

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломного проєкту (роботи)
бакалавра
на тему:
«АВТОНОМНЕ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ БЮВЕТУ»

Виконав: студент 3 курсу,
групи НВДЕ 2023–1у
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
(Нетрадиційні та відновлювальні джерела
енергії)



Д.Л. Шай

Керівник



М.Л. Глебова

Рецензент



О.Б. Єгоров

Харків – 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА імені О.М. БЕКЕТОВА

ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури
Кафедра Альтернативної електроенергетики та електротехніки
Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
завідувач кафедри АЕЕ



доц. О.Б. Єгоров

“ 14 ” червня 2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ
Шай Денису Леонідовичу

1. Тема проєкту: Автономне електропостачання бювету

керівник проєкту (роботи) Глєбова Марина Леонідівна, канд. техн. наук, доцент
затверджені наказом вищого навчального закладу 22.05.2026 року № 440-03.

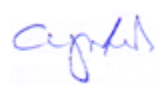
2. Строк подання студентом проєкту 14 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): Загальні вимоги до водопостачання, кліматичні особливості місцевості розташування

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Необхідність розвитку альтернативного водопостачання, електричне навантаження. Аналітичний огляд вітрових двигунів та магнітоелектричних машин. Розрахунок вітрової установки та електричного генератора, вибір комплектуючих. Небезпечні та шкідливі фактори при спорудженні вітрової установки, пожежна безпека. Захист від блискавки та заземлення.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1) Загальна характеристика об'єкту проєктування. 2) Види вітродвигунів. 3). Структурні схеми вітрових установок. 4). Класифікація магнітоелектричних машин та регулювання їх напруги. 5.Параметри вітрового колеса, шаблон кореневого перерізу лопаті

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розрахункова частина	Глебова М. Л., доцент каф. АЕЕ		
Охорона праці	Серіков Я.О., доцент каф. ОП та БЖД		

7. Дата видачі завдання 25 травня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Обґрунтування застосування вітрової енергетичної установки та аналітичний огляд вітрових двигунів і магнітоелектричних машин	25.05.2026-29.05.2026	
2	Аналітичний огляд вітрових двигунів, вітрових установок і магнітоелектричних машин	30.05.2026-01.06.2026	
3	Розрахунок вітрової турбіни та електричного генератора	02.06.2026-06.06.2026	
4	Охорона праці при монтажі та експлуатації ВЕУ	07.06.2026-10.06.2026	
5	Підготовка та подання дипломної роботи до захисту.	11.06.2026-14.06.2026	

Студент  Денис Шай

Керівник  Марина Глебова

РЕФЕРАТ

Дипломна робота бакалавра: 97 сторінок пояснювальної записки, 4 розділи, 41 рисунок, 13 таблиць, 5 аркушів графічної частини, 24 використаних джерела інформації.

Метою роботи є розробка автономної системи електропостачання бювету для забезпечення питною водою. Аналіз різних варіантів цього показав, що найбільш виправданим є застосування вітроенергетичної установки. Середня швидкість вітру близько 5 м/с та електричне навантаження бювету дали можливість застосування установки потужністю 9 кВт. Така вітрова установка відноситься до малих, не є складною для монтажу та не потребує особливих дозволів на її спорудження.

Вибір складових елементів ВЕУ виконаний на основі аналітичного огляду вітрових двигунів, вітрових установок в цілому та магнітоелектричних машин.

Розрахована трилопатева установка з горизонтальним ротором потужністю 9 кВт та синхронний генератор зі збудженням від постійних магнітів номінальною повною потужністю 5,7 кВА.

Для управління зарядом та розрядом залізо-літієвих акумуляторів для накопичення електроенергії типу EcoLiFe 48-200, передбачений контролер WindSanPro-150 +LCD+ MPPT + Wi-fi. Постійний струм перетворюється в змінний необхідних параметрів інвертором Deye SUN-5K-SG04LP3-EU.

В розділі охорони праці запропоновані заходи безпеки при монтажі установки, грозозахисту та заземлення. Розрахований пристрій заземлення ВЕУ.

Ключові слова: ВОДОПОСТАЧАННЯ, БЮВЕТ, КЛІМАТ, ВІТРОВІ ДВИГУНИ, ЕЛЕКТРИЧНІ ГЕНЕРАТОРИ, МОНТАЖ ВЕЖІ, ОХОРОНА ПРАЦІ, ЗАЗЕМЛЕННЯ.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ БЮВЕТУ	10
1.1 Необхідність розвитку альтернативного водопостачання в умовах обмеження електропостачання	10
1.2. Характеристика місця розміщення бювету та електричне навантаження обладнання	13
Висновки за розділом 1	14
2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВІТРОВИХ ДВИГУНІВ, ВІТРОВИХ УСТАНОВОК І МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	15
2.1 Аналіз конструкцій вітрових двигунів та вітроустановок	15
2.2 Структурні схеми ВЕУ	20
2.3 Застосування магнітоелектричних машини для генерації електроенергії ВЕУ	24
2.3.1 Узагальнена класифікація магнітоелектричних машин	29
2.3.2 Регулювання напруги генераторів з постійними магнітами	33
Висновки за розділом 2	40
3 РОЗРАХУНОК ВІТРОВОЇ УСТАНОВКИ ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА	41
3.1 Уточнення вітрових характеристик і вихідні дані для розрахунку вітрової установки	41
3.2 Визначення діаметра ротору вітрової установки, кількості лопатей та швидкості обертання	43
3.3 Вибір аеродинамічного профілю лопаті	46
3.4 Визначення коефіцієнта гальмування, за якого коефіцієнт потужності має найбільше значення	48
3.5 Розрахунок лопаті	51

3.5.1	Визначення відносної товщини перерізів лопаті	52
3.5.2	Визначення коефіцієнтів швидкохідності, відносних модулів, коефіцієнтів сумарної напруженості перерізу лопаті	53
3.5.3	Визначення кутів встановлення лопатей	54
3.5.4	Визначення координат та побудова шаблонів профілів перерізів лопаті	56
3.6	Розрахунок електричного генератора вітроустановки	59
3.6.1	Розрахунок магнітопроводу та обмотки статора	62
3.6.2	Розрахунок діаметра ротора	65
3.7	Вибір контролера, інвертора та акумуляторів	66
3.7.1	Вибір контролера	66
3.7.2	Вибір інвертора	68
3.7.3	Розрахунок ємності та вибір акумуляторної батареї	69
	Висновки за розділом 3	71
4	ОХОРОНА ПРАЦІ	72
4.1	Організація та законодавство з охорони праці в Україні	58
4.2	Технічні та конструктивні особливості вітроустановки бювету	75
4.3	Небезпечні та шкідливі фактори при спорудженні та експлуатації вітроенергетичної установки	76
4.4	Заходи з охорони праці при монтажі вежі	79
4.4.1	Розрахунок меж небезпечної зони роботи автомобільного крану	81
4.4.2	Безпека при роботі вантажопідйомних механізмів	82
4.5	Пожежна безпека вітрової енергетичної установки	83
4.6	Захист ВЕУ від ударів блискавки та заземлення	86
4.6.1	Розрахунок пристрою заземлення ВЕУ	90
4.6.2	Захист обладнання від імпульсних перенапруг	92
	Висновки за розділом 4	93
	ВИСНОВКИ	94
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ	95

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВЕС – вітрова електростанція;
ВЕУ – вітрова енергетична установка;
ВД – вітровий двигун;
ККД – коефіцієнт корисної дії;
АКБ – акумуляторна батарея;
МЕМ – магнітоелектрична машина;
МЕГ – магнітоелектричний генератор;
ЕРС – електрорушійна сила;
СГПМ – синхронний генератор зі збудженням від постійних магнітів;
КВЕВ – коефіцієнт використання енергії вітру;
МОП – Міжнародна організація праці;
МАГАТЕ – Міжнародна агенція з атомної енергетики;
МООЗ – Міжнародна Організація Охорони Здоров'я;
НВФ – небезпечні виробничі фактори;
ШВФ – шкідливі виробничі фактори;
ПЗП – пристрій захисту від імпульсних перенапруг;
ПУЕ – Правила улаштування електроустановок.

ВСТУП

На сьогодні у світі, серед інших енергетичних технологій, найбільш динамічний розвиток демонструє відновлювана енергетика. При цьому спостерігається стійка тенденція до виведення з експлуатації технологій традиційної енергетики з використанням викопного палива.

Визначальними факторами розвитку відновлюваних джерел енергії в Україні є необхідність покращення екологічної ситуації, обмеженість традиційних енергетичних ресурсів, нагальна потреба в подоланні залежності від їх імпорту, необхідність корінної реконструкції енергетичної системи та термінового оновлення енергетичного обладнання, міжнародні зобов'язання.

Для вирішення масштабного освоєння технологій отримання електричної енергії на основі відновлюваних джерел в Україні є всі передумови. Передовсім це наявність значного енергетичного потенціалу – вітрової, сонячної енергії, гідравлічної енергії малих річок, біомаси, геотермальної енергії та енергії довкілля. За ефективного використання цього потенціалу, можливо забезпечити близько 50 % загального споживання енергетичних ресурсів шляхом використання відновлюваних джерел енергії. Цьому сприяє наявна розвинена науково-технічна і виробнича база. Наразі галузь відновлюваної енергетики є однією з найпривабливіших для інвестування, оскільки має хороші економічні показники, цілком спроможна скласти економічну конкуренцію ТЕС і, найголовніше, створює умови позбавитися Україні залежності від імпорту в енергетиці.

В Україні немало територій з високим вітровим енергетичним потенціалом, при розміщенні на яких сучасних ВЕС можливе виробництво електроенергії з коефіцієнтом використання номінальної потужності 0,30 – 0,40. У 2019 році за темпами розвитку відновлювальної енергетики Україна належала до десяти провідних країн світу та займала 6-те місце за інвестиційною привабливістю цієї сфери. Протягом 10 років у відновлювану енергетику було залучено понад 12 млрд доларів США.

У 2023 році частка потужностей відновлюваних джерел енергії в структурі загального виробництва електроенергії України, досягла 22%, (в Європі цей показник становить 42%). Частка електроенергії з таких джерел до 2022 року становила близько 8-10% від загального об'єму генерації. Значна частина потужностей, (зокрема, до 90% вітрових та близько 13% промислових СЕС), постраждала внаслідок бойових дій, але відновлювана енергетика залишається основою майбутньої відбудови, якщо брати до уваги нагальну необхідність переходу України на розосереджену генерацію.

Слід також звернути увагу на енергетичну незалежність невеликих громад та забезпечення їх автономного електропостачання, як і окремих об'єктів необхідних для життєдіяльності.

В даній роботі розглядається можливість автономного електропостачання свердловини для добування води та бювету з кафетерієм.

1 ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ БЮВЕТУ

1.1 Необхідність розвитку альтернативного водопостачання в умовах обмеження електропостачання

Внаслідок бойових дій, енергетика України знаходиться у вкрай складному стані. Пошкоджені практично всі крупні теплові електростанції та ряд гідроелектростанцій. Відключення електроенергії в таких реаліях не завжди прогнозовані та найчастіше мають аварійний характер з непрогнозованою тривалістю.

Відключення, не тільки в районах активних бойових дій, а й за їх межами, спричиняють перебої або повну відсутність централізованого водопостачання, що змушує населення користуватися джерелами води, такими як індивідуальні колодязі, індивідуальні неглибокі свердловини і навіть відкриті водойми.

Критично необхідним для забезпечення безперервного доступу до питної води в умовах аварій, відключень електроенергії або руйнування водопровідних мереж є альтернативне водопостачання, яке дозволить запобігти споживанню забрудненої води.

В листопаді 2024 року Кабінет Міністрів України своїм розпорядженням затвердив Державну програму енергетичної модернізації підприємств водопостачання та водовідведення, що перебувають у державній або комунальній власності, на період до 2030 року [1]. Оскільки сфера централізованого водопостачання та водовідведення є однією з найбільш енерговитратних галузей (витрати на електроенергію становлять близько 40 відсотків собівартості послуг) необхідне вжиття заходів з їх зниження.

Вирішення питання питного водопостачання можливе шляхом буріння свердловин достатньої глибини до шарів водоносного горизонту. Звісно, що вода, отримана від цих свердловин не може бути направленою в загальну

водопровідну мережу. Для розбору питної води не тільки в містах, але й за їх межами необхідне влаштування мережі спеціальних пунктів – бюветів.

Бювет – це спеціально обладнана інженерна споруда в яку вода надходить із підземного джерела. До її складу входять свердловина, розподільні колонки та додаткове обладнання. У бюветах вода зазвичай проходить попереднє очищення та дезінфекцію, за необхідності пом'якшення, що робить її придатною для пиття. Найчастіше бювети виконуються у вигляді невеликих приміщень, павільйонів або колонок, обладнаних кранами для розливу води [2]. Зразки споруд бюветів показані на рис. 1.1. Якість води повинна відповідати вимогам Державних санітарних норм та правил [3].



Рисунок 1.1 –Зразки бюветів

Застосування бюветів запобігає використанню небезпечних джерел води при аваріях на централізованих мережах. Вони дозволяють підтримувати життєдіяльність навіть при повному припиненні централізованого постачання.

Серйозною проблемою у використанні бюветів є їх залежність від зовнішньої електричної мережі – необхідне незалежне джерело живлення. Існують кілька основних варіантів роботи бювету за умов відключення електроенергії:

- встановлення та застосування ручного насосу;
- використання накопичувального резервуару;
- застосування генераторів з двигунами внутрішнього згоряння;

- використання сонячних батарей з акумуляторами;
- застосування вітрових установок.

Варіант з ручним насосом підходить для об'єктів глибиною не більше 30 метрів. Процес добування води повністю ручний, і не залежить від наявності електроенергії, але зовсім не підходить для масового використання.

Встановлення поблизу свердловини резервуару для накопичення води та приєднання його до системи відбору може бути зручнішим у разі нетривалих відключень та запасанні води в час наявності електроенергії.

Перевагою такого способу є можливість забезпечення запасу води на деякий час тривалість якого залежить від ємності бака. Крім того, зменшується кількість вмикань та вимикань електродвигуна насоса. Недоліком є необхідність виділення додаткового місця для монтажу баку на певній висоті та утеплення з метою запобігання замерзання.

Такий спосіб цілком може бути виправданим для приватного господарства з невеликою витратою води.

Застосування генератора з двигуном внутрішнього згоряння є, на перший погляд, чи не найзручнішим, оскільки такий генератор може використовуватися для живлення інших приймачів електроенергії, досить легко приєднується до існуючої мережі та можлива функція автоматичного запуску в разі зникнення основного живлення. Але двигуни вимагають постійного технічного обслуговування та нагляду, наявності запасів паливо-мастильних матеріалів, спеціального місця для установки та створюють значний шум при роботі. Крім того, вони створюють пожежонебезпечну ситуацію.

Більш прийнятними варіантами живлення бюветів, особливо при частих вимиканнях, є використання сонячних батарей або вітрових генераторних установок. Для накопичення електроенергії в період недостатності сонячної енергії чи за відсутності вітру необхідне використання акумуляторів необхідної ємності. Застосування сонячних чи вітрових установок створює повну автономність забезпечення установки розливу води.

1.2 Характеристика місця розміщення бювету та електричне навантаження обладнання

Розміщення проєктованого бювету планується на узвишші поряд з автомобільною дорогою на території Харківської області для якої характерний помірно-континентальний клімат. Середньомісячна температура повітря протягом року змінюється в межах від $-5 - 7^{\circ}\text{C}$, у найхолоднішому місяці січні, до $+21 - +22^{\circ}\text{C}$ в найтеплішому липні. Річна кількість опадів становить 450-500 мм: найменше в лютому – 25-30 мм, а найбільше в липні – 70-75 мм.

Дані швидкості вітру по місяцях протягом року наведені в табл. 1.1, а графік – на рис. 1.2.

Таблиця 1.1 – Швидкість вітру в місці розташування бювету

Місяць	Січ	Лют	Бер	Квіт	Трав	Черв	Лип	Серп	Вер	Жовт	Лист	Груд
Швидкість, м/с	5,6	5,9	5,9	5,4	5,0	4,3	4,1	3,8	3,9	4,6	5,4	5,8

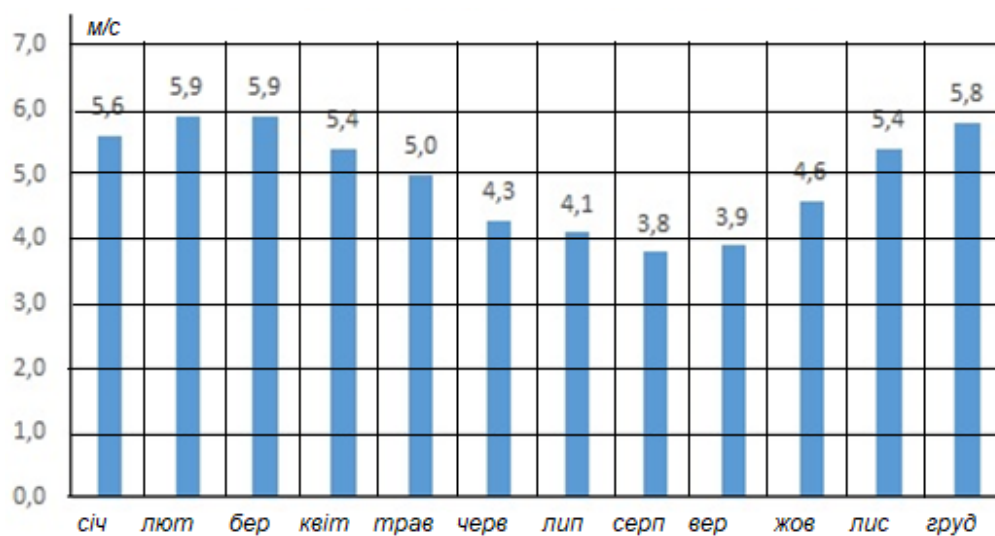


Рисунок 1.2 – Середня швидкість вітру по місяцях протягом року [4]

Як видно з графіку, найвища середня швидкість вітру характерна для лютого, а найнижча – для серпня, вересня. Загалом середня швидкість вітру впродовж року 5,0 м/с. Такі параметри вітру цілком дозволяють використання вітрової установки, яка може бути розташованою поряд зі свердловиною. Поряд відсутні високі будівлі та дерева, місцями є невисокий чагарник.

Для розрахунку необхідної потужності електричного генератора та ВЕУ в цілому в табл. 1.2 наведений перелік необхідного електричного обладнання та його потужність $P_{вст}$, кВт. Крім обладнання, призначеного для підйому та розливу води передбачена можливість зарядки телефонів, користування WF та в денний час пригоститися кавою з випічкою в невеликому буфеті.

Таблиця 1.2 – Перелік електричного обладнання бювету

Споживач	Кількість споживачів, шт.	Потужність одиниці, кВт	Сумарна потужність, кВт
Насос глибинний	1	0,75	0,75
Освітлення світлодіодне	10	0,02	0,2
Підігрів водяної арматури взимку	1	1,0	1,0
Розетки для зарядки телефонів	5	0,01	0,05
Кавомашина	1	0,85	0,85
Холодильник	1	0,2	0,2
Роутер	1	0,02	0,02
Касовий апарат	1	0,1	0,1
Сумарна встановлена потужність електричного обладнання			3,17

Частина приймачів електроенергії працюватиме не цілодобово, але потужність генератора приймаємо за встановленою потужністю – 3,5 кВт.

Для стабілізації тиску води в кранах, створення запасу води, запобігання занадто частих вмикань та вимикань насоса, передбачений гідроаккумулятор, який є металевим баком з мембраною, що розділяє воду та повітря під тиском [5]. Очищення води здійснюється системою зворотного осмосу. Електричного живлення фільтр не потребує, як і гідроаккумулятор.

Для визначення потужності та типу вітрового двигуна, структурної схеми установки та типу електричного генератора необхідний детальний аналіз.

Висновки за розділом 1

Розглянута необхідність застосування бюветів та кліматичні умови місця розташування. Визначена електрична потужність встановленого обладнання, яка становить 3,5 кВт.

2 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВІТРОВИХ ДВИГУНІВ, ВІТРОВИХ УСТАНОВОК І МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

2.1. Аналіз конструкцій вітрових двигунів та вітроустановок

Серед вітрових двигунів (ВД) за *принципом дії* виділяють дві групи:

1. – виникнення крутного моменту є результатом різниці сил лобового тиску потоку повітря на лопаті робочого колеса стосовно осі його обертання;
2. – крутний момент створюється дією аеродинамічної підйомної сили.

До першої групи належать вітродвигуни карусельного, роторного та барабанних типів (Рис. 2.1). Вони мають досить просту конфігурацію вітрового колеса, відповідно невисоку вартість, нескладні та невибагливі в експлуатації.



а)



б)



в)

Рисунок 2.1 – Вітродвигуни, що працюють за різниці сил лобового тиску
а) - Карусельного типу; б) - Багатолопатевий барабанного типу; в) - Ротор Савоніуса

В той же час такі переваги не сприяли повною мірою широкому поширенню внаслідок їх тихохідності та низького коефіцієнту використання енергії вітру. Вітрові двигуни найбільшу потужність розвивають, за умови якщо робоча площа, що сприймає потік повітря, рухається зі швидкістю,

рівною третині від швидкості вітру [6]. Але і в цьому разі значення коефіцієнту використання ξ повної енергії вітру для вказаних двигунів не перевищує 0,18, тому основним типом ВД на сьогодні є двигуни крильчастої конструкції, в яких крутний момент створюється дією аеродинамічних підйомних сил, які виникають на лопатях вітроколеса.

Такі двигуни набули найбільшого розповсюдження та застосування. Для них характерні великі коефіцієнти використання енергії вітру ξ та значно більша ніж у попередніх швидкохідність. У швидкохідних коліс найбільше значення ξ досягає 0,45-0,48.

За конструктивним виконанням ВД також поділяють на дві групи:

- з горизонтальною віссю обертання;
- з вертикальною віссю обертання.

Більш ефективні крильчаті з горизонтальною віссю, особливо коли потік повітря перпендикулярний площині обертання лопатей. Ця умова забезпечується наявністю в складі ВЕУ пристроїв, які забезпечують автоматичний поворот осі обертання. Це може бути крило-стабілізатор чи спеціальна система орієнтації вітрового колеса.

У ВД з вертикальною віссю немає необхідності в орієнтації на вітер – вони можуть працювати за будь-якого його напрямку.

Різноманіття конструкцій ВЕУ досить велике, окремі конструкції установок з вертикальною віссю ВД представлені на рис. 2.1, а з горизонтальною – на рис. 2.2.

Особливий інтерес становить конструкція полівітродвигунної установки (рис. 2.2, г), яка має три однакові генератори, винесені з гондоли на лопаті основного ротора та обладнані додатковими вітровими колесами, встановленими на валах генераторів. Це дозволяє зменшити масу ВЕУ та отримати стабільні високі значення ККД основного колеса від початку роботи до номінальної швидкості вітрового потоку. Діаметр додаткових коліс в рази менший діаметра основного ротора, а обороти – навпаки. [7]



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.2 – Вітродвигуни, з горизонтальною віссю, що працюють завдяки дії аеродинамічної підйомної сили: а) – Однолопатевий; б) – Трилопатевий; в) – Багатолопатевий; г) – Полівітродвигунна установка; д) – Вітрильний вітрогенератор; е) – Вітрогенератор Оніпко

За потужністю ВЕУ умовно поділяють на:

- призначені для промислових ВЕС («велика» енергетика);
- малі вітроелектростанції, перспективні для систем автономного електропостачання.

За абсолютним значенням потужності підрозділяють чотири групи:

- великої потужності – понад 1 МВт;
- середньої потужності – від 100 кВт до 1 МВт;
- малої потужності – від 5 до 99 кВт;
- дуже малої потужності – менше 5 кВт.

Залежно від призначення та умов роботи стосовно енергосистеми та способу управління розрізняють три класи ВЕУ (табл. 2.1). [6]

Таблиця 2.1 – Класифікація ВЕУ за призначенням [6]

Найменування	Потужність	Ознака	Призначення
Системні, мережеві	Від 200 кВт до 5 МВт	Робота з ВЕС паралельно з потужною мережею	Джерела видачі в електромережу максимально можливого об'єму електроенергії
Автономні	50...500 кВт	Індивідуальна робота ВЕС (автономна)	Джерела живлення електроенергії споживачів, які не зв'язані з електричною мережею та відрізняються низьким коефіцієнтом використання встановленої потужності
Гібридні	Різна	Робота ВЕС паралельно з електростанціями обмеженої потужності (дизель-генератори, малі ГЕС і таке інше)	Джерела живлення електроенергії для безперебійного постачання споживачем електроенергії номінальної потужності

Крім вказаних ознак вітроустановки можуть відрізнятися також:

- видом виробленої енергії – механічні та електричні, в свою чергу електричні ВЕУ поділяються на ВЕУ постійного і змінного струму;
- ознакою роботи з постійною або змінною частотою обертання вітрового колеса (ВК);
- способами управління;
- структурою системи генерування енергії.

Автономні одногогенераторні ВЕУ, не приєднуються до енергетичної системи з метою паралельної роботи. Вони використовуються для освітлення невеликих приміщень чи ділянок, живлення маяків, засобів зв'язку та інше, а потужність не перевищує 5 кВт. У разі використання енергії таких ВЕУ для опалювання, їх потужність може досягати 20 кВт і більше. Для генерації електроенергії використовуються різні типи генераторів, наприклад, багатополюсних з постійними магнітами, синхронних генераторів з нестабілізованими і стабілізованими вихідними параметрами напруги, асинхронних генераторів зі самозбудженням або допоміжним збудженням і таке інше. Вартість вказаних ВЕУ не дуже висока і багато в чому визначається системою управління електричним генератором.

В простих ВЕУ параметри їх електроенергії в разі застосування генератора змінного струму, можуть забезпечуватися випрямлячами, електричними акумуляторами та транзисторними чи тиристорними перетворювачами (інверторами), що живляться від акумуляторів. Можливе отримання якісної електроенергії за рахунок механічного управління лопатями вітроколеса з метою стабілізації частоти його обертання, або електричне управління, яке забезпечується зміною електричного (баластного) навантаження на виході генератора. Такий спосіб стабілізації частоти обертання дозволяє ефективніше використовувати енергію вітру, оскільки лопаті вітрового колеса постійно працюють в оптимальному режимі. При застосуванні сучасної електроніки таке рішення є надійнішим і дешевшим, ніж механічне управління.

У тому разі коли потужність ВЕУ практично відповідає потужності приєданого резервного дизель-генератора (ДЕС) чи іншого типу, що є звичним для віддалених локальних електричних систем, її застосування дозволяє заощадити рідке паливо. Забезпечення якості електроенергії та управління можливе такими ж технічними засобами, як і в попередньому випадку, але для отримання кращого ефекту можливе застосування інших систем акумуляції енергії.

Якщо ВЕУ працює паралельно з електричною системою набагато більшої потужності, ніж її власна, то вона є мережевою. В такому випадку використовуються ВЕУ великих одиничних потужностей (від 1 до 10 МВт), об'єднаних у вітроенергетичні станції (ВЕС). Електроенергія ВЕУ використовується безпосередньо на місці генерації, або повністю подається в енергосистему. У разі безвітря живлення споживачів забезпечується від енергосистеми. Найбільш зручним та дешевим типом електричних генераторів в таких ВЕС є асинхронний генератор змінного струму, якого веде енергосистема. Паралельна робота ВЕС з мережею створює можливість збільшення одиничної потужності ВЕУ, зниження вартості електроенергії, підвищення якості електроенергії та надійності електропостачання споживачів.

До того ж, робота ВЕС з електроенергетичною системою дозволяє узгодити можливу (для даного вітру) величину генерації і віддавання електроенергії споживачам. Наявність електричної системи також усуває необхідність у пристроях накопичення електроенергії та резервних джерелах, необхідних для автономних вітроелектростанцій.

2.2 Структурні схеми ВЕУ

Структурні схеми ВЕУ та режими їх роботи залежно від призначення та умов використання різняться. Так, для установок які функціонують в автономному режимі використання електроенергії, застосовують наступні основні схеми перетворення вітрової енергії в електричну:

1. Вітрогенератор – генератор постійного струму – акумуляторна батарея із системою регулювання її заряджання – навантаження, (рис. 2.3).

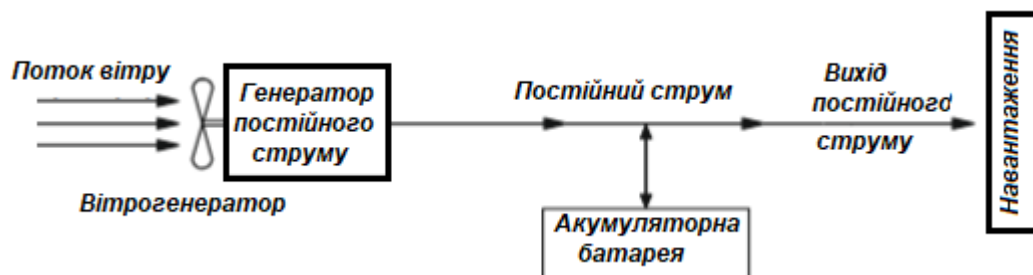


Рисунок 2.3 – Структурна схема автономної ВЕУ постійного струму [7]

Очевидно, що в цьому варіанті приймачами електроенергії можуть бути лише пристрої, для яких необхідний тільки постійний струм (наприклад, двигуни постійного струму).

2. Вітрогенератор – генератор постійного чи змінного струму –нагрівач (рис. 1.4). Використовується тільки генератор змінного або постійного струму без регулювання, який застосовують для отримання тільки тепла і його акумулювання. Частота обертання вітрогенератора може бути змінною.

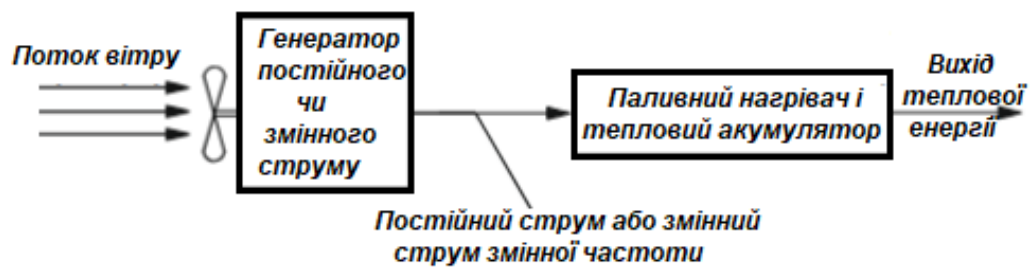


Рисунок 2.4 – Структурна схема автономної ВЕУ для отримання теплової енергії [7]

3. Вітрогенератор – генератор змінного струму – випрямний зарядний пристрій – акумуляторна батарея – автономний інвертор.

За необхідності отримання змінного струму зі стандартними параметрами якості при нелінійних і нестаціонарних вольтамперних характеристиках ВЕУ потрібне використання спеціалізованих напівпровідникових перетворювачів (інверторів), які це забезпечують, (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Структурна схема автономної ВЕУ для отримання електричної енергії стандартних параметрів [7]

На сьогодні в таких ВЕУ найчастіше використовуються безредукторні багатополюсні синхронні генератори із збудженням від постійних магнітів. Мінливий характер вітового потоку потребує обов'язкової наявності в складі ВЕУ накопичувача енергії, яким найчастіше є акумуляторна батарея (АКБ). Вироблений змінний струм випрямляється напівпровідниковим випрямлячем, а стабілізація напруги та забезпечення оптимального режиму заряджання АКБ здійснюється регулятором напруги. Параметри якості електроенергії та їх стабільність забезпечує автономний інвертор.

Вимоги до ВЕУ середньої та великої потужності пропелерного типу дещо жорсткіші, тому вони, як правило, мають ряд додаткових пристроїв і систем, таких як механізми зміни кута повороту лопатей вітроколеса, орієнтації вітроколеса в цілому стосовно вітру та систему автоматичного управління. [7]. Узагальнена структурна схема таких ВЕУ зображена на рис. 2.6. До схеми входять аеродинамічний, механічний, електричний, перетворювальний модулі, а також модуль системи управління.

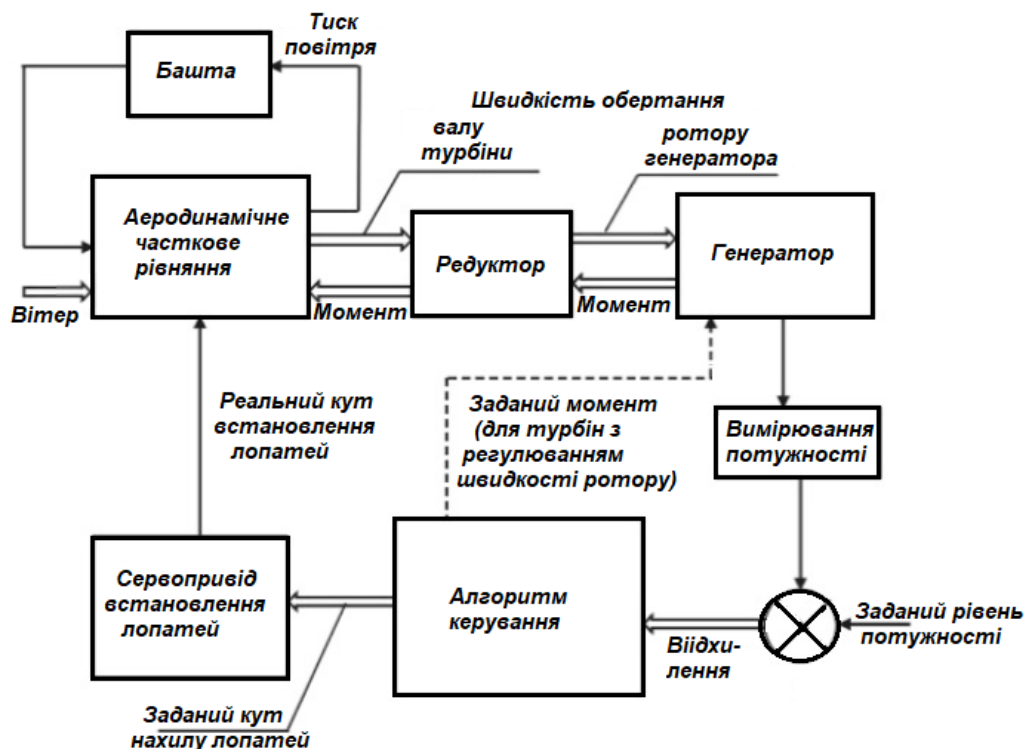


Рисунок 2.6 – Загальна структурна схема ВЕУ [7]

Функціональне призначення модулів ВЕУ та їх складові наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Функціональне призначення та складові модулів ВЕУ

Модуль	Складові модулю	Функції модулю
Аеродинамічний	Ротор з лопатями або вітродвигун	Перетворює кінетичну енергію вітру в механічну
Механічний	Гальмо, коробка передач, високошвидкісний і низькошвидкісний вали	Перетворює механічну енергію з метою отримання її параметрів, необхідних для роботи генератора
Електричний	Генератор	Перетворює механічну енергію в електричну
Перетворювальний	Інвертор, або аналогічні пристрої	Забезпечує отримання електричної енергії з заданими параметрами
Система управління	Анемометр, контролер, флюгер, привід гондоли та привід лопатей	Орієнтує вітроустановку на вітер з метою максимального використання його енергії

Встановлюються ВЕУ на спеціальних вежах, які при невеликій потужності найчастіше є циліндричною щоглою, або ґратчастою баштою. Вежа установки досить масивна, оскільки вона повинна витримувати значні вітрові навантаження, які зумовлені високою парусністю лопатей, а також безпосередньою дією вітру на неї. Враховуючи постійну дію вітрових зусиль, особливо при зміні швидкості вітру (від повного штилю до можливого урагану), при конструюванні ВЕУ вимушено закладається надмірна міцність, що викликає збільшення маси самої щогли та фундаментів.

Впливає на масу ВЕУ також матеріал лопатей, які можуть виготовлятися з дерева, алюмінію, склопластику і таке інше. Останнім часом з'явилась тенденція виготовлення лопатей із композитних матеріалів та скловолокна, тому що у них висока питома міцність і відносно невисока вартість. Крім того, у таких лопатей високі антикорозійні властивості та гарні показники «втомлюваності» при тривалій експлуатації.

Більшість конструкцій лопатей передбачають крутку та змінну хорду, але застосовуються і лопаті з постійною хордою та без крутки, що є найдешевшим способом виготовлення.

Інколи, з метою створення гладкої поверхні та зниження опору лопатей вітровому потоку застосовується їх покриття спеціальними синтетичними матеріалами. В цілому висновок стосовно конструкції лопатей може бути

наступний – має місце застосування різних форм лопатей із різних матеріалів, при врахуванні області застосування ВЕУ, її потужності та кваліфікації і можливостей виробників.

Суттєву роль у невеликих автономних ВЕУ відіграє можливість зміни кута установки лопатей, що забезпечує захист від недопустимого збільшення частоти обертання, а також створює можливість регулювання потужності. Водночас, можливість зміни кута установки ускладнює конструкцію ВЕУ та підвищує її вартість і знижує надійність. Тому для невеликих ВЕУ застосовуються лопаті з фіксованим кутом установки. [8]

Для ВЕУ пропелерного типу з горизонтальною віссю необхідна орієнтація стосовно вітрового потоку. Найпростіше це можливо здійснити за рахунок розміщення вітрової турбіни за баштою. За цих умов спостерігається стабільність роботи турбіни, а повороти за напрямом вітру відбуваються автоматично, але при цьому лопаті пересікають вихровий вітровий потік за баштою, що створює додаткові навантаження на лопаті та на всю конструкцію в цілому.

Найпростішим способом орієнтації на вітер є хвостова лопать, але при можливості краще застосувати віндрозу, яка забезпечує орієнтацію на вітер навіть при бурі. [8]

Для системи електричного живлення бювета має сенс застосувати ВЕУ пропелерного типу з горизонтальною віссю та орієнтацією стосовно вітрового потоку за допомогою хвостової лопаті.

2.3 Застосування магнітоелектричних машини для генерації електроенергії ВЕУ

Останнім часом в різноманітних галузях, таких як електротранспорт, авіаційна техніка, вентиляційні та насосні установки, робототехніка, відновлювана енергетика, автономні енергоустановки і таке інше набули поширення магнітоелектричні машини (МЕМ).

Часом їх появи вважають винайдення колеса Барлоу (1822 р.) та дискового генератора Фарадея (1831 р.). Конструктивне виконання цих машин показано на рис. 2.7.

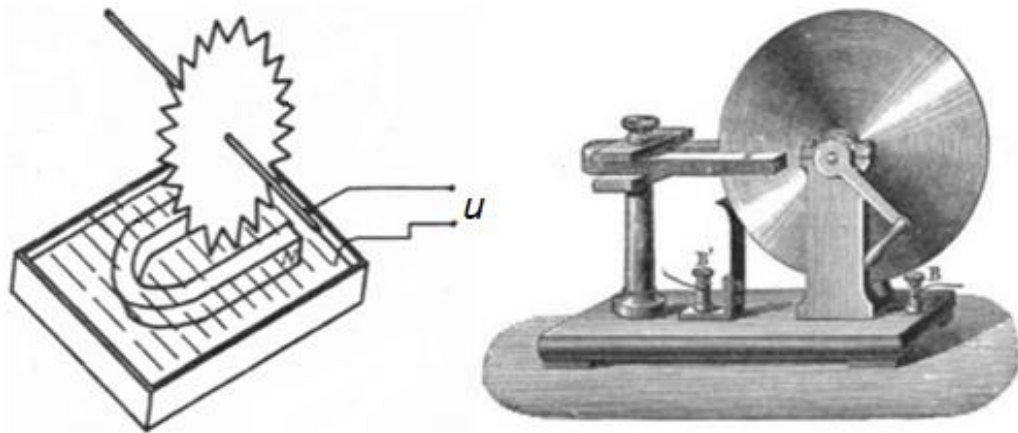


Рисунок 2.7 – Колесо Барлоу та диск Фарадея [9]

У 1842 р. з'явилась перша придатна для практичного застосування конструкція магнітоелектричного генератора, який використовувався для дистанційного підривання мін і показав гарні перспективи з нарощення потужності, шляхом об'єднання декількох машин в одну.

Найбільше застосування у 40-50-і роки XIX ст. отримав магнітоелектричний генератор (МЕГ) з трьома обертовими постійними магнітами.

В цей же період спостерігається розширення застосування дугових ламп, що викликало створення потужних МЕГ.

Організована в період з 1849 р. по 1856 роки в Парижі електропромислова компанія «Альянс» почала розробляти та випускати досить потужні МЕГ для живлення маяків. В них (рис. 2.8) на чавунній станині закріплені кілька рядів, розташованих радіально, підковоподібних постійних магнітів. Між ними на валу знаходяться диски з великою кількістю котушок, які виконували функцію якорів. Різні варіанти таких машин мали різну кількість рядів магнітів. На валу генератора монтувався колектор із металевих пластин, ізольованих, як одна від одної так і від валу. Струм від колектору відводився через спеціальні ролики, що виконували функцію сучасних щіток.

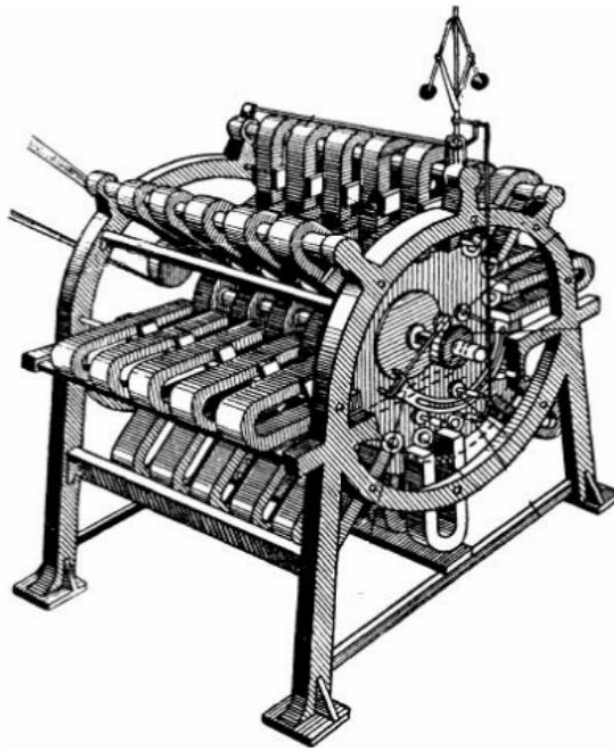


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд магнітоелектричного генератора «Альянс» [9]

Залежно від навантаження ролики переміщувалися за допомогою відцентрового регулятора з'єднаного з валом. Такий пристрій фактично є аналогом щіткової траверси. Маса генераторів «Альянс» була значною і становила 4 тони.

В експлуатації такі генератори виявили ряд недоліків, характерні для МЕМ загалом:

1. – Відсутність якісних матеріалів для постійних магнітів і технології виготовлення;
2. – Швидке розмагнічування магнітів під дією реакція якоря, природнього старіння та вібрацій, що зменшувало ЕРС генератора та його потужність;
3. – Прискорене старіння ізоляції, причиною якого стало нагрівання багат шарової обмотки стрижневих якорів внаслідок поганого тепловідводу;
4. – Значна маса та габарити при відносно невеликій потужності та висока вартість потужних генераторів;

5 – Наявність значних пульсацій вихідного струму характерних для МЕМ з явнополюсним якорем.

Вказані недоліки, особливо мала потужність постійних магнітів, сприяли поширенню МЕМ з електромагнітами, обмотки яких мали незалежне живлення від окремого джерела. Поява генераторів із самозбудженням, а також генераторів змінного та постійного струму з електромагнітним збудженням МЕМ поступово втратили актуальність. Поширення набули асинхронні машини та традиційні щіткові двигуни постійного струму.

Повернення до розробки МЕМ продовжилася в середині ХХ століття, зі створенням постійних магнітів з рідкісноземельних елементів які мали високу коерцитивну силу. Також цьому сприяв розвиток напівпровідникової та обчислювальної техніки, поява напівпровідникових контролерів, з допомогою яких регулювалась швидкість обертання з застосуванням датчиків Холла.

В період з 40-х до 70-х років були розроблені нові конструкції машин з застосуванням нових матеріалів для магнітів та відсутністю ковзних контактів.

Активізація розвитку МЕМ почалася в другій половині ХХ ст. В [9] наведені етапи розвитку МЕМ, як класу машин із комбінованим збудженням, у розрізі історії розвитку синхронних машин з електромагнітним збудженням, (Рис. 2.9). Найбільш активний розвиток магнітоелектричних систем почався на початку 1980-х років, зі збільшенням виробництва постійних магнітів та підвищенням вимог до енергоефективності систем.

Великою позитивною рисою МЕМ є те, що вони об'єднують переваги електричних машин з традиційним електромагнітним збудженням та збудженням від постійних магнітів.

Наразі МЕМ є однією з найбільш перспективних технологій для сучасних систем перетворення, виробництва та накопичення енергії. Вони використовуються в автомобілебудуванні, робототехніці, авіації та космічних системах, є елементами відновлюваних джерел енергії і таке інше.

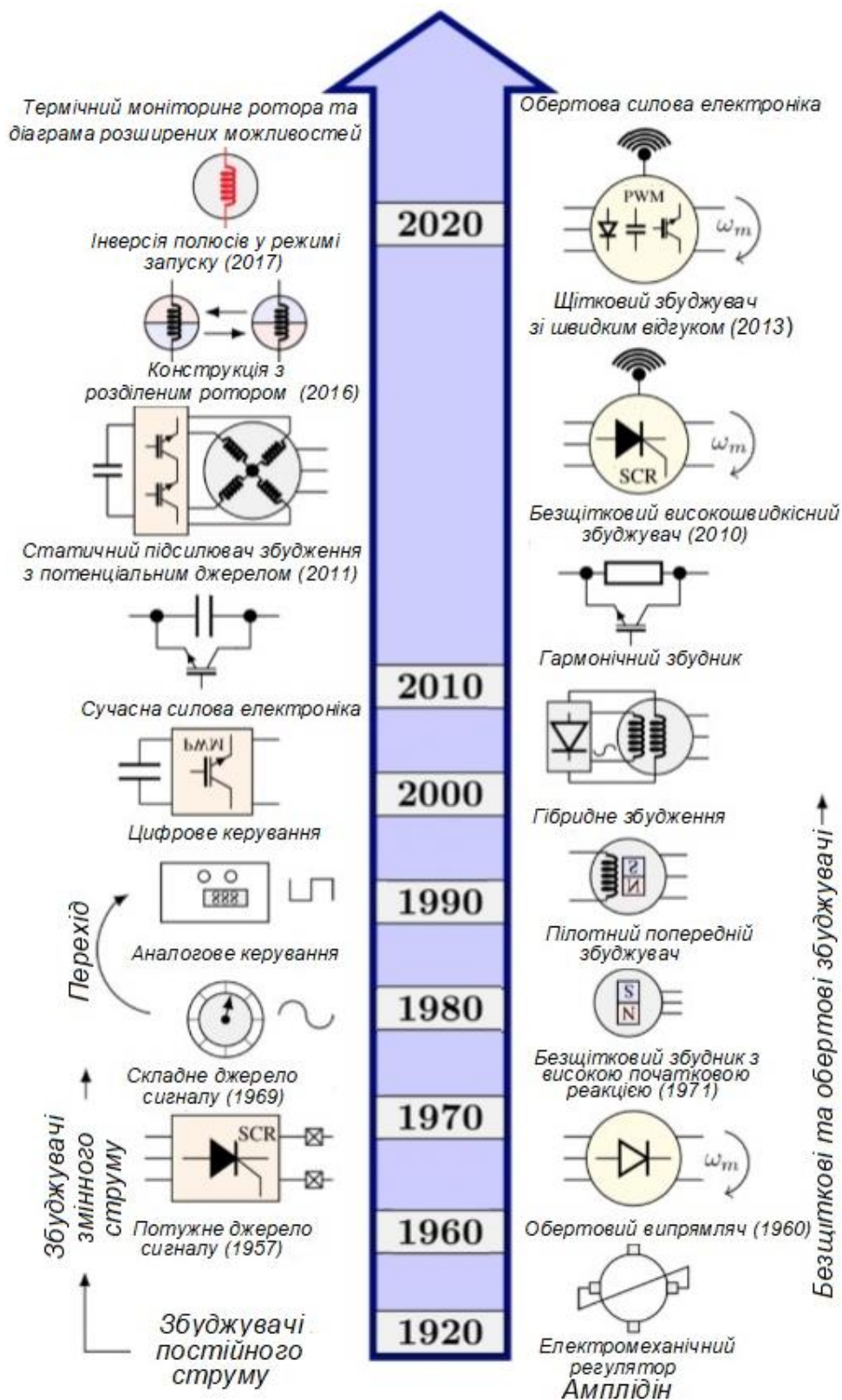


Рисунок 2.9 – Історична послідовність розвитку машин з обмоткою збудження [9]

Суттєвим фактором поширення МЕМ послужили простота конструкції та менші втрати порівняно з машинами електромагнітного збудження. Також системи генерування електроенергії з застосуванням цих машин мають менші

масу та габарити, відносно прості в обслуговуванні, що є важливим для автономних вітрових установок.

Серед різноманіття типів генераторів та варіантів систем генерації електроенергії найбільше задовольняють існуючі вимоги синхронні генератори зі збудженням від постійних магнітів (СГПМ).

Водночас ряд недоліків електричних машин з постійними магнітами, спричинених особливостями конструкції і недосконалістю магнітних матеріалів, обмежує більш широке їх застосування.

2.3.1 Узагальнена класифікація магнітоелектричних машин

В нормальному усталеному режимі роботи електричні машини зі збудженням від постійних магнітів мають практично постійний потік збудження, що змінюється в незначних межах під впливом навантаження. Але, для забезпечення зовнішніх характеристик генераторів, наприклад, вітроустановки, та регулювання вихідної напруги необхідна зміна магнітного потоку збудження в досить широкому діапазоні. Параметри постійних магнітів не змінюються, тому регулювання магнітного потоку в машинах з їх застосуванням виконується одним із методів:

1. – підмагнічуванням ярма статора чи ротора;
2. – застосуванням гібридного збудження;
3. – магнітним шунтуванням.

Найефективніше регулювання мають машини з гібридним збудженням, коли для збудження використовуються як постійні магніти так і електромагнітне збудження. В цьому разі за рахунок магнітного потоку постійних магнітів зменшується потужність обмотки збудження та зберігаються регульовальні властивості машини.

Класифікація MEM за типами збудження та типом електричних машин показана на рис. 2.10.

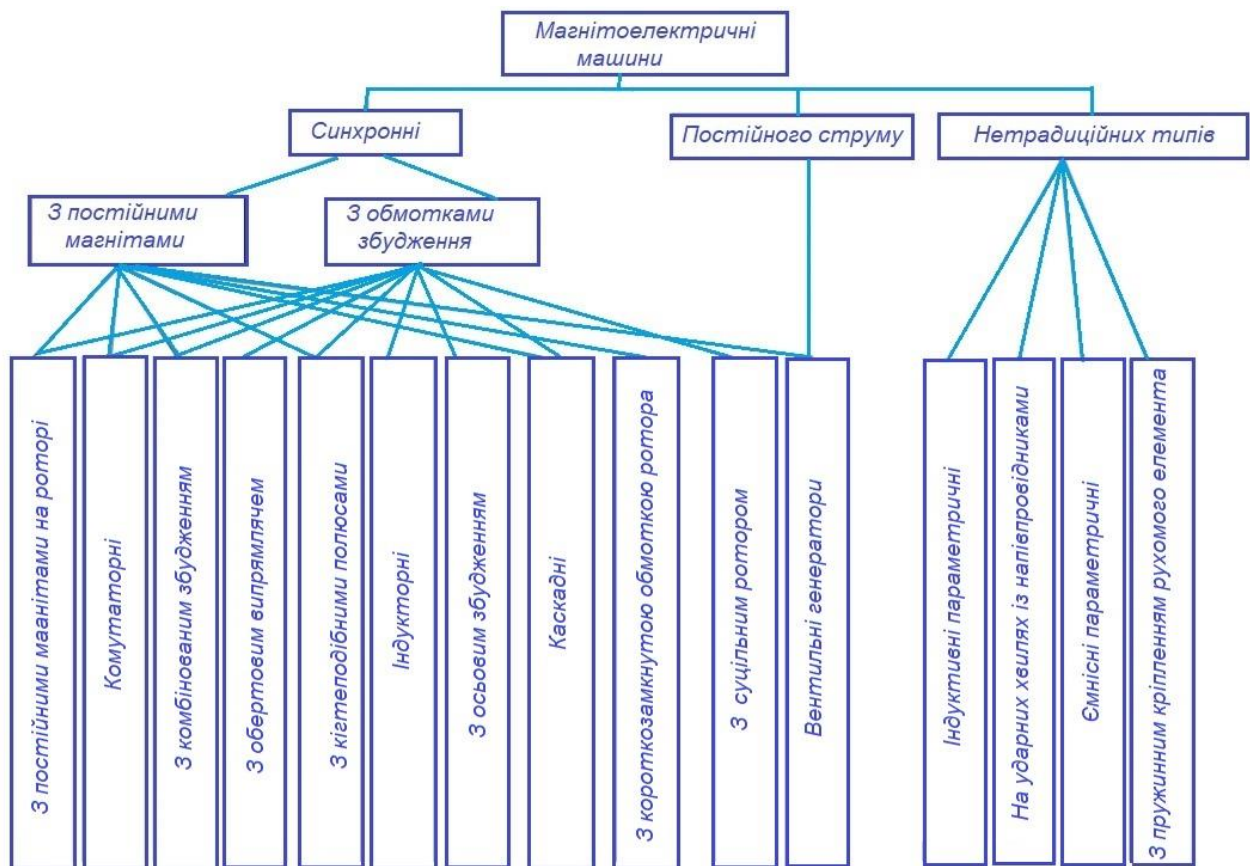


Рисунок 2.10 – Узагальнена класифікація магнітоелектричних машин [9]

Найбільш широко використовуються синхронні генератори з постійними магнітами та додатковою обмоткою підмагнічування.

За конструктивним виконанням найбільш поширені два варіанти конструкції MEM:

- циліндричні (з радіальним магнітним потоком);
- торцеві (з аксіальним магнітним потоком).

В машинах з аксіальним магнітним потоком має місце плоский повітряний проміжок, магнітна система – симетрична, а вектор нормальної складової магнітної індукції направлений уздовж осі симетрії. Власне ці ознаки вирізняють торцеві електричні машини з-поміж інших, для яких характерні циліндрична, плоска або інші форми активної поверхні. Окремі конструкції торцевих магнітоелектричних генераторів наведені на рис. 1.5.

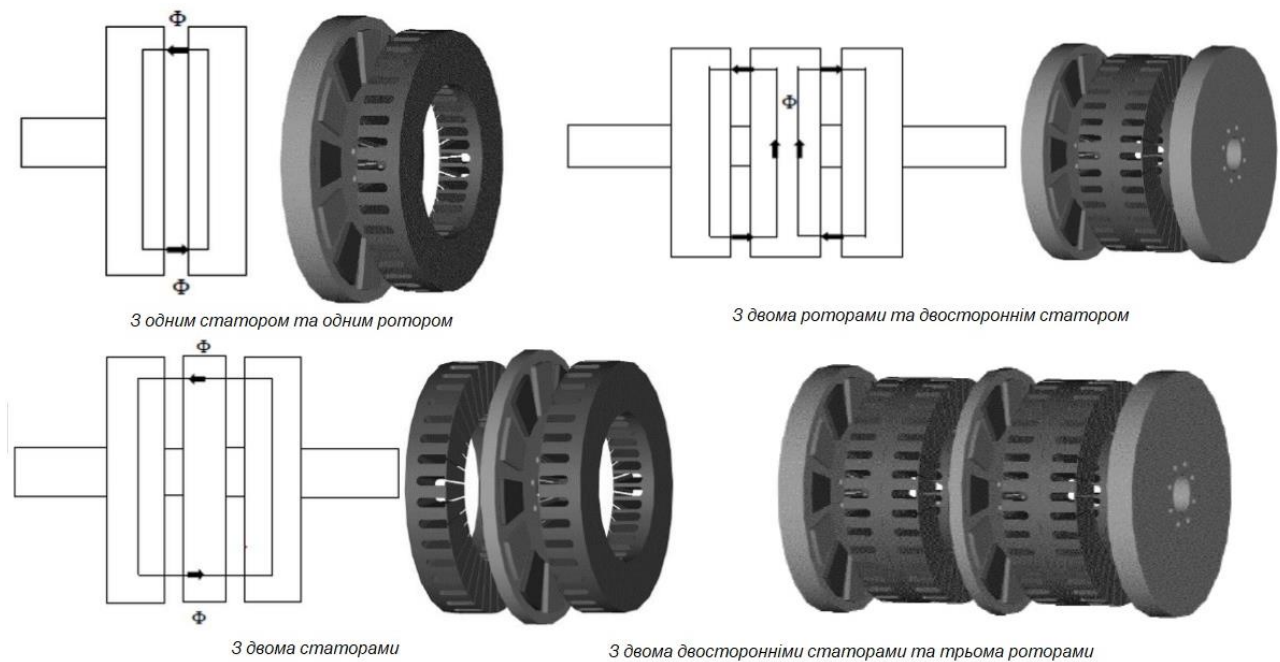


Рисунок 2.11 – Конструкції торцевих магнітоелектричних машин [9]

Конструкції машин на постійних магнітах з радіальним магнітним потоком показані на рис. 1.6.

Найбільш поширені машини такого типу із зовнішнім розташуванням статора та внутрішнім ротором, що є характерним для традиційних машин. Машини із зовнішнім ротором і внутрішнім статором (барабанного типу) добре підходить для механізмів в яких ротор може бути безпосередньо складовою частиною приводу (наприклад, мотор-колеса електромобілів).

Існує також конструкція машини з внутрішнім статором з тороїдальною намоткою і двома роторами. У такої машини істотно більший крутний момент, але ускладнений відвід тепла від внутрішнього статора, тому необхідна ефективна циркуляція повітря.

Окремі конструкції ротора показані на рис. 1.7.

Постійні магніти частіше використовуються накладні, але в деяких машинах вбудовуються в ротор. Накладні магніти застосовуються в машинах з невисокими оборотами тому, що вони кріпляться наклеюванням яке може пошкодитися при великих відцентрових силах. Механічна міцність можливо

підвищити за допомогою спеціального поясу, виготовленого зі скловолокна чи сталюого циліндра, який виготовляється з нержавіючої сталі.

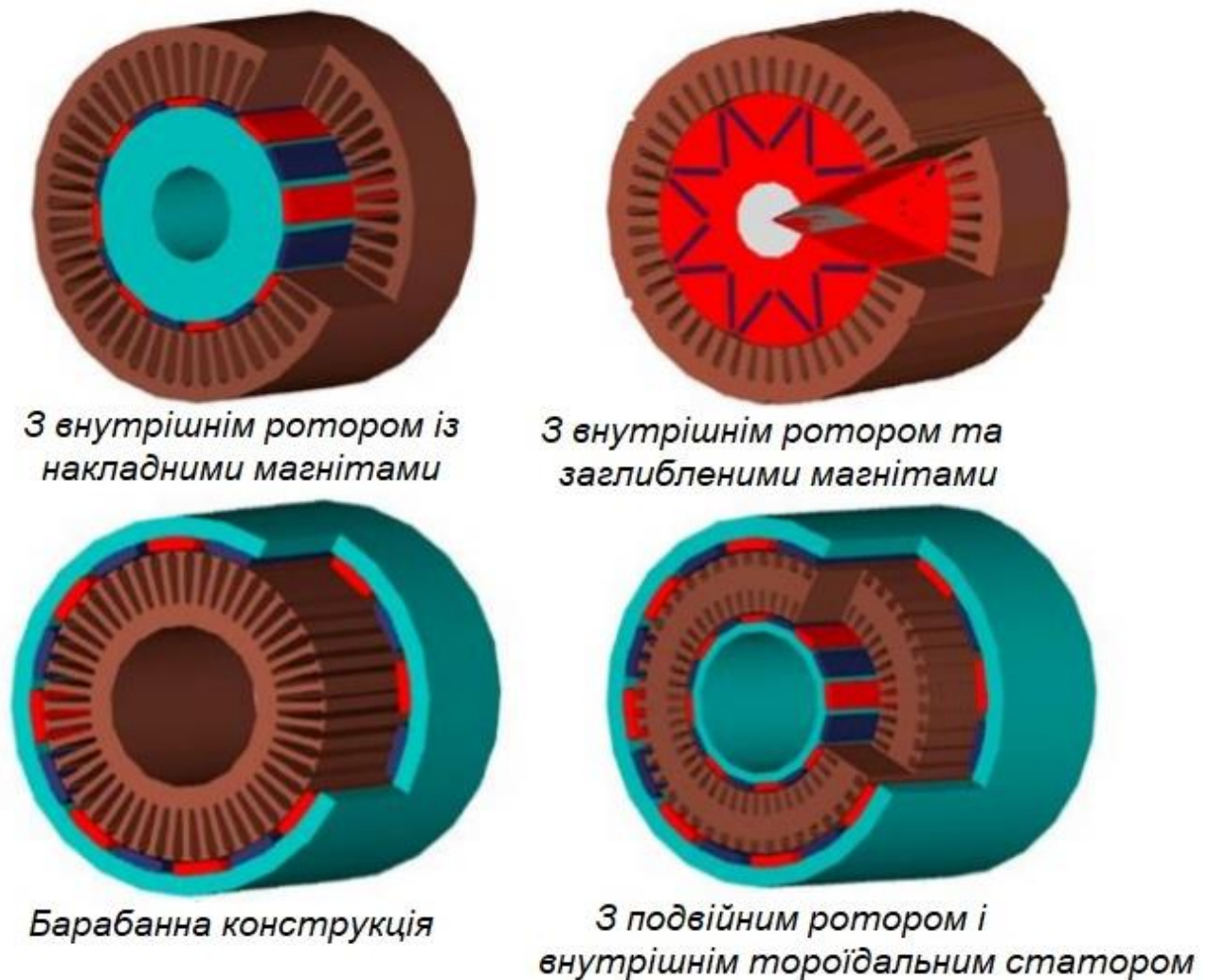


Рисунок 2.12 – Конструкції машин з радіальним магнітним потоком

З метою отримання синусоїдної форми магнітної індукції в повітряному зазорі застосовується спеціальна форма полюсів.

Конструкція роторів з вбудованими магнітами складніша технологічно, але не вимагає їх складної фіксації та дозволяє використання більш високих обертів. Разом з тим зменшується ризик розмагнічування магнітів, тому що вони оточені феромагнітним залізом і знаходяться відносно далеко від повітряного проміжку.

Проходження магнітних потоків розсіювання через торцеві частини сталі ротора викликає загальне збільшення розсіювання. Його можливо деякою мірою зменшити, але воно буде більшим ніж в накладних магнітах.

Загалом конструкція з накладними магнітами є простішою та технологічно зручнішою.

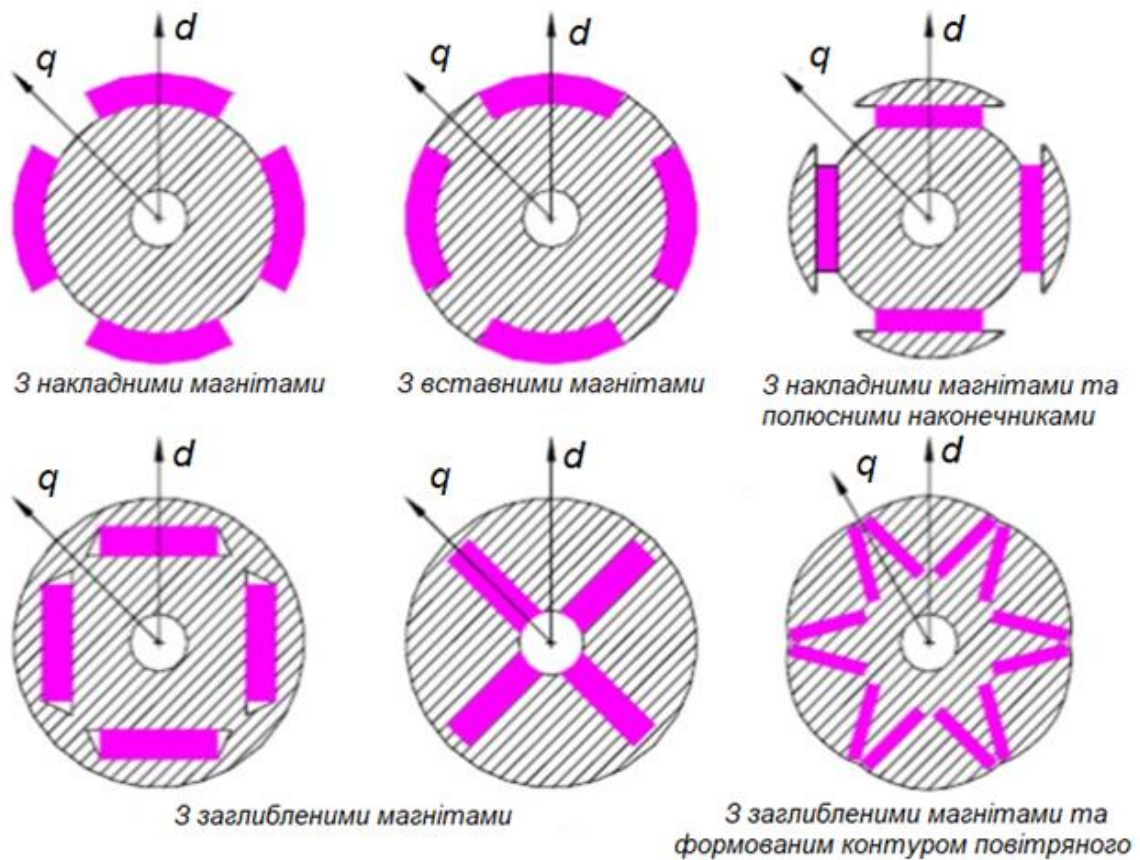


Рисунок 2.13 – Конструкція роторів магнітоелектричних машин

2.3.2 Регулювання напруги генераторів з постійними магнітами

За умови постійної швидкості обертання ротора стабілізація напруги генераторів з постійними магнітами можлива зміною магнітного опору магнітопроводу статора – спинки або зубців. Застосовується також регулювання за допомогою регулювання струму обмотки підмагнічування, розташованою рівномірно по всьому якорю (Рис. 1.8).

В робочому режимі така система керування підмагнічуванням споживає незначну потужність, а в режимі неробочого ходу споживання максимальне. Розглянутий метод стабілізації напруги має високу точність – $\pm 0,5\%$, недоліком є наявність вищих гармонік.

Плавне регулювання напруги при постійних обертах та навантаженні забезпечується підмагнічуванням спинки статора за рахунок зміни її магнітного насичення. Для цього може застосовуватися як змінний так і постійний струм.

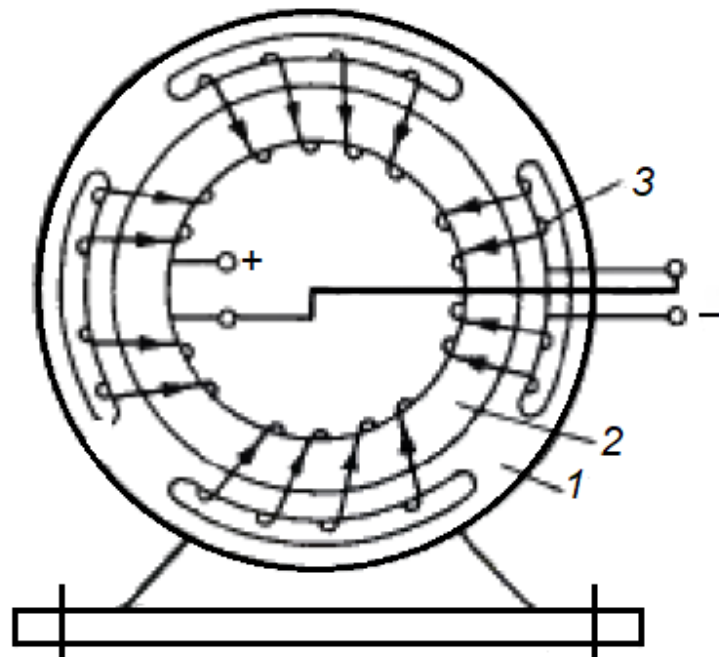


Рисунок 2.14 – Схема розташування обмотки підмагнічування:

1 – корпус генератора; 2 – магнітне осердя статора; 3 – обмотка підмагнічування

Магнітний потік підмагнічування замикається через осердя статора. Для його створення, доки сталь не насичена, потрібна невелика потужність, але при роботі, зі зростанням насичення магнітного кола, потужність також істотно зростає досягаючи навіть до 10% від повної потужності генератора.

При збільшенні навантаження генератора струм обмотки підмагнічування зменшують. Відповідно зменшується реактивна провідність контуру намагнічування, завдяки чому напруга генератора, в деяких межах зміни навантаження, є майже постійною.

Секції обмотки підмагнічування з'єднуються таким чином, щоб результуюча змінна ЕРС обмотки, яка наводиться обертовим магнітним полем, дорівнювала нулю.

Живлення обмотки підмагнічування відбувається від частини обмотки статора (Рис. 1.8), а регулювання підмагнічування здійснюється реостатом, ввімкненим в коло постійного струму обмотки збудження після випрямляча. Кількість обмоток збудження може різнитися.

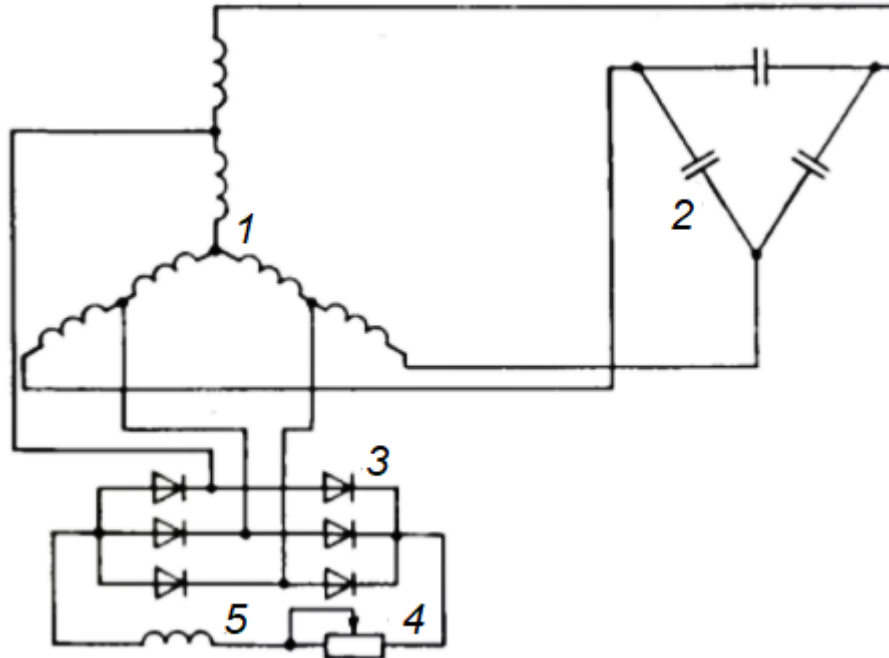


Рисунок 2.15 – Схема генератора з обмоткою підмагнічування що живиться від статора: 1 – трифазна обмотка статора; 2 – конденсатори підмагнічування; 3 – мостовий випрямляч; 4 – регулювальний реостат; 5 – обмотка підмагнічування [9]

Схема має деякі недоліки:

- необхідність виконання додаткових статорних обмоток;
- неможливість забезпечення стабільності напруги при широких межах зміни навантаження.

Стабілізувати вихідні параметри синхронного генератора з постійними магнітами можливо за допомогою підмагнічування сторонньою ємністю. При її приєднанні до обмотки якоря (послідовно чи паралельно) СГПМ переходить в режим перезбудження. Надлишок реактивної потужності збільшує напругу на виході генератора. Стабілізація напруги можлива для одного значення

навантаження (наприклад, номінального), або ступінчасто для різних значень, рис. 1.9.

За допомогою ємностей крім ступінчастого можливе і плавне регулювання.

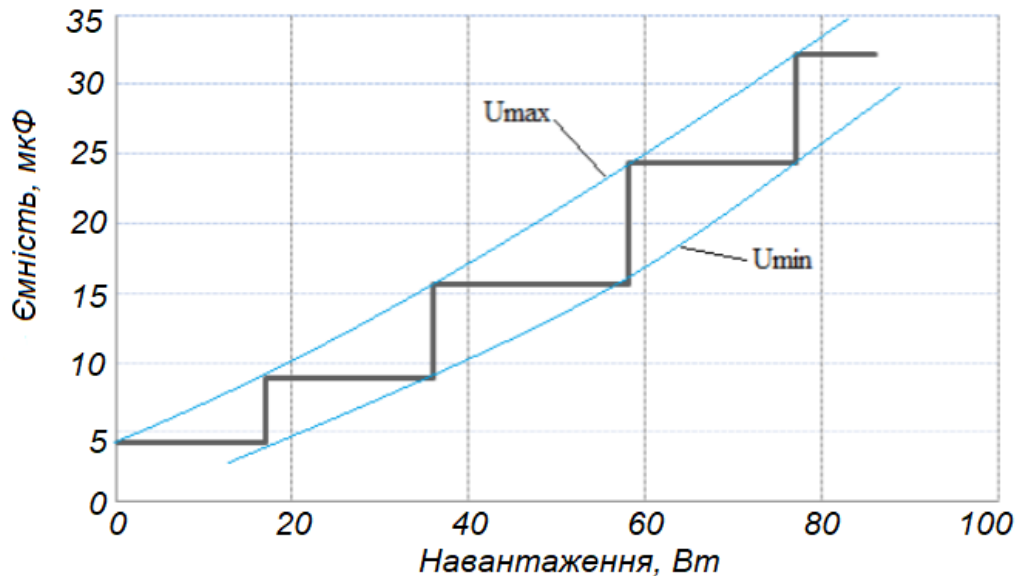


Рисунок 2.16 – Залежність величини ємності від навантаження за постійної напруги для генератора невеликої потужності [9]

Для цього в колі ємностей, які можуть бути ввімкненими як на фазну так і на лінійну напругу, вмикається активний опір (реостат), який дозволяє регулювати напругу на конденсаторах і, відповідно, на виході генератора.

Реактивна потужність конденсаторів для підтримання необхідної напруги при нерегульованих конденсаторах $C = \text{const}$, забезпечується підбором опорів та ємності конденсаторів, рис. 1.10, а.

Регулювання можливе з застосуванням трансформатора в якому змінюється коефіцієнт трансформації. Первинна обмотка такого трансформатора ввімкнена в обмотку якоря генератора, а до вторинної приєднані конденсатори (рис. 1.10,б).

Регулювання напруги за схемою, наведеною на рис. 1.10,а неекономічне внаслідок втрат енергії в реостатах, а на рис. 1.10, б – вимагає застосування спеціального трансформатора з потужністю близькою до потужності

генератора. Крім того, в цій схемі необхідна більша ємність конденсаторів для того, щоб компенсувати реактивну потужність трансформатора – звідси збільшення навантаження генератора реактивним струмом, додаткові втрати та нагрівання.

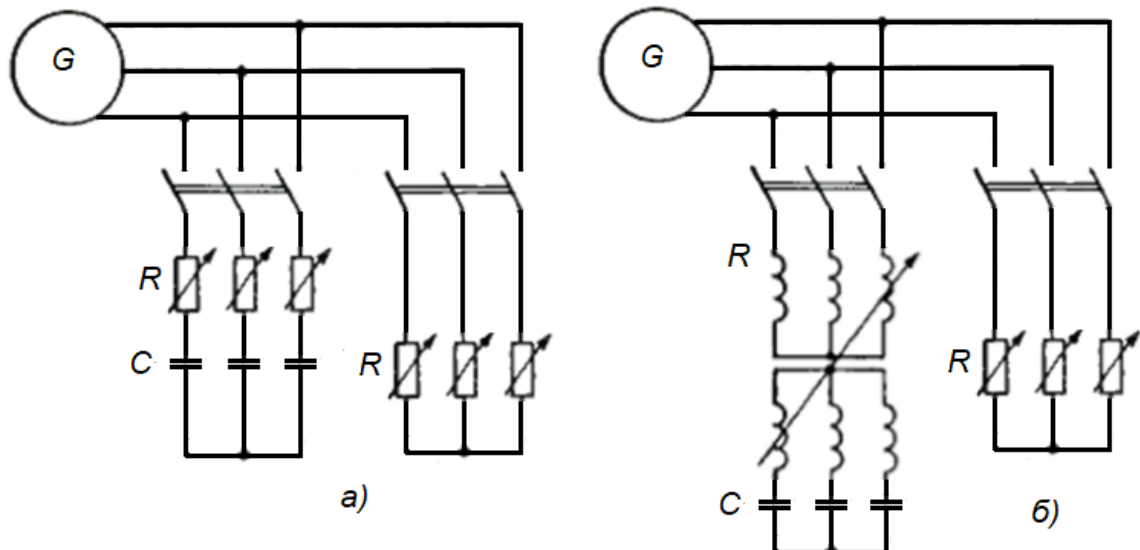


Рисунок 2.17 – Схеми регулювання напруги синхронного генератора за допомогою конденсаторів: а) – з активними опорами; б) – трансформатором із змінним коефіцієнтом трансформації [9]

Інколи з метою спрощення застосовують двоступеневу схему регулювання з двома батареями конденсаторів, рис. 1.11. Одна з них, C_1 , ввімкнена постійно, а C_2 вмикається при визначеному навантаженні.

У вказаній схемі недоліком є ступеневе регулювання, яке в разі змінного навантаження не забезпечує усталеність напруги, а також наявність силової комутаційної апаратури.

Більш ефективна та простіша схема стабілізації напруги за рахунок підтримання незмінної індуктивності контуру намагнічування шляхом зміни намагнічування ферорезонансним стабілізатором напруги, що є реактором зі змінною індуктивністю, рис. 1.12. Поєднання стабілізатора з батареєю конденсаторів постійної ємності забезпечує стабілізацію напруги при зміні навантаження в невеликих межах.

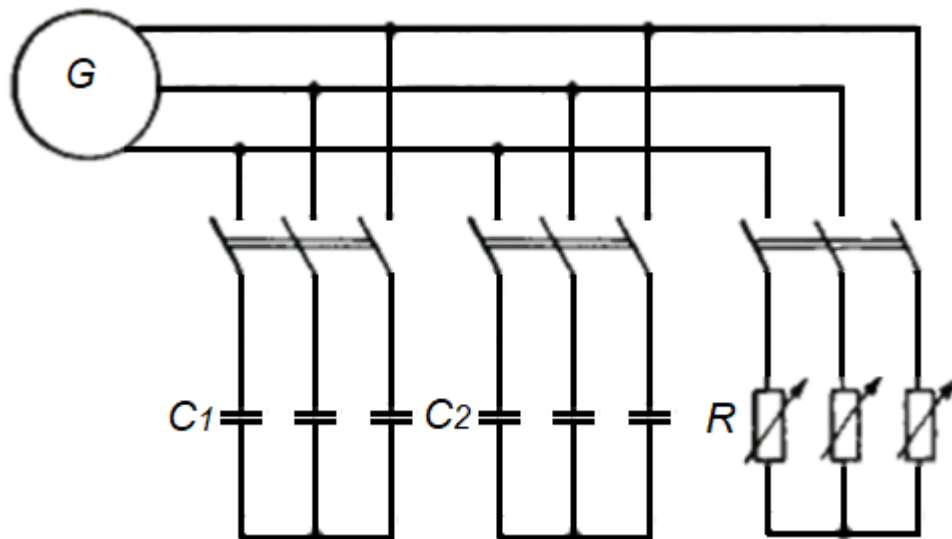


Рисунок 2.18 – Схема СГПМ з двоступеневим регулюванням ємності шунтувальних конденсаторів [9]

Схема з застосуванням ферорезонансного стабілізатора налаштовується на резонанс струмів при номінальній напрузі в режимі неробочого ходу.

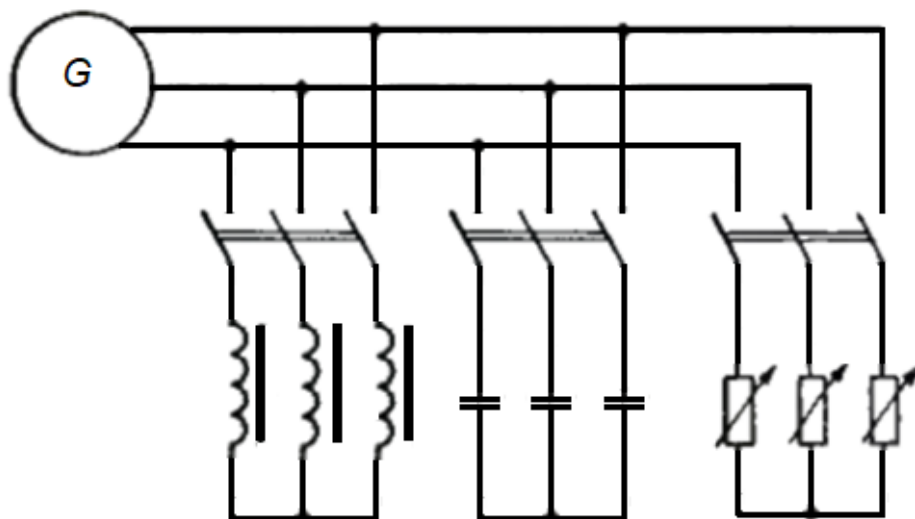


Рисунок 2.19 – Схема СГПМ з ферорезонансною стабілізацією напруги [9]

Недоліком методу є невеликий діапазон регулювання та необхідність застосування габаритного стабілізатора.

Стабілізацію та регулювання напруги за будь якого навантаження можливе при застосуванні безконтактних пристроїв до складу яких входять

конденсатори постійної ємності та керований реактор. Фактично ця схема є розвитком попередньої з ферорезонансним стабілізатором, рис. 1.13.

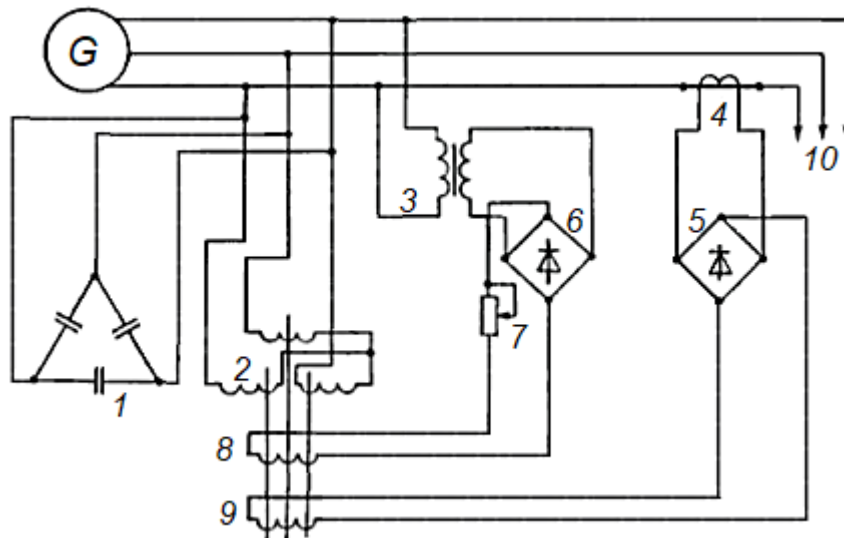


Рисунок 2.20 – Схема СГПМ з керованим реактором:

- 1 – конденсатори; 2 – обмотки змінного струму; 3 – трансформатор напруги;
4 – трансформатор струму; 5, 6 – випрямлячі; 7 – реостат; 8, 9 – обмотки управління; 10 – навантаження [9]

В схемі паралельно до конденсаторів приєднані обмотки змінного струму реактора, підмагнічування якого здійснюється двома диференційно ввімкненими обмотками управління. Одна з обмоток працює на намагнічення, а інша – на розмагнічення. Струм першої обмотки пропорційний напрузі на виході генератора, а другої – струмові навантаження.

В неробочому ході генератора осердя реакторів магнітно насичені, а по його обмотках змінного струму протікає найбільший струм. Струм на виході ділянки, утвореної обмотками змінного струму реактора та конденсаторами, ємнісний, і його значення достатнє для збудження генератора майже до номінальної напруги. Поява навантаження обмежує насичення осердя реактора, при цьому зростає індуктивний опір обмотки змінного струму. Струм на виході збільшується, а напруга генератора залишається стабільною.

Схема з керованим реактором забезпечує плавне, автоматичне регулювання ємності конденсаторів у всьому діапазоні зміни навантаження, але

не реагує на фазу напруги. Розвитком цієї схеми є застосування фазочутливих елементів.

Відносно новим методом регулювання напруги генераторів є магнітне шунтування робочого магнітного потоку. Для цього використовуються:

- параметрична стабілізація за рахунок вибору та зміни внутрішніх параметрів генератора, магнітні шунти, механічного переміщення окремих частин магнітопроводу стосовно одна одної;
- зовнішні елементи стабілізації та регулювання (конденсатори та дроселі насичення);
- напівпровідникові ключі на виході генератора, які періодично розривають зовнішнє коло генератора або періодично закорочують його якорну обмотку;
- комбіноване збудження від постійних магнітів та додаткових обмоток збудження (у цьому разі магнітоелектричний генератор переходить у новий клас електричних машин – комбінованого збудження);
- увімкнення на виході генератора напівпровідникового статичного перетворювача зі стабілізацією напруги та частоти.

Висновки за розділом 2

Враховуючи більш просту конструкцію та надійність, для отримання механічної енергії від вітру, передбачаємо застосування вітрової установки пропелерного типу з горизонтальною віссю та орієнтацією стосовно вітрового потоку за допомогою хвостової лопаті.

Як електричний генератор передбачається магнітоелектрична машина – синхронний генератор зі збудженням від постійних магнітів. З метою спрощення системи регулювання напруги передбачається встановлення на виході генератора статичних напівпровідникових перетворювачів для забезпечення необхідної якості електроенергії.

3 РОЗРАХУНОК ВІТРОВОЇ УСТАНОВКИ ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕНЕРАТОРА

3.1 Уточнення вітрових характеристик і вихідні дані для розрахунку вітрової установки

Загальновідомо, що зі збільшенням висоти вплив земної поверхні на швидкість і напрям потоків вітру зменшується, а їх швидкість зростає. На висоті 500 м вона майже вдвічі вища, ніж безпосередньо біля поверхні землі [7], а поривчастість менша. Зміна швидкості вітру з висотою взимку, як правило, більша.

Для отримання більшої кількості енергії вітрові колеса встановлюються на вежах, висота яких залежить від швидкості вітру, потужності вітрового двигуна, технологічних можливостей і таке інше. При розрахунках враховується, в основному, тільки швидкість вітру, оскільки напрямок вітру мало впливає на його використання.

В розділі 1 визначено, що середня швидкість вітру в місці розташування установки на висоті флюгера ($H_{\phi} = 10$ м) становить $v_{\phi} = 5$ м/с.

Вертикальна зміна швидкості вітру $v = f(H)$ для практичних розрахунків може бути визначеною за спрощеною формулою рекомендованою [6, 7]:

$$v = v_{\phi} \times \left(\frac{H}{H_{\phi}} \right)^{\alpha} \quad (3.1)$$

де: v – швидкість вітру на висоті розміщення вітроустановки (вежі), м/с;

v_{ϕ} – середня швидкість вітру на висоті флюгера, м/с;

H – висота щогли, $H = 20$ м;

H_{ϕ} – висота флюгера, $H_{\phi} = 10$ м;

α – емпіричний показник степені.

Величина α знаходиться в межах 0,143 до 0,3 [10], приймаємо $\alpha = 0,25$.

З графіку залежності $v = f(H)$, показаного на рис. 3.1, видно, що швидкість вітру на висоті 20 м становить 5,95 м/с.

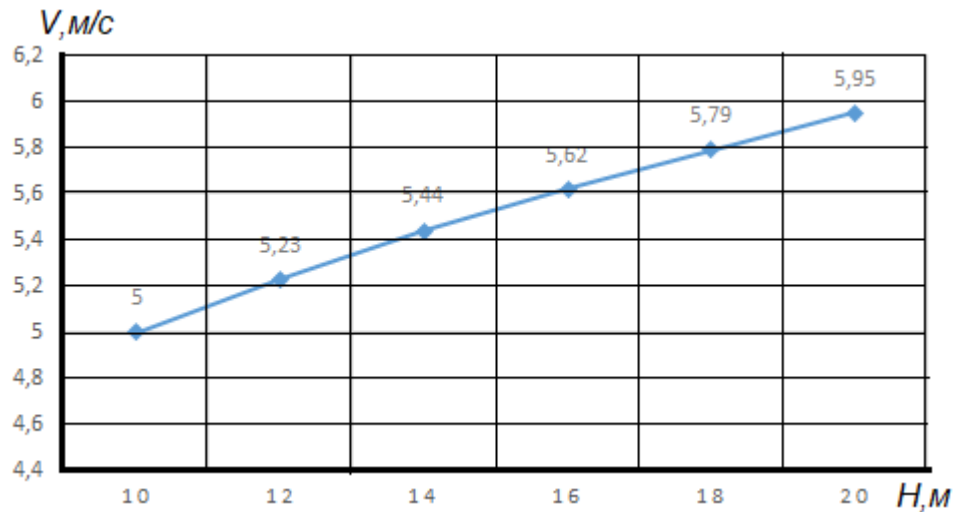


Рисунок 3.1 – Залежність швидкості вітрового потоку від висоти

Аеродинамічна потужність ВЕУ P_a визначається на підставі необхідної електричної потужності P_e , яка становить 3,5 кВт (Розділ 1). Ці величини пов'язані між собою коефіцієнтом використання енергії вітру ξ (КВЕВ):

$$P_e = \xi \cdot P_a, \text{ кВт} \quad (3.2)$$

Теоретичний максимальний КВЕВ є ідеальним і практично недосяжним у зв'язку з неминучістю втрат, тому для горизонтально-осьової вітрової установки, передбаченої для бювету, приймаємо реальний $\xi = 0,4$, хоча він змінюється в межах 0,25 – 0,47. Таким чином, необхідна аеродинамічна потужність ВЕУ повинна становити:

$$P_a = \frac{P_e}{\xi} = \frac{3,5}{0,4} = 8,75 \approx 9 \text{ кВт}. \quad (3.3)$$

Номінальна швидкість вітру визначається на основі середньої швидкості V_{cp} і знаходиться в межах $(1,25 - 2) \times V_{cp}$: [9]

$$V_H = (1,25 - 2)V_{cp}, \quad (3.4)$$

$$V_H = 1,7 \times 5,0 = 8,5 \text{ м/с.}$$

В цілому вихідні дані, необхідні для розрахунку ротора вітрової установки, зведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку ротора вітрової установки

Параметр	Значення
Аеродинамічна потужність вітроустановки, P_a , кВт	9,0
Середньорічна швидкість вітру, $V_{\text{ср}}$, м/с	5,0
Максимальна швидкість вітру в пориві, $V_{\text{пор}}$, м/с	25
ККД електричний, $\eta_{\text{ел}}$, відносних одиниць	0,85
ККД механічний, $\eta_{\text{мех}}$, відносних одиниць	0,9
Густина повітря при норм. атмосферних умовах, ρ , кг/м ³	1,29
Відносний радіус розміщення кореневого перерізу лопаті, $\bar{r}_0$, відносних одиниць	0,25
Число перерізів лопаті, n , шт.,	5
Число точок поділу інтервалу коефіцієнта гальмування для вибору оптимального значення, n_e , відносних одиниць	6
Відносна товщина профілю кореневого перерізу лопаті, $\bar{c}_{\text{корн}}$, відносних одиниць	0,20
Відносна товщина периферійного перерізу профілю лопаті, $\bar{c}_{\text{периф}}$, відносних одиниць	0,10

3.2 Визначення діаметра ротору вітрової установки, кількості лопатей та швидкості обертання

Енергія потоку вітру, який набігає на лопаті, а потім передається роторові (вітровому колесу) ВЕУ за 1 секунду, є аеродинамічною потужністю. Вона розраховується за формулою:

$$P_A = \frac{m \times v^2}{2} = \frac{\rho \times V \times v^2}{2} = \frac{\rho \times S \times v \times v^2}{2} = \frac{\rho \times S \times v^3}{2}, \quad (3.5)$$

де P_A – аеродинамічна потужність, Вт;

ρ – щільність сухого повітря, що проходить через ротор (приймається 1,2041 кг/м³ при температурі 20 °С та тиску 101,325 КПа), кг/м³;

v – швидкість потоку вітру до зустрічі з ротором, м/с;

m – маса повітря, що проходить за 1 секунду через ротор, кг;

V – те ж саме, але об'єм, м³;

S – для установок з горизонтальною віссю це площа проекції ротора на площину, перпендикулярну до осі обертання (обмахувана площа ротора), м².

З формули (3.3) обмахувана площа ротора S :

$$S = \frac{2 \times P}{\rho \times v^3} = \frac{2 \times 9500}{1,2041 \times 8,5^3} = 25,7 \text{ м}^2.$$

Досвід розробки ВЕУ показав, що обмаховану площу, з урахуванням поправки на реальний коефіцієнт використання вітру (65 – 67% від ідеального), слід збільшувати приблизно на 30%.

$$S_{\text{реал}} = S \times 1,33 = 25,7 \times 1,3 = 33,4 \text{ м}^2.$$

Діаметр ротора може бути визначеним з формули:

$$S = \frac{\pi \times D^2}{4} \text{ м}^2, \quad (3.6)$$

де D – діаметр ротора, м.

$$\text{Тоді з (3.3) і (3.4) діаметр ротора } D = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 33,4}{3,14}} = 6,52 \approx 7 \text{ м.}$$

Відповідно радіус становить $R = 3,5$ м.

Кількість лопатей ротора ВЕУ n визначається його швидкохідністю (модулями) Z , тобто відношенням лінійної швидкості кінця лопаті до швидкості вітру.

Поняття швидкохідності визначає ефективність роботи вітрового колеса. Якщо його лопаті розташовані досить густо, або вітрове колесо обертається з такою швидкістю, що кожна лопать проходить через турбулентний потік повітря від попередньої лопаті, то вітрове колесо має малу віддачу. Якщо ж лопаті розташовані не густо, чи вітроколесо обертається надто повільно, то частина потоку вітру проходить через поперечний переріз без взаємодії з лопатями. Таким чином, найбільша ефективність ВЕУ досягається тоді коли частота обертання ротора з певною кількістю лопатей якимось чином повинна відповідати швидкості вітру.

Для роторів з горизонтальною віссю n та Z зв'язані між собою рівнянням:

$$n = \frac{80}{Z^2} \text{ шт.} \quad (3.7)$$

Швидкохідність Z приймається на основі вимог до конструкції та досвіду проектування. При сильних вітрових потоках її збільшення дозволяє збільшити частоту обертання і є позитивним, а при малих високе значення швидкохідності знижує обертовий момент ротора, що негативно впливає на виробництво енергії.

В зоні розташування ВЕУ швидкість потоків вітру досить невисока, тому для швидкохідної установки, враховуючи рекомендації [10] приймати Z в межах 4,5 – 7, приймаємо $Z = 5$. Тоді за (3.5) кількість лопатей установки становитиме:

$$n = \frac{80}{Z^2} = 3,2 \text{ шт.}$$

З округленням до найближчого цілого числа приймаємо кількість лопатей $n = 3$. За цієї умови частота обертання ротора в об/хв. становитиме:

$$\omega_{\text{об/хв}} = \frac{60 \times Z \times v}{\pi \times D} = \frac{60 \times 5 \times 8,5}{3,14 \times 7,0} = 116 \text{ об/хв.} \quad (3.8)$$

Те ж саме в Гц: $\omega_{Гц} = \frac{\omega_{об/хв}}{60} = \frac{116}{60} = 1,93 \text{ Гц}$.

3.3 Вибір аеродинамічного профілю лопаті

Аеродинамічний профіль – це аеродинамічна конструкція, яка має вигляд витягнутого уздовж повітряного потоку перерізу з закругленою передньою та гострою задньою кромками. Вона може мати симетричну чи асиметричну кривизну. У вітровій енергетиці частіше використовують профілі з асиметричною кривизною. Наразі не існує чітких позначень та класифікації розроблених профілів [10]. На підставі експериментальних даних у відносних величинах будують характеристики ротора.

Для даної установки вибираємо профіль GOE–225, зовнішній вигляд якого показаний на рис. 3.2.

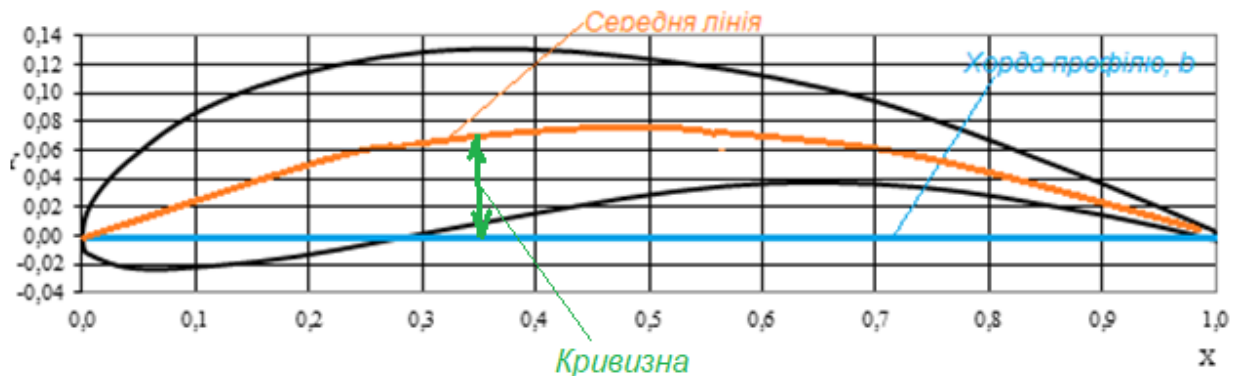


Рисунок 3.2 – Переріз профілю GOE–225 [11]

Аеродинамічні характеристики вибраного профілю наведені в табл. 3.2, а його безрозмірні координати – в табл. 3.3.

Таблиця 3.2– Аеродинамічні характеристики профілю GOE–225

Параметр		Кут атаки, $\alpha, ^\circ$	Коефіцієнт підйомної сили, C_{ya} , в. о.	Коефіцієнт зворотної аеродинамічної якості, μ_a , відн. од.
№ точки	1	-9°	0,036	0,375
	2	-6°	0,39	0,029487
	3	-3°	0,746	0,014477

Продовження таблиці 3.2

Параметр		Кут атаки, $\alpha, ^\circ$	Коефіцієнт підйомної сили, C_{ya} , в. о.	Коефіцієнт зворотної аеродинамічної якості, μ_a , відн. од.
№ точки	4	0°	1,004	0,010956
	5	3°	1,173	0,010315
	6	6°	1,303	0,012203
	7	9°	1,394	0,016141
	8	12°	1,448	0,01989
	9	15°	1,463	0,026179
	10	18°	1,439	0,034677
	11	20°	1,398	0,043634

Таблиця 3.3 – Безрозмірні координати профілю GOE-225 $\bar{y}_H = (\bar{y}_H/c)100\%$

Номер точки	$\bar{x} = (x/b)100\%$	$\bar{y}_H = (\bar{y}_H/c)100\%$	$\bar{y}_B = (\bar{y}_B/c)100\%$
1	0,000000	0,000000	0,000000
2	0,002013	- 0,010243	0,011270
3	0,008035	- 0,013491	0,022844
4	0,018019	- 0,017179	0,034372
5	0,031883	- 0,020887	0,046358
6	0,049516	- 0,022942	0,058311
7	0,070776	- 0,023356	0,071707
8	0,095492	- 0,022070	0,084154
9	0,123464	- 0,020322	0,094936
10	0,154469	- 0,017937	0,104581
11	0,188255	- 0,014533	0,112767
12	0,224552	- 0,009784	0,119600
13	0,263066	- 0,004074	0,125063
14	0,303488	0,002085	0,128937
15	0,345492	0,008207	0,130725
16	0,388740	0,014348	0,130782
17	0,432883	0,020549	0,129091
18	0,477568	0,026321	0,125849
19	0,522432	0,031183	0,121756
20	0,567117	0,034866	0,116803
21	0,611261	0,037068	0,110663
22	0,654509	0,037447	0,103439
23	0,696513	0,036513	0,095178
24	0,736934	0,034260	0,085079
25	0,775449	0,031068	0,074456
26	0,811745	0,026906	0,063631
27	0,845531	0,022255	0,053260
28	0,876536	0,017986	0,043744
29	0,904509	0,014001	0,035059
30	0,929224	0,009913	0,027015
31	0,950485	0,006382	0,020078
32	0,968117	0,003041	0,013996
33	0,981982	0,000414	0,009215

Продовження таблиці 3.3

Номер точки	$\bar{x} = (x/b)100\%$	$\bar{y}_H = (\bar{y}_H/c)100\%$	$\bar{y}_B = (\bar{y}_B/c)100\%$
34	0,991965	-0,001478	0,005771
35	0,997987	-0,002619	0,003694
36	1,000000	0,000000	0,000000

3.4 Визначення коефіцієнта гальмування, за якого коефіцієнт потужності має найбільше значення

Реальна величина вказаного коефіцієнта визначається за формулою:

$$\xi = \xi_i \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \bar{T}_J - \bar{T}_p - \bar{T}_o\right), \quad (3.9)$$

де ξ_i – ідеальний коефіцієнт потужності;

$\bar{T}_J$ – коефіцієнт який характеризує втрати на кінці лопаті (кінцеві втрати);

$\bar{T}_p$ – коефіцієнт профільних втрат;

$\bar{T}_o$ – коефіцієнт який вказує на втрати пов'язані з закрученням струменю;

$\frac{r_0}{R}$ – конструкційний параметр, який для ВЕУ з діаметром ротора до D=10 м становить 0,1 [10].

Ідеальний коефіцієнт потужності ξ_i розраховується за формулою:

$$\xi_i = 4 \times e \times \frac{1-e}{1+e}, \quad (3.10)$$

Значення e приймаються послідовно від 0,2 до 0,45 (0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4; 0,45), всього 6 значень.

Коефіцієнт кінцевих втрат визначається за формулою: [10, 11]

$$T_j = \frac{e}{1-e} \times \left(\frac{8 \times \sqrt{1 + \left(\frac{1-e}{Z}\right)^2}}{(1+e) \times i_{\text{л}} \times Z} - \left(\sqrt{1 + \left(\frac{i_{\text{л}} \times Z}{\pi \times \left(1 - \frac{e}{2}\right)} \right)^2} \right)^{-1} \right) \quad (3.11)$$

Відповідно коефіцієнт профільних втрат $\bar{T}_p$ визначається за формулою:

$$\bar{T}_p = 2 \times \mu_{\text{аср}} \left(\frac{1-e}{Z} + \frac{Z}{3 \times (1-e)} \right), \quad (3.12)$$

де $\mu_{\text{аср}} = 0,01989$ – середній коефіцієнт зворотної аеродинамічної якості для даного профілю.

Коефіцієнт втрат пов'язаних із закрученням струменю повітря $\bar{T}_o$ визначається за формулою:

$$\bar{T}_o = \frac{\xi_i \times \eta_i^2}{2 \times Z^2} \ln \frac{R}{r_o}, \quad (3.13)$$

$$\text{де } \eta_i \approx \frac{1 - \mu_{\text{аср}} \times Z}{1 + \frac{\mu_{\text{аср}}}{Z}} = \frac{1 - 0,01989 \times 3}{1 + \frac{0,01989}{3}} = 0,934.$$

$z_{\text{сер}} = \frac{1+r_0}{2} \times Z_R = \frac{1+0,2}{2} \times 5 = 3,0$ – z – середній вздовж лопаті коефіцієнт швидкохідності.

Для прикладу розраховуємо величини за формулами (3.10), (3.11) (3.12) (3.13) та (3.9) для $e=0,2$.

$$\xi_i = 4 \times 0,2 \times \frac{1-0,2}{1+0,2} = 0,533.$$

$$T_j = \frac{0,2}{1-0,2} \times \left(\frac{8 \times \sqrt{1 + \left(\frac{1-0,2}{5}\right)^2}}{(1+0,2) \times 3 \times 5} - \left(\sqrt{1 + \left(\frac{3 \times 5}{3,14 \times \left(1 - \frac{0,2}{2}\right)} \right)^2} \right)^{-1} \right) = 0,055.$$

$$\bar{T}_p = 2 \times 0,01989 \left(\frac{1-0,2}{5} + \frac{5}{3 \times (1-0,2)} \right) = 0,105.$$

$$\bar{T}_0 = \frac{0,533 \times 0,934^2}{2 \times 3^2} \ln \frac{3,5}{0,2} = 0,015.$$

$$\xi = \xi_i \left(1 - \frac{r_0^2}{R^2} - \bar{T}_j - \bar{T}_p - \bar{T}_0\right) = 0,533 \left(1 - \frac{0,2^2}{3,5^2} - 0,055 - 0,105 - 0,015\right) = 0,423.$$

Результати всіх обчислень зведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати розрахунку для різних значень e

Параметр	Номер точки					
	1	2	3	4	5	6
Коефіцієнт гальмування потоку, e	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45
Коефіцієнт ідеальної потужності, ξ_i	0,533	0,6	0,646	0,674	0,686	0,683
Коефіцієнт кінцевих втрат, $\bar{T}_j$	0,066	0,084	0,102	0,123	0,146	0,172
Коефіцієнт профільних втрат, $\bar{T}_p$	0,089	0,094	0,100	0,107	0,115	0,125
Середній вздовж лопаті коефіцієнт швидкохідності, $Z_{\text{сер}}$	3	3	3	3	3	3
Середній вздовж лопаті ККД, η_i	0,921	0,916	0,911	0,904	0,897	0,888
Коефіцієнт втрат на закручення струменю повітря, $\bar{T}_0$	0,015	0,016	0,017	0,018	0,018	0,017
Коефіцієнт потужності попередній, $\xi_{\text{поп}}$	0,421	0,459	0,478	0,480	0,467	0,441

За даними табл. 3.4 на рис. 3.3 побудований графік залежності коефіцієнта потужності від коефіцієнта гальмування

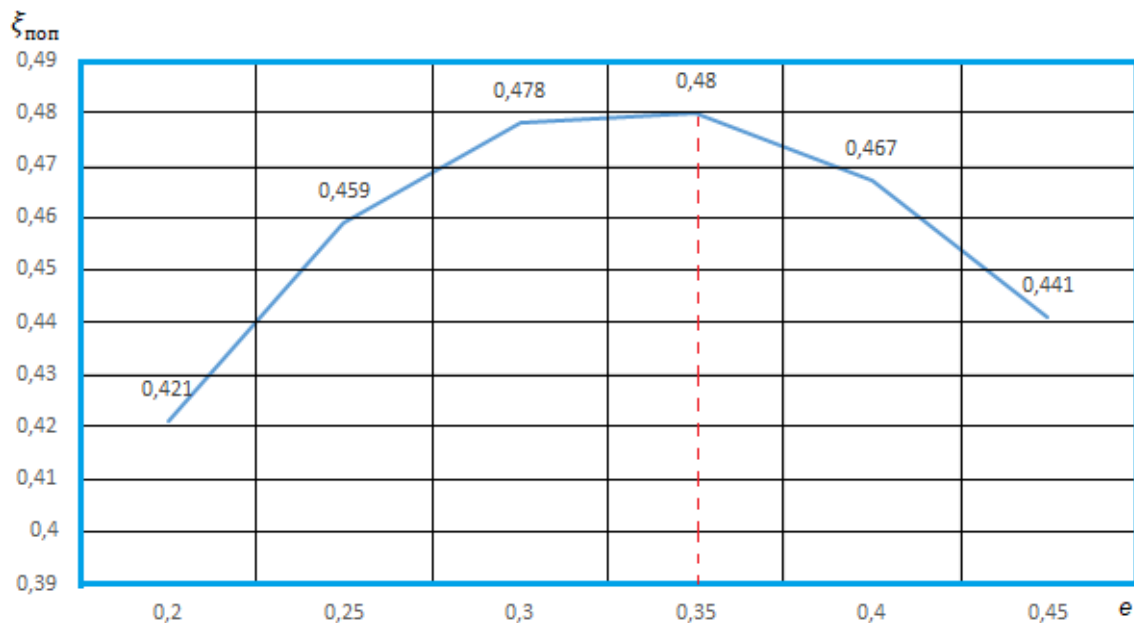


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта потужності від коефіцієнта гальмування

З графіка видно, що максимальне значення коефіцієнт потужності має при коефіцієнті гальмування 0,35.

3.5 Розрахунок лопаті

Важливим параметром лопаті є величина її хорди. Хорда – це пряма лінія, що з'єднує носик профілю з його кінцевою точкою. Величина хорди впродовж лопаті може бути як постійною так і змінною. Для малих ВЕУ приймають профіль лопаті з хордою змінної довжини, яка залежить від відстані визначеної точки до комелю (кореня). Величина хорди розраховується за виразом:

$$b = \frac{16 \times \pi \times R \times \left(\frac{R}{r}\right)}{9 \times Z^2 \times i_{\text{л}}}, \quad (3.14)$$

де r – відстань від осі обертання до визначеної точки лопаті, яка змінюється в межах $0 < r < R$.

Наприклад, довжина змінної хорди на кінці лопаті (100 % довжини, $l = 3,5$ м) становить:

$$b_{\text{к}} = \frac{16 \times 3,14 \times 3,5 \times \left(\frac{3,5}{1 \times 3,5}\right)}{9 \times 5^2 \times 3} = 0,26 \text{ м.}$$

Для інших точок лопаті, розташованих відповідно на відстанях $r_1 = 0,2R = 0,7$ м; $r_2 = 0,4R = 1,4$ м; $r_3 = 0,6R = 2,1$ м; $r_4 = 0,8R = 2,8$ м, довжини хорди становлять 1,3 м, 0,65 м; 0,43 м; 0,33 м.

Зазвичай хорда на кінці лопаті в швидкохідних роторах приблизно становить 0,038 від діаметра ротора D , тобто: $b_{\text{к}} = 0,038 \times D = 0,038 \times 7 = 0,266$ м. Розраховане значення $b_{\text{к}} = 0,26$ м практично відповідає отриманому результату.

3.5.1 Визначення відносної товщини перерізів лопаті [10,11]

Відносна товщина профілю GOE-225 в комлевому перерізі становить 20%, тобто $\bar{c}_{\text{комл}} = 0,2$, а в кінцевому – $\bar{c}_{\text{кінц}} = 0,1$.

Відносна товщина, $\bar{c}_k$ інших перерізів визначається виразом:

$$\bar{c}_k = \bar{c}_{\text{комл}} + \frac{(\bar{c}_{\text{кінц}} - \bar{c}_{\text{комл}})(k-1)}{n-1}, \quad (3.15)$$

де $\bar{c}_{\text{комл}} = 0,2$;

$\bar{c}_{\text{кінц}} = 0,1$;

n – кількість перерізів лопаті, $n = 5$;

$k = 1, 2, 3, 4, 5$ – номер перерізу.

Для другого перерізу за (2.18): $\bar{c}_2 = 0,2 + \frac{(0,1-0,2)(2-1)}{5-1} = 0,18$, для третього аналогічно $\bar{c}_3 = 0,15$; для четвертого $\bar{c}_4 = 0,13$.

За відносними величинами товщини профілів розраховуються їх розмірні параметри:

$$c_k = \bar{c}_k \times b_k, \quad (3.16)$$

де $\bar{c}_k$ – відносна товщина перерізу;

b_k – хорда перерізу, м.

Для комлевого перерізу $c_{\text{комл}} = \bar{c}_{\text{комл}} \times b_{\text{комл}} = 0,2 \times 1300 = 260$ мм, для другого $c_2 = \bar{c}_2 \times b_2 = 0,18 \times 650 = 117$ мм, для третього – $c_3 = 65$ мм, для четвертого – $c_4 = 43$ мм, для кінцевого – $C_5 = 26$ мм.

Стосовно зовнішнього радіуса вітроколеса відносні хорди перерізів становлять: $\bar{b}_1 = 0,38$; $\bar{b}_2 = 0,19$; $\bar{b}_3 = 0,12$; $\bar{b}_4 = 0,09$; $\bar{b}_5 = 0,07$.

3.5.2 Визначення коефіцієнтів швидкохідності, відносних модулів, коефіцієнтів сумарної напруженості перерізу лопаті

Коефіцієнти швидкохідності Z_k визначаються за виразом:

$$Z_k = Z_R \times \bar{r}_k, \quad (3.17)$$

де $Z_R = 5$ – попередньо визначене значення бистрохідності;

$\bar{r}_k$ – відносний радіус розміщення перерізу; $\bar{r}_1 = 0,2$, $\bar{r}_2 = 0,4$, $\bar{r}_3 = 0,6$, $\bar{r}_4 = 0,8$, $\bar{r}_5 = 1,0$.

Відповідно до (3.17) $Z_1 = 1,0$, $Z_2 = 2,0$, $Z_3 = 3,0$, $Z_4 = 4,0$, $Z_5 = 5,0$.

Відносні модулі перерізу Z_{ui} розраховуються за формулою:

$$Z_{ui} = Z_k \times \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{\xi_{id}}{Z_k^2}}}{2(1 - e_{opt})}, \quad (3.18)$$

де ξ_{id} – коефіцієнт ідеальної потужності, $\xi_{id} = 0,674$;

e – коефіцієнт гальмування потоку, $e = 0,35$

$$Z_{u1} = 1,0 \times \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{0,674}{1,0^2}}}{2(1 - 0,35)} = 1,76; \quad \text{відповідно} \quad Z_{u2} = 3,2; \quad Z_{u3} = 4,7; \\ Z_{u4} = 6,22; \quad Z_{u5} = 7,74.$$

Коефіцієнт сумарної напруженості перерізу визначається, як:

$$C_{напр\ i} = \frac{8\pi \times \bar{r}_k \times e_{opt}}{(1 + e_{opt})(1 - e_{opt})^2 (Z_{uk} + C_{ха\ min}) \times \sqrt{1 + Z_{uk}^2}}, \quad (3.19)$$

де $C_{ха\ min}$ – найменший коефіцієнт опору; $C_{ха\ min} = 0,010315$ (в. о.), (табл. 3.2).

Для першого перерізу коефіцієнт сумарної напруженості:

$$C_{\text{напр } 1} = \frac{8 \times 3,14 \times 0,2 \times 0,35}{(1+0,35)(1-0,35)^2(1,76+0,010315) \times \sqrt{1+1,76^2}} = 0,86$$

Другого – 0,573; третього – 0,409; четвертого – 0,314; п'ятого – 0,255.

3.5.3 Визначення кутів встановлення лопатей

Лопать стосовно вітру встановлюється під кутом Ψ , який залежить від кута набігання потоку β , а також від відстані r від комелю та змінюється вздовж лопаті. Кут визначається за формулою:

$$\Psi = \beta - \alpha, \quad (3.20)$$

де α – кут атаки лопаті вітровим потоком;

β – кути набігання вітрового потоку.

Кути атаки вітрового потоку α_k на перерізи лопаті визначаються за формулою:

$$\alpha_k = \alpha(i_k-1) + (\alpha(i_k) - \alpha(i_k - 1)) \times \frac{C_{yak} - C_{ya}(i_k-1)}{C_{ya}(i_k) - C_{ya}(i_k-1)}, \quad (3.21)$$

де $C_{yak} = \frac{C_{\text{напр } k}}{i_{\text{л}} \times \bar{b}_k}$ – коефіцієнт підйомної сили перерізу.

$$C_{yak1} = \frac{C_{\text{напр } 1}}{i_{\text{л}} \times \bar{b}_1} = \frac{0,86}{3 \times 0,38} = 0,75; \quad C_{yak2} = \frac{0,573}{3 \times 0,19} = 1,0; \quad C_{yak3} = \frac{0,409}{3 \times 0,12} = 1,14;$$

$$C_{yak4} = \frac{0,314}{3 \times 0,09} = 1,16; \quad C_{yak5} = \frac{0,255}{3 \times 0,07} = 1,21.$$

Елемента гілки характеристики C_{ya} повинен дорівнювати C_{yak} , або бути найближчим більшим за нього із масиву даних (табл. 3.2)

В першому перерізі визначений коефіцієнт підйомної сили $C_{yak1} = 0,75$, приймаємо $C_{ya1} = 0,746$, $i_1 = 3$; $C_{ya2} = 1,0$, приймаємо $C_{ya2} = 1,004$, $i_2 = 4$; $C_{ya3} = 1,14$, приймаємо $C_{ya3} = 1,173$, $i_3 = 5$; $C_{ya4} = 1,16$, приймаємо $C_{ya4} = 1,173$, $i_4 = 5$; $C_{ya5} = 1,21$, відповідно $C_{ya5} = 1,303$, $i_5 = 6$.

Тоді відповідно до (3.21):

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= -6 + (-3) - (-6) \times \frac{0,75-0,39}{0,746-0,39} = -2,97; \alpha_2 = -3 + (0+3) \times \frac{1,0-0,746}{1,004-0,746} = -0,05. \\ \alpha_3 &= 0 + (3-0) \times \frac{1,14-1,004}{1,173-1,004} = 2,41, \alpha_4 = 0 + (3-0) \times \frac{1,16-1,004}{1,173-1,004} = 2,77, \\ \alpha_5 &= 3 + (6-3) \times \frac{1,21-1,173}{1,303-1,173} = 3,87.\end{aligned}$$

Кут набігання вітрового потоку β розраховують як: [11]

$$\beta = \arctg\left(\frac{1}{Z_{uk}}\right) \quad (3.22)$$

$$\begin{aligned}\beta_1 &= \arctg\left(\frac{1}{Z_{u1}}\right) = \arctg\left(\frac{1}{1,76}\right) = 29,6^\circ; \\ \beta_2 &= \arctg\left(\frac{1}{Z_{u2}}\right) = \arctg\left(\frac{1}{3,2}\right) = 17,35^\circ \\ \beta_3 &= \arctg\left(\frac{1}{Z_{u3}}\right) = \arctg\left(\frac{1}{4,7}\right) = 12,01^\circ \\ \beta_4 &= \arctg\left(\frac{1}{Z_{u4}}\right) = \arctg\left(\frac{1}{6,22}\right) = 9,13^\circ \\ \beta_5 &= \arctg\left(\frac{1}{Z_{u5}}\right) = \arctg\left(\frac{1}{7,74}\right) = 7,36^\circ\end{aligned}$$

Відповідно кути встановлення лопаті Ψ будуть:

$$\Psi_1 = \beta_1 - \alpha_1 = 29,6 + 2,97 = 32,57; \Psi_2 = \beta_2 - \alpha_2 = 17,35 + 0,005 = 17,355;$$

$$\Psi_3 = \beta_3 - \alpha_3 = 12,01 - 2,41 = 9,6; \Psi_4 = \beta_4 - \alpha_4 = 9,13 - 2,77 = 6,36;$$

$$\Psi_5 = \beta_5 - \alpha_5 = 7,36 - 3,87 = 3,49.$$

Визначені параметри вітрового колеса зведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Параметри вітрового колеса

Параметри, позначення, одиниці вимірювання	Номер перерізу				
	1	2	3	4	5
Відносний радіус розміщення перерізу, $\bar{r}_k$, в. о.	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Радіус розміщення перерізу, r_k , мм	700	1400	2100	2800	3500
Відносна хорда (в частках зовнішнього радіусу, $\bar{b}_k$, в. о.	0,38	0,19	0,12	0,09	0,07
Розмірна величина хорди лопаті, b_k , мм	1330	650	430	330	260
Відносна товщина, перерізу $\bar{c}_k$, в. о.	0,2	0,18	0,15	0,13	0,1
Розмірна товщина перерізу, c_k , мм	260	117	65	43	26
Розрахунковий коефіцієнт підйомної сили, $C_{y_{ak}}$, в. о.	0,75	1,004	1,14	1,16	1,303
№ точки характеристики, i_k	3	4	5	5	6
Прийнятий коефіцієнт підйомної сили, $C_{y_{ak}}$, в. о.	0,746	1,004	1,173	1,173	1,303
Кут обтікання, β_k , градус	29,6	17,35	12,01	9,13	7,36
Кут атаки перерізу, α_k , градус	-2,97	-0,05	2,41	2,77	3,87
Кут встановлення лопаті, Ψ , град.	32,57	17,35	9,6	6,36	3,49

3.5.4 Визначення координат та побудова шаблонів профілів перерізів лопаті [11]

Для точного виготовлення лопатей використовують роз'ємні контрольні шаблони перерізів. Вони формуються на основі координат профілів вздовж лопаті, які розраховуються за безрозмірними координатами верхньої ($\bar{x}, \bar{y}_v$) та нижньої ($\bar{x}, \bar{y}_n$) дуг профілю GOE-225 (Табл. 2.3) шляхом перерахунку в розмірні:

$$x_i = \bar{x}_i \times \frac{b_1}{100}; y_{vi} = \bar{y}_{vi} \times \frac{c_1}{100}; y_{ni} = \bar{y}_{ni} \times \frac{c_1}{100}, \quad (3.23)$$

В перерізі комелю: $b_1 = 1330$ мм; $c_1 = 260$ мм. Розраховані значення для цього перерізу наведені в табл. 3.6.

Профіль шаблонів для п'яти перерізів показані на рис. 3.4 – 3.8. Зовнішній вигляд всіх перерізів однаковий, але розмірні параметри різні.

Таблиця 3.6 – Координати профілю комлевого перерізу лопаті
($b_1=1330$ мм; $c_1 = 260$ мм)

x, мм	Y _в , мм	Y _н , мм
2,7	0,00	0,0
2,7	-2,65	2,9
10,6	-3,51	5,9
23,9	-4,47	8,9
42,6	-5,43	12,1
65,8	-5,95	15,2
94,2	-6,08	18,6
127,0	-5,75	21,9
164,3	-5,28	24,7
205,5	-4,65	27,2
250,4	-3,77	29,3
298,7	-2,52	31,1
349,9	-1,07	32,5
403,7	0,55	33,5
459,5	2,13	34,0
517,0	3,72	34,0
575,8	5,33	33,6
635,2	6,84	32,7
694,8	8,11	31,7
754,2	9,07	30,4
813,0	9,65	28,8
870,5	9,75	26,9
926,3	9,49	24,8
980,1	8,92	22,1
1031,3	8,09	19,4
1079,6	6,99	16,5
1124,5	5,80	13,9
1165,7	4,68	11,4
1203,0	3,64	9,1
1235,8	2,57	7,0
1264,2	1,66	5,2
1287,6	0,78	3,6
1306,1	0,10	2,4
1319,4	-0,04	1,5
1328,3	-0,07	1,0
1330,0	0,00	0,0

Розрахунок координат профілів інших перерізів виконуються аналогічно.

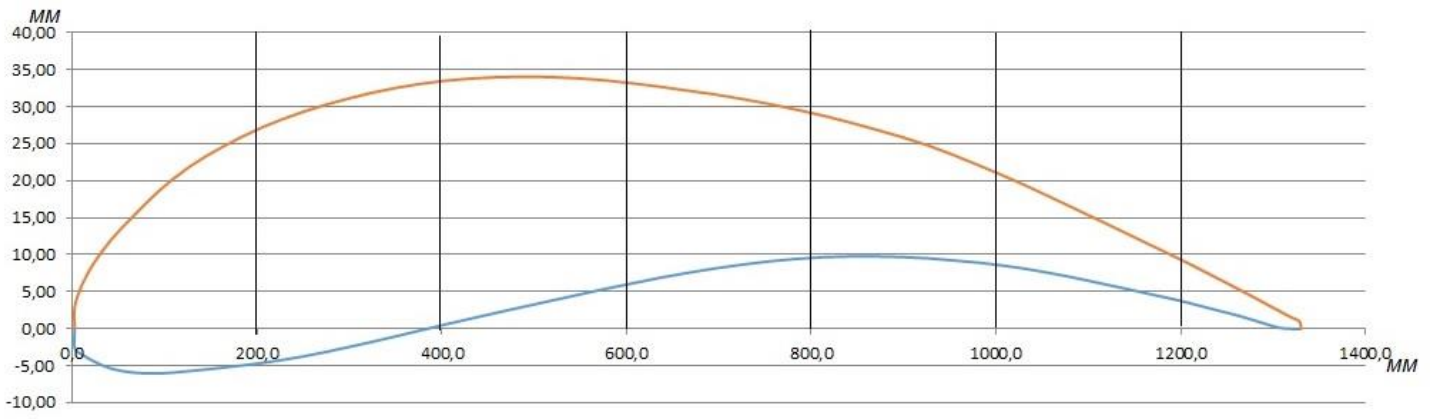


Рисунок 3.4 – Профіль перерізу комелю

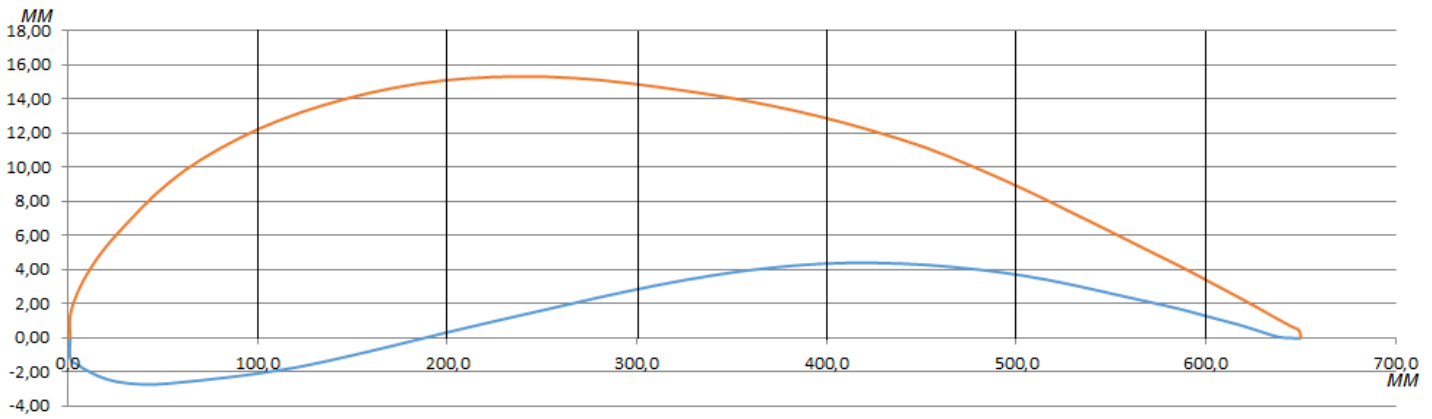


Рисунок 3.5 – Профіль другого перерізу

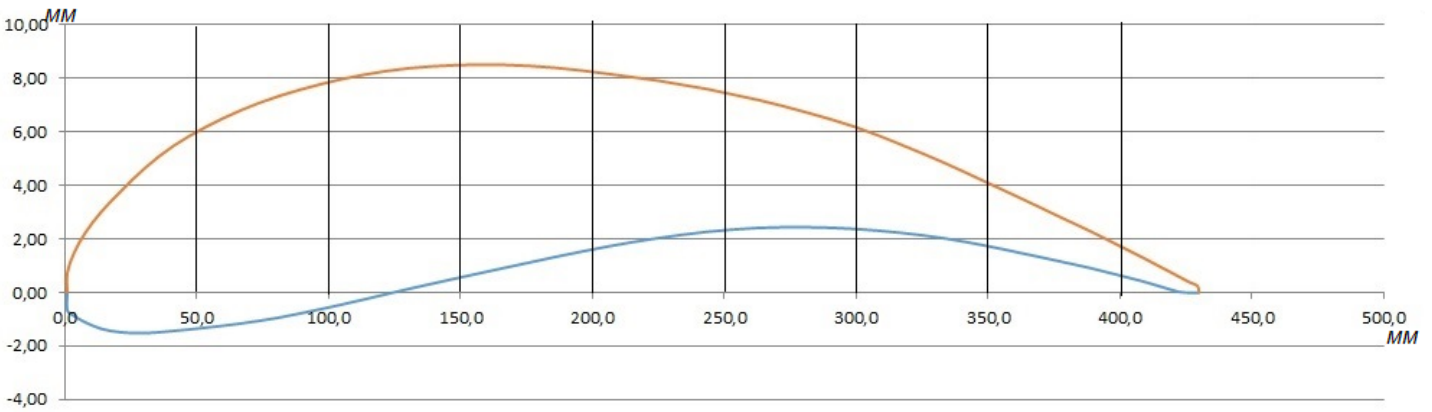


Рисунок 3.6 – Профіль третього перерізу

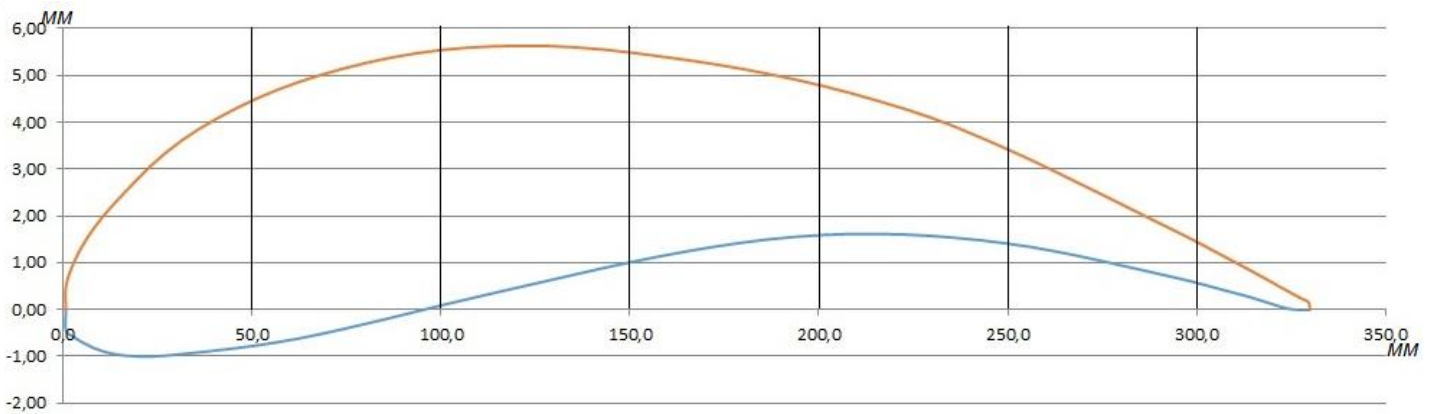


Рисунок 3.7 – Профіль четвертого перерізу

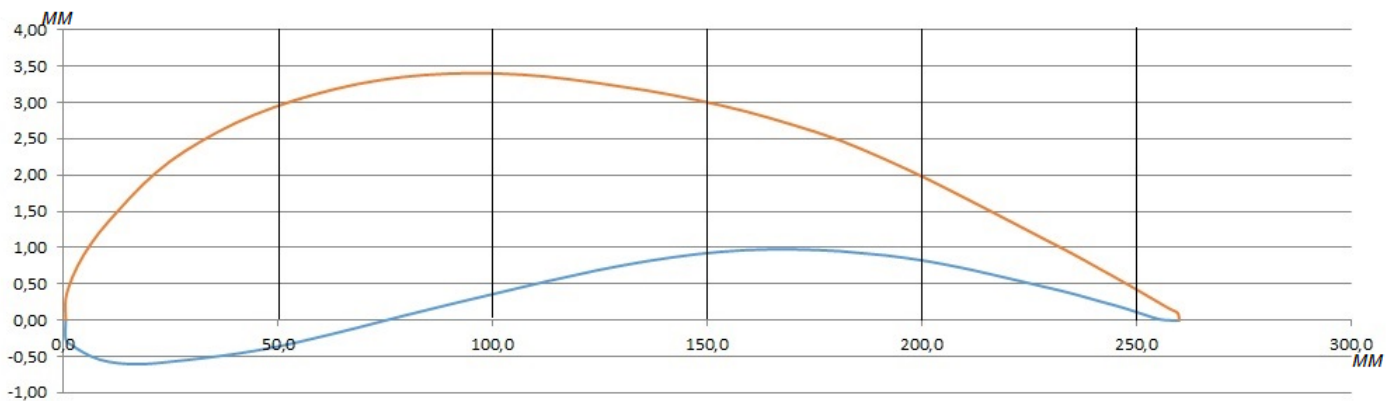


Рисунок 3.8 – Профіль кінцевого перерізу

3.6 Розрахунок електричного генератора вітроустановки

Максимальне навантаження бювета, розраховане в розділі 1, становить 3,5 кВт, номінальну потужність генератора $P_{\text{ном}}$ також приймаємо 3,5 кВт. Генератор передбачається трифазний, напруга 400/230 В, частота – $f = 50$ Гц. Номінальна швидкість обертання вітрового колеса становить 116 об./хв., але швидкості вітру в місці розташування загалом невисокі, тому приймаємо для генератора оберти $n = 100$ об./хв.

Розрахункова повна потужність генератора S_H , визначається за формулою:

$$S_H = \frac{K_e \cdot P_H}{\cos \varphi}, \quad (3.24)$$

де $K_e = \frac{E_H}{U_H}$ – відношення діючого значення ЕРС E_H , яка індукується в фазі обмотки статора генератора до фазної напруги; Коефіцієнт $K_e = 1,2 - 1,4$, приймаємо значення $K_e = 1,3$;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності, $\cos \varphi = 0,8$ з відставанням.

За (3.24) повна потужність генератора становить:

$$S_H = \frac{K_e \cdot P_H}{\cos \varphi} = \frac{1,3 \times 3,5}{0,8} = 5,7 \text{ кВА.}$$

Розрахункова частота обертання вітрового колеса $n = 100$ об./хв., тому для заданої частоти вихідної напруги $f = 50$ Гц кількість пар полюсів p магнітної системи генератора становитиме:

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{100} = 30 \text{ шт.}$$

Електромагнітний момент генератора:

$$M_e = \frac{S_H}{\omega}, \quad (3.25)$$

де ω – кутова частота обертання, $\omega = \frac{2 \times \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \times \pi \cdot 100}{60} = 10,47 \text{ рад./с.}$

$$M_e = \frac{5700}{10,47} \approx 545 \text{ Н} \times \text{м.}$$

Розрахунок внутрішнього діаметра статора D можливо виконати ґрунтуючись на формулі для визначення електромагнітного моменту, в яку входить діаметр:

$$M_e = \alpha_i \times A_{cp} \times B_{\delta \max} \times \pi \times D_p^3 \times \lambda, \quad (3.26)$$

де α_i – розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття; $\alpha_i = 0,7 \div 0,74$, $\alpha_i = 0,73$;

A_{cp} – лінійне магнітне навантаження статора, $A = 22 \times 10^3$ А/м; [11]

$B_{\delta \max}$ – найбільше значення магнітної індукції в повітряному зазорі, $B_{\delta} = 0,8$ Тл; [11]

λ – конструктивний коефіцієнт, який є відношенням активної довжини ротора генератора L_p до його діаметра $\lambda = \frac{L_p}{D_p}$. Значення коефіцієнта залежить від кількості пар полюсів, для СГПМ рекомендується $\lambda = 1,5$:

$$D = \sqrt[3]{\frac{M_e}{\lambda \pi \alpha_i B_{\delta} A}} \quad (3.27)$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{545}{1,5 \times 3,14 \times 0,73 \times 0,8 \times 22 \times 10^3}} = 0,21 \text{ м.}$$

За кількістю пар полюсів та діаметром визначаємо полюсний поділ τ :

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \quad (3.28)$$

де D – внутрішній діаметр статора;

p – кількість пар полюсів.

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3,14 \times 0,21}{2 \times 30} = 0,011 \text{ м.}$$

Розрахункова довжини статора l_{δ} визначається за формулою:

$$l_{\delta} = \frac{6,1 \cdot S'_H \cdot 10^3}{D_t^2 \cdot n \cdot K_{обм} \cdot K_{\phi} \cdot B_{\delta \max} \cdot A \cdot \alpha_i} \quad (3.29)$$

де $K_{обм}$ – обмотувальний коефіцієнт, приймаємо $K_{обм} = 0,92$;

K_{ϕ} – коефіцієнт форми поля, $K_{\phi} = 1,14 \div 1,16$, приймаємо $K_{\phi} = 1,15$.

$$l_{\delta} = \frac{6,1 \times 5,7 \times 10^3}{0,21^2 \times 100 \times 0,92 \times 1,15 \times 0,8 \times 22 \times 10^3 \times 0,73} = 0,58 \text{ м.}$$

Зовнішній діаметр статора D_a значення визначається за виразом:

$$D_a = K_d \times D_i, \quad (3.30)$$

де $K_d = f(p)$ приймаємо відповідно до табл. 2.4 [11], $K_d = 1,25$.

Розраховане значення діаметра округлюється до нормалізованого згідно з табл. 2.5 [11]. За (3.30) $D_a = 1,25 \times 0,21 = 0,26 \text{ м}$, приймаємо нормалізований зовнішній діаметр статора СГПМ $0,28 \text{ м}$. Відповідно до визначеного діаметра уточнюється полюсний поділ $\tau = \frac{3,14 \times 0,28}{2 \times 30} = 0,015 \text{ м}$.

3.6.1 Розрахунок магнітопроводу та обмотки статора

В режимі неробочого ходу розрахунковий магнітний потік полюсу визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \Phi_{\delta 0} &= B_{\delta 0} l \tau \alpha_i; \\ \Phi_{\delta 0} &= 0,8 \times 0,58 \times 0,015 \times 0,73 = 0,005 \text{ Вб.} \end{aligned} \quad (3.31)$$

ЕРС неробочого ходу за природної стабілізації напруги:

$$E_0 = k_e U_{\phi} = 1,2 \times 230 = 276 \text{ В;}$$

Кількість витків w_{ϕ} у фазі обмотки статора попередньо визначається, як:

$$w_{\phi} = \frac{E_0}{4k_{\phi} k_0 f \Phi_{\delta 0}}, \quad (3.32)$$

$$w_{\phi} = \frac{276}{4 \times 1,15 \times 0,92 \times 50 \times 0,005} = 260,8 \text{ витки, приймаємо } w_{\phi} = 260 \text{ витків.}$$

Номинальний струм фази, А:

$$I_{\text{нф}} = \frac{S_{\text{н}}}{mU_{\text{ф}}}, \quad (3.33)$$

де m – число фаз, $m = 3$.

$$I_{\text{нф}} = \frac{5700}{3 \times 230} = 8,3 \text{ А.}$$

Кількість пазів статора визначається, як :

$$Z = 2pmq, \quad (3.34)$$

де q – кількість пазів на один полюс.

При кількості полюсів машини $2p > 8$ і невеликому полюсному поділу значення q вибирають дробовим для зменшення негативного впливу вищих гармонік на форму ЕРС.

Приймаємо $q = 1\frac{1}{5}$, тоді відповідно до (3.34) кількість пазів:

$$Z = 2 \times 30 \times 3 \times 1\frac{1}{5} = 216.$$

Кількість ефективних провідників в одному паду:

$$N_{\text{н}} = \frac{w_{\text{ф}} a}{q p}, \quad (3.35)$$

де a – кількість паралельних гілок, $a = 1$.

$$N_{\text{н}} = \frac{260 \times 1}{1\frac{1}{5} \times 30} = 7,2 \approx 8 \text{ витків.}$$

Уточнене число витків у фазі: $w_{\text{ф}} = \frac{N_{\text{н}} q p}{a} = \frac{8 \times 1\frac{1}{5} \times 30}{1} = 288 \text{ витків.}$

Симетрія двошарової обмотки додержується за наступних умови:

$$\begin{cases} \frac{z}{m \times t} - \text{ціле число;} \\ \frac{2p}{d} - \text{ціле число,} \end{cases} \quad (3.36)$$

де t – найбільший спільний дільник z і p , $t = 6$;

d – знаменник простого дробу числа q , $d = 5$.

$\frac{216}{3 \times 6} = 12$ – ціле число, $\frac{2 \times 30}{5} = 12$ – ціле число. Таким чином умови симетрії обмотки виконуються.

$$\text{Зубцевий поділ: } t_z = \frac{\pi D}{z} = \frac{\pi \cdot 0,21}{216} = 0,003 \text{ м.}$$

Уточнене лінійне навантаження, А/м:

$$\begin{aligned} A &= \frac{z N_n I_{\text{нф}}}{\pi D a}, \\ A &= \frac{216 \times 8 \times 8,3}{3,14 \times 0,21 \times 1} = 21750,68 \frac{\text{А}}{\text{м}}. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Уточнене значення магнітного потоку в режимі неробочого ходу:

$$\begin{aligned} \Phi_{\delta 0} &= \frac{E_0}{4k_b k_0 f w_{\phi}}, \\ \Phi_{\delta 0} &= \frac{276}{4 \times 1,11 \times 0,92 \times 50 \times 260} = 0,0052 \text{ Вб.} \end{aligned} \quad (3.38)$$

Мінімальна ширина зубця $b_{z \min}$ розраховується за формулою:

$$b_{z \min} = \frac{B_{\delta 0} t_z}{B_{z \max} k_c}, \quad (3.39)$$

де – $B_{z \max}$ – допустима індукція в зубцеві для сталі 1411 $B_{z \max} = 1,6 - 1,9$ Тл;

k_c – коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю; при товщині листа $\Delta_l = 3,5 \times 10^{-4}$ м $k_c = 0,95$.

$$B_{\delta 0} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{l \tau a_i}; \quad (3.40)$$

$$B_{\delta 0} = \frac{0,0052}{0,58 \times 0,015 \times 0,73} = 0,819 \text{ Тл.}$$

$$b_{Z \min} = \frac{0,819 \times 0,003}{1,9 \times 0,95} = 0,001 \text{ м.}$$

Попереднє значення ширини паза:

$$b_n = \frac{\pi(D+2h_k)}{Z} - b_{Z \min}, \quad (3.41)$$

де h_k – висота коронки зубця, $h_k = (1,3 - 1,5) \times 10^{-3}$ м.

$$b_n = \frac{3,14 \cdot (0,21 + 2 \times 0,0015)}{216} - 0,001 = 0,002 \text{ м.}$$

Переріз ефективного провідника обмотки статора:

$$q_{\text{еф}} = \frac{I_n}{a j_1}, \quad (3.42)$$

де j_1 – допустима густина струму, приймаємо $j_1 = 5 \text{ А/мм}^2$.

$$q_{\text{еф}} = \frac{8,3}{1 \times 5} = 1,66 \text{ мм}^2.$$

$$\text{Діаметр проводу обмотки } d = \sqrt{\frac{4 \times q_{\text{еф}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 1,66}{3,14}} = 1,45 \text{ мм.}$$

3.6.2 Розрахунок діаметра ротора

Необхідною умовою в конструкції СГПМ є забезпечення мінімально можливого зазору δ між статором і ротором. Цей зазор визначається технологією виготовлення, приймаємо його рівним 0,6 мм, тоді зовнішній діаметр ротора становитиме:

$$D_p = D - 2\delta \quad (3.43)$$

де D – внутрішній діаметр статора генератора $D = 0,21$ м;

$$D_p = 0,21 - 2 \times 0,0006 = 0,2088 \text{ м.}$$

Коефіцієнт полюсного перекриття:

$$\alpha_i = \alpha_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1-\alpha_p}}, \quad (3.44)$$

де α_p – конструктивний коефіцієнт полюсного перекриття, $\alpha_p = 0,7$.

δ_p – повітряний зазор, з урахуванням коефіцієнту $k_\delta = 1,81$, тому $\delta_p = k_\delta \delta = 1,81 \cdot 0,6 = 1,086 \text{ мм.}$

$$\alpha_i = 0,7 + \frac{4}{\frac{0,011}{1,086 \cdot 10^{-3}} + \frac{6}{1-0,7}} = 0,9.$$

Ширина полюса: $b_M = \alpha_i \tau = 0,9 \times 0,011 = 0,0099$.

Довжина полюса відповідає довжині статора $l = 0,58 \text{ м.}$

3.7 Вибір контролера, інвертора та акумуляторів

3.7.1 Вибір контролера

Контролер вітроенергетичної установки необхідний для:

- управління розподілом енергії, отриманої від генератора, між зарядом акумулятора та живленням навантаження;
- випрямлення змінного струму (АС $\rightarrow$ DC);
- відключення генератора при порушенні нормальних режимів роботи (наприклад, перевантаження) – режим захисту;
- встановлення оптимальних режимів відбору потужності від генератора з врахуванням наявної потужності генерації, потреб навантаження, струму заряду акумуляторної батареї;
- забезпечення заряду акумуляторів з регулюванням струму заряду;
- обмеження надмірного розряду акумулятора\$

– контролю та відображення напруги, струму, потужності.

Найпростішим є on/off контролер, який виконує тільки відключення акумулятора від генератора коли напруга досягне визначеного значення. Контролери такого типу майже не застосовуються.

Контролери PWM (ШИМ – з широтно-імпульсною модуляцією) в автоматичному режимі контролюють рівні струму та напруги, а також настання максимуму напруги та повного заряду акумулятора. Контролери цього типу мають досить невисоку ціну.

Найкращі технічні показники мають контролери типу MPPT (ТМП – точка максимальної потужності). Вони контролюють ТМП і дозволяють більш ефективно заряджати акумулятори. Ці контролери мають високу вартість, але набагато переважають інші за технічними параметрами.

Вибираємо знижувальний контролер заряду WindSanPro-150 +LCD+ MPPT + Wi-fi, який може знижувати напругу генератора за системою MPPT [12]. Контролер має плавне регулювання струму зарядки та напруги, може працювати в 24 В та 48 В системах, можливе дистанційне налагодження та контроль. Технічні параметри контролера представлені в табл. 3.7, а зовнішній та внутрішній вигляд – на рис. 3.9.

Таблиця 3.7 – Параметри контролера WindSanPro-150 +LCD+ MPPT + Wi-fi [12]

Параметр	Показник
Потужність, кВт	5,0
Максимальна вхідна напруга	230
Максимальний струм зарядки АКБ, А	60 А (регулюється)
Технологія	MPPT + Wi-fi
Призначення	Зарядка, стабілізація, блокування
Режим роботи	Безперервний
Споживання струму контролером, мА	150



Рисунок 3.9 – Зовнішній та внутрішній вигляд контролера WindSanPro-150 +LCD+ MPPT + Wi-fi [12]

3.7.2 Вибір інвертора

При виборі інвертора необхідно мати на увазі, що одні інвертори створюють чисту синусоїду, а інші – квазісинусоїду, коли форма струму (напруги) є спотвореною синусоїдою з паразитними гармоніками.

Вибираємо трифазний низьковольтний інвертор Deye SUN-5K-SG04LP3-EU, який створює високоякісну синусоїду. Технічні параметри інвертора показані в табл. 3.8, а зовнішній вигляд – на рис. 3.10.

Таблиця 3.8 – Параметри інвертора Deye SUN-5K-SG04LP3-EU [13]

Параметр	Показник
Батарея	
Тип	Залізо- іонний, літій-іонний
Діапазон напруги батареї, В	40 – 60
Струм зарядки, А	120 Макс
Розрядний струм, А	120

Продовження таблиці 3.8

Параметр	Показник
Змінний струм	
Номінальна вихідна активна потужність змінного струму, кВт	5,0
Максимальна вихідна активна потужність змінного струму, кВт	5,5
Номінальний вихідний струм змінного струму, А	7,6
Максимальний вихідний змінний струм А	8,4
Діапазон регулювання коефіцієнта потужності	Від 0,8 випередження до 0,8 відставання
Вихідна частота, Гц і напруга	50/60 Гц; 3L/N/PE
Вихідна напруга, В	230/400 В змінного струму
Загальні параметри	
Діапазон робочих температур, °С	40 – 60
Охолодження	Природне повітряне
Вага, кг	48,5
Ступінь захисту	IP65
Тип установки	Настінний
Розміри (ШхВхГ), мм	464×763×282



Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд інвертора Deye SUN-5K-SG04LP3-EU [13]

3.7.3 Розрахунок ємності та вибір акумуляторної батареї

Вибір ємності батареї виконується за максимальною потужністю електричного обладнання бювету $P_{\text{макс}}=3500$ Вт.

З урахуванням коефіцієнта одночасності 0,4 розрахункова потужність $P_{\text{розр}}=1400$ Вт.

Найбільший час роботи бювету від акумуляторної батареї приймаємо рівним одній добі – 24 год. Напруга акумулятора $U_{\text{ак}}= 48$ В, тоді величина споживаного струму становитиме:

$$I_{\text{бат}} = \frac{P_{\text{розр}}}{U_{\text{пер}}} = \frac{1400}{48} \approx 29 \text{ А.}$$

Звідси загальна ємність блоку акумуляторів повинна бути:

$$C_{\text{акб}} = I_{\text{бат}} \times T = 29 \times 24 = 696 \text{ А} \times \text{год.}$$

Залізо-літієві (LiFePO_4) акумулятори допускають досить глибокий рівень розряду – до 80-90% без суттєвої шкоди, але для максимального терміну служби (понад 2000-5000 циклів) краще уникати розряду нижче 20%. Приймаємо необхідну ємність батарей рівною $C_{\text{бат}} = 880 \text{ А} \times \text{год.}$

Для комплектації такої батареї використовуємо чотири паралельно з'єднаних акумулятори EcoLiFe 48-200 [14]. Параметри акумуляторів наведені в табл. 3.9, а зовнішній вигляд – на рис. 3.11.

Таблиця 3.9 – Характеристики акумулятора EcoLiFe 48-200 [14]

Параметр	Показник
Тип	Залізо-літієвий
Напруга, В	48
Ємність, А×год	220
Рекомендована напруга для резервного використання	48,0 – 51,2 В
Потужність, Вт	11264
Кількість циклів «заряд – розряд»	4000
Робоча температура при зарядці	Від 0 до + 40 ⁰ С
Робоча температура при розрядці	Від - 20 до + 50 ⁰ С
Період служби	8 – 12 років
Розміри, мм	520×440×300
Вага, кг	42
Клас захисту	IP 20



Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд акумулятора EcoLiFe 48-200 [14]

В акумуляторі вмонтована BMS-плата, яка захищає його від перегріву, перенапруги та глибокого розряду, значно збільшуючи цим термін служби.

Висновки за розділом 3

Уточнені вітрові характеристики в місці розташування БЕУ, розрахований діаметр вітрового колеса, який становить 3,5 м, вибраний профіль лопаті, визначені загальні параметри, кути встановлення та її шаблони для різних перерізів. Розрахований генератор зі збудженням від постійних магнітів номінальною повною потужністю 5,7кВА.

Для комплектації БЕУ підібрані стандартні:

- контролер WindSanPro-150 +LCD+ MPPT + Wi-fi;
- інвертора Deye SUN-5K-SG04LP3-EU активною потужністю 5,0 кВт;
- 4 акумулятори EcoLiFe 48-200 напругою 48 В, ємністю 200 А×год.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Організація та законодавство з охорони праці в Україні

Одним із головних показників економічного благополуччя та рівня соціального захисту в будь-якій країні є стан охорони праці. За умов стрімкого розвитку науково-технічного прогресу, людство змушене постійно працювати над проблемами мінімізації шкідливих виробничих факторів та забезпечення необхідного рівня безпеки працівників, щоб зберегти їх життя та здоров'я під час праці. Це питання є злбоденним не тільки для самих працівників, але і для працедавців, оскільки поліпшення умов праці та її охорони сприяє зростанню економічних та соціальних показників як окремих осіб так і суспільства в цілому.

При ігноруванні охороною праці вимог гігієни і безпеки праці, підривається економічна ефективність підприємств, що не може сприяти стратегії їхнього розвитку.

Соціальне значення охорони праці виражається в поліпшенні якості та продуктивності праці, збереженні трудових ресурсів і підвищенні соціально-економічних показників не тільки на окремому підприємстві, а і в державі, в цілому.

За належної організації охорони праці позитивні наслідки полягають в наступному:

- скорочуються простой під час змін за рахунок зниження кількості або повного усунення мікротравм, зумовлених несприятливими умовами праці;
- шляхом оптимізації умов і режимів праці та відпочинку, інших заходів, які сприяють підвищенню ефективності використання робочого часу вдається запобігти передчасному стомленню.

Оптимізація умов праці сприяє покращенню стану здоров'я, зростанню працездатності, покращенню стосунків між працівниками, формуванню нормального мікроклімату в колективах.

В Україні державна політика з питань охорони праці встановлюється та регулюється законодавчими і нормативно-правовими актами, зокрема Законом України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 р, який визначає основні положення стосовно реалізації конституційних прав громадян на охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює, за участі відповідних державних органів, стосунки між власниками підприємства, установи чи організації і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

Дія Закону України «Про охорону праці» розповсюджується на всі заклади, підприємства, організації незалежно від їх форми власності і діяльності, та на всіх громадян, які працюють у цих організаціях. Цей Закон встановлює ряд норм прямої дії стосовно порядку організації охорони праці та відповідальності посадових осіб та працівників.

Правові, організаційні, економічні та соціальні засади охорони здоров'я визначає Закон «Основи законодавства України про охорону здоров'я», в якому гарантуються права працівників на соціальне забезпечення при втраті працездатності, отриманні професійних захворювань, інвалідності, забезпечення усіх громадян гарантованим рівнем медичної допомоги.

Взагалі система законодавчих актів, що стосуються охорони праці дуже широка. До неї входять Закони України: «Про забезпечення санітарного епідеміологічного благополуччя населення», «Про пожежну безпеку», «Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування від нещасного випадку на виробництві та професійного захворювання, які спричинили втрату працездатності», «Про охорону навколишнього середовища» (Рис. 4.1). Основою всіх Законів є Конституція України. Крім Законів існує система підзаконних актів (таких як, наприклад, Нормативно – правові акти з охорони праці (НПАОП) чи Державні стандарти з безпеки)), які розвивають та конкретизують дію Законів стосовно підтримання на необхідному рівні та поліпшення стану охорони праці в Україні. Державна політика в галузі охорони

праці визначається Верховною Радою відповідно до Конституції на принципах, які спрямовані на захист життя і здоров'я працівників.

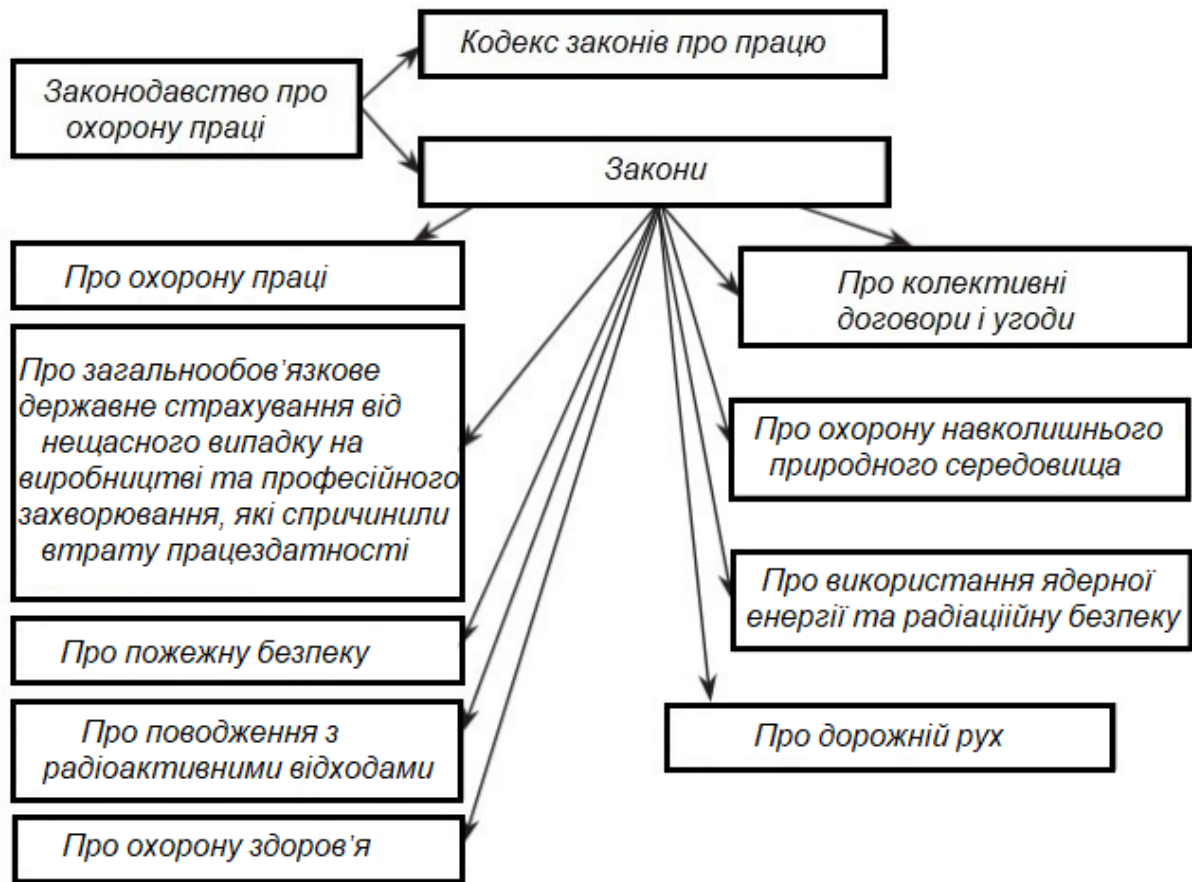


Рисунок 4.1 – Структура Законодавства про охорону праці в Україні

Україна підтримує також ряд міжнародних нормативних актів з охорони праці, співробітничав з Міжнародною організацією праці (МОП), яка створювалась з метою встановлення й збереження суспільної злагоди, захисту прав людини та світового соціального прогресу.

Зрозуміло, що більшість норм про працю, які пропонуються МОП у формі конвенцій та рекомендацій, не мають інноваційного характеру та не є універсальними, але вони пропонують такі методи вирішення ряду проблем у трудовій сфері, які позитивно зарекомендували себе або є єдино правильними, та пройшли апробацію в багатьох країнах. Вони також сприяють розробці державами власної політики у сфері соціально-трудових відносин в загальному міжнародному контексті та вирішенню національних проблем з використанням та одночасним розвитком міжнародної співпраці.

З усіх ухвалених МОП конвенцій Україна ратифікувала 54, з них за роки незалежності – 10.

Україна також співробітничав з Європейською агенцією охорони праці, є членом Міжнародної агенції з атомної енергетики (МАГАТЕ), Міжнародної Організації Охорони Здоров'я (МООЗ) та інших спеціалізованих установ Організації Об'єднаних Націй і виконує схвалені ними нормативні акти та рекомендації стосовно охорони здоров'я та життя працюючих.

В Україні останні роки демонструють зниження рівня загального травматизму, але все ж в порівнянні з розвиненими країнами він є надто високим. Значний рівень травматизму спостерігається в агропромисловому комплексі, вугільній промисловості, будівництві і транспорті. На жаль високий рівень травматизму із смертельними наслідками у соціально-культурній сфері та торгівлі, який сумірний з будівництвом і транспортом [15, 16]. Серйозне непокоїть стан з охороною праці на малих підприємствах, з рівнем травматизму значно вищим, ніж на підприємствах інших секторів економіки [17].

4.2 Технічні та конструктивні особливості вітроустановки бювету

Вітрові турбіни (див. розділ 2) бувають різні за конструкцією та потужністю, але всі вони перетворюють кінетичну енергію повітряного потоку в механічну роботу. На даний час розповсюдження отримали вітрові генератори з горизонтальною віссю обертання вітроколеса та трьома лопатями.

Застосовується також широке різноманіття вертикальних вітрових турбін, але вони мають гірші енергетичні показники ніж конструкції з горизонтальною віссю, тому менш розповсюджені.

Автономна трилопатева ВЕУ для електропостачання бювету також має горизонтальну вісь обертання і може бути віднесена до установок малої потужності (9 кВт). Висота вежі, на якій монтується ВЕУ, становить 20 м, середня за рік швидкість вітру – 5 м/с; при бурях може досягати 25 м/с.

Хвостова частина турбіни забезпечує контроль ризикання гондоли, тобто її здатність забезпечити настроювання турбіни під напрям вітру та розташовувати ротор на його шляху.

Вежа є трубчатою з тросовими відтяжками та встановлюється неподалік від бювету на залізобетонний фундамент.

Обертове колесо ВЕУ не створює при роботі небезпеки травмування людей, що знаходяться біля установки – діаметр вітрового колеса 7 м, тому при обертанні кінець лопаті проходить над землею на висоті близько 16 м.

Загальні технічні вимоги до ВЕУ малої потужності встановлені стандартом ДСТУ 4859:2007 Вітроенергетика. Установки електричні вітряні малої потужності. Загальні технічні вимоги, та поширюються на горизонтально-осьові та вертикально-осьові ВЕУ малої потужності діаметром ротора до 10 м або площею обмахування ротора до 80 м² з лопатями аеродинамічного профілю, призначені для перетворення кінетичної енергії вітру в електричну.

Найбільш ймовірне отримання травм при монтажі, наладці та експлуатації ВЕУ, а також при прокладанні кабелю до ввідного пристрою бювету.

З погляду охорони праці в роботі не розглядаються питання стосовно будівництва приміщення бювету, буріння свердловини, встановлення насосу, монтажу водопроводу та роздавальних кранів – ці роботи виконує та надалі експлуатує комплекс спеціалізоване комунальне підприємство.

4.3 Небезпечні та шкідливі фактори при спорудженні та експлуатації вітроенергетичної установки

Однією з головних умов здорової та високопродуктивної праці на виробництві є сприятливе виробниче середовище і трудовий процес. Фактори які можуть бути причиною порушення працездатності та здоров'я називають

виробничими шкідливостями [17]. Їх несприятливі фактори поділяються на дві групи: небезпечні (НВФ) і шкідливі виробничі фактори (ШВФ).

НВФ – це фактор, дія якого на працівника за певних умов призводить до травми чи іншого раптового різкого погіршення здоров'я.

ШВФ – за певних умов призводить до захворювання або зниження працездатності.

В будь-якому виробничому процесі існує загроза дії на людину небезпечних умов праці, які можуть бути наслідком незадовільної підготовки з питань безпеки праці, відсутності чіткої системи контролю за станом охорони праці, недостатнім рівнем організації праці, низькою надійністю машин, їх окремих частин, деталей або робочих органів і таке інше.

У ряді випадків помітити небезпечні умови простіше, ніж виявити сам фактор.

НВФ і ШВФ поділяють на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні (Рис. 4.2). ШВФ і НВФ нормуються за рівнем їх дії.

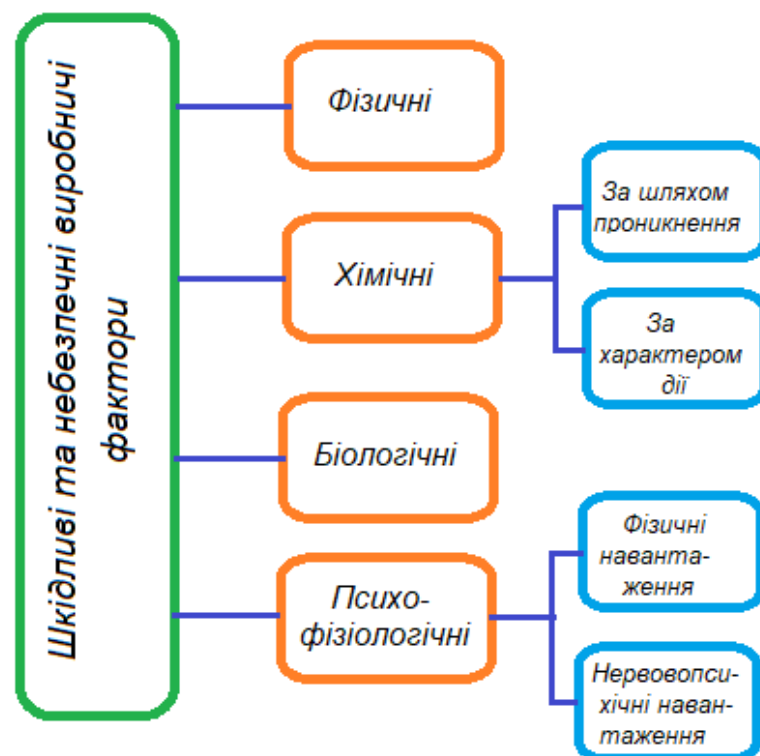


Рисунок 4.2 – Класифікація шкідливих та небезпечних факторів

НВФ та ШВФ, які можуть виникнути при спорудженні та експлуатації вітрової енергетичної установки, загалом відповідають тим, що виникають на інших промислових та інфраструктурних об'єктах.

При спорудженні ВЕУ основними роботами є:

- підготовка та огороження території майданчика установки ВЕУ;
- підготовка котловану для фундаменту;
- бетонування фундаменту;
- підйомно-транспортні роботи з переміщення та встановлення вежі з вітро- і електрогенератором.

Аналіз основних робіт показує, що найбільше впливати на працівників можуть фізичні НВФ та ШВФ такі як:

- розташування місця виконання робіт на значній висоті стосовно землі;
- вироби, заготовки та матеріали, що переміщуються;
- гострі краї та задирки на поверхнях заготовок, інструментів, обладнання;
- підвищена чи понижена температура наколишнього повітря;
- підвищена вологість навколишнього повітря;
- недостатня освітленість місця робіт;
- підвищений рівень шуму;
- небезпечний рівень електричної напруги.

Для запобігання дії небезпечних факторів, пов'язаних з експлуатацією ВЕУ та висотними роботами, необхідно, зокрема:

- провести навчання персоналу техніці підйому на висоту та прийомам запобігання падінню;
- провести огляд та перевірити цілісність споруди перед початком робіт;
- забезпечити працівників належними індивідуальними страховими системами для висотних робіт. Системи з'єднання елементів на страхових і на вежі повинні бути сумісними;
- для підйому та спуску інструментів або матеріалів на висоту, слід використовувати сумки для інструментів встановленого зразка;

Найскладнішим з погляду охорони праці є процес встановлення вежі ВЕУ на фундамент з наступним монтажем генератора за допомогою автомобільного крану КС-55727– У на базі КрАЗ-65053 вантажопідйомністю 25 тон (Рис. 4.3).



Рисунок 4.3 – Автомобільний кран КС-55727– У на базі КрАЗ-65053

4.4 Заходи з охорони праці при монтажі вежі

Безпека праці на всіх етапах виконання робіт повинна забезпечуватися організацією монтажного майданчика, ділянок робіт і робочих місць. При цьому встановлюються зони, в межах яких можуть діяти НВФ. Ці зони необхідно позначати знаками безпеки й написами.

До зон з можливою постійною дією небезпечних виробничих факторів належать:

- зони поблизу від неізолюваних струмовідних частин електроустановок;
- поблизу від неогороджених перепадів висоти 1,3 м і більше;
- в місцях переміщення машин і обладнання або їх частин і робочих органів;
- у місцях із вмістом шкідливих речовин у концентраціях вище гранично допустимих або з впливом шуму, рівень якого перевищує допустимі норми;

– в місцях, над якими здійснюють переміщення вантажів вантажопідйомними кранами.

Проведення будівельно-монтажних робіт у вказаних зонах, як правило, не допускається.

До зон, які потенційно знаходяться під дією небезпечних виробничих факторів, відносяться ділянки території поблизу споруджуваного об'єкту та його елементи над якими здійснюється монтаж конструкцій або обладнання.

При такелажних роботах необхідно дотримання таких основних вимог:

– при підйомі вантажу його маса не повинна перевищувати максимальну вантажопідйомність крана за даного вильоту стріли з урахуванням маси захватних пристосувань і тари;

– підйом вантажів масою, що є близькою до максимальної вантажопідйомності при даному вильоті стріли крана, необхідно здійснювати у два етапи: спочатку на висоту 20 – 30 см з метою перевірки підвіски, стійкості крана й надійності дії гальм, а потім на повну висоту;

– заборонено підтягувати вантажі вантажопідйомними машинами при косих натягах канатів або за рахунок повороту стріли, а також піднімати вантажі, що зачепилися;

– зміна вильоту стріли крана при підвішеному вантажі можлива тільки в межах його вантажної характеристики;

– заборонене перенесення вантажів над людьми, а також перебування в зоні роботи крана особам, які не мають прямого відношення до роботи крана;

– заборонена установка крана на свіжонасипаному ґрунті без спеціальних інвентарних пристроїв (плити, шпали, металевий прокат і таке інше);

– кран повинен встановлюватися на всі опори, під які розміщуються спеціальні підкладки;

– не дозволяється підймання вантажу, що знаходиться в нестійкому положенні, або вантажу, підвішеного за один ріг дворогого гака;

– заборонене підймання та переміщення вантажу з людьми, що перебувають на ньому. Підймання робітників вантажопідймальним краном

для виконання робіт дозволяється тільки за умови використання спеціальних колисок;

- для відтягування вантажу під час піднімання та переміщення слід користуватися довгомірними гаками або відтяжками;
- при установці крана на місці робіт необхідно враховувати зони можливого падіння вантажу.

4.4.1 Розрахунок меж небезпечної зони роботи автомобільного крану

Монтаж вежі ВЕУ планується з допомогою автомобільного крану КС-55727–У на базі КрАЗ-65053 вантажопідйомністю 25 тон (Рис. 4.3).

Межі небезпечних зон автомобільних стрілових кранів для різних умов роботи розраховуються з урахуванням умов виконання монтажу.

Умови встановлення крана відрізняються залежно від того, для чого він використовується. Це можуть бути умови:

- монтажу стійких елементів;
- монтажу високих нестійких елементів;
- роботи поряд зі штабелем складування чи поблизу будівлі;
- роботи біля котловану чи траншеї;
- роботи поблизу лінії електропередачі.

Вежа, на якій встановлюється вітровий і електричний генератори, є високою та нестійкою. В цьому разі межа небезпечної зони розраховується за формулою:

$$R_0 = R_p + h_{\pi} + S, \quad (4.1)$$

де R_0 – радіус небезпечної зони, пов'язаний з вилітом гака, м;

R_p – робочий радіус крана, $R_p = 10$ м;

h_{π} – висота підйому вантажу, $h_{\pi} = 20$ м;

S – нормована відстань від вильоту гака до місця можливого падіння вантажу (для висоти підйому вантажу до 20 м $S = 7$ м) [18].

Радіус безпечної зони при підйомі вежі БЕУ повинен становити не менше: $R_0 = 10 + 20 + 7 = 37$ метрів (Рис. 4.4).

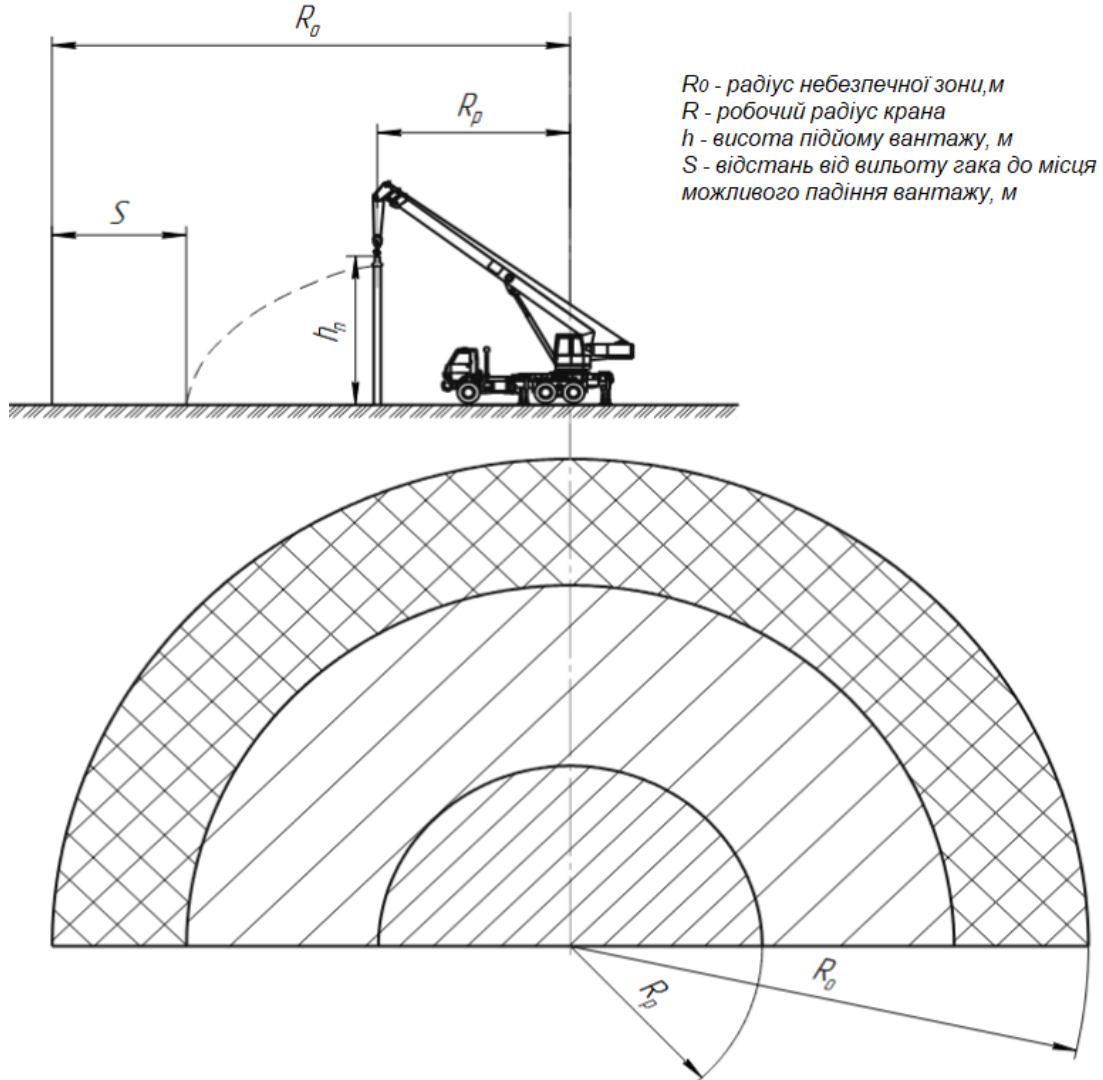


Рисунок 4.4 – Межі небезпечної зони роботи крана при монтажу вежі

4.4.2 Безпека при роботі вантажопідйомних механізмів

Перед проведенням монтажних робіт, усі задіяні робітники зобов'язані пройти загальний інструктаж, з реєстрацією в спеціальному журналі.

Для підвішування вантажів на гак крана призначаються навчені за відповідною програмою й атестовані кваліфікаційною комісією монтажною організацією стропальники.

Трос на вантаж, який піднімається, накладається без вузлів і перекручувань. На його гострих кутах (ребрах) необхідно встановлювати дерев'яні прокладки для захисту строп від руйнування й збільшення тертя між стропами та вантажем. Підйом і опускання вантажу повинні виконуватися плавно без ривків.

Стропи належить знімати тільки після надійної установки обладнання на опорний майданчик або на зазначене в проекті місце тільки після перевірки стійкості.

Важкий вантаж (в даному випадку вежу) необхідно піднімати за два прийоми: спочатку на 25 – 30 см, а потім, після перевірки правильності стропування – на потрібну висоту.

При підйомі не можна торкатися стропу, тримати руками або якимось предметом ланцюг або канат, який ковзає по вантажу, що піднімається.

4.5 Пожежна безпека вітрової енергетичної установки

Усунення чи запобігання дії факторів пожежі та обмеження збитку від неї можливе завдяки правильній організації системи протипожежного захисту, що об'єднує організаційні заходи та технічні засоби.

Оскільки пожежі простіше запобігти, ніж боротися з нею, то в першу чергу необхідне правильне планування будівель і споруд, розміщення виробничих об'єктів, обладнання, вибір будівельних конструкцій, створення протипожежних перешкод і систем пожежогасіння з урахуванням вимог Правил пожежної безпеки.

Вогневі та зварювальні роботи при монтажі ВЕУ можуть виконуватися тільки за нарядом-допуском.

В разі виникнення пожежі необхідне вжиття заходів з її обмеження та створення умов для успішного гасіння, але спочатку дії працівників мають бути спрямовані на безпеку людей та, за необхідності, їх евакуацію та рятування. Також слід негайно повідомити про пожежу телефоном найближчий пожежно-

рятувальний підрозділ з чітким поясненням місця знаходження об'єкта, та безпосередньо місця виникнення пожежі. Далі необхідно розпочати гасіння пожежі наявними засобами.

Основними вогнегасними речовинами та сполуками, що застосовуються для гасіння пожеж, є вода, водяна пара, хімічна піна, повітряно-механічна піна, водні розчини солей, інертні й негорючі гази, галоїдно-вуглеводневі сполуки, вуглекислота, галогеновуглеводи, сухі негорючі порошки та пісок. Застосування того чи іншого засобу гасіння залежить від характеру пожежі. Так, наприклад, не допускається гасіння пожежі електричного обладнання, яке знаходиться під напругою і таке інше.

Основні ризики пожежної небезпеки малої вітрової електричної станції визначаються наступними факторами: [19; 20]

- відсутністю оператора, який здійснює постійний контроль за роботою;
- високою концентрацією обладнання в гондолі з застосуванням мастила, полімерних ізоляційних матеріалів та кабелів з горючою оболонкою;
- підвищений ризик ураження блискавкою.

Найпростішою системою пожежогасіння може бути використання тонко розпиленої води або спринклерної системи, але на малих ВЕУ вони не застосовуються.

В разі виникнення пожежі ускладнені умови її ліквідації внаслідок розташування обладнання на висоті та можливість отримання травм персоналом, що здійснює роботи з тушіння.

Ймовірність отримання травм за звичайних умов невисока, але метеорологічні умови, сила вітру можуть суттєво вплинути на ризики для персоналу пожежної команди. Ними можуть бути:

- відокремлення лопатей від валу ротора;
- руйнування вежі ВЕУ;
- небезпечні погодні умови (блискавка, обледеніння з небезпекою розкидання льоду);
- можлива необхідність робота на висоті.

Ураження блискавкою є найчастішою причиною виникнення пожеж ВЕУ, що пов'язане з її висотою та розміщенням на відкритій місцевості.

Також поширеною причиною пожеж є різноманітні неполадки в електричній частині ВЕУ:

- несправність автоматики;
- погані контактні з'єднання в силових колах;
- відсутність чи несправність захисту від перенапруги.

Основна частина робіт, пов'язаних з усуненням пожежі, покладається на сили цивільного захисту адміністративно-територіальної одиниці, на території якої розташована установка, а також відповідним формуванням Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту.

Після прибуття на місце ці служби повинні:

- при можливості налагодити взаємодію зі старшою посадовою особою об'єкта, який організовує першочергові оперативні дії працівників об'єкта для отримання оперативної інформації щодо характеру та причини пожежі, можливої необхідності знеструмлення об'єкта (приміщення бювету) від зовнішньої мережі, схеми розміщення приміщень, основного устаткування;

- провести розвідку та виставити пости безпеки для отримання оперативної інформації стосовно змін обертання ротора, зміни погодних умов, можливої деформації конструктивних елементів ВЕУ;

- оцінити можливість фізичного доступу до вежі, враховуючи метрологічні обставини та їх можливе ускладнення;

- вжити заходи для створення безпечних умов роботи персоналу і пожежних підрозділів під час гасіння пожежі.

У тому разі коли пожежа охопила лопаті ротора і вони обертаються, знаходитися біля вежі заборонено, тому що можливе розкидання лопатей (уламків). Проводити роботи можливо після повного зупинення ротора, яке може виконати тільки представник сервісної служби з обслуговування ВЕУ.

Особливістю організації і гасіння пожеж на обладнанні ВЕУ є строге дотримання правил безпеки праці і повна взаємодія з персоналом об'єкту та

сервісної служби, що визначені у Статуті дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж, Інструкції з гасіння пожеж на енергетичних об'єктах, правилах пожежної безпеки в компаніях, на підприємствах та організаціях енергетики України.

Для гасіння можливої пожежі в приміщенні де встановлені інвертор та акумулятори передбачається переносний вуглекислотний вогнегасник ВВК-5 з масою заряду 5 кг. Його перевагою є те, що діоксид вуглецю не проводить струму, охолоджує зону займання, не забруднює та не пошкоджує обладнання.

Розміщується вогнегасник біля дверей всередині приміщення, прибудованого до бювету та виконаного з цегли.

Допущений до експлуатації вогнегасник повинен мати:

- обліковий (інвентарний) номер;
- пломби на пристроях ручного пуску;
- бирки та маркувальні написи на корпусі, червоне сигнальне фарбування.

Ефективність застосування вогнегасника, у першу чергу, залежить від правильності вибору його типу залежно від характеру пожежі. На маркуванні кожного типу вогнегасника вказані символи класів пожеж, для гасіння яких він призначений. Їх знання необхідне, для того щоб запобігти застосуванню для гасіння пожеж тих класів, для яких він не призначений.

4.6 Захист ВЕУ від ударів блискавки та заземлення

Національний стандарт України «Установки електричні вітряні малої потужності» встановлює загальні технічні вимоги до ВЕУ малої потужності [21] та поширюється на горизонтально-осьові ВЕУ малої потужності з діаметром ротора до 10 м.

Вимоги безпеки при експлуатації таких станцій включають обов'язкове заземлення конструкції та встановлення захисту від ударів блискавки.

Основою захисту обладнання електричних установок від атмосферних перенапруг, які можуть виникнути від ураження прямими ударами блискавки, є система блискавковідводів, тобто заземлених провідників, розташованих вище елементів електроустановки – вітроенергетичної турбіни, та будівлі, в якій розташоване супутнє обладнання (контролер, інвертор, акумулятори, приміщення бювету) [22].

Для захисту від вторинних проявів блискавки необхідне заземлення всіх металевих частин електроустаткування шляхом приєднання до контуру захисного заземлення.

Прямий удар блискавки в вітрову установку завжди є великою небезпекою. Наприклад, ураження блискавкою незахищеної лопаті вітрової турбіни може призвести до значного підвищення її температури, що в свою чергу, спричинить пошкодження поверхні лопаті, розтріскування країв. Результатом є значне скорочення терміну служби лопаті. Фізичне пошкодження лопаті є найдорожчим пошкодженням дією блискавки, але більш поширене пошкодження системи керування та генератора.

Для захисту вітрових турбін від удару блискавки майже не застосовують стрижневі блискавковідводи, оскільки вони можуть заважати протіканню потоку вітру та знижувати ефективність ВЕУ. Крім того, вітрові турбіни часто є найвищими спорудами, розташованими на відкритих територіях, тому для них ураження блискавкою є цілком очікуваним. Головне завдання полягає в безпечному відведенні струму блискавки через лопаті, механічні та електричні системи в землю [22]. З цією метою на лопатях вітрової турбіни встановлюються металеві кріплення, які є точками приєднання блискавки. Такі приймачі блискавки розташовані в кінці лопаті (Рис. 4.5) та ближче до середини. До них приєднується провідник (струмовідвід), вбудований в лопать.

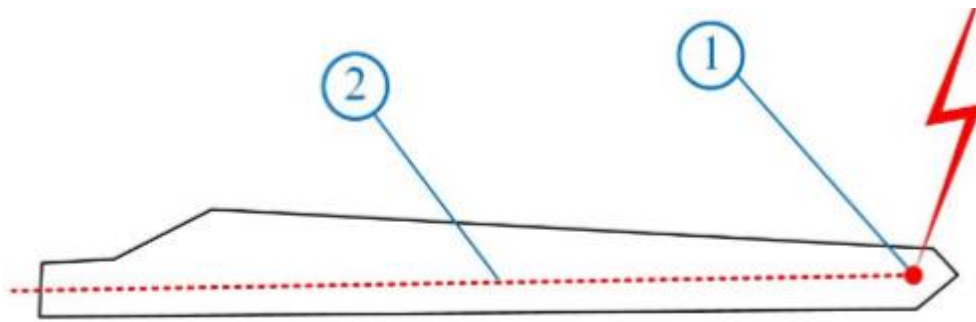


Рисунок 4.5 – Захист від блискавки лопаті вітрової турбіни:

1 – блискавкоприймач; 2 – внутрішній провідник (струмовідвід)

У разі влучання блискавки струм проходить від основи лопаті до вежі, а далі в землю. Для цього в місцях рухомих з'єднань передбачаються ковзні контакти чи іскрові зазори.

Для безпечного відведення струму блискавки в землю влаштовується система заземлення, яка одночасно виконує функції робочого заземлення електричної мережі.

Близьке розташування приміщення бювету та ВЕУ сприяє можливості виконання їх загального заземлення.

Діючі стандарти України [23, 24] передбачають два типи систем заземлення: типу А – стрижневі та типу В – кільцеві.

До типу А відносяться горизонтальні і глибинні вертикальні стрижневі заземлювачі, що приєднуються до кожного окремого струмовідводу та заглиблюються в землю зовні периметру об'єкта захисту.

Вертикальні стрижневі заземлювачі заглиблюються в ґрунт біля фундаменту споруди чи будівлі на відстані близько 1 м.

На рис. 4.6 показаний сталевий стрижень покритий міддю з головкою для забивання, різьбовою муфтою, хрестовим затискачем і наконечником. Можливе покриття цинком.



Рисунок 4.6 – Стрижень глибинного заземлювача типу А

Стрижні типу А виготовляють довжиною від 1,5 до 2,5 м (можливе з'єднання двох і більше), термін їх експлуатації становить понад 40 років, в той час коли простий сталевий стрижень виходить з ладу внаслідок корозії через $7 \div 11$ років. Конструкція вертикального заземлювача типу А показана на рис. 4.7, а наочне розміщення глибинного заземлювача типу А в траншеї показане на рис. 4.8.

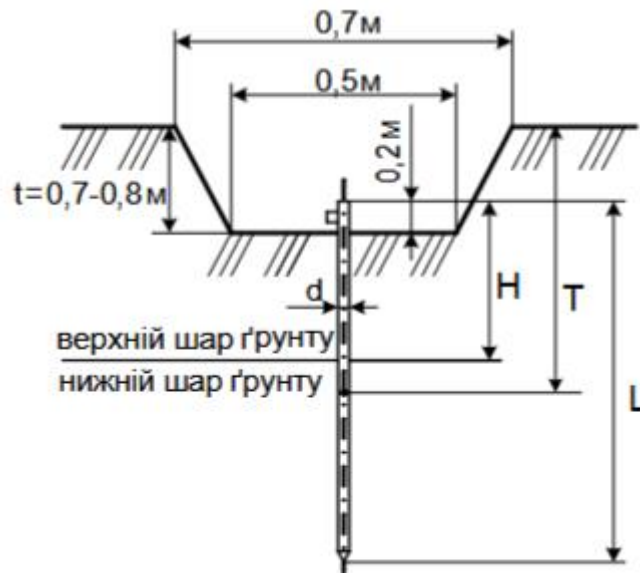


Рисунок 4.7 – Конструкція вертикального заземлювача типу А

L – довжина заземлювача; d – діаметр; H – товщина верхнього шару ґрунту; T – заглиблення (відстань від поверхні до середини електрода); t – глибина траншеї

Довжина вертикального заземлювача має бути такою, щоб він пройшовши верхній шар ґрунту заглибився у нижній шар, який має практично стабільне значенням питомого опору ρ .

Заземлювачі згаданого типу доцільно використовувати для невеликих будівельних споруд, оснащених стрижнями або тросами для приймання блискавки, та для створення ізолюваної системи блискавкозахисту (наприклад, ВЕУ). Основною перевагою заземлювачів типу А є досить простий монтаж.



Рисунок 4.8 – Розміщення глибинного заземлювача типу А в траншеї
4.6.1 Розрахунок пристрою заземлення ВЕУ

Напруга генератора вітрової установки становить 400 В, режим нейтралі – глухе заземлення. Для такої мережі опір пристрою заземлення згідно з ПУЕ повинен становити не більше 4 Ом, а для заземлення грозозахисту – 10 Ом. Приймаємо меншу норму 4 Ом.

ВЕУ розташована на суглинку з питомим опором $\rho = 100 \text{ Ом} \times \text{м}$; товщина верхнього шару ґрунту $H = 2,0 \text{ м}$. Заглиблення вертикального електрода визначається глибиною розташування верхньої частини $t = 0,8 \text{ м}$ і половиною його довжини $L/2$ (довжина $L=5,0 \text{ м}$) та визначається виразом:

$$T = t + \frac{L}{2} = 0,8 + \frac{5,0}{2} = 3,3 \text{ м.} \quad (4.2)$$

Опір вертикального електрода розраховується за формулою:

$$R_{\text{верт}} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L} \left(\ln \left(\frac{2 \times L}{d} \right) + 0,5 \ln \left(\frac{4T+L}{4T-L} \right) \right), \quad (4.3)$$

де ρ – питомий опір ґрунту, $\rho = 100 \text{ Ом} \times \text{м}$;

L – довжина вертикального стрижня зі сталі в мідній оболонці, $L=5 \text{ м}$;

d – діаметр вертикального стрижня $d = 0,02 \text{ м}$;

T – заглиблення електрода, м.

$$R_{\text{верт}} = \frac{100}{2 \times 3,14 \times 5,0} \left(\ln \left(\frac{2 \times 5,0}{0,02} \right) + 0,5 \ln \left(\frac{4 \times 3,3 + 5,0}{4 \times 3,3 - 5,0} \right) \right) = 21 \text{ Ом.}$$

Заземлення (Рис. 4.9) влаштовується навколо ВЕУ, а вертикальні електроди, з метою запобігання взаємного екранування, розташовуються на відстані один від одного не меншій їх довжини, тобто 5 м. Всього використовується 8 стрижнів. З двох сторін контур заземлення приєднується до вежі ВЕУ.

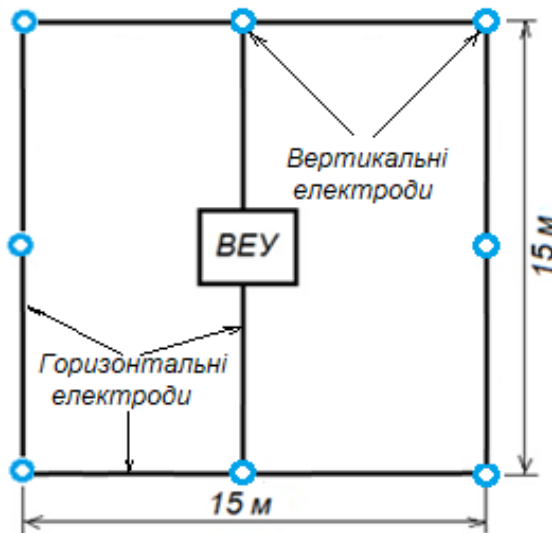


Рисунок 4.9 – План заземлення ВЕУ

Вертикальні стрижні з'єднуються за допомогою прямокутних сталевих оцинкованих смуг перерізом $30 \times 3,5$ мм. Їх загальна довжина $L_{\Gamma} = 70$ м.

Опір з'єднувальних смуг R_{Γ} розраховується за формулою:

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho}{2 \times \pi \times L_{\Gamma}} \times \ln \frac{2 \times L_{\Gamma}^2}{b \times h}, \quad (4.4)$$

де b – ширина полоси горизонтального електрода, м; $b = 0,03$ м.

$$R_{\Gamma} = \frac{100}{2 \times 3,14 \times 70} \times \ln \frac{2 \times 70^2}{0,03 \times 0,8} = 2,42 \text{ Ом.}$$

Загальний опір заземлення визначається як опір паралельного з'єднання вертикальних та горизонтальних електродів беручи до уваги коефіцієнт використання $k_{\text{вик}} = 0,4$ за формулою:

$$R_{\text{заг}} = \frac{1}{k_{\text{вик}} \times \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{R_i}} \quad (4.5)$$

$$R_{\text{заг}} = \frac{1}{0,4 \times \left(\frac{1}{2,42} + \frac{8}{21} \right)} = 3,14 \text{ Ом} < 4 \text{ Ом.}$$

Горизонтальні смуги з'єднуються з вертикальними за допомогою затискачів (Рис. 5.7). Місця з'єднань захищаються від корозії за допомогою спеціального бандажу.

Розрахований опір пристрою заземлення відповідає вимогам ПУЕ.

4.6.2 Захист обладнання від імпульсних перенапруг

Обмеження імпульсних перенапруг до безпечного рівня здійснюється пристроєм захисту від імпульсних перенапруг (ПЗІП). Цей пристрій багаторазової дії приєднується до силової мережі і є складовою частиною системи вирівнювання потенціалів. Він не впливає на роботу обладнання та режим роботи мережі, але за різкого зростання напруги (наприклад, блискавки), ПЗІП спрацьовує та знижує напругу до безпечного рівня таким чином ефективно захищаючи мережу від перенапруги, що є наслідком грозового розряду.

Ніякі аварійні режими мережі не викликають спрацювання ПЗІП, оскільки вони мають набагато вищий поріг спрацювання.

ПЗІП розрізняються за класами та рівнями вимог залежно від місця їх встановлення. В мережах змінного струму напругою до 1000 В промислової частоти використовують ПЗІП трьох класів, які відрізняються низкою параметрів залежно від їх призначення, конструкції, класів випробувань.

ПЗІП 1 класу (за міжнародним стандартом – клас «В») на струми 40-60 кА, призначаються для захисту від безпосередніх проявів грозового розряду. Пристрої цього класу встановлюються на вводі електричної мережі в будівлю – в даному випадку на вводі в приміщення де розміщені акумулятори та інвертор. УЗІП 1 класу рекомендуються для встановлення з метою захисту систем електропостачання будівель, які розташовані окремо на відкритій місцевості, або поблизу високих об'єктів (в даному випадку ВЕУ), тобто існує значна небезпека грозового впливу.

ПЗІП 2 класу (за міжнародним стандартом – клас «С») встановлюється в розподільчих щитах для захисту від вторинних ефектів блискавки та стрибків напруги від комутацій, тобто в даному випадку безпосередньо на ввідному щитку бювету.

ПЗІП 3 класу (за міжнародним стандартом – клас «D») слугують для захисту чутливого обладнання безпосередньо біля нього. Таке обладнання в бюветі відсутнє, тому ПЗІП 3 класу не використовується.

Висновки за розділом 4

Розглянута організація охорони праці в Україні, технічні та конструктивні особливості вітроустановки бювету, виконаний аналіз небезпечних та шкідливих факторів при спорудженні та експлуатації вітроенергетичної установки.

На основі аналізу запропоновані заходи з охорони праці при монтажі вежі з застосуванням автомобільного крану.

Передбачені заходи захисту від ударів блискавки та перенапруг, розрахований пристрій заземлення.

ВИСНОВКИ

Необхідність створення додаткових джерел якісного водопостачання в умовах складної ситуації з електропостачанням комунально-побутової сфери наразі є необхідною і невідкладною. Рішенням може бути створення мережі бюветів, розташованих як в населених пунктах, так і за їх межами.

З метою забезпечення надійного живлення насосів запропоноване альтернативне джерело – вітрова енергетична установка.

Для вибору типу ВЕУ виконаний аналітичний огляд вітрових двигунів, вітрових установок в цілому та магнітоелектричних машин, які можуть застосовуватися як генератори. Розрахована вітрова трилопатева установка з горизонтальним ротором потужністю 9 кВт, розміщена на вежі висотою 20 м та синхронний генератор зі збудженням від постійних магнітів номінальною повною потужністю 5,7 кВА. Для управління процесами заряду та розряду залізо-літієвих акумуляторів типу EcoLiFe 48-200, передбачених для накопичення електроенергії, установка комплектується контролером WindSanPro-150 +LCD+ MPPT + Wi-fi. Забезпечення необхідної якості вихідної напруги здійснюється інвертором Deye SUN-5K-SG04LP3-EU.

Ємність акумуляторів передбачена з розрахунку забезпечення роботи бювету протягом доби при максимальному навантаженні.

Запропоновані заходи з охорони праці при монтажі установки, грозозахисту та заземлення.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. КАБІНЕТ МІНІСТРІВ УКРАЇНИ. РОЗПОРЯДЖЕННЯ Про затвердження Державної цільової економічної програми енергетичної модернізації підприємств водопостачання та водовідведення, що перебувають у державній або комунальній власності, на період до 2030 року від 15 листопада 2024 р. № 1133-р Київ {Із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 272 від 07.03.2025 № 1796 від 31.12.2025

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1133-2024-%D1%80#Text>

2. <https://skandinavia.com.ua/ua/blog/shho-slid-znati-pro-byuveti-kieva/>

3. ДЕРЖАВНІ САНІТАРНІ НОРМИ ТА ПРАВИЛА "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10)

<https://aqua-life.ua/ua/info/gigienicheskie-trebovaniya-k-vode-pitevoy-sanpin-2.2.4-171-10/?srsltid=AfmBOopJjay29In2yv0TEA0LmkdcODN8vwi9V-CfaktUYLoGyuPgl73J>

4. Методичні вказівки «Довідкові дані з клімату України» для виконання практичних, розрахунково-графічних, курсових робіт, дипломних проектів і магістерських робіт студентами всіх природничих напрямів підготовки та спеціальностей НУВГП денної та заочної форм навчання / О.І. Галік, Т.О. Басюк. – Рівне: НУВГП, 2014. – 158 с.

5. <https://termounion.ua/hidroakumulyator-shcho-tse-take-i-navishcho-vin-potribnuu>

6. Синєглазов В. М. Відновлювальна енергетика: навчальний посібник / В. М. Синєглазов, О. А. Зеленков, Ш. І. Аскеров, Б. І. Дмитренко – К.: НАУ, 2015. – 278 с.

7. 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.

8. Галько С. В. Технології та засоби перетворення відновлюваних джерел енергії для приватних домогосподарств: монографія / С. В. Галько,

В. Я. Жарков, А. В. Жарков. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. - 215 с.

9. Чумак В.В., Островерхов М.Я., Тимошук О.Л., Коваленко М.А., Цивінський С.С., Коваленко І.Я. Безконтактні магнітоелектричні машини із постійними магнітами: монографія / Чумак В.В., Островерхов М.Я., Тимошук О.Л., Коваленко М.А., Цивінський С.С., Коваленко І.Я. – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2022. – 210 с

10. Вітроенергетика [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка» / Головка В. М. ; КПП ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,5 Мбайт). – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 88 с.

11. Методичні рекомендації до виконання курсового проекту «Проектування вітроенергетичної установки» із навчальної дисципліни «Вітроенергетика» (для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» галузей знань 14 – Електрична інженерія спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : М. Л. Глебова, О. Б. Єгоров, С. І. Корнелюк. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 97 с.

12. <https://specantenna.com.ua/ua/a435699-chto-takoe-kontroller.html>

13. https://gbo.com.ua/uk/gibridnyi-trekhfaznyi-nizkovoltnyi-invertor-deye-5-kvt/?srsltid=AfmBOoqWGiVkJ78YcDMWVr_Vu2nxY8E1mzolXTysTtC34d__JLD2jBGh

14. https://a-trade.com.ua/product/akkumulyatomaya-batareya-litievaya-lifepo4-ecolife-48-220?srsltid=AfmBOoo2D5cNFB2IqAJCPScCSnALU4h6wVZ0MYKxcijqWHNRYFAI_1SN

15. Геврик Є. О. Охорона праці: навч. посібник для студентів вищих навчальних закладів [Електронний ресурс] / Є. О. Геврик. – К. : Ельга: Ніка-центр, 2003. – 280 с. – Режим доступу : lib.ltd.ua/охорона-праці-геврик.html

16. Гогіташвілі Г. Г. Основи охорони праці [Електронний ресурс] / Г. Г. Гогіташвілі, В. М. Лапін. – К. : Знання, 2008. – 302 с. – Режим доступу : library.nung.edu.ua/okhorona-pratsi-yak-vazhlivii-aspekt-diyalnosti

17. Безпека життєдіяльності : конспект лекцій / упоряд. Ю. Ю. Млавець. Ужгород : ДВНЗ “УжНУ”, 2023. 44 с. URL: <https://surl.li/bflieh>
18. Будівельні крани (конструкції, технічні характеристики, вибір та експлуатація): навч. посіб. / Л. А. Хмара, М. П. Колісник, А. Ф. Шевченко [та ін.]. Дніпропетровськ: ІМА-прес, 2015. – 356 с.
19. Зеркалов Д.В. Охорона праці в галузі: Загальні вимоги. Навчальний посібник. – К.: «Основа». 2011.
20. ДЕРЖАВНІ БУДІВЕЛЬНІ НОРМИ УКРАЇНИ СИСТЕМИ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ, ДБН В.2.5-56:2014 Київ, Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015
21. НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ, Вітроенергетика, УСТАНОВКИ ЕЛЕКТРИЧНІ ВІТРЯНІ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ. Загальні технічні вимоги, ДСТУ 4859:2007, Київ, ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2009.
22. ЗАХИСТ СПОРУД ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ВІД ВПЛИВІВ БЛИСКАВОК. ПРИРОДА ТА ПАРАМЕТРИ БЛИСКАВКИ, Навчальний посібник рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», Укладачі: Є. О. Троценко, Ю.В. Перетятко Електронне мережне навчальне видання, Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023.
23. Улаштування глибинних заземлень обладнання електричних мереж. Проект повторного застосування. Арх. № 1.18. Методика розрахунку. Робочі креслення. Науково-виробниче підприємство ТОВ «ЕНЕРГОЛІГА». Київ, 2018.
24. ДСТУ Б В.2.5-82:2016 Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом.

ГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Види вітродвигунів

Вітродвигуни, що працюють за різниці сил лобового тиску



Карусельний



Барабанний



Ротор Савоніуса

Вітродвигуни з горизонтальною віссю, що працюють завдяки дії аеродинамічної підйомної сили



Однолопатевий



Трилопатевий



Багатолопатевий



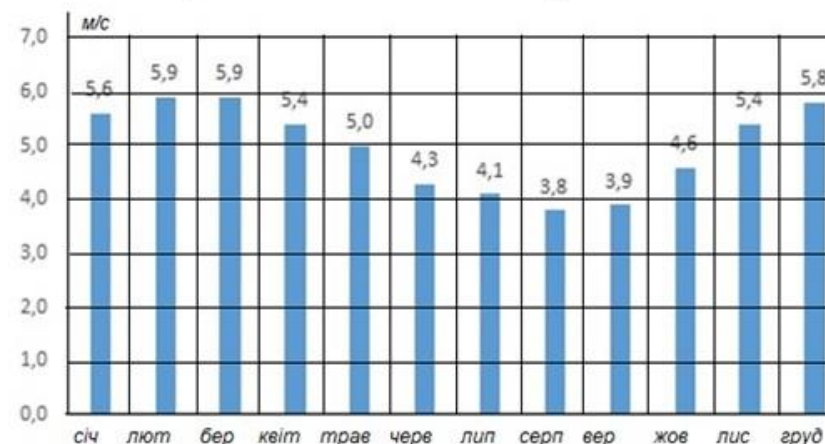
Вітрогенератор
Онiпко

Загальна характеристика об'єкту проектування

Можливі варіанти виконання бюветів



Середня швидкість вітру по місяцях



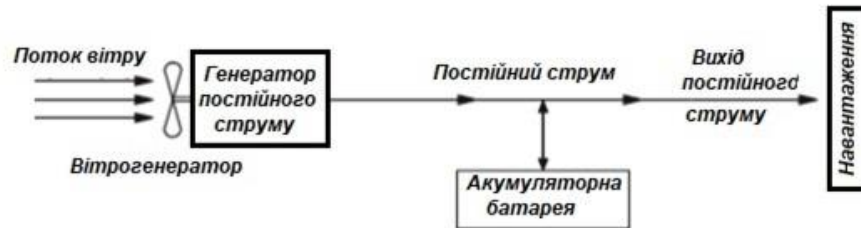
Перелік обладнання та встановлена потужність

Варіанти роботи бювету за умов відсутності зовнішнього електропостачання

- Встановлення та застосування ручного насосу;
- Використання накопичувального резервуару;
- Застосування генераторів з двигунами внутрішнього згоряння;
- Використання сонячних батарей з акумуляторами;
- Застосування вітрових установок.

Споживач	Кількість споживачів, шт.	Потужність одиниці, кВт	Сумарна потужність, кВт
Насос глибинний	1	0,75	0,75
Освітлення світлодіодне	10	0,02	0,2
Підігрів водяної арматури взимку	1	1,0	1,0
Розетки для зарядки телефонів	5	0,01	0,05
Кавомашина	1	0,85	0,85
Холодильник	1	0,2	0,2
Роутер	1	0,02	0,02
Касовий апарат	1	0,1	0,1
Сумарна встановлена потужність електричного обладнання			3,17

Структурні схеми вітрових установок



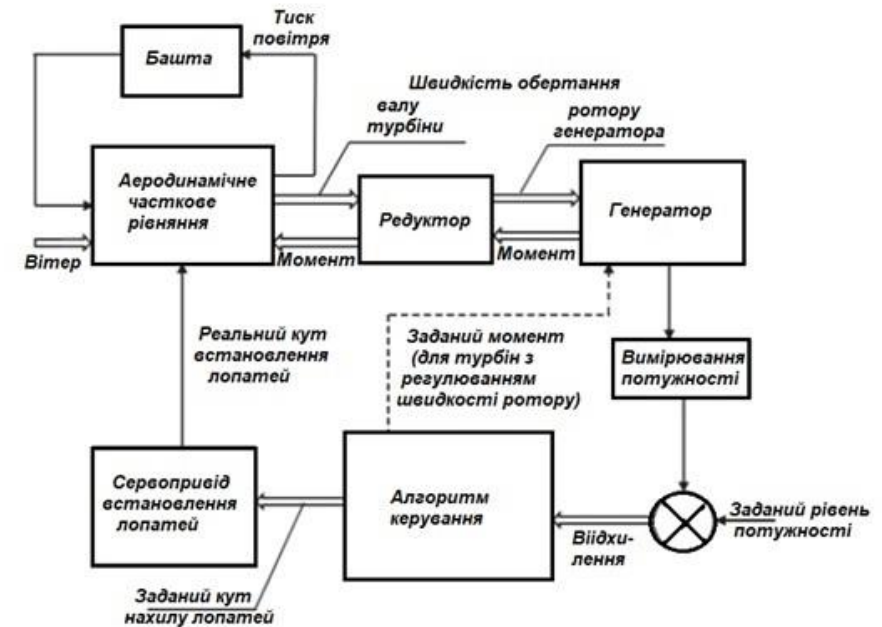
Автономна ВЕУ постійного струму



Автономна ВЕУ для отримання теплової енергії

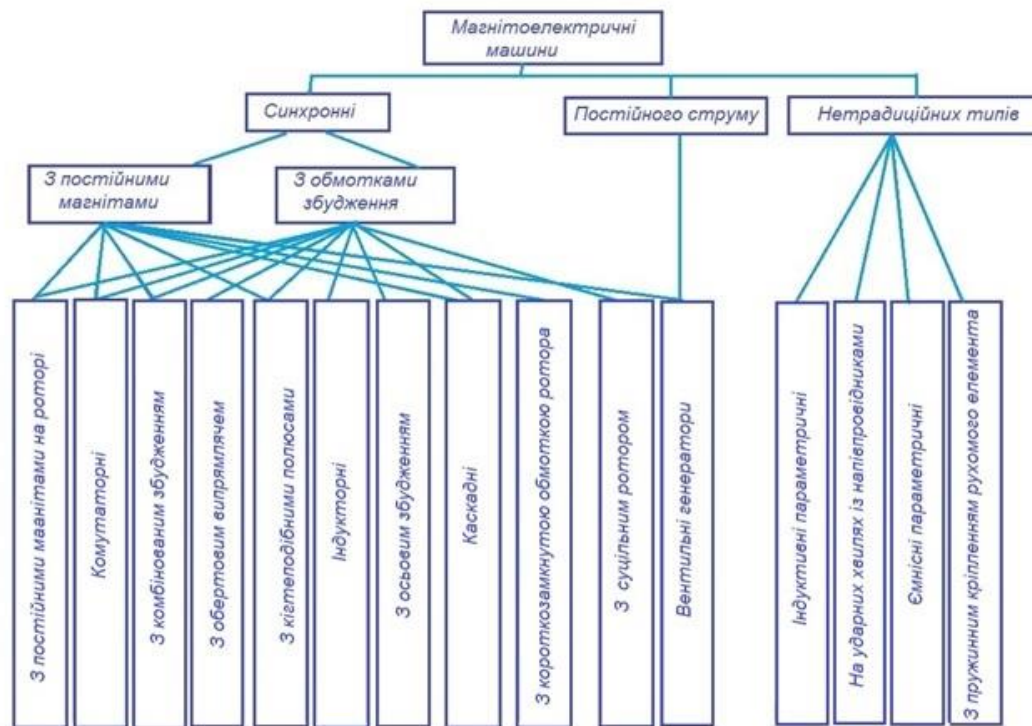


Автономна ВЕУ для отримання електроенергії стандартних параметрів

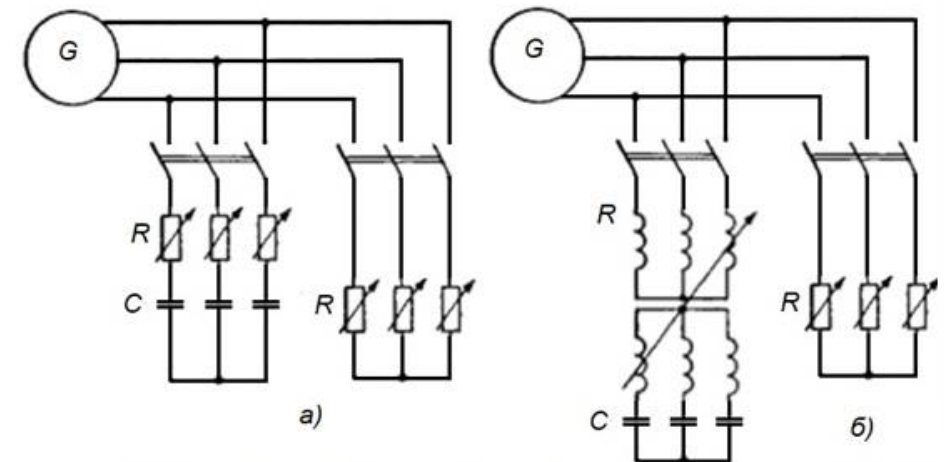


Узагальнена структурна схема ВЕУ

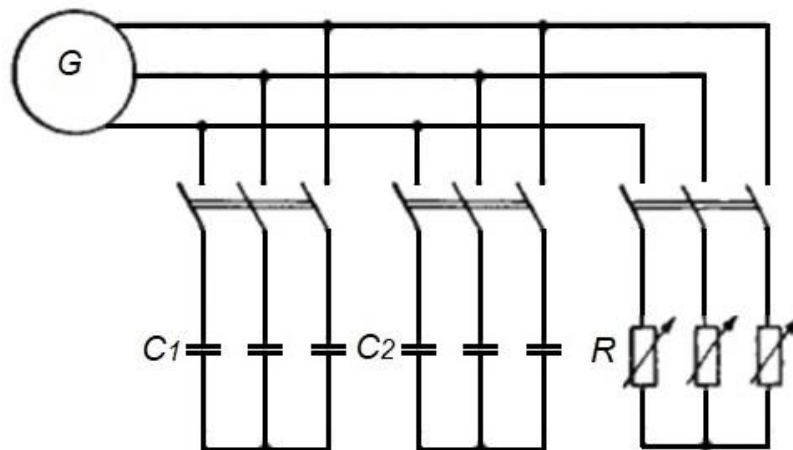
Класифікація магнітоелектричних машин та регулювання їх напруги



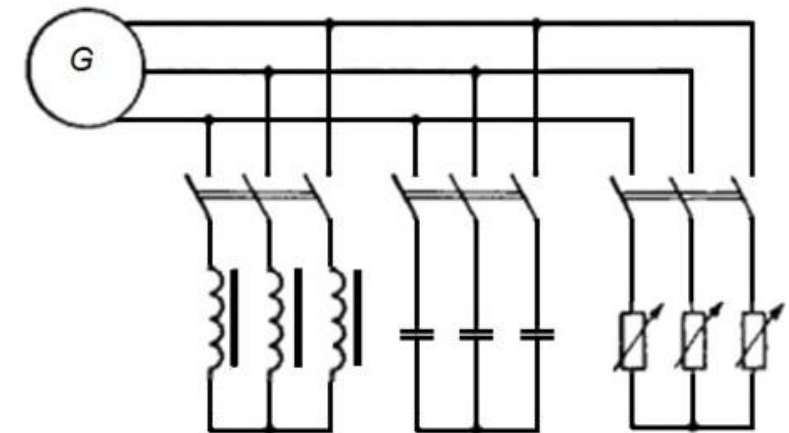
Регулювання за допомогою конденсаторів



з активними опорами трансформатором зі змінним коефіцієнтом трансформації



двоступеневе регулювання ємності шунтувальних конденсаторів



ферорезонансна стабілізація

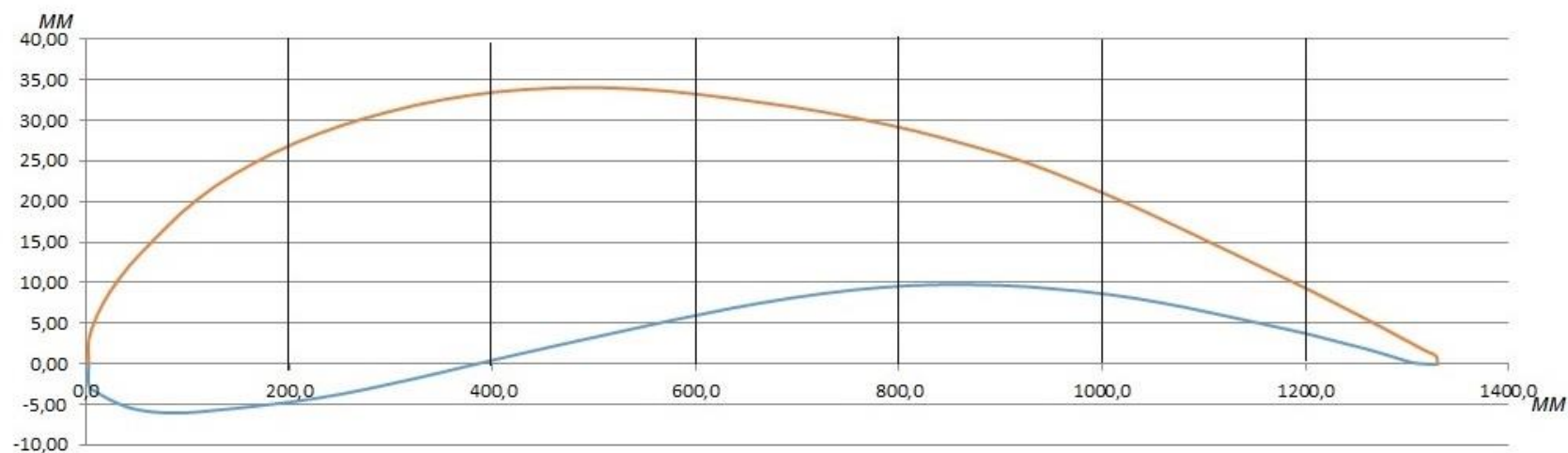
Параметри вітрового колеса. шаблон кореневого перерізу лопаті

Залежність коефіцієнта потужності від
коефіцієнта гальмування



Параметри лопаті

Параметри	Номер перерізу				
	1	2	3	4	5
Відносний радіус розміщення перерізу	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Радіус розміщення перерізу, мм	700	1400	2100	2800	3500
Довжина хорди лопаті, b_k , мм	1330	650	430	330	260
Товщина перерізу лопаті, c_k , мм	260	117	65	43	26
Коефіцієнт підйомної сили, $C_{y,k}$	0,746	1,004	1,173	1,173	1,303
Кут обтікання лопаті вітром, β_k , градус	29,6	17,35	12,01	9,13	7,36
Кут атаки перерізу, α_k , градус	-2,97	-0,05	2,41	2,77	3,87
Кут встановлення лопаті, Ψ , град.	32,57	17,35	9,6	6,36	3,49



Шаблон кореневого перерізу лопаті