

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

**ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**  
із навчальної дисципліни

**«ВІТРОЕНЕРГЕТИКА»**

*(для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»  
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,  
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2020**

Лабораторний практикум із навчальної дисципліни «Вітроенергетика» (для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр» спеціальності 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. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 34 с.

Укладачі : канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,  
канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров

Рецензент

**Д. В. Тугай**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 5 від 10.11.2020.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1 Дослідження швидкісних характеристик вітротурбін від швидкості вітру.....	11
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2 Дослідження швидкісних характеристик вітротурбін від кута атаки вітру.....	15
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3 Дослідження крутного моменту вітротурбін від кількості лопатей.....	19
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4 Дослідження характеристик холостого ходу синхронного генератора в залежності від частоти обертання колеса вітротурбіни.....	23
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5 Дослідження характеристик холостого ходу генератора постійного струму в залежності від частоти обертання колеса вітротурбіни.....	27
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6 Дослідження робочих характеристик вітрогенераторів, що працюють у режимах змінного навантаження.....	30

## ВСТУП

Потенціал вітрової енергії, який може бути використаний до 2030 р., оцінюється в 16 ГВт, до того ж щорічно можна виробляти від 25 до 30 ТВт·год. електроенергії. Крім того, Агентство з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів вважає, що до 2050 р. може використовуватись до 30 ТВт·год. вітрової енергії, тоді як загальний технічний потенціал вітрової енергії становитиме 42 ТВт·год. В українській Енергетичній стратегії планується, що до 2030 р. в Україні 2 ТВт·год. електроенергії будуть вироблятися вітровими установками. Це означає, що здійснене у 2005 р. державне планування задає показник, який приблизно на 90 % менший від потенціалу, оцінюваного Агентством з питань забезпечення ефективного використання.

Переваги вітрової енергетики:

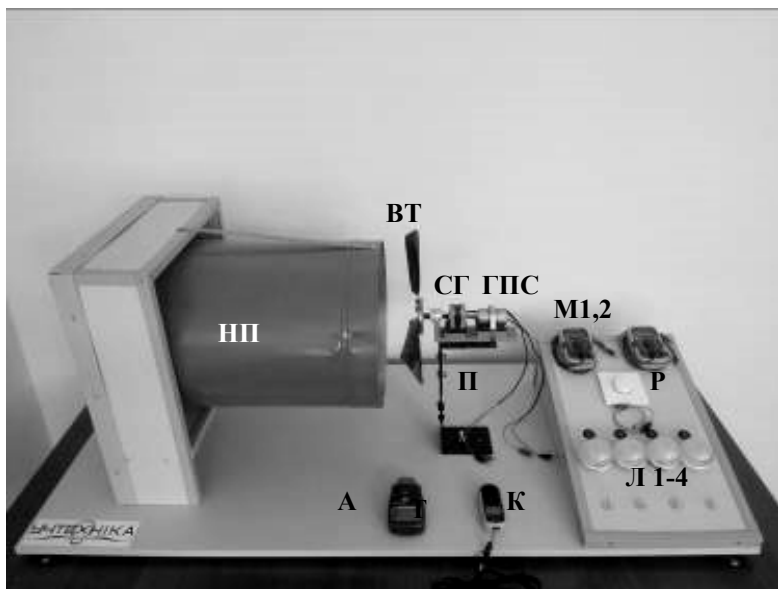
- низька собівартість – вітроенергетика може конкурувати з ядерною, вугільною та газовою енергетикою;
- нульова вартість паливної складової, джерело енергії невичерпне і присутнє в необмеженій кількості;
- екологічно прийнятна енергетика – виробництво енергії не супроводжується викидами двоокису вуглецю;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

Вітрова енергетика завжди буде впливати на резерви енергетичної системи, величина яких залежатиме від розміру енергосистеми, виду генерації, коли-

вань, управління попитом і ступенем інтеграції з іншими системами. При цьому великі енергосистеми можуть використовувати перевагу, що полягає у різноманітності джерел генерації.

### Склад лабораторної установки

Лабораторна установка «Лабораторний стенд з дослідження раціонального використання енергії вітру» (ЛС ВЕВ) має зовнішній вигляд, комплектацію та схему роботи, які наведені на рисунках 1.1, 1.2.



1. Нагнітач повітря (НП).
2. Універсальна віротурбіна (ВТ).
3. Синхронний генератор (СГ).
4. Генератор постійного струму (ГПС).
5. Мультиметри (М1, М2).
6. Регулятор швидкості вітру (Р).
7. Лампи навантаження (Л1, Л2, Л3, Л4).
8. Тахометр (Т).
9. Анемометр (А).
10. Контактні затиски (К).
11. Поворотна платформа (П).

Рисунок 1.1 – Комплектація стенду ЛС ВЕВ

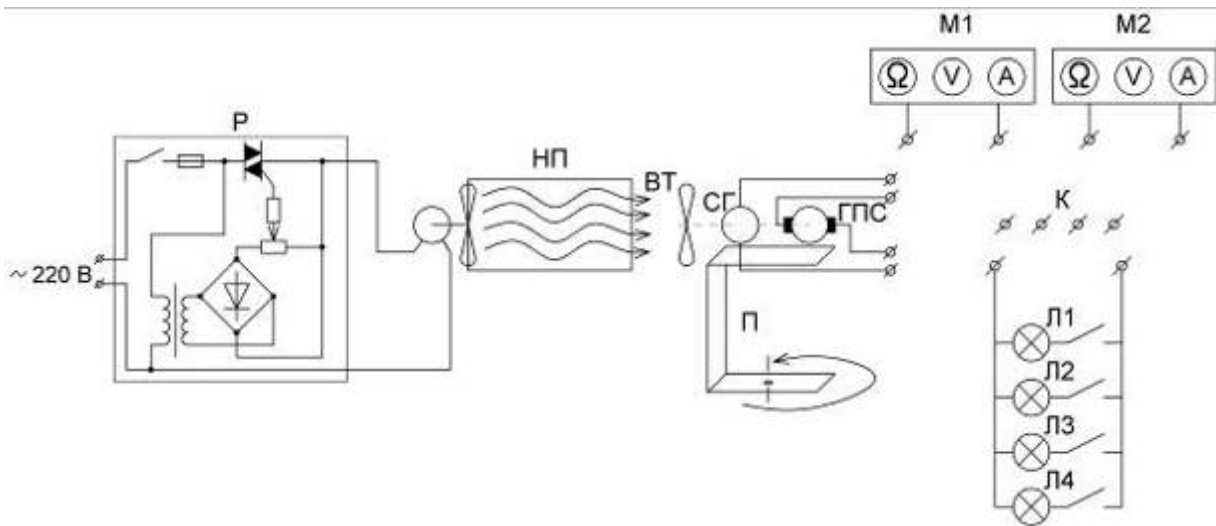


Рисунок 1.2 – Схема лабораторного стану ЛС ВЕВ

Відповідно до складу, комплектації та схеми роботи складові стану виконують такі функції:

1. **Нагнітач повітря** по суті є вентилятором з аеродинамічною трубою, який створює основний вітровий потік, що може змінюватися за швидкістю вітру.

2. **Універсальна вітротурбіна** складається з основи, яка обертається на підшипниках. Основа має отвори для кріплення лопатей вітротурбіни різної кількості та форми, що дає можливість моделювати вітротурбіну з кількістю лопатей 2, 3, 4 (частково симетричну) та 6. Основа універсальної вітротурбіни може бути закріплена як горизонтально так і вертикально, що дозволяє моделювати різні види вітротурбін;

3. **Синхронний генератор** перетворює механічну енергію обертання валу вітротурбіни в електричну енергію змінного струму на його затисках.

4. **Генератор постійного струму** перетворює механічну енергію обертання валу вітротурбіни в електричну енергію постійного струму на його затисках.

5. **Мультиметри** (вимірювальні прилади) призначені для зняття показань величин в електричних колах генератори – навантаження.

6. **Регулятор швидкості вітру** по суті є симисторним регулятором вентилятору нагнітача повітря. За його допомогою регулюється частота обертання вентилятору, а, отже швидкість вітру.

7. **Лампи навантаження** створюють електричне навантаження на затисках генераторів, що дозволяє досліджувати режими роботи вітроелектростанції під навантаженням.

8. **Тахометр** дозволяє вимірювати частоту обертання вітротурбіни та генераторів.

9. **Анемометр** дозволяє вимірювати швидкість вітру.

10. **Контактні затиски** використовуються під час зборки електричних схем живлення навантаження та підключення вимірювальних приладів.

11. **Поворотна платформа** є основою для монтажу універсальної вітротурбіни та орієнтації її в просторі.

### **Основні характеристики вітроприймального пристрою ВЭУ**

При будь-якому перетворенні енергії мають місце втрати. Це відноситься і до перетворення енергії вітру в механічну енергію, а для ВГУ – це обертання ротора (вітрового колеса). Обґрунтуванням оптимального коефіцієнта перетворення або так званою теорією ідеального вітряка займалися багато вчених, один з них німецький фізик Альберт Бетц (1885–1968).

Бетц виходив з того, що існують три області швидкостей повітряного потоку (рис. 1.3):

- набігаючий на ротор потік зі швидкістю  $v_1$ ;
- потік зі швидкістю  $v$  безпосередньо в місці розташування ротора;
- потік повітряного потоку, що відходить від ротора зі швидкістю  $v_2$ .

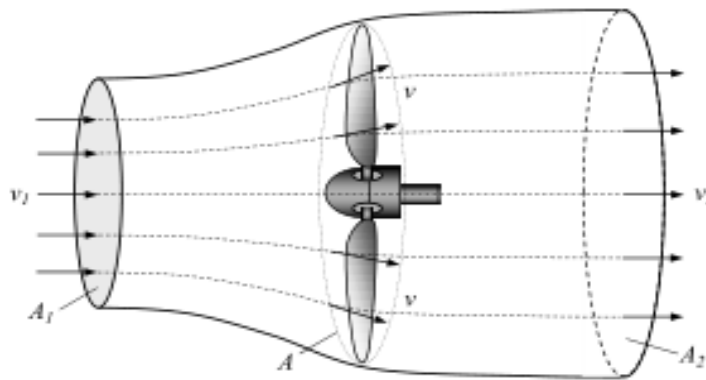


Рисунок 1.3 – Взаємодія потоку вітру з вітроколесом

Якщо швидкість потоку за ротором  $v_2$  буде дорівнювати 0, то тоді повітряний потік не повинен проходити через перетин ротора. Якщо ж потік не гальмується (швидкість потоку за ротором  $v_2$  буде дорівнює швидкості потоку перед ротором  $v_1$ ), то не відбувається перетворення енергії. Отже, існує оптимальне співвідношення швидкостей потоку перед ротором  $v_1$  і після ротора  $v_2$ , при якому і відбувається максимальне перетворення енергії повітряного потоку в механічну енергію обертання ротора ВГУ за рахунок гальмування потоку і віддачі частини кінетичної енергії вітру вітровому колесу (ротору).

При обґрунтуванні теорії ідеального вітряка було прийнято ряд припущень:

1. Вітрове колесо розглядалося як колесо з нескінченно великим числом лопатей дуже малої ширини і мало нескінченно малі розміри в напрямку потоку повітря, тобто являло собою ідеальну площину.

2. Вісь обертання вітрового колеса завжди була спрямована паралельно вектору швидкості повітряного потоку.

3. Вітрове колесо створює підпір і тиск повітря  $p$  в міру наближення до вітряка підвищується, а при проходженні через вітрове колесо різко падає. Тобто повітряний потік створює на площині негативний скачок (імпульс) тиску.

4. Повітря вважався нестисливим, його питома щільність вважалася постійною, а також не відбувався теплообмін між повітрям і вітровим колесом.



Якщо прийняти швидкість повітряного потоку перед колесом  $v_1$  незмінною, то видно, що величина коефіцієнта використання енергії вітру залежить від швидкості  $v_2$ .

Основними характеристиками вітроприймального пристрою (ветроколеса) є коефіцієнт використання потужності  $C_p$ , коефіцієнт моменту окружних сил  $C_m$  і швидкохідність  $Z$ .

Коефіцієнт використання потужності визначається за формулою:

$$C_p = \frac{N_B}{N_{\text{ветр}}} = \frac{(v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{2v_1^3}, \quad (1.1)$$

де  $N_B$  – потужність вітроколеса, що використана вітроколесом в процесі його обертального руху, Вт;  $N_{\text{ветр}}$  – повна енергія набігаючого вітрового потоку, Вт;  $v_1$   $v_2$  – швидкість вітру до і після вітроколеса, м/с.

Максимальне значення коефіцієнта  $C_p$  досягається при співвідношенні швидкостей  $v_2/v_1 = 1/3$  і становить  $C_p = C_B = 0,593$  (де  $C_B$  – критерій Бетца). Коефіцієнт корисної дії вітроколеса, виходячи з цього критерію, визначається за формулою:

$$\eta_B = \frac{C_p}{C_B}. \quad (1.2)$$

Швидкохідність  $Z$  вітроколеса є відношенням лінійної швидкості кінця лопаті до швидкості набігаючого вітрового потоку і застосовується в якості базової характеристики вітроколеса. Швидкохідність визначається за формулою:

$$Z = \frac{2\pi nR}{v_{\text{ветр}}}, \quad (1.3)$$

де  $n$  – частота обертання, об/с;  $R$  – радіус вітроколеса, м,  $v_{\text{ветр}} = v_2$ .

Оптимальне значення швидкохідності вітроколеса  $Z_{\text{опт}}$  залежно від числа лопатей розраховується за формулою:

$$Z_{\text{опт}} = \frac{4\pi}{n_{\text{лоп}}}, \quad (1.4)$$

де  $n$  – кількість лопатей, шт.

Коефіцієнт моменту окружних сил дорівнює:

$$C_M = \frac{2M}{\rho_d S D}, \quad (1.5)$$

де  $M$  – крутний момент на валу вітроколеса, Н м;  $\rho_d$  – динамічний тиск вітрового потоку, Па;  $S$  – площа, що омивається вітроколесом, м<sup>2</sup>;  $D$  – діаметр вітроколеса, м.

Крутний момент на валу вітроколеса  $M$ , Нм, є відношенням потужності вітроколеса до його кутової швидкості  $\omega$ , рад/с:

$$M = \frac{N_B}{\omega} = C_M \frac{\rho \pi v_{\text{ветр}}^2 R^3}{2}, \quad (1.6)$$

де  $\rho$  – щільність повітря 1,226 кг/м<sup>3</sup>.

Швидкохідність вітроколеса  $Z$  знаходиться в наступній залежності від коефіцієнта використання потужності  $C_p$  і коефіцієнта моменту окружних сил  $C_M$ :

$$Z = \frac{C_p}{C_M}. \quad (1.7)$$

Потужність вітроколеса  $N_B$ , Вт, залежить від швидкості вітру  $v_{\text{ветр}}$  і визначається за формулою:

$$N_B = C_p \frac{\rho \pi v_{\text{ветр}}^3 R^2}{2}. \quad (1.8)$$

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1

### Дослідження швидкісних характеристик вітротурбін від швидкості вітру

**Мета роботи.** Визначити та порівняти швидкісні характеристики вітротурбін з різною кількістю лопатей.

**Теоретичні пояснення.** Аеродинамічним профілем називається аеродинамічна конструкція, виконана у вигляді витягнутого уздовж повітряного потоку перетину із закругленою передньою і гострою задньою кромками і з симетричною або асиметричною кривизною. У вітроенергетиці, як правило, використовуються профілі з асиметричною кривизною. Аеродинамічні профілі розроблялися у всьому світі різними організаціями і фірмами в період бурхливого розвитку авіації.

Як приклад на рисунку 1.4 представлено перетин і основні геометричні параметри одного із серії профілів НАСА з умовним позначенням НАСА 4415, який використовується при виготовленні лопатей вітрогенераторних установок.

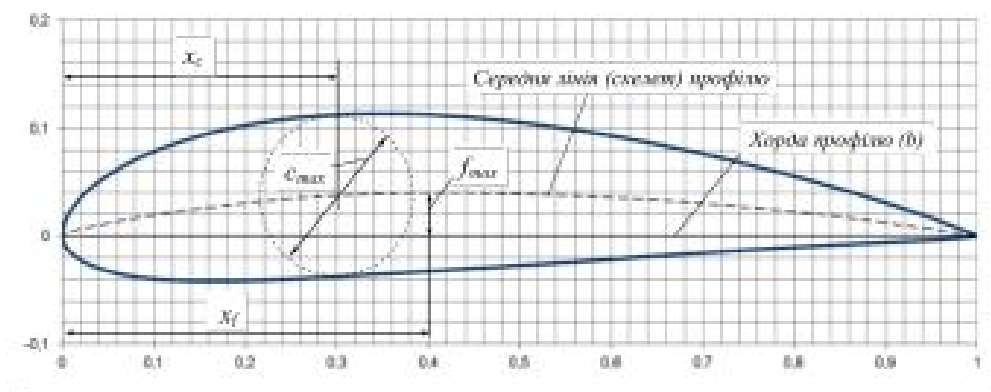


Рисунок 1.4 – Перетин і основні геометричні параметри профілю НАСА 4415

До основних геометричних параметрів профілю належать:

- *хорда  $b$*  – відрізок прямої, що з'єднує дві найбільш віддалені одна від одної точки профілю. Хорда є також довжиною профілю;
- *середня лінія (скелет) профілю*;

- максимальна товщина профілю –  $c_{max}$ ;
- положення максимальної товщини уздовж хорди –  $x_c$ ;
- максимальна угнутість профілю –  $f_{max}$ ;
- положення максимальної угнутості –  $x_f$ .

### **Програма роботи**

1. Здійснюється монтаж вітротурбіни необхідної конструкції (необхідна форма та кількість лопатей).
2. За допомогою регулятора Р вмикаємо нагнітач повітря НП на повну потужність. Далі, за допомогою того ж регулятора, відповідно до необхідних значень швидкості вітру, змінюємо її у бік зменшення.
3. За допомогою анеометра здійснюється вимірювання швидкістю вітру  $V_B$ , м/с. Відповідно до замірів швидкості вітру за допомогою лазерного тахометру здійснюється заміри швидкості частоти обертання валу вітротурбіни  $n$ , об/хв.
4. Показники замірів заносяться в таблицю 1.1 відповідно цих показників будуються залежності частоти обертання функції швидкості вітру  $n = f(V_B)$  (рис. 1.5).
5. Визначити коефіцієнт використання  $C_p$  за формулою 1.1. Для цього вимірювати швидкість вітрового потоку перед вітроколесом ( $v_1$ ) та після нього ( $v_2$ ).
6. Побудувати залежності  $C_p = f(V_B)$  для різної кількості лопатей на вітроколесі (рис. 1.6).

Таблиця 1.1 – Залежності характеристик вітроколеса від швидкості вітру та кількості лопатей

Кількість лопатей	Параметр	Номер заміру					
		1	2	3	4	5	6
2	$V_B, \text{ м/с}$						
	$n, \text{ об/хв}$						
	$V_1, \text{ м/с}$						
	$V_2, \text{ м/с}$						
	$C_p, \text{ в. о.}$						
3	$V_B, \text{ м/с}$						
	$n, \text{ об/хв}$						
	$V_1, \text{ м/с}$						
	$V_2, \text{ м/с}$						
	$C_p, \text{ в. о.}$						
6	$V_B, \text{ м/с}$						
	$n, \text{ об/хв}$						
	$V_1, \text{ м/с}$						
	$V_2, \text{ м/с}$						
	$C_p, \text{ в. о.}$						

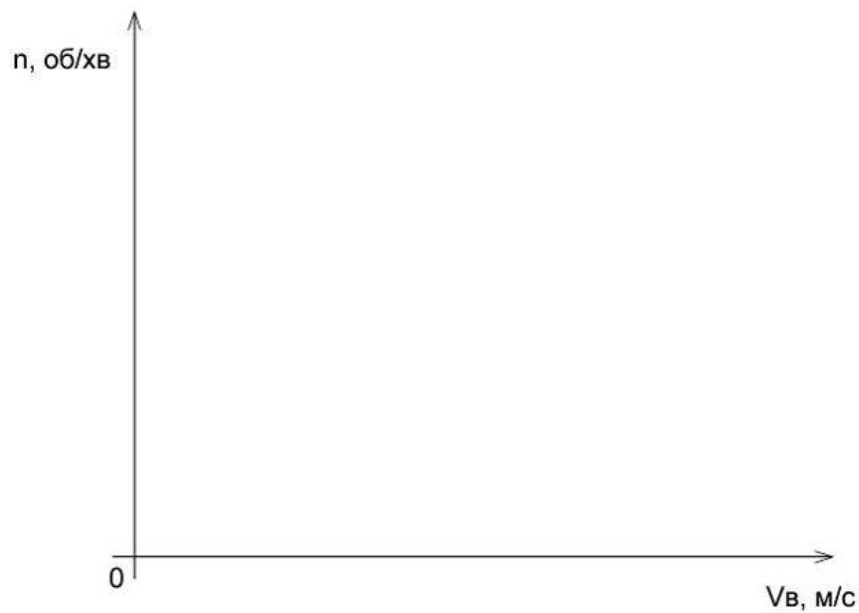


Рисунок 1.5 – Залежність кількості обертів вітротурбіни від швидкості вітру



Рисунок 1.6 – Залежність коефіцієнту  $C_p$  вітротурбіни від швидкості вітру

Зробіть висновки.

### Контрольні запитання

1. Охарактеризуйте три області швидкостей повітряного потоку.
2. Що таке оптимальне співвідношення швидкостей потоку?
3. Припущення, що прийняті при обґрунтуванні теорії ідеального вітряка.
4. Назвіть основні характеристики вітроприймального пристрою.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2

### Дослідження швидкісних характеристик вітротурбін від кута атаки вітру

**Мета роботи.** Визначити та порівняти швидкісні характеристики в залежності від кута напрямку вітру відповідно вісі вітротурбін різної конструкції.

**Теоретичні пояснення.** При поступальному русі аеродинамічної площини (наприклад при горизонтальному польоті літака) кут набігання повітряного потоку  $\alpha$  для всіх перерізів площини, а також напрямок і модуль вектора повної аеродинамічної сили  $F$  залишаються постійними.

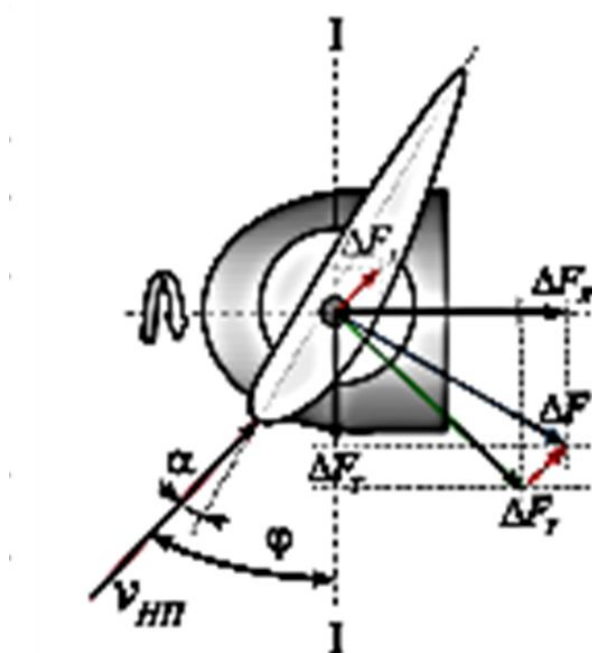


Рисунок 2.1 – Векторна діаграма сил, що діють на вітрогенераторну установку

При обертанні лопатей вітрогенераторних установок розподіл швидкостей і кутів носить зовсім інший характер. Відповідно до теорії ідеального вітряка швидкість вітру  $v_s$  при підході до робочого колеса сповільнюється і в площині обертання робочого колеса становить величину, яка дорівнює  $v_{вк} = -v_s$ . Окружний рух лопатей дає додаткову складову окружної швидкості  $v_o$ , яку можна знайти, якщо вважати що лопаті нерухомими, а повітря рухається в протилежному обертанню напрямку. В результаті геометричного підсумовування

швидкостей  $v_o$  та  $v_{вк}$  отримаємо результуючу швидкість повітряного потоку  $v_{нп}$  котра діє на лопать (швидкість набігаючого потоку).

Режим оптимального відбору потужності відповідає режиму роботи площині на оптимальних кутах набігання потоку, при яких коефіцієнт лобового опору  $c_x$  значно нижче коефіцієнта підйомної сили  $c_y$ . У цьому випадку повна аеродинамічна сила  $F$ , що діє на площину, буде дорівнює підйомній силі  $F_y$ .

### Програма роботи

1. Здійснюється монтаж вітротурбіни необхідної конструкції (необхідна форма та кількість лопатей).

2. За допомогою регулятора Р вмикаємо нагнітач повітря НП на повну потужність.

3. Шляхом оберту платформи вітротурбіни змінюємо її положення відносно напрямку вітру на необхідний кут.

4. Відповідно до кута не співпадіння напрямку вітру та осі вітротурбіни  $\alpha$  за допомогою лазерного тахометру здійснюється заміри швидкості частоти обертання валу вітротурбіни  $n$ , об/хв.

5. Визначити значення коефіцієнту використання  $C_p$  за формулою 1.1. для кількості лопатей  $b$  залежно від кута атаки. Для цього вимірювати швидкість вітрового потоку перед вітроколесом ( $v_1$ ) та після нього ( $v_2$ ).

6. Побудувати залежності  $C_p = f(\alpha)$  для двох варіантів форми лопатей та залежності частоти обертання функції кута атаки вітру  $n = f(\alpha)$  для обох форм лопатей та різної їхньої кількості.



Таблиця 2.1 – Параметри вітроколеса залежно від кута атаки та кількості лопатей

Форма лопаті 1		Номер заміру					
Кількість лопатей		1	2	3	4	5	6
2	$\alpha, ^\circ$						
	n, об/хв						
3	$\alpha, ^\circ$						
	n, об/хв						
6	$\alpha, ^\circ$						
	n, об/хв						
	$V_1, \text{м/с}$						
	$V_2, \text{м/с}$						
	$C_p$						
Форма лопаті 2							
Кількість лопатей		1	2	3	4	5	6
2	$\alpha, ^\circ$						
	n, об/хв						
3	$\alpha, ^\circ$						
	n, об/хв						
6	$\alpha, ^\circ$						
	n, об/хв						
	$V_1, \text{м/с}$						
	$V_2, \text{м/с}$						
	$C_p$						

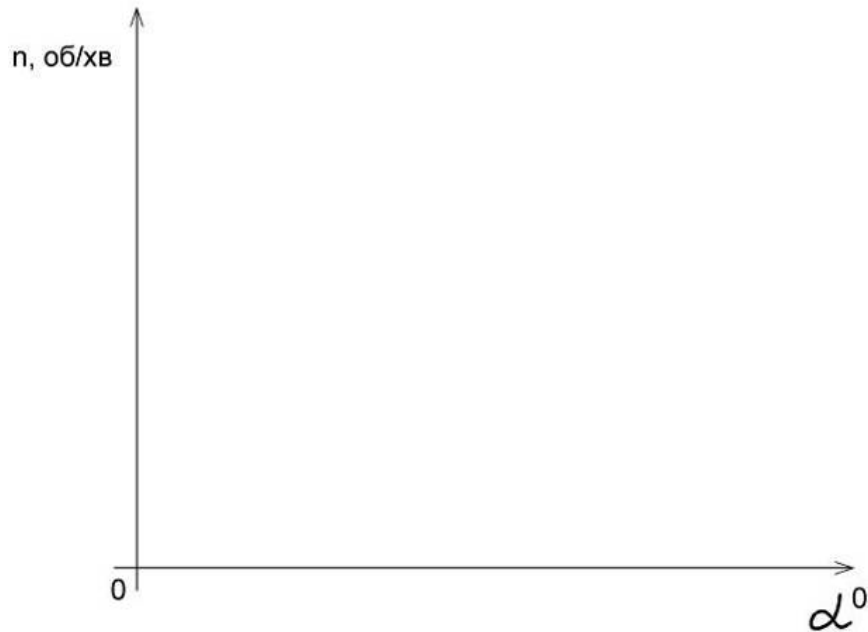


Рисунок 2.2 – Залежність кількості обертів вітротурбіни від кута атаки вітру

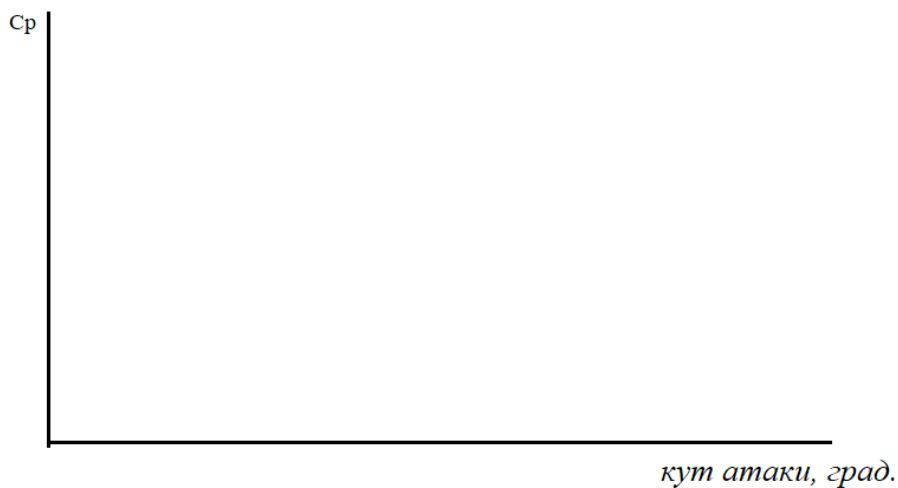


Рисунок 2.3 – Залежність  $C_p$  вітротурбіни від кута атаки вітру

Зробіть висновки.

### Контрольні запитання

1. Що називають кутом атаки?
2. У який спосіб пов'язана швидкість обертання колеса від кута атаки?
3. Як залежить коефіцієнт використання вітроколеса від кута атаки вітру?
4. Як змінюють кут атаки для регулювання роботи вітроенергетичної установки?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3

### Дослідження крутного моменту вітротурбін від кількості та форми лопатей

**Мета роботи.** Визначення та порівняння характеристик вітроколеса та крутного моменту в залежності від кількості та форми лопатей.

#### Теоретичні пояснення.

Швидкохідність визначає ефективність роботи вітроколеса. Для досягнення максимальної ефективності, частота обертання вітроколеса що має певну кількість лопатей, повинна якось відповідати швидкості вітру. Розглянемо співвідношення визначають цю відповідність.

Ефективність роботи вітроколеса, отже, визначається співвідношенням двох характерних проміжків часу:

$\Delta t_n$  – за яке лопать переміщається на відстань, рівну відстані між лопатями;

$\Delta t_b$  – за яке створюване лопатями збурення повітряного потоку переміститься на відстань, яка дорівнює його довжині.

Проміжок часу  $\Delta t_b$  залежить від розміру і профілю лопатей і змінюється обернено пропорційно швидкості вітру.

Проміжок часу  $\Delta t_n$  для  $N$  – лопатевого вітроколеса, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ , дорівнює:

$$\Delta t_n \approx \frac{2\pi}{N\omega}. \quad (3.1)$$

Кутова швидкість обчислюється за формулою

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}, \quad (3.2)$$

де  $n$  – швидкість обертання вітроколеса, об/хв.

Проміжок часу існування в площині вітроколеса створюваного лопаттю збурення приблизно дорівнює:

$$\Delta t_b \approx \frac{d}{v_0}, \quad (3.3)$$

де  $v_0$  – швидкість набігаючого потоку повітря;  $d$  – характерна довжина збуреної

лопаттю області повітряного потоку. Очевидно, що ефективність використання енергії повітряного потоку буде максимальною, якщо  $\Delta t_v = \Delta t_n$ , або враховуючи (3.2) та (3.3) маємо:

$$\frac{2\pi}{N\omega} = \frac{d}{v_0}, \text{ або } \frac{N\omega}{v_0} = \frac{2\pi}{d}. \quad (3.4)$$

Коефіцієнт швидкохідності дорівнює відношенню швидкості кінця лопаті до швидкості вітру, або:

$$Z = \frac{R\omega}{v_0}. \quad (3.5)$$

### Програма роботи

Вимірювання швидкості обертання вітротурбіни здійснюється при постійній (максимальній) швидкості вітру, та змінній конструкції вітроколеса.

1. Здійснюємо монтаж вітротурбіни необхідної конструкції (необхідна форма та кількість лопатей).

2. За допомогою регулятора Р вмикаємо нагнітач повітря НП на повну потужність.

3. За допомогою анемометра та лазерного тахометра вимірюємо швидкість вітру та частоту обертання вітротурбіни відповідно. При цьому слід стежити за тим, щоб швидкість вітру при усіх вимірювання була однаковою.

4. Коефіцієнт використання потужності  $C_p$  визначається по формулі 1.1.

5. Визначаємо швидкохідність за формулою 1.3. Частоту обертання  $n$  треба брати як об/сек.

6. За формулою 1.7 визначаємо коефіцієнт моменту окружних сил  $C_m$ .

7. Визначаємо потужність вітроколеса  $N_v$ , Вт за формулою 1.8.

8. Визначаємо крутний момент на валу вітроколеса  $M$  за формулою 1.6.

9. Будуємо залежності крутного моменту та потужності від кількості лопатей вітроколеса  $M = f(N_l)$ ,  $N = f(N_l)$  на одній координатній площині.

10. Повторюємо зняття параметрів та розрахунки для форми лопатей № 2, та будуємо графіки.

Показники замірів та розрахунків заносимо в таблицю 3.1 відповідно цих показників будуються в залежності крутного моменту від частоти обертання для різних конструкцій вітроколес.

Таблиця 3.1 – Параметри вітроколеса залежно від частоти обертання

Лопаті за формою 1

$N_L$ , шт	2	3	6
$n$ , об/хв			
$V_1$ , м/с			
$V_2$ , м/с			
$C_p$			
$Z$			
$C_m$			
$M$ , Нм			
$N$ , Вт			

Лопаті за формою 2

$N_L$ , шт	2	3	6
$n$ , об/хв			
$V_1$ , м/с			
$V_2$ , м/с			
$C_p$			
$Z$			
$C_m$			
$M$ , Нм			
$N$ , Вт			

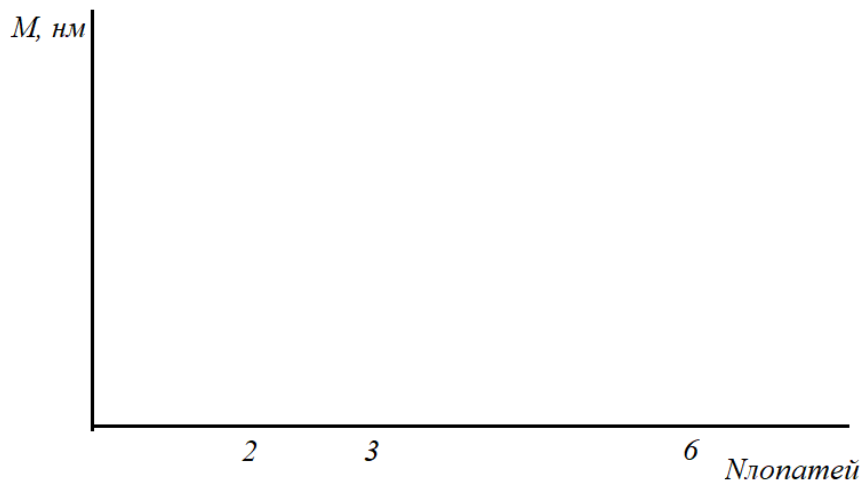


Рисунок 3.1 – Залежність моменту вітротурбіни від кількості лопатей за формою 1

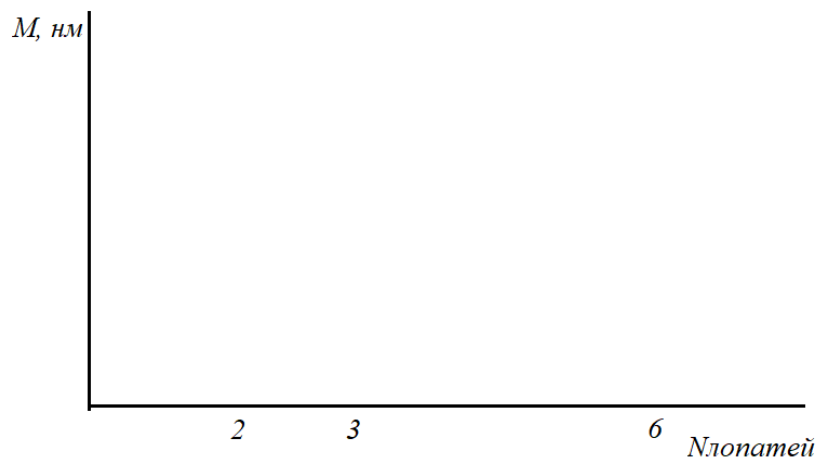


Рисунок 3.2 – Залежність моменту вітротурбіни від кількості лопатей за формою 2

Зробіть висновки.

### Контрольні запитання

1. Від чого залежить швидкохідність вітроенергетичної установки?
2. Які моменти діють на вітроколесо?
3. Які параметри впливають на значення крутного моменту?
4. Як можна керувати параметрами вітроколеса в динамічних режимах його роботи?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4

### Дослідження характеристик холостого ходу синхронного генератора залежно від частоти обертання колеса вітротурбіни

**Мета роботи.** Визначити та порівняти характеристики холостого ходу вітроелектростанції із синхронним генератором в залежності від швидкості вітру.

**Теоретичні пояснення.** Синхронна машина (СМ) – це електрична машина змінного струму, у якій частота обертання ротора і частота  $f$  струмів і ЕРС в обмотці якоря пов'язані чітким співвідношенням  $n = \frac{60f}{p}$ . У таких машинах у сталому режимі роботи результуюче магнітне поле і ротор обертаються з однаковою швидкістю (синхронно).

Номинальні дані: повна потужність  $S_n$ , лінійна напруга  $U_n$  і струм  $I_n$  обмотки збудження.

ЕРС синхронного генератора, індуковані у фазній обмотці якоря (статора):

– основним магнітним потоком  $\Phi_0$  збудження

$$E_0 = -j4,44 j\omega k\Phi_{0m} = jC_0 n\Phi_{0m};$$

– магнітним потоком  $\Phi_{\text{я}}$  якоря

$$E_{\text{я}} = -j4,44 j\omega k\Phi_{\text{ям}} = -jX_{\text{я}}I;$$

– магнітним потоком  $\Phi_{\text{яроз}}$  розсіювання якоря

$$E_{\text{яроз}} = -jX_{\text{яроз}}I,$$

де  $\omega$  – кількість витків фазної обмотки якоря;  $k$  – її обмотковий коефіцієнт;  $X_{\text{я}}$  і  $X_{\text{яроз}}$  – головний індуктивний опір фазної обмотки якоря та її індуктивний опір розсіювання, обумовлене магнітними потоками  $\Phi_{\text{я}}$  і  $\Phi_{\text{яроз}}$ ,  $\Phi_{0m}$  і  $\Phi_{\text{ям}}$  – амплітудні значення магнітних потоків  $\Phi_0$  і  $\Phi_{\text{я}}$ ;  $I$  струм якоря.

Кут навантаження – просторовий кут між осями результуючого магнітного потоку  $\Phi$  і потоку збудження  $\Phi_0$ . Оскільки  $X_{я} \gg X_{яроз}$ , кути  $\theta'$  і  $\theta$  практично рівні, тому надалі під кутом навантаження вважатимемо кут  $\theta$ .

Електромагнітна потужність і момент

$$P_{ем} = \frac{mUE_0}{X_c} \sin \theta; \quad M_{ем} = M = \frac{mUE_0}{\omega X_c} \sin \theta,$$

де  $m$  – число фаз обмотки якоря;  $\omega = \pi/30$  – кутова швидкість обертання ротора.

Повна, активна і реактивна потужність:

$$\left. \begin{aligned} S &= mUI = \frac{mUE_0}{X_c}; \\ P &= mUI \cos \varphi = \frac{mUE_0}{X_c} \sin \theta; \\ Q &= nUI \sin \varphi = \frac{mUE_0}{X_c} \cos \theta, \end{aligned} \right\}$$

де  $U$  і  $I$  – діючі значення напруги і струму якоря.

Режим роботи синхронної машини зазвичай характеризується значеннями напруги  $U$  і струму  $I$  якоря, зсувом фаз і струмом  $I_s$  збудження (чи ЕРС  $E_0$ ), причому для кожної з указаних величин справедливі такі співвідношення:

$$\begin{aligned} E_0 &= \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + X_c I)^2}; \\ I &= \frac{-U \sin \varphi + \sqrt{(U \sin \varphi)^2 + (E_0^2 - U^2)}}{X_c}; \\ U &= -X_c I \sin \varphi + \sqrt{E_0^2 - X_c^2 I^2} \cos^2 \varphi; \\ \varphi &= \arcsin \frac{E_0^2 - U^2 - X_c^2 I^2}{2UIX_c}. \end{aligned}$$



## Хід роботи

1. Здійснюємо монтаж вітротурбіни необхідної конструкції (необхідна форма та кількість лопатей).

2. За допомогою регулятора Р вмикаємо нагнітач повітря НП на повну потужність.

3. За допомогою анемометра та лазерного тахометра вимірюємо швидкість вітру та частоту обертання вітротурбіни відповідно.

4. За допомогою мультиметрів вимірюємо діючу величину ЕРС на затисках генератора.

5. Підключаємо цифровий осцилограф та досліджуємо форму ЕРС, визначаємо її частоту та амплітуду.

Показники замірів заносимо в таблицю 4.1 відповідно цих показників будуються залежності наведеної ЕРС генераторів від швидкості вітру та частоти обертання  $E = f(V, n)$ .

Таблиця 4.1 – Дані для побудови характеристики холостого ходу

Кількість лопатей	Номер заміру						
1	2						
2	<i>V м/с</i>						
	<i>n, об/хв</i>						
	<i>E, В</i>						
	<i>E<sub>амп</sub>, В</i>						
	<i>Частота E, Гц</i>						
3	<i>V м/с</i>						
	<i>n, об/хв</i>						
	<i>E, В</i>						
	<i>E<sub>амп</sub>, В</i>						
	<i>Частота E, Гц</i>						

Продовження таблиці 4.1

1	2						
4	$V, \text{ м/с}$						
	$n, \text{ об/хв}$						
	$E, \text{ В}$						
	$E_{амп}, \text{ В}$						
	Частота $E, \text{ Гц}$						
6	$V, \text{ м/с}$						
	$n, \text{ об/хв}$						
	$E, \text{ В}$						
	$E_{амп}, \text{ В}$						
	Частота $E, \text{ Гц}$						

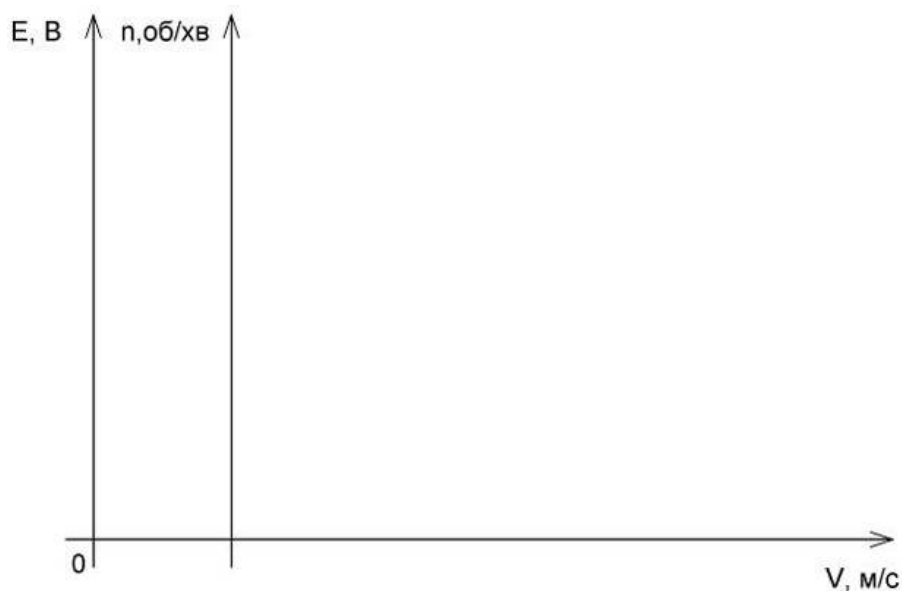


Рисунок 4.1 – Залежність наведеної ЕРС генераторів від швидкості вітру та частоти обертання  $E = f(V, n)$ .

Зробіть висновки.

**Контрольні запитання**

1. Поясніть будову і принцип дії синхронного генератора.
2. Характеристики синхронних генераторів?
3. Різновиди синхронних генераторів?
4. Системи збудження синхронних генераторів. Їх недоліки та переваги.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 5

### Дослідження характеристик холостого ходу генератора постійного струму залежно від частоти обертання колеса вітротурбіни

**Мета роботи.** Визначити та порівняти характеристики холостого ходу вітроелектростанції із синхронним генератором залежно від швидкості вітру.

**Теоретичні пояснення.** Принцип дії генератора оснований на явищі електромагнітної індукції і полягає в тому, що, при обертанні в магнітному полі електропровідної рамки (обмотки), в її провідниках виникає змінна ЕРС, миттєве значення якої, при рівномірному обертанні з кутовою частотою обертання  $\omega$ , визначиться як:

$$e = B l v \sin \omega t,$$

де  $t$  – час, с.

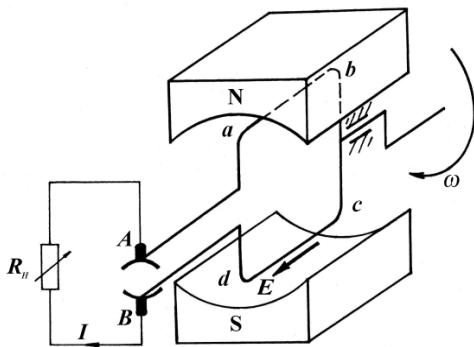


Рисунок 5.1 – Спрощена модель генератора постійного струму

Щоб мати генератор постійного струму, необхідно цю ЕРС випрямити, як випрямляч служить колектор. Розглянемо, як відбувається випрямлення змінної ЕРС на макеті (рис. 5.1), що складається з постійного магніту, між полюсами  $N$  і  $S$  якого розміщена електропровідна рамка  $abcd$ . Кінці рамки з'єднані з двома ізольованими півкільцями, до яких дотикаються дві нерухомі щітки  $A$  і  $B$ . Рамка  $abcd$  завдяки

підшипнику має можливість обертатися разом з півкільцями. ЕРС, що створюється при обертанні рамки, викликає струм в колі рамка-щітка  $B - R_n -$  щітка  $A$ . Напрямок і величина ЕРС та струму в рамці  $abcd$ , визначаються положенням провідників рамки під полюсами і напрямом обертання. Однак, при обертанні, незалежно від положення провідників під полюсами, з щіткою  $A$  буде з'єднаний через «своє» півкільце провідник, що розташовується під полюсом  $N$ , а з щіткою  $B$  – провідник, що розташований під полюсом  $S$ . Струм

зовнішнього кола в даному макеті направлений від щітки *B* (її називають *позитивною*) до щітки *A* (*негативної*). Зміна струму на опорі навантаження буде лише за величиною, але не за напрямом, тобто, він буде пульсувати від нуля до максимуму. Отже, в генераторі постійного струму колектор разом із щітками відіграють роль *механічного випрямляча* змінного струму, що виникає в обмотці якоря, в постійний у зовнішньому колі машини.

### Хід роботи

1. Здійснюємо монтаж вітротурбіни необхідної конструкції (необхідна форма та кількість лопатей).

2. За допомогою регулятора Р вмикаємо нагнітач повітря НП на повну потужність.

3. За допомогою анемометра та лазерного тахометра вимірюємо швидкість вітру та частоту обертання вітротурбіни відповідно.

4. За допомогою мультиметрів вимірюємо величину ЕРС на затисках генератора.

Показники замірів заносимо в таблицю 5.1 відповідно цих показників будуються залежності наведеної ЕРС генераторів від швидкості вітру та частоти обертання  $E = f(V, n)$ .

Таблиця 5.1 – Дані для побудови характеристики холостого ходу

Кількість лопатей	Номер заміру						
1	2						
2	<i>V м/с</i>						
	<i>n, об/хв</i>						
	<i>E, В</i>						
3	<i>V м/с</i>						
	<i>n, об/хв</i>						
	<i>E, В</i>						

Продовження таблиці 5.1

1	2						
4	$V, \text{ м/с}$						
	$n, \text{ об/хв}$						
	$E, \text{ В}$						
6	$V, \text{ м/с}$						
	$n, \text{ об/хв}$						
	$E, \text{ В}$						

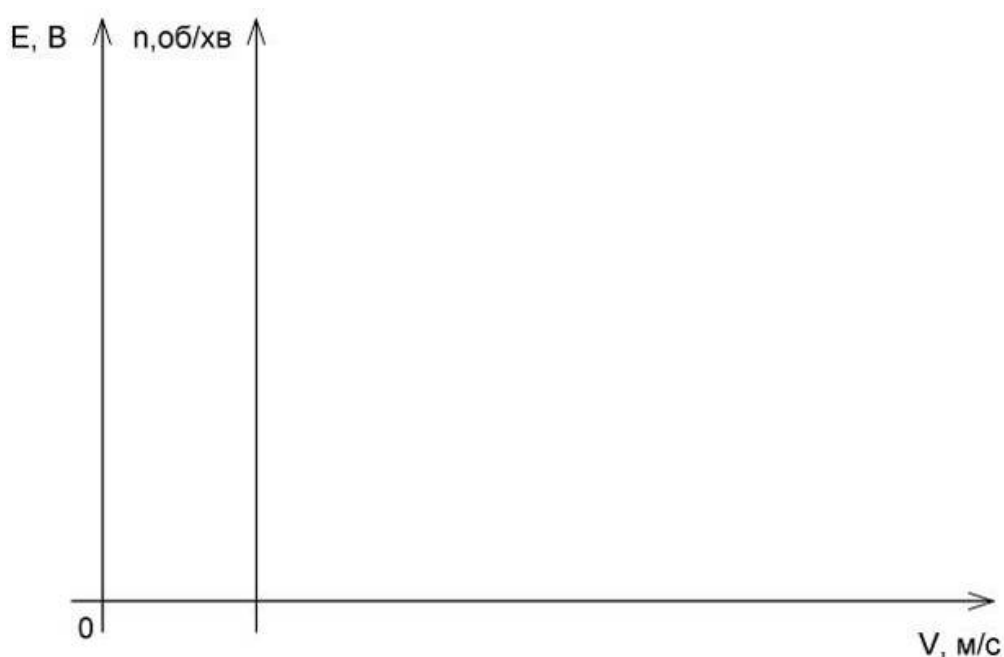


Рисунок 5.1 – Залежність наведеної ЕРС генераторів від швидкості вітру та частоти обертання  $E = f(V, n)$ .

Зробіть висновки.

### Контрольні запитання

1. Поясніть будову і принцип дії генератора постійного струму.
2. Які характеристики генераторів постійного струму для режиму холостого ходу?
3. Назвіть різновиди генераторів постійного струму.
4. Які системи збудження генераторів постійного струму. Їх недоліки та переваги.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 6

### Дослідження робочих характеристик вітрогенераторів, що працюють у режимах змінного навантаження

**Мета роботи.** Визначити та порівняти характеристики роботи генераторів вітроелектростанції (синхронного генератора та генератора постійного струму) при роботі під навантаженням.

**Теоретичні пояснення.** Для синхронного генератора величина наведеної в обмотці статора ЕРС кількісно пов'язана з числом витків обмотки і швидкості зміни магнітного потоку:

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt}$$

Переходячи до діючих значень, вираз ЕРС можна записати у вигляді:

$$E = c \cdot n \cdot \Phi,$$

де  $n$  – частота обертання ротора генератора,

$\Phi$  – магнітний потік,

$c$  – постійний коефіцієнт.

При підключенні навантаження напруга на затискачах генератора в різному ступені змінюється. Так, збільшення активного навантаження не робить помітного впливу на напругу. У той же час індуктивна і місткість навантаження впливають на вихідний на-напруга генератора. У першому випадку зростання навантаження розмагнічування генератор і знижує напругу, у другому відбувається його підмагнічування і підвищення напруги. Таке явище називається реакцією якоря.

Для забезпечення стабільності вихідної напруги генератора необхідно регулювати магнітний потік. При його ослабленні машину треба підмагнітитися, при збільшенні – розмагнітити. Робиться це шляхом регулювання струму, що подається в обмотку збудження ротора генератора.

Зовнішня характеристика генератора постійного струму уявляє залежність  $U = f(I)$  при  $n = \text{const}$  та  $R_z = \text{const}$ . Дані для її побудови знімають таким чином. Генератор навантажують до номінального струму при номінальній напрузі, потім зменшують навантаження і записують показання приладів, за отриманими даними будують криву (рис. 6.1, б). Зменшення напруги при зростанні навантаження пояснюється падінням напруги в колі якоря та розмагнічувальною дією реакції якоря. Нахил характеристики до вісі абсцис (жорсткість зовнішньої характеристики) оцінюється номінальною зміною  $\Delta U_{\text{ном}}$ :

$$\Delta U_{\text{ном}} = \frac{U_0 - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100 [\%] .$$

Як правило, для генераторів незалежного збудження  $\Delta U_{\text{ном}} = 5 \div 10 \%$ .

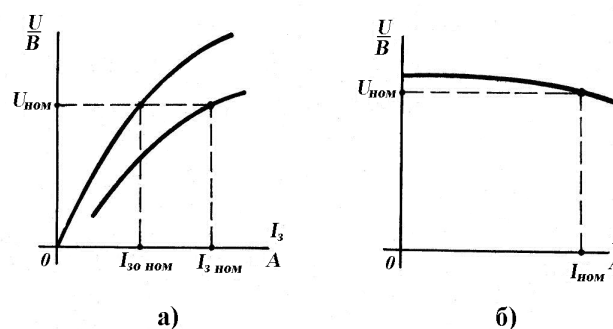


Рисунок 6.1 – Навантажувальна (а) та зовнішня (б) характеристики генератора незалежного збудження

### Хід роботи

1. Здійснюємо монтаж вітротурбіни необхідної конструкції (необхідна форма та кількість лопатей).
2. За допомогою регулятора Р вмикаємо нагнітач повітря НП на повну потужність.
3. За допомогою анемометра та лазерного тахометра вимірюємо швидкість вітру та частоту обертання вітротурбіни відповідно.

4. За допомогою мультиметрів вимірюємо величину ЕРС на затисках генераторів в режимі холостого ходу

5. На контактних затисках змінюємо реостатом значення навантаження.

6. Змінюючи навантаження за допомогою мультиметрів визначаємо показники споживаного струму навантаження та напруги живлення на затисках генераторів

Показники замірів заносимо в таблицю 6.1 відповідно цих показників будуються залежності напруги на затисках генераторів  $U_2$  від струму навантаження  $I_n$ , мА при постійній швидкості вітру.

Таблиця 6.1 – Показники замірів

Кількість лопатей	Синхронний генератор						
1	2						
2	$V$ м/с						
	$n$ , об/хв						
	$U_2$ , В						
	$I_n$ , мА						
3	$V$ м/с						
	$n$ , об/хв						
	$U_2$ , В						
	$I_n$ , мА						
6	$V$ м/с						
	$n$ , об/хв						
	$U_2$ , В						
	$I_n$ , мА						



Продовження таблиці 6.1

Кількість лопатей	Генератор постійного струму						
	2	$V$ , м/с					
$n$ , об/хв							
$U_2$ , В							
$I_n$ , мА							
3	$V$ , м/с						
	$n$ , об/хв						
	$U_2$ , В						
	$I_n$ , мА						
6	$V$ , м/с						
	$n$ , об/хв						
	$U_2$ , В						
	$I_n$ , мА						

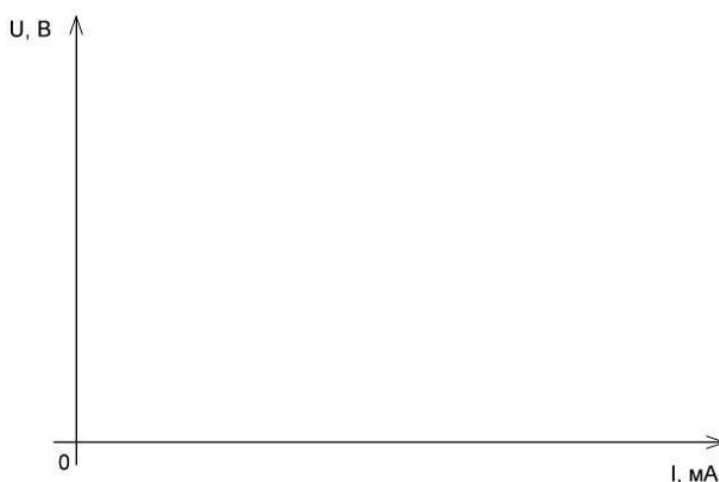


Рисунок 6.2 – Залежність напруги на затискачах генераторів  $U_2$  від струму навантаження  $I_n$ , мА при постійній швидкості вітру.

Зробіть висновки.

### Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії й пристрій генератора постійного струму.
2. Що таке номінальна потужність генератора?
3. Зрівняйте між собою різні схеми порушення генератора постійного струму.
4. Поясніть процес самозбудження генератора постійного струму.

*Виробничо-практичне видання*

Лабораторний практикум

із навчальної дисципліни

## **«ВІТРОЕНЕРГЕТИКА»**

*(для студентів усіх форм навчання освітнього рівня «бакалавр»  
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,  
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Укладачі : ГЛЄБОВА Марина Леонідівна,  
ЄГОРОВ Олексій Борисович

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2020, поз. 207 М.

---

Підп. до друку 26.11.2020. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 2,0.

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.