

Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і робототехнічних
систем



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

на тему «Модернізація біротативного генератора для вітроелектростанції»

Здобувач СВО «Бакалавр»: . Кардопольцев Роман Сергійович

Керівник : Штепа Євген Павлович , к.т.н., доцент

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від 15.06. 2026 р.

В.о. Завідувача кафедри АТЕіРС _____ **Олексій ЖИЙГАЛО**

Одеса - 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: Автоматизації та робототехніки

Кафедра автоматизації технологічних, електромеханічних і робототехнічних систем

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма: Електромеханічні системи з інтелектуальним керуванням

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри ЕтаМ

_____Осадчук П.І.

«____» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувача СВО «Бакалавр» Кардопольцев Роман Сергійович

1. Тема роботи: «Модернізація біротативного генератора для вітроелектростанції

«

Керівник роботи: Штепа Євген Павлович к.т.н., доцент

Затверджено наказом ОНТУ від **30.01.2026** р. наказ № **58-03**

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 10.6.26

3. Вихідні дані роботи: Біротативний генератор: МСБ-72/4S4; 15,0кВт;1450об/хв.

Генератор і двигун постійного струму:ПД152,8; 8,8, кВт;1500об/хв

4. Перелік питань, які потрібно розробити : метод дослідження; Конструкція біротативного генератора; Схема вітроелектростанції; характеристики біротативного генератора; моделювання електроприводу.

5. Перелік демонстраційного матеріалу. Слайди презентації: Титульний слайд; мета і завдання роботи; конструкція біротативного генератора; схема вітроелектростанції; характеристики біротативного генератора; моделювання електроприводу

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання: 21.5.2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк викона	При
1	.Розділ 1. Вітроенергетика	15.03.2026	
2	РОЗДІЛ 2. Вірогенератор з біротативним генератором	10.04.2026	
3	Розділ 3. Розрахунок вітроустановки	25.05.26	
4	Розділ 4. Експериментальні дослідження	10.05.2026	
5	.Розділ 5.Економіка	12.05.26	
5	.Розділ 6 Техніка електробезпеки	25.05.2026	
6	Попередній захист кваліфікаційної роботи.	10.06.2026	
7	Захист кваліфікаційної роботи бакалавра.	25.06.2026	

Здобувач: Кардопольцев Р. С. _____

Керівник проекту доцент Штепа Є.П. _____

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ. Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач СВО Кардопольцев Р. С. _____

РЕФЕРАТ

Кардопольцев Р. С. Модернізація біротативного генератора для вітроелектростанції. Кваліфікаційна робота бакалавра. – Одеса: ОНТУ, 2026. – 61 с. **Бібліогр.: 8. Іл.: 28**

У кваліфікаційній роботі бакалавра описно принцип дії і обладнання діючих вітроелектростанцій, приведена конструкція біротативного генератора, у якого статор і ротор вільно обертаються в підшипника; схема вітроелектростанції з біротативним генератором; характеристики біротативного генератора. Приведені технічні характеристики біротативного генератора і машин постійного струму системи управління частотою обертання статора біротативного генератора.

Досліджена система управління біротативним генератором на електронній моделі в середовищі Matlab Simulink.

В заключній частині кваліфікаційної роботи приведені економічні розрахунки, а також техніка електробезпеки.

Ключові слова: біротативний генератор, конструктивне виконання генератора, електронна модель, схема вітроелектростанції, характеристики.

ABSTRACT

Kardopoltsev R. S. Modernization of a birotary generator for a wind power plant. Bachelor's qualification work. – Odesa: ONTU, 2026. – 76 p. Bibliography: 8. Ill.: 28

The bachelor's qualification work describes the principle of operation and equipment of operating wind power plants, the design of a birotary generator is given, in which the stator and rotor rotate freely in bearings; a diagram of a wind power plant with a birotary generator; characteristics of a birotary generator. The technical characteristics of the birotary generator and DC machines of the stator frequency control system of the birotary generator are given. The birotary generator control system is studied on an electronic model in the Matlab Simulink environment. In the final part of the qualification work, economic calculations are given, as well as electrical safety techniques. Keywords:

birotary generator, generator design, electronic model. Wind power plant diagram, characteristics.electronic model.

Зміст

Вступ.....	.6
Розділ 1. Вітроенергетика.....	9
1.1.Загальні відомості про вітрову енергію.....	9
1.2.Потужність та енергія, що виробляється вітроустановкою.....	12
1.3.Швидкохідність вітру	13
1.4. Конструкція вітроустановок.....	14
1.5. Конструктивні елементи ВЕУ згоризонтальною віссю обертання.....	15
РОЗДІЛ 2. Ветроелектростанція з біротативним генератором.....	18
2.1.Існуючі системи системи управління вітрогенераторами генератором.....	18
Розділ 3. Розрахунок втроустановки.....	29
3.1.Розрахунок потужності вітрогенератора	29
3.2.Синхронні генератори.....	30
3.3.Технічні дані електроустаткування.....	37
Розділ 4.Експериментальні дослідження.....	38
Розділ 5. Економіка.....	42
5.1.Загальні відомості.....	42
5.2.Капітальні вкладення.....	45
5.3.Собівартість виробництва електроенергії.....	47
5.4. Оцінка терміну окупності ВЕС.....	49
5.5.Вироблення електро енергії ВЕС.....	52

Розділ 6. Техніка безпеки	КРЕ АТЕРС: 641-03.26.11.25:1.3.6	53
Список літератури	Підпис	Дата
Розробив.	Кардопольцев	
Перевірив.	Штепа Є. П.	
Реценз.		
Н. Контр.		
Затверд.		
Модернізація біротативного генератора для вітроелектростанції		7
		ОНТУ

ВСТУП

Переваги вітрової енергетики:

вугільною та газовою енергетикою;

- нульова вартість паливної складової, джерело енергії невичерпне і присутнє в необмеженій кількості;
- екологічно прийнятна енергетика – виробництво енергії не супроводжується викидами двоокису вуглецю;
- вітроенергетика не має ризиків, пов'язаних із нестабільністю цін на викопне паливо;
- надійність поставок – вітроенергетика дозволяє уникнути залежності від імпорту енергоресурсів;
- модульний дизайн, швидкий монтаж;
- електропостачання за обсягами порівнянне з традиційними способами генерації;
- вітроенергетика не заважає веденню сільського господарства і промислової діяльності поблизу вітростанцій.

Переваги вітрової енергетики:

- низька собівартість – вітроенергетика може конкурувати з ядерною, вугільною та газовою енергетикою;
- нульова вартість паливної складової, джерело енергії невичерпне і присутнє в необмеженій кількості;
- екологічно прийнятна енергетика – виробництво енергії не су-

	проводжується	викидами	двоокису вуглецю;		Лист
			КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	8

—
—
— вітроенергетика не має ризиків, пов'язаних із нестабільністю цін на викопне паливо;

— надійність поставок — вітроенергетика дозволяє уникнути залежності від імпорту енергоресурсів;

— модульний дизайн, швидкий монтаж;

— електропостачання за обсягами порівнянне з традиційними способами генерації;

— вітроенергетика не заважає веденню сільського господарства і промислової діяльності поблизу вітростанцій.

— Низький рівень інтеграції не чинить на роботу системи значного впливу. В даний час виробництво електроенергії за рахунок вітроенергетики становить 3-4% від загальної потреби ЄС у електроенергії, хоча існує велике варіювання по регіонам і країнам. Сучасні методи контролю та резервні потужності дозволяють без проблем інтегрувати до 20% електроенергії, одержуваної від вітростанцій.

— За прогнозами аналітиків, у найближчі роки вітроенергетика в Україні буде розвиватися швидше, в порівнянні з іншими видами відновлювальної енергетики, а загальна потужність вітропарків перевищить потужність сонячних станцій в 10 разів. На думку експертів, це зумовлено тим, що в порівнянні з фотоелектричними модулями, при однаковій потужності, вітроустановки займають меншу площу і коштують набагато дешевше.

— Для того щоб краще розуміти суть правового регулювання питання необхідно розібратися з деякими технічними особливостями функціонування вітроенергетики. Вітрогенератор (вітрова турбіна) —

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

це пристрій для перетворення кінетичної енергії вітру на електричну. Застосовується два види вітрових генераторів: горизонтальні та

—

—

вертикальні. Найбільш поширеними є горизонтальні, хоча у вертикальних навіть трохи більша енергія вітру. Вітрогенератори можна умовно поділити на дві категорії: 1. Промислові вітроелектростанції — група вітрових електричних установок (або окрема вітрова електрична установка), устаткування і споруди, які розташовані на одній території, функціонально пов'язані між собою і становлять єдиний комплекс, призначений виробляти електроенергію, перетворюючи кінетичну енергію вітру на електричну. 2. Домашні, або малі вітряки (для приватного використання), можуть повністю забезпечувати електроенергією один або декілька будинків, невеликі промислові об'єкти. Такі установки здатні працювати при середній швидкості вітру від 4 м/с.

- За прогнозами аналітиків, у найближчі роки вітроенергетика в Україні буде розвиватися швидше, в порівнянні з іншими видами відновлювальної енергетики, а загальна потужність вітропарків перевищить потужність сонячних станцій в 10 разів. На думку експертів, це зумовлено тим, що в порівнянні з фотоелектричними модулями, при однаковій потужності, вітроустановки займають меншу площу і коштують набагато дешевше.

—

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

Розділ 1. Вітроенергетика

1.1. Загальні відомості про вітрову енергію

Переваги вітрової енергетики:

- низька собівартість – вітроенергетика може конкурувати з ядерною, вугільною та газовою енергетикою;
- нульова вартість паливної складової, джерело енергії невичерпне і присутнє - в необмеженій кількості;
- екологічно прийнятна енергетика – виробництво енергії не супроводжується не має ризиків, пов'язаних із нестабільністю цін на викопне паливо;
- надійність поставок – вітроенергетика дозволяє уникнути залежності від імпорту енергоресурсів;
- модульний дизайн, швидкий монтаж;
- електропостачання за обсягами порівнянне з традиційними викидами двоокису вуглецю;
- вітроенергетика способами генерації;
- вітроенергетика не заважає веденню сільського господарства і промислової діяльності поблизу вітростанцій.

1.2. Основи теорії вітроелектричних установок

Потужність $P_{\text{мех}}$, яку вітрове колесо передає валу редуктора (якщо такий є) або безпосередньо валу генератора вітроустановки визначається за формулою:

$$P_{\text{мех}} = M_{\text{т}} - M_{\text{тер}} \cdot \Omega_{\text{вк}}, \quad (3.28)$$

де $M_{\text{тер}}$ – механічні втрати на тертя в підшипниках маточини вітрового колеса.

Визначимо, яку частину енергії вітрового потоку може перетворити в корисну роботу поверхня, поставлена перпендикулярно на-пряму вітру. На перший погляд здається, що таке положення поверхні по відношенню до вітру є найвигіднішим, так як за цієї умови тиск на поверхні досягає максимального значення. Проте слід взяти до уваги, що окрім сили тиску, є ще і швидкість переміщення цієї поверхні під дією сили вітрового потоку.

. Насправді, потужність обумовлюється добутком сили на швидкість. Звідси витікає, що одну і ту ж роботу можна отримати або за рахунок великої сили, але при малій швидкості переміщення робочої поверхні, або, навпаки, за рахунок малої сили

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

поверхні, але при відповідно до збільшеної швидкості її, отже, малій переміщення.

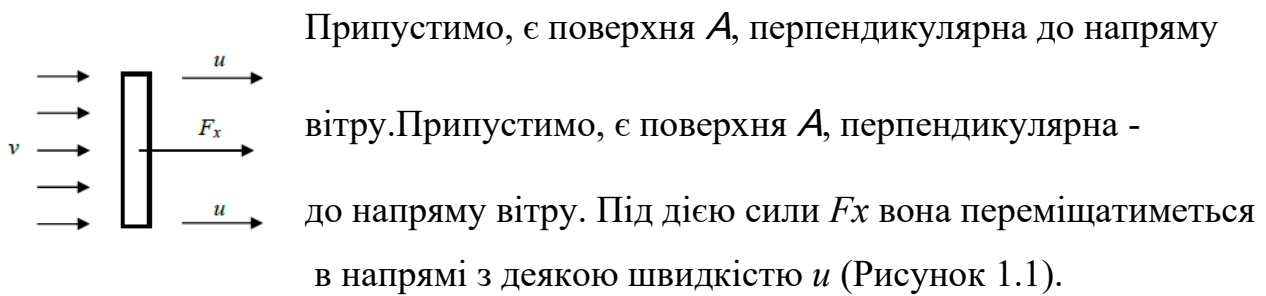


Рисунок 1.1 – Схема дії сили вітрового потоку на поверхню, до розміщена перпендикулярно до його напрямлення

Потужність сили F_x буде дорівнювати

Потужність сили F_x буде дорівнювати

$$P = F_x u, \quad (1.1)$$

де сила

$$F_x = c_x \rho A (v - u)^2. \quad (1.2)$$

Вітер набігає на поверхню з відносною швидкістю, рівною

$$w = v - u; \quad (1.3)$$

$$P = c_x \rho A (v - u)^2 u$$

Після перетворення отримаємо

$$c_{rmax} = 0,296. 0,65 = 0,192.$$

тобто максимальний коефіцієнт використання енергії вітру при роботі поверхні силою опору не може бути більший 0,192.

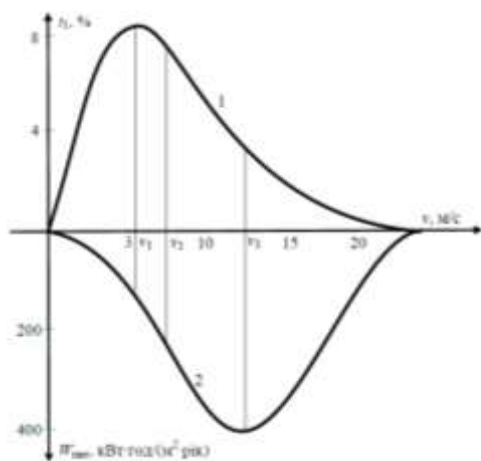
На практиці цей коефіцієнт менший. Завдяки тому, що робочі лопаті ротора переміщуються у напрямі повітряного потоку, вітрове навантаження діє не одночасно на усі лопаті, а по черзі.

Лопаті, що обертаються за напрямом вітру, зазнають тиску, що дорівнює

$$F_x = c_x \rho A (v - u)^2.$$

Робочі характеристики вітропродвигуна

Основними характеристиками вітроагрегата є момент, що розвивається ним, потужність і частота обертання. Найбільш поширені потужностні характеристики типу $P = f(v)$, характеристики лобового тиску $F_L = f(v)$, моментні характеристики $M = f(n)$, $M = f(v)$.



При побудові робочих характеристик користуються наступними

Рисунок 1.2 – Залежність від швидкостей вітру $\lambda l (l)$ енергії вітру $W_{\text{віт}}(2; v_1 v_2, v_3)$

формулами:

– діючий момент на валу ротора,

$F_{\text{л}} = f(v)$, моментні характеристики $M = f(n)$, $M = f(v)$.

При побудові робочих характеристик користуються наступними даними:

– діючий момент на валу ротора,

$$M = \bar{M} \pi R_p^3 \rho \frac{v^2}{2};$$

- потужність, що розвивається ротором,

$$P_p = M \omega = \bar{M} \pi R_p^3 \frac{\rho v^2}{2} \omega = \bar{M} \pi R_p^2 \rho \frac{v^3}{2} Z;$$

- лобовий тиск на лопаті ротора $F_{\text{л}} = \bar{B} \pi R_p^2 \rho \frac{v^2}{2}.$

1.2.Потужність та енергія, що виробляється вітроустановкою

Потужність вітроустановки визначається вираженням

вітроустановки визначається вираженням

$$P_{\text{ВЕУ}} = C_p A v^3, \text{ Вт}$$

Оскільки площа, що обметається вітроколом площа має форму круга, то

$$A = \frac{\pi D^2}{4}.$$

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

Враховуючи, що енергія від вітроколеса передається через редуктор, необхідно врахувати ККД редуктора ($\eta_{\text{мех}}$), та ККД генератора, або точніше ККД перетворення електричної енергії ($\eta_{\text{ген}}$), тоді, виражаючи потужність ВЕУ в кіловатах, рівняння запишеться у вигляді

$$P_{\text{ВЕУ}} = \frac{1}{2} C_p \rho \frac{\pi D^2}{4} V^3 \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{ген}} \cdot 10^{-3} =$$

Знаючи залежність C_p від швидкості вітру, можна побудувати характеристику потуж-

ності вітру в залежності від швидкості, або зняти її під час тривалих натурних випробувань, або шляхом продувки моделі в аеродинамічній трубі.

У всякому разі, будь-яка фірма в рекламних матеріалах дає характеристику потужності (в зарубіжній літературі вона має назву "крива потужності").

Для того, щоб визначити енергію, що виробляється вітроустановкою необхідно рактистику

знати розподіл швидкості вітру по діапазонах і хапотужності вітроустановки.

Існують два способи визначення енергії:

а) за допомогою стандартної функції розподілу швидкості вітру;

– зазвичай в якості такої функції використовуються або двох параметрична функція Вейбулла, або її спрощення у вигляді однопараметричної функції розподілу Релея;

б) другий спосіб ґрунтується на визначенні функції розподілу швидкості вітру за діапазонами на базі реальних вимірів швидкостівітру.

При цьому в прийнятих діапазонах швидкості вітру і, отже, потужність

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

приймається остійною

Сутність процесу пояснюється на рисунку 1.2.

Так якщо мається повторюваність швидкості вітру, то кожному значенню швидкості v_i та повторюваності t_i відповідає питоме значення енергії, яке визначається за формулою:

$$T_{\text{ВВП}} = K_{\text{ВВП}} T$$

де $T = 8760$ – число годин у році.

Таким чином будується крива питомої значення вітру. Як бачимо крива має максимум, при швидкості v_3 , яка не співпадає з середньою швидкістю.

1.3.Швидкохідність вітру

Це оняття визначає ефективність роботи вітроколеса. Розглянемо два крайніх режиму, неефективність яких зрозуміла на якісному рівні. Перший, коли лопаті вітроколеса розташовані так часто або вітроколесо обертається так швидко, що кожна лопать обертається в ту-рбулізованим потоці, збуреному попередніми лопатями. В результаті вітроколесо "перемелює" повітря і віддача від нього мінімальна. Другий крайній випадок, коли лопаті розташовані так рідко, або колесо обертається так повільно, що значна частина потоку проходить через поперечний переріз вітроколеса не взаємодіючи з тією його лопатями. Звідси випливає, що для досягнення

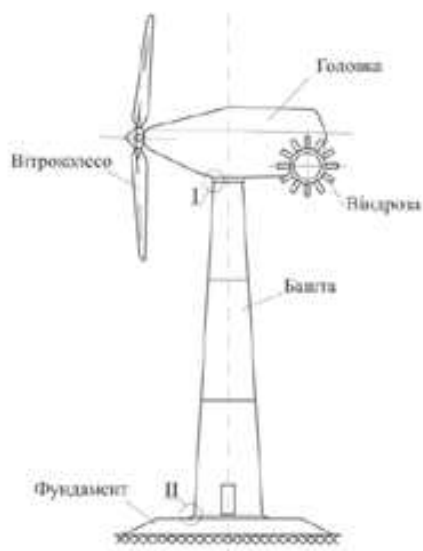
максимальної ефективності, частота обертання вітроколеса що має певну кількість лопатей, повинна якоюсь відповідати швидкості вітру.

$$W_i = P_{i0} t_i T = \frac{\rho v_i^3 t_i T}{2},$$

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

1.4. КОНСТРУКЦІЯ ВІТРОУСТАНОВОК

Структурні схеми ВЕУ та режими їх роботи в



класах *A*, *B* і *C* різні. При розгляді конструктивних схем розрізняють тип вітродвигуна, спосіб управління ним у робочому і пусковому режимах По

Рисунок 1.3-Загальний вигляд горизонтальної вітроустановки

кожному із зазначених елементів необхідно зробити оптимальний вибір на основі порівняльного аналізу можливих варіантів. Так, для установок , що функціонують в автономному режимі або паралельно з традиційними джерелами енергії, внаслідок нелінійності і нестационарності вольтамперних характеристик ВЕУ потрібне використання спеціалізованих параметри якості електричної енергії напівпровідникових перетворювачів, що забезпечують стандартні.

Залежно від орієнтації осі обертання по відношенню до напрямку вітрового потоку вітротурбіни ВЕУ можуть бути з горизонтальною віссю обертання, паралельною напрямку вітрового потоку, і з вертикальною віссю обертання, перпендикулярною напрямку вітрового потоку.

В даний час найбільшого поширення набули горизонтально-осьові пропелерні ВЕУ, що використовують підйомну силу лопаті. Вони вважаються більш ефективними зважаючи на високий коефіцієнт використання енергії вітру (0,35...0,45), мають достатній пусковий момент і легко розкручуються, включаючись в роботу при швидкостях вітру 3...5 м/с.

Для автономних ВЕУ вимоги і прийняті технічні рішення по структурі

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

ВЕУ, що пред'являються можуть істотно відрізнятися від тих, які повинні працювати паралельно з енергосистемою. Це пояснюється тим, що в даному випадку необхідні стандартами значення напруги і частоти джерела енергії та їх стабільність не задаються енергосистемою, а повинні бути забезпечені системами автоматичного керування самою ВЕУ. Аналіз показує, що автономні ВЕУ можна розділити на дві групи за принципом отримання заданої

частоти джерела:

- 1) зі стабілізацією частоти, одержуваної в генераторі ВЕУ;
з перетворенням змінної частоти, одержуваної в генераторі, в задану
- 2) постійну частоту.

Структурна схема вітроенергетичної установки, що складається з аеродинамічного, механічного, електричного, а також перетворювального модулів і системи управління.

1.5. Схеми і конструктивні елементи ВЕУ з горизонтальною віссю обертання

Загальний вигляд конструктивного компонування вітроенергетичної установки з горизонтальною віссю обертання вітроколеса показаний на рисунку 1.3.

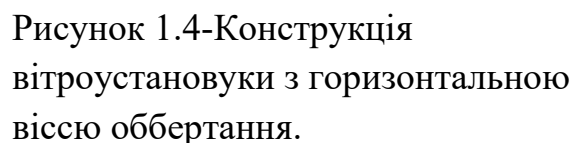
Основними функціональними елементами вітрових електроустановок є (рис. 1.3): вітровий двигун, електрогенератор, механічна (є також системи без передачі) передача, пристрої автоматичного управління та регулювання, допоміжні пристрої.

Вітровий двигун є проточним двигуном, що перетворює кінетичну енергію вітру в механічну. Вітровий двигун з горизонтальною віссю складається з:

- ротора, сформованого з комплексу закріплених променевих лопатей в маточині розташованого на горизонтальному валу;
- основного корпусу (башти або гондоли), розташованого на рухомому (обертовому) наконечнику на вежі або щоглі відповідної висоти;
- направляючих пристроїв, що призначенні для підстроювання ротору під вітер, тобто віссю паралельно до напрямку вітру;
- регулювальних і керуючих пристроїв;
- комплексу зняття і видачі електричної енергії.

На рис. 1.4 представлений класичний приклад компонування і розміщення устаткування в Рисунок 1.3-Загальний вигляд горизонтальної вітроустановки

вітроенергетичній установці.	КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2				Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	17



Згідно прийнятої класифікації до ВЕУ малої потужності відносяться ВЕУ з номінальною потужністю до 100 кВт включно.

Так як основнимиспоживачами цих ВЕУ є жителі сільських районів, заміських будинків, власники невеликих підприємств, ферм тощо, до ВЕУ малої потужності пред'являються наступні основні вимоги:

- порівняно низька питома вартість одного кВт встановленої
- високий виробіток електроенергії для певної середньорічної швидкості вітру в районі розміщення;
- якість вироблюваної електроенергії повинна відповідати вимогам діючих стандартів;
- простота в монтажі та технічному обслуговуванні при експлуатації;
- відносно невелика площа для розміщення;
- шумовий вплив ВЕУ на довкілля не повинен перевищувати значень, встановлених чинними нормативними документами для житлових забудов;
- можливість використовувати ВЕУ для роботи спільно з додамою можливістю і забезпечити

енергоспоживачів.

На рисунку 1.5 показана класична компоновка вітроустановки малої потужності. Відмінною особливістю ВЕУ малої потужності є відсутність потужної гондоли, в якій фактично розташований тільки генератор. Для забезпечення установки ВЕУ на вітер використовується флюгерна система.

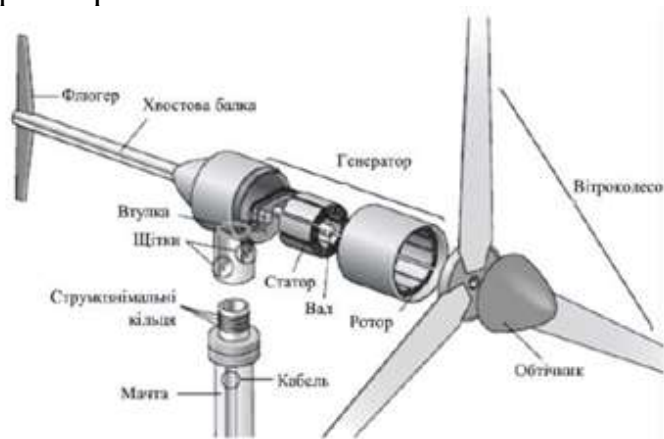


Рисунок 1.5-Установка вітроустановки малої потужності

Дуже малі ВЕУ (потужністю до 5 кВт), як правило, мають генератор змінного струму з постійними магнітами, вироблювана енергія змінного струму перетворюється в постійний струм за допомогою випрямляча.

У таких ВЕУ швидкість обертання, а значить і частота на виході генератора може змінюватися в широких межах, вони не містять редукторів. Як правило, такі ВЕУ використовуються для зарядки акумуляторів з підключенням до нього електроприладів на постійному струмі, напругою 12 або 24 В.

Широко також використовуються генератори постійного струму з напругою на виході 12 або 24 В.

Для орієнтації на вітер практично всіх ВЕУ цього класу використовуються хвостові флюгерні пристрої.

У багатьох з них передача електроенергії від генератора, розташованого вгорі в гондолі, до випрямляча, розташованого внизу, здійснюється кабелем через контактні кільця з щітковим апаратом. Це дозволяє гондолі обертатися навколо вертикальної осі скільки завгодно раз при зміні напрямку вітру.

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

Однак контактні кільця є досить ненадійним елементом.

У вітроустановках потужністю 5 кВт і більше як правило використовуються трифазні

генератори змінного струму, вітроустановки мають механічні регулятори, що забезпечують

сталість швидкості обертання вітроколеса, а значить і частоти струму, на рівні вимог для автономного енергопостачання. ВЕУ такого роду можуть додатково або бензиновими комплектуватися дизельними генераторами, які вводяться в роботу при відсутності вітру або, у разі коли потужність вітру недостатня для покриття навантаження. Однак паралельна робота ВЕУ і навіть малих дизель-генераторів може забезпечуватися тільки спеціальною системою управління.

РОЗДІЛ 2. Вірогенератор з біротативним генератором.

2.1. Існуючі системи управління вітрогенераторами генератором.

Існує декілька схем ветрових електростанцій:

Існує декілька схем ветрових електростанцій:

1. Асинхронний генератор з короткозамкнутим ротором (Рисунок 2.1).

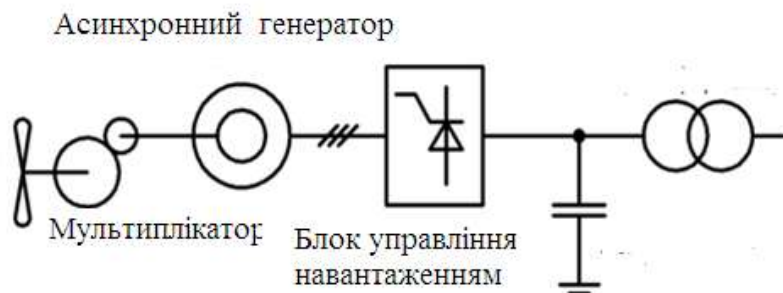


Рисунок 2.1.- Електростанції на базі асинхронного генератора з короткозамкнутим ротором .

Основними недоліками даного технічного рішення є: відносно низький ККД ; фіксована робоча частота обертання вітряка, що є причиною недовикористання його енергетичних можливостей, а наявність мультиплікатора знижує надійність

і підвищує вартість установки.	КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2				Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	20

2. Асинхронний генератора з фазним ротором (Рисунок 2.2) .

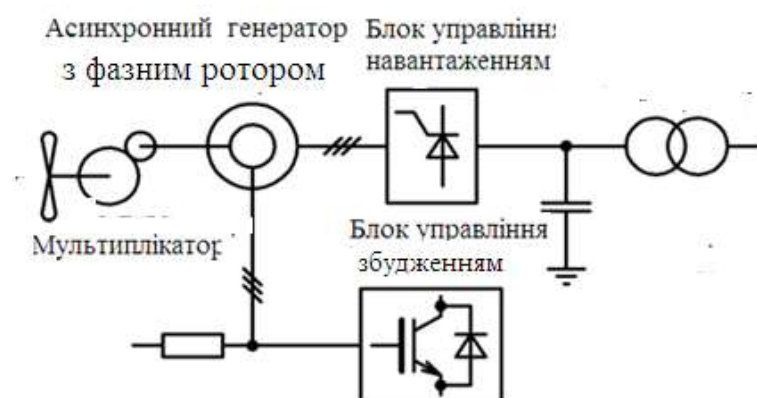


Рисунок 2.2 Електростанції на базі асинхронного генератора з фазним ротором .

На збудження при значному розузгодженні частот витрачається відчутна частка електроенергії, що виробляється. Наявність ковзаючих контактів і мультиплікатора також знижують надійність установки в порівнянні з попередніми.

3. Асинхронизований синхронний генератор (машини подвійного живлення).

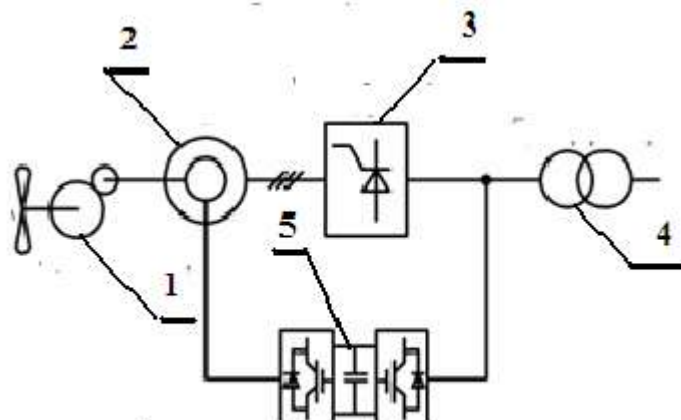


Рисунок 2.3-Схема на базі асинхронизованного синхронного генератора подвійного живлення.

4. Синхронний генератор із збудженням від постійних магнітів або електромагнітним збудженням

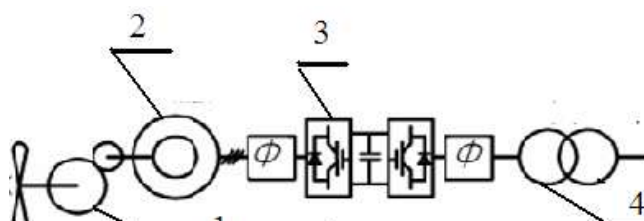


Рисунок 2.4-Схема на базі синхронного генератора із збудженням від постійних магнітів або електромагнітним збудженням

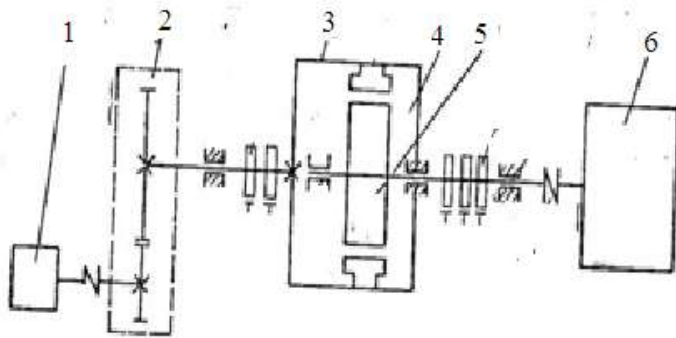


Рисунок 2. 5-Біротативний електропривод: 1-допоміжний двигун; 2 - редуктор; 3-біротативний двигун; 4 – статор; 5 - ротор; 6 – робоча машина.

наведені схеми роботи повітряних електростанцій мають складну конструкцію, що потребує значну кількість складних елементів конструкції.

2.2. Вітроелектростанції з біротативним генератором

Є приклади [2, с.125-129] використання біротативної синхронної машини в режимі двигуна в гірничій промисловості для регульованого електроприводу вентиляторів головного провітрювання шахт, компресорів, вуглесосів, а також шахтних підйомних машин а також шахтних підйомних машин

В роботі [3, С.29-32] розглянута система управління швидкістю вентилятора за системою Г-Д з біротативним синхронним двигуном (Рисунок 2.5). В такій системі регулювання швидкості

вентилятора здійснюється регулюванням струму збудження машин постійного струму реостатами $R_{вг}$ і $R_{вд}$ 6 через редуктор 2, до якого під'єднано машину постійного струму 1, що може працювати в режимі двигуна, або генератора.

Якірне коло цієї машини постійного струму з'єднано з якорем другої машини постійного струму, що також може працювати в режимі генератора або двигуна в залежності від напрямку регулювання швидкості ротора.

В роботі [5, С.1-4] розглянуто автоматизований електропривід складається (рис.2.7) з синхронного біротативного двигуна 1, який приводить в дію робочу машину 2 через редуктор 3, до якого під'єднано машину постійного струму 4, що може в режимі двигуна, або генератора. Якірне коло цієї машини постійного струму з'єднано з якорем другої

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

машини постійного струму 7. що також може працювати в режимі генератора або двигуна в залежності від напрямку регулювання швидкості ротора.

.При відсутності збудження 5 машини 4 статор обертається з синхронною частотою і ротор нерухомий. При поступовому збільшенні регулятором 6 струму збудження 5 ротор поступово регулюють струм збудження 9 двигуна 7.

В роботі [6, С. 49-55] розглянуто електропривід підйомної установки 1 з редуктором 2 і біротативним двигуном 3 (Рисунок 2.6) . В схемі позначено реостати: $R_{зд}$ - в колі збуд-

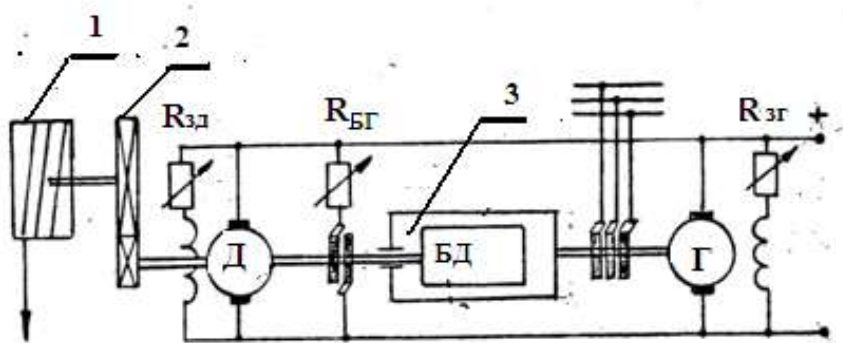


Рисунок 2.6- Електропривід підйомної установки з біротативним двигуном.

ження двигуна постійного струму Д, $R_{БГ}$ – в колі збудження синхронного біротативного генератора, $R_{зг}$ – в колі збудження генератора постійного струму Г.

Канатоведучий шків 1 підйомної машини з'єднаний через редуктор 2 з валом якоря двигуна постійного струму М , а також з індуктором біротативного синхронного двигуна 3. Статор приєднаний до трифазної мережі через контактні кільця. До вала статора приєднано генератор постійного струму Г. Кола якоря двигуна Д і якоря генератора Г з'єднані послідовно.

В такій системі має місце паралельна передача потужностей системою постійного струму Г-Д. Додатковий обертаючий момент буде

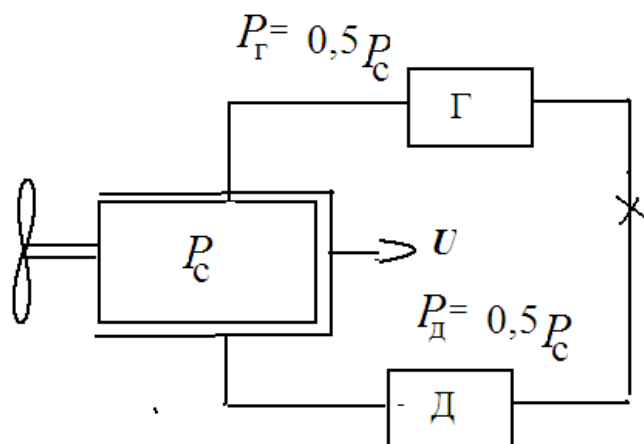
					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

передататися по паралельному каналу через загальний вал ротора біротативного двигуна БД та двигуна постійного струму Д, який вибирають приблизно рівним половинній потужності від потужності біротативного двигуна.

Щоб уникнути його перевантажень пусковий момент установки не повинен перевищувати 1,4 номінального (наприклад, в багатоканатні підйомні установки, вентилятори). Таку систему електроприводу зазвичай застосовують для агрегатів, де пусковий момент не перевищує значення 2,8 ... 3,0, що характерно для машин постійного струму.

Номінальним приймають такий режим біротативного двигуна, коли швидкість обертання його ротора зменшується до 0,5 від синхронної.

Уповільнення електроприводу здійснюється поступовим зменшенням струму в обмотці збудження генератора. Для реверсування необхідно ротор зупинити, а потім розігнати в



зворотну сторону. З огляду на знаве моменту інерції доцільно роботі [3, С.29-32] розглянута система управління швидкістю вентилятора за системою Г-Д з біротативним синхронним двигуном (Рисунок 2.5). В такій

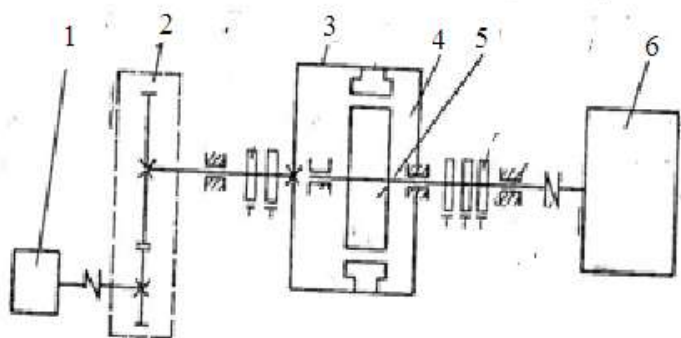
Рисунок 2. 7-Розподіл потужностей

системі регулювання швидкості вентилятора здійснюється регулюванням струму збудження машин постійного струму реостатами $R_{вг}$ і $R_{вд}$.

В роботі [4, с.46] розгляну електропривід складається (рису.2.6) з синхроннобіротативного двигуна 3, який приводить в дію робочу машину

Рисунок 2.8-Біротативний

електропривод: 1-допоміжний двигун; 2 - редуктор; 3- біротативний двигун; 4 – статор; 5 - ротор; 6 – побоча машина.



працювати в режимі двигуна, або

генератора. Якірне коло цієї машини постійного струму з'єднано з якорем другої машини постійного струму, що також може працювати в режимі генератора або двигуна в залежності від напрямку регулювання швидкості ротора.

В роботі [5, С.1-4] розглянуто автоматизований електропривід складається (рис.2.7) з синхронного біротативного двигуна 1, який приводить в дію робочу машину 2 через редуктор 3, до якого під'єднано машину постійного струму 4, що може в режимі двигуна, або генератора. Якірне

коло цієї машини постійного струму з'єднано з якорем

другої машини постійного струму 7, що також може працювати в режимі генератора або двигуна в залежності від напрямку регулювання швидкості ротора.

.При відсутності збудження 5 машини 4 статор обертається з синхронною частотою і ротор нерухомий. При поступовому

збільшенні регулятором 6 струму збудження 5 ротор поступово регулюють струм збудження 9 двигуна 7.

В роботі [6, С. 49-55] розглянуто електропривід підйомної установки

для скорочення часу застосовувати електродинамічне гальмування.

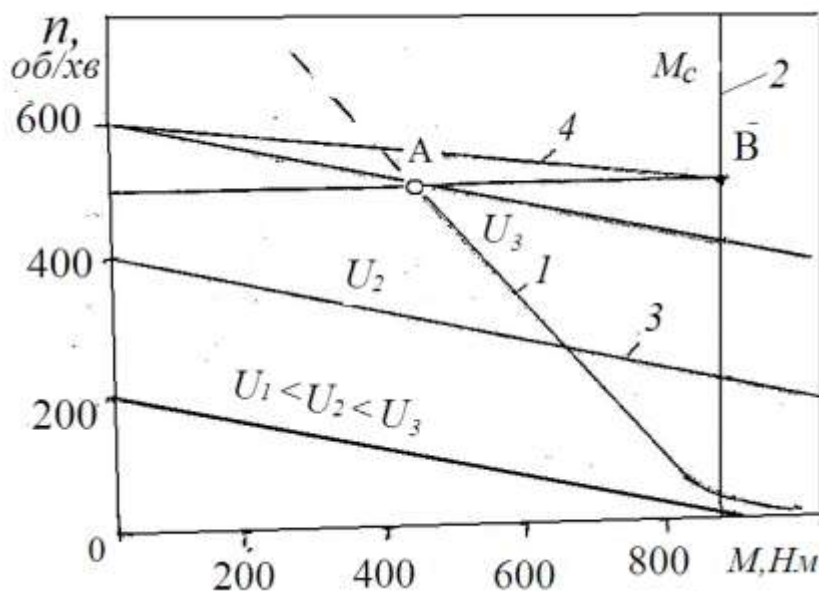
Встановлена потужність електричних машин в описаній системі електроприводу складається із (Рисунок 2.9) потужності біротативного

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

потужності двигуна постійного струму $P_d = 0,5P_c$ і потужності генератора постійного струму $P_r = 0,5P_c$, тобто дорівнює $3P_c$,

що на одну електричну машину потужністю P_c менше в порівнянні з дводвигуновим електродвигуном за звичайною системою Г-Д.

Крива 1 на механічних характеристиках електроприводу ілюструє перерозподіл



навантаження між синхронним біротативним двигуном і допоміжним

Рисунок 2.9- Механічні харпактеристики.

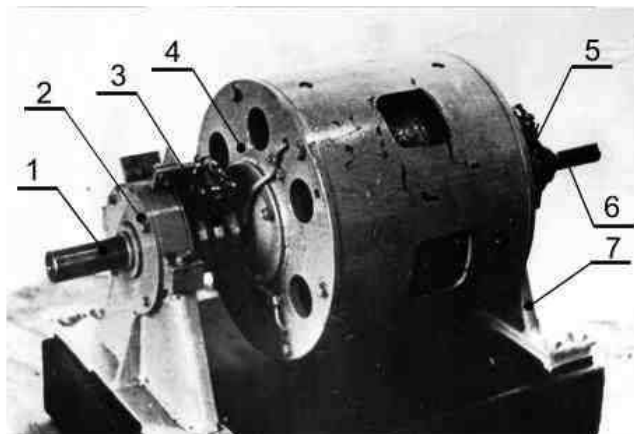
двигуном Д. Похилі паралельні прямі 3 представляють механічні характеристики системи Г-Д при різних напругах генератора Г ($U_1 < U_2 < U_3$).

Момент навантаження M_c

прийнятий постійним і відображений вертикальною лінією 2. Похила пряма 4 являє собою спільну механічну характеристику біротативного двигуна і двигуна Д. Для її побудови через точку А проводять горизонтальну пряму до перетину з лінією моменту

навантаження в точці В. Потім через точки А і В проводять сумісну механічку характеристику.

В роботах [7, С.49-55; 8, С. 32-34] розглянуто конструктивні особливості біротативних генераторів асинхронних і синхронних статор і ротор обертаються в ідшипниках



Біротативна машина (рис.2.9). має статор 4, що обертається в підшипниках 1 .

Рисунок 2.10-Будова біротативного генератора.

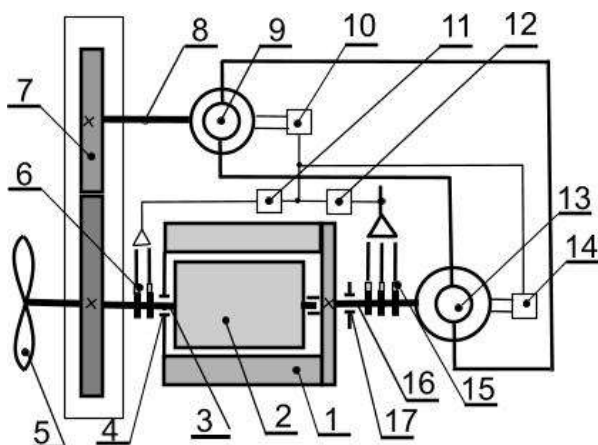
Трифазна напруга джерела живлення до

обмотки статора приєднується через три контактних кільця за допомогою

щіток 3. Напруга струму збудження приєднується до обмотки ротора через два контактних кільця за допомогою щіток 5. Вал ротора 6 обертається в підшипниках 2.

Роботоздатність вітроелектростанції була перевірена на дослідній моделі з використанням біротативного синхронного генератора, виготовленого на базі генератора МСА-72-4 потужністю 15 кВт, з номінальним струмом 22 А лінійною напругою 380 В при частоті обертання 1500 об/хв.

Особливістю вітроелектростанції є використання біротативного синхронного генератора (рис.2.11.), який має статор 1 і ротор 2. Вал 3 ротора 2, що обертається в підшипниках 4, з'єднано з вітроколесом 5. Вал 16 статора 1, що обертається в підшипниках 17, з'єднано з валом двигуна



постійного струму 13 [5,с.1-4.].

Використання біротативного синхронного генератора дає можливість вітроелектростанцію, що відрізняється від існуючих описаних вище

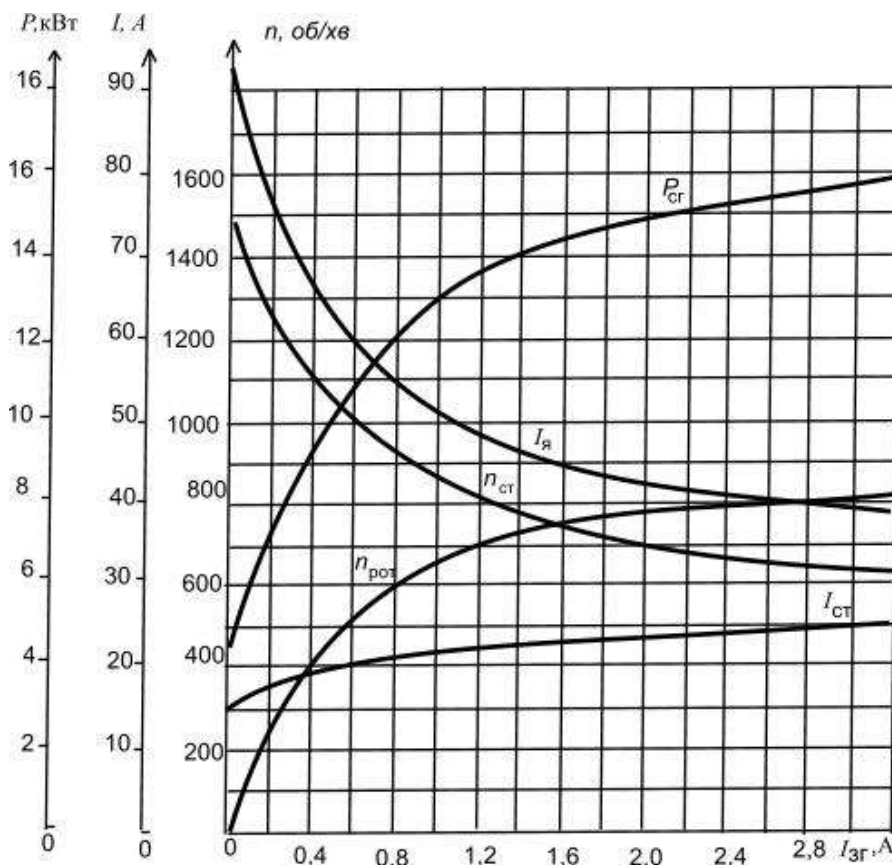
Рисунок 2.11-Будова вітроелектростанції

Роботоздатність вітроелектростанції була перевірена на дослідній моделі з використанням біротативного синхронного генератора, виготовленого на базі генератора МСА-72-4 потужністю 15 кВт, з номінальним струмом 22 А лінійною напругою 380 В при частоті обертання 1500 об/хв.

Особливістю вітроелектростанції є використання біротативного синхронного генератора (рис.2.12.), який має статор 1 і ротор 2. Вал 3 ротора 2, що обертається в

Лист

28



підшипниках 4,
з'єднано з вітроколесом
5. Вал 16 статора 1, що
обертається в
підшипниках 17,
з'єднано з валом
двигуна
постійного струму 13
[5,с.1-4.].

Якір двигуна 13
з'єднано з якорем
генератора 9. Вал
генератора 9
з'єднано з вихідним

Рисунок 2.12- Графіки потужності, струму і частоти обертання валом 8 редуктора 7. Трифазна напруга, що виробляється біротативним синхронним генератором, знімається через три контактних кільця за допомогою щіток 15. Обмотка збудження біротативного синхронного генератора приєднана до регулятора струму збудження 11 через два контактних кільця за допомогою щіток 6. Величина струму збудження синхронного біротативного генератора визначається датчиком 12 частоти і на біротативного генератора

.Регулятори 10 і 14 регулюють струми збудження генератора 9 і двигуна 13.

Відомо, що частота струму генератора прямо пропорційна частоті магнітного поля n_0 , що створюється обмоткою збудження ротора:

$$n_0 = \frac{60f}{p},$$

де f – частота струму; p – число пар полюсів генератора.

Якщо частота обертання ротора $n_{\text{рот}}$ така, що відповідає частоті струму $f=50$ Гц, то статор повинен бути нерухомим, тобто його частота обертання $n_{\text{ст}}=0$. При зменшенні швидкості вітру зменшується частота обертання ротора генератора $n_{\text{рот}}$, що відповідно зменшує частоту обертання магнітного поля статора n_0 , через що зменшується частота струму мережі f .

Тому статор треба обертати в напрямі протилежному напрямку обертання ротора з такою частотою $n_{\text{ст}}$, щоб

$$n_{\text{рот}} + n_{\text{ст}} = n_0 = \text{const.} \quad (2.2)$$

При збільшенні швидкості вітру збільшується частота обертання ротора генератора $n_{\text{рот}}$, що приведе до збільшення частоти струму, тому статор треба обертати в напрямку погодженому з напрямом обертання ротора з такою частотою $n_{\text{ст}}$, щоб

$$n_{\text{рот}} - n_{\text{ст}} = n_0 = \text{const}$$

ментальні до

збільшенні швидкості вітру двигун постійного струму 13 обертає статор 1 погоджено з напрямом обертання ротора 2 біротативного синхронного генератора, а при зменшенні – навпаки. Регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму здійснюється регулюванням струмів в обмотках збудження генератора 9 і двигуна 13 регуляторами 10 і 14.

Напрямок регулювання частоти обертання визначається датчиком частоти і напруги 12, а величина напруги регулюванням струму збудження біротативного синхронного генератора регулятором 11.

.Висновок.

З графіків видно (рис.2.12), що при збільшенні частоти обертання ротора $n_{\text{рот}}$, тобто при збільшенні швидкості вітру, частота обертання статора $n_{\text{ст}}$ зменшується.

Оскільки біротативний синхронний генератор чотириполюсний, то частота обертання його магнітного поля згідно формулі (2.1) дорівнює $n_0=1500$ об/хв. При частоті обертання ротора $2n_{\text{рот}}=750$ об/хв, частота обертання статора також $n_{\text{ст}}=$

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

750 об/хв, що відповідає формулі (2.2).

При зменшенні швидкості вітру частота обертання ротора $n_{\text{рот}}$ зменшується, а частота обертання статора $n_{\text{ст}}$ відповідно збільшується. На графіках також показано, що зі збільшенням частоти обертання ротора $n_{\text{рот}}$ потужність біротативного $P_{\text{ст}}$ синхронного генератора і його струм $I_{\text{ст}}$ також збільшуються, а струм якоря $I_{\text{я}}$ генератора постійного струму, від якого живиться двигун постійного струму, що регулює частоту обертання статора, відповідно зменшується. Регулювання частоти і напруги визначається датчиками 11,12.

Розділ 3. Розрахунок вітроустановки

3.1.Розрахунок1 потужності вітрогенератора

При розрахунку вітрогенератора (вітряка) потужність вітрового потоку омітання вітроколеса, що проходить через площу, обчислюють досить точно за формулою:

$$P = Q \cdot S \cdot V^3$$

P - потужність (Вт);

Q – щільність повітря (1,23 кг/м³);

S - площа кидання ротора (м²);

V - швидкість вітру (м/с); Але оскільки стовідсоткового перетворення одного виду енергії в іншу неможливо, то почнемо віднімати втрати.

Вітроколесо має певний коефіцієнт використання (перетворення) енергії вітру.

Максимальне значення теоретичного використання енергії вітру у ідеальних швидкохідних крильчастих вітроколес дорівнює 0,593. Для кращих зразків швидкохідних вітроколес з аеродинамічним профілем цей показник становить від 0,42 до 0,46. Для багатолопатевих тихохідних вітроколес цей показник коливається від 0,27 до 0,35 залежно від якості виконання та у розрахунках позначається символом C_p . Для узгодження оборотів тихохідного вітроколеса і генератора необхідно використовувати редуктор (мультиплікатор), що підвищує, і його ККД коливається від 0,7 до 0,9 в залежності від коефіцієнта передачі і виконання.

Перетворюючи механічну енергію в електричну, також зазнаємо втрат. Тому	Лист
КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	
Извл. из проекта № 58-03.30.01.26.1.3.2. Ng від 0,6 до 0,8.	31

$$P = 1,23 \cdot 5 \cdot 125 \cdot 5 \cdot 0,35 \cdot 0,8 \cdot 0,9 = 969 \text{ Вт.};$$

P – потужність (Вт); Q – щільність повітря (1,23 кг/м³);

S - площа кидання ротора (м²);

V - швидкість вітру, (м/с);

CP - коефіцієнт використання енергії вітру (0,35). При цьому швидкість вітроколеса буде:

$$W = V / L \cdot Z \cdot 60 = 5 / 9,42 \cdot 3 \cdot 60 = 95,5 \text{ об / хв.}$$

3.2. Синхронні генератори

Принцип дії синхронного генератора розглянемо на дво полюс-ній моделі синхронної машини (рис. 3.1). При вмиканні обмотки збудження на джерело постійного струму, вона створює магнітне поле. Оскільки це поле утворене постійним струмом, то воно нерухомо в просторі щодо полюсів ротора. На кожному полюсному поділу в повітряному проміжку індукція розподіляється за синусоїдальним законом (рис. 3.2).

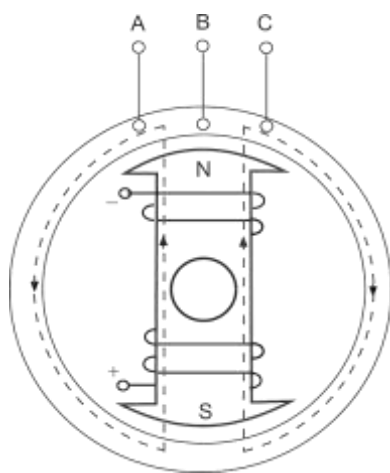


Рисунок 3.1 –
Модель дво полюсної

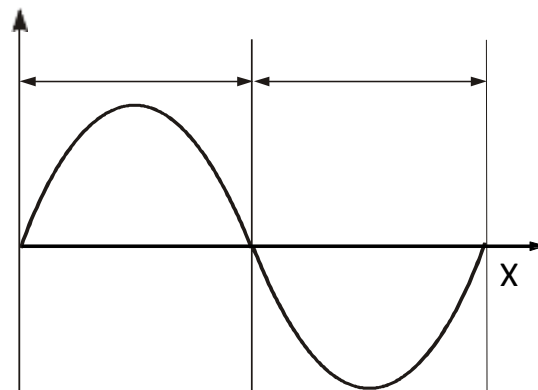


Рисунок 3.2 – Розподіл магнітної
індукції в повітряному проміжку

Якщо ротор не приведений в обертання, в обмотці якоря ЕРС не індукується. Коли ротор приводиться в обертання приводним двигуном (вітродвигуном), силові лінії поля збудження перетинають провідники

обмотки якоря (статора) і індукують у них ЕРС. Діюче значення ЕРС фази	Лист
обмотки якоря визначається вином	32

$$E_{\phi} = 4,44 W_{\phi} f \Phi_0 k_{об} , \quad (3.1)$$

де W_{ϕ} – число послідовно з'єднаних витків у фазі обмотки якоря; f – частота ЕРС синхронного генератора, яка визначається формулою (3.1), Гц; Φ_0 – магнітний потік збудження на полюсному поділі, Вб; $k_{об}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки якоря.

Як правило, в генераторах загальнопромислового призначення частота вихідної напруги $f = 50$ Гц, отже, у залежності від числа пар полюсів машини, частота обертання ротора повинна відповідати ряду:

p	1	2	3	4	5
$n, \text{об/хв}$	3000	1500	1000	750	600

Таким чином, в синхронних генераторах регулювати значення ЕРС обмотки якоря і відповідно, вихідну напругу можливо тільки зміною струму збудження. Напрямок обертання ротора повинен бути таким, щоб на затискачах обмотки якоря утворився прямий порядок зміни фаз A, B, C .

У синхронних машинах застосовують дві різні конструкції ротора: неявнополюсну – з неявно вираженими полюсами (рис. 5.3, а) і явнополюсну – з явно вираженими полюсами (рис. 3.3, б).

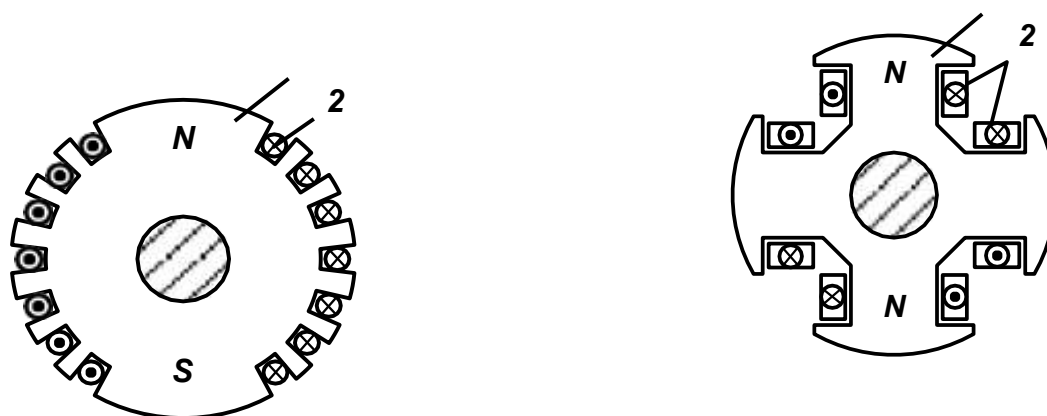


Рисунок 3.3 – Ротори синхронних неявнополюсної (а) і явнополюсної (б) машин: 1 – осердя ротора; 2 – обмотка збудження

Дво- і чотириполюсні машини великої потужності, що працюють

при частоті обертання ротора 1500 і 3000 об/хв, виготовляють, як правило, з неявнополюсним ротором. Застосування в них явнополюсного ротора неможливо за умов забезпечення необхідної механічної міцності кріплення полюсів і обмотки збудження.

Явнополюсний ротор зазвичай використовують в машинах з чотирма полюсами і більше (рис. 3.3). Обмотку збудження в цьому ви-

перерізу, які розміщують на сердечниках полюсів. У явнополюсних машинах полюсним наконечникам зазвичай надають такий профіль, щоб повітряний проміжок між полюсним наконечником і статором був мінімальним під серединою полюса і максимальним у його країв, завдяки чому крива розподілу індукції в повітряному проміжку наближається до синусоїди.

В процесі роботи навантаженого синхронного генератора в ньому одночасно діють МРС збудження F_0 і статора (якоря) F_a , при цьому МРС статора впливає на МРС збудження, посилюючи або по-

слабляючи поле збудження або ж спотворюючи його форму. Дія МРС обмотки статора на МРС обмотки збудження називається реакцією якоря.

Реакція якоря впливає на робочі властивості синхронної машини, оскільки зміна магнітного поля в машині супроводжується зміною ЕРС, наведеною в обмотці статора, і отже, зміною ряду інших величин, пов'язаних з цією ЕРС. Вплив реакції якоря на роботу синхронної машини залежить від значення і характеру навантаження/Для з'ясування впливу реакції якоря на роботу синхронної машини доцільно розглянути випадки роботи генератора при навантаженнях граничного характеру, а саме: активного, індуктивного і ємнісного. Скористаємося для цього векторними діаграмами МРС. При побудові цих діаграм матимемо на увазі, що вектор ЕРС F_a , індукованою магнітним потоком збудження в обмотці статора, відстає по фазі від вектору цього потоку (а отже, і вектору МРС E_0) на 90° . Що ж до вектору струму в обмотці статора I_1 , то він може займати по відношенню до вектору E_0 різні положення, визначувані кутом ψ , залежно від виду навантаження.

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

Активне навантаження ($\psi = 0$)

На рис. 3.4, а представлені статор і ротор двополюсного генератора. На статорі показана частина фазної обмотки. Ротор явнопольсний, обертається проти руху годинникової. Припустимо, що увідає максимум ЕРС $\underline{E}_0$ у фазній обмотці. Оскільки струм при актив-деякий момент часу ротор займає вертикальне положення, що відповному навантаженні співпадає по фазі з ЕРС, то вказане положення ротора відповідає також і максимуму струму. Зобразивши лінії магнітної індукції поля збудження (ротора) і лінії магнітної індукції поля обмотки статора, бачимо, що МРС статора $\underline{F}_a$ спрямована перпендикулярно МРС збудження $\underline{F}_0$. Цей висновок також підтверджується векторною діаграмою, побудованою для цього ж випадку.

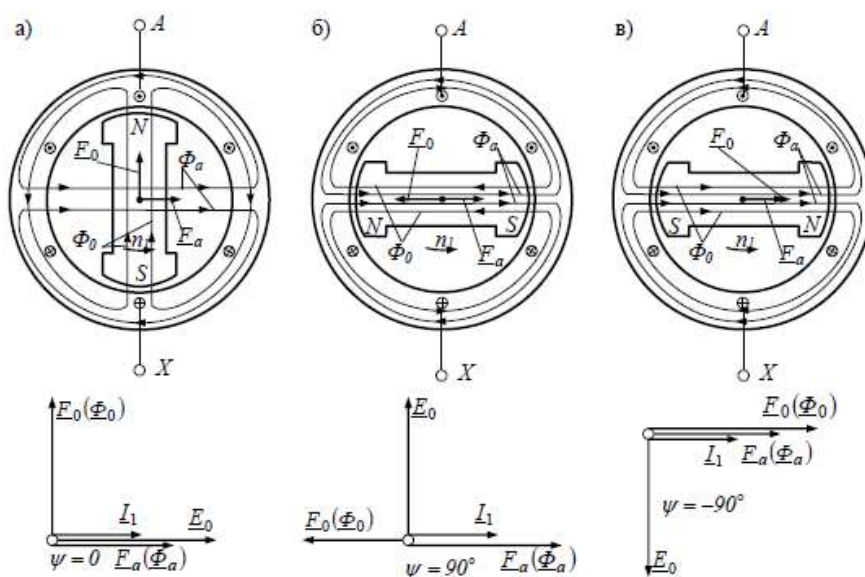


Рисунок 3.4 Реакція якоря при навантаженні: а-активному; б-індуктивному; в-ємнісному.

Порядок побудови цієї діаграми наступний: відповідно до просторового положення ротора генератора проводимо вектор МРС збудження $\underline{F}_0$; під кутом 90° до цього вектору у бік відставання проводимо вектор ЕРС $\underline{E}_0$, наведеною

агнітним полем збудження в обмотці статора; при підключенні чисто
Рисунок 3.4 Реакція якоря при навантаженні:
 а-активному; б-індуктивному; в-ємнісному.

активного навантаження струм в

обмотці статора

$\underline{I}_1$ співпадає по фазі з вектором ЕРС $\underline{E}_0$.

Індуктивна потужність ($\psi = 90^\circ$).

При чисто індуктивному навантаженні генератора струм статора $\underline{I}_1$ відстає по фазі від ЕРС $\underline{E}_0$ на 90° . Тому він досягає максимального значення лише після повороту ротора вперед на 90° відносно його положення, згідно максимуму ЕРС $\underline{E}_0$ (див. рис. 3.4, б). При цьому МРС $\underline{F}_a$ діє уздовж осі полюсів ротора зустрічно МРС збудження $\underline{F}_0$. У цьому ми також переконуємося, побудувавши векторну діаграму.

Така дія МРС статора $\underline{F}_a$ послаблює поле машини. Отже, реакція якоря в синхронному генераторі при чисто індуктивному навантаженні виявляє подовжньо-розмагнічуючу дію.

випадку магнітне поле не спотворюється.

Ємнісне навантаження ($\psi = -90^\circ$).

Оскільки струм $\underline{I}_1$, при ємнісному навантаженні випереджає по фазі ЕРС на 90° , то свого більшого значення він досягає раніше, ніж ЕРС, тобто коли ротор займе положення, показане на рис. 3.4, в. Магніторушійна сила статора $\underline{F}_a$ так само, як і у попередньому випадку, діє по осі полюсів, але тепер уже згідно з МРС збудження $\underline{F}_0$.

При цьому відбувається посилення магнітного поля збудження. Таким чином, при чисто ємнісному навантаженні синхронного генератора реакція якоря чинить дію, що подовжньо-намагнічує. Магнітне поле при цьому не спотворюється. Напругу на виході синхронного генератора буде:

$$\underline{U}_1 = \sum \underline{E} - \underline{I}_1 R_1 = \underline{E}_0 + \underline{E}_{1d} + \underline{E}_{1q} + \underline{E}_{\sigma 1} - \underline{I}_1 R_1,$$

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

де $\sum \underline{E}$ – геометрична сума усіх ЕРС, наведених в обмотці статора результируючим магнітним полем машини, утвореним спільною дією усіх МРС (F_0, F_{ad}, F_{aq}) і потоком розсіяння статора $\Phi_{\sigma 1}$.

Активний опір фази обмотки статора R_1 у синхронних машин середньої і великої потужності невеликий, і тому навіть при номінальному навантаженні падіння напруги $I_1 R_1$ складає настільки малу величину, що з деяким допущенням можна прийняти $I_1 R_1 = 0$.

Активний опір фази обмотки статора R_1 у синхронних машин середньої і великої потужності невеликий, і тому навіть при номінальному навантаженні падіння напруги $I_1 R_1$ складає настільки малу величину, що з деяким допущенням можна прийняти $I_1 R_1 = 0$. Тоді рівняння (5.15) можна записати у вигляді

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_0 + \underline{E}_{1d} + \underline{E}_{1q} + \underline{E}_{\sigma 1}. \quad (3.2)$$

Вирази (3.2) і (5.16) представляють собою рівняння напруг явнополюсного синхронного генератора.

У неявнополюсних синхронних генераторах реакція якоря характеризується повною МРС статора F_1 без розділення її по осях, оскільки в цих машинах магнітні опори по подовжній і поперечній осям однакові. Тому ЕРС статора в неявнополюсних машинах E_1 , рівна індуктивному падінню напруги в обмотці статора, пропорційна індуктивному опору реакції якоря X_a , тобто

$$\underline{E}_1 = -j \underline{I}_1 X_a. \quad (3.3)$$

Потік реакції якоря Φ_1 і потік розсіяння статора $\Phi_{\sigma 1}$ створюються одним струмом $\underline{I}_1$, тому індуктивні опори X_a і X_1 можна розглядати як сумарний індуктивний опір

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

$$X_c = X_a + X_1,$$

що представляє собою синхронний опір неявнополісної машини.

Зурахуванням цього ЕРС реакції якоря розглядати також як суму E_1 і ЕРС розсіяння $E_{\sigma 1}$ слід розглядати також як суму

$$\underline{E}_c = \underline{E}_1 + \underline{E}_{\sigma 1} = -j\underline{l}_1 X_a + (-j\underline{l}_1 X_1) = -j\underline{l}_1 X_c, \quad (3.4)$$

що представляє собою синхронну ЕРС неявнополісної машини. З урахуванням викладеного рівняння напруги неявнополісного синхронного генератора має вигляд

$$\underline{U}_1 = \underline{\Sigma E} - \underline{I}_1 R_1 = \underline{E}_0 + \underline{E}_c - \underline{I}_1 R_1.$$

Зовнішні характеристики СГ є залежностями напруги U від струму навантаження I при незмінному струмі збудження I_f , в частоті

обертання ротора n і коефіцієнті потужності навантаження $\cos \varphi$.

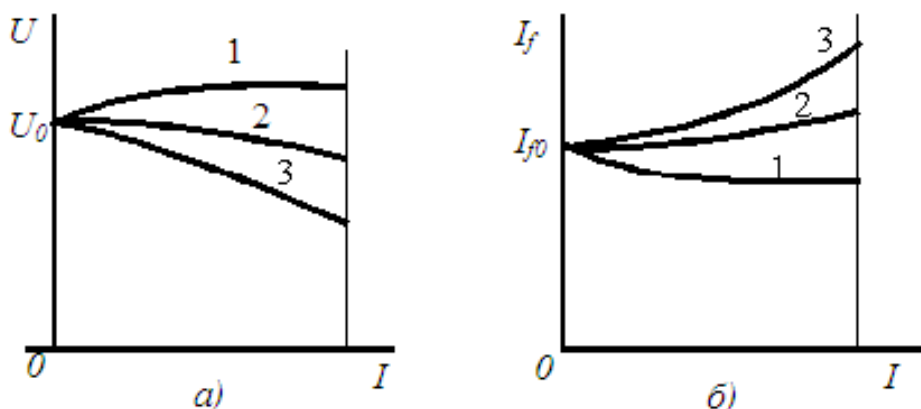
Основними характеристиками синхронних генераторів, працюючих на автономне навантаження, є зовнішні і регулювальні характеристики.

Регулювальні характеристики є залежностями струму збудження

I_f від струму навантаження I при U, n і $\cos \varphi = \text{const}$.

Вони пока-

зують, як треба змінювати струм збудження генератора, щоб підтримувати напругу постійною при зміні навантаження.



Ці характеристики при різних за характером навантаженнях, але при незмінних значеннях $\cos \varphi$ приведені на рис.

3.5.					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		38

0.69 Ом, де

$\rho=0.0212$ Ом/ - питомий опір обмотки при розрахунковій температурі,

$w_1 = 80$ -число послідовно з'єднаних витків в фазі.

$l_{л1} = 268$ м – середня довжина витка обмотки статора;

$x_1 = 7.6$ Ом -індуктивний опір фази обмотки

статора

Таблица 2-Параметри обмотки статора

R_s , Ом	X_s , Ом
0,69	7,6

Таблица 3-Техічні машин постійного струму

Тип	Потужність, кВт	Частота обертання, об/хв	Напруга, В	Струм, А
ПД152,8	8,8	1500	220	48

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист 41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Розділ 4. Експериментальні дослідження

Електронна модель двигуна

Узагальнена модель віртуальної установки для дослідження переходних про (рис.4.1) на базі якої використана модель статора асинхронного двигуна

Three-Phase Asynchronous Machine

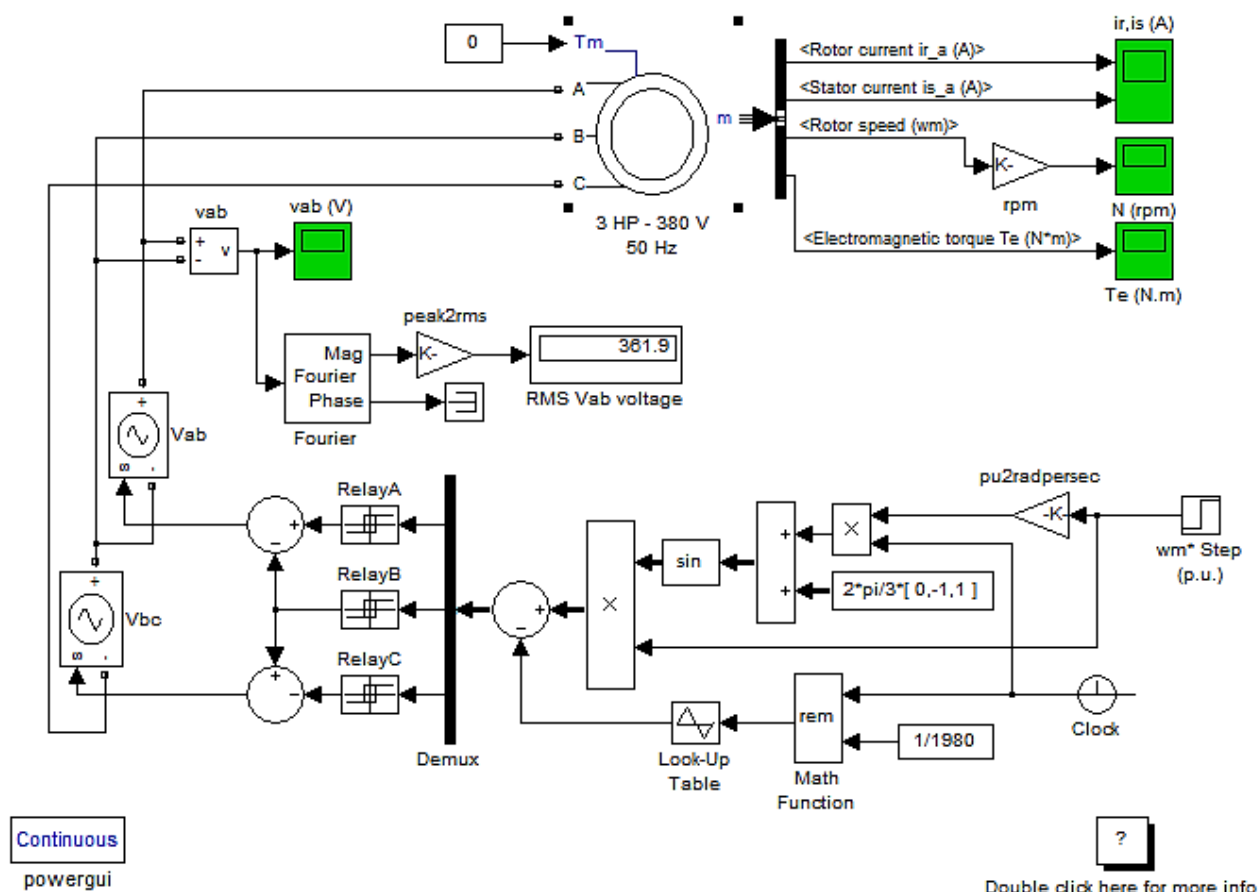


Рис.4.1- Схема моделі для дослідження асинхронного двигуна.

Параметри асинхронної машини для вікна налаштування (рис 1.4) частково беруться з паспортних даних двигуна, а також із розрахунків параметрів схеми заміщення.

Слід відразу звернути увагу на те, що позначення в вікні налаштування дещо відрізняються від вказаних на схемі заміщення:

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

Block Parameters: 3 HP - 380 V 50 Hz

Asynchronous Machine (mask) (link)

Implements a three-phase asynchronous machine (wound rotor, squirrel cage or double squirrel cage) modeled in a selectable dq reference frame (rotor, stator, or synchronous). Stator and rotor windings are connected in wye to an internal neutral point.

Configuration Parameters Advanced

Nominal power, voltage (line-line), and frequency [Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:

[1500 380 50]

Stator resistance and inductance[Rs(ohm) Lls(H)]:

[0.69 0.0242]

Rotor resistance and inductance [Rr'(ohm) Llr'(H)]:

[0.46 0.01496]

Mutual inductance Lm (H):

0.04840

Inertia, friction factor, pole pairs [J(kg.m^2) F(N.m.s) p()]:

[0.102 0.009541 2]

OK Cancel Help Apply

Рисунок 4.2- Вікно налаштування параметрів двигуна.

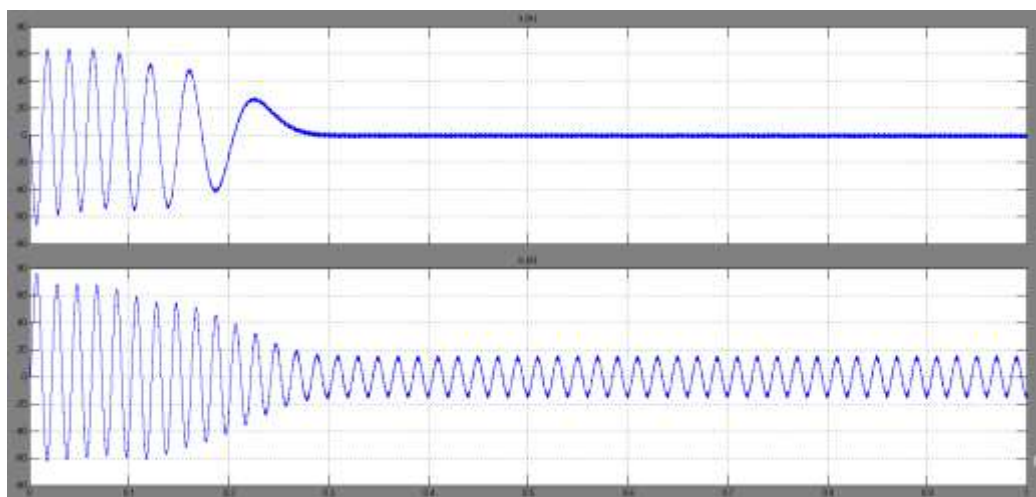


Рисунок.4.3 – Струм в колі ротора та струм статора.

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

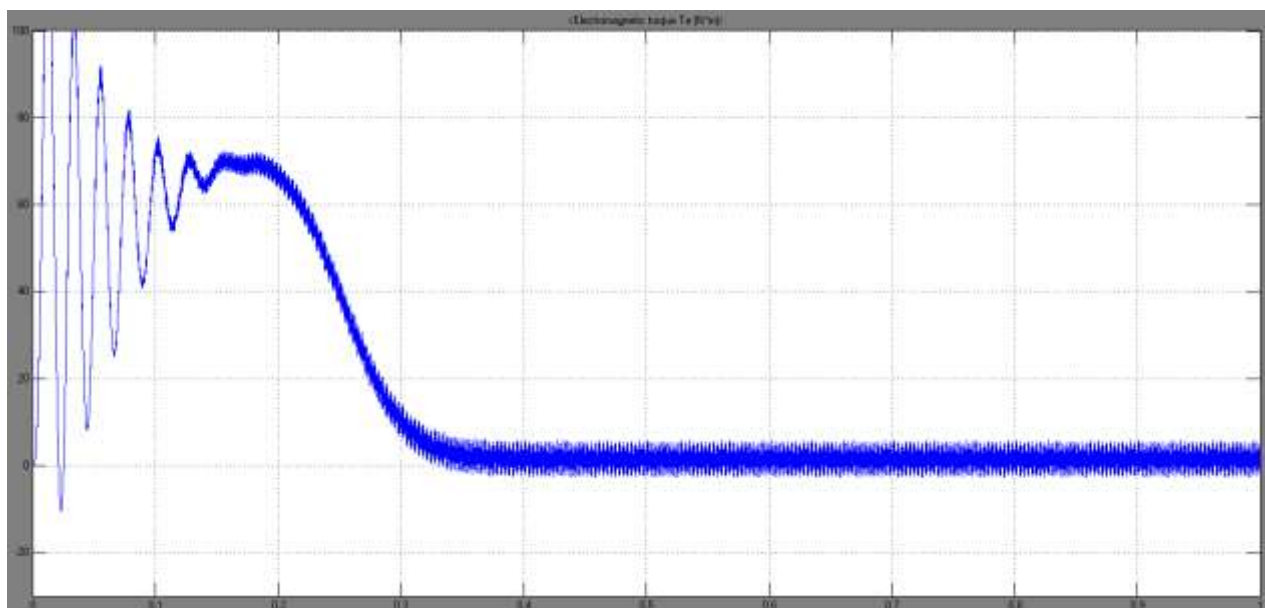


Рисунок 4.4– Графік моменту.

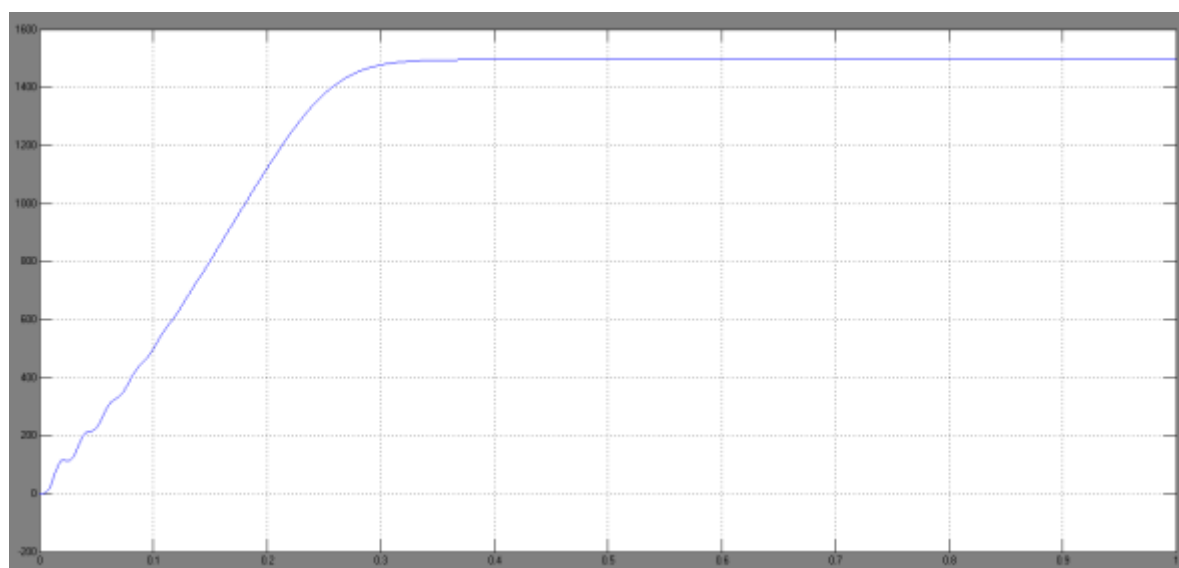


Рисунок 4.5- Графік швидкості.

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

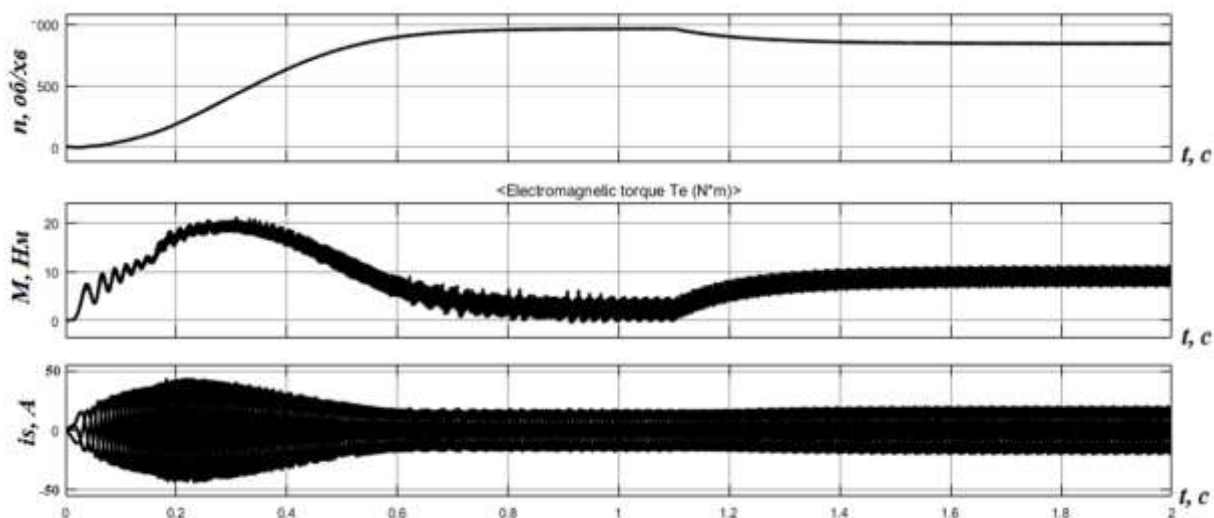


Рисунок 4.6- Графіки синхронного генератора при частоті $f_1=50$ Гц

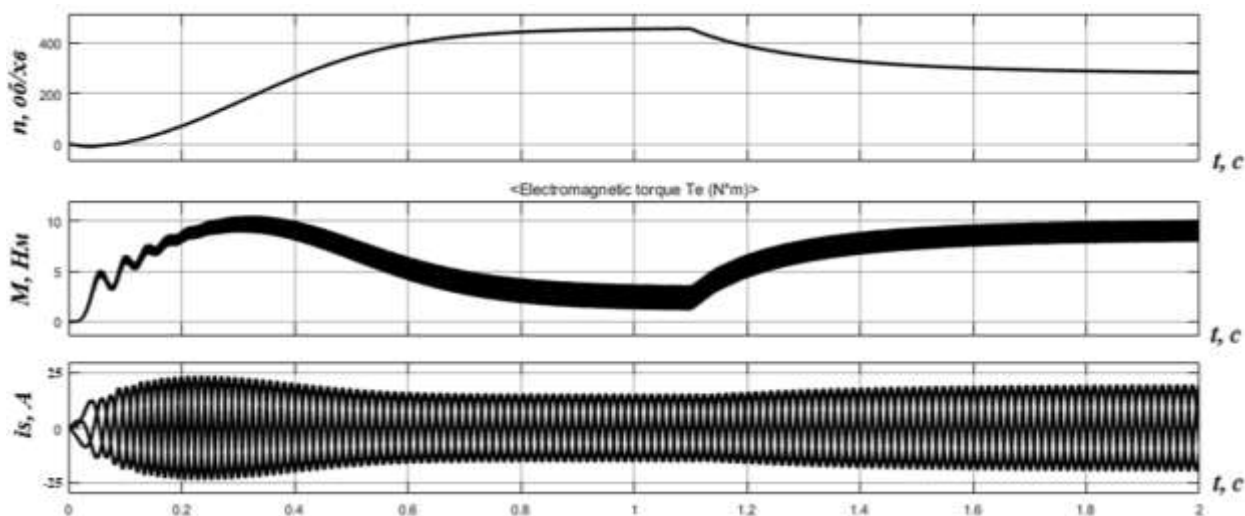


Рисунок 4.7- Графіки синхронного генератора при частоті $f_1=25$ Гц

Висновок

1. На початку розгону генератора виникають пускові струми і моменти, які не перебільшують відповідні паспортні величини для старота генератора.
2. Графіки частоти обертання, моменту і струму статора одержані при частотах обертання 50 і 25 Гц пропорціонально зменшуються в два рази.

Розділ 5. Економіка

5.1. Загальні відомості

Розвиток вітрової енергетики дає економічний ефект у вигляді створення нових робочих місць. Виробництво вітрових турбін та їх комплектуючих забезпечує велику кількість вакансій, що вимагають інженерних навичок і знань. Крім того, в сільській місцевості розвиток вітрової енергетики забезпечує створення робочих місць та приток інвестицій у віддалені населені пункти. Робота вітрових станцій на території фермерських угідь дає фермерам можливість отримувати стабільний дохід і при цьому продовжувати займатися сільським господарством.

Вартість електроенергії від ВЕС залежить насамперед від обсягу виробленої електроенергії, який в свою чергу визначається в основному величиною середньорічної швидкості вітру, витратами на обслуговування та експлуатацію, терміном служби вітроустановки, ставкою дисконтування плати за кредит, а також залежить від величини капітальних вкладень. Необхідно пам'ятати, що вартість електроенергії від ВЕС є узагальнюючим економічним показником. Найчастіше при великих капітальних вкладеннях для однієї з ВЕС вартість, а точніше собівартість виробництва електроенергії на ній може виявитися нижчою, ніж при менших капітальних вкладеннях на другий ВЕС, тому що на першій станції виробляється істотно більше електроенергії через кращі вітрові умови.

Як і у всякій іншій галузі енергетики основними економічними показниками вітроенергетики є питома вартість встановленої потужності (грн/кВт) та вартість електроенергії від ВЕС (грн/кВт·год). В

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

останніх роботах в оцінці капітальних затрат використовується також показник – питомої вартості на одиницю обмахуваної поверхні.

Собівартість електричної енергії, виробленої вітроенергетичними установками, залежить від швидкості вітру і, наприклад, за даними США становить 4,8...4,9 цента/кВт·год при швидкості вітру 7 м/с; 3,6...3,7 цента/кВт·год при швидкості вітру 8 м/с і 2,5...2,6 цента/кВт·год при швидкості вітру 9,5 м/с. Для порівняння: собівартість електроенергії, яку вироблено на вугільних електростанціях США, становить 4,5...6 цента/кВт·год.

Вітроенергетика є нерегульованим джерелом енергії. Продуктивність вітроелектростанції залежить від сили вітру – фактора, що відрізняється великою мінливістю. Відповідно, видача електроенергії з вітрогенератора в енергосистему відрізняється великою нерівномірністю як в добовому, так і в тижневому, місячному, річному і багаторічному розрізі. Враховуючи, що енергосистема сама має неоднорідності навантаження (піки і провали енергоспоживання), регулювати які вітроенергетика, природно, не може, введення значної частки вітроенергетики в енергосистему сприяє її дестабілізації. Зрозуміло, що вітроенергетика вимагає резерву потужності в енергосистемі (наприклад, у вигляді газотурбінних електростанцій), а також механізмів згладжування неоднорідності їх вироблення (у вигляді гідро- або гідроакумулюючих електростанцій). Дана особливість вітроенергетики істотно здорожує одержувану від них електроенергію. Проблеми в мережах і диспетчеризації енергосистем через нестабільність роботи ВЕС починаються після досягнення ними частки в 20-25% від загальної встановленої потужності енергосистеми.

Капітальні витрати включають в себе вартість вітроустановки на заводі, витрати на транспортування обладнання, будівельні роботи, роботи та обладнання по приєднанню до мереж енергосистеми, плату за землю та за банківський кредит.

Слід відзначити як позитивний фактор те, що питомі капітальні

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

витрати і собівартість виробництва електроенергії на ВЕС за останні

25 років суттєво знизилися. У світовій практиці за останні 20 років питома вартість будівництва ВЕС знизилася з 4000 до 1000 дол/кВт, а собівартість виробництва електроенергії з 30 до 4 центів/кВт·год. Тут і далі всі економічні оцінки даються в європейській (євро) або світовій (дол. США) валютах, оскільки більш-менш надійні вартісні оцінки у вітчизняній валюті відсутні.

Такою стійкою тенденцією не може похвастати жодна галузь традиційної енергетики, і навіть навпаки: в паливній енергетиці через постійне зростання цін на паливо та підвищення вимог до шкідливих викидів від теплових електростанцій є і прогнозується стійке зростання питомих капітальних вкладень і собівартості електроенергії. Аналогічним чином підвищуються ці показники і на АЕС через жорсткість вимог до їх безпеки.

У період з 2000 по 2003 роки спостерігалось подальше зниження питомої вартості ВЕС, а потім до 2008 року відбувається зростання питомої вартості у зв'язку з подорожчанням всіх матеріалів і послуг. Однак, за оцінкою EWEA, зниження питомої вартості ВЕС почалося з 2008 року (рис. 9.1.).

Вважається, що застосування вітрогенераторів в побуті для забезпечення електроенергією побутових споживачів є недостатньо доцільним з наступних причин:

- необхідність застосування, для перетворення змінного або постійного струму, одержуваного від вітрогенератора в електроенергію промислової якості (220В, 50Гц) і синхронізації по фазі із зовнішньою мережею, інвертора, вартість якого становить приблизно 50% вартості всієї установки;

- необхідність установки, для забезпечення безперебійності живлення із-за нестабільності вітру і за відсутності зовнішньої мережі, акумуляторних батарей, вартість яких може досягати 25% вартості

-

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

- установки ВЕУ.

Крім того, вітроустановки невеликої одиничної потужності можуть мати проблеми з мережевою інфраструктурою, оскільки вартість лінії електропередач і розподільного пристрою для підключення до енергосистеми можуть виявитися занадто великими. Проблема частково вирішується, якщо вітроустановка підключається до місцевої мережі, де є енергоспоживачі. В цьому випадку використовується існуюче силове і розподільче обладнання, а ВЕС створює деякий підпір потужності, знижуючи ззовні. потужність, споживану місцевою мережею. Трансформаторна підстанція і зовнішня лінія електропередач виявляються менш навантаженими, хоча загальне споживання потужності може бути вище.

Привабливість ринку вітрової енергетики для інвесторів залежить від ряду факторів. У тому числі: від капітальних витрат, наявності фінансових ресурсів, цінового режиму на відпущену електрику і очікуваного рівня прибутку.

5.2.Капітальні вкладення

Значною перевагою ВЕС над тепловими та атомними станціями є те, що капітальні витрати практично не "змертвляються", оскільки вітроустановка починає виробляти електроенергію практично через 1-3 тижні після її доставки на місце установки.

Конкретні дані про співвідношення вартості власне вітроустановки (заводська вартість) і супутніх витрат для прикладу показані в табл. 5.1.

Таблиця 5.1- Вартість будівництва вітроустановки потужністю 2 МВт

Компоненти					Середня вартість, €/кВт	В % від загальної вартості	В % від вартості вітроустановки
Вартість турбіни, включаючи транспортування					928	75,6	100,00
Фундамент					80	6,5	8,62
Електроапарати					18	1,5	1,94
Підключення до мережі					109	8,9	11,75
КРБ АТЕРС					58-03.30.01.26.1.3.2		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

Системи керування	4	0,3	0,43
Консультації	15	1,2	1,62
Земля	48	3,9	5,17
Фінансове забезпечення	15	1,2	1,62
Дорога	11	0,9	1,19
Разом	1228	100	132,33

З таблиці видно, що збільшення вартості проекту склало більш 32% від вартості ВЕУ. Слід обмовитися, що в наведеній таблиці не вказані транспортні витрати, які для внутрішніх поставок можуть бути включені у вартість устаткування. Не вказані також і вартість проектних робіт, які іноді частково входять в відповідні розділи наведеної таблиці. У всякому разі, таблиця дає хорошу орієнтування для попередньої оціночної вартості обладнання ВЕС.

Узагальнюючі дані по компонентам затрат на основі даних за 2001-2002 роки з будівництва ВЕС середньої потужності (850 кВт – 1 МВт) в передових з вітроенергетики станах Європи (Німеччина, Іспанія, Данія, і Великобританія) наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 Витрати на спорудження вітроустановки потужності 850 кВт -

Компоненти витрат	Частка від загальної вартості, %	Частка в інших витратах, %
Вітротурбіна (заводська ціна)	74-82	-
Фундамент	1-6	20-25
Електричне обладнання	1-9	10-15
Підключення до мережі	2-9	35-45
Консалтинг	1-3	5-10
Земля	1-3	5-10
Фінансові витрати	1-5	5-10
Спорудження дороги	1-5	5-10

Джерело: Renewable Energy World, July-August, 2004. vol 7, num. 4. p.126-137

Показано, що вартість власне вітроустановки становить порядку 74-82% від загальної вартості будівництва.

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

А серед "інших витрат", тобто затрат по спорудженню ВЕС основними є витрати на спорудження фундаменту і на підключення до мережі.

Слід зазначити, що при збільшенні одиничної потужності ВЕУ питома вартість встановленої потужності ВЕС як правило зменшується. В теж час питомі капітальні вкладення, навіть для ВЕУ однієї потужності мають досить великий діапазон змін – до 30 і більше відсотків, а середні питомі капітальні вкладення, наприклад для країн Євро-союзу, знаходяться в діапазоні від 700 до 1000 євро/кВт.

5.3. Собівартість виробництва електроенергії

Собівартість 1 кВт·год електроенергії традиційно розраховується виходячи з дисконтування та розподілу капітальних, експлуатаційних і амортизаційних витрат протягом терміну експлуатації вітрової турбіни і перерахунку отриманих затрат по відношенню до річного обсягу виробленої електроенергії. Собівартість кіловат-години виробленої електроенергії, відповідно, обчислюється як середня собівартість за весь термін служби турбіни, що зазвичай становить 20 років. Насправді реальна собівартість кіловат-години виявляється нижче на початку терміну експлуатації турбіни, завдяки меншим експлуатаційним та амортизаційним видаткам і збільшується з терміном служби установки.

Основним показником, що визначає собівартість є річне виробництво електроенергії. Однак саме по собі це не дає уявлення про ефективність вироблення електроенергії. Для будь-якого виду електростанцій ефективність їх роботи оцінюється показником, який називається коефіцієнтом використання встановленої потужності ($K_{\text{ввп}}$), що представляє собою відношення фактичної річного виробітку генеруючого пристрою до максимально можливого. Іншими словами цей коефіцієнт можна подати так:

$$K_{\text{ввп}} = \frac{A}{B'}$$

(5.1)

КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2

Лист

51

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

де A – дійсне вироблення електроенергії за даний період часу; B – енергія, яка може бути вироблена, якщо генератор буде працювати з 100% потужністю весь даний період часу.

Найбільша кількість сучасних ВЕУ, підключених до енергосистеми, працюють з коефіцієнтом використання встановленої потужності від 0,15 до 0,30. Електростанції на традиційних (невідновлюваних) джерелах енергії працюють з коефіцієнтом від 0,4 до 0,8. В Україні, в середньому, коефіцієнт використання встановленої потужності вітроелектростанцій складає 0,2...0,25.

Коефіцієнт використання встановленої потужності будь-якого генеруючого джерела залежить:

- від того, як часто потрібно його зупиняти, усувати несправності або проводити ремонтні та регламентні роботи і скільки на це потрібно часу;
- від графіка навантаження, тобто необхідної споживачем потужності, яка змінюється протягом доби, місяця та року від нуля до максимального значення.

В вітроустановках цей коефіцієнт ще залежить від наявності вітру та його швидкості. Ось чому коефіцієнт використання встановленої потужності вітроустановок істотно менше, ніж у інших генераторів, хоча вітроустановки які працюють в гарних вітрових умовах мають $K_{\text{ввп}} = 0,5$.

Аналогічне смислове навантаження має показник: "число годин використання встановленої потужності"

$$T_{\text{ввп}} = K_{\text{ввп}} T,$$

де $T = 8760$ годин у рік; $E_{\text{рік}}$ – енергія, вироблена установкою протягом року, кВт·год; $P_{\text{вст}}$ – встановлена потужність генератора вітроене-

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпись	Дата		52

ргетичної установки, кВт.

Необхідно мати на увазі "прихований" резерв у підвищенні конкурентоспроможності ВЕУ в частині собівартості електроенергії. У ряді Європейських країн вже існує податок на електроенергію від теплових електростанцій, як компенсація витрат на захист навколишнього середовища. Природна електроенергія, одержувана на ВЕС, таким податком не обкладається. У собівартості електроенергії виробленої ВЕС істотне значення мають витрати на експлуатацію та обслуговування. Протягом терміну служби ВЕУ ці витрати оцінюються

в 20...25% від загальної собівартості. Поки ВЕУ досить нова,

$T_{\text{ВВП}} = K_{\text{ВВП}} T$ витрати на експлуатацію та обслуговування можуть становити 10...15%. а до

нця терміну служби можуть збільшитися до 20...35% від загальної собівартості. Зазначені витрати мають наступні складові: страхівка, оренда землі, регулярне технічне обслуговування, проведення ремонту, запасні частини і витрати на управління.

5.4. Оцінка терміну окупності ВЕС

Як відомо, термін окупності капітальних вкладень є однією з головних оцінок ефективності споруди електростанції. Сучасні способи оцінки терміну окупності вимагають істотних витрат часу, а також достовірної інформації за всіма статтями витрат. Однак отримання такої інформації пов'язане з великими труднощами, а в сучасній Україні часто просто неможливо. Для можливо достовірної попередньої оцінки витрат при спорудженні ВЕС запропоновано спосіб оцінки терміну окупності на базі загальновідомих вхідних параметрів, або на базі достовірних діапазонів їх зміни.

За основу приймається формула простого терміну окупності:

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{D - B}, \quad (5.3)$$

де K – капітальні витрати на будівництво об'єкта; D – річний прибуток від експлуатації ВЕС; B – річні експлуатаційні витрати.

Капітальні вкладення визначаються за відомою формулою:

$$K = C_{\text{пит}} P_{\text{вст}}, \quad (5.4)$$

де $C_{\text{пит}}$ – питомі капвкладення в будівництво ВЕС, грн./кВт; $P_{\text{вст}}$ – встановлена потужність ВЕС, кВт.

Вибрані для розрахунків $C_{\text{пит}}$ на базі зазначених вище даних, дозволяють з великою достовірністю оцінити величину капітальних вкладень в проєктований об'єкт. Прибуток D від продажу електроенергії ВЕС може бути виражений через обсяг заміщаємого органічного палива $V_{\text{туп}}$ на теплових електростанціях енергосистеми. Очевидно, що в цьому випадку прибуток буде більше, ніж просто вартість заміщаємого палива, оскільки тариф на електроенергію, вироблену на цьому обсязі палива включає і відсоток рентабельності теплової станції. Цей момент враховується коефіцієнтом $k_{\text{тар}}$, який дорівнює відношенню тарифу на електроенергію $T_{\text{ел}}$ до паливної складової тарифу $T_{\text{пал.клад.}}$, тобто

$$k_{\text{тар}} = \frac{T_{\text{ел}}}{T_{\text{пал.клад.}}}. \quad (5.5)$$

З урахуванням цього, річний дохід від експлуатації ВЕС визначається за наступною формулою:

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54

$$D = V_{\text{тип}} C_{\text{пал}} k_{\text{тар}} = E_{\text{рік}} q C_{\text{пал}} k_{\text{тар}} = T_{\text{ввп}} P_{\text{вст}} q C_{\text{пал}} k_{\text{тар}}, \quad (5.6)$$

де $C_{\text{пал}}$ – ціна на паливо для електростанції в даній енергосистемі, грн/т.у.п.; q – питома витрата палива на теплових електростанціях в даній енергосистемі, т.у.п./кВт·год; $T_{\text{ввп}}$ – число годин використання встановленої потужності ВЕС 1 рік.

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

Річні експлуатаційні витрати B визначаються, як частка n від наведених капітальних витрат на будівництво ВЕС, тоді

$$B = nE_{\text{норм}}K = nE_{\text{норм}}C_{\text{пит}}P_{\text{вст}}, \quad (5.7)$$

де $E_{\text{норм}}$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Варіюючи значенням n можна також правильно оцінити діапазон експлуатаційних витрат. При питомих капітальних вкладеннях приблизно 1000 дол. США за кВт і число годин використання встановленої потужності на ВЕС порядку 2500 (середні вітрові умови) проектний термін окупності не перевищує 10 років, тобто знаходиться в діапазоні прийнятому для об'єктів енергетики.

5.5. Вироблення електро енергії ВЕС

Розрахунковий вираз для визначення виробітку електроенергії ВЕС може бути представлено наступною формулою:

$$E_{\text{ВЭС}} = K_{\text{зат}} K_{\text{с}} K_{\text{вп}} \sum_{i=1}^{N_{\text{ВЭУ}}} E_i, \quad (5.8)$$

де $K_{\text{зат}}$ – коефіцієнт затінення ВЕС, що враховує зменшення вироблення електричної енергії в результаті взаємного затінення ВЕУ та особливостей ландшафту території ВЕС $K_{\text{зат}} \leq 1$; $K_{\text{с}}$ – коефіцієнт, що враховує втрати енергії в електричній мережі ВЕС і в загально-стаціонарному електричному обладнанні ($K_{\text{с}} < 1$); $K_{\text{вп}}$ – коефіцієнт, що враховує споживання електричної енергії на власні потреби ВЕС ($K_{\text{вп}} < 1$); E_i – обсяг виробітку електроенергії ВЕУ за рік T ; $N_{\text{ВЭУ}}$ – чи

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		55

сло вітроенергетичних установок в складі ВЕС.

Значення K_c і $K_{вп}$ визначаються конкретними умовами схемного рішення внутрішньої мережі ВЕС і обсягами робіт з обслуговування і забезпечення працездатності ВЕУ. Кількісні значення цих коефіцієнтів складають приблизно 0,93...0,96.

Коефіцієнт затінення ВЕС $K_{зат}$ повністю і однозначно визначається проектним рішенням і характеризує зменшення об'єму вироблення електроенергії в результаті взаємного затінення ВЕУ, впливу рельєфу місцевості, природних перешкод і різних споруд. На етапі проектування слід по можливості прагнути до збільшення значення $K_{зат}$ в рамках існуючих обмежень на спорудження ВЕС, а на етапі експлуатації діючих станцій, необхідно знати числове значення $K_{зат}$ з метою планування обґрунтованого обсягу виробітку електроенергії.

Затінення ВЕУ, викликане ландшафтом місцевості, сусідніми установками або їх рядами, залежить від місця розташування ВЕУ і напрямку швидкості вітру. Ступінь затінення окремими перешкодами враховує коефіцієнт гальмування швидкості вітру K_m , значення якого визначається за виразом

$$K_{гальм} = 1 - r_{гальм1} r_{гальм2}, \quad (5.9)$$

де $r_{гальм1}$ і $r_{гальм2}$ – безрозмірні коефіцієнти, що враховують гальмування швидкості вітру перешкодою.

Значення коефіцієнтів $r_{гальм1}$ і $r_{гальм2}$ залежать від висоти осі обертання ротора ВЕУ, висоти перешкоди, відстані від перешкоди до ВЕУ, ширини перешкоди і визначаються за номограмами, представлених в довідковій літературі.

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

Розділ 6. Техніка безпеки.

У світі відновлюваних джерел енергії вітряні турбіни відіграють вирішальну роль у забезпеченні чистою енергією. Однак їх ефективність та продуктивність нерозривно пов'язані з проблемами, пов'язаними з технологіями безпеки. Від висвітлення перешкод до оповіщення авіації, заходів кібербезпеки для захисту від цифрових загроз та ефективних концепцій порятунку у надзвичайних ситуаціях на великій висоті – безпека вітряних турбін

є багатогранною областю. У цьому посібнику ми висвітлюємо всі важливі аспекти безпеки, про які повинні знати оператори, технічні фахівці та рятувальники. Ми поринаємо у світ нічної розмітки, обговорюємо важливість регулярних експертиз, представляємо методики порятунку на висоті, обговорюємо заходи захисту від корозії та багато іншого. Ціль полягає в тому, щоб створити всебічне розуміння вимог безпеки та рішень у вітроенергетиці, не покладаючись на рекомендації конкретних постачальників послуг.

Освітлення перешкод та освітлення на вимогу Нічний маркування Освітлення перешкод використовується для: Вітряні турбіни вночі та в умовах поганої видимості як перешкоди для авіації. Нічне маркування на вимогу робить ще один крок уперед, активуючи світло лише тоді, коли Літаки знаходяться в безпосередній близькості. Це знижує світлове випромінювання та вплив на навколишнє середовище, забезпечуючи при цьому безпеку в повітряному просторі. Впровадження систем на вимогу вимагає точного Технологія виявлення повітряних суден та надійне управління освітлювальне обладнання. Кваліфікаційні іспити Кваліфікаційні тести необхідні для того, щоб:

забезпечити персоналу, який працює на вітряних турбінах, доступ до має необхідні знання та навички для безпечного виконання своїх завдань. бути виконаним. Ці іспити охоплюють широке коло тем, включаючи експлуатацію та технічне обслуговування вітряних турбін, Правила техніки безпеки, заходи першої допомоги та дії у надзвичайних ситуаціях. Регулярне навчання та аудити допомагають забезпечити високий рівень безпеки. щоб переконатися, що це так. Порятунки на висоті Через висоту вітрогенераторів, Порятунки на висоті є найважливішим елементом стратегії безпеки. Рятувальні команди мають бути спеціально навчені діяти швидко та ефективно у разі виникнення надзвичайної ситуації. могли. Це включає методи безпечної евакуації поранених з гондоли або з вежі, а також можливість діяти в складних умовах.

робота. Захист від корозії Вітряні турбіни надзвичайно схильні до погодних

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

умов, які можуть призвести до корозії. Ефективний Тому захист від корозії має важливе значення для забезпечення довговічності та безпеки. установок. Це включає підбір підходящих матеріалів, регулярні огляди та роботи з технічного обслуговування, а також використання Покриття та фарби, що захищають від корозійних впливів. Загальні концепції доступу та порятунку Концепції доступу та порятунку для Вітряні турбіни повинні справлятися як із щоденною роботою, так і з аварійними ситуаціями. розглядати. Це включає безпечні способи доступу до гондоли і вежі, аварійних виходів і рятувальних платформ, а також обладнання та навчання персонал для надзвичайних ситуацій. Кібератаки Зі зростанням взаємопов'язаності Вітряні турбіни також підвищують ризик кібератак. Захисні заходи включають впровадження надійних систем безпеки, регулярних Оновлення програмного забезпечення та навчання персоналу виявленню потенційних загроз. Виявлення та запобігання. Технічне обслуговування та інспекції Регулярне технічне обслуговування та інспекція вітряних турбін є основним компонентом для забезпечення їхньої безпеки та ефективності в довгостроковій перспективі. Ці заходи спрямовані на те, щоб не тільки ідентифікація та усунення потенційних механічних або електричних дефектів, але й запобігання поломкам і нещасним випадкам. Експерти-інспектори перевіряють системи на наявність ознак зношування, корозійні пошкодження та структурну цілісність. Роботи з технічного обслуговування включають перевірку та технічне обслуговування систем безпеки, таких як освітлення перешкод та аварійне обладнання. Повна документація результатів огляду та проведених робіт з технічного обслуговування для демонстрації відповідності застосовним правилам безпеки. Навчання та виховання персоналу Навчання та безперервне навчання Навчання персоналу вітряних турбін має вирішальне значення для безпечної експлуатації та технічного обслуговування систем. Це включає в себе не тільки *технические* навички і знання роботи с обладнанням, *але і* .та навчання надання першої допомоги, протипожежного

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

захисту, порятунку на висоті та Робота з надзвичайними ситуаціями. Крім того, співробітники повинні регулярно проходити навчання за найновішими протоколами та стандартами безпеки, щоб: Підтримувати знання в актуальному стані та застосовувати кращі практики. Плани дій у надзвичайних ситуаціях та евакуації

Плани дій у надзвичайних ситуаціях та евакуації

Ефективні плани дій у надзвичайних ситуаціях та евакуації необхідні для реагування на аварії чи надзвичайні ситуації, пов'язані з вітряними турбінами, щоб мати можливість це зробити. Ці плани повинні включати чітко визначені процедури для різних типів Сценарії включали, від порятунку поранених до евакуації у разі пожежі, аж до процедури у разі технічних несправностей або Стихійні лиха. Регулярна практика цих планів гарантує, що кожен уміти діяти швидко та скоординовано у разі виникнення надзвичайної ситуації. Майбутні розробки в галузі Безпека Технології в області Вітряні турбіни постійно розвиваються, як і способи підвищення безпеки. Такі інновації, як більш досконалі датчики для раннього виявлення несправностей, покращені матеріали для довговічності та корозійної стійкості, а також розумніші Системи керування для оптимізації операцій обіцяють забезпечити безпеку для подальшого збільшення. Інтеграція штучного інтелекту та Машинне навчання може допомогти спрогнозувати потреби в технічному обслуговуванні та виконуйте автоматичні перевірки безпеки.

Міжнародні стандарти та правила

Відповідність міжнародним стандартам та нормативні акти мають важливе значення для безпечної експлуатації вітряних турбін. такі організації, як Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК) та Глобальна організація з вітроенергетики (GWO), впроваджує визнані у всьому світі керівні принципи для Проектування, експлуатація та технічне обслуговування вітрогенераторів. Ці стандарти гарантують, що високий рівень безпеки та сприяють гармонізації Методи забезпечення безпеки по всьому світу.

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
						59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Оператори вітряних турбін повинні постійно інформувати про нововведення та зміни в нормативних актах з метою забезпечення відповідності та забезпечення захисту персоналу та обладнання. гарантувати. Результат Безпека вітряних турбін широка і багатшарова тема, що потребує постійної уваги та Потрібна адаптація. Від технологічних інновацій до суворих правил техніки безпеки до безперервного навчання персоналу – Кожен елемент відіграє найважливішу роль у захисті людей і людей. Навколишнє середовище. У міру того, як вітроенергетика продовжує зростати та розвиватися, Технології безпеки також розвиватимуться і надалі, щоб відповідати новим вимогам Проблеми. Зрештою, мета зрозуміла: забезпечення чистою енергією безпечним та ефективним способом на користь усіх залучених сторін.

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Список літератури

- 1.Беляков П.Ю., ПановР.М. анализ эффективности современных цепей преобразования энергии в ветроэлектрических установках большой мощности альтернативная энергетика. 2011.№4.С.27-34.
- 2.Берловский В.М., Штепа Е.П.,Богопольский Б.Х. Регулируемый синхронный биротативый электропривод. *Горный журнал*.1967. №1. С.125-129.
3. Штепа Е.П. Аавтоматизований електропривід з синхронним біротативним двигуном. Сборник содержит доклады участников VI Всеукраинской научно-практической конференции«Информационные технологии и автоматизация – 2013. С.46.
4. Штепа Є.П. Вітроелектростанція: Патент №94321 Україна: МПК F03D 1/02/ заявник; патенто власник Одеська нац. акад.харчових технологій.–U201405454; заявлено 22.05.14. С. 1-4.
5. Загірняк М. В., Невзлін Б. І. Електричні машини: Підручник. — 2-ге вид., перероб. і доп. — Київ: Знання, 2009. — 400 с. — ISBN 978-966-346-644-6.
6. Півняк Г. Г. Електричні машини: навч. посіб. / Г. Г. Півняк та ін. — Д.: НГУ, 2003. — 328 с. — ISBN 966-8271-36-X.
7. Моделювання електромеханічних систем: Підручник / Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю., Садовий О.В.– Кременчук, 2001. – 410 с.
8. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
7. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботибакалавра для здобувачів СВО «Бакалавр» спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», галузі знань 14 – «Електрична інженерія» / Укладачі: П.І. Осадчук, В.Ф. Бабіч, А.А. Галіулін, Є.П. Штепа. – Одеса: ОНТУ, 2021. – 55 с.

					КРБ АТЕРС. 58-03.30.01.26.1.3.2	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		61

