

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Розробка вітроенергетичної установки для забезпечення резервного живлення підприємства**

Виконав(ла): студент(ка) 4 курсу, групи ЕТс-41
спеціальності 141

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Харковський М.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Белякова І.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Мовчан Л.Т.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

студенту Харковський Михайло Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка вітроенергетичної установки для забезпечення резервного живлення підприємства

Керівник роботи Белякова Ірина Володимирівна, к.т.н., доцент

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

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

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Потужність споживачів

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

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці

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

1. Презентація

2.

3.

4.

5.

6.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	Гурик О.Я., к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Мовчан Л.Т., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ		
2	Аналітичний розділ		
3	Проектно-конструкторський розділ		
4	Розрахунковий розділ		
5	Безпека життєдіяльності, основи охорони праці		
6	Загальні висновки		
7	Оформлення пояснювальної записки		
8	Оформлення графічної частини		

Студент _____
(підпис)

Харковський М.М.
_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Белякова І.В.
_____ (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

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

Стор. 62; рис. 15; табл. 3; креслень -; джерел 24; додатків 0.

Робота бакалавра виконана згідно завдання на тему: «Розробка вітроенергетичної установки для забезпечення резервного живлення підприємства».

Мета роботи полягає у розробці вітроенергетичної установки для забезпечення резервного електропостачання підприємства з урахуванням його енергетичних потреб, режимів навантаження та умов експлуатації.

Описано вибір об'єкту альтернативного електропостачання. Розглянуто параметри ВЕУ. Проведено вибір вітрогенератора. Розглянуто додаткове обладнання ВЕУ. Розглянуто питання монтажу вітрогенератора, загальні правила безпеки під час монтажу вітроенергетичної установки. Проведено визначення технічних характеристик. Розраховано аеродинамічні параметри вітроенергетичної установки. Показано результат розрахунків показників. Проведено вибір електрогенератора. Описано застосування редукторів в вітроустановках.

Ключові слова: вітроенергетична установка, резервне живлення, промислове підприємство.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	8
1.1 Вітроелектростанції.....	8
1.1.1 Малі ВЕС.....	9
1.1.2 Середні ВЕС.....	11
1.1.3 Великі ВЕС (вітропарки).....	13
1.1.4 Горизонтально-осьові вітротурбіни.....	17
1.1.4.1 Однолопатеві ротори горизонтальної осі обертання.	17
1.1.4.2 Дволопатеві ротори горизонтальної осі обертання..	18
1.1.4.3 Трилопатеві ротори горизонтальної осі обертання...	20
1.1.4.4 Багатолопатеві ротори горизонтальної осі обертання.....	21
1.1.5 Вертикально-осьові вітротурбіни.....	23
1.1.5.1 Ротор Савоніуса.....	23
1.1.5.2 Ротор Дар'є.....	24
1.1.5.3 Гелікоїдний ротор.....	26
1.1.5.4 Багатолопатевий вертикальний ротор.....	28
1.2 Постановка завдань.....	29
2 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	30
2.1 Вибір об'єкту альтернативного електропостачання.....	30
2.1.1 Вибір об'єкту.....	30
2.1.2 Розрахунок споживаної потужності.....	31
2.2 Висновки до Розділу 2.....	35
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ.....	36
3.1 Параметри ВЕУ.....	36
3.2 Вибір вітрогенератора.....	36
3.3 Додаткове обладнання ВЕУ.....	37

3.4 Монтаж вітрогенератора.....	39
3.5 Загальні правила безпеки під час монтажу вітроенергетичної установки.....	41
3.6 Знаходження технічних характеристик.....	42
3.7 Аеродинамічні параметри вітроенергетичної установки.....	44
3.8 Результат розрахунків показників.....	46
3.9 Вибір електрогенератора.....	46
3.10 Застосування редукторів в вітроустановках.....	50
3.11 Висновки до розділу 3.....	51
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	52
4.1 Небезпеки, які виникають при роботі з обертовими частинами вітротурбіни.....	52
4.2 Вимоги безпеки під час монтажу та обслуговування вітротурбіни на висоті.....	53
4.3 Причини можливого виникнення пожежі у вітроенергетичній установці.....	54
4.4 Небезпеки, пов'язані з експлуатацією акумуляторних батарей....	56
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	60

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність роботи обумовлена сучасними трансформаційними процесами в енергетичній галузі, які супроводжуються зростанням навантаження на електричні мережі, підвищенням вимог до якості та безперервності електропостачання, а також необхідністю переходу до більш стійких і екологічно безпечних джерел енергії. Для промислових підприємств стабільне електроживлення є ключовим фактором ефективного функціонування, оскільки будь-які перебої в подачі електроенергії можуть призводити до зупинки технологічних ліній, порушення виробничих циклів, псування сировини та значних економічних втрат.

В умовах сучасних викликів, зокрема зношеності енергетичної інфраструктури, ризиків аварійних відключень, а також можливих дефіцитів потужності в енергосистемі, особливої важливості набуває впровадження резервних та автономних джерел електропостачання. Традиційні резервні системи, такі як дизель-генераторні установки, мають суттєві недоліки, зокрема залежність від палива, високі експлуатаційні витрати та негативний вплив на довкілля. У цьому контексті використання відновлюваних джерел енергії є більш перспективним і стратегічно обґрунтованим напрямом розвитку.

Вітроенергетичні установки є одним із найбільш ефективних рішень для забезпечення резервного електропостачання, оскільки дозволяють використовувати безкоштовний природний ресурс — енергію вітру. Сучасні конструкції вітрогенераторів забезпечують достатній рівень надійності, ефективності та адаптивності до різних кліматичних умов. У поєднанні з системами накопичення енергії (акумуляторними батареями) та силовою електронікою вони можуть забезпечувати стабільне живлення навіть при нестабільному вітровому режимі.

Крім технічних переваг, впровадження вітроенергетичних установок має значний економічний та екологічний ефект. Воно сприяє зниженню витрат на

електроенергію, зменшенню залежності від централізованих мереж та викопних видів палива, а також скороченню викидів парникових газів. Це відповідає сучасним світовим тенденціям декарбонізації енергетики та підвищення енергоефективності промислових систем.

Тому, розробка вітроенергетичної установки для забезпечення резервного живлення підприємства є актуальною задачею.

Мета роботи полягає у розробці вітроенергетичної установки для забезпечення резервного електропостачання підприємства з урахуванням його енергетичних потреб, режимів навантаження та умов експлуатації.

Завдання:

- ✓ виконати оцінку енергетичних потреб столярного цеху;
- ✓ провести аналіз економічного потенціалу вітру на території підприємства;
- ✓ здійснити вибір вітрогенератора.

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Вітроелектростанції

Вітроелектростанція (ВЕС) – це енергетичний комплекс, призначений для перетворення кінетичної енергії вітрового потоку в електричну енергію за допомогою вітроенергетичних установок. ВЕС є одним із ключових напрямів розвитку відновлюваної енергетики та широко використовується як у промислових масштабах, так і для локального енергозабезпечення.

Основним елементом вітроелектростанції є вітроенергетична установка (вітрогенератор), яка включає ротор (з лопатями), вал, редуктор (за наявності), електричний генератор, систему орієнтації, системи керування та захисту. Під дією вітру лопаті ротора обертаються, передаючи механічну енергію на генератор, де вона перетворюється в електричну. Далі електроенергія надходить у силову електроніку (перетворювачі частоти, випрямлячі, інвертори), після чого через трансформатор підвищується до рівня напруги електричної мережі.

Залежно від конструкції та принципу роботи вітроустановок, ВЕС можуть базуватися як на горизонтально-осьових, так і на вертикально-осьових вітротурбінах. Горизонтальні установки є найбільш поширеними завдяки високому коефіцієнту корисної дії, тоді як вертикальні – менш чутливі до напрямку вітру та краще працюють у турбулентних умовах, зокрема в міській забудові.

Вітроелектростанції поділяються за потужністю на:

- малі ВЕС – до десятків кіловат, використовуються для автономного живлення будинків, фермерських господарств або телекомунікаційного обладнання;
- середні ВЕС – сотні кіловат до кількох мегават, застосовуються для промислових і комунальних об'єктів;

- великі ВЕС (вітрові парки) – десятки і сотні мегават, що працюють паралельно з об'єднаною енергосистемою.

До складу сучасної ВЕС входять також системи моніторингу та автоматичного керування, які контролюють швидкість вітру, кут атаки лопатей, частоту обертання ротора, навантаження генератора та параметри електричної мережі. Це дозволяє оптимізувати виробництво електроенергії та забезпечувати безпечну експлуатацію обладнання.

Важливою складовою є трансформаторні підстанції та кабельні мережі, які забезпечують збір електроенергії від окремих турбін і її передачу в енергосистему. У великих ВЕС застосовуються також системи компенсації реактивної потужності та пристрої стабілізації напруги.

Перевагами вітроелектростанцій є використання відновлюваного джерела енергії, відсутність шкідливих викидів під час роботи, зменшення залежності від викопного палива, можливість швидкого розгортання потужностей та низькі експлуатаційні витрати після введення в експлуатацію. Також ВЕС можуть ефективно працювати у складі гібридних енергетичних систем разом із сонячними електростанціями та акумуляторними батареями.

До недоліків відносять залежність від вітрових умов, нерівномірність генерації електроенергії, необхідність резервних джерел потужності або систем накопичення енергії, а також значні початкові інвестиції у будівництво та інфраструктуру. Додатково слід враховувати вимоги до вибору майданчика, вплив на ландшафт і рівень шуму.

1.1.1 Малі ВЕС

Малі вітроелектростанції (малі ВЕС) – це вітроенергетичні установки невеликої потужності, призначені для автономного або локального електропостачання окремих споживачів: приватних будинків, фермерських господарств, невеликих підприємств, телекомунікаційних об'єктів та систем освітлення.

Зазвичай до малих ВЕС відносять установки потужністю до 10–100 кВт (у деяких класифікаціях – до 100–200 кВт). Вони можуть працювати як самостійно, так і у складі гібридних систем разом із сонячними електростанціями, акумуляторними батареями або дизель-генераторами.

Конструктивно малі ВЕС складаються з вітротурбіни (найчастіше з горизонтальною або вертикальною віссю обертання), щогли, генератора, контролера заряду, інвертора та системи акумулювання енергії. Отримана електроенергія може використовуватись безпосередньо або накопичуватись у батареях для подальшого споживання.

Основною перевагою малих ВЕС є можливість забезпечення енергетичної автономності об'єктів, особливо у віддалених або сільських районах, де підключення до централізованої мережі є складним або економічно не вигідним. Вони також сприяють зниженню витрат на електроенергію та підвищенню енергетичної безпеки споживача.

До недоліків належать залежність від вітрових умов, нерівномірність генерації електроенергії, необхідність накопичення або резервного джерела живлення, а також обмежена потужність порівняно з промисловими вітроелектростанціями.

Малі ВЕС є перспективним напрямом розвитку розподіленої енергетики, особливо у поєднанні з іншими відновлюваними джерелами енергії, що дозволяє створювати надійні гібридні енергетичні системи для автономного електропостачання [22].

На рисунку 1.1 показано загальний вигляд малих ВЕС: вітрогенератор з контролером SH-400s 400 Вт [1] та вертикальний вітрогенератор CNCEST 100 Вт [2].

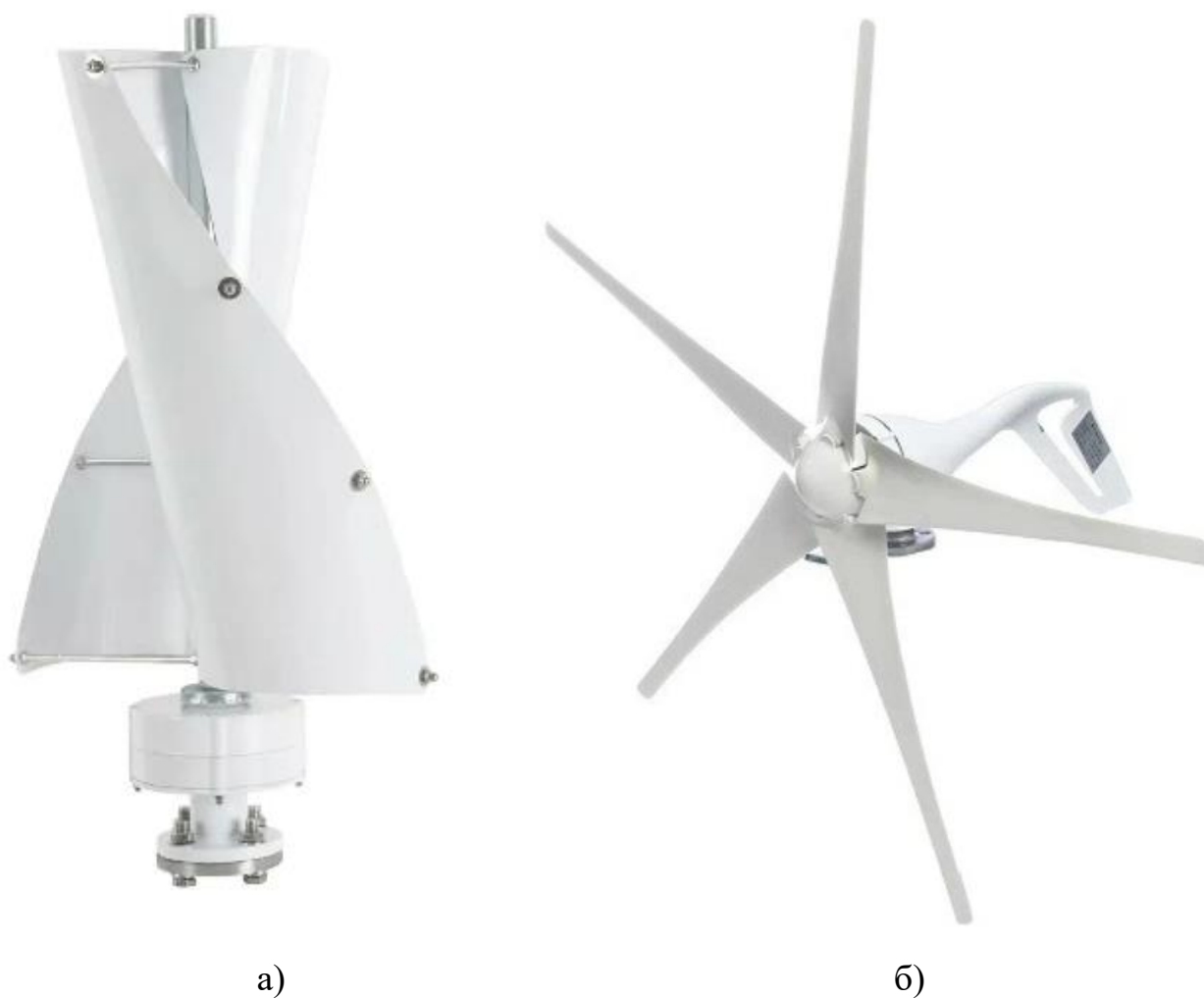


Рисунок 1.1 - загальний вигляд малих ВЕС

б) вітрогенератор з контролером SH-400s 400 Вт; а) вертикальний вітрогенератор CNCEST 100 Вт

1.1.2 Середні ВЕС

Середні ВЕС – це вітроенергетичні установки або комплекси середньої потужності, які займають проміжне положення між малими автономними системами та великими промисловими вітропарками [17, 18]. Вони призначені для забезпечення електроенергією невеликих населених пунктів, промислових підприємств, аграрних комплексів або окремих районів електромережі.

Зазвичай до середніх ВЕС відносять установки потужністю приблизно від 100 кВт до 1–10 МВт (залежно від класифікації). Такі станції можуть складатися

з кількох вітротурбін середньої або малої потужності, об'єднаних у єдину енергосистему з трансформаторною підстанцією та системами керування.

Конструктивно середні ВЕС включають вітроенергетичні установки (найчастіше з горизонтальною віссю обертання), щогли, генератори, перетворювальне обладнання, системи автоматичного керування, захисту та моніторингу, а також інфраструктуру для підключення до електричної мережі. Енергія, вироблена турбінами, зазвичай трансформується до середньої або високої напруги для передачі споживачам.

Основною перевагою середніх ВЕС є більш стабільна генерація електроенергії порівняно з малими установками, можливість живлення значних локальних навантажень та підключення до розподільчих електричних мереж. Вони також мають вищу ефективність використання вітрового ресурсу та кращі економічні показники на одиницю виробленої енергії.

До недоліків належать залежність від вітрових умов, необхідність резервування потужності в енергосистемі, значні початкові інвестиції та вимоги до площі розміщення. Крім того, потрібне ретельне проектування для мінімізації впливу на навколишнє середовище та електричну мережу.

Середні ВЕС є важливою складовою децентралізованої енергетики та часто використовуються як перехідний етап між локальними автономними системами та великими вітропарками промислового масштабу.

Прикладом середньої вітроелектростанції може служити Зборівська ВЕС [3]. ВЕС розміщена в Зборівському районі Тернопільської області. Введена в експлуатацію в 2018 році. Встановлена потужність 1,32 МВт. Середньорічна швидкість вітру – 6,49 м/с. Турбіна – Vestas, модель V47-0.66.

На рисунку 1.2 показано загальний вигляд середньої ВЕС [4].



Рисунок 1.2 - Загальний вигляд середньої ВЕС.

1.1.3 Великі ВЕС (вітропарки)

Великі вітроелектростанції (вітропарки) – це промислові енергетичні комплекси, що складаються з великої кількості потужних вітроенергетичних установок, об'єднаних для масового виробництва електроенергії та її подачі в об'єднану енергосистему.

Такі вітропарки зазвичай мають встановлену потужність від десятків до кількох сотень мегават і включають десятки або навіть сотні віротурбін. Кожна турбіна працює автономно, але всі вони інтегровані в єдину систему збору, перетворення та передачі електроенергії через підстанції високої напруги.

Конструктивно великі ВЕС складаються з віротурбін (найчастіше з горизонтальною віссю обертання), високих щогл, генераторів, силової електроніки, кабельних мереж середньої напруги, головної трансформаторної підстанції та системи диспетчеризації. Сучасні турбіни можуть мати одиничну потужність 3–15 МВт і більше.

За розташуванням великі вітропарки поділяються на:

- наземні – розміщені на суходолі;
- морські – встановлені у морських акваторіях, де вітрові умови більш стабільні та сильні.

Прикладами сучасних великих ВЕС є морські вітропарки Hornsea Wind Farm у Великій Британії [7] та Dogger Bank Wind Farm [10], які є одними з найбільших у світі за встановленою потужністю.

Перевагами великих ВЕС є висока ефективність виробництва електроенергії, низька собівартість кіловат-години, масштабованість та значний внесок у скорочення викидів CO₂. Вони є важливою частиною сучасної декарбонізованої енергетики.

До недоліків належать висока вартість будівництва, необхідність великих територій або морських акваторій, вплив на ландшафт і екосистеми, а також потреба у складній інфраструктурі передачі електроенергії.

Наведемо перелік найбільших вітрових електростанцій - топ-5 гігантів 2025 року [5]:

1. Найбільший наземний гігант – Китай – Gansu Wind Farm [6], 8 ГВт (рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 - Gansu Wind Farm, Китай.

2. Морський титан – Великобританія - Hornsea One [7], 1.2 ГВт (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 - Hornsea One, Великобританія.

3. Американська міць – США - Alta Wind Energy Center [8], 1.55 ГВт (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 - Alta Wind Energy Center, США.

4. Сила тропічних вітрів – Індія - Murrandal Wind Farm [9], 1.5 ГВт (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 - Murrandal Wind Farm, Індія.

5. Майбутнє вже тут – Великобританія - Dogger Bank Wind Farm [10], 3.6 ГВт (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 - Dogger Bank Wind Farm, Великобританія.

1.1.4 Горизонтально-осьові вітротурбіни

1.1.4.1 Однолопатеві ротори горизонтальної осі обертання

Однолопатеві ротори горизонтальної осі обертання є одним із найменш поширених типів вітроенергетичних установок. Їх конструкція передбачає наявність лише однієї робочої лопаті, яка закріплюється на маточині ротора. Для забезпечення динамічного балансування з протилежного боку встановлюється спеціальна противага, маса якої компенсує масу лопаті та зменшує вібрації під час обертання [21].

Основною перевагою однолопатевих роторів є зменшення витрат матеріалів на виготовлення лопатей, що потенційно дозволяє знизити вартість конструкції та спростити транспортування великогабаритних елементів. Крім того, менша площа ротора знижує аеродинамічний опір під час сильних вітрів. Завдяки меншій масі обертової системи можливе швидше реагування на зміну швидкості вітру.

Водночас такі ротори мають низку суттєвих недоліків. Незважаючи на використання противаги, повністю усунути нерівномірність навантажень та вібрації складно. Під час роботи виникають значні змінні механічні навантаження на вал, підшипники та конструкцію башти. Це призводить до прискореного зношування обладнання та підвищених вимог до його міцності. Крім того, однолопатеві ротори мають нижчу плавність обертання порівняно з дво- та трилопатевиими конструкціями.

З точки зору аеродинаміки однолопатеві ротори можуть досягати достатньо високих коефіцієнтів використання енергії вітру, проте складність забезпечення надійності та довговічності обмежує їх практичне застосування. У сучасній вітроенергетиці такі установки майже не використовуються і мають переважно експериментальний або дослідницький характер.

На рисунку 1.8 показано загальний вигляд однолопатевого ротора.



Рисунок 1.8 - Загальний вигляд однолопатевого ротора

1.1.4.2 Дволопатеві ротори горизонтальної осі обертання

Дволопатеві ротори горизонтальної осі обертання є одним із різновидів вітроенергетичних установок, у яких ротор складається з двох аеродинамічних лопатей, закріплених на маточині та розташованих симетрично відносно осі обертання. Як і в інших вітротурбінах горизонтального типу, вісь ротора розміщується паралельно напрямку вітрового потоку, а для підтримання оптимального положення використовується система орієнтації на вітер.

Порівняно з трилопатевиими конструкціями дволопатеві ротори мають меншу масу та потребують меншої кількості матеріалів для виготовлення. Це знижує вартість виробництва, транспортування та монтажу вітроустановки. Менша маса ротора також сприяє зменшенню навантажень на башту та фундамент, що є важливою перевагою для потужних вітроенергетичних установок великої висоти.

Для досягнення необхідної потужності дволопатеві ротори зазвичай працюють із вищою частотою обертання, ніж трилопатеві. Це дозволяє забезпечити достатню швидкість руху кінців лопатей та ефективне використання енергії вітру. Аеродинамічний принцип роботи базується на виникненні підйомної сили на профілі лопатей, завдяки чому створюється обертальний момент на валу генератора.

Разом із перевагами дволопатеві ротори мають певні недоліки. Основним з них є підвищений рівень вібрацій і змінних механічних навантажень порівняно з

трилопатовими роторами. Під час обертання виникають циклічні навантаження на лопаті, вал і опорні конструкції, що може негативно впливати на довговічність обладнання. Крім того, через більшу швидкість обертання збільшується рівень аеродинамічного шуму.

Для зменшення динамічних навантажень у багатьох дволопатових конструкціях застосовують шарнірне кріплення лопатей, яке дозволяє їм частково змінювати своє положення під дією вітру. Таке рішення підвищує надійність роботи установки та знижує вплив поривів вітру на елементи конструкції.

У сучасній вітроенергетиці дволопатові ротори використовуються значно рідше, ніж трилопатові, однак вони залишаються перспективними для окремих проєктів, де важливими є зниження маси та вартості обладнання. За сукупністю технічних та експлуатаційних характеристик вони займають проміжне положення між однолопатовими та трилопатовими роторами, поєднуючи відносно високу ефективність із помірною складністю конструкції.

На рисунку 1.9 показано загальний вигляд дволопатового ротора [11].



Рисунок 1.9 - Загальний вигляд дволопатового ротора.

1.1.4.3 Трилопатеві ротори горизонтальної осі обертання

Трилопатеві ротори горизонтальної осі обертання є найбільш поширеним типом роторів сучасних вітроенергетичних установок. Їх конструкція складається з трьох аеродинамічних лопатей, закріплених на маточині, яка з'єднана з валом генератора. Вісь обертання ротора розташована паралельно напрямку вітрового потоку, тому для ефективної роботи вітротурбіна оснащується системою орієнтації на вітер.

Застосування трьох лопатей забезпечує оптимальне поєднання енергетичної ефективності, механічної стійкості та плавності обертання [19]. Порівняно з одно- та дволопатевиими конструкціями, трилопатеві ротори створюють менші вібрації та навантаження на опорні елементи установки. Це сприяє збільшенню терміну служби підшипників, редуктора та інших механічних компонентів вітроустановки.

Аеродинамічний профіль лопатей розробляється таким чином, щоб максимально використовувати підйомну силу повітряного потоку [20]. При проходженні вітру навколо лопаті виникає різниця тисків між її поверхнями, що створює обертальний момент на валу ротора. Завдяки цьому кінетична енергія вітру перетворюється на механічну енергію обертання, яка далі перетворюється генератором на електричну енергію.

Сучасні трилопатеві ротори виготовляються переважно зі склопластику, вуглепластику та композитних матеріалів, що забезпечують високу міцність при невеликій масі. Довжина лопатей великих промислових вітротурбін може перевищувати 80–100 м, а діаметр ротора досягати понад 200 м. Збільшення діаметра ротора дозволяє охопити більшу площу вітрового потоку та підвищити виробіток електроенергії.

Основними перевагами трилопатевих роторів є високий коефіцієнт використання енергії вітру, низький рівень шуму, стабільність роботи та добра динамічна врівноваженість. Саме тому переважна більшість сучасних вітроелектростанцій використовує трилопатеві ротори горизонтальної осі

обертання як найбільш ефективне та надійне технічне рішення для перетворення енергії вітру в електричну енергію.

На рисунку 1.10 показано загальний вигляд трилопатевого ротора [12].



Рисунок 1.10 - Загальний вигляд трилопатевого ротора.

1.1.4.4 Багатолопатеві ротори горизонтальної осі обертання.

Багатолопатеві ротори горизонтальної осі обертання являють собою вітроколеса, які мають більше трьох лопатей, зазвичай від 6 до 24 і більше. Такі конструкції широко використовувалися на ранніх етапах розвитку вітроенергетики та досі застосовуються для виконання механічної роботи, зокрема для приводу водяних насосів, млинів та інших сільськогосподарських механізмів. Вісь обертання ротора розташовується паралельно напрямку вітру, а лопаті рівномірно розміщуються по колу для забезпечення плавного обертання.

Головною особливістю багатолопатевих роторів є високий пусковий момент. Завдяки великій кількості лопатей вони здатні починати обертання навіть за невеликих швидкостей вітру, що робить їх ефективними в районах зі слабкими вітровими ресурсами. Велика площа поверхні, яка взаємодіє з повітряним

поток, забезпечує значну силу обертання на валу вже на початкових режимах роботи.

Разом із тим збільшення кількості лопатей призводить до зростання аеродинамічного опору. Частина лопатей рухається в зоні турбулентності, створеній сусідніми лопатями, що знижує коефіцієнт використання енергії вітру та обмежує швидкість обертання ротора. Через це багатолопатеві конструкції працюють переважно на низьких обертах і мають меншу ефективність виробництва електроенергії порівняно з сучасними трилопатевиими роторами.

Конструктивно багатолопатеві ротори характеризуються більшою масою та складністю виготовлення. Збільшення кількості лопатей підвищує навантаження на маточину, вал і опорні елементи вітроустановки. Водночас такі ротори забезпечують дуже плавне обертання та рівномірний розподіл механічних навантажень, що позитивно впливає на роботу механічних приводів.

У сучасній вітроенергетиці багатолопатеві ротори практично не використовуються для виробництва електроенергії великої потужності, оскільки поступаються трилопатевиим конструкціям за ефективністю та економічністю. Проте вони залишаються актуальними для автономних механічних систем, водопідйомних установок і невеликих вітроагрегатів, де визначальними факторами є високий пусковий момент, простота експлуатації та здатність працювати за низьких швидкостей вітру.

На рисунку 1.11 показано загальний вигляд багатолопатевого ротора.



Рисунок 1.11 - Загальний вигляд багатолопатевого ротора.

1.1.5 Вертикально-осьові вітротурбіни

1.1.5.1 Ротор Савоніуса

Ротор Савоніуса – це різновид вертикально-осьового ротора, який працює за принципом використання сили аеродинамічного опору. Він був розроблений фінським інженером Sigurd Savonius у 1922 році. Конструкція ротора є однією з найпростіших серед усіх типів вітродвигунів і широко застосовується в малих вітроенергетичних установках.

Основу ротора становлять дві або більше напівциліндричні лопаті, закріплені на вертикальному валу. Лопаті розташовуються таким чином, щоб утворювати S-подібний переріз. Під дією вітрового потоку на увігнуту поверхню лопаті створюється більша сила тиску, ніж на опуклу поверхню протилежної лопаті. У результаті виникає різниця сил, яка створює обертальний момент і забезпечує обертання ротора.

Головною перевагою ротора Савоніуса є його здатність самостійно запускатися навіть за низьких швидкостей вітру (2–3 м/с). Він не потребує системи орієнтації на вітер, має просту конструкцію, високу механічну міцність та невеликі вимоги до технічного обслуговування. Завдяки цьому ротори Савоніуса часто використовуються для автономного електропостачання невеликих об'єктів, вентиляційних систем, насосних установок та метеорологічних приладів.

До недоліків ротора належать порівняно низький коефіцієнт використання енергії вітру (зазвичай 0,15–0,25), невисока швидкохідність і значні пульсації крутного моменту під час роботи. Через це установки з ротором Савоніуса мають меншу ефективність порівняно з аеродинамічними роторами типу Дар'є та сучасними трилопатеvimи вітротурбінами з горизонтальною віссю обертання.

Незважаючи на відносно невисокий ККД, ротор Савоніуса залишається перспективним рішенням для малопотужних вітроенергетичних систем, особливо в умовах змінного та турбулентного вітрового потоку, де його надійність і

простота конструкції є важливішими за максимальну ефективність перетворення енергії вітру.

На рисунку 1.12 показано загальний вигляд ротора Савоніуса, об'єднаного з турбіною Дар'є [13, 16].



Рисунок 1.12 - Загальний вигляд ротора Савоніуса, об'єднаного з турбіною Дар'є

1.1.5.2 Ротор Дар'є

Ротор Дар'є – це аеродинамічний ротор вертикально-осьового вітрогенератора, який працює за рахунок підйомної сили, що виникає на профільованих лопатях під час їх руху в повітряному потоці. Він був розроблений французьким інженером Georges Darrieus та запатентований у 1931 році. Завдяки використанню підйомної сили ротор Дар'є має значно вищу ефективність порівняно з ротором Савоніуса.

Конструктивно ротор складається з двох або трьох вигнутих або прямих аеродинамічних лопатей, закріплених на вертикальному валу. Класична конструкція має характерну форму, що нагадує збивач для яєць, хоча сьогодні широко використовуються також Н-подібні ротори з прямими лопатями. Під час проходження повітряного потоку на лопатях виникає підйомна сила, складова якої створює обертальний момент і забезпечує обертання ротора.

Основною перевагою ротора Дар'є є високий коефіцієнт використання енергії вітру, який може досягати 0,35–0,45. Такі установки характеризуються високою швидкохідністю, меншою масою лопатей та кращими енергетичними показниками порівняно з роторами, що працюють на основі сили опору. Крім того, вони не потребують системи орієнтації на напрямок вітру та можуть працювати при змінних повітряних потоках.

Недоліком ротора Дар'є є низький пусковий момент. Більшість таких турбін не здатні самостійно запускатися за малих швидкостей вітру і потребують допоміжного пускового пристрою або комбінування з ротором Савоніуса. Також під час роботи лопаті зазнають значних циклічних механічних навантажень, що висуває підвищені вимоги до їхньої міцності та довговічності.

Завдяки високій ефективності ротори Дар'є застосовуються у вітроенергетичних установках малої та середньої потужності, особливо в умовах обмеженого простору або складних напрямків вітрових потоків. Вони є перспективним рішенням для автономних і гібридних систем електропостачання, де важливими є компактність, надійність та ефективне використання енергії вітру.

На рисунку 1.13 показано загальний вигляд ротора Дар'є [14].



Рисунок 1.13 - загальний вигляд ротора Дар'є.

1.1.5.3 Гелікоїдний ротор.

Гелікоїдний ротор є удосконаленим різновидом ротора Дар'є з вертикальною віссю обертання, у якому лопаті мають гвинтоподібну (спіральну) форму. Така конструкція була розроблена для усунення основних недоліків класичного ротора Дар'є, зокрема нерівномірності крутного моменту та значних вібрацій під час роботи.

Конструктивно ротор складається з двох або трьох аеродинамічних лопатей, закріплених на вертикальному валу та закручених уздовж його висоти на певний кут, зазвичай від 60° до 180° . Завдяки такій геометрії різні ділянки лопаті взаємодіють із вітровим потоком у різні моменти часу, що забезпечує більш плавне створення обертального моменту протягом усього циклу обертання.

Принцип роботи гелікоїдного ротора базується на використанні підйомної сили, яка виникає на аеродинамічному профілі лопаті під час її руху відносно повітряного потоку. Енергія вітру перетворюється на механічну енергію обертання вала, яка далі передається генератору для виробництва електроенергії. Завдяки спіральній формі лопатей навантаження розподіляються більш рівномірно, що підвищує стабільність роботи установки.

Основними перевагами гелікоїдного ротора є рівномірний крутний момент, зменшений рівень вібрацій та шуму, покращені умови запуску і підвищена довговічність конструкції. Крім того, такі ротори можуть ефективно працювати за турбулентних повітряних потоків і не потребують системи орієнтації на напрямок вітру. Коефіцієнт використання енергії вітру для таких установок може досягати 0,35–0,45.

До недоліків належать складніша технологія виготовлення спіральних лопатей, вища вартість конструкції та підвищені вимоги до точності монтажу. Незважаючи на це, гелікоїдні ротори все частіше застосовуються у малих та середніх вітроенергетичних установках, особливо в умовах міської забудови, на дахах будівель та в автономних системах електропостачання, де важливими є низький рівень шуму, компактність і стабільність роботи.

На рисунку 1.14 показано загальний вигляд гелікоїдного ротора [15, 16].



Рисунок 1.14 - Загальний вигляд гелікоїдного ротора.

1.1.5.4 Багатолопатовий вертикальний ротор

Багатолопатовий вертикальний ротор – це тип вертикально-осьового вітродвигуна, який має велику кількість робочих елементів (лопатею або чашок), розміщених рівномірно навколо вертикального валу. Така конструкція забезпечує підвищений пусковий момент і стабільну роботу при слабких та нестабільних вітрових потоках.

Конструктивно ротор складається з вертикального валу, верхнього та нижнього опорних дисків або рами, великої кількості лопатею (зазвичай від 6 до 20 і більше), а також підшипникових вузлів і з'єднання з генератором або робочим механізмом. Лопаті можуть мати форму плоских пластин, напівциліндрів або простих аеродинамічних елементів.

Принцип роботи базується переважно на використанні сили аеродинамічного опору. Під дією вітру на одну сторону лопатею виникає більший тиск, ніж на іншу, що створює різницю сил і забезпечує обертальний момент. Завдяки великій кількості лопатею ротор легко запускається навіть при низькій швидкості вітру та не потребує орієнтації на його напрямок.

До основних переваг багатолопатового вертикального ротора належать високий пусковий момент, простота конструкції, надійність роботи та здатність функціонувати в умовах турбулентного вітру. Недоліками є низький коефіцієнт корисної дії, обмежена швидкохідність та значні аеродинамічні втрати через велику площу опору.

Такі ротори найчастіше застосовуються у малопотужних автономних вітроустановках, системах освітлення, вентиляції та насосних установках, де важливішою є стабільність запуску і роботи, ніж максимальна ефективність перетворення енергії вітру.

На рисунку 1.15 показано загальний вигляд багатолопатового вертикального ротору [15, 16].



Рисунок 1.15 - Загальний вигляд багатолопатевого вертикального ротору.

1.2 Постановка завдань

1. Виконати оцінку енергетичних потреб столярного цеху;
2. Провести аналіз економічного потенціалу вітру на території підприємства;
3. Здійснити вибір вітрогенератора.

2 РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір об'єкту альтернативного електропостачання.

2.1.1 Вибір об'єкту

Вибір вітроустановки проводимо відносно допоміжного виробництва, цим самим мінімізуючи ризики зупинки масового виробництва.

Як об'єкт альтернативного електропостачання використовуватимемо столярний промислового підприємства.

План-схема цеху показана в графічній частині роботи.

У столярному цеху присутні наступні електричні прилади:

Верстат столярний – 1 од.;

Прес для склеювання дощок – 1 од.;

Клеємішалка – 1 од.;

Точило наждачне – 1 од.;

Настільний свердлильний верстат – 1 од.;

Універсальний фрезерний верстат – 1 од.;

Токарний верстат – 2 од.;

Свердлильний верстат – 1 од.;

Стрічкова пилка – 1 од.;

Шипорізний верстат – 1 од.;

Верстат паяння пилок – 1 од.;

Заточувальний верстат – 1 од.;

Пиля педальна – 1 од.;

Циркулярна пилка – 2 од.;

Торцювальний верстат – 1 од.;

Поздовжньо розпилювальний верстат – 1 од.;

Прорізний верстат – 1 од.

Відомі номінальні потужності і режими роботи всіх згаданих пристроїв.

2.1.2 Розрахунок споживаної потужності

В табл. 2.1 представимо відомості функціонування електричних приймачів і величину споживаної потужності.

Потужність, яка споживається електричним обладнанням у ранковий час та складає:

$$P_{нік} = 64900 \text{ Вт} .$$

Потужність інвертора, який входить в склад установки:

$$P_{інвер} > 64900 \text{ Вт} .$$

Отже, приймаємо:

$$P_{інвер} = 65 \text{ кВт} .$$

Знаходимо добове енергоспоживання.

Дані представимо у вигляді таблиці 2.2.

Таблиця 2.1 – Проведення розрахунку пікового значення потужності

Електричний прилад	Встановлена потужність P_i , <i>Вт</i>	Потужність споживання, <i>Вт</i>			
		Ранок	День	Вечір	Ніч
Верстат столярний	400,0	400,0	0,0	400,0	0,0
Прес склеювання дощок	1500,0	1500,0	0,0	1500,0	0,0
Клеємішалка	2500,0	0,0	0,0	0,0	2500,0
Точило наждачне	6600,0	6600,0	0,0	6600,0	0,0
Настільно- свердлильний верстат	1300,0	1300,0	0,0	1300,0	0,0
Універсал-фрезерний верстат	11000,0	11000,0	0,0	11000,0	0,0
Токарний верстат	4700,0	4700,0	0,0	0,0	0,0
Токарний верстат	2700,0	2700,0	2700,0	2700,0	2700,0
Свердлильний верстат	5000,0	0,0	5000,0	0,0	0,0
Стрічкова пила	4500,0	4500,0	0,0	4500,0	0,0
Шипорізний верстат	4500,0	4500,0	0,0	4500,0	0,0
Верстат паяння пилок	3000,0	0,0	0,0	3000,0	0,0
Пило-заточувальний верстат	1000,0	1000,0	1000,0	1000,0	0,0
Пила педальна	3500,0	0,0	0,0	0,0	3500,0
Циркулярна пилка	10000,0	10000,0	10000,0	10000,0	10000,0
Циркулярна пилка	7000,0	7000,0	7000,0	7000,0	7000,0
Торцювальний верстат	9700,0	9700,0	0,0	9700,0	0,0
Поздовжньо - розпилювальний верстат	11600,0	0,0	0,0	0,0	11600,0
Прорізний верстат	33200,0	0,0	33200,0	0,0	0,0
Разом $P_{піку}$:	123700,0	64900,0	35400,0	63200,0	37300,0

Таблиця 2.2 – Обчислення споживаної електричної енергії за добу.

Електричний прилад	Встановлена потужність $P_i, \text{Вт}$	Потужність споживання, Вт				Електрична енергія споживана, $\text{Вт}\cdot\text{год}$
		Ранок, 2 год.	День, 10 год.	Вечір, 5 год.	Ніч, 7 год.	
Верстат столярний	400,0	200,0	0,0	2000,0	0,0	2200,0
Прес склеювання дощок	1500,0	500,0	0,0	900,0	0,0	1400,0
Клеємішалка	2500,0	0,0	0,0	0,0	2000,0	4000,0
Точило наждачне	6600,0	5500,0	0,0	6100,0	0,0	11600,0
Настільно- свердлильний верстат	1300,0	1000,0	0,0	1050,0	0,0	2050,0
Універсально- фрезерний верстат	11000,0	10000,0	0,0	5000,0	0,0	15000,0
Токарний верстат	4700,0	2300,0	0,0	0,0	0,0	2300,0
Токарний верстат	2700,0	4300,0	2600,0	4500,0	1300,0	12700,0
Свердлильний верстат	5000,0	4000,0	0,0	4500,0	0,0	8500,0
Стрічкова пила	4500,0	4000,0	0,0	3750,0	0,0	7750,0
Шипорізний верстат	4500,0	500,0	0,0	4000,0	0,0	4500,0
Верстат паяння пилوک	3000,0	500,0	0,0	2500,0	0,0	3000,0

Продовження таблиці 2.2

Електричний прилад	Встановлена потужність $P_i, \text{Вт}$	Потужність споживання, Вт				Електрична енергія споживана, $\text{Вт}\cdot\text{год}$
		Ранок, 2 год.	День, 10 год.	Вечір, 5 год.	Ніч, 7 год.	
Пило-заточувальний верстат	1000,0	0,0	0,0	0,0	1000,0	1000,0
Пила педальна	3500,0	1600,0	1600,0	1600,0	1600,0	6400,0
Циркулярна пилка	10000,0	6000,0	8000,0	7600,0	9800,0	31400,0
Циркулярна пилка	7000,0	4370,0	5800,0	6950,0	5000,0	22120,0
Торцювальний верстат	9700,0	8000,0	0,0	9500,0	0,0	17500,0
Поздовжньо-розпилювальний верстат	11600,0	600,0	0,0	1000,0	11500,0	13100,0
Прорізний верстат	33200,0	0,0	33000,0	0,0	0,0	33200,0
Разом:	123700,0	53370,0	51000,0	60950,0	32200,0	357720,0

Кількість енергії, яка споживається столярним цехом в добу:

$$E_{\text{доб}} = 357720 \text{ Вт}\cdot\text{год}.$$

Кількість енергії, яка споживається столярним цехом за год.:

$$E_{\text{год}} = \frac{E_{\text{доб}}}{24} = \frac{357720}{24} = 14905 \text{ Вт}\cdot\text{год}.$$

Потужність, що має розвивати установка:

$$P_{\text{спец}} = \frac{E_{\text{год}}}{1} = \frac{14905}{1} = 14905 \text{ Вт}.$$

2.2 Висновки до Розділу 2

Визначено наступні параметри, за якими вибиратиметься ВЕУ:

Пікова потужність столярного цеху;

Кількість електроенергії, яка споживається столярним цехом за добу;

Номінальна потужність.

Значення пікової добової потужності столярного цеху становить $P_g = 64900 \text{ Вт}$.

Потужність інвертору $P_i = 65 \text{ кВт}$.

Кількість електроенергії, яка споживається столярним цехом за добу, складає $E_{\text{доб}} = 357720 \text{ Вт} \cdot \text{год}$. Потрібно орієнтуватись на це значення при виборі комплектуючого обладнання ВЕУ та розрахунку ємності АБ.

3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Параметри ВЕУ.

Для розрахунку використовується швидкість вітру, отримана через спостереження, які є зареєстрованими через проміжки часу. Це може бути один день, один місяць, один рік чи десять років.

$$V_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i,$$

n – к-сть інтервалів вимірів.

Середня річна швидкість вітру $6-7,5 \text{ м/с}$.

Коефіцієнт варіації:

$$C_V = \frac{S_V}{V_{CP}}.$$

Представимо розу вітрів (графічна частина кваліфікаційної роботи).

Дані характеристики дають змогу оптимізувати вибір ВЕ обладнання та на далі інтегрувати дане обладнання у систему електропостачання промислового підприємства.

3.2 Вибір вітрогенератора.

ВЕУ можна використовувати для економії коштів, для основного живлення, або резервного живлення.

ВЕУ може входити в склад комплексу із генератором (дизель чи бензин), СЕС, електричною мережею центрального постачання. В систему також можуть входити акумуляторні батареї.

Залежність між швидкістю вітру та електричною потужністю, яка виробляється вітрогенератором:

$$P_{el} = \xi \cdot 0,5 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \rho \cdot V_{cp}^3 \cdot \eta$$

$$\rho = 1,2041 \text{ кг/м}^3;$$

$$\eta = 0,7 - 0,9 .$$

Знайдемо середню річну швидкість вітру. Для цього використаємо шкали Бофорта та дані, які отримані шляхом спостереження (графічна частина кваліфікаційної роботи).

Отже:

$$V_{cp} = 6 \text{ м/с} .$$

Для електропостачання вибираємо ВЕУ типу WH6.4-5000. В графічній частині кваліфікаційної роботи показано потужну характеристику вибраної вітрової установки.

Вітрогенератор тип WH6.4-5000 має номінальною потужністю, яка складає 5000 Вт. Функціонує за початкової швидкості вітру, яка складає 2,5 м/с. За середньої річної швидкості вітру, що складає 6 м/с, потужність, яка виробляється, становить близько 10 кВт. Для того щоб згенерувати потужності, яка складає 14,905 кВт потрібно не менше два «вітряки»:

$$2 \cdot 10000 \geq 14905 \text{ Вт} .$$

Вітрогенератори Weswen [] можуть генерувати набагато більше електроенергії, аніж конкурентні моделі. Коефіцієнт корисної дії генератора складає більше як 80%. В моделі WH4.6-5000W економічно обґрунтовано застосування інтелектуальної системи керування Siemens PLC, що реалізує функцію самозахисту, моніторингу. Важливою частиною монтажу є прокладання.

3.3 Додаткове обладнання ВЕУ

Для забезпечення надійної та безперебійної роботи вітроенергетичної установки (ВЕУ) до її складу входить ряд допоміжних пристроїв, які забезпечують накопичення, перетворення, стабілізацію та автоматичний розподіл електричної енергії.

Акумуляторні батареї призначені для накопичення електричної енергії, виробленої вітрогенератором, та її подальшого використання у періоди відсутності або недостатності вітру. Вони забезпечують безперервність

електропостачання споживачів, згладжують коливання потужності генератора та підвищують загальну ефективність роботи автономної енергосистеми. Найчастіше використовуються свинцево-кислотні, AGM, гелеві або літій-іонні акумулятори.

Стартерні акумуляторні батареї застосовуються у вітроенергетичних установках для забезпечення запуску допоміжних систем керування, приводу орієнтації ротора, систем аварійного гальмування та іншого обладнання. Вони здатні короткочасно віддавати великі струми, необхідні для запуску електродвигунів та виконавчих механізмів. У невеликих ВЕУ можуть використовуватися стандартні автомобільні стартерні акумулятори.

Гелеві акумулятори є різновидом свинцево-кислотних батарей, у яких електроліт знаходиться у вигляді гелю. Вони характеризуються високою надійністю, тривалим терміном служби, низьким саморозрядом та стійкістю до глибоких циклів заряду-розряду. Завдяки герметичній конструкції такі батареї не потребують обслуговування та можуть експлуатуватися у широкому діапазоні температур. Саме тому вони широко застосовуються в автономних вітроенергетичних системах.

Стабілізатор напруги призначений для підтримання постійного рівня вихідної напруги при зміні навантаження та швидкості вітру. Його використання дозволяє захистити електроприлади від перенапруг, просідань напруги та інших відхилень параметрів електроенергії. Особливо важливим являється застосування стабілізаторів у системах з чутливою електронною технікою та автоматизованими системами керування.

Пристрій автоматичного введення резерву (АВР) забезпечує автоматичне переключення споживачів між основним та резервним джерелами живлення. У вітроенергетичних системах АВР використовується для переходу на живлення від акумуляторів, дизель-генератора або централізованої електромережі у випадку недостатньої генерації електроенергії вітротурбіною. Це дозволяє забезпечити безперервність електропостачання відповідальних споживачів без участі оператора.

Випрямляч служить для перетворення змінного струму, що виробляється генератором вітроустановки, у постійний струм. Отримана постійна напруга використовується для заряджання акумуляторних батарей або подальшого перетворення в інверторі. Випрямляч є невід'ємним елементом більшості автономних вітроенергетичних систем, особливо тих, що оснащені акумуляторними накопичувачами енергії.

Призначення інвертора - перетворення постійного струму від акумуляторних батарей або випрямляча у змінний струм стандартної напруги 220 В та частоти 50 Гц. Він забезпечує можливість живлення побутових та промислових електроприладів від автономної вітроенергетичної установки. Сучасні інвертори також виконують функції моніторингу, захисту від перевантажень, коротких замикань і контролю режимів роботи системи.

Застосування акумуляторних батарей, випрямлячів, інверторів, стабілізаторів напруги та пристроїв автоматичного введення резерву дозволяє значно підвищити ефективність, надійність і безпеку роботи вітроенергетичної установки. Комплексне використання цього обладнання забезпечує стабільне електропостачання споживачів незалежно від змін швидкості вітру та режимів роботи генератора.

3.4 Монтаж вітрогенератора

Монтаж вітрогенератора є одним із найвідповідальніших етапів створення вітроенергетичної установки, від якого залежить надійність, безпека та ефективність її подальшої експлуатації. Процес монтажу включає підготовку майданчика, встановлення фундаменту, монтаж щогли, генератора, ротора, електротехнічного обладнання та виконання пусконаладжувальних робіт.

На першому етапі здійснюється вибір місця встановлення вітрогенератора. Майданчик повинен знаходитися на відкритій території з достатнім вітровим потенціалом та мінімальною кількістю природних і штучних перешкод, які можуть створювати турбулентність повітряних потоків (графічна частина

кваліфікаційної роботи). Відстань до будівель, дерев та інших об'єктів повинна забезпечувати безпечну експлуатацію установки та зручність її обслуговування.

Після підготовки майданчика виконується спорудження фундаменту. Для невеликих вітроустановок використовуються монолітні залізобетонні основи або анкерні системи кріплення. Фундамент повинен витримувати статичні та динамічні навантаження, які виникають при роботі вітротурбіни та дії сильних вітрів.

Наступним етапом є встановлення щогли або башти. Залежно від конструкції вітроустановки застосовуються трубчасті, ґратчасті або відкидні щогли. Монтаж здійснюється із застосуванням підйомних механізмів, автокранів або лебідок. Особлива увага приділяється вертикальності конструкції та надійності кріплення розтяжок і анкерних елементів.

Після монтажу щогли виконується встановлення генератора, ротора та лопатей. Усі механічні вузли повинні бути ретельно відцентровані та збалансовані для запобігання надмірним вібраціям під час роботи. Під час монтажу лопатей необхідно забезпечити однакові кути встановлення та надійне кріплення відповідно до вимог виробника.

Важливою частиною монтажу є прокладання електричних кабелів та встановлення допоміжного обладнання. До складу електричної системи можуть входити контролер заряду, випрямляч, акумуляторні батареї, інвертор, стабілізатор напруги та пристрій автоматичного введення резерву.

Після завершення монтажних робіт проводяться електричні вимірювання та перевірка працездатності системи. Контролюється якість ізоляції кабелів, правильність електричних з'єднань, функціонування захисних пристроїв, систем гальмування та керування. Далі виконуються пусконаладжувальні роботи та пробний запуск установки в різних режимах роботи.

Під час монтажу вітрогенератора необхідно суворо дотримуватися вимог охорони праці та техніки безпеки. Основними небезпечними факторами є роботи на висоті, підйом важких конструкцій, можливість ураження електричним струмом та несприятливі погодні умови. Монтажні роботи мають виконуватися

кваліфікованим персоналом із використанням засобів індивідуального захисту та спеціалізованого обладнання.

3.5 Загальні правила безпеки під час монтажу вітроенергетичної установки

Монтаж вітроенергетичної установки належить до робіт підвищеної небезпеки, оскільки пов'язаний із виконанням висотних робіт, переміщенням великогабаритних конструкцій, використанням вантажопідіймальних механізмів та електромонтажними операціями. Дотримання вимог безпеки є обов'язковою умовою запобігання виробничому травматизму та аварійним ситуаціям.

До виконання монтажних робіт допускаються особи, які пройшли медичний огляд, спеціальне навчання, інструктаж з охорони праці та мають відповідну кваліфікацію для виконання робіт на висоті й електромонтажних робіт. Усі працівники повинні бути забезпечені необхідними засобами індивідуального захисту: захисними касками, рукавицями, спецодягом, захисним взуттям, страхувальними поясами та запобіжними канатами.

Перед початком монтажу необхідно провести огляд території, перевірити стан фундаменту, під'їзних шляхів, монтажного обладнання та вантажопідіймальних механізмів. Робоча зона повинна бути огорожена та позначена попереджувальними знаками безпеки. Перебування сторонніх осіб у зоні виконання робіт забороняється.

Особливу увагу слід приділяти роботам на висоті під час монтажу щогли або башти вітрогенератора. Працівники повинні використовувати сертифіковані страхувальні системи та надійно закріплюватися до елементів конструкції. Роботи на висоті дозволяється виконувати лише при сприятливих погодніх умов. Під час сильного вітру, грози, ожеледиці, тумані або інтенсивних опадах монтажні роботи необхідно припинити.

Під час підйому та встановлення елементів вітроустановки необхідно використовувати справні крани, лебідки та стропи, які пройшли технічний огляд.

Забороняється перебування людей під піднятим вантажем, а також виконання робіт у зоні можливого падіння конструкцій або інструменту. Підйом і переміщення обладнання повинні здійснюватися відповідно до затвердженої технологічної карти монтажу.

Під час виконання електромонтажних робіт необхідно забезпечити відсутність напруги на електрообладнанні, використовуючи блокування, заземлення та попереджувальні плакати. Усі електроінструменти повинні мати справну ізоляцію та захисне заземлення. Підключення генератора, інвертора, акумуляторних батарей та інших елементів електричної системи повинно виконуватися відповідно до вимог нормативної документації.

Особливу небезпеку становлять акумуляторні батареї, які можуть бути джерелом коротких замикань, опіків електролітом або вибуху газоповітряної суміші. При роботі із акумуляторами необхідно використовувати захисні окуляри та рукавички, забезпечувати вентиляцію приміщення та не допускати утворення відкритого вогню або іскор поблизу місця встановлення батарей.

Після завершення монтажу проводиться комплексна перевірка механічних кріплень, електричних з'єднань, систем захисту, заземлення та блискавкозахисту. Перед введенням вітроенергетичної установки в експлуатацію необхідно виконати пробний запуск і переконатися у відсутності вібрацій, сторонніх шумів та інших ознак несправності.

3.6 Знаходження технічних характеристик.

У табл. 3.1 наведено технічних характеристики вітрогенератору.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики вітрогенератору.

Номінальна потужність, Вт	5000,0 Вт
Максимальна вихідна потужність, Вт	7500,0 Вт
Зарядна напруга, В	Постійний струм 180,0 В
Вихідна напруга, В	Змінний струм 180,0 В
Лопаті / кількість	3,0
Матеріал лопаті	Армований скловолокном пластик
Лопаті несучого гвинта діаметра, м	6.4 м
Початкова швидкість вітру, м/с	2.5 м/с
Номінальна швидкість вітру, м/с	10,0 м/с
Номінальна швидкість обертання	240,0
Регулювання швидкості (захист)	Механічна + ручна
Коефіцієнт використання енергії вітру, %	40,0 %
Вихід генератора	Трифазний змінний струм
Частота виходу напруги, Гц	0-360,0 Гц
Розрахунковий струм, А	20,0 А
Максимальний струм (короткий час), А	32,0 А
Рівень шуму (при швидкості вітру 5 м/с), дБ	34,0 дБ
Ефективність перетворення генератора, %	80,0 %
Тип та вага генератора	Трифазний генератор на постійних магнітах, вага 147,0 кг
Вільно стояча щогла - діаметр	Ø495· Ø185 / 2,0 шт.
Висота щогли, м	12,0 м
Рекомендовані батареї, А·год	400,0/600,0 А·год
Гарантія	Від 12 місяців до 5 років

Знайдемо площу перерізу щогли $S_{щ}$:

$$S_{щ} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 1,85^2}{4} = 2,7 \text{ м}^2.$$

Знайдемо площу, що займає розтяжка S_p :

$$S_p = 2 \cdot h \cdot \sin(\Omega) = 2 \cdot 12 \cdot 0,5 = 12 \text{ м}.$$

Площа під встановлення розтяжок (графічна частина кваліфікаційної роботи):

$$S_p = S_{кв} = L_{кв}^2 = \frac{S_{кол}}{\pi \cdot 4 \cdot 0,5} = \frac{D_p^2}{2} = \frac{12^2}{2} = 72 \text{ м}^2.$$

Сума значень складає 74.7 м².

Для розташування ВЕС біля даного підприємства, яка складається із двох «вітряків», потрібно 149.4 м².

Встановлюємо альтернативне електропостачання на даху промислового підприємства, цим самим створюємо умови для виробництва електричної енергії столярного цеха. Місце забезпечує зниження рівня шуму ВЕУ близько 45 дБ.

3.7 Аеродинамічні параметри вітроенергетичної установки.

Зв'язок електричної потужності ВЕУ із аеродинамічною:

$$P_e = \xi \cdot P_A, \text{ Вт}$$

Реальне значення ξ горизонтально-осьових установок міняється не більше 0,25...0,4. Максимально можливе значення, яке знаходиться шляхом розрахунку за Жуковським-Бетц та рівне $\xi_{ж} = 0,593$.

Аеродинамічна потужність:

$$P_A = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot v \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot S \cdot v \cdot v^2}{2} = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}, \text{ Вт},$$

Площа, що омітається вітром:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \text{ м}^2,$$

Знайдемо ідеальну аеродинамічна потужність за ідеального коефіцієнту використання вітру:

$$P_A = \frac{P_e}{\zeta_{\text{ж}}} = \frac{5000}{0,593} = 8432, \text{ Вт}.$$

Площа ротора:

$$S = \frac{2 \cdot P_A}{\rho \cdot v^3} = \frac{2 \cdot 8432}{1,20 \cdot 10^3} = 14 \text{ м}^2.$$

Реальна площа:

$$S_{\text{реал}} = S \cdot 1,33 = 18,6 \text{ м}^2.$$

Знайдемо діаметр ротора:

$$D = \frac{\sqrt{4 \cdot S}}{\pi} = 4,9 \text{ м}.$$

Знайдемо зовнішній діаметр колеса:

$$D_{\text{розр}} = \frac{\sqrt{8 \cdot N}}{C_p \rho V^3 \pi \eta_e \eta_{\text{мех}}} = 3,63 \text{ м}.$$

де C_p - коефіцієнт в робочій точці, $C_p = 0,4$.

Заокруглюємо значення до $D_{\text{розр}} = 4 \text{ м}$.

Радіус вітроколеса - $R = 2 \text{ м}$.

Отже, вітроенергетична установка має характеристики:

- аеродинамічна потужність $P_A = 8432 \text{ Вт}$;
- площа вітроколеса $S = 18,6 \text{ м}^2$;
- діаметр ротора $D = 4,9 \text{ м}$.
- зовнішній діаметр $D_{\text{розр}} = 4 \text{ м}$.

Перше рівняння методики:

$$i_n b C_{y_a} = \frac{8 \pi r e}{(1+e)(1-e)^2 (z_u + \mu_a) \sqrt{1+z_u^2}}.$$

Друге рівняння:

$$Z = Z_u (1-e) - \frac{e}{1+e} \cdot \frac{1 - \mu_a \cdot z_u}{z_u + \mu_a}.$$

Дані рівняння являються базою для розрахунку вітроколеса.

3.8 Результат розрахунків показників.

Максимальна добова пікова потужність $P_g = 64900 \text{ Вт}$. Отже, потужність інвертора P_i має бути не менше 65 кВт .

Кількість електроенергії, яка споживається столярним цехом за добу, становить на рівні $E_o = 357720 \text{ Вт} \cdot \text{год}$.

Номинальна потужність у регіоні становить 15 кВт .

Площа, яку займає 1 ВЕС із розтяжками становить $74,7 \text{ м}^2$. Для ВЕС загалом потрібно $149,4 \text{ м}^2$.

Параметри вітроколеса наступні:

- Ідеальна аеродинамічна потужність $P_A = 8432 \text{ Вт}$.

Площа, яка омитається, повинна бути рівною $S = 18,6 \text{ м}^2$.

Діаметр вітроколеса – $D = 5 \text{ м}$.

Зовнішній діаметр $D_{\text{розр}} = 4 \text{ м}$.

3.9 Вибір електрогенератора

Кінетична енергія вітру:

$$E_{\text{кін}} = \frac{mV^2}{2},$$

де $\rho = 1,226 \text{ кг/м}^3$ – густина повітря, яка відповідає нормальним кліматичним умовам ($t = 15^\circ \text{ C}$, тиск 760 мм рт.ст. ($101,3 \text{ кПа}$)).

Розрахунок механічної потужності на валу електрогенератора:

$$N_{\text{БК}} = 0,5 \cdot \rho \cdot \zeta \cdot D^2 \cdot V^3,$$

де ζ - коефіцієнт використання енергії вітру.

Електрична потужність:

$$P_{\text{BEV}} = N_{\text{БК}} \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{е}}.$$

Функціональний зв'язок між механічними і електричними величинами вітрогенератора:

$$P_{BEV} = 0,68 \cdot D^2 \cdot V^3.$$

Передбачається використання вітроенергетичної установки із горизонтальною віссю обертання вітроколеса та крильчастими лопатями.

Розрахунок синхронного генератора із постійними магнітами

Вихідні дані:

- активна потужність $P = 5000 \text{ Вт}$;
- напруга на виході $U = 220 \text{ В}$;
- частота змінної напруги $f = 50 \text{ Гц}$;
- кількість фаз $m = 1$ (з резервом переходу на $m = 3$).

Машинна постійна Арнольда:

$$C_a = \frac{D^2 l_\delta \eta}{P} = \frac{6,1}{a_\delta k_\phi k_0 B_\delta A}$$

$$a_\delta = 0,8;$$

$$k_\phi = 1,11;$$

$$k_0 = 0,92;$$

$$A = 220 \cdot 10^2 \text{ А/м};$$

$$B_\delta = 0,8 \text{ Тл}.$$

Розрахункова потужність:

$$P = \frac{k_e P_H}{\cos \varphi}$$

де $k_e = \frac{E_i}{U_n}$ - характеризує внутрішню електрорушійну силу якірної обмотки,

$$k_e = 1,2.$$

Співвідношення між однофазним і трифазним живленням:

$$P_{1\Phi} = 0,7 P_{3\Phi},$$

$$P_{3\Phi} = \frac{P_{1\Phi}}{0,7} = \frac{5000}{0,7} = 7142,8 \text{ Вт}.$$

Зазвичай приймають $\cos \varphi = 0,8$:

$$P_w = P = \frac{1,2 \cdot 7142,8}{0,8} = 10714,2 \text{ Вт.}$$

Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{250} = 12.$$

Представимо наступне співвідношення:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau},$$

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

Одержимо вираз:

$$\lambda = \frac{2l_\delta p}{\pi D},$$

Це значення зазвичай дорівнює $\lambda = 1,5$. Розрахункова довжина:

$$l_\delta = \frac{\lambda \pi D}{2p},$$

Отримаємо вираз:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 2pP}{\lambda \pi \alpha_\delta k_\phi k_0 B_\delta A n}},$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{6,1 \cdot 24 \cdot 10714,2}{1,5 \cdot 3,14 \cdot 0,8 \cdot 1,11 \cdot 0,92 \cdot 220 \cdot 10^2 \cdot 0,8 \cdot 250}} = 0,4525 \text{ м.}$$

Округлимо значення $D = 0,45 \text{ м.}$

Полюсний поділ:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,45}{24} = 0,0589 \text{ м.}$$

Знайдемо розрахункову довжину статора:

$$l_\delta = \lambda \tau = 1,5 \cdot 0,0589 = 0,0883 \text{ м.}$$

Округлюємо значення $l_\delta = 0,08 \text{ м.}$

Внутрішній діаметр становить $D = 0,45 \text{ м.}$, розрахункова довжина становить $l_\delta = 0,08 \text{ м.}$

Розрахунок ротора:

1. Повітряний зазор $\delta = 0,6 \text{ мм.}$
2. Зовнішній діаметр ротора описується формулою:

$$D_p = D - 2\delta,$$

$$D = 0,45 \text{ м.};$$

Отримуємо:

$$D_p = 0,45 - 2 \cdot 0,0006 = 0,4488,$$

Округлимо значення $D_p = 0,45 \text{ м.}$

3. Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття знаходиться за формулою:

$$a_i = a_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1 - a_p}},$$

$$a_p = 0,68.$$

Отримуємо:

$$a_i = 0,68 + \frac{4}{\frac{0,0589}{0,6384 \cdot 10^{-3}} + \frac{6}{1 - 0,68}} = 0,716,$$

4. Розрахуємо ширину полюса:

$$b_M = a_p \cdot \tau,$$

$$b_M = 0,68 \cdot 0,0589 = 0,04 \text{ м.}$$

$$l_M = l_\delta = 0,08 \text{ м.}$$

Запишемо значення зовнішнього діаметру ротору $D_p = 0,45 \text{ м.}$

Коефіцієнт полюсного перекриття становить $a_i = 0,716$.

Ширина полюса $b_M = 0,04 \text{ м.}$

Довжина ротора $l_M = 0,08 \text{ м.}$

3.10 Застосування редукторів в вітроустановках

Редуктор є важливим елементом багатьох вітроенергетичних установок, призначеним для передачі механічної енергії від ротора вітротурбіни до електричного генератора. Основна функція редуктора полягає у збільшенні частоти обертання вала, оскільки ротор вітроустановки обертається відносно

повільно, тоді як для ефективної роботи генератора необхідна значно вища швидкість обертання.

У більшості сучасних вітротурбін ротор обертається зі швидкістю від 10 до 30 об/хв, тоді як генератор потребує частоти обертання 1000–1800 об/хв. Для узгодження цих параметрів застосовують багатоступеневі редуктори з передавальним числом від 1:50 до 1:120. Найпоширенішими є планетарні та циліндричні зубчасті редуктори.

Використання редуктора дозволяє застосовувати стандартні високошвидкісні генератори меншої маси та вартості. Це сприяє зниженню загальної вартості вітроенергетичної установки та спрощує її технічне обслуговування. Крім того, редуктор допомагає оптимізувати роботу генератора при змінній швидкості вітру, підтримуючи необхідний режим роботи електрообладнання.

Разом із перевагами редуктори мають і певні недоліки. Вони збільшують масу гондоли, потребують регулярного технічного обслуговування, контролю стану мастила та є одним із найбільш навантажених вузлів вітротурбіни. Значна частина відмов вітроустановок пов'язана саме зі зносом зубчастих передач та підшипників редуктора.

У зв'язку з цим останніми роками набувають поширення безредукторні вітроустановки, у яких ротор безпосередньо з'єднаний із низькообертним генератором. Такі системи характеризуються вищою надійністю та меншими витратами на обслуговування, проте потребують використання більш габаритних і дорогих генераторів.

3.11 Висновки до розділу 3

Номінальна потужність ВЕУ для енергопостачання столярного цеху із врахуванням середньої швидкості вітру в регіоні становить 15 кВт .

Площа, що займає 1 ВЕУ із розтяжками, становить $74,7 \text{ м}^2$. Для розміщення ВЕС в загальному потрібно $149,4 \text{ м}^2$.

Параметри вітроколеса наступні:

Площа лопатей вітроколеса $S = 18,6 \text{ м}^2$.

Ідеальна аеродинамічна потужність $P_A = 8432 \text{ Вт}$.

Діаметр вітроколеса $D = 5 \text{ м}$.

Параметри синхронного генератора для ротора і статора:

Розрахункова довжина ротора $l_m = l_s = 0,08 \text{ м}$;

Внутрішній діаметр ротора $D = 0,45 \text{ м}$;

Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття $a_i = 0,716$;

Зовнішній діаметр ротора $D_p = 0,45 \text{ м}$;

Ширина полюса $b_M = 0,04 \text{ м}$.

Перерахованим параметрам цілком відповідає вітрогенератор типу $WH6.4-5000W$, який за середньорічної швидкості вітру, повинен виробляти 10000 Вт .

Для навантаження столярного цеху, що дорівнює 15 кВт , передбачається встановлення 2 вітрогенераторів.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Небезпеки, які виникають при роботі з обертовими частинами вітротурбіни

При роботі з обертовими частинами вітроенергетичної установки виникає комплекс небезпечних виробничих факторів, які необхідно враховувати під час проєктування, монтажу, експлуатації та технічного обслуговування обладнання. Основна небезпека пов'язана з наявністю рухомих елементів великого діаметра та маси, що обертаються з високою кутовою швидкістю та накопичують значну кінетичну енергію.

Насамперед існує ризик механічного травмування персоналу внаслідок безпосереднього контакту з обертовими лопатями ротора. Потраплення людини в зону обертання може призвести до тяжких тілесних ушкоджень, включаючи розчавлення, ампутацію кінцівок або смертельні наслідки. Небезпека значно зростає при виконанні робіт поблизу працюючої установки або при порушенні правил блокування обладнання під час технічного обслуговування.

Додатковим небезпечним фактором є можливість раптового запуску або самовільного обертання ротора внаслідок зміни швидкості вітру або автоматичного вмикання системи керування. Така ситуація є особливо небезпечною під час ремонтних робіт, коли персонал може перебувати в безпосередній близькості до рухомих частин. Відсутність належного механічного або електричного блокування підвищує ймовірність аварійних ситуацій.

Також існує ризик руйнування елементів конструкції ротора, зокрема лопатей або кріпильних вузлів, внаслідок втомного зношування матеріалу, перевантажень або впливу екстремальних погодних умов. У разі руйнування можливий розліт уламків з великою кінетичною енергією, що створює загрозу для обслуговуючого персоналу та об'єктів, розташованих у зоні дії установки.

Суттєвим фактором небезпеки є вібраційний вплив, який виникає під час

роботи вітротурбіни, особливо при несиметричному навантаженні або поривах вітру. Вібрації можуть призводити до зниження стійкості конструкції, втрати рівноваги персоналом під час обслуговування, а також до прискореного зносу елементів кріплення та механічних вузлів.

Окремо слід відзначити небезпеку, пов'язану з виконанням робіт на висоті, оскільки більшість елементів вітроенергетичної установки розташовані на щоглі або башті. Поєднання висотних робіт та наявності обертових механізмів значно підвищує ризик падіння, зіткнення з рухомими частинами або втрати контролю над інструментом.

4.2 Вимоги безпеки під час монтажу та обслуговування вітротурбіни на висоті

Під час монтажу та обслуговування вітротурбіни на висоті виконуються роботи підвищеної небезпеки, що поєднують ризики падіння з висоти, впливу погодних умов, а також небезпеки від механічного та електричного обладнання. У зв'язку з цим до таких робіт висувається комплекс організаційних, технічних та індивідуальних вимог безпеки.

Перш за все, до висотних робіт допускаються лише працівники, які пройшли спеціальне навчання, медичний огляд, інструктаж з охорони праці та мають відповідний допуск до робіт на висоті. Перед початком робіт обов'язково проводиться цільовий інструктаж із визначенням небезпечних зон, порядку виконання операцій та заходів аварійного припинення робіт.

Важливою вимогою є використання засобів індивідуального захисту від падіння з висоти. До них належать страхувальні системи (пояси, прив'язі, стропи з амортизаторами), каски з підборідним ременем, спеціальне взуття з нековзною підошвою, а також рукавички та спецодяг, що забезпечують захист від механічних пошкоджень і погодних впливів. Усі елементи страхувальної системи повинні бути справними, сертифікованими та перевіреними перед використанням.

Обов'язковим є застосування надійних анкерних точок кріплення страхувальних систем, які розраховані на відповідні навантаження та сертифіковані для використання у висотних роботах. Забороняється кріплення до випадкових або не призначених для цього елементів конструкції.

Під час монтажу та обслуговування вітротурбіни необхідно суворо дотримуватися вимог щодо зупинки обладнання. Перед виконанням робіт вітротурбіна повинна бути повністю знеструмлена, загальмована та заблокована від випадкового запуску. Це виключає можливість обертання ротора під дією вітру або автоматичного вмикання.

Особлива увага приділяється метеорологічним умовам. Роботи на висоті забороняється виконувати під час сильного вітру, ожеледиці, грози, дощу або обмеженої видимості, оскільки це значно підвищує ризик втрати рівноваги та падіння.

Також необхідно забезпечити організацію безпечного робочого місця: огороження небезпечної зони внизу, запобігання падінню інструментів і деталей (використання страхувальних шнурів для інструментів), а також наявність засобів аварійного спуску та рятувального обладнання.

Під час виконання робіт персонал повинен працювати не менш ніж у складі двох осіб із постійним візуальним або радіозв'язком, щоб у разі виникнення нештатної ситуації була можливість оперативного реагування.

4.3 Причини можливого виникнення пожежі у вітроенергетичній установці

Причини можливого виникнення пожежі у вітроенергетичній установці пов'язані як з електричними процесами, так і з механічними навантаженнями, умовами експлуатації та впливом навколишнього середовища. Умовно їх можна поділити на електричні, механічні та експлуатаційні.

Однією з основних причин є електричні аварійні режими, зокрема короткі замикання в генераторі, силових кабелях, перетворювачах напруги або системах

керування. Перевантаження електричних кіл призводить до перегріву провідників, руйнування ізоляції та можливого займання горючих матеріалів усередині гондоли або електрощитів. Особливо небезпечними є перехідні процеси при різких змінах навантаження або помилки в роботі системи регулювання.

Іншою важливою причиною є перегрів механічних вузлів, зокрема підшипників ротора, редуктора та генератора. Недостатнє змащення, зношування деталей або порушення балансування ротора можуть викликати підвищене тертя, що супроводжується локальним нагрівом і, у крайніх випадках, займанням мастильних матеріалів.

Також пожежі можуть виникати через несправності системи гальмування або керування швидкістю обертання ротора. При відмові гальмівної системи можливе перевищення допустимої швидкості обертання, що призводить до механічних перевантажень, нагріву елементів конструкції та їх подальшого руйнування з іскроутворенням.

Суттєвим фактором є удари блискавки, оскільки вітротурбіни встановлюються на значній висоті та є відкритими для атмосферних розрядів. Неналежно виконана або пошкоджена система блискавкозахисту може призвести до проходження струму через конструкцію, локального перегріву та займання композитних матеріалів лопатей або електронних компонентів.

Не менш важливою причиною є помилки монтажу, ремонту або обслуговування, зокрема неякісні електричні з'єднання, порушення ізоляції, використання невідповідних матеріалів або інструментів. Такі дефекти часто проявляються у вигляді контактного перегріву та іскріння.

Крім того, до факторів ризику належать зовнішні впливи, такі як високі температури навколишнього середовища, накопичення пилу або забруднень у гондолі, що може сприяти поширенню полум'я, а також потрапляння сторонніх предметів у рухомі частини.

4.4 Небезпеки, пов'язані з експлуатацією акумуляторних батарей

Експлуатація акумуляторних батарей у складі систем резервного живлення вітроенергетичних установок пов'язана з низкою потенційних небезпек електричного, хімічного, термічного та пожежного характеру. Це зумовлено особливостями їхньої роботи, накопиченням значної електричної енергії та використанням хімічно активних речовин.

Однією з основних небезпек є ураження електричним струмом. Акумуляторні батареї, особливо літій-іонні або свинцево-кислотні системи великої ємності, здатні створювати високі струми короткого замикання. При випадковому контакті з струмопровідними частинами або при пошкодженні ізоляції існує ризик електротравм, опіків або ураження внутрішніх органів.

Іншою суттєвою небезпекою є термічний розгін, характерний насамперед для літій-іонних батарей. У разі перегріву, внутрішнього короткого замикання або механічного пошкодження відбувається неконтрольоване підвищення температури елементів, що може призвести до займання або вибуху акумулятора.

Також важливими є пожежні ризики, пов'язані із займанням електроліту або матеріалів елементів батареї. Під час горіння можуть виділятися токсичні гази, які становлять небезпеку для персоналу та навколишнього середовища. Особливо це актуально для герметичних приміщень без належної вентиляції.

До небезпек належать і хімічні ризики, зокрема витік електроліту у разі пошкодження корпусу батареї. Електроліт свинцево-кислотних акумуляторів містить сірчану кислоту, яка може викликати хімічні опіки шкіри, слизових оболонок і пошкодження обладнання.

Важливим фактором є також вибухонебезпека, яка виникає при накопиченні водню (у свинцево-кислотних батареях під час заряджання) або при внутрішніх дефектах літійових елементів. За відсутності належної вентиляції гази можуть утворювати вибухонебезпечні суміші.

Додатково слід враховувати перегрів і перевантаження батарей, що виникають при неправильному режимі заряджання або використанні несправних зарядних пристроїв. Це призводить до прискореного зношування, втрати ємності та підвищення ризику аварійних ситуацій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Визначено наступні параметри, за якими вибиратиметься ВЕУ:

Пікова потужність столярного цеху;

Кількість електроенергії, яка споживається столярним цехом за добу;

Номінальна потужність ВЕУ.

Величина пікової добової потужності столярного цеху становить $P_g = 64900 \text{ Вт}$.

Потужність інвертору $P_i = 65 \text{ кВт}$.

Кількість електроенергії, яка споживається столярним цехом за добу, складає $E_{\text{доб}} = 357720 \text{ Вт} \cdot \text{год}$. На це значення потрібно орієнтуватись при виборі комплектуючого обладнання ВЕУ та розрахунку ємності АБ.

Номінальна потужність ВЕУ для енергопостачання столярного цеху із врахуванням середньої швидкості вітру в регіоні становить 15 кВт .

Площа, що займає 1 ВЕУ із розтяжками, становить $74,7 \text{ м}^2$. Для розміщення ВЕС в загальному потрібно $149,4 \text{ м}^2$.

Параметри вітроколеса наступні:

Площа лопатей вітроколеса $S = 18,6 \text{ м}^2$.

Ідеальна аеродинамічна потужність $P_A = 8432 \text{ Вт}$.

Діаметр вітроколеса $D = 5 \text{ м}$.

Параметри синхронного генератора для ротора і статора:

Розрахункова довжина ротора $l_m = l_s = 0,08 \text{ м}$;

Внутрішній діаметр ротора $D = 0,45 \text{ м}$;

Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття $a_i = 0,716$;

Зовнішній діаметр ротора $D_p = 0,45 \text{ м}$;

Ширина полюса $b_M = 0,04 \text{ м}$.

Перерахованим параметрам цілком відповідає вітрогенератор типу *WH6.4-5000W*, який за середньорічної швидкості вітру, повинен виробляти *10000 Вт*.

Для навантаження столярного цеху, що дорівнює *15 кВт*, передбачається встановлення 2 вітрогенераторів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. <https://rozetka.com.ua/ua/237829549/p237829549/>
2. Вертикальний вітрогенератор CNCEST 100W 24V з контролером заряду для а, ціна 15525 ₪: купити на Prom.ua | Україна, Львів. *Prom.ua*. URL: <https://prom.ua/ua/p3078176598-vertikalnij-vitrogenerator-cncest.html>.
3. Зборівська ВЕС | Energo.ua. *Energo.ua*. URL: https://www.energo.ua/uk/assets/zborivska_wind_farm
4. <https://golos.te.ua/u-zborovi-na-ptahofabrytsi-vstanovlyuyut-vitrovi-elektrostantsiji-foto/>
5. Найбільші вітрові електростанції світу: ТОП-5 гігантів 2025 року - News Ukraine. *News Ukraine*. URL: <https://www.newsukraine.com.ua/najbilshi-vitrovi-elektrostantsiyi-svitu-top-5-gigantiv-2025-roku/>
6. Учасники проєктів Вікімедіа. Комплекс ВЕС Ганьсу – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Комплекс_ВЕС_Ганьсу
7. Hornsea Project One: The World's Largest Offshore Wind Farm. *AZoCleantech*. URL: <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=994>
8. Alta Wind Energy Center Projects. *We are POWER | POWER Engineers*. URL: <https://powereng.netlify.app/library/alta-wind-energy-center-projects>
9. Contributors to Wikimedia projects. Muppandal Wind Farm - Wikipedia. *Wikipedia, the free encyclopedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Muppandal_Wind_Farm
10. <https://techno.nv.ua/ukr/popsceience/elektrostantsiya-dogger-bank-potuzhnist-3-6-gvt-i-novi-robochi-miscya-u-britaniji-50558752.html>
11. Вітряна турбіна з двома лопатями виявилася куди ефективнішою за звичайну: у чому її секрет. *ФОКУС*. URL: <https://focus.ua/uk/digital/718484-vitryana-turbina-z-dvoma-lopatyami-viyavilasya-kudi-efektivnishoyu-za-zvichaynu-u-chomu-jiji-sekret>
12. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н.

Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с. ISBN 978-966-350-526-8

13. Учасники проєктів Вікімедіа. Ротор Савоніуса – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ротор_Савоніуса

14. Учасники проєктів Вікімедіа. Турбіна Дар'є – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Турбіна_Дар'є

15. Характеристики, класифікація і відмінності вітрогенератора Ленца | Альтернативна енергетика у світі та Україні. *Альтернативна енергетика у світі та Україні*. URL: <https://alternative-energy.com.ua/harakteristiki-klasifikacziya-i-vidminnosti-vitrogeneratora-lencza/>

16. Жила, С. Ю. Модель вітроенергетичної установки, як альтернативного джерела енергії / С. Ю. Жила, О. А. Дзюбенко // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології : зб. наук. пр. [Електронний ресурс] / М-во освіти і науки України, ХНАДУ. - Харків, 2017. - Вип. 12.

17. Стрункін , Г. . (2024). Автономна вітроенергетична установка з аеродинамічним мультиплікуванням на базі асинхронного генератора з фазним ротором зі збудженням від інвертора напруги. *Технічні науки та технології*, (4 (38)), 245–253. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-245-253](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-245-253)

18. Стрункін Г. М. Оцінювання маси основного обладнання вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням на базі асинхронного генератора з фазним ротором. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2025. № 2 (288). С. 49–55. URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-288-2-49-55>

19. Оробчук, Б. Я., & Пихач, В. І. (2022). Дослідження стійкості роботи електропередачі вітроенергетичної установки в енергосистемі. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 88-89.

20. Коваль, В. П. (2020). Підвищення ефективності використання вітрового потоку у вітрових енергоустановках. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних*

технологій “до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, 204-204.

21. Білевич, В. Р., Яковчук, А. М., & Коваль, В. П. (2025). Вплив кількості лопатей на енергоефективність вітротурбіни. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій “, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 11-12.

22. Коваль, В. П., & Похилий, О. І. (2025). Вітроенергетика України: проблеми та перспективи будівництва нових вітрових електростанцій. Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій “, 399-401.

23. Гурик О.Я. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці [електронний ресурс]: //Інституційний репозитарій Atutor (код дисципліни ID 4656): офіційний сайт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя – Тернопіль, 2017. – Режим доступу: <https://dl.tntu.edu.ua/index.php>.

24. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.