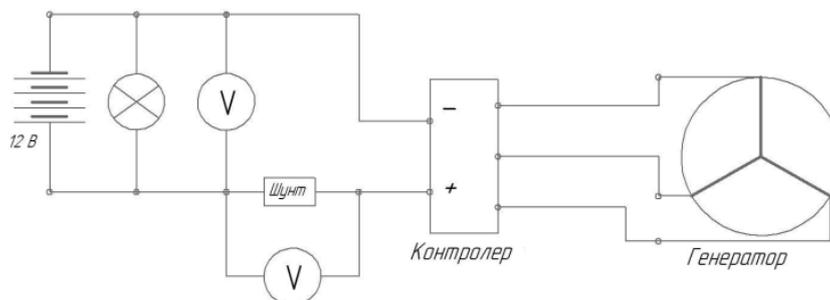


Рисунок 3.1. Схема підключення генератора з використанням контролера FW 12/24

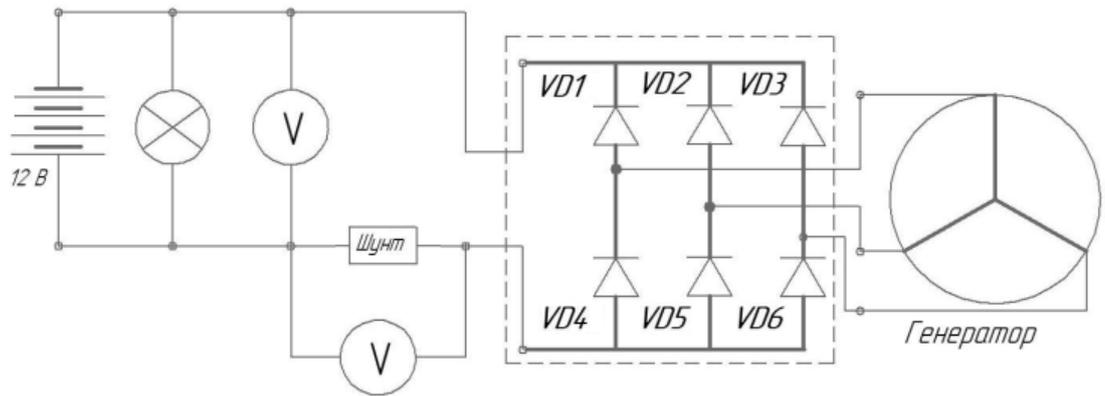
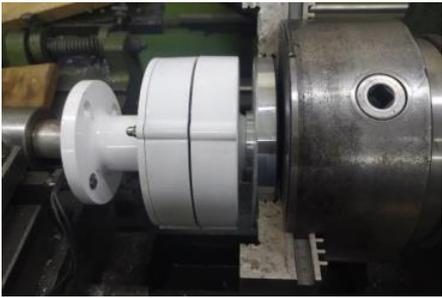
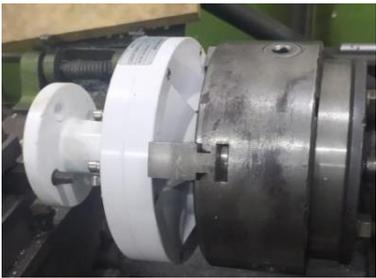


Рисунок 3.3. Схема підключення генератора з використанням трифазного мостового випрямляча

Опір обмоток статора генератора представлено табл. 3.3. При визначенні приймалося з'єднання статора обмоток за схемою «зірка».

№ п/п	Найменування	Міжфазний опір, Ом	Фаза	Середній фазний опір, Ом
1	 S-300	66.0	AB	33
		66.1	BC	
		66.9	CD	
2	 RC-500Y	19,0	AB	10
		19,0	BC	
		20,0	CD	
3	 RC-600XV	10.0	AB	5
		10.1	BC	
		10.9	CD	

Результати визначення потужності досліджуваних генераторів показані в табл. 3.4-3.6.

Таблиця 3.4. Результати визначення потужності генератора S-300

№	n, хв <sup>-1</sup>	I <sub>a</sub> , А	P(ВА)	V <sub>н</sub> , В
1	17	0,00	0,00	12,01
2	19	0,00	0,00	12,01
3	23	0,00	0,00	12,01
4	31	0,00	0,00	12,01
5	42	0,00	0,00	12,01
6	57	0,00	0,00	12,01
7	61	0,00	0,00	12,01
8	78	0,00	0,00	12,01
9	126	0,04	0,48	12,01
10	167	0,14	1,46	12,01
11	209	0,25	2,89	12,01
12	258	0,37	4,34	12,01
13	324	0,55	6,26	12,01
14	371	0,64	7,24	12,01
15	467	0,84	9,64	12,01
16	584	1,00	12,05	12,01

Таблиця 3.5. Результати визначення потужності генератора RC-500Y

№	n, хв <sup>-1</sup>	I <sub>a</sub> , А	P(ВА)	V <sub>н</sub> , В
1	13	0,00	0,00	12,10
2	21	0,00	0,00	12,10
3	27	0,00	0,00	12,10
4	29	0,00	0,00	12,10
5	34	0,00	0,00	12,10
6	46	0,00	0,00	12,10
7	61	0,00	0,00	12,10
8	64	0,00	0,00	12,10
9	83	0,17	1,93	12,10
10	98	0,35	4,35	12,10
11	126	0,67	8,24	12,10
12	168	1,14	14,03	12,10
13	214	1,67	20,34	12,10
14	262	2,22	26,64	12,10
15	334	2,87	34,85	12,10
16	379	3,25	39,23	12,10
17	475	4,03	48,44	12,10
18	583	4,57	55,21	12,10

Таблиця 3.6. Результати визначення потужності генератора RC-600XV

№	n, хв <sup>-1</sup>	I <sub>a</sub> , А	P(ВА)	V <sub>н</sub> , В
1	13	0	0	12,08
2	17	0	0	12,08
3	24	0	0	12,08
4	27	0	0	12,08

5	29	0	0	12,08
6	36	0	0	12,08
7	46	0	0	12,08
8	57	0,17	1,45	12,10
9	64	0,38	4,33	12,08
10	82	0,82	9,67	12,06
11	101	1,38	16,46	12,12
12	128	2,17	26,26	12,14
13	172	3,38	41,07	12,21
14	213	4,46	54,62	12,28
15	264	5,66	67,67	11,98
16	380	8,54	103,42	12,16
17	436	10,18	124,05	12,17
18	562	11,06	140,51	12,71

На рис. 3.4 показано порівняння потужності, що виробляється генераторами.

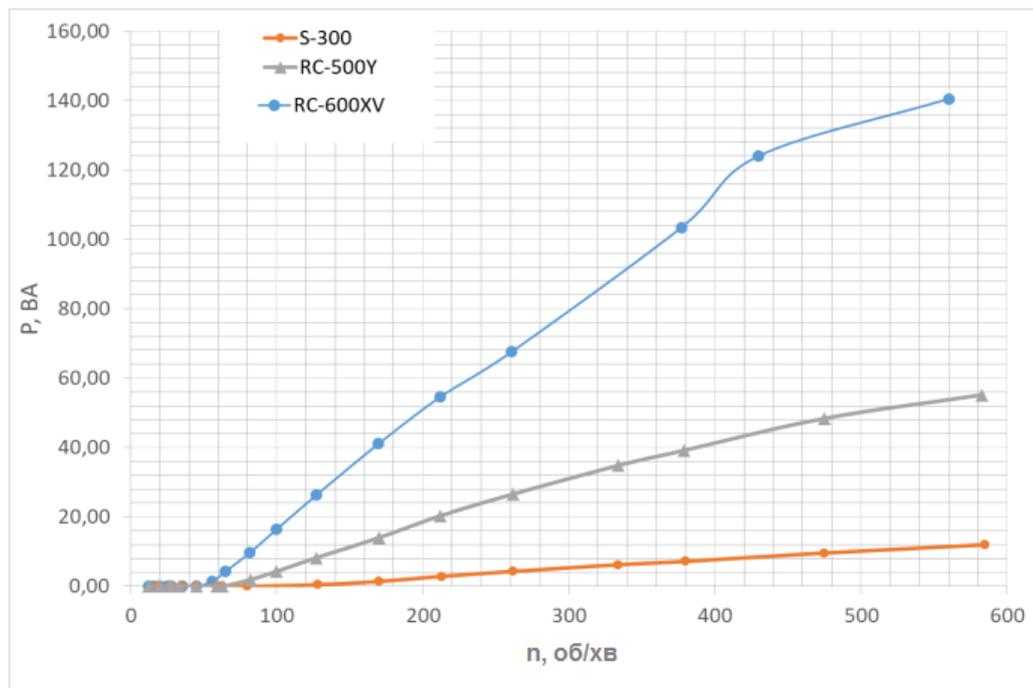


Рисунок 3.4. Порівняння потужності, що виробляється генераторами

### 3.2. Опис схеми підключення модулів до спільної мережі

Схема підключення споживачів модуля вітрогенератора зображена на рис. 3.5.

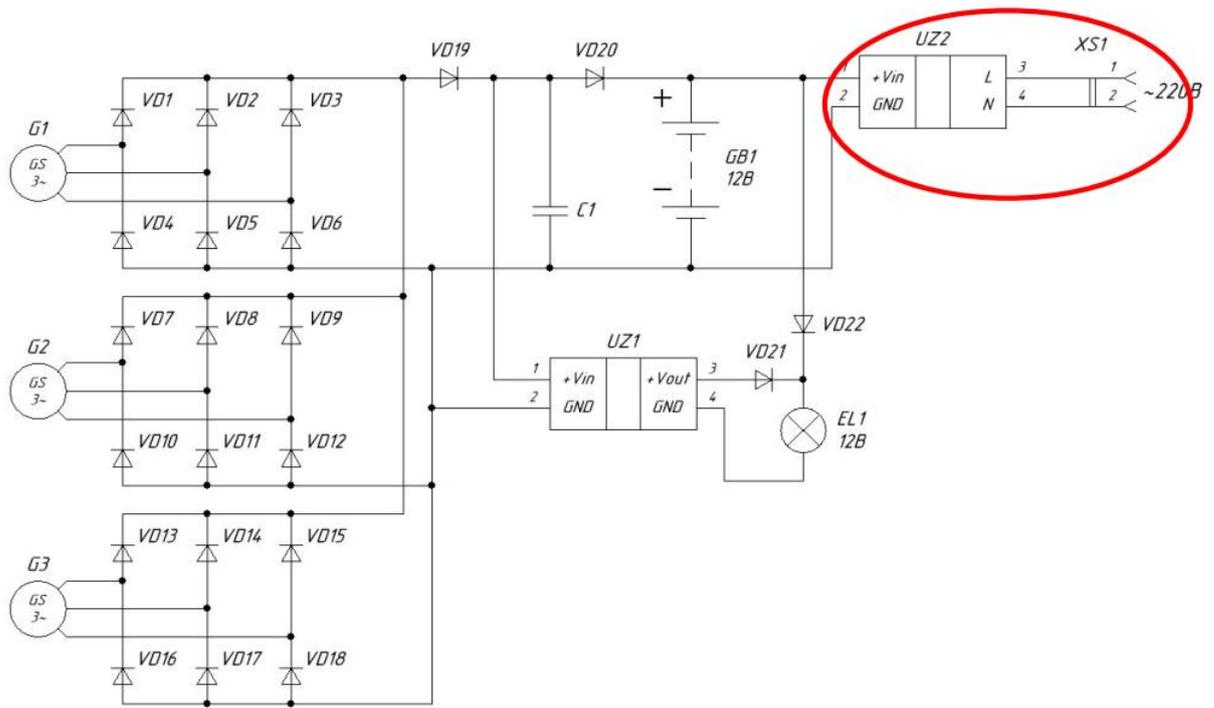


Рисунок 3.5. Схема підключення споживачів модуля вітрогенератора

Схема рис. 3.5 працює наступним чином: діоди VD 1-6, VD7-12, VD 13-18 – формують міст, у якому випрямляється змінний 3-х фазний струм, що надходить від генератора (G1, G2, G3). Допускається застосовувати готові випрямлячі аналогічної потужності. Випрямлений струм через діод VD 19 заряджає конденсатор (іоністр) C1. На рис. 3.6 представлено складання такого іоністра з балансувальною платою. У випадку якщо випрямлена напруга, що виробляється генераторами G1-3 менше напруги АКБ (GB1), то живлення споживача EL1 здійснюється від перетворювача UZ1 (стабілізатор напруги, наприклад, LM2596 або аналог). Якщо випрямлена напруга з генераторів G1-3 досягає значення напруги АКБ, тоді АКБ починає заряджатися. При цьому живлення споживача EL1 здійснюється від АКБ (GB1). Перетворювач (мережевий перетворювач) UZ2 працює в діапазоні напруги від 10 до 15 (дані значення регулюються в залежності від типу батареї). У випадку зменшення напруги на АКБ менше 10 В перетворювач відключається, батарея починає заряджатися. Особливістю запропонованої схеми є можливість роботи споживача EL1 у широкому діапазоні напруги від 3 до 15 В.

Гальмування вітрогенератора у запропонованій схемі здійснюється за рахунок можливості скидання навантаження у загальну (зовнішню) мережу.

Для підключення модулів вітрогенераторів між собою та синхронізацією із зовнішньою мережею (з можливістю віддачі електричної енергії в загальну мережу) пропонується використовувати мережевий інвертор.



Рисунок 3.6. Складання іоністра (суперконденсатора) з балансувальною платою

На рис. 3.7 представлена принципова схема розключення модулів для однофазної мережі.

Мережевими інверторами (UZ2 – UZ4) (рис. 3.7) є пристрої, що перетворюють постійну напругу в змінну і передають її безпосередньо в мережу 220В (380В), тим самим знижуючи споживання електроенергії від енергомереж. Мережеві інвертори також називають синхронними перетворювачами тому, що вони мають одну особливість – наявність синхронізації напруги та струму зі стаціонарною мережею. Таким чином, мережевий інвертор здійснює перетворення постійного струму відновлюваних джерел енергії у змінний (з належними значеннями частоти та фази для сполучення зі стаціонарною мережею) [8, 14, 15].

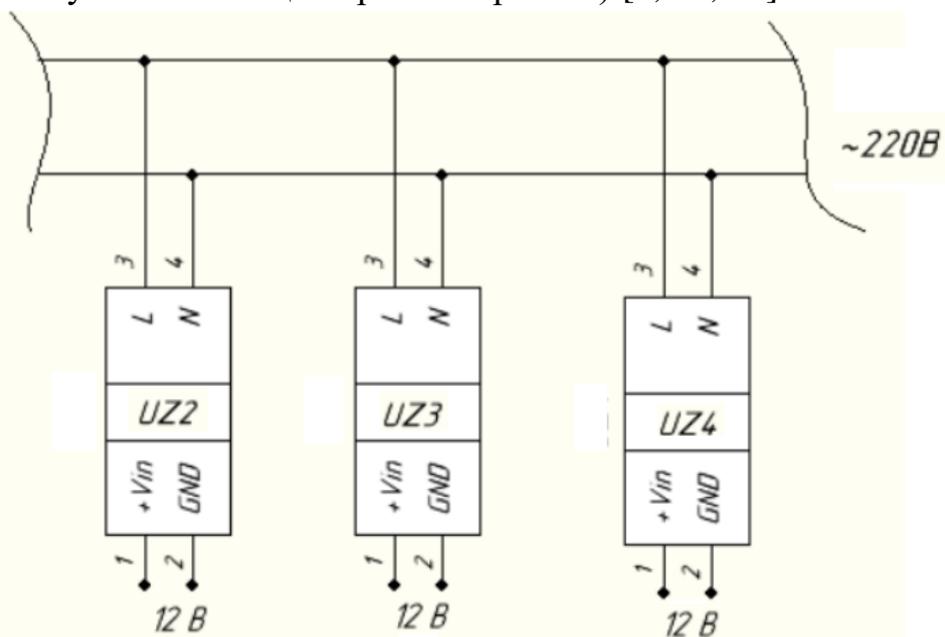


Рисунок 3.7. Принципова схема підключення для однофазної мережі

Особливістю інвертора мережного типу є неможливість його роботи за відсутності живлення зовнішньої мережі. Тобто. при відключенні зовнішньої мережі інвертор вимикається, і передача енергії у зовнішню мережу виключається. В даному випадку модуль вітрогенератора буде працювати як

автономне джерело, забезпечуючи живлення місцевого споживача (лампочки, світлодіоди тощо) або заряджати АКБ.

Основні характеристики мережевих інверторів:

- номінальна вихідна потужність - потужність, що отримується від даного інвертор;

- вихідна напруга – показник, що визначає до якої мережі по напрузі може бути підключений інвертор. Для невеликих інверторів (побутового призначення) вихідна напруга зазвичай дорівнює 240В. Інвертори для промислового призначення розраховані на 208, 240, 277, 400 або 480В, крім того, їх можна підключати до 3-х фазної мережі;

- максимальна ефективність – найвища ефективність перетворення енергії, що може забезпечити інвертор.

Максимальний ККД більшості мережевих інверторів становить більше 94%, у деяких – до 97%;

- виважена ефективність - середня ефективність інвертора, даний показник краще характеризує ефективність роботи інвертора. Показник важливий, оскільки інвертори, здатні перетворювати енергію при різних вихідних напругах змінного струму, мають різну ефективність при кожному значенні напруги;

- максимальний вхідний струм - максимальна кількість постійного струму, який може перетворювати інвертор. Якщо будь-яке відновлюване джерело (наприклад, сонячна панель) буде виробляти струм, що перевищує дане значення, мережевий інвертор не використовує;

- максимальний вихідний струм - максимальний безперервний змінний струм, що виробляється інвертором. Даний показник використовують для визначення мінімального (номінального) значення перевантаження по струму пристроїв захисту (наприклад, вимикачів або запобіжників);

- діапазон відстеження напруги максимальної потужності - діапазон напруги постійного струму, в якому працюватиме точка максимальної потужності мережевого інвертора;

- мінімальна вхідна напруга - мінімальна напруга, необхідне включення інвертора та її роботи;

- ступінь захисту IP (або код виконання) – характеризує ступінь захисту корпусу від проникнення зовнішніх твердих предметів (перша цифра), і навіть води (друга цифра).

Принципова схема інвертора представлена на рис. 3.8.

Синусоїдальна напруга через резистор R3 надходить до вузла синхронізації, виконаному на здвоєному оптроні U1.

При позитивній напівхвилі струм протікає через світлодіод оптрону U1.2 та транзистор цього оптрона відкритий, тому на тактовому вході (вив.3) DD1.1 низький рівень напруги.

При негативній напівхвилі напруги мережі відкритий транзистор оптрона U1.1 та тактовому вході DD1.1 також низький рівень, але в моменти, коли мережна напруга переходить через нуль, обидва світлодіоди вимкнені,

транзистори оптронів закриті, а тактовому вході DD1.1 на короткі відрізки часу з'являються рівень 1. Внаслідок цього рівень 1 з'являється на тактовому вході DD1.1 тільки в момент переходу через мережевий нуль напруги. Ці імпульси з частотою 100 Гц приходять на дільник 2, виконаний на D-тригері DD1.1, а також на вив.2 DD3.1 та вив.13 DD3.2.

Від тривалості імпульсу залежить величина зазору між включенням силових ключів. Це необхідно для того, щоб силові ключі не виявилися одночасно відкритими, що небезпечно протіканням через них наскрізних струмів.

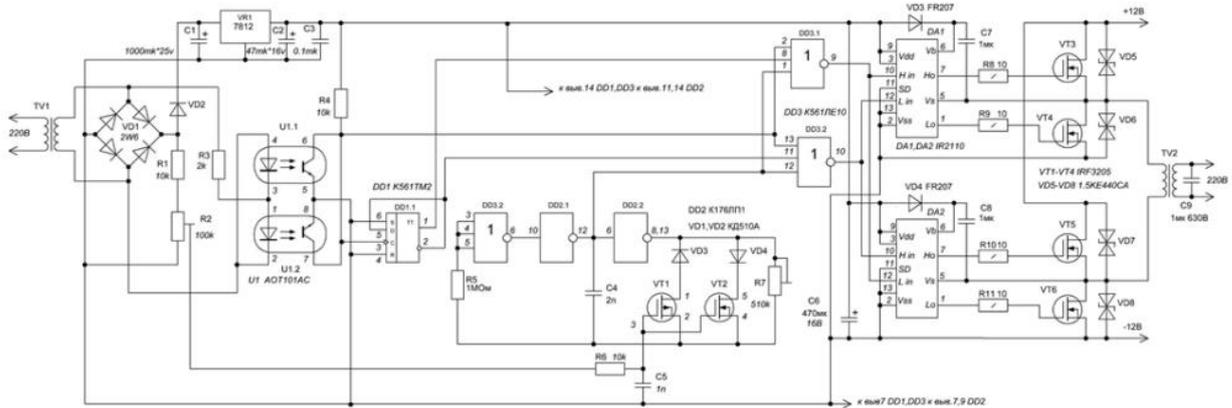


Рисунок 3.8. Принципова схема інвертора

### 3.3. Результати розрахунку гібридної енергоустановки

Для розрахунку та проектування розроблено установку, яка передбачається до монтажу для живлення освітлення та камер аварійнонебезпечної ділянки траси М-06. Від потоку повітря, що створюється транспортними засобами при проїзді повз електроустановку, приводяться в дію вітрогенератори, які передають електроенергію на живлення систем освітлення. Суперконденсатори в свою чергу здешевлюють установку.

Освітлення загорається по черзі, розрахунковий час горіння однієї лампи 6 секунд на один транспортний засіб. Вітроустановки заряджають вдень АКБ, встановлені для живлення камер.

У табл. 3.7 наведені дані розрахунку навантаження електроприймачів, які необхідні для живлення від гібридної енергоустановки. Для розрахунку часу роботи освітлення прийнято до уваги нічне завантаження траси М-06 автомобілів за годину та час горіння освітлення 6 секунд на одну машину.

Таблиця 3.8. Дані розрахунку навантаження електроприймачів

Електроприймачі	P <sub>i</sub> , Вт	T <sub>i</sub> , год		E, Вт·год
		день, 12 год	ніч, 12 год	
Освітлення	400	0	9,8	3920
Камери	100	12	12	2400
Всього за добу	500	12	21,8	6320

Оскільки дана гібридна установка передбачається для монтажу на трасі, тому для розрахункової швидкості прийнято значення швидкості, що створюється від вантажівок та автобусів, які рухаються зі швидкістю 90 км/год і легкових автомобілів, що рухається зі швидкістю 110 км/год.

У табл. 3.9 наведені результати розрахунку миттєвої потужності вітряної електричної установки, вироблення енергії за добу та за день при різних швидкостях вітру. Для розрахунку денної та добової потужності вітроустановки прийнято до уваги денне та нічне завантаження траси М-06 400 та 280 автомобілів.

Таблиця 3.9. Результати розрахунку миттєвої вітряної потужності електричної установки

Транспортний засіб	v м/с	P <sub>м.в</sub> , Вт	P <sub>в.д</sub> , Вт·доб
Автобус	2,20	9,15	197,67
	4,61	84,9	1800,07
	7,18	300,93	6501,34
	11,2	1104,33	24172,44
Вантажівка	1,41	2,31	48,21
	3,83	45,02	971,11
	6,01	162,04	3524,52
	8,71	552,03	11921,15
Легковий автомобіль	1,01	0,28	5,12
	1,05	1,18	24,59
	1,69	4,52	96,19
	2,31	8,12	184,64
	4,49	80,07	1696,45
Середня розрахункова швидкість	8,01	412,21	9552,02

У таблиці 3.10 наведено результати розрахунку акумуляторних батарей.

Таблиця 3.10. Результати розрахунку акумуляторних батарей

$P_n$ , Вт	$I_{сп}$ , А	$C_{АКБ}$ , А·год	$S_{акб.посл}$ шт ,	$m$ , шт	$C_{АКБ_n}$ А·год ,	$U_{a.n.}$ , В
65,88	2,82	110,42	2	2	150	12

За результатами розрахунку в табл. 3.10 для встановлення вибрано 2 АКБ 150 А·год кожна [7, 11].

У таблиці 3.11 наведено результати розрахунку сонячних батарей.

Таблиця 3.11. Результати розрахунку сонячних батарей

$R_{год}$ , кВт·год/м <sup>2</sup>	$P_б$ , кВт	$N_б$ , шт	$U_б$ , В	$P_{сб.н}$ , Вт	$R_{сум}$ , кВт·год/м <sup>2</sup>
0,094	0,121	1,167≈2	24	100	2,87

За результатами розрахунку в таблиці 3.11 для встановлення вибрано 2 сонячні панелі 100 Вт кожна [12].

### 3.4. Висновок по третьому розділу

В даному розділі кваліфікаційної роботи визначено фактичні показники генераторів різних виробників. В результаті порівняння обрано генератор РС-600ХV, через високі показники 140 Вт при частоті обертання 560 хв<sup>-1</sup> і початком роботи при порівняно низькій частоті обертання 56 хв<sup>-1</sup>.

## ВИСНОВОК

Проведено аналіз технічних рішень, внаслідок якого:

- вибрано вітроустановку та сонячні панелі монокристалічного типу.

Дана гібридна установка має найменшу вартість та відносно високий ККД.

Проведено вибір обладнання, для реалізації автономного електропостачання споживачів:

- визначено потужність показників вітрогенераторів, які мають перевищувати значення 412 Вт;
- визначено потужність показників сонячних панелей, які мають перевищувати 150 Вт.

Проведено експериментальну роботу:

- визначено фактичні показники різних генераторів виробників;
- в результаті порівняння обрано генератор RC-600XV, через високі потужних показників 140 Вт при частоті обертання  $560 \text{ хв}^{-1}$  і початком роботи при порівняно низькій частоті обертання  $56 \text{ хв}^{-1}$ .

Таким чином, у роботі показано ефективність застосування запропонованої гібридної установки для забезпечення автономності та енергонезалежності дорожньо-транспортної інфраструктури.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Попадченко С. А. Аналіз світових тенденцій модернізації електричних підстанцій на сучасному етапі розвитку / С. А. Попадченко // Енергетика та електрифікація. 2016. № 9. С. 46-49.
2. Балансова надійність електричної мережі з фотоелектричними станціями : монографія / [П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук та ін.] ; Вінницький нац. техн. ун-т. Вінниця, 2018. 136 с.
3. Медиковський М. О. Нейромережевий метод визначення активного складу вітрової електричної станції / Медиковський М. О., Мельник Р. В., Дубчак М. А. // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Інформаційні системи та мережі» 8 - SISN. 2020; Випуск 8: сс. 55 – 64
3. Бондаренко Д. В. Еквівалентні схеми акумуляторів електроенергії, які підключені до сонячних фотоелементів / Д. В. Бондаренко // Відновлювана енергетика. 2019. № 3. С. 30–34.
4. Медиковський М.О. Дослідження режимів управління енергодинамічними процесами в системах електропостачання за наявності акумуляюючих елементів / Медиковський М.О., Кравчишин В.С., Мельник Р.В., Шуневич О.Б. // Науковий вісник НЛТУ України, 2016. т. 26, № 7 С. 291 – 298.
5. Вступ до спеціальності. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: Курс лекцій/ С.О. Кудря, В.І. Будько. К.: НТУУ «КПІ», 2013. 387 с.
6. Шмідт Г., Конеченков А., Ільчук М. Гріцишина М., «Вітроенергетичний сектор України 2018. Огляд ринку», Українська вітроенергетична асоціація, 2019.
7. Комбіновані фотоенергетичні системи : [монографія] / Р. В. Зайцев, Г. С. Хрипунов, М. В. Кіріченко, А. В. Меріуц ; Нац. техн. ун-т "Харківський політехнічний інститут". Харків : [ФОП Бровін О. В.], 2020. 323 с.
8. Лежнюк П. Д. Фотоелектричні станції як елемент енергоефективного електропостачання / П. Д. Лежнюк, С. В. Кравчук, І. В. Котилко // Оптико електронні інформаційно–енергетичні технології. 2019. № 2. С. 100–106.
9. <https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/2353355-zitomirsku-obizdnudorogu-rekonstruue-kitajska-kompania.html>
10. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії / О.І.Соловей, Ю.Г.Лега, В.П. Розен, О.О.Ситник, А.В.Чернявський, Г.В.Курбаса / за заг. ред. О.І.Солов'я. Черкаси: Вид. ЧДТУ, 2007. 484 с.
11. Кузнецов М., Лисенко О. та Мельник О., «Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ,» Відновлювана енергетика, № 2, С. 6-15, 2018.

12. Сонячні системи на основі термічних і фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії / А. В. Дорошенко, М. А. Глауберман, Я. І. Лепіх, А. П. Балабан // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. 2020. № 3. С. 40–50.

13. Стаднік М. І. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії / М. І. Стаднік, Д. П. Проценко, С. М. Бабій // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2020. № 4. С. 32–41.

14. Фотоенергетика : навч. посібник / Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай, С. В. Котелевець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 160 с.

15. Щербина О. Енергія для всіх. Технічний довідник з енергоощадності та відновних джерел енергії. Ужгород., 2007. 336 с.