

Вінницький національний технічний університет

Факультет електроенергетики та електромеханіки

Кафедра комп'ютерні електромеханічні системи і комплекси

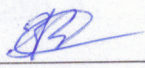
БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

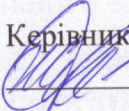
на тему:

«СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ КОМПЛЕКСОМ»

Виконав: студент 4-го курсу, групи ЕМСА-216

спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

В'ячеслав ЗУБЛЕВИЧ 

Керівник: к.т.н., доц. кафедри КЕМСК
 Олексій ЖУКОВ

« 20 » Травня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., доц. каф. ЕСЕМ
 Бойтський Ю.М.

« 10 » червня 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц. МИКОЛА Мошноріз 

« 3 » червня 2025 р.

Вінницький національний технічний університет

Факультет Електроенергетики та електромеханіки

Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

Рівень вищої освіти I-й (бакалаврський)

Галузь знань 14 – Електрична інженерія

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

К.Т.Н., доц. МИКОЛА Мошноріз

“18” лютого 2025 року

ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Зублевичу В'ячеславу Ярославовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система керування вітровим електротехнічним комплексом керівник роботи Жуков Олексій Анатолійович к.т.н., доц. каф. КЕМСК.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “20” 03 2025 р. № 97

2. Строк подання студентом роботи «03» 06 2025 р.

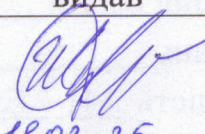
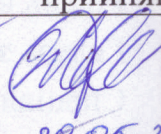
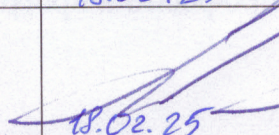
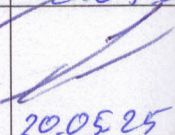
3. Вихідні дані до роботи: режим роботи тривалий, електричний генератор синхронного типу з електричним збудженням, потужність до 3 кВт

4. Зміст текстової частини: Коротка характеристика об'єкта керування і режимів його роботи. Визначення параметрів вітрової установки. Попередній розрахунок потужності генератора ВЕУ. Техніко-економічне обґрунтування вибору генератора. Вибір генератора ВЕУ. Розробка системи керування вітровою енергетичною установкою. Розробка математичної моделі та моделювання перехідних процесів. Висновки. Охорона праці.

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

Об'єкт, предмет, мета та задачі дослідження; Зовнішній вигляд та кінематична схема. Структурна схема системи автоматичного керування. Функціональна схема системи автоматичного керування Результати моделювання системи автоматичного керування вітроенергетичною установкою. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Жуков О. А., к.т.н., доц. каф. КЕМСК	 18.02.25	 20.05.25
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.пед.н., професор, зав. каф. БЖДПБ	 18.02.25	 20.05.25

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми бакалаврської дипломної роботи (БКР)	18.02.25	Вик
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	06.05.25	Вик
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	20.05.25	Вик
4	Виконання розділу «Охорона праці»	20.05.25	Вик
5	Попередній захист БКР	03.06.25	Вик
6	Нормоконтроль БКР	03.06.25	Вик
7	Рецензування БКР	10.06.25	Вик
8	Захист БКР	19.06.25	Вик

Студент


(підпис)

В'ячеслав ЗУБЛЕВИЧ
(прізвище та ім'я)

Керівник роботи


(підпис)

Олексій ЖУКОВ
(прізвище та ім'я)

АНОТАЦІЯ

Зублевич В.Я. Модернізація системи керування вітроенергетичної установки. Бакалаврська дипломна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Вінниця: ВНТУ, 2025. 94 с.

В бакалаврській кваліфікаційній роботі були запропоновані рішення щодо підвищення ефективності функціонування системи керування вітроенергетичної установки, шляхом створення системи автоматичного керування цією установкою, що дозволяє збільшити відбір потужності від вітрового колеса. В основній частині роботи запропоновано структурну та функціональну схему керування, обґрунтовано вибір електричного генератора, проведено комп'ютерне моделювання вітрової енергетичної установки.

В розділі охорони праці визначено основні положення щодо безпечної експлуатації досліджуваної вітрової установки в умовах дії шкідливих чинників оточуючого середовища.

Ключові слова: вітровий електротехнічний комплекс, генератор вітрової установки, система керування, режими роботи, моделювання, математична модель.

ABSTRACT

Zublevych V.Ya. Modernization of the control system of a wind power plant. Bachelor's thesis in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics. Vinnytsia: VNTU, 2025. 94 p.

In the bachelor's qualification work, solutions were proposed to increase the efficiency of the functioning of the control system of a wind power plant, by creating an automatic control system for this plant, which allows increasing the power output from the wind wheel. In the main part of the work, a structural and functional control scheme was proposed, the choice of an electric generator was justified, and a computer simulation of a wind power plant was conducted.

In the section on labor protection, the main provisions on the safe operation of the studied wind power plant under the influence of harmful environmental factors were determined.

Keywords: wind electrotechnical complex, wind power plant generator, control system, operating modes, simulation, mathematical model.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	10
1.1. Типи вітроустановок та принципи класифікації	10
1.2. Огляд існуючих структур систем автоматичного керування ВЕК.....	15
2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ВІТРОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ	24
2.1. Конструкція та принцип дії горизонтальної вітроенергетичної установки	24
2.2. Попередній розрахунок потужності генератора.....	28
2.2. Розрахунок конструктивних параметрів вітроколеса ВЕК	30
2.4. Техніко-економічне обґрунтування вибору генератора та системи керування ВЕУ	33
2.5. Вибір електрогенератора ВЕУ за потужністю і швидкістю обертання	38
2.6. Статичні характеристики електрогенератора ВЕУ	40
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІТРОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ	44
3.1. Розробка структури системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом	44
3.2. Розробка функціональної схеми системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом	46
3.3. Вибір інвертора	50
3.4. Вибір акумуляторів	51
3.4. Вибір контролера.....	52
4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВІТРОВОЇ УСТАНОВКИ.....	54
5 ОХОРОНА ПРАЦІ.	57

5.1. Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту	58
5.2. Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	61
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	70
Додаток А (обов'язковий) Технічне завдання	78
Додаток Б (обов'язковий) Ілюстративна частина	82

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АГ – асинхронний генератор

АСГ – асинхронізований синхронний генератор

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

БПЧ – безпосередній перетворювач частоти

ВД – вітровий двигун

ВЕК – вітровий електротехнічний комплекс

ВЕУ – вітрова електрична установка

ВМП – відбір максимальної потужності

ІВМ – інвертор ведений мережею

НВК – над синхронний вентильний каскад

СГ – синхронний генератор

PPT – power point tracking

ВСТУП

Актуальність. Зростаючий попит на електроенергію у поєднанні з необхідністю зменшення викидів парникових газів зумовлює активний перехід світової енергетики до відновлюваних джерел енергії. Серед них вітрова енергетика займає провідне місце завдяки своїй екологічності, доступності вітрового ресурсу та можливості масштабування. У контексті глобального тренду на декарбонізацію енергетики Україна також поступово розширює частку «зеленої» енергії у загальному енергетичному балансі. Згідно з прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (IEA), вже до 2030 року глобальні потужності вітрової енергетики можуть подвоїтись, а електроенергія з ВДЕ покриватиме понад третину світового попиту [1, 2]. В Україні, попри воєнні виклики, зберігається стратегічний курс на розвиток відновлюваної енергетики, зокрема й децентралізованих джерел у складі мікромереж та автономних систем живлення.

Вітрові електротехнічні комплекси (ВЕК) виступають важливою складовою цієї трансформації. Проте ефективність їх роботи значною мірою залежить не лише від якості вітроресурсу чи конструктивних характеристик турбіни, а й від технічного рівня системи керування. Саме система керування забезпечує узгоджену роботу генератора, силової електроніки та елементів автоматизації, реалізує адаптацію до змін вітрових умов, стабілізацію частоти й напруги, а також максимально можливе енергознімання при заданих обмеженнях.

Таким чином, розробка, дослідження та вдосконалення системи керування вітровим електротехнічним комплексом є важливим і актуальним завданням, що має як практичне, так і науково-технічне значення для підвищення енергоефективності, надійності та стабільності роботи вітрових установок в умовах реального енергетичного середовища.

Мета роботи – підвищення ефективності функціонування вітрового електротехнічного комплексу шляхом розробки системи автоматичного

керування, яка забезпечує оптимальний відбір електричної потужності залежно від параметрів вітрового потоку.

Основні задачі роботи:

1. Провести аналіз відомих структур вітрових електротехнічних комплексів та їх систем керування.
2. Виконати розрахунок споживання електричної потужності об'єкта електропостачання.
3. Розробити структуру системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом.
4. Здійснити вибір електротехнічного та силового обладнання для реалізації системи.
5. Розробити комп'ютерну модель вітроенергетичної установки з системою керування.
6. Провести моделювання та отримати графіки перехідних процесів.

Об'єктом дослідження в бакалаврській кваліфікаційній роботі є вітровий електротехнічний комплекс.

Предметом дослідження є процеси регулювання потужності вітрового електротехнічного комплексу.

Методи дослідження: У процесі дослідження застосовувалися: теорія електричних машин; методи аналізу електричних кіл; закони Кірхгофа; методи комп'ютерного імітаційного моделювання для дослідження динаміки електромеханічних систем; методи частотного аналізу стійкості замкнутих систем.

Особистий внесок здобувача. Основні розрахункові результати з формулюванням відповідних висновків отримані автором самостійно.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати досліджень доповідались та обговорювались на LIV науково технічній конференції підрозділів ВНТУ, 2025 р.

Публікації. За тематикою дослідження опубліковано тези доповіді за у Матеріалах LIV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, 2025 р.

1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1 Типи вітроустановок та принципи класифікації

Вітроустановки (вітроенергетичні установки, ВЕУ) є пристроями, що призначені для перетворення кінетичної енергії вітру в електричну енергію. Конструкція та принцип дії таких установок можуть суттєво відрізнятися, тому для систематичного аналізу необхідно класифікувати їх за ключовими ознаками [3].

Найбільш поширеним критерієм класифікації є орієнтація осі обертання ротора відносно напрямку вітру (рисунок 1.1):

- Горизонтальні вітроустановки (HAWT) – ротор орієнтований паралельно до напрямку вітру. Це найпоширеніший тип ВЕУ. Він забезпечує високу ефективність, але потребує системи орієнтації.
- Вертикальні вітроустановки (VAWT) – ротор обертається навколо вертикальної осі. Такі установки можуть працювати за будь-якого напрямку вітру, не потребують поворотного механізму, але мають нижчий коефіцієнт корисної дії (ККД).

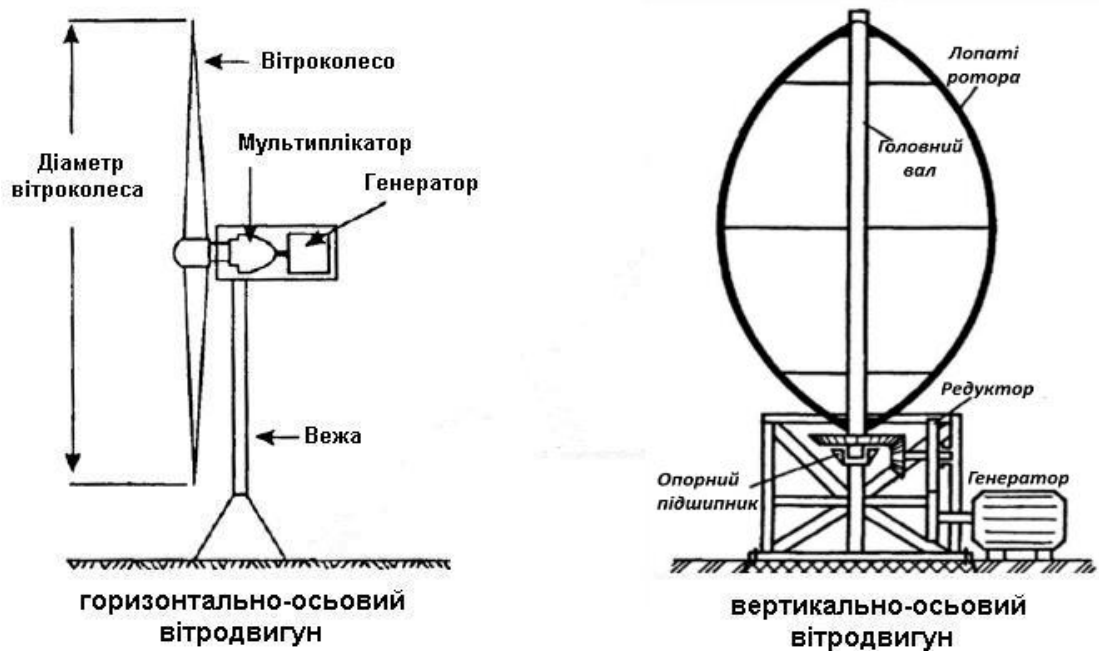


Рисунок 1.1 – Класифікація вітроустановок за орієнтацією осі ротора

Горизонтальні вітроенергетичні установки (ВЕУ) є найпоширенішим типом вітрогенераторів завдяки своїй ефективності та конструктивній простоті. У таких установках вісь обертання ротора (вітроколеса) орієнтована паралельно до поверхні землі, а лопаті обертаються в площині, перпендикулярній напрямку повітряного потоку. Конструкція передбачає автоматичне орієнтування вітроколеса у напрямку вітру за допомогою хвостовика або активної системи повороту гондоли. Для підвищення ефективності роботи також застосовуються системи регулювання кута атаки лопатей, що дозволяє максимально ефективно використовувати навіть слабкі вітри. Завдяки цим технічним рішенням горизонтальні вітрові установки здатні забезпечувати стабільне виробництво електроенергії у широкому діапазоні вітрових умов. Коефіцієнт корисної дії горизонтальних ВЕУ зазвичай становить 40-50%, що є одним з найвищих показників серед усіх типів вітрогенераторів. Саме тому вони найчастіше застосовуються у промислових вітроелектростанціях (ВЕС) для генерації значних обсягів електроенергії.

За кількістю лопатей [3] вітрові колеса поділяють на (рисунок 1.2):

- Однолопатеві установки – мають найменшу масу ротора, але потребують противаги для балансування та складної системи керування.
- Двохлопатеві установки – компроміс між масою та ефективністю, менш поширені.
- Трилопатеві установки – найпоширеніші, забезпечують стабільну роботу, оптимальне співвідношення ефективності, рівномірності навантаження та аеродинамічних характеристик.

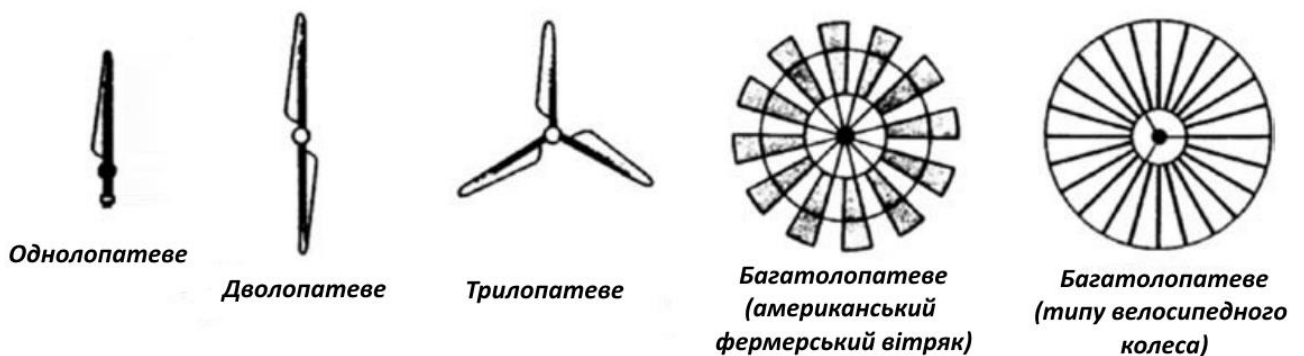


Рисунок 1.2 – Типи вітроколес за кількістю лопатей

Однолопатева турбіна – має лише одну лопать, рідко використовується через дисбаланс і складність стабілізації, має високу швидкість обертання, але менш ефективна при змінному вітрі.

Дволопатева турбіна – має дві лопаті, легша й дешевша, ніж трилопатева, але створює більше вібрацій і шуму, часто потребує гіроскопічної стабілізації.

Трилопатева турбіна – є найпоширенішим типом сучасних вітроенергетичних установок завдяки раціональному співвідношенню між коефіцієнтом аеродинамічної ефективності, стабільністю обертання та зменшеним рівнем вібрацій. Вона забезпечує надійну роботу в широкому діапазоні швидкостей вітру та є оптимальною з точки зору масо-габаритних характеристик, складності керування та енергоефективності.

Багатолопатева турбіна (фермерський вітряк, США) – містить багато коротких лопатей (до 20), призначена для повільного, але високомоментного механізму, – наприклад, для перекачування води, добре працює при низьких швидкостях вітру. Але: потребує міцної опори, що ускладнює монтаж та обслуговування; погано регулюється за потужністю: важко реалізувати ефективне регулювання швидкості або кута атаки; має низький ККД для генерації електроенергії і неефективне перетворення кінетичної енергії вітру в електрику.

Багатолопатева турбіна (типу велосипедного колеса) – велика кількість вузьких лопатей, схожа на велосипедне колесо, працює при дуже низьких швидкостях вітру, має високий пусковий момент. Але має низький ККД, потребує складного балансування та ускладнене технічне обслуговування через велику кількість деталей.

За принципом дії ротора вітрові електротехнічні комплекси поділяються на такі:

- Установки з підйомною силою – використовують аеродинамічний підйом, мають високий ККД, характерні для горизонтальних установок.
- Установки з лобовим опором – застосовуються переважно в простих вертикальних конструкціях, мають нижчий ККД.

За встановленою потужністю ВЕУ поділяють на [5]:

- Мікроустановки – до 1 кВт.
- Малі установки – до 100 кВт.
- Середні установки – від 100 до 1000 кВт.
- Промислові – понад 1 МВт.

Класифікація за даною ознакою приведена у таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Класифікація ВЕК за встановленою потужністю

Клас установки	Потужність, МВт	Діаметр колеса, м	Кількість лопате́й	Призначення
Малої потужності	До 0,1	3-10	3-2	Заряджання акумуляторів, насоси, побутові потреби
Середньої потужності	Від 0,1 до 1,0	25-44	3-2	Енергетика
Високої потужності	Від 1,0	>45	3-2	Енергетика

Залежно від сфери застосування механічні ВЕУ підрозділяють на дві підгрупи: вітронасосні та вітросилові згідно рисунок 1.3.

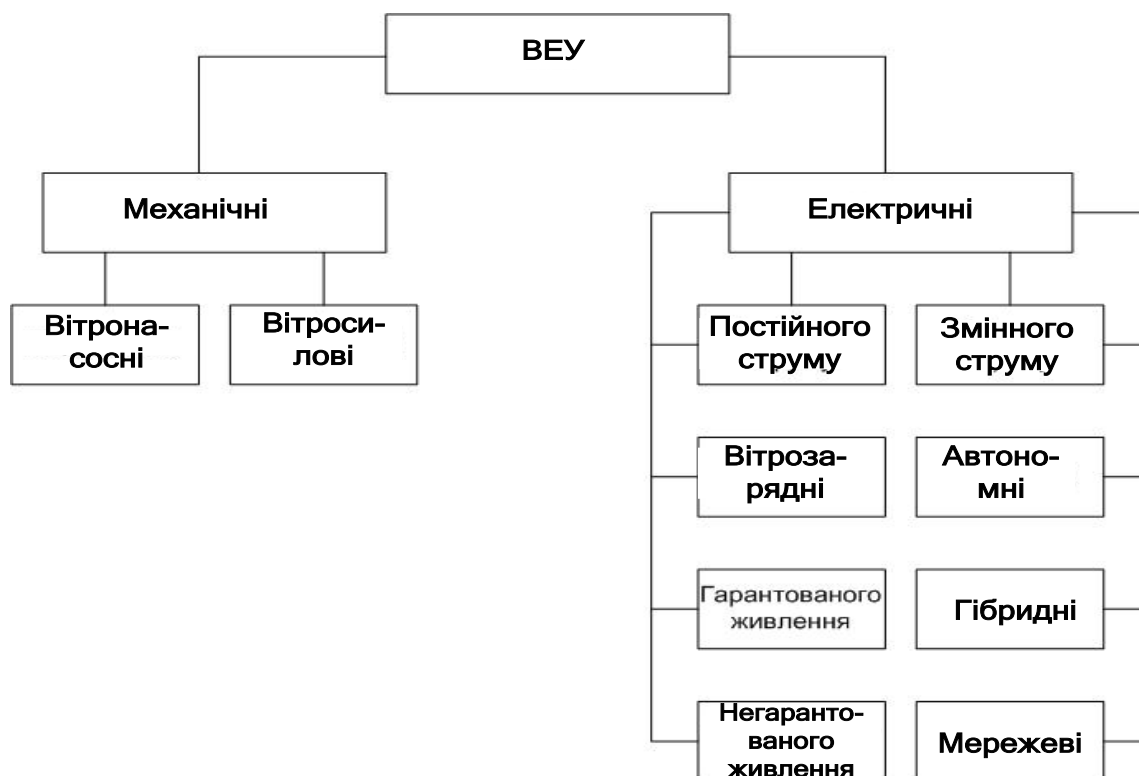


Рисунок 1.3 – Класифікація ВЕУ залежно від сфери застосування

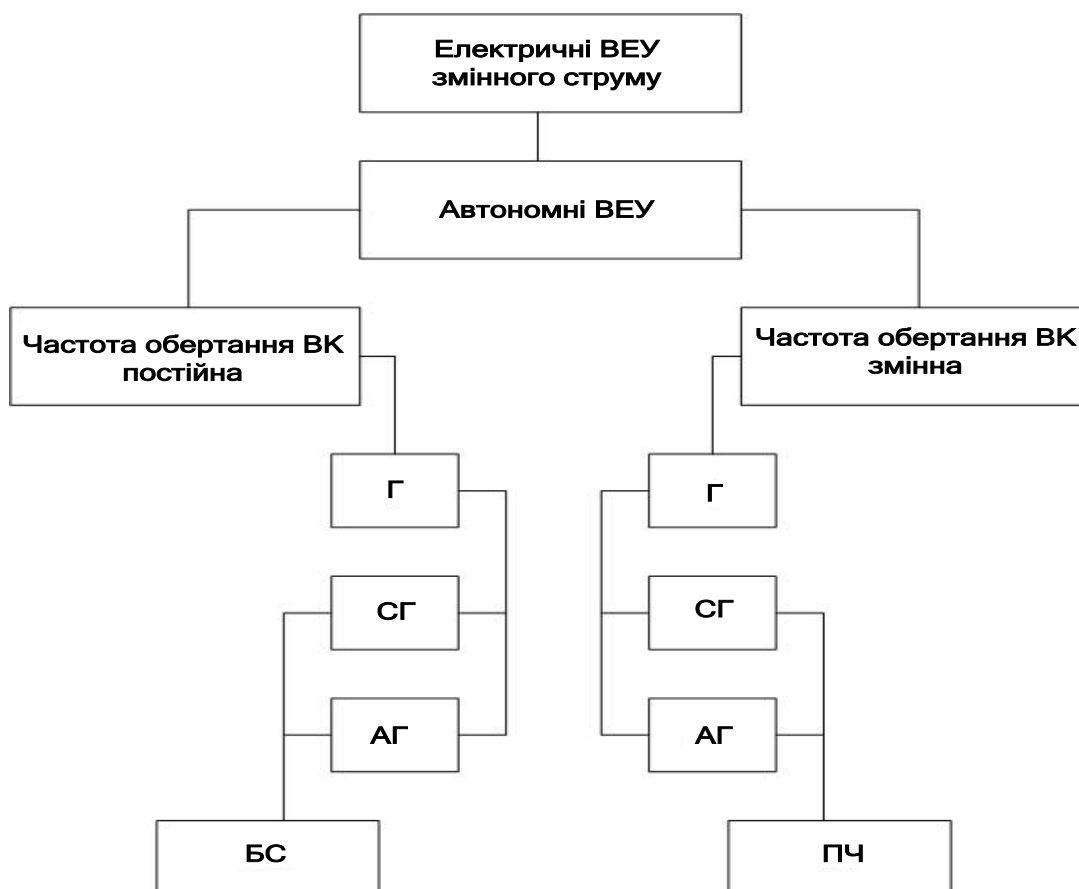


Рисунок 1.4 – Структурна схема автономних ВЕУ: Г – генератор; АГ – асинхронний генератор; БО – баластний опір; ПЧ – перетворювач частоти



Рисунок 1.5 – Структурна схема мережевих ВЕУ: СГ – синхронний генератор; АГ – асинхронний генератор; АсГ – асинхронізований генератор; ПЧ – перетворювач частоти

Класифікація вітрових енергетичних установок дозволяє структурувати різновиди конструкцій ВЕК і сформувати базу для обґрунтованого вибору структури системи керування. Тип установки, її орієнтація, принцип дії ротора та діапазон потужності безпосередньо впливають на вимоги до алгоритмів регулювання, архітектури керуючої системи та складу силової електроніки. Наведений огляд є необхідною передумовою для подальшого аналізу технічних рішень щодо реалізації ефективної системи автоматизованого керування ВЕК.

1.2 Огляд існуючих структур систем автоматичного керування ВЕК

Система керування є ключовим компонентом вітрового електротехнічного комплексу, що забезпечує адаптацію установки до змінних умов навколишнього середовища та стабільне функціонування електроенергетичної частини. Вибір структури системи керування визначається типом генератора, способом підключення до електромережі, необхідністю регулювання потужності та забезпеченням якості електроенергії.

У даному підрозділі розглянуто найбільш поширені структурні схеми систем керування ВЕК, серед яких – підключення синхронного генератора до мережі через безпосередній перетворювач частоти (БПЧ), що наведено на рисунку 1.6 та рисунку 1.7.

Синхронний генератор (СГ) підключається до мережі через безпосередній перетворювач частоти (БПЧ), який забезпечує перетворення частоти f_1 на f_2 та адаптацію виробленої енергії до параметрів мережі.

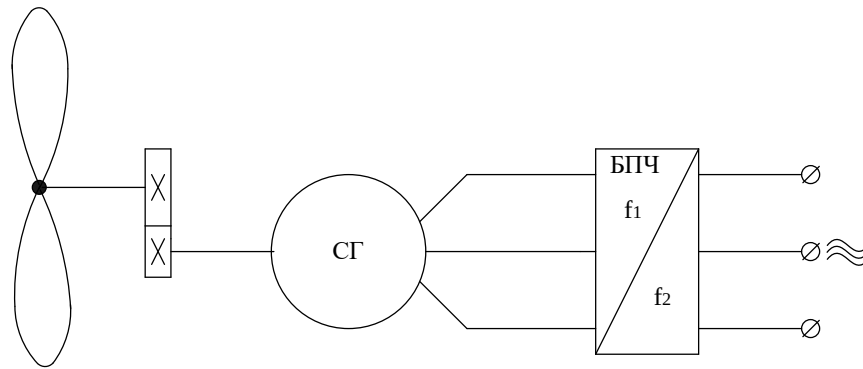


Рисунок 1.6 – Схема підключення СГ до навантаження через БПЧ

Перевагами такої схеми є – забезпечення стабільної частоти та напруги незалежно від швидкості обертання ротора та можливість роботи в широкому діапазоні швидкостей вітру. Але дана схема має недоліки, такі, як – висока вартість силової електроніки, наявність значних електромагнітних завад (ЕМІ), потреба у фільтрах, складність обслуговування перетворювача, підвищені втрати на комутацію в БПЧ.

На рисунку 1.7 зображено схему, в якій синхронний генератор підключається до навантаження через безпосередній перетворювач частоти (БПЧ). Така система дозволяє компенсувати змінну частоту генерації за рахунок електронного узгодження з мережею.

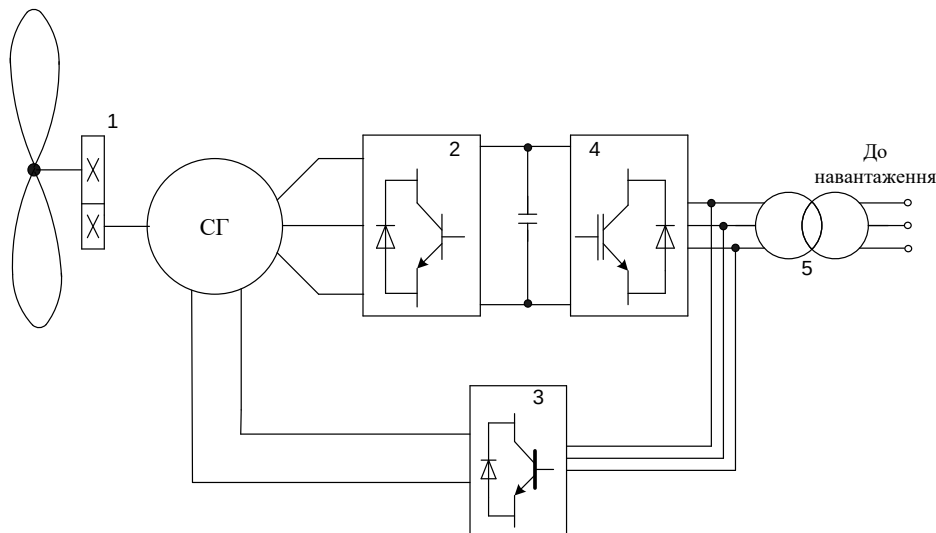


Рисунок 1.7. Конфігурація ВЕК із використанням синхронного генератора

До переваг даної конфігурації належить (рис 1.6 та рис. 1.7) висока якість електроенергії на виході та можливість адаптації до змінних швидкостей вітру. Водночас, складність керування та потреба у захисті від перевантаження обмежують її використання в системах великої потужності без додаткових елементів.

На рисунку 1.8 представлено систему, де використано генератор із постійними магнітами та двоступеневий перетворювач: випрямляч і інвертор. Проміжна ланка постійного струму дозволяє забезпечити керовану стабілізацію напруги.

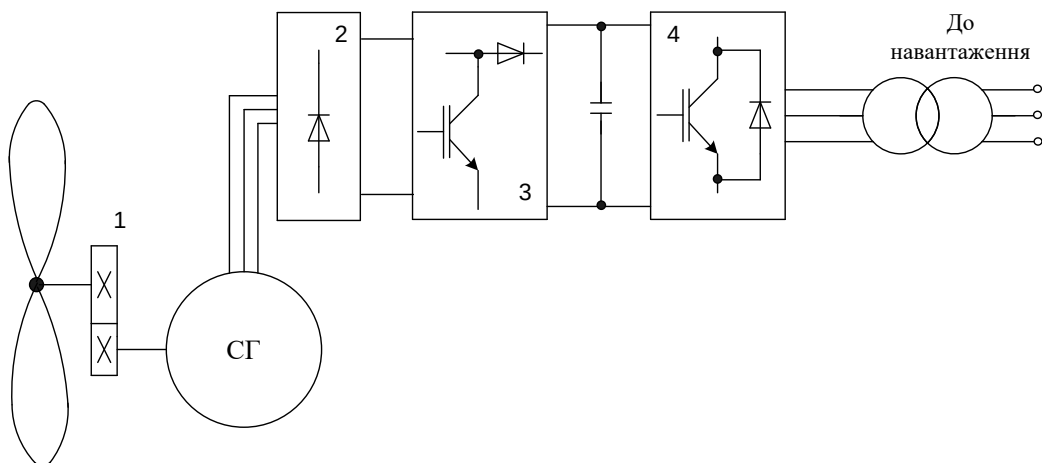


Рисунок 1.8 СГ з ПМ та перетворювачем у конфігурації DC-link

Схема має високий ККД та надійність завдяки відсутності ковзних контактів. Застосування генератора з ПМ спрощує конструкцію, зменшує втрати та підвищує чутливість керування. Проте недоліками є висока вартість ПМ та складність реалізації плавного старту.

Рисунок 1.9 демонструє складнішу схему, де використано асинхронізований генератор із живленням ротора через інвертор. Такий підхід забезпечує змінну швидкість обертання ротора при збереженні частоти вихідної напруги на заданому рівні.

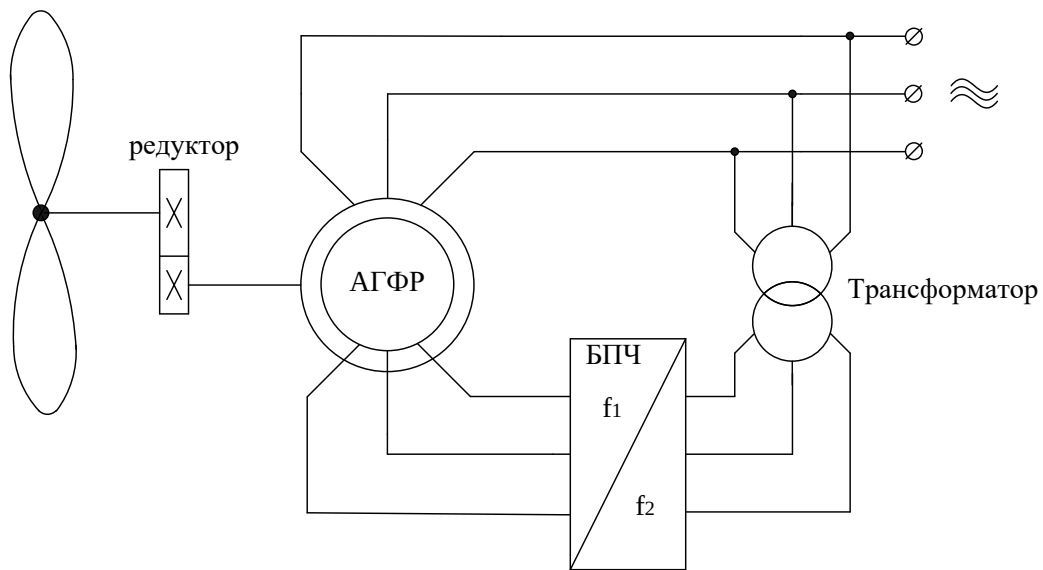


Рисунок 1.9. Асинхронізований СГ з керованим живленням ротора

Ця схема дозволяє реалізувати векторне керування, поліпшує стабільність і динаміку, але ускладнює конструкцію і вимагає застосування силової електроніки з подвійним живленням.

На рисунку 1.10 приведена схема із використанням незалежного випрямляча і інвертора (НВК). Вона базується на незалежному випрямлячі та інверторі, які розділені елементом накопичення енергії. Така конфігурація є найгнучкішою у питанні реалізації алгоритмів керування.

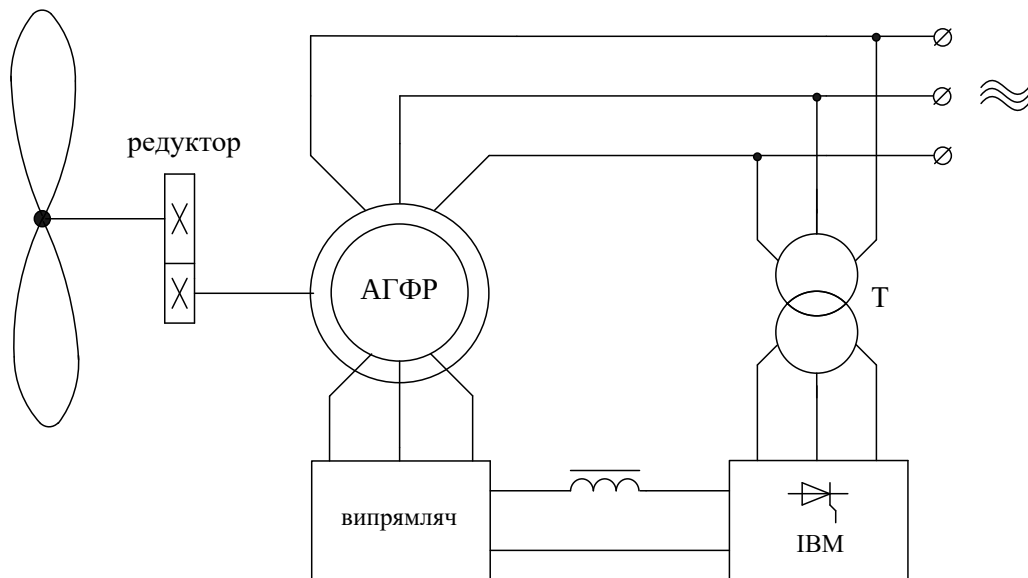


Рисунок 1.10 – Схема з НВК (незалежним випрямлячем і керованим інвертором)

Приведена схема (рис. 1.10) дозволяє ефективно регулювати потужність, частоту та фазу, проте потребує складних схем захисту та охолодження.

Потужність в такому випадку знімається зі статора і з ротора, що збільшує коефіцієнт використання машини, а також розширює можливості керування.

Недоліком такої системи, крім перерахованих для асинхронізованого синхронного генератора, є також те, що генерування активної потужності можливе лише при надсинхронній швидкості обертання, підсинхронний режим неможливий, так як випрямляч в колі ротора може пропускати активну потужність тільки від роторної обмотки на перетворювач частоти, а не навпаки [54, 62]. Це означає необхідність в високій швидкості обертання ВК (а ВЕУ вертикального типу є тихохідними) або ж застосування мультиплікатора, котрий знизить загальний ККД системи.

На рисунку 1.11 представлено блок-схему гібридної вітрової енергетичної системи, яка поєднує в собі мікротурбіну та вітрову турбіну із розподілом сигналів керування. Це дозволяє забезпечити більш стабільне живлення об'єкта.

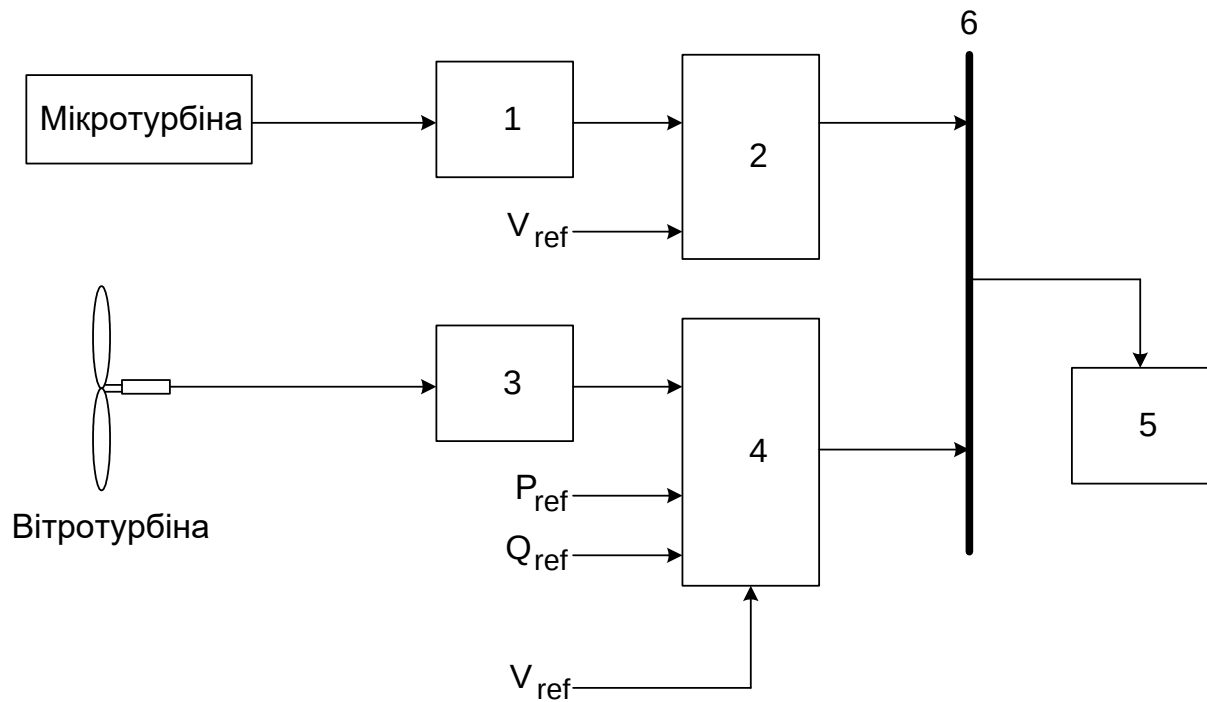


Рисунок 1.11. Блок-схема гібридної ВЕС

На рисунку 1.11: 1 – синхронний генератор на постійних магнітах; 2 – система керування потужністю мікротурбіни; 3 – генератор із самозбудженням; 4 – система керування потужністю основної вітротурбіни; 5 – навантаження (мережа); 6 – шина змінної напруги; V_{ref} – уставка за напругою; P_{ref} , Q_{ref} – задане значення активної та реактивної потужності відповідно.

Система з відбором максимальної потужності наведена на рисунку 1.12. Вона показує структурну реалізацію енергетичної системи з реалізацією відбору максимальної потужності (MPPT). Система включає сенсори швидкості вітру, перетворювач, регулятор струму та керуючий контролер. (1 – синхронний генератор на постійних магнітах; 2 – індуктивно ємнісний фільтр; 3 – трифазний випрямляч; 4 – блок обчислення точки відбору максимальної потужності; 5 – пороговий блок для обмеження швидкості обертання; 6 – конур ШІМ.)

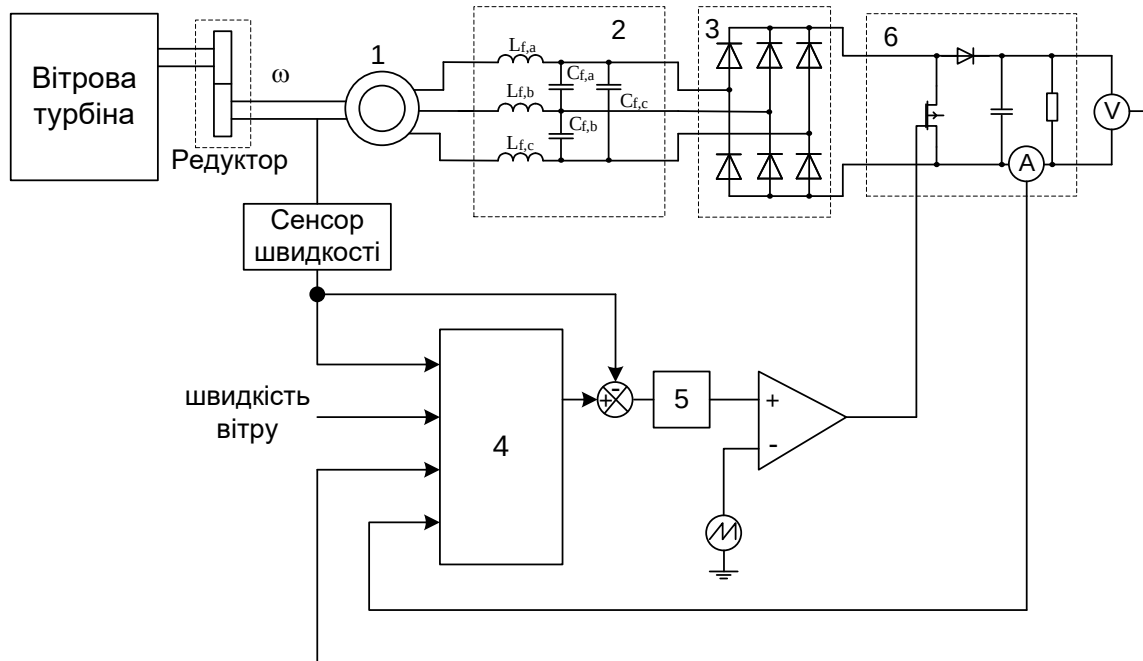


Рисунок 1.12. Схема реалізації системи МРРТ з вхідними параметрами від сенсорів

На рисунку 1.13 подано структурну схему керування вітроустановкою з урахуванням параметрів обертання, напруги та струму. Застосовано ланки керування моментом, напругою та фільтрацію зворотних сигналів. У даній схемі відповідно позначено: 1 – база даних точок відбору максимальної потужності; 2 – блок множення; 3 – фільтр низьких частот; 4 – регулятор з ПІ законом регулювання; 5 – широтно-імпульсний генератор; *out* – вихід на одновібратор розрядного транзистора; ω_m – швидкість обертання колеса; i_a – струм генератора; u_a – напруга генератора; P_{caf}^* – максимальна потужність (бажана); P_{caf} – фактична потужність

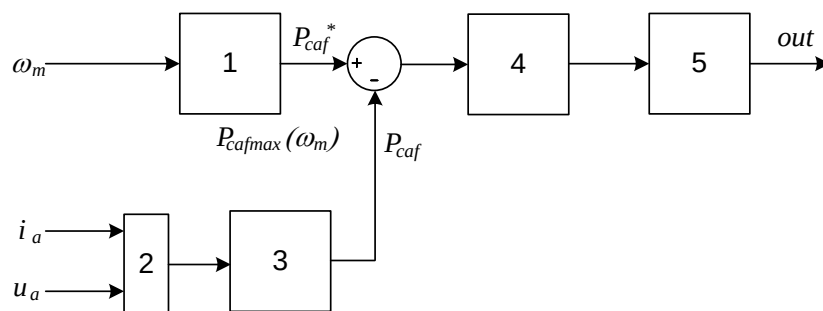


Рисунок 1.13 Базова схема керування ВЕУ

На рисунку 1.14 розглядається система керування асинхронізованим синхронним генератором, в якості якого пропонується використовувати серійний асинхронний двигун з фазним ротором або спеціально спроектований генератор. Вона включає: 1 – вітротурбіну; 2 – трансмісію; 3 – електричну машину АСГ; 4 – збуджувач; 5 – регулятор збудження; 6.1 і 6.2 – сенсори струму ротора і статора; 6.3. і 6.4 – сенсори напруги статора і ротора; 6.5 – сенсор кутового положення ротора; 6.6 – сенсор кута, що позначає вектор напруги мережі; 6.7 – сенсор швидкості вітру.

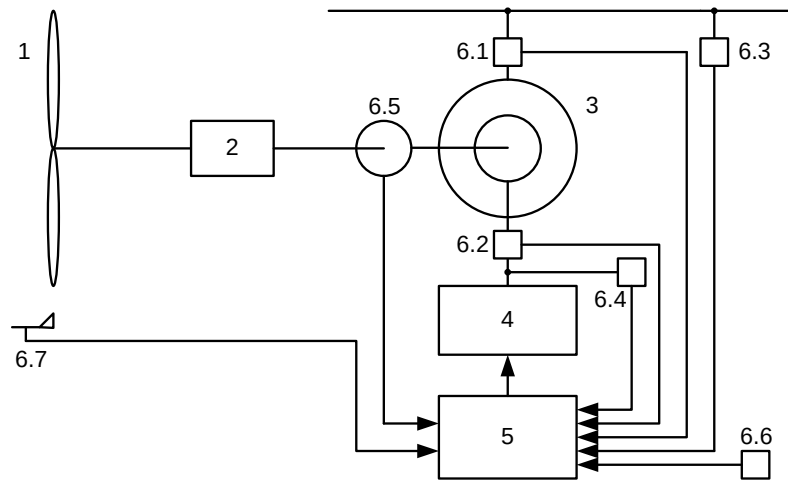


Рисунок 1.14. Система керування з АСГ та регулюванням потужності

Рисунок 1.15 ілюструє блок-схему реалізації алгоритму відбору максимальної потужності. Передбачено обчислення оптимальної потужності на основі швидкості обертання вала.

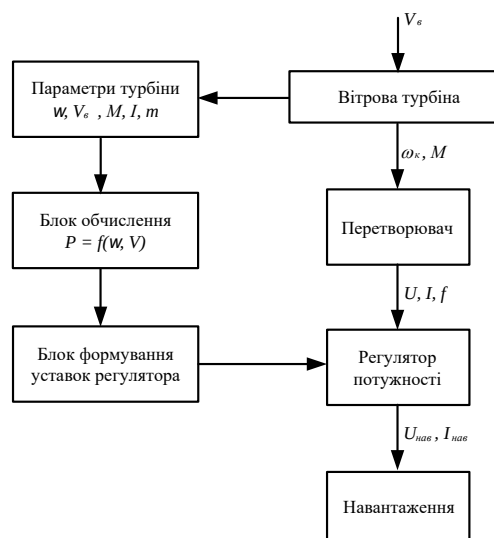


Рисунок 1.15 – Блок-схема реалізації МРРТ алгоритму

На рисунку 1.16 графічно пояснено суть алгоритму відбору максимальної потужності при різних навантаженнях. Залежність потужності від швидкості обертання ілюструє наявність точки максимуму, що шукається у режимі регулювання в реальному режимі часу.

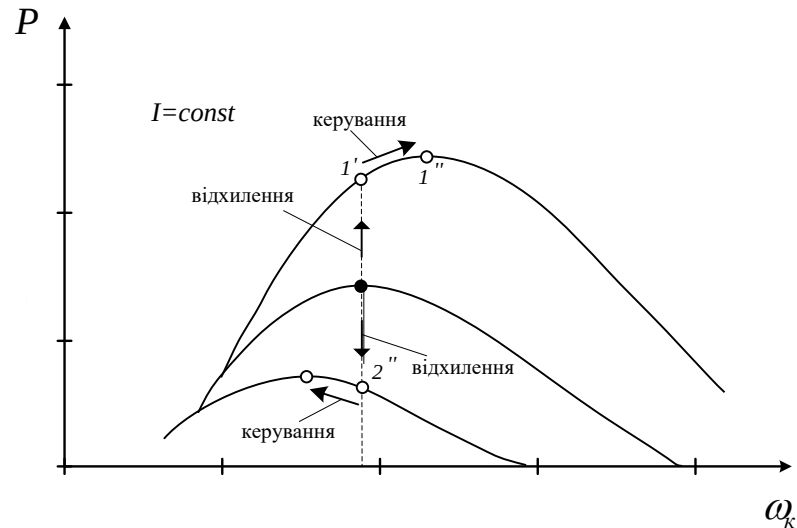


Рисунок 1.16 – Графік потужності ВЕК з точками максимального відбору

Висновок. У результаті аналізу конструкцій вітрових електротехнічних комплексів та схем їх систем керування встановлено, що ефективність роботи ВЕК значною мірою визначається не лише типом вітротурбіни, а й архітектурою системи керування. Оптимальне поєднання генератора, перетворювачів і алгоритмів керування дозволяє забезпечити стабільну роботу системи, максимальний відбір потужності та прийнятну якість електроенергії. Результати цього огляду є основою для розробки системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом.

2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ ВІТРОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

2.1 Конструкція та принцип дії горизонтальної вітроенергетичної установки

На рисунку 2.1 представлено конструктивну схему горизонтально-осьової вітрової електроустановки, що дозволяє наочно уявити її будову та функціональні елементи. Такий тип конструкції є найбільш поширеним у промисловій та побутовій вітроенергетиці завдяки високій ефективності перетворення енергії вітру.

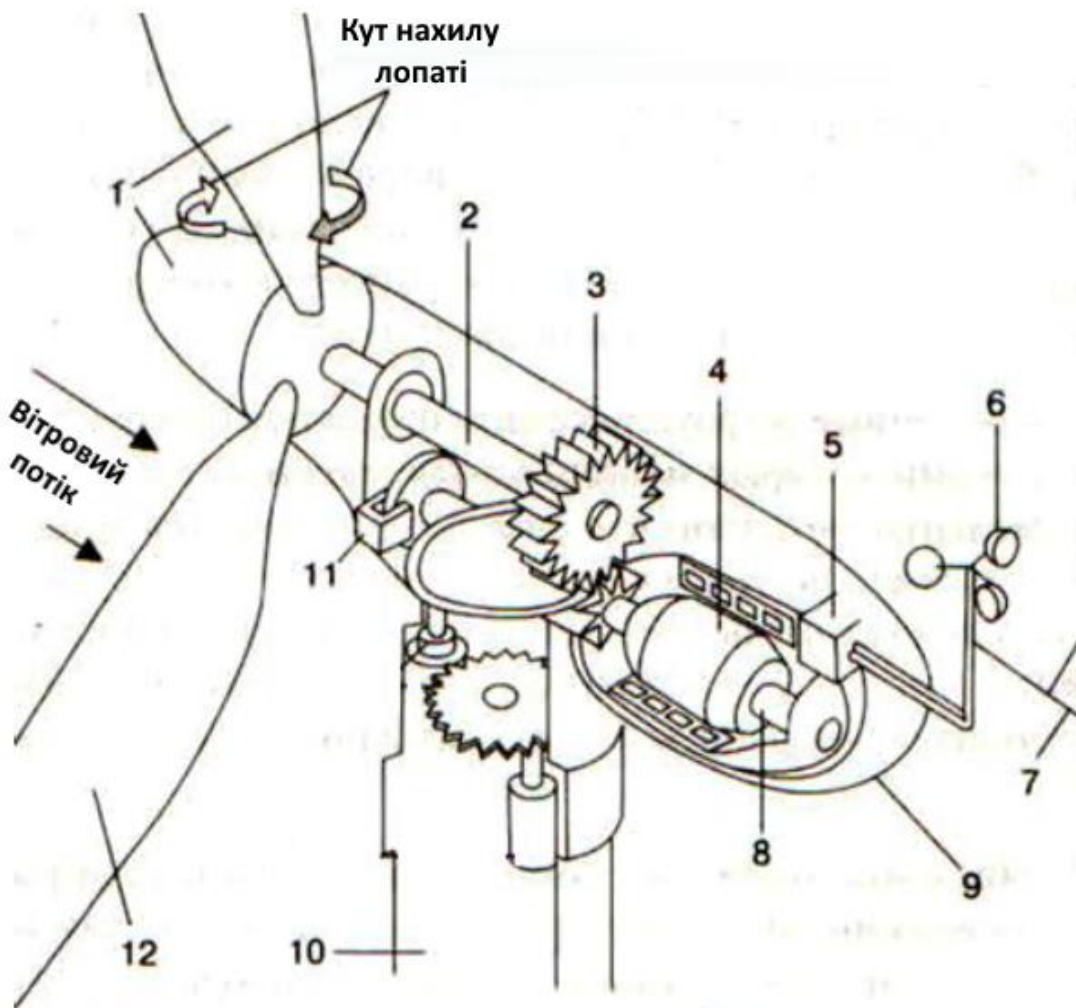


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема вітроенергетичної установки з вертикальною віссю обертання

Основні елементи такої вітрової установки:

1. Ротор вітроколеса – складається з лопатей, які взаємодіють з вітровим потоком.
2. Низькошвидкісний вал – передає обертальний момент від ротора до редуктора.
3. Редуктор – підвищує частоту обертання з низькошвидкісного вала до рівня, необхідного для генератора.
4. Генератор – перетворює механічну енергію обертання у електричну. Зазвичай працює на основі індукції або постійних магнітів.
5. Контролер – електронний модуль, що забезпечує автоматичний запуск і зупинку турбіни, а також обробку даних із сенсорів.
6. Анемометр – вимірює швидкість вітру та передає цю інформацію до контролера.
7. Флюгер – визначає напрямок вітру і дозволяє орієнтувати гондолу з вітроколесом у відповідному напрямі.
8. Високошвидкісний вал – обертає ротор генератора з частотою, достатньою для ефективної генерації.
9. Гондола – корпус, у якому розміщуються всі ключові компоненти: генератор, редуктор, гальмо, контролер.
10. Щогла – піднімає гондолу на висоту, де швидкість вітру є стабільнішою та вищою.
11. Гальмо – запобігає аваріям при надмірному вітровому навантаженні, здійснюючи екстрену зупинку ротора.
12. Лопаті ротора – основні елементи, що уловлюють енергію вітру та створюють обертальний момент.

Принцип роботи установки полягає в наступному: під впливом вітрового потоку лопаті (поз. 12 на рис. 2.1) приводяться в обертання. Обертання передається на ротор (поз. 1), який закріплений на низькошвидкісному валу (поз. 2). Через редуктор (поз. 3) обертальний момент передається на високошвидкісний вал (поз. 8), з'єднаний із ротором генератора (поз. 4). У

генераторі відбувається перетворення механічної енергії на електричну. Контролер (поз. 5), анемометр (поз. 6) і флюгер (поз. 7) забезпечують керування та адаптацію роботи установки до зміни умов середовища. Гальмівна система (поз. 11) виконує захисну функцію.

Корпус вітроустановки є центральною частиною конструкції, на яку кріпиться генератор і редуктор, а також розміщуються основні вузли системи орієнтації. Він закріплюється у верхній частині щогли і забезпечує поворот турбіни за напрямком вітру, що дозволяє підтримувати її в оптимальному положенні для максимального відбору енергії. Такий поворот здійснюється навколо вертикальної осі (вісь ристання) за допомогою хвостової балки з оперенням. Саме вона, реагуючи на зміну напрямку вітрового потоку, автоматично повертає турбіну, орієнтуючи ротор у потрібному напрямку.

На рисунку 2.2 зображено конструкцію та принцип дії хвостового механізму орієнтації та автоматичного відхилення вітроколеса при надмірних швидкостях вітру. Для уникнення руйнувань при перевищенні граничної швидкості вітру використовується механізм відхилення осі ротора від напрямку вітру. Такий механізм реалізовано за рахунок зміщення осі відхилення хвоста відносно осі ротора та геометричної побудови важеля з хвостовим оперенням.

У нормальних умовах сила тяги від ротора врівноважується аеродинамічною силою, що діє на хвостову частину. Завдяки цьому вісь ротора залишається паралельною до напрямку вітрового потоку. Кут нахилу осі хвоста θ_0 (у площині «вигляд зверху») та кут α (у площині «вигляд збоку») обираються так, щоб у сталому режимі вага хвостового оперення забезпечувала повернення системи до робочого положення. При зростанні швидкості вітру сила тиску на хвіст переважає відновлювальний момент від ваги хвоста. Це зумовлює його відхилення, що призводить до зміни просторового положення вітроколеса. Як наслідок, вісь ротора відхиляється від вітрового потоку, зменшуючи ефективну площу лопатей, що беруть участь у перетворенні енергії, і, відповідно, знижуючи навантаження на генератор та редуктор. Коли швидкість вітру

нормалізується, хвіст повертається у вихідне положення під дією власної ваги, і установка знову переходить у стандартний режим роботи.

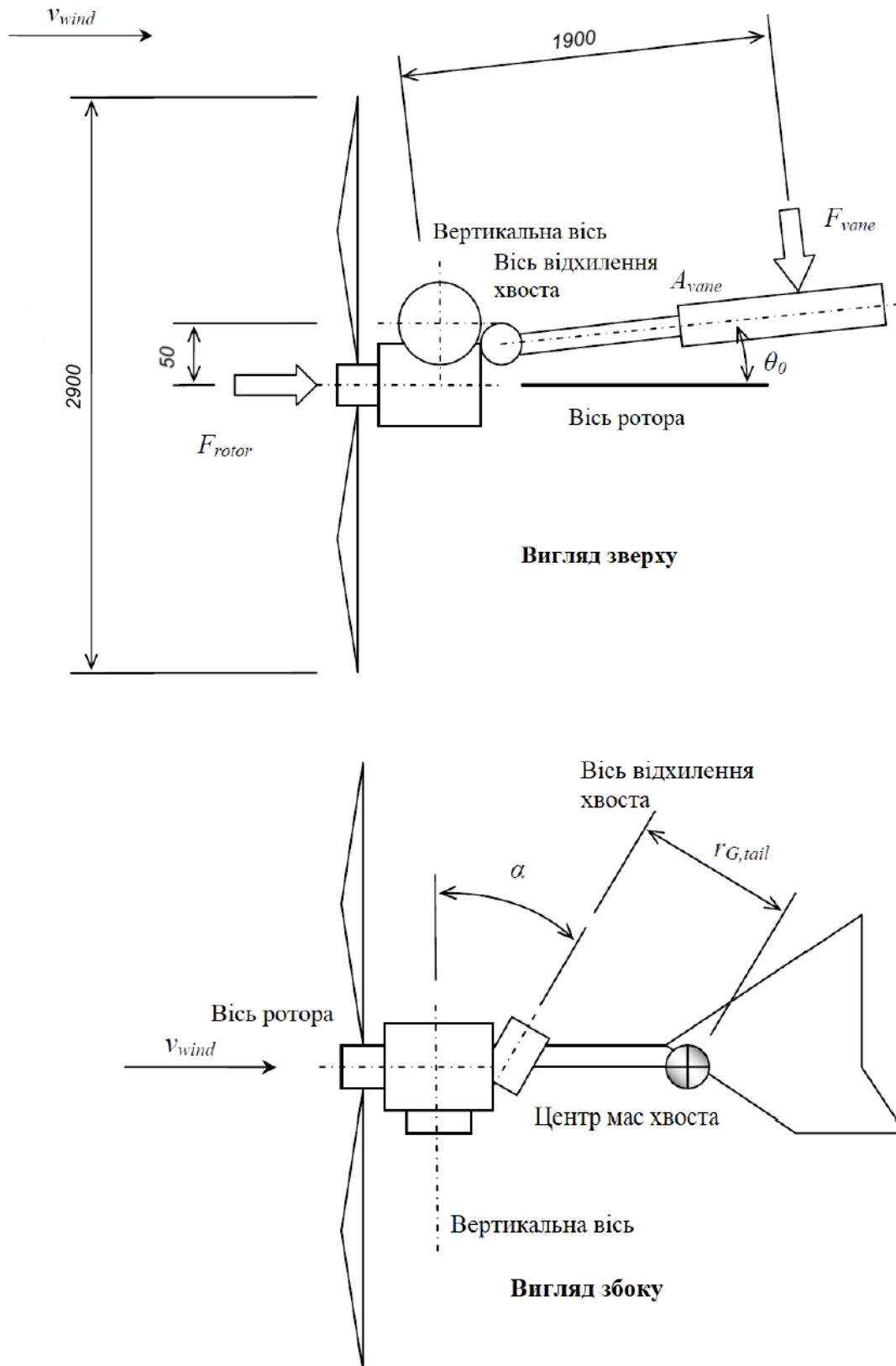


Рисунок 2.2 – Схема конструкції вітротурбіни із механізмом відхилення при високих швидкостях вітру

Таке рішення дозволяє реалізувати пасивну систему захисту від перевантаження без складної електроніки, що особливо актуально для малопотужних автономних ВЕУ.

2.2 Попередній розрахунок потужності генератора

Найдоцільніше розміщувати вітроенергетичний комплекс (ВЕК) у такій місцевості, де вітровий потенціал є достатнім для ефективного виробництва електроенергії. Для прикладу, якщо середньорічна швидкість вітру становить понад 4-4,5 м/с, установка потужністю 1 кВт може забезпечити річне виробництво до 1000-1200 кВт·год. Припустімо, що ВЕК встановлюється у типовому сільському районі Вінницької області, наприклад, у віддаленому населеному пункті.

Дані щодо середньомісячної швидкості вітру для даного регіону наведено на рис. 2.3. Інформація отримана з відкритих кліматичних джерел (наприклад, WeatherSpark.com).

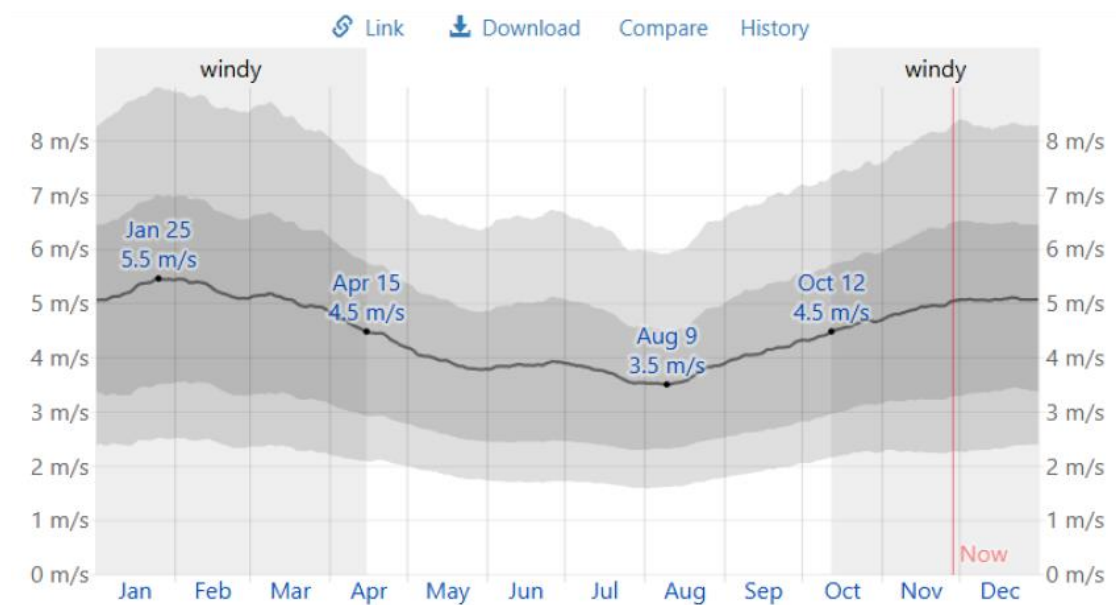


Рисунок 2.3 - Середні значення середньогодинної швидкості вітру протягом року

Для розрахунку потужності генератора приймаємо як об'єкт навантаження типовий приватний будинок. Згідно з попередніми оцінками, місячне споживання електроенергії у такому будинку не перевищує:

$$W_{\text{міс}} = 250 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Витрати електроенергії є помірними, оскільки для опалення та нагріву води використовується газовий котел. Вітрогенератор у такому разі має забезпечувати електропостачання побутових споживачів (освітлення, холодильник, насос, електроніка тощо) загальною потужністю до 2 кВт у пікові години.

У разі перебоїв електропостачання при відсутності вітру (наприклад, у безвітряну ніч) резервне живлення забезпечується бензиновим генератором. Необхідно оцінити його потужність так, щоб він зміг зарядити акумуляторну систему для забезпечення 250 кВт·год щомісячного споживання.

Для попередньої оцінки обчислюємо середнє годинне споживання електроенергії:

$$W_{\text{ср.г}} = \frac{W_{\text{м}}}{N \cdot n}, \quad (2.1)$$

де $W_{\text{ср.г}}$ - середнє щогодинне споживання, [кВт/г];

$W_{\text{м}}$ - середньомісячне споживання;

N - число днів у місяці;

n - число годин у добі.

$$W_{\text{ср.г}} = \frac{250}{30 \cdot 24} = 347 \text{ Вт / год.}$$

Для заряджання акумуляторних батарей зі швидкістю не менше 350 Вт/год, слід підібрати генератор, потужність якого буде в 2-3 рази більшою, оскільки фактична тривалість роботи генератора становитиме лише близько 30-35 % від повного часу. Це пов'язано з неможливістю постійної генерації через

циклічний режим роботи. Тоді номінальна потужність генератора, враховуючи коефіцієнт запасу ($K_3 = 2...3$), має становити:

$$P_n = W_{\text{ср.г}} \cdot K_3 \quad (2.2)$$

де P_n - номінальна потужність.

$$P_n = 350 \cdot 3 = 1050 \text{ (Вт)}.$$

2.3 Розрахунок конструктивних параметрів вітроколеса ВЕК

Конструктивна схема трилопатевого вітроколеса зображена на рисунку 2.4. Вона визначається такими основними геометричними параметрами:

- L – довжина однієї лопаті;
- R – радіус кола обертання ротора;
- D – діаметр вітроколеса ($D = 2R$).

.

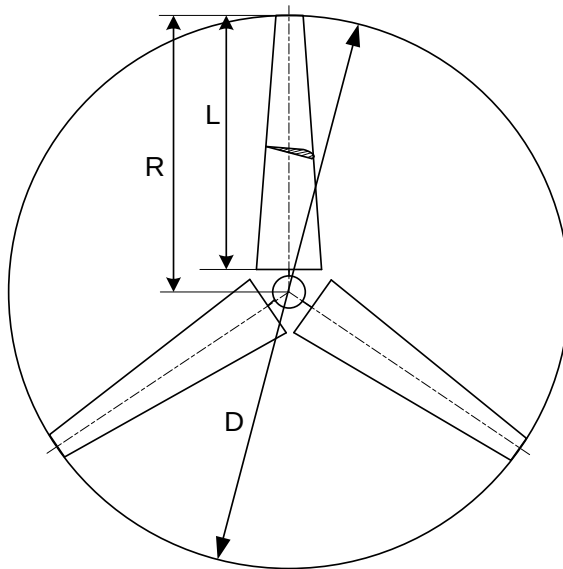


Рисунок 2.4 - Схема вітроколеса

Вибір діаметра вітроколеса базується на необхідній кількості виробленої електроенергії та вітроенергетичному потенціалі регіону встановлення.

Попередньо площу обміту лопатей S , необхідну для забезпечення потрібної кількості енергії, можна визначити за формулою:

$$S = W_{\Sigma} / (\eta_{\text{вев}} \cdot E_{\text{віт.пит}}), \quad (2.3)$$

де, W_{Σ} – річна потреба в електроенергії, кВт·год;

$E_{\text{віт.пит}}$ – питома вітрова енергія регіону (кВт·год/м²·рік), визначається за атласами енергетичного потенціалу України. Для регіонів зі швидкістю вітру близько 4,25 м/с на висоті 30 м типове значення становить 1120 кВт·год/м²·рік.

$\eta_{\text{вев}}$ – коефіцієнт перетворення енергії потоку вітроустановкою ($\eta_{\text{вев}} = \eta_{\text{д}} \eta_{\text{і}} \eta_{\text{е}}$).

$$S = 3000 / (0,4 \cdot 1120) = 6.69 (\text{м}^2).$$

$$W_{\Sigma} = W_{\text{м}} \cdot n, \quad (2.4)$$

n - кількість місяців у році;

$W_{\text{м}}$ - кількість енергії для споживання на місяць.

Тоді енергоспоживання на рік становить:

$$W_{\Sigma} = 250 \cdot 12 = 3000 (\text{Вт}).$$

$$\eta_{\text{вев}} = \eta_{\text{в}} \eta_{\text{м}} \eta_{\text{е}}, \quad (2.5)$$

де $\eta_{\text{е}}$ - коефіцієнт перетворення енергії вітрового потоку віротурбіною (КПЕП перетворення вітрового потоку для даного типу, може приймати значення 0,1 – 0,5);

$\eta_{\text{е}}$ - коефіцієнт корисної дії електрогенератора (0,8);

$\eta_{\text{і}}$ - коефіцієнт корисної дії мультиплікатора та трансмісії (1), оскільки мультиплікатор не використовується.

$$\eta_{\text{вев}} = 0,5 \cdot 0,8 = 0,4$$

Знаючи площу обмаху, діаметр ротора визначається як:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}}, \quad (2.6)$$

де $\pi = 3.14$.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 6.69}{3.14}} = 2.9 \text{ (м)}.$$

Таблиця 2.1 - Питомий енергетичний потенціал вітрової енергії в Україні

№ району	Середньорічна швидкість вітру, V_{cp} , м/с	Висота, м	Природний потенціал вітру, кВт.год/м ² рік	Технічно-досяжний потенціал вітру, кВт.год/м ² рік
1	< 4,25	15	1120	200
		30	1510	280
		60	2030	375
		100	2530	460
2	4,5	15	2010	390
		30	2710	520
		60	3640	700
		100	4540	850
3	5,0	15	2810	520
		30	3790	690
		60	5100	860
		100	6350	975
4	5,5	15	3200	620
		30	4320	830
		60	5810	1020
		100	7230	1150

Висновок. На основі середньорічного вітрового потенціалу для обраного регіону розраховано необхідну площу обміту вітроколеса. Встановлено, що для забезпечення середнього домогосподарства електроенергією потрібен діаметр ротора близько 2,9 м.

2.4 Техніко-економічне обґрунтування вибору генератора та системи керування ВЕУ

Класична вітроенергетична система складається з вітрового колеса, механічного редуктора/мультиплікатора, електричного генератора. Щоб обрати оптимальний тип генератора, проаналізовано найпоширеніші конфігурації.

Асинхронний генератор із короткозамкненим ротором (КЗР). Має низьку вартість, просту паралельну роботу з мережею. Але низький ККД (75 %), фіксовану швидкість, необхідність мультиплікатора. Також потребує наявності додаткових конденсаторних батарей.

Синхронний генератор з постійними магнітами (ПМ) через мультиплікатор має вищий ККД порівняно з асинхронними машинами; краще використання енергії вітру; підвищену надійність, знижені експлуатаційні витрати; самозбудження за рахунок наявності постійних магнітів. Вища початкова вартість компенсується меншими втратами енергії та обслуговування.

Синхронний тихохідний генератор на постійних магнітах тому є досить поширеним і адаптованим до використання у вітрових установках і в разі необхідності може бути швидко заміненим.

Вибір оптимального типу генератора здійснюється на підставі порівняльного аналізу за показником приведених витрат, обчислених за формулою:

$$Z_i = E_n \cdot K_i + C_i, \quad (2.7)$$

де i – кількість розглянутих варіантів;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності ($E_n = 0,17 \text{ р}^{-1}$ для всіх галузей);

K_i – капітальні витрати, грн;

C_i – поточні щорічні витрати (амортизація, ремонт, втрати енергії, обслуговування).

Як базові моделі для порівняння взято генератори потужністю 1-1,2 кВт:

Приведемо розрахунок для СГПМ.

Капітальні витрати:

$$K = D + CK, \quad (2.8)$$

де D – вартість генератора ($D = 8000$ грн),

CK – вартість системи керування ($CK = 2500$ грн),

$$K = 8000 + 2500 = 10500 \text{ (грн)}.$$

Річні капітальні витрати:

$$K_{\text{річні}} = E_n \cdot K, \quad (2.9)$$

$$K_{\text{річні}} = 0,17 \cdot 16995 = 2889.15 \text{ (грн/рік)}.$$

Загальні додаткові відрахування:

$$C = C_A + C_D + C_P + C_O, \quad (2.10)$$

де C_{Ai} – амортизаційні відрахування, грн/рік;

C_{Pi} – відрахування на ремонт, грн/рік;

C_{Di} – додаткові відрахування, грн/рік;

C_{Oi} – відрахування на обслуговування, грн/рік.

Величина амортизаційних відрахувань в середньому приймається 10% від капітальних вкладень:

$$C_A = 0,1 \cdot K, \quad (2.11)$$

$$C_A = 0,1 \cdot 10500 = 1050 \text{ (грн/рік)}.$$

Відрахування на ремонт електрообладнання приймають в розрахунку 2% від капітальних вкладень:

$$C_P = 0,02 \cdot K, \quad (2.12)$$

$$C_P = 0,02 \cdot 10500 = 210 \text{ (грн/рік)}.$$

Додаткові відрахування враховують втрати енергії в стаціонарних та перехідних режимах роботи:

$$C_D = \Delta P_{\Sigma_{ДВ}} \cdot c, \quad (2.13)$$

де $\Delta P_{\Sigma_{ДВ}}$ – сумарні втрати потужності в генераторі у стаціонарних та перехідних режимах роботи за рік, (кВт·год)/рік;

c – вартість для одного кіловата потужності за годину, грн/(кВт·год) ($c = 4,32$ грн/(кВт·год)).

Сумарні втрати потужності в генераторі у стаціонарних та перехідних режимах роботи за рік:

$$\Delta P_{\Sigma_{ДВ}} = (\Delta P_{ном} + \Delta P_{перех.}) \cdot k_3 \cdot \Phi, \quad (2.14)$$

де $\Delta P_{ном}$ – втрати потужності в генераторі в номінальному режимі роботи, кВт;

$\Delta P_{перех.}$ – додаткові втрати потужності в генераторі у перехідних режимах роботи, кВт;

k_3 – коефіцієнт завантаження по потужності (приймають рівним 0,8);

Φ – дійсний фонд часу роботи системи ВЕУ за рік, год/рік.

Втрати потужності в генераторі в номінальному режимі роботи:

$$\Delta P_{ном} = P_{ном} \cdot \frac{1 - \eta_{ном}}{\eta_{ном}}, \quad (2.15)$$

де $P_{ном}$ – номінальна потужність електричного генератора ($P_{ном} = 1$ кВт);

$\eta_{ном}$ – номінальний ККД генератора ($\eta_{ном} = 0,8$),

$$\Delta P_{ном} = 1 \cdot \frac{1 - 0,8}{0,8} = 0,25 \text{ (кВт)}.$$

Додаткові втрати потужності в генераторі у перехідних режимах роботи приймають рівними 10% від номінальних:

$$\Delta P_{перех.} = 0,1 \cdot \Delta P_{ном}, \quad (2.16)$$

$$\Delta P_{перех} = 0,1 \cdot 0,25 = 0,025 \text{ (кВт)}.$$

Дійсний фонд часу роботи ВЕУ за рік:

$$\Phi = \varepsilon \cdot Z_{\text{р.д.}} \cdot Z_{\text{р.з.}} \cdot t_{\text{р.з.}}, \quad (2.17)$$

де ε – відносна тривалість ввімкнення згідно тахограми ($\varepsilon = 1$);

$Z_{\text{р.д.}}$ – кількість робочих днів за рік ($Z_{\text{р.д.}} = 365$ 1/рік);

$Z_{\text{р.з.}}$ – кількість робочих змін ($Z_{\text{р.з.}} = 1$);

$t_{\text{р.з.}}$ – тривалість робочої зміни ($t_{\text{р.з.}} = 24$ год),

$$\Phi = 1 \cdot 365 \cdot 1 \cdot 24 = 8760 \text{ (год/рік)}.$$

Сумарні втрати потужності в генераторі у стаціонарних та перехідних режимах роботи згідно формули (4.8):

$$\Delta P_{\Sigma \text{дв}} = (0,25 + 0,025) \cdot 0,8 \cdot 8760 = 1927,2 \text{ ((кВт} \cdot \text{год)/рік)}.$$

Додаткові відрахування згідно формули (5.7):

$$C_{\text{д}} = 1927,2 \cdot 4,32 = 2709 \text{ (грн/рік)}.$$

Відрахування на обслуговування електрообладнання приймають рівним 5% від суми відрахувань на амортизацію, ремонт та додаткових витрат:

$$C_{\text{о}} = 0,05 \cdot (C_{\text{А}} + C_{\text{д}} + C_{\text{р}}), \quad (2.18)$$

$$C_{\text{о}} = 0,05 \cdot (1050 + 2709 + 210) = 169,4 \text{ (грн/рік)}.$$

Загальні додаткові відрахування згідно формули (4.4):

$$C = 1050 + 1349,04 + 399,9 + 169,4 = 3557,8 \text{ (грн/рік)}.$$

Приведені витрати згідно формули (4.1):

$$З = 0,17 \cdot 16995 + 2709 + 210 + 169,4 = 6993 \text{ (грн/рік)}.$$

Для інших систем електричного привода проведемо аналогічні розрахунки, результати розрахунків зведемо в порівняльну таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльна таблиця

Показник	Генератори БЕУ		
	СТ ПМ	ГПС	АГ
1	2	3	4
Вартість генератора Д, грн	8000	5800	3800
Вартість системи керування СК, грн	2500	5000	2351
Капітальні вкладення К, грн	10500	10800	6151
Річні капітальні витрати $K_{\text{річн}}$, грн/рік	1785	1797	1046
Амортизаційні відрахування C_A , грн/рік	1050	1040	615
Відрахування на ремонт C_R , грн/рік	210	208	123
Додаткові відрахування C_D , грн/рік	2709	8326	11101
Відрахування на обслуговування C_O , грн/рік	209	479	592
Загальні відрахування С, грн/рік	4178	10053	12431
Приведені витрати З, грн/рік	6993	11820	13476

Висновок. Порівняльний аналіз капітальних вкладень і річних експлуатаційних витрат показав, що тихохідний синхронний генератор на постійних магнітах (СТГПМ) у поєднанні з МРРТ-контролером забезпечує найменші приведені витрати ≈ 7 тис. грн/рік. Його переваги зумовлені відсутністю мультиплікатора та щітково-контактних пар, підвищеним ККД і можливістю прямого монтажу вітроколеса на вал генератора, що спрощує механічну частину приводу. Для асинхронного генератора (АГ) найвища

величина сукупними енергетичними втратами та низьким ККД ($\approx 0,75$), втратами у мультиплікаторі та реактивними струмами самозбудження. Таким чином, СТГПМ + МРРТ-контролер є техніко-економічно доцільним вибором для вітроенергетичної установки потужністю ~ 1 кВт, забезпечуючи мінімальні сумарні витрати, вищу енергоефективність та надійність системи.

2.5 Вибір електрогенератора ВЕУ за потужністю і швидкістю обертання

На сучасному етапі розвитку науки і техніки найбільш ефективною з енергетичної точки зору є конфігурація автономної вітроенергетичної установки (ВЕУ), що працює зі змінною частотою обертання вітроколеса (ВК), здебільшого без використання проміжного мультиплікатора. Найкращі результати забезпечує система на базі синхронного магнітоелектричного генератора з повним перетворенням електричної потужності за допомогою напівпровідникового перетворювача частоти. Така конфігурація дозволяє досягти високих показників якості та стабільності вироблюваної електроенергії, навіть при нестаціонарних і змінних вітрових умовах.

Такий підхід є доцільним для ВЕУ малої та середньої потужності, що працюють в умовах автономного електроживлення об'єктів у поєднанні з акумуляторними батареями.

У рамках даного проєкту обрано синхронний вентильний генератор змінного струму Ginlong GL-PMG-1000.

Зазначимо, що вентильний генератор – це різновид синхронного генератора, в якому випрямлення струму здійснюється за допомогою напівпровідникових елементів (діодів або вентилів). Збудження у таких машинах може здійснюватися як за допомогою електромагнітів, так і з використанням постійних магнітів (PMG – permanent magnet generator). Технічна характеристика генератора наведена в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики генератора

Марка генератора	Номінальна кількість обертів	Номінальна потужність	ККД	Вихід на напруга	Максимальна потужність	Максимальна кількість обертів
Ginlong GL-PMG-1000	450 об/хв	1000 Вт	95%	57 В	1400 Вт	1000 об/хв

Зовнішній вигляд генератора ВЕУ марки ВГ-1(12) 450 приведено на рисунку 2.5



Рисунок 2.5 - Зовнішній вигляд генератора Ginlong GL-PMG-1000

Висновок. Таким чином, з урахуванням технічних вимог, енергоефективності, надійності та конструктивної простоти, для даної вітроенергетичної установки обґрунтовано обрано синхронний вентильний генератор змінного струму Ginlong GL-PMG-1000. Такий генератор забезпечує роботу ВЕУ при змінній швидкості вітру без потреби в мультиплікаторі, що дозволяє покращити загальний ККД системи та знизити витрати на обслуговування.

2.6 Статичні характеристики електрогенератора ВЕУ

Під час вибору та аналізу генератора для вітроенергетичної установки (ВЕУ) необхідно враховувати низку специфічних особливостей його роботи в умовах змінного та нестабільного навантаження:

- нестаціонарний характер сили і швидкості вітру на коротких часових інтервалах;
- наявність значних динамічних моментів на валу турбіни та генератора;
- відсутність мультиплікатора як механічного демпфера осьових навантажень;
- постійна дія перехідних процесів, які супроводжуються пусковими та гальмівними струмами, електродинамічними силами, підвищеними втратами та нагріванням активних частин машини;
- малі кругові швидкості ротора при прямому приводі.

Усі ці умови обумовлюють необхідність використання генератора, адаптованого до нестабільного вітрового режиму. Таким критерієм відповідає синхронний вентильний генератор GLPMG1000, обраний для реалізації даної системи.

Статичні характеристики цього генератора були розраховані з урахуванням параметрів навантаження та умов роботи у складі ВЕУ. Графічні залежності наведені на рисунках 2.6-2.10.

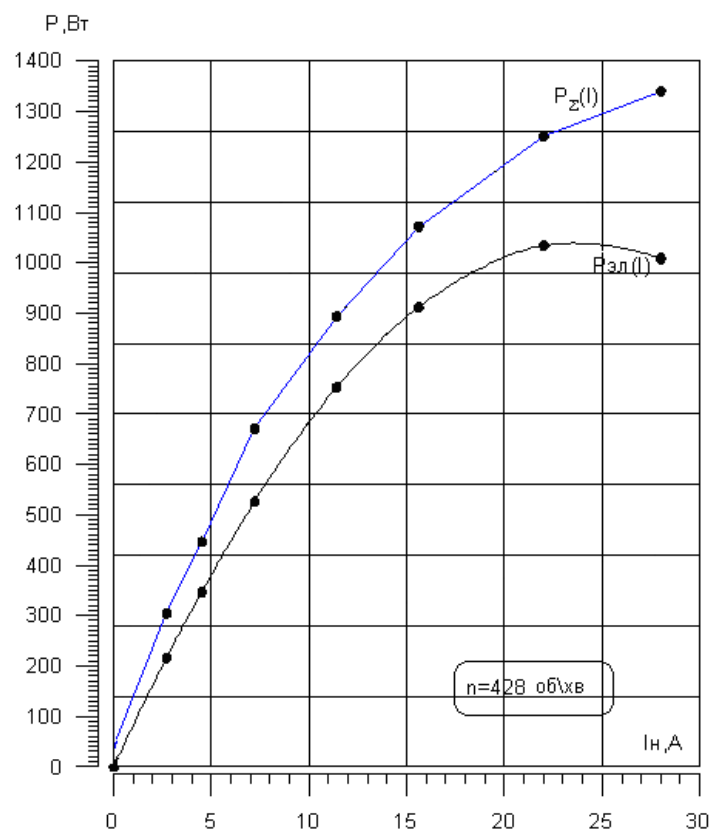


Рисунок 2.6 – Характеристика потужності електрогенератора

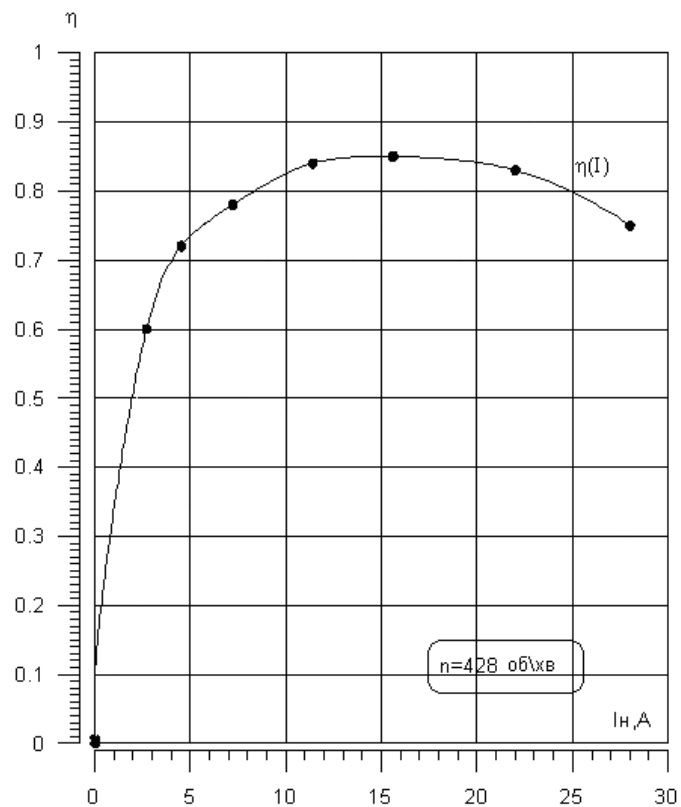


Рисунок 2.7 – Графік залежності ККД генератора від навантаження

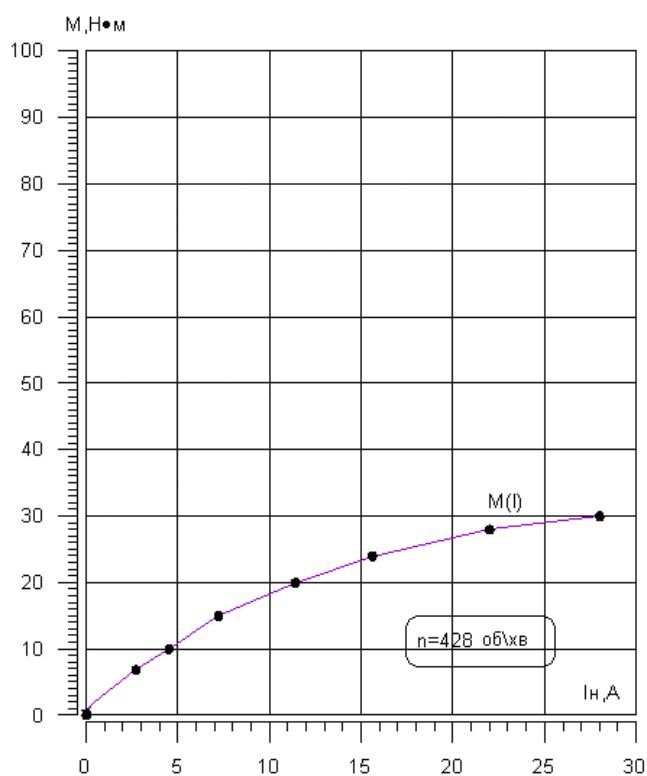


Рисунок 2.8 – Графік залежності моменту від струму навантаження

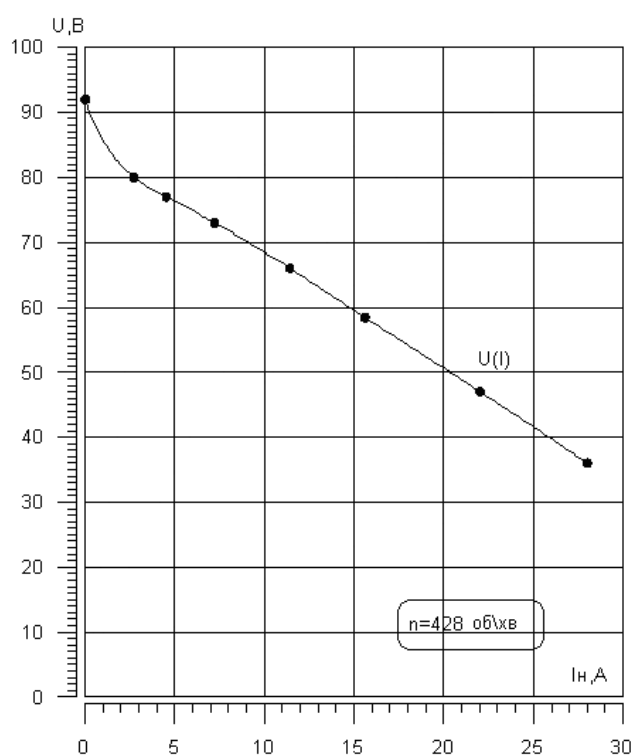


Рисунок 2.9 – Графік залежності напруги генератора від струму навантаження (зовнішня характеристика)

Згідно заданих і розрахункових даних вітроколеса, була побудована вітроенергетична характеристика генератора, приведена на рисунку 2.10.

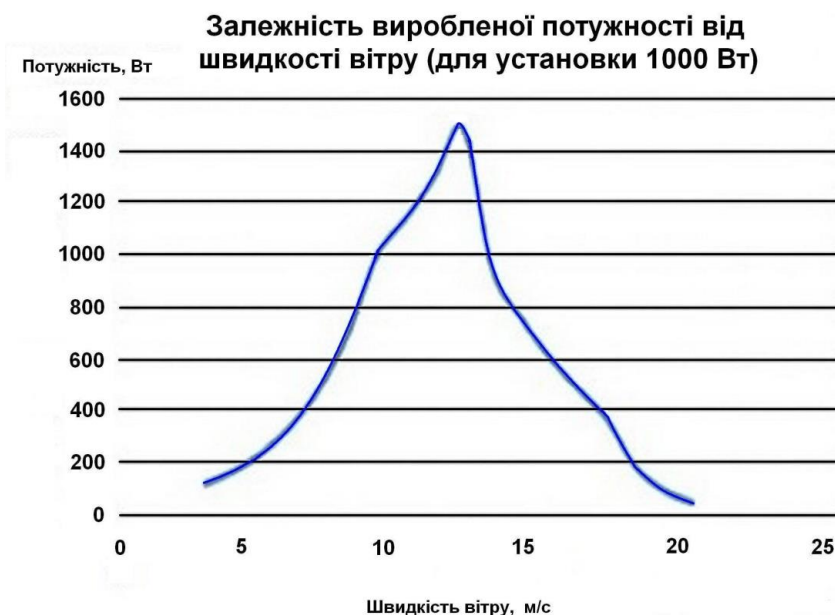


Рисунок 2.10 – Вітроенергетична характеристика з врахуванням вітрового колеса

Вищенаведені характеристики є необхідною основою для розробки системи керування ВЕУ з врахування режимів змінного навантаження.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВІТРОВОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ

3.1 Розробка структури системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом

Для забезпечення стабільного енергоживлення автономного об'єкта на основі вітрового джерела розроблено структуру системи керування, що враховує наявність змінних умов вітрового ресурсу, необхідність накопичення електроенергії, а також потребу в резервному джерелі живлення.

На рисунку 3.1 представлено структурну схему запропонованої системи.

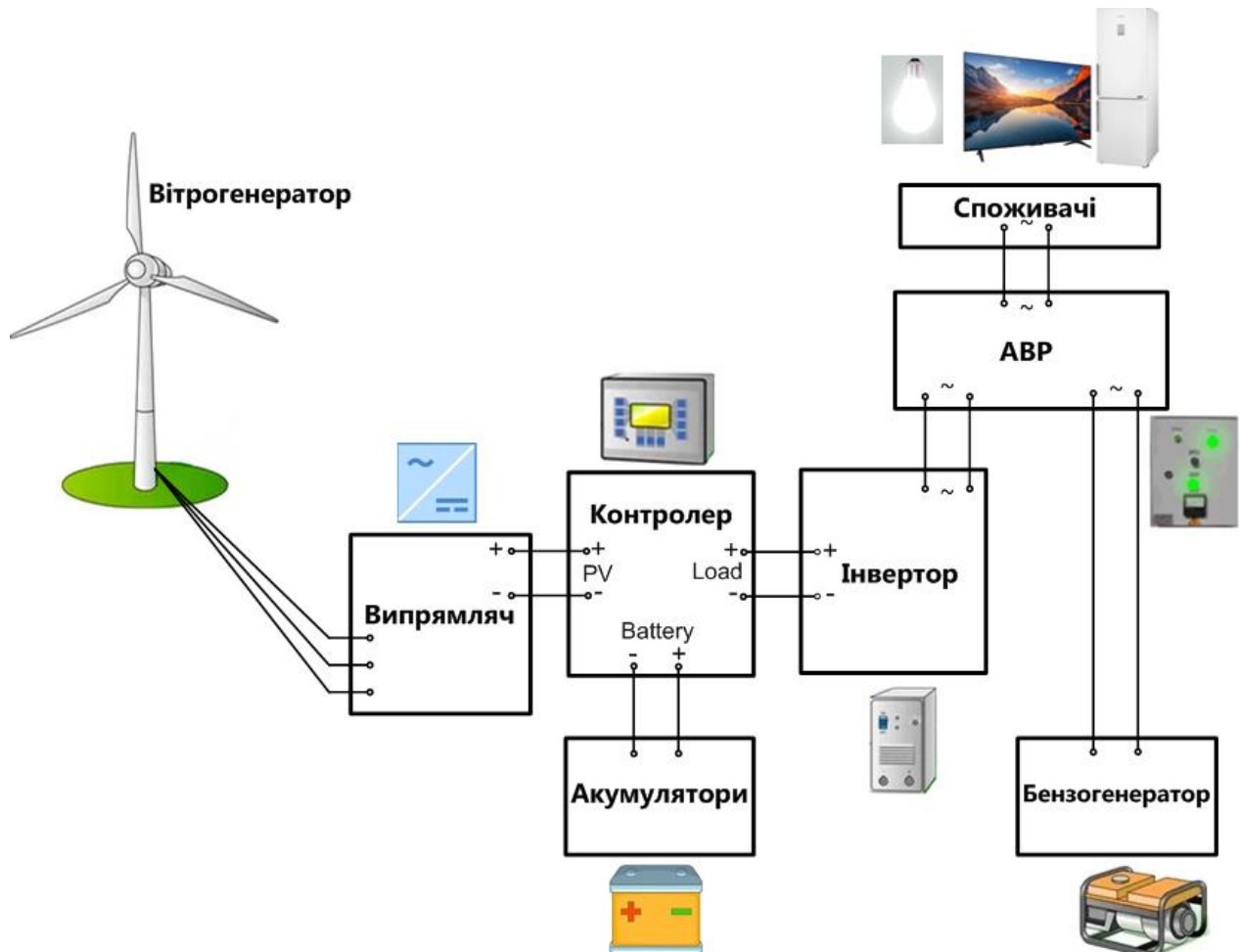


Рисунок 3.1 – Структурна схема системи керування автономним вітровим електротехнічним комплексом

Основні функціональні складові системи:

- Вітрогенератор – первинне джерело електроенергії, що перетворює кінетичну енергію вітру на змінну електричну. Його вихід підключений до випрямляча.
- Випрямляч – виконує перетворення змінного струму, отриманого від генератора, у постійний струм, придатний для зарядки акумуляторів або подальшої інвертації.
- Контролер – центральний елемент системи керування, який: координує заряд/розряд акумуляторів. розподіляє енергію між навантаженням та накопичувачами, захищає систему від перевантажень та глибокого розряду, може підтримувати паралельну роботу з фотоелектричними панелями (опція PV).
- Акумулятори – забезпечують накопичення надлишкової енергії та живлення навантаження в періоди низького вітрового ресурсу або повної його відсутності.
- Інвертор – перетворює постійну напругу з акумуляторів або виходу контролера на змінну напругу 220 В / 50 Гц для стандартного побутового споживача.
- Споживачі – електричне навантаження (освітлення, холодильники, побутова техніка тощо), що отримує живлення через інвертор.
- АВР (автоматичне введення резерву) – пристрій, який контролює наявність напруги на виході інвертора і при її зникненні автоматично перемикає навантаження на резервне джерело живлення.
- Бензогенератор – резервне джерело електроживлення, що автоматично активується через АВР у разі повного розряду акумуляторів або тривалої відсутності вітрового ресурсу.

У нормальному режимі енергія, вироблена вітрогенератором, через випрямляч надходить до контролера, де розподіляється між живленням навантаження та зарядом акумуляторів. При зниженні швидкості вітру або відсутності генерації живлення навантаження відбувається з акумуляторів через

інвертор. У разі повного розряду АКБ система АВР автоматично підключає бензогенератор, який забезпечує тимчасове живлення критичних споживачів.

Таким чином, розроблена структура системи керування дозволяє реалізувати надійне, безперебійне автономне електропостачання, здатне адаптуватися до змінних умов вітрової генерації та мінімізувати втрати електроенергії за рахунок оптимального розподілу потоків потужності.

3.2 Розробка функціональної схеми системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом

На основі структурної побудови системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом (ВЕК), розроблено функціональну схему (рисунок 3.2), яка деталізує принцип роботи елементів керування та електропостачання. Основною метою є забезпечення безперебійного живлення навантаження в умовах змінного або обмеженого вітрового ресурсу.

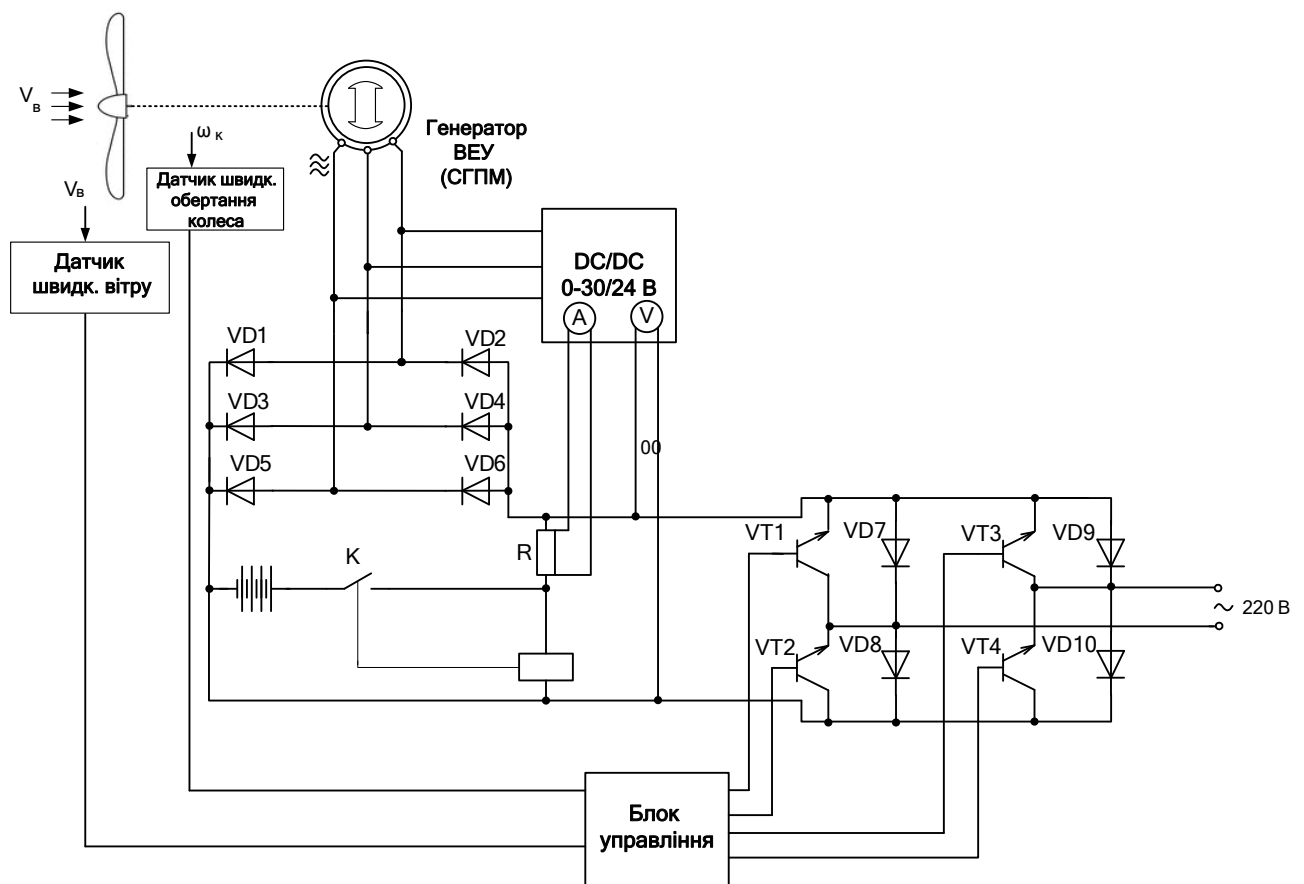


Рисунок 3.2 – Функціональна схема системи керування ВЕК

У системі використано два основні сенсори:

- Датчик швидкості вітру (V_v) — оцінює наявність достатнього вітрового ресурсу;
- Датчик обертів ротора (ω_k) — контролює фактичну кутову швидкість обертання вітроколеса.

Вихідна змінна напруга з генератора БЕК подається на випрямляч, сформований на діодах VD1-VD6. Далі DC/DC перетворювач забезпечує стабілізовану напругу для заряджання акумуляторів та живлення навантаження.

У системі передбачено акумуляторний блок, який накопичує енергію при наявності вітрового ресурсу і виконує роль буфера в періоди його зниження або повної відсутності.

Інверторний блок (VT1-VT4, VD7-VD10) забезпечує перетворення постійної напруги з акумуляторів на змінну 220 В / 50 Гц для споживачів. Перемикання між джерелами здійснюється блоком керування, що формує сигнали на тиристорні ключі інвертора та забезпечує координацію режимів.

У разі зниження рівня заряду акумуляторів нижче допустимого значення (встановленого в контролері), система автоматичного вводу резерву (ABP) перемикає навантаження на резервне джерело — бензогенератор або мережу (в залежності від конфігурації).

Таким чином, функціональна схема забезпечує:

- перетворення енергії вітру в електричну та її накопичення;
- живлення побутових споживачів стандартною напругою;
- автоматичне перемикання джерел живлення залежно від наявності вітру або заряду АКБ;
- мінімізацію втрат енергії та підвищення надійності енергозабезпечення автономного об'єкта.

Робота вітроенергетичної установки (ВЕУ) безпосередньо залежить від аеродинамічних характеристик вітроколеса. Одним із ключових показників ефективності є коефіцієнт потужності (C_p), який відображає здатність вітроколеса перетворювати кінетичну енергію вітру в механічну енергію обертання.

На рисунку 3.3, а зображено залежність коефіцієнта потужності C_p від швидкохідності вітроколеса – відношення лінійної швидкості обертання лопаті до швидкості вітру. З графіка видно, що існує певне оптимальне значення швидкохідності, при якому досягається максимальний коефіцієнт потужності.

На рисунку 3.3, б подано залежності вихідної потужності $P_{ВК}$ та моменту $M_{ВК}$ вітроколеса від кутової швидкості обертання. Відзначено оптимальне значення кутової швидкості ω_{opt} , при якому забезпечується максимальний відбір потужності.

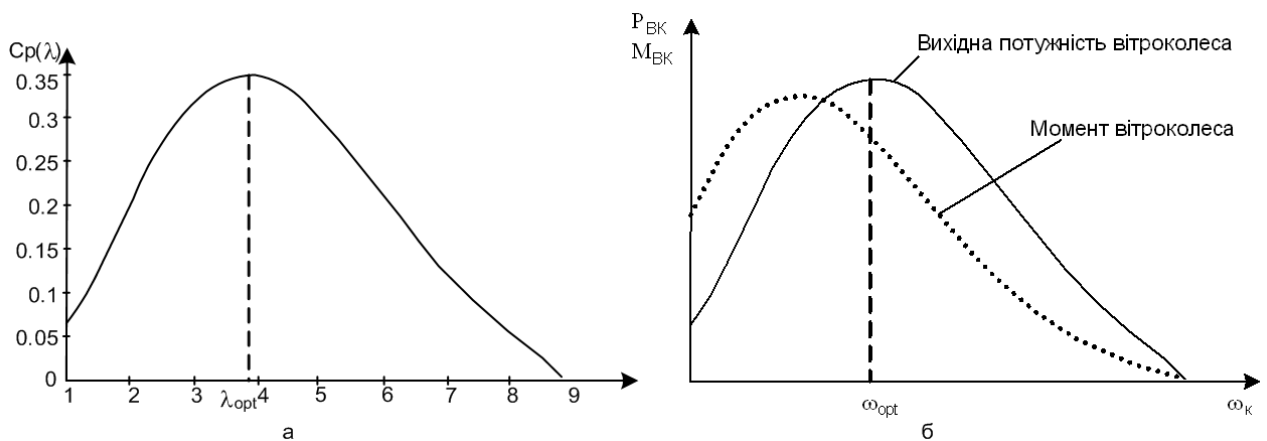


Рисунок 3.3. - Характеристики вітрового колеса

Для забезпечення ефективної роботи ВЕУ на окреме навантаження (наприклад, заряджання акумуляторів) необхідно підтримувати роботу турбіни поблизу точки максимального відбору потужності (MPPT – Maximum Power Point Tracking). Це досягається шляхом динамічного регулювання моменту навантаження, що прикладається до вала генератора, тобто зміною струму заряду акумуляторних батарей.

Якщо струм заряду збільшується, момент навантаження на валі зростає, що призводить до зменшення кутової швидкості. Якщо струм зменшується – швидкість обертання зростає. Таким чином, система керування, змінюючи струм заряду, автоматично встановлює оптимальну швидкість обертання відповідно до поточної швидкості вітру.

На рисунку 3.4 показано порівняння роботи вітротурбіни з системою МРРТ (крива 1) та без неї (крива 2). Видно, що без регулювання турбіна працює з відхиленням від оптимальної швидкості: на низьких швидкостях вітру вона перевантажена, а на високих – недовантажена. Це призводить до недоотримання електроенергії.

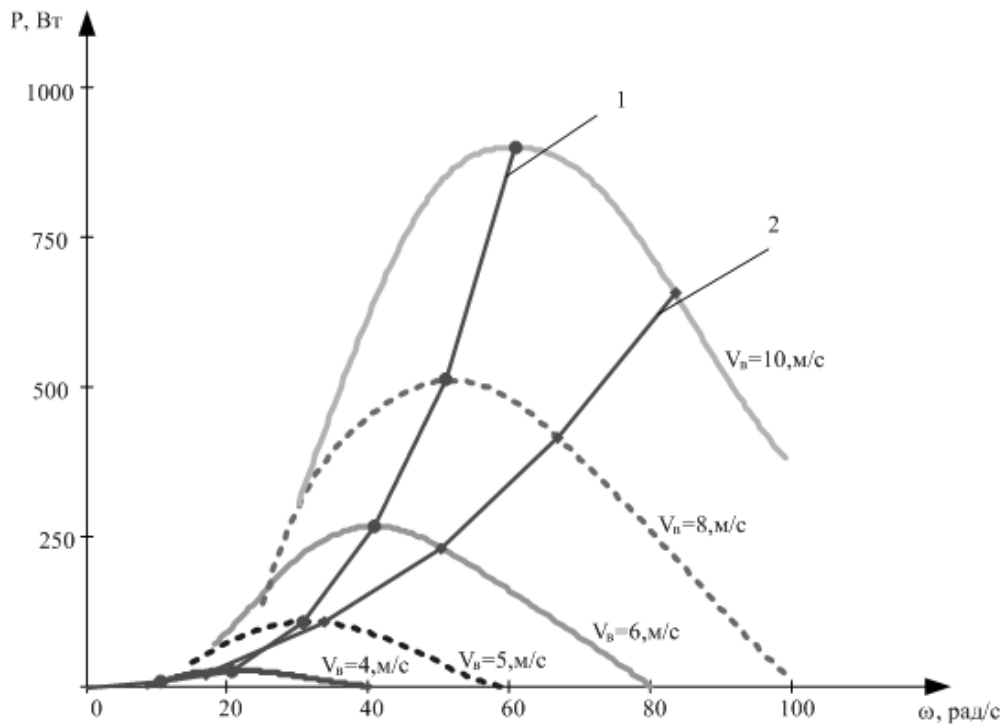


Рисунок 3.4 Криві потужностей при роботі вітрового колеса

Таким чином, застосування керування за принципом МРРТ дозволяє максимально ефективно використовувати енергетичний потенціал вітру, забезпечуючи адаптацію системи до змінних умов вітрового ресурсу, зменшення втрат та підвищення надійності енергопостачання автономних об'єктів.

3.3 Вибір інвертора

Для забезпечення живлення навантаження у складі БЕУ необхідно передбачити наявність автономного джерела змінної напруги. З цією метою використовується інвертор, який перетворює постійну напругу від акумуляторних батарей у змінну напругу, придатну для живлення побутових споживачів. Для виконання поставлених задач обрано інвертор Must PV18-1512VPM, що здатен працювати з напругою 12 В та забезпечувати вихідну змінну напругу 230 В. Основні технічні характеристики наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Параметри інвертора

Модель	Номінальна потужність	Пікова потужність	Вхідна напруга	Вихідна напруга	Заряд від мережі
Must PV18-1512VPM	1500 Вт	3000 Вт	12 В	230 В	так

Зовнішній вигляд інвертора наведено на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 – Зовнішній вигляд інвертора Must PV18-1512VPM

Схема підключення інвертора Must PV18-1512VPM приведена на рисунку 3.6.

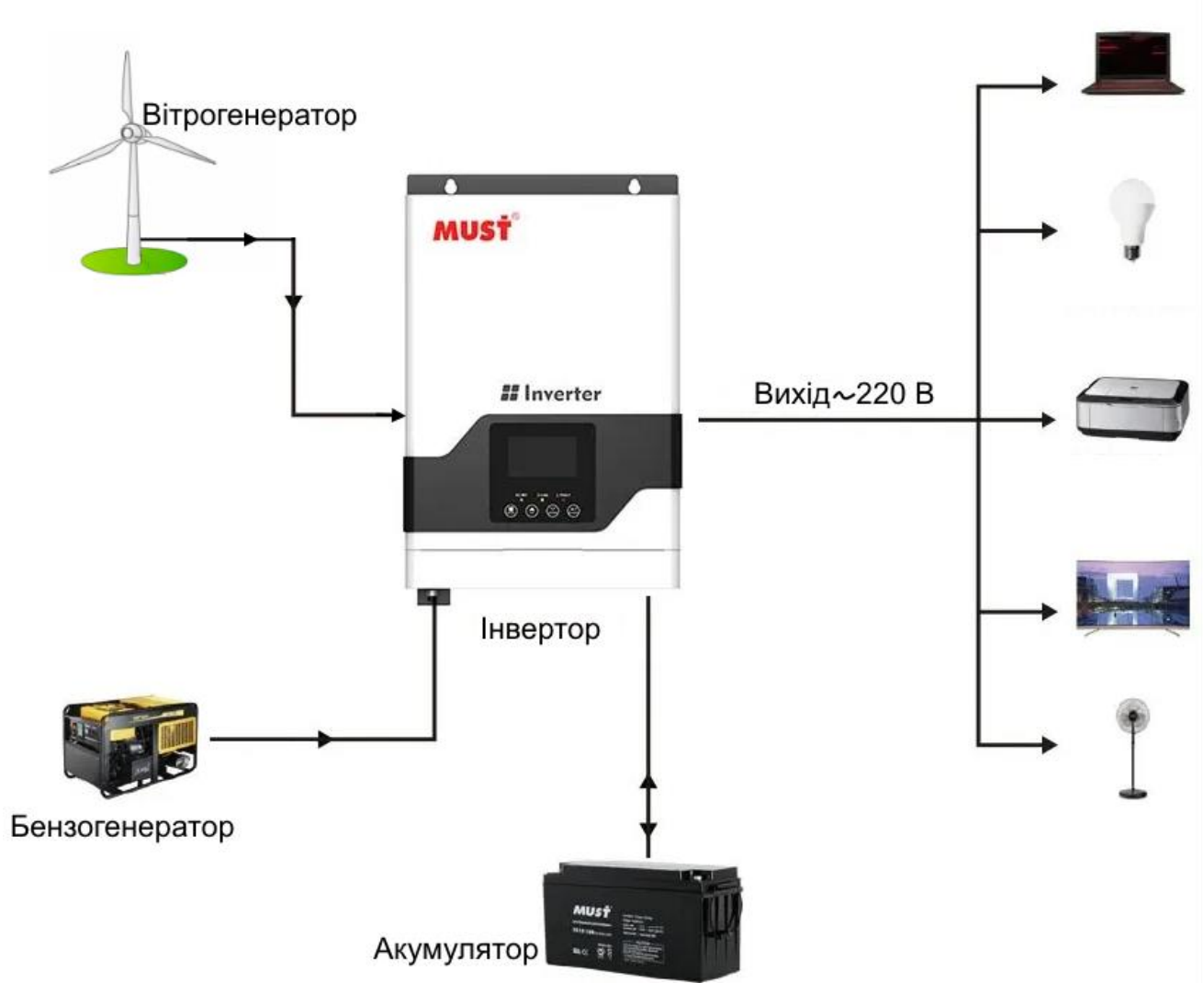


Рисунок 3.6 – Схема приєднання інвертора Must PV18-1512VPM

3.4 Вибір акумуляторів

Наступним етапом є визначення необхідної ємності акумуляторних батарей для забезпечення автономної роботи навантаження. Розрахунок проводимо за умови живлення споживача потужністю 1 кВт протягом 1 години:

Напруга АКБ: 12 В.

Для забезпечення мінімальної тривалості автономної роботи у 1 годину потрібна акумуляторна батарея ємністю не менше 100 А·год.

У даній роботі використаємо свинцеву AGM батарею 6СТ-100А, яка має наступні параметри (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Параметри акумуляторних батарей

Модель	Місткість (Ач)	Струм розряду(А)	Напруга (В)	Габарити Д/Ш/В (мм)	Вага (кг)	Термін служби (років)
6СТ- 100А	100	25	12	214x171x 330	27.5	4-6

Для подовження автономної роботи можна застосувати три батареї 100 А·год паралельно, що дає змогу працювати 1 годину при навантаженні 3 кВт.

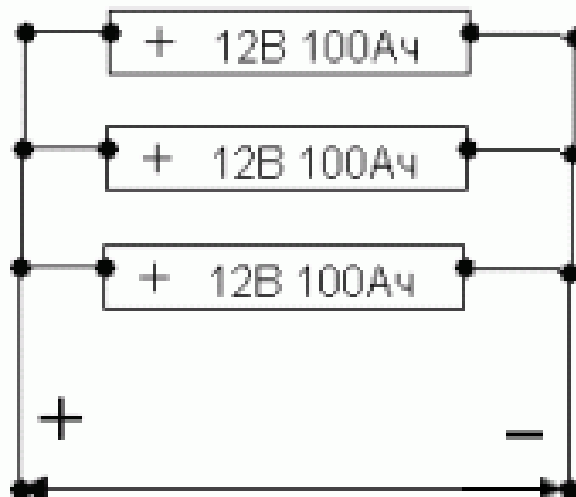


Рисунок 3.6 – Схема з'єднання батарей для запасу електроенергії 3,6 кВт/год.

3.5 Вибір контролера

Контролер заряду призначений для керування процесом заряджання акумуляторних батарей від ВЕУ та запобігання їх глибокому розряду чи перезаряду. У проєкті обрано контролер типу WELLSEE WS-MPPT60 з максимальним струмом заряду 60 А та підтримкою напруги до 48 В. Основні технічні характеристики наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Параметри контролера WELLSEE WS-MPPT60

Модель	Номінальна напруга (В)	Максимальний струм навантаження (А)	Діапазон вхідних напруг (В)
WELLSEE WS- MPPT60 60A 48V	12/24/48	60	20 - 80

Зовнішній вигляд контролера показано на рисунку 3.7.



Рисунок 3.7 – Зовнішній вигляд контролера WELLSEE WS-MPPT60

Висновок. Обрані інвертор, акумуляторні батареї та контролер заряду забезпечують стабільне функціонування системи автономного живлення. Така конфігурація дозволяє забезпечити роботу навантаження потужністю до 1.5 кВт, а також стабільне зарядження АКБ з можливістю відбору максимуму потужності з ВЕУ за алгоритмом MPPT.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВІТРОВОЇ УСТАНОВКИ

Для оцінки роботи вітроенергетичного комплексу (ВЕК) використано один із найбільш актуальних методів — математичне моделювання в середовищі MATLAB Simulink. Для реалізації цього підходу була розроблена структурна схема моделі вітроустановки на основі раніше розглянутих технічних рішень.

Математична модель електротехнічного комплексу ВЕК базується на рівнянні руху вала генератора, яке має вигляд:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{в}} - M_{\text{г}} - k_{\text{тр}} \omega, \quad (4.1)$$

де J — сумарний приведений до вала генератора момент інерції;

$M_{\text{в}}$ — механічний момент вітроколеса;

$M_{\text{г}}$ — електромагнітний момент генератора;

ω — частота обертання вала генератора.

На рисунку 4.1 представлено структурну схему, яка реалізує це рівняння.

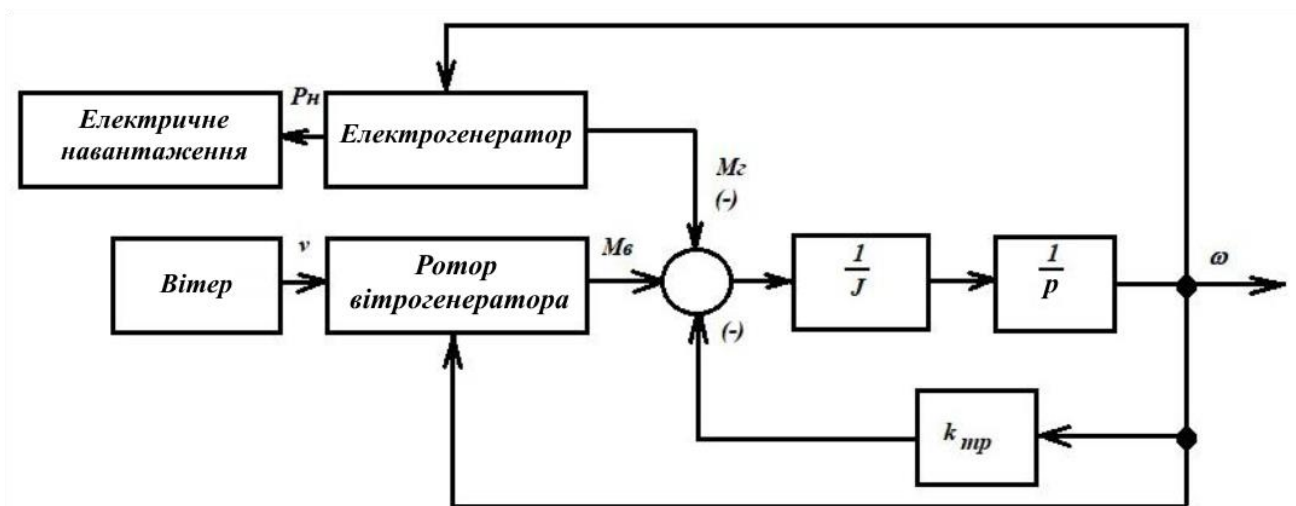


Рисунок 4.1 – Структурна схема математичної моделі ВЕК для Simulink

Виконавши підстановку $p = d/dt$, запишемо рівняння (4.1) в операторній формі:

$$J(p)\omega = M_B - M_T - k_{tr}\omega, \quad (4.2)$$

Структурна схема, яка характеризує робочий процес вітроустановки, приведена на рисунку 4.1.

На рисунку 4.2 зображено реалізацію моделі в середовищі MATLAB Simulink. Вона дозволяє спостерігати зміну параметрів системи при зміні вхідних впливів (наприклад, швидкості вітру)..

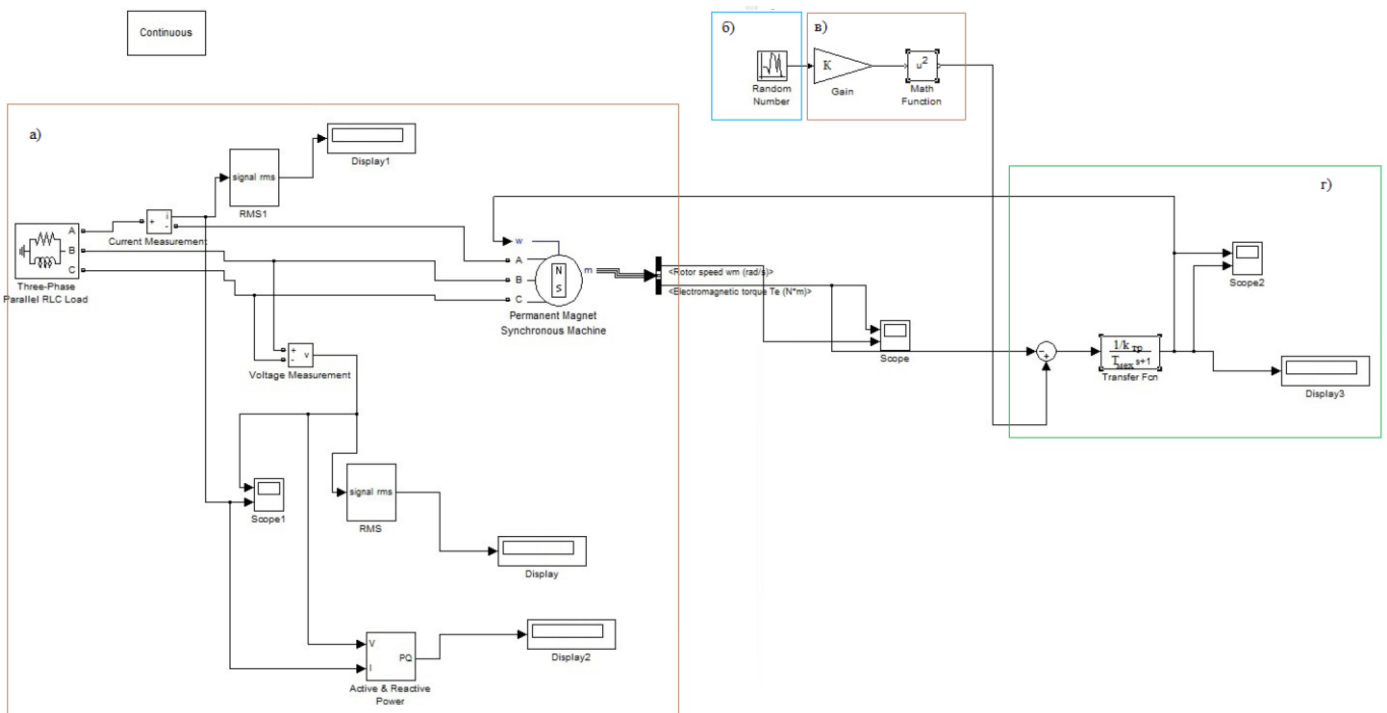


Рисунок 4.2 – Модель вітроенергетичної установки в Simulink Matlab

На рисунку 4.3 показано результати моделювання, графіки перехідних процесів. Зокрема, показано: залежність швидкості обертання генератора від часу; залежність напруги від часу; зміну швидкості вітру.

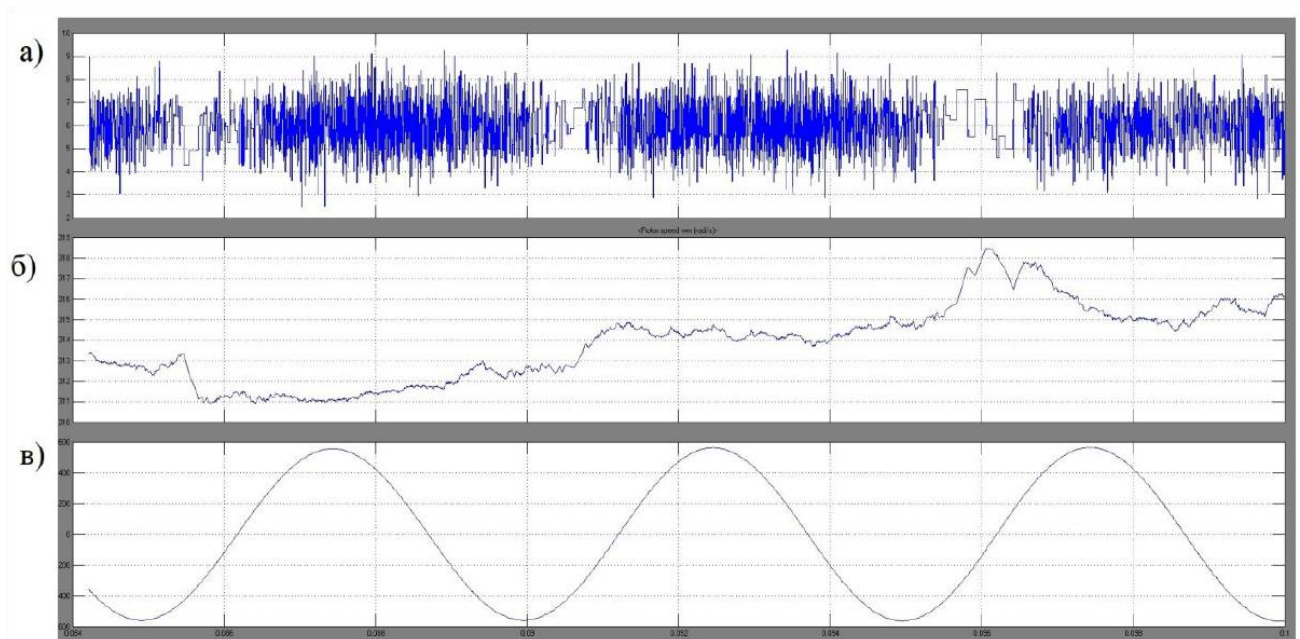


Рисунок 4.3 – Результати моделювання: а – швидкість вітру, б – швидкість обертання вала синхронного генератора, в – напруга, що генерується ВЕК

Висновок. Результати моделювання підтверджують правильність побудованої математичної моделі: швидкість обертання генератора коректно змінюється відповідно до зміни швидкості вітру. Модель може бути використана як основа для подальших досліджень і проєктування контурів регулювання та стабілізації частоти обертання генератора у складі автономної вітроенергетичної системи.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

У бакалаврській роботі розглянуті заходи з підвищення ефективності системи керування вітровим електротехнічним комплексом. При виконанні робіт з монтажу та обслуговування електрообладнання вітрового комплексу передбачається створення належного температурного режиму, який забезпечує необхідні санітарно-гігієнічні норми праці і виробництва продовольчих товарів. Усі металеві неструмоведучі частини (корпуса електродвигунів, шаф, світильників, тощо), які можуть опинитися під напругою в наслідок пошкодження ізоляції, заземлюються шляхом приєднання до нульового проводу живлячої мережі.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які впливають на оперативно-ремонтний персонал, що обслуговує електропривод вітрового комплексу, у відповідності з прийнятою класифікацією.

Фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо); іонізація повітря.

Хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (нетоксичний пил).

Фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Всі роботи, які проводяться в електроустановках, що не вимагають оформлення наряду, виконуються: за розпорядженнями осіб, уповноважених на це, з попереднім оформленням у журналі обліку робіт за нарядами і розпорядженнями або в оперативному журналі; в порядку поточної експлуатації.

Розпорядження про проведення робіт має разовий характер. Термін його дії визначається тривалістю робочого дня виконавців. За необхідності продовження роботи, в разі зміни її умов або складу бригади, розпорядження віддається знову. Працівник, який віддав розпорядження, призначає керівника робіт (наглядача), членів бригади, визначає можливість безпечного проведення робіт і визначає необхідні для цього організаційні та технічні заходи. Розпорядження записується в журнал обліку робіт за нарядами і розпорядженнями особою, яка його віддала, або оперативним працівником, де вказується:

- ким віддано розпорядження;
- зміст і місце роботи;
- заходи безпеки;
- час виконання роботи;
- прізвища, ініціали, групи з електробезпеки керівника робіт (наглядача) і всіх членів бригади. Змінювати склад бригади, що працює за розпорядженням, в процесі роботи забороняється.

Розпорядження про роботу віддається керівнику робіт і допускачеві або працівникові, який дає дозвіл на підготовку робочого місця і на допуск. В електроустановках без місцевих чергових працівників в тих випадках, коли допуск до роботи не вимагається, розпорядження може бути віддано безпосередньо працівнику, який виконує роботу, Інформація про закінчення

робіт, виконаних за розпорядженням, повідомляється працівникові, який віддав розпорядження, з відповідним записом у журналі.

При роботі, яка зв'язана з дотиком до струмоведучих частин електродвигуна або до обертових частин електродвигуна, який приводить в рух механізм, необхідно зупинити електродвигун та на його пусковому пристрої або ключі керування повісити плакат "НЕ ВМИКАТИ, ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ". При роботах за межами КРУ на відхідних ПЛ або КЛ на підключеному до них обладнанні візок з вимикачем необхідно викотити з шафи; верхню заслінку або дверці закрити на замок та вивісити плакати "НЕ ВМИКАТИ!" або "НЕ ВМИКАТИ! РОБОТА НА ЛІНІЇ".

Розшиновку або від'єднання кабеля при підготовці робочого місця може виконати ремонтний робітник, який має третю групу. Під наглядом чергового або оперативно-ремонтного робітника. З найближчих до робочого міста струмоведучих частин до наступних доторканню повинна бути знята напруга або вони повинні бути огорожені.

Відключене положення комутаційних апаратів до 1000 В з недоступними для огляду контактами (автоматичні вимикачі, пакетні вимикачі, рубильники в закритому виконанні тощо) визначається перевіркою відсутності на їх затискачах або на відходячих шинах, проводах або затискачах обладнання, яке відключається цими комутаційними апаратами.

В електроустановках до 1000 В при роботах на збірних шинах РУ, щитів, збірок напруга з шин повинна бути знята та шини (за винятком шин, які виконані ізолюваним проводом) повинні бути заземлені. Необхідність та можливість встановлення на приєднання цих РУ, щитів, збірок та підключеного до них обладнання визначає працівник, який видає наряд (розпорядження).

Перед допуском до роботи на електродвигунах насосів, димососів та вентиляторів, якщо можливо обертання електродвигунів від з'єднаних з ними механізмів, повинні бути закриті та заперті на замок засувки цих механізмів, а також прийняті заходи для гальмування ротора електродвигунів.

Ремонт і наладку електросхем електроприводів, не з'єднаних з виконуючим механізмом, регулюючих органів та запірної арматури, можна проводити по розпорядженню. Дозвіл на їх випробування дає працівник, який дав розпорядження на вивід електропривода в ремонт, наладку. Про це повинен бути зроблений запис при оформленні розпорядження. При роботі на електродвигуні заземлення встановлюється на кабелі (з від'єднанням або без від'єднання його від електродвигуна) або на його приєднанні в РУ. Вмикання електродвигуна для перевірки до повного закінчення роботи проводиться після виводу бригади з робочого місця.

Після випробування проводиться повторний допуск з оформленням в наряді. При виконанні роботи по розпорядженню на повторний допуск розпорядження дається заново.

5.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Категорія умов по небезпеці електротравматизму – підвищеної небезпеки, у зв'язку з наявністю у цехах підвищеної вологості. Технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; - підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від

КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі. Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [6] встановлюють оптимальну та допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення.

Таблиця 5.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Іа

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Іа	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [7]:

1. Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні допустимих параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм.

2. Якщо температура поверхонь вище або нижче допустимої температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше їм.

3. Для забезпечення нормованих значень руху кисню проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

В умовах даного виробництва в цехах можливим забруднювачем являється нетоксичний пил.

Таблиця 5.2 – Концентрація шкідливих речовин в повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимальна разова	Середня добова	
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для видалення шкідливих домішок з повітря у виробничих приміщеннях проектом передбачено [7] застосування вентиляції і кондиціонування повітря.

Природню аерацію в теплу пору року можна регулювати за допомогою фрамуг, які встановлюються у віконних пройомах і через витяжні ліхтарі, які

встановлюються на даху приміщення – це безканална вентиляція. Більш активна вентиляція забезпечується пристроєм вентиляційних каналів, які споруджуються у стінах приміщення. При цьому для підсилення швидкості руху повітря на виході теплого повітря зовні, а саме на трубі, яка розташовується на даху будівлі, встановлюють спеціальні камери-патрубки.

Природна вентиляція не передбачає підігрів та зволоження повітря, яке поступає у приміщення, і очистка від пилу повітря, яке видаляється на зовні, тому для досягнення максимального рівня вентиляції ще використовують механічну вентиляцію.

5.2.3 Виробниче освітлення

Вплив світла на життєдіяльність людини вивчений досить добре. Воно впливає не лише на функцію зору, а й на діяльність організму в цілому: посилюється обмін речовин, збільшується поглинання кисню і виділення вуглекислого газу. Відомий сприятливий вплив природного освітлення на скелетну мускулатуру. Недостатня або надмірна освітленість, нерівномірність освітлення в полі зору втомлює очі, призводить до зниження продуктивності праці; при цьому зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків.

Раціональне освітлення – один з основних факторів створення сприятливих робочих умов праці. Недостатнє освітлення викликає передчасне стомлення працюючих, знижує продуктивність праці, може стати причиною нещасного випадку.

У приміщенні використовується штучне та природне освітлення.

Система штучного освітлення – комбінована, оскільки поряд із загальним освітленням (тип джерела освітлення – лампи світлодіодні) використовуються індивідуальні джерела світла (настільні світильники з лампами світлодіодними).

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та суміщеному освітленні (відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [8], характеристика зорової роботи – дуже високої точності, розряд зорової роботи – II, підрозряд – в) зазначені у таблиці 5.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,15 до 0,3 включно	II	в	малий середній великий	світлий середній темний	1500	200	-	4,2

Для загального освітлення приміщень рекомендується використовувати головним чином, світлодіодні лампи, що обумовлюється наступними перевагами: високою світловою віддачею (до 75 лм/Вт і більше); довгим часом використання (до 10000 годин); малою яскравістю поверхні, що світиться; спектральним складом випромінюючого світла (для деяких видів ламп цей склад є близьким до природного світла, що забезпечує гарну передачу кольорів). Разом з тим необхідно врахувати і недоліки цих ламп: висока пульсація світлого потоку та пов'язана з цим можливість стробоскопічного ефекту; для запалювання та горіння лампи необхідно включення послідовно з ним пускорегулюючих апаратів; працездатність ламп залежить від температури

оточуючого середовища, до кінця часу роботи світловий потік зменшується більш ніж на половину від номінального.

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

5.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки» [9].

Основні параметри виробничого шуму на постійних робочих місцях в промислових приміщеннях наведені у таблиці 5.4.

Шум порушує нормальну роботу шлунка, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Таблиця 5.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху.

Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі.
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

5.2.5 Виробнича вібрація

Вібрація відноситься до факторів, які мають велику біологічну активність. Як загальна, так і локальна вібрація несприятливо впливає на організм людини, викликає зміну у функціональному стані вестибулярного апарату, центральної нервової, серцево-судинної систем, погіршує самопочуття та може призвести до розвитку професійних захворювань.

У нашому цеху присутня вібрація типу – За [10]. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання.

Основні параметри вібрації, такі як середньоквадратичне значення віброприскорення та віброшвидкості, логарифмічні рівні приведені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Категорія вібрації по санітарним нормам	Напрямок дії	Нормативні, корекційовані по частоті та еквівалентні корекційовані значення			
		Віброприскорення		Віброшвидкість	
		$\text{м} \cdot \text{с}^{-2}$	ДБ	$\text{м} \cdot \text{с}^{-2} \cdot 10^{-2}$	ДБ
Загальна	Z_o, Y_o, X_o	0,1	100	0,2	92

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

- динамічне погашення вібрації - приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;
- зміна конструктивних елементів машин;
- застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

5.2.6 Психофізіологічні фактори

Психофізіологічні фактори вибираються відповідно з Гігієнічною класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу, затвердженої Наказом Міністерства охорони здоров'я № 528 від 27 грудня 2001 року.

Фізичні навантаження. Робоча поза: Періодичне перебування в незручній та/або фіксованій позі до 50% часу зміни; перебування у вимушеній позі (навпочіпки, на колінах і т. ін.) від 10% до 25% часу зміни; знаходження в позі стоячи від 60% до 80% часу зміни.

Сумарна маса вантажів, що переміщуються протягом кожної години зміни: з робочої поверхні (чоловіки): до 1500

Нахили корпусу (вимушені, більше 30), кількість за зміну: 101 –300

Переміщення у просторі (переходи, обумовлені технологічним процесом протягом зміни), км/ По горизонталі: до 12. По вертикалі: до 8

Інтелектуальні навантаження: Рішення складних завдань з вибором за відомим алгоритмом (робота за серією інструкцій)

Зміст роботи: Сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальним значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів, Обробка, перевірка і контроль за виконанням завдання, Робота в умовах дефіциту часу

Сенсорні навантаження: Тривалість зосередженого спостереження (в % від часу зміни) 51-75. Щільність сигналів (світлових, звукових) та повідомлень в середньому за годину роботи 176–300. Кількість виробничих об'єктів одночасного спостереження 11-25

Навантаження на зоровий аналізатор (Спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) 3-4

Навантаження на слуховий аналізатор (при виробничій необхідності сприйняття мови чи диференційованих сигналів) Розбірливість слів та сигналів від 70% до 50%

Навантаження на голосовий апарат (сумарна кількість годин, що наговорюються протягом тижня) 20-25

Емоційне навантаження: Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності. Значущість помилки – Несе відповідальність за функціональну якість основної роботи (завдань). Вимагає виправлень за рахунок додаткових зусиль всього колективу (групи, бригади та ін.)

Ступінь ризику для власного життя: Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб

Монотонність навантажень: Кількість елементів (прийомів), необхідних для реалізації простого завдання або в операціях, які повторюються багаторазово 5-2

Тривалість виконання простих виробничих завдань чи операцій, що повторюються (сек.) 24-2

Монотонність виробничої обстановки (час пасивного спостереження за технологічним процесом в % від часу зміни) 91-95

Режим праці: Фактична тривалість робочого дня (год.) 10– 12

Змінність роботи Тризмінна робота (робота у нічну зміну)

Наявність регламентованих перерв та їх тривалість Перерви нерегламентовані або недостатньої тривалості до 3% часу зміни

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі вирішено задачу розробки пристрою автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом (ВЕК). Запропонований закон регулювання забезпечує максимальний відбір потужності від вітрового колеса та стабілізацію напруги на виході установки, що підвищує ефективність використання енергії вітрового потоку.

Основні результати роботи:

Розроблено структуру системи керування для ВЕК з горизонтальною віссю обертання, яка забезпечує роботу в точці максимальної потужності.

Розроблено функціональну схему системи автоматичного керування ВЕК.

Вибрано стандартне електричне обладнання для запропонованої системи автоматичного керування.

Промодельовано систему автоматичного керування струмом збудження у середовищі Matlab Simulink.

Отримано графіки перехідних процесів при роботі запропонованої системи керування.

Виконано техніко-економічний розрахунок витрат на запропонований варіант системи електропривода. Доведено, що впровадження запропонованих рішень забезпечує економію річних експлуатаційних витрат, що підтверджує економічну доцільність технічного рішення.

Визначено основні положення щодо охорони праці при експлуатації запропонованого ВЕК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії / Під заг. ред. А.К. Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 560 с.
2. Міжнародне енергетичне агентство. Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028 [Електронний ресурс]. – Paris: IEA, 2023. – Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
3. Wind Energy Explained: Theory, Design and Application / Д. Ф. Манвелл, Дж. Г. МакГоуен, А. Л. Рогерс. — 2-ге вид. — Чичестер: John Wiley & Sons, 2009. — 705 с. — ISBN 978-0-470-01500-1
4. Смолінський С. Вітряки України // Ватерпас. - 1999. - № 18/19. – С. 56-61.
5. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/section-2/2-2/2-2-1>
6. Фатеев В.М. Вітродвигуни і вітроустановки. – М.: Сільгоспаидат, 1957. – 536 с.
7. Мокін Борис Іванович. До питання вибору вітрових двигунів і електричних генераторів вітрових електричних станцій / Б.І.Мокін, О.Б.Мокін, О.А.Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №6. – С.52-62.
8. Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії / Під заг. ред. А.К. Шидловського. – К.: Українські енциклопедичні знання, 2007. – 560 с.
9. Комплекс ресурсо- і енергозберігаючих геотехнологій видобутку та переробки мінеральної сировини, технічних засобів їх моніторингу із системою управління і оптимізації гірничорудних виробництв / А.А. Азарян, Ю.Г. Вілкул та інші – Кривий Ріг: Мінерал, 2006. – 219 с.
10. Сінчук О.М. До питання вибору електричного генератора для вітрогенеруючої установки з вертикальною віссю обертання в умовах залізорудних шахт / Сінчук О.М., Бойко С.М., Ялова А.М. // Сучасні проблеми систем електропостачання промислових та побутових об'єктів. Збірник наукових праць I Всеукраїнської науково-технічної конференції

- викладачів, аспірантів і студентів: 18-19 жовтня 2012р. – Донецьк, «ДВНЗ» ДонНТУ, 2012. – С. 88-89.
11. Сінчук О.М. Обґрунтування вибору типу генератора для вітроенергетичної установки, яка працює в умовах залізрудних шахт / Бойко С.М., Щербак М.А. // Гірничі електромеханіка та автоматика. Дніпропетровськ: Наук. – техн. зб. – 2012. – Вип. 89. – С. 150 – 153.
 12. Сінчук О.М. Відновлювальні джерела електричної енергії. / І.О. Сінчук, С.М. Бойко, Луценко І.А., Ткаченко Г.І.// Монографія – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2013. – 192с.
 13. Шефтер Я.И. Використання енергії вітру.- М.: Энергоатом, 1983.- 200 с.
 14. R. Datta and V.-T. Ranganathan, “A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, pp. 163–168, March 2003.
 15. Мокін Б. І. Автоматичні регулятори в електричних мережах / Б. І. Мокін, Ю. Ф. Виговський. — К. : Техніка, 1985. — 104 с.
 16. Бойко С.М. Система керування асинхронним генератором з короткозамкненим ротором у складі вітроелектротехнічного комплексу/ Бойко С.М., Щербак М.А., Дяченко В.А., Жуков О.А. //Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів. 09-11 квітня 2012 р. – Кременчук, КрНУ, 2013. – С. 206-207.
 17. Rallman R. Der Asynhrongenerator// Wasser, Energie, Luft. – 1984. - № 3/4. S. 33-43.
 18. Денисенко Г.И., Васько П.Ф., Бриль А.А., Некур П.П. Энергетика автономных вітроустановок // Энергетика і транспорт. - 1990. - №3. - С.130-135.
 19. Carlson O., Hylander J., Tsilos S. Variable speed AC - generators applied in WECS // EWEC'86. - 1986. - 1. Sec. D, D23 -P. 685 - 690.
 20. S. Muller, M. Deicke, and R.-W. De Docker, “Adjustable speed generators for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-quadrant igbt

- converters linked to the rotor,” IEEE Industry Applications Conference, vol. 4, pp. 2254–2259, October 2000.
21. Чумаченко І.В. Мікроконтролерні прилади: структура і використання: навчальний посібник / Чумаченко І.В., Кошовий М.Д., Лопатин В.В. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т “ХАІ”, 2001. – 277 с.
 22. Евстифеев А.В. Микроконтролеры AVR семейства Classic фирмы Atmel / А.В. Евстифеев. – К.: «Додека-XXI», 2006. – 288 с.
 23. Сінчук І.О. Вибір типу і потужності акумуляторної батареї вітроенергетичного комплексу для підземних виробіток рудних шахт / Сінчук І.О., Бойко С.Н., Миколаєнко Ю.А. // Технічна Електродинаміка. Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». Частина 3 – Харків, Інститут Електродинаміки НАН України, 2012. – С. 64-67
 24. Сінчук О.М. Аспекти оцінки впливу роботи вітроелектричних установок в умовах рудних шахт на середовище // XI Міжнародна науково-технічна конференція «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об’єктів»: Матеріали конференції. – Кременчук, КрНУ, 2012. – С. 202-203.
 25. Зміни та доповнення до комплексної програми будівництва вітрових електростанцій // МКР з питань будівництва вітрових електростанцій. - 2000. - 109с.;
 26. Васько П.Ф. Системи електромеханічного перетворювання енергії вітру: Автореф.дис... д-ра техн. наук: 05.14.08 / Інститут електродинаміки НАН України. – Київ, 1998. – 33 с.
 27. Вітроенергетичні установки малої потужності для безперебійного живлення автономних енергоспоживачів // Пропозиція. - 2001. - №10. – 106 с.
 28. ГКД 3.003 – 2000. Вітроенергетика. Вітрові електричні установки. Порядок поставлення на серійне виробництво / Бриль А.О., Васько В.П., Хілько В.А., Шульга В.Г. – Київ: Державний комітет промислової політики України, 2000. – 31 с.

29. ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електричних станцій / Жовмір М.М., Симонов А.С. та інші. – Строк перевірки 2004 р. – Київ: Мінпаливноенерго україни, 2001. – 52 с.
30. Голубенко М.С., Гембарський О.М., Решетняк М.М. Стан розвитку вітроенергетики в Україні // Энергетика и электрификация. - 2000. - №12. – С.36-37.
31. ДСТУ 3896-99. Вітроенергетичні установки та вітроелектричні станції. Терміни та визначення. – Київ: Держстандарт України, 1999. – 21 с.
32. ДСТУ 4037-2001. Вітроенергетика. Установки електричні вітрові. Загальні технічні вимоги. – Київ: Держстандарт України, 2001. – 28 с.
33. Жовмір М.М., Шульга С.В. До питання про доцільність будівництва вітрових електростанцій в Україні // Энергетика и электрификация. - 2000. - №4. - С.36-40.
34. Методика розрахунку аеродинамічних характеристик вітродвигуна роторного типу (ВДР) / В.М.Кутін, В.П.Горенюк // Вісн. Вінниц. політехн. ін-ту. – 1999. - № 2. – С.57-62.
35. Кудря С.О. Нетрадиційні та поновлювальні джерела енергії в регіоні // Доповіді першої міжнародної науково-практичної конференції "Наука і вітроенергетика".-Львів.-2001.-С. 91-95.
36. Кудря С.О., Тучинский В.Г. Основні задачі МНТЦ вітроенергетики НАНУ по науково-техничному супроводу комплексної програми будівництва ВЕС в Україні // Труды Третьей международной конференции «Нетрадиционная энергетика в XXI веке». – Судак. – 2002. – С. 32-36.
37. Кукушкін В.І. Нетрадиційні і поновлювальні джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні // Доповіді першої міжнародної науково-практичної конференції „Ветроэнергетика сегодня”. – Львів. – 2001. – С. 96-98.
38. Васько П.Ф. Питомі характеристики енергетичного потенціалу вітру на території України // Энергетика и электрификация. – 1997. – №4. – С. 53-55.
39. Смолінський С. Вітряки України // Ватерпас. - 1999. - № 18/19. – С. 56-61.

40. Сиротюк В.М., Воробкевич В.Ю., Сиротюк С.В. Деякі аспекти обґрунтування конструктивних параметрів вітроколів // С.-г. машини: Зб. ст. – Луцьк. – 1999. - Вип. 5. – С. 246-253.
41. Шульга В., Кудря С., Хілько В. Від вітряка до вітроенергетики // Пропозиція. - 1998. - №11. – С.50-51.
42. Ветроэнергетика / Под ред. Д. де Рензо.- М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
43. Мокін Б. І. До питання вибору вітрових двигунів і електричних генераторів вітрових електричних станцій / Б.І.Мокін, О.Б.Мокін, О.А.Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2007. – №6. – С.52-62.
44. Carlson O., Hylander J., Tsilos S. Variable speed AC - generators applied in WECS // EWEC'86. - 1986. - 1. Sec. D, D23 -P. 685 - 690.
45. Joanne Hui An Adaptive Control Algorithm for Maximum Power Point Tracking for Wind Energy Conversion Systems / Joanne H. // 2008 Queen's University. A thesis submitted to the Department of Electrical and Computer Engineering in conformity with the requirements for the degree of Master of Science (Engineering). 83 pp. Kingston, Ontario, Canada.
46. J. Marques, H. Pinheiro, H. Grundling, J. Pinheiro, and H. Hey, “A survey on variable-speed wind turbine system,” Proceedings of Brazilian conference of electronics of power, vol. 1, pp. 732 – 738, 2003.
47. S. Muller, M. Deicke, and R.-W. De Docker, “Adjustable speed generators for wind turbines based on doubly-fed induction machines and 4-quadrant igbt converters linked to the rotor,” IEEE Industry Applications Conference, vol. 4, pp. 2254–2259, October 2000.
48. Тихевич Остап Олегович.. Удосконалення методики узгодження параметрів віротурбіни та асинхронізованого синхронного генератора вітроенергетичної установки: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.14.08 / НАН України; Інститут електродинаміки. — К., 2003. — 19 с.
49. G. Moor and H. Beukes, “Power point trackers for wind turbines,” Power Electronics Specialist Conference (PESC), pp. 2044–2049, 2004.

50. T. Nakamura, S. Morimoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "Optimum control of ipmsg for wind generation system," Power Conversion Conference (PCC), vol. 3, pp. 1435–1440, 2002.
51. Q. Wang and L.-C. Chang, "An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, pp. 1242–1249, September 2004.
52. E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, "Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 53, April 2006.
53. R. Datta and V.-T. Ranganathan, "A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, pp. 163–168, March 2003.
54. Мокін Б. І., Мокін О. Б., Жуков О. А. Векторні діаграми та математичні моделі вітрового колеса з вертикальною віссю обертання//Електронне науково-спеціалізоване видання «Наукові праці Вінницького національного технічного університету» на англ.,рос.і укр. мовах.— 2008. — Вип. 1. — Розділ: Енергетика і електротехніка. — Адрес: <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.htm>
55. Мокін Б. І., Мокін О. Б., Жуков О. А. Математичні моделі сил, що діють на вітрове колесо з вертикальною віссю обертання, при ненульових кутах повороту лопатей / /Електронне науково-спеціалізоване видання «Наукові праці Вінницького національного технічного університету» на англ.,рос.і укр. мовах.— 2008. — Вип. 2. — Розділ: Енергетика і електротехніка.
56. Мокін Борис Іванович. Ідентифікація параметрів моделей та оптимізація режимів системи електропривода трамвая з тяговими електродвигунами постійного струму: монографія / Б.І.Мокін, О.Б.Мокін — Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. — 92 с. — ISBN 978-966-641-241-9
57. Кір'янов Д. В. Модель системи автоматичного керування підйомом антенної щогли в умовах дії вітрових навантажень / Д.В. Кір'янов // Системи

озброєння і військова техніка – Харків, 2009. – Вип 4(20). – С. 115 – 119.

58. Кирьянов Д. В. Методика параметрического синтеза цифрового нечеткого регулятора САУ нестационарными объектами управления / Д.В. Кір'янов // Системи обробки інформації. – 2006. – Вип. 5(54). – С. 53 – 57.

59. Мокін Б. І. Математична модель пристрою керування електричною вітроенергетичною установкою з вертикальною віссю обертання / Б.І.Мокін, О.Б.Мокін, О.А.Жуков // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – №3. – С.48-54.

60. Грабко В.В. Математична модель для коригування температурних зображень об'єктів при контролі електрообладнання / В.В Грабко, В.В. Грабко // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Електромашинобудування та електрообладнання”. Випуск 66. Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. – К.: “Техніка”. – 2006. – С. 394 – 396.

61. Грабко В.В. Математична модель для коригування температурних зображень об'єктів при контролі електрообладнання / В.В Грабко, В.В. Грабко // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Електромашинобудування та електрообладнання”. Випуск 66. Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. – К.: “Техніка”. – 2006. – С. 394 – 396.

62. Чумаченко І.В. Мікроконтролерні прилади: структура і використання: навчальний посібник / Чумаченко І.В., Кошовий М.Д., Лопатин В.В. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т “ХАІ”, 2001. – 277 с.

63. Ціделко В.Д. Невизначеність вимірювання. Обробка даних і подання результату вимірювання / В.Д. Ціделко, Н.А. Яремчук. – К.: ІВЦ Видавництво Політехніка, 2002. – 176 с.

64. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю: [навчальний посібник] / [Є.Т. Володарський, В.В. Кухарчук, В.О. Поджаренко, Г.Б. Сердюк]. – Вінниця: ВДТУ, 2001. – 219с.

65. Мирский Г.Я. Электронные измерения / Г.Я. Мирский. – М.: Радио и связь, 1986. – 440 с.
66. Пат. 154673 UA, МПК G01K 13/08. Пристрій для безконтактного вимірювання ресурсу ізоляції ротора гідрогенератора / В. В. Грабко, О. А. Жуков, В. В. Грабко, А. Г. Штурба (Україна). – № u 2023 02768 , заявл. 07.06. 2023 , опубл. 29.11.2023, Бюл. № 48. – 9 с.
67. Проблематика інтелектуалізації систем керування вітроенергетичних установок [Електронний ресурс] / О. А. Жуков, А. Г. Штурба // Матеріали LII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 21-23 червня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2023/paper/view/17403>.
68. Особливості застосування відновлювальних джерел енергії в Зублевич залізничного транспорту. [Електронний ресурс] / О. А. Жуков, В. Я. Штурба // Матеріали LIV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 24-27 березня 2025 р. – Електрон. текст. дані. – 2025. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2025/paper/view/23485/19413>

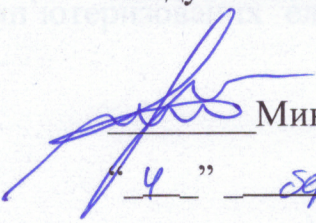
Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувача кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРИЗ

« 4 » вересня 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

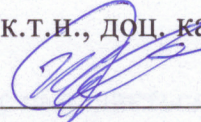
на бакалаврську кваліфікаційну роботу

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ
КОМПЛЕКСОМ**

08-24. БКР.007.00.000 ТЗ

Керівник роботи

к.т.н., доц. каф. КЕМСК

Олексій ЖУКОВ

« 4 » вересня 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕМСА-216

В'ячеслав ЗУБЛЕВИЧ

« 4 » вересня 2025 р.

Вінниця ВНТУ 2025

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Система керування вітровим електротехнічним комплексом».

Скорочене найменування розробки – «Вітровий електротехнічний комплекс».

Замовник – кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем дипломного проектування.

3 Призначення розробки і галузь використання

Вітровий електротехнічний комплекс призначений для резервного живлення об'єктів домашнього господарства.

4 Вимоги до розробки

Система керування вітровим електротехнічним комплексом повинна забезпечувати ефективний відбір потужності від вітрового колеса.

5 Комплектація розробки

Вітровий електротехнічний комплекс складається із вітродвигуна, електричного генератора і системи керування .

6 Технічні характеристики

Тип електричного генератора – синхронний, потужністю 2000 Вт. Із електричною обмоткою збудження.

7 Джерела розробки

1. ГКД 3.003 – 2000. Вітроенергетика. Вітрові електричні установки. Порядок поставлення на серійне виробництво / Бриль А.О., Васько В.П., Хілько В.А., Шульга В.Г. – Київ: Державний комітет промислової політики України, 2000. – 31 с.
2. ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електричних станцій / Жовмір М.М., Симонов А.С. та інші. – Строк перевірки 2004 р. – Київ: Мінпаливноенерго України, 2001. – 52 с.

8 Елементна база

Генератор, апаратура керування і захисту, провідники, кабелі і т.п. виробництва України чи країн близького зарубіжжя.

9 Конструктивне виконання

Електропривод виготовляється окремими блоками, що реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у бризгозахищеному виконанні.

10 Показники технологічності

Обладнання виконується на сучасній елементній базі. Його монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок.

11 Етапи виконання

Стадії і етапи розробки	Термін виконання
Основна частина	
Графічна частина	

12 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями-електромонтажниками відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою

здійснюється мінімум один раз на півроку. Ремонт здійснюється електромеханіками, фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

13 Живлення електропривода

Живлення електропривода повинно бути виконане трифазною напругою 0,4 кВ.

14 Порядок контролю та прийняття Виконання етапів графічної та розрахункової документації бакалаврської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИМ
КОМПЛЕКСОМ**

Актуальність теми. Мета, об'єкт та предмет дослідження.

Актуальність теми. Зростаючий попит на електроенергію у поєднанні з необхідністю зменшення викидів парникових газів зумовлює активний перехід світової енергетики до відновлюваних джерел енергії. Серед них вітрова енергетика займає провідне місце завдяки своїй екологічності, доступності вітрового ресурсу та можливості масштабування. У контексті глобального тренду на декарбонізацію енергетики Україна також поступово розширює частку «зеленої» енергії у загальному енергетичному балансі. Згідно з прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (IEA), вже до 2030 року глобальні потужності вітрової енергетики можуть подвоїтись, а електроенергія з ВДЕ покриватиме понад третину світового попиту [1, 2]. В Україні, попри воєнні виклики, зберігається стратегічний курс на розвиток відновлюваної енергетики, зокрема й децентралізованих джерел у складі мікромереж та автономних систем живлення.

Розробка, дослідження та вдосконалення системи керування вітровим електротехнічним комплексом є важливим і актуальним завданням, що має як практичне, так і науково-технічне значення для підвищення енергоефективності, надійності та стабільності роботи вітрових установок в умовах реального енергетичного середовища.

В даній роботі розглядається ВЕУ з горизонтально віссю обертання вітрового колеса.

Метою роботи є підвищення ефективності функціонування вітрового електротехнічного комплексу шляхом розробки системи автоматичного керування, яка забезпечує оптимальний відбір електричної потужності залежно від параметрів вітрового потоку.

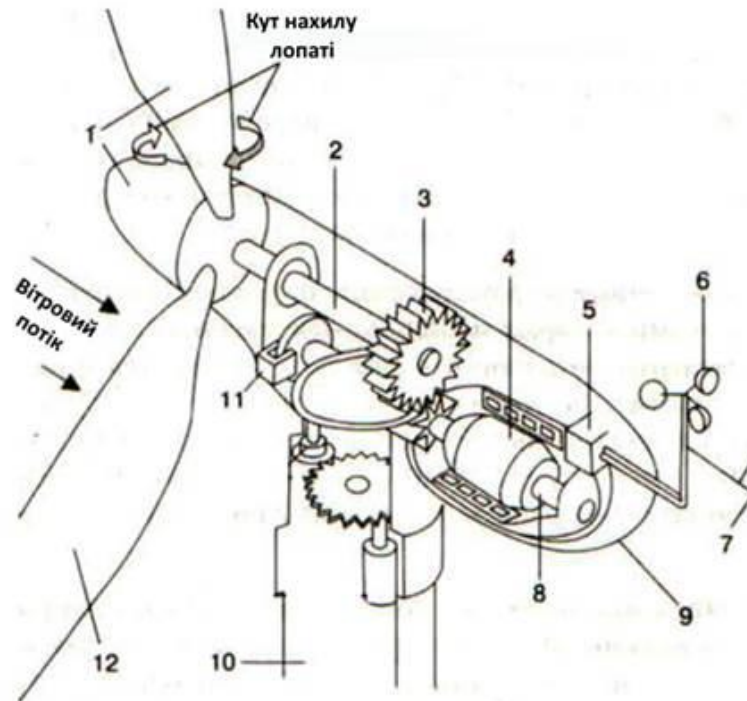
Об'єктом дослідження в бакалаврській роботі є вітровий електротехнічний комплекс.

Предметом дослідження є процеси регулювання потужності вітрового електротехнічного комплексу.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

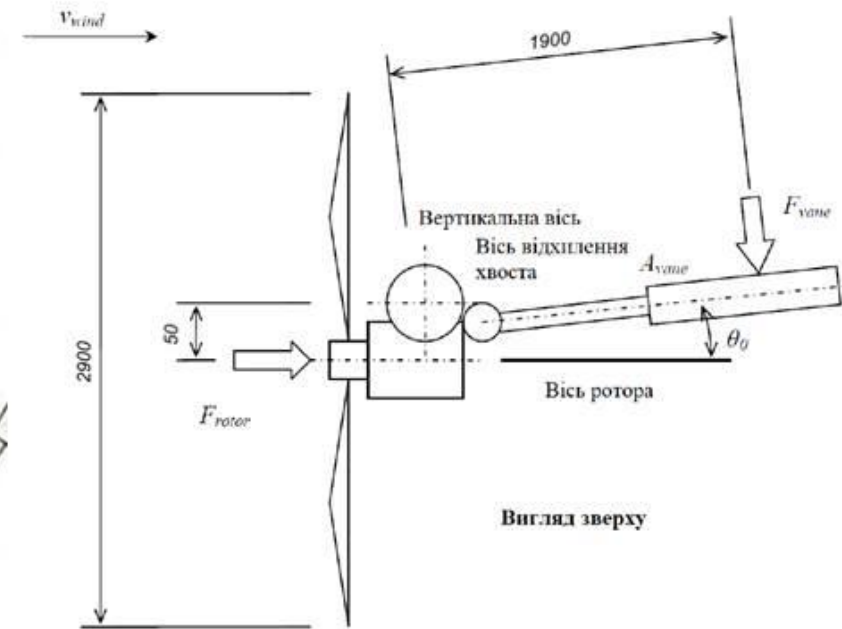
- Провести аналіз відомих структур вітрових електротехнічних комплексів та їх систем керування.
- Виконати розрахунок споживання електричної потужності об'єкта електропостачання.
- Розробити структуру системи автоматичного керування вітровим електротехнічним комплексом.
- Здійснити вибір електротехнічного та силового обладнання для реалізації системи.
- Розробити комп'ютерну модель вітроенергетичної установки з системою керування.
- Провести моделювання та отримати графіки перехідних процесів.

Улаштування і кінематична схема ВЕУ



Улаштування вітрової електростанції

1. Ротор вітроколеса; 2. Низькошвидкісний вал; 3. Редуктор;
4. Генератор; 5. Контролер; 6. Анемометр; 7. Флюгер; 8.
- Високошвидкісний вал; 9. Гондола; 10. Щогла; 11. Гальмо;
12. Лопаті ротора.

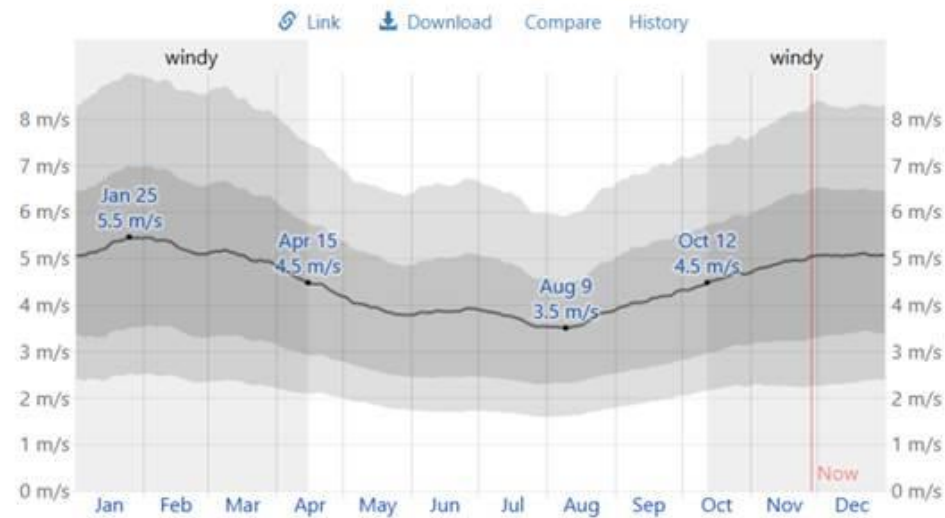


Кінематична схема ВЕУ:

Енергетичний потенціал вітрової енергії в Україні

№ району	Середньорічна швидкість вітру, $V_{\text{ф}}$, м/с	Висота, м	Природний потенціал вітру, кВт.год/м ² рік	Технічно-досяжний потенціал вітру, кВт.год/м ² рік
1	< 4,25	15	1120	200
		30	1510	280
		60	2030	375
		100	2530	460
2	4,5	15	2010	390
		30	2710	520
		60	3640	700
		100	4540	850
3	5,0	15	2810	520
		30	3790	690
		60	5100	860
		100	6350	975

Енергетичний потенціал вітрової енергії у Вінницькій області



Техніко-економічне порівняння генератора та системи керування ВЕУ

Показник	Генератори ВЕУ		
	СГ ПМ	ГПС	АГ
1	2	3	4
Вартість генератора Д, грн	8000	5800	3800
Вартість системи керування СК, грн	2500	5000	2351
Капітальні вкладення К, грн	10500	10800	6151
Річні капітальні витрати $K_{річн}$, грн/рік	1785	1797	1046
Амортизаційні відрахування C_A , грн/рік	1050	1040	615
Відрахування на ремонт C_P , грн/рік	210	208	123
Додаткові відрахування C_D , грн/рік	2709	8326	11101
Відрахування на обслуговування C_O , грн/рік	209	479	592
Загальні відрахування С, грн/рік	4178	10053	12431
Приведені витрати З, грн/рік	6993	11820	13476

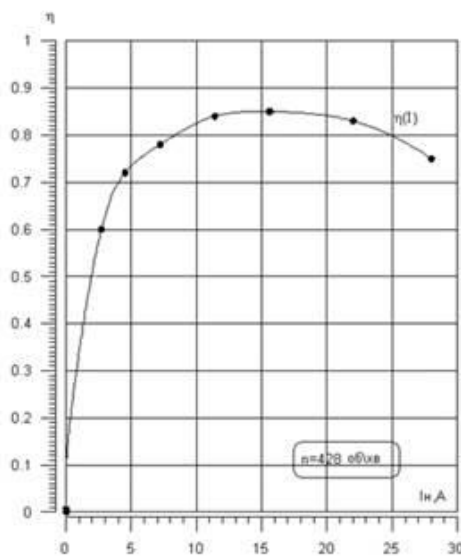
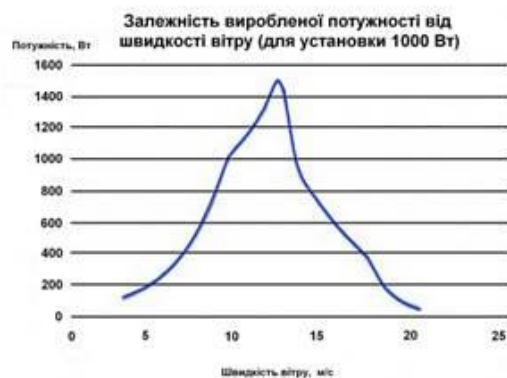
Параметри та статичні характеристики генератора ВЕУ

Технічні характеристики генератора

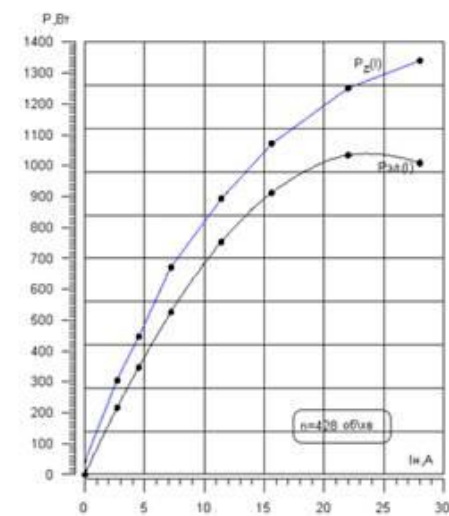
Марка генератора	Номинальна кількість обертів	Номинальна потужність	ККД	Вихід на напруга	Максимальна потужність	Максимальна кількість обертів
Ginlong GL-PMG-1000	450 об/хв	1000 Вт	95%	57 В	1400 Вт	1000 об/хв



Рисунок 2.5 - Зовнішній вигляд генератора Ginlong GL-PMG-1000

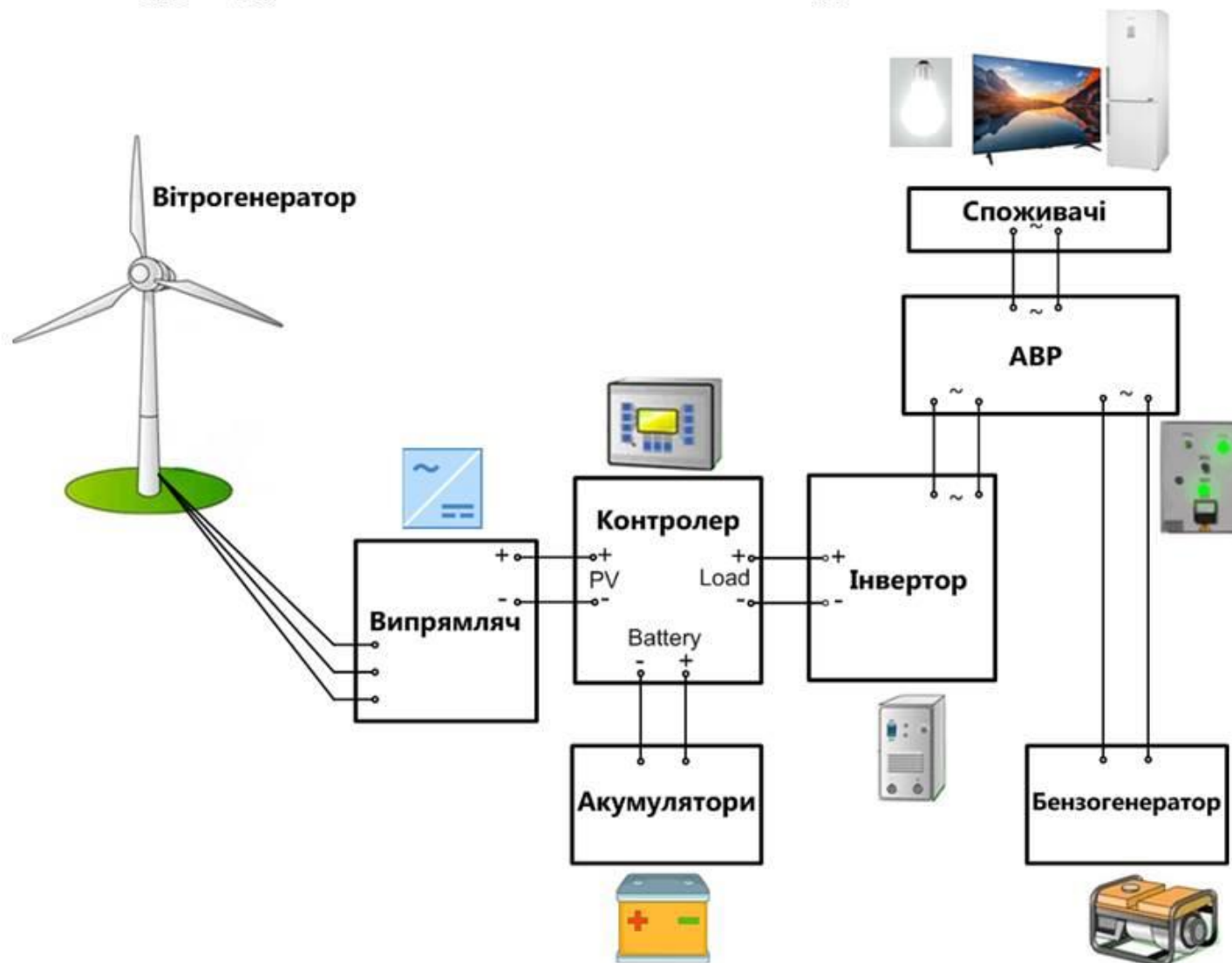


Характеристика зміни ККД генератора залежно від навантаження

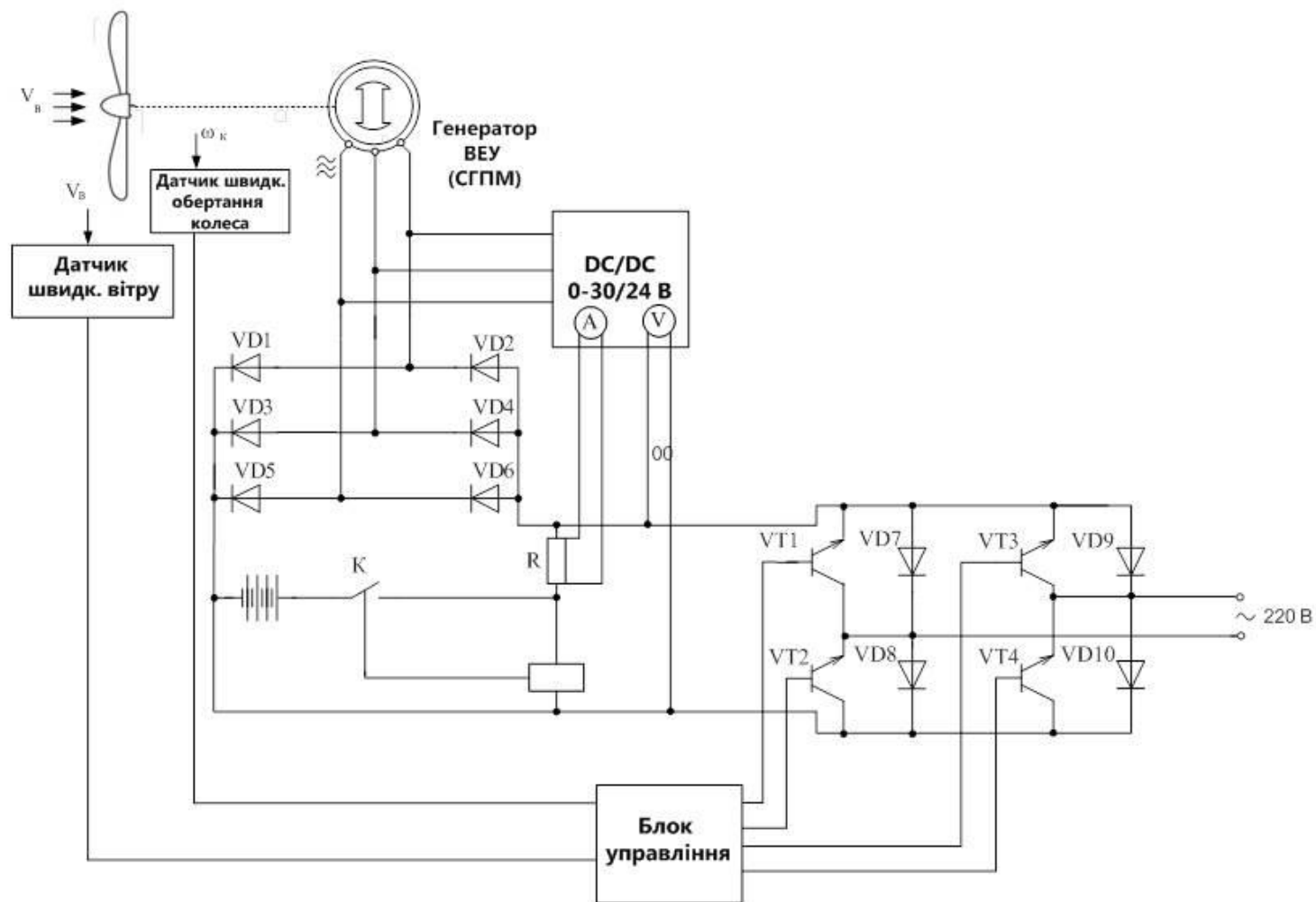


Характеристика потужності генератора

Структура системи автоматичного керування ВЕК



Функціональна схема системи автоматичного керування ВЕУ



Функція максимумів потужностей вітроенергетичних характеристик

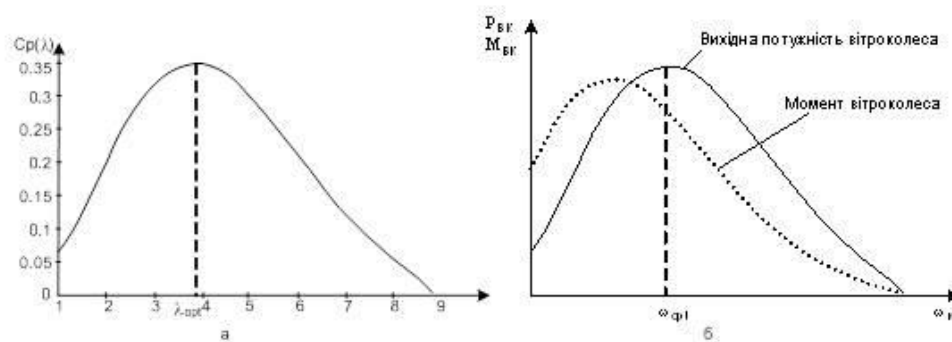


Рис. 11.1. Характеристики вітрового колеса

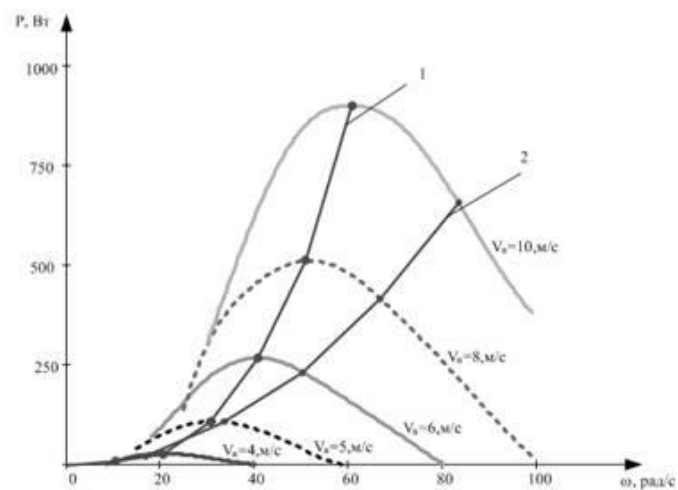
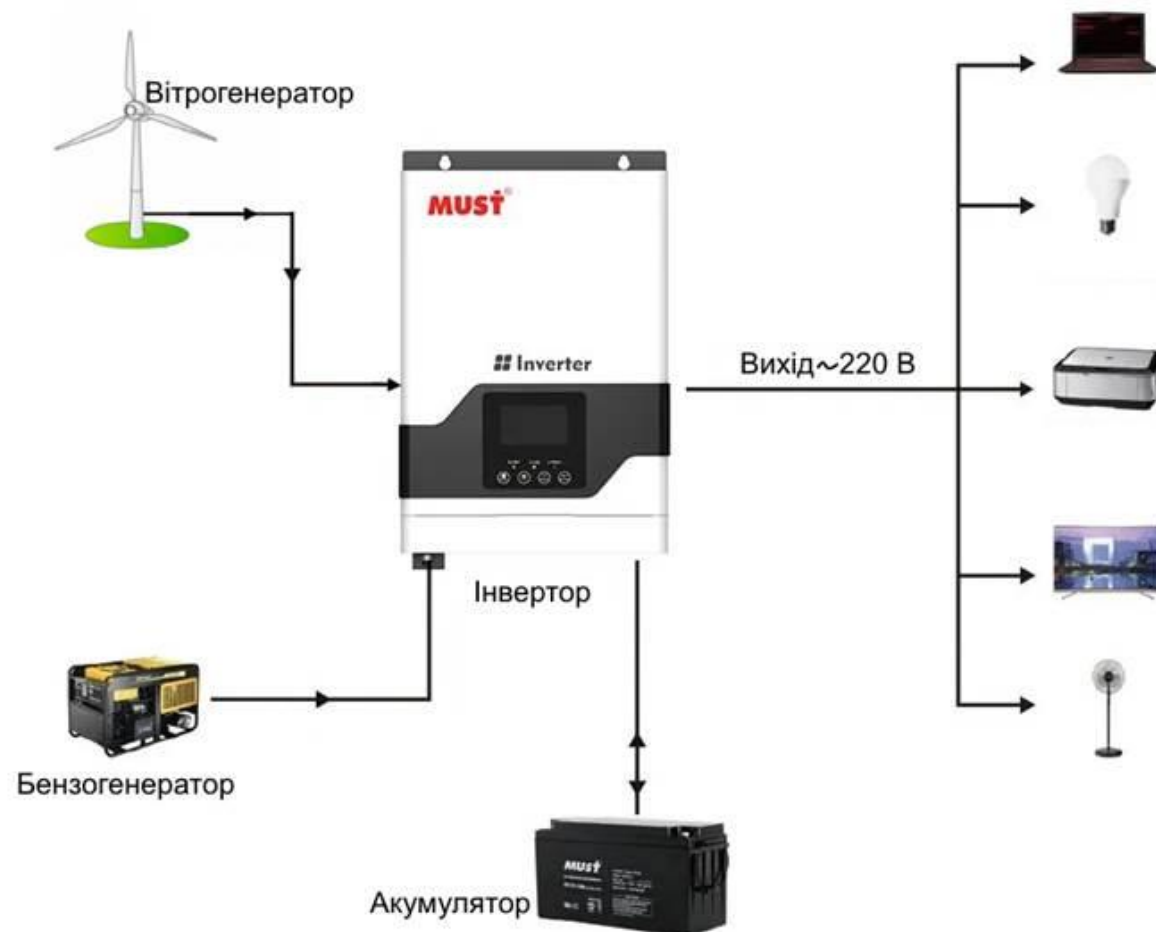


Схема підключення інвертора Must PV18-1512VPM



Комп'ютерне моделювання системи автоматичного керування ВЕУ

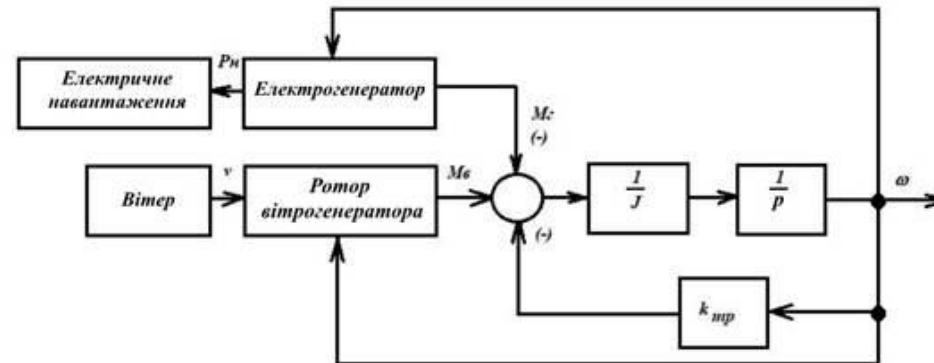


Рис.13.1 Структурна схема математичної моделі ВЕК

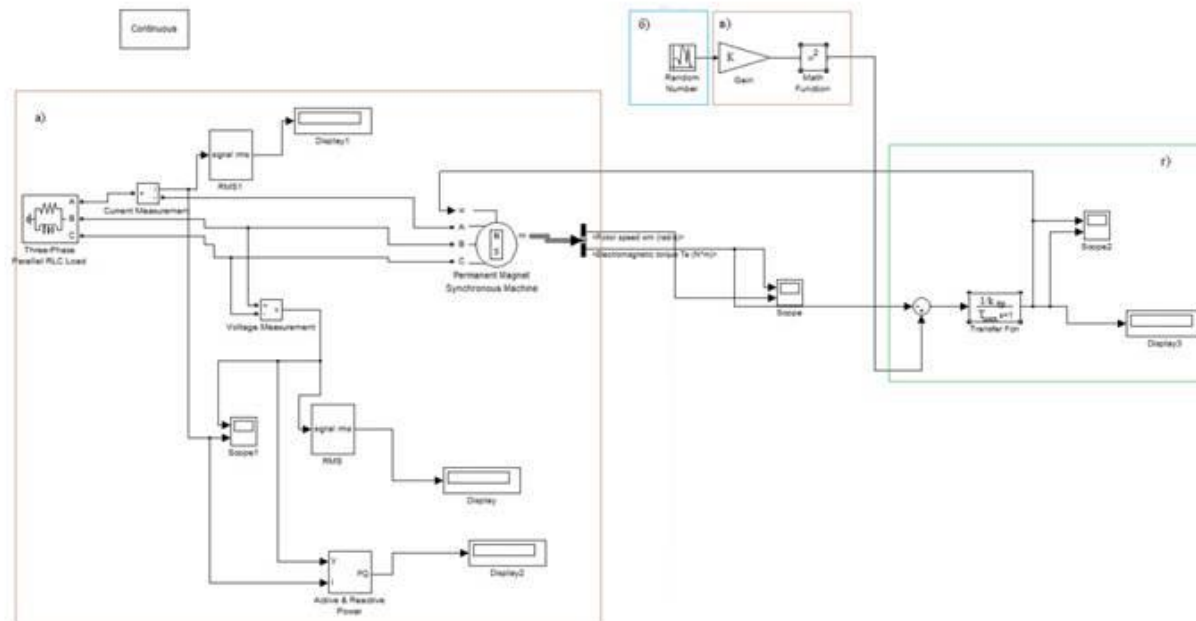
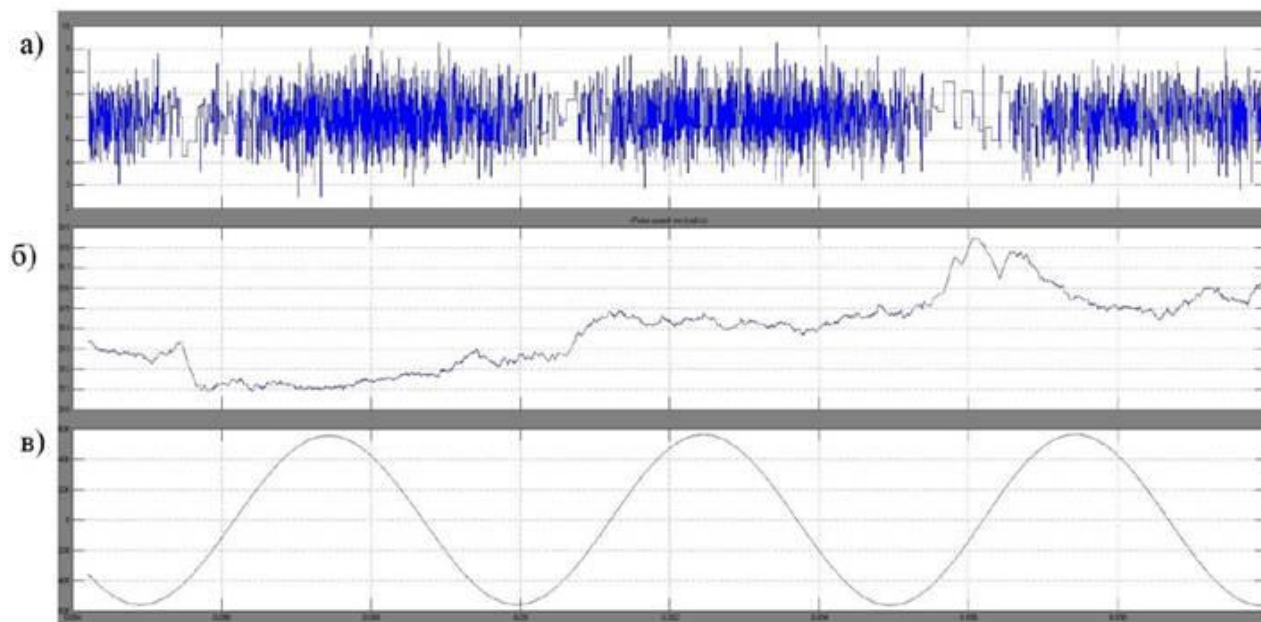


Рис.13.2. Модель вітроенергетичної установки в Simulink Matlab

Результати моделювання системи автоматичного керування ВЕК



а – швидкість вітру, б – швидкість обертання вала синхронного генератора, в – напруга, що генерується ВЕК

Підсумки проектування

Основні результати роботи:

1. Розроблено систему керування вітроенергетичної установки, яка забезпечує її роботу у точці максимального відбору потужності вітрового колеса.
2. Розроблено структуру системи керування для БЕК з горизонтальною віссю обертання, яка забезпечує роботу в точці максимальної потужності.
3. Розроблено функціональну схему системи автоматичного керування БЕК.
4. Вибрано стандартне електричне обладнання для запропонованої системи автоматичного керування.
5. Промодельовано систему автоматичного керування струмом збудження у середовищі Matlab Simulink.
6. Отримано графіки перехідних процесів при роботі запропонованої системи керування.
7. Виконано техніко-економічний розрахунок витрат на запропонований варіант системи електропривода. Доведено, що впровадження запропонованих рішень забезпечує економію річних експлуатаційних витрат, що підтверджує економічну доцільність технічного рішення.
8. Визначено основні положення щодо охорони праці при експлуатації запропонованого БЕК.
9. За тематикою дослідження опубліковано тези доповіді за у Матеріалах LIV науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, 2025 р

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Система керування вітровим електротехнічним комплексом
Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕЕМ, гр. ЕМСА-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 12,92 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☐ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.
(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП Мошноріз М.М.
(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Паянок О.А.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Жуков О.А.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Зублевич В.Я.

(прізвище, ініціали)

					08-24.БКР.007.00.000							
Зм.	Арк.	№ докумен.	Підпис	Дата	Система керування вітровим електротехнічним комплексом			Літ.	Маса	Масштаб		
Розробив:		Зублевич В.Я.		20.05								
Перевірів		Жуков О.А.		20.05								
Т. контр.												
								Аркуш 1	Аркушів 1			
Рецензент		Войтюк Ю.А.		03.06				ВНТУ, гр. ЕМСА-216				
Норм.кон.		Жуков О.А.		03.06								
Затверд.		Мешноріз М.М.		03.06								