

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Інститут електроенергетики

(інститут)

Електротехнічний факультет

(факультет)

Кафедра Відновлюваних джерел енергії
(повна назва)

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеню магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Борщ Іван Олегович
(ПІБ)

академічної групи 141М-17-3
(шифр)

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

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії
(офіційна назва)

на тему Дослідження ефективності вертикального вітрогенератора барабанного типу
(назва за наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Ципленков Д.В.			
розділів:				
Розділ 1	Ципленков Д.В.			
Розділ 2	Ципленков Д.В.			
Розділ 3	Ципленков Д.В.			
Рецензент				
Нормоконтролер	Ципленков Д.В.			

Дніпро
2018

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
Відновлюваних джерел енергії
(повна назва)

_____ Шкрабець Ф.П.
(підпис) (прізвище, ініціали)

" _____ " _____ 2018 року

**ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу**

кваліфікаційної роботи ступеню магістра
(бакалавра, спеціаліста, магістра)

студента Борщ І.О. академічної групи 141М-17-3
(прізвище та ініціали) (шифр)

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

спеціалізації _____

за освітньо-професійною програмою Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії
(офіційна назва)

на тему Дослідження ефективності вертикального вітрогенератора барабанного типу
(назва за наказом ректора)

затверджену наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 12.11.18 № 1913-л

Розділ	Зміст	Термін виконання

Завдання видано _____ Ципленков Д.В.
(підпис керівника) (прізвище, ініціали)

Дата видачі **10.10.2018**

Дата подання до екзаменаційної комісії **25.12.18**

Прийнято до виконання _____ Борщ І.О.
(підпис студента) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка магістерської дисертації складається з: 61 сторінки, 33 рисунків, 12 таблиць, 15 літературних джерел.

Тема дисертації: дослідження ефективності вертикального вітрогенератора барабанного типу.

У першому розділі розглянута класифікація та способи реалізації вертикально-осьових ВЕУ. Описані основні їх види, а також вказані параметри за якими визначають ефективність того чи іншого типу ротора. Наведені деякі енергетичні характеристики.

У другому розділі досліджено аеродинамічні характеристики ротора Савоніуса барабанного типу. Розраховано основні величини та встановлено як вони залежать від зміни геометричних розмірів ротора. Розроблена конструкція вітрогенератора.

У техніко-економічному обґрунтуванні розраховані витрати, пов'язані з виготовленням вітроустановки.

Ключові слова: ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВА ВІТРОУСТАНОВКА, РОТОР ДАР'Є, РОТОР САВОНІУСА, ЛОПАТЬ, ВІДНОСНИЙ ОБЕРТОВИЙ МОМЕНТ, КОЕФІЦІЄНТ ОПОРУ

ABSTRACT

The explanatory note of the Master's dissertation consists of: 54 pages, 33 figures, 12 tables, 15 literary sources.

The topic of the dissertation: the study of the effectiveness of the vertical wind turbine drum type.

In the first section, the classification and methods for the implementation of vertically-axial wind turbines are considered. The basic types of them are described, and also the specified parameters on which determine the efficiency of one or another type of rotor. Some energy characteristics are given.

The second section explores the aerodynamic characteristics of the rotor Savonius drum type. The basic values are calculated and determined as they depend on the change in the geometric dimensions of the rotor. The design of wind turbine generator is developed.

In the feasibility study, the costs associated with the manufacture of wind turbines are calculated.

Key words: VERTICAL-WHEEL VITROUSTANOVKA, ROTOR DAREH, ROTOR SAVONIUS, LOPATH, RELATIVE SURVIVAL MOMENT, COEFFICIENT OF SUPPRESSION

ЗМІСТ

Список скорочень	6
Вступ	7
Розділ 1. Огляд існуючих типів вертикально-осьових вітроенергетичних установок	9
1.1 Ретроспектива вертикально-осьових вітроенергетичних установок	9
1.2 Особливості вертикально-осьових вітроенергетичних установок	13
1.2.1 Ротори Дар'є	13
1.2.2 Ротори Савоніуса	19
1.2.3 Енергетичні характеристики	24
1.3 Висновки за першим розділом	26
Розділ 2. Розрахунок вітрогенератора	27
2.1 Аеродинамічні параметри ротора Савоніуса	28
2.2 Оцінка енергетичної ефективності використання ротора Савоніуса	29
2.3 Висновки за другим розділом	49
Розділ 3. Техніко-економічне обґрунтування	51
3.1 Вступ	51
3.2 Розрахунок витрат, пов'язаних з виготовленням установки	53
3.3 Висновки за третім розділом	57
Висновки	58
Перелік посилань	59
Додаток А	61

Список скорочень

ВЕУ – вітроелектрична установка

ВЕС – вітроелектрична станція

ЦАГІ – Центральний аерогідродинамічний інститут ім. професора
Н.С. Жуковського

ККД – коефіцієнт корисної дії

АГТУ – Астраханський державний технічний університет

ВСТУП

Вітроенергетика – це ключова галузь альтернативної енергетики. Енергію вітру люди використовують вже протягом багатьох століть. Вітряки використовувалися ще до нашої ери, з їх допомогою молотили зерно. Такі млини широко використовувалися в ісламському світі того часу, а вже потім були хрестоносцями завезені в Європу. Вітряки використовувалися не тільки для розмелювання зерна, але за допомогою їх відкачували воду і організували зрошення ґрунту. Перші вітряні млини, які виробляли електроенергію, з'явилися в 19 столітті, а в 1890 р. була побудована перша вітроелектростанція. Але вже в середині 20 століття вітроенергетика переживає занепад. Інтерес до неї виник після нафтової кризи 1973 р. Цей період можна сміливо вважати початком відродження вітроенергетики.

Вітер є екологічно чистим джерелом енергії, який має величезний потенціал, здатний задовольнити потребу в енергії, а також пом'якшити наслідки зміни клімату від викидів парникових газів, що виробляються при спалюванні викопного палива. Встановлено, що вітер дозволяє отримати приблизно 10 мільйонів МВт енергії. Для перетворення енергії вітру в механічну енергію, а так само вироблення електроенергії використовуються вітряні турбіни.

На сьогоднішній день вітроенергетика по потужності річного електроенергетичного приросту вийшла на перше місце, обігнавши природний газ і сонячну енергетику.

За типом конструкції вітрові установки бувають вертикальні і горизонтальні. У сучасній вітроенергетиці в основному використовуються горизонтальні вітрогенератори. Вони в свою чергу діляться на однолопатеві, дволопатеві, трилопатеві і багатолопатеві. Саме найбільшого поширення набули трилопатеві вітрогенератори, і їх номінальна потужність досягає 7 МВт. Сучасні роторні вітрові установки оснащені новітніми гальмівними

механізмами, і вони можуть легко переносити шквальний вітер, не виходячи з ладу.

Але є ще ряд недоліків, які гальмують розвиток і поширення вітрової енергетики. До них можна віднести високу вартість вітрогенераторів. Одним з головних чинників який істотно впливає на продуктивність вироблення електроенергії – це сила вітру. На жаль людина, не може ніяк на неї впливати. Шум вітрових електростанцій, теж один із головних негативних чинників. Розробникам на сьогоднішній день вдалося добре впоратися з механічним шумом, який створювався при роботі механізмів, а ось аеродинамічний шум, який виникає при взаємодії вітру з лопаттю, поки так і залишився. Не менш важливим недоліком є обмерзання лопатей в холодну пору року або при використанні вітрових установок в місцевості, де обмерзання відбувається часто. Обледеніння лопатей небезпечно тим, що при запуску вітрогенератора відбувається розліт крижин в радіусі 60 м. Тому при таких погодних умовах обов'язково встановлюються попереджувальні знаки, що б запобігти травматизму.

Однак в тих районах де швидкість вітру не дуже висока, набули поширення вертикальні вітрогенератори, через те, що використання їх в таких умовах більш продуктивно. І через відсутність більшості проблем горизонтальних вітрогенераторів, вертикально-осьові можуть встановлюватися в населених пунктах.

Однак виходячи з того що прогрес не стоїть на місці і деякі проблеми поступово вирішуються, вітроенергетика буде стрімко розвиватися. Вона особливо актуальна, де немає централізованого енергопостачання. Особливо ефективно використання вітроенергетики в комплексі з іншими видами альтернативної енергетики.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ТИПІВ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

1.1 Ретроспектива вертикально-осьових вітроенергетичних установок

На початку 21 століття суспільство гостро зіткнулося з проблемою обмеженості викопних енергоресурсів. Сьогодні відбувається заміна технічних інструментів традиційної енергетики, які згубно впливають на навколишнє середовище, на поновлювані екологічно чисті джерела енергії, в тому числі вітрові. Незважаючи на те, що гілка першості сьогодні належить горизонтально-осьовим вітрогенераторам (більше 90% ринку), популярність вертикально-осьових вітрогенераторів стрімко зростає. Це пояснюється, в тому числі тим, що вчені теоретично і експериментально довели, що вертикальні ВЕУ в змозі наздогнати по ефективності горизонтальні.

Відставання в освоєнні вертикально-осьових ВЕУ викликано декількома причинами. Вертикально-осьові ВЕУ були винайдені пізніше горизонтально-осьових пропелерних (ротор Савоніуса - в 1929 р, ротор Дарині - в 1931 р, ротор Масгроува - в 1975 г.). Крім цього, до недавнього часу головним недоліком вертикально-осьових ВЕУ помилково вважалося те, що для них неможливо отримати відношення максимальної лінійної швидкості робочих органів (лопатеї) до швидкості вітру більше одиниці (для горизонтально-осьових пропелерних ВЕУ цей показник сягає понад 5:1).

Ця передумова, вірна лише для тихохідних роторів типу ротора Савоніуса, що використовують різні опори лопатеї при їх русі по вітру і проти вітру, привела до неправильних теоретичних висновків про те, що граничний коефіцієнт використання енергії вітру у вертикально-осьових ВЕУ нижче, ніж у горизонтально-осьових пропелерних, через що цей тип

ВЕУ майже 40 років взагалі не розроблявся. І тільки в 60-х - 70-х роках спочатку канадськими, а потім американськими та англійськими фахівцями було експериментально доведено, що ці висновки не стосуються роторів Дар'є, що використовують підйомну силу лопатей. Для цих роторів вказане максимальне відношення лінійної швидкості робочих органів до швидкості вітру досягає 6:1 і вище, а коефіцієнт використання енергії вітру не нижче, ніж у горизонтально-осьових пропелерних ВЕУ.

Вертикально-осьові ВЕУ почали інтенсивно освоювати з початку 80-х років, причому діапазон їх потужностей безперервно розширюється. Сьогодні практично всі країни експлуатують вертикально-осьові ВЕУ з ротором Дар'є, причому в Канаді, США, Нідерландах перевага віддається класичною схемою з криволінійними лопатями, а в Великобританії та Румунії в якості основної схеми прийняті ротори з прямими лопатями, паралельними осі обертання. Найбільших успіхів добилася фірма VAWT (Великобританія). З 1986 р на о-ві Сардинія була випробувана ВЕУ цієї фірми з ротором діаметром 14 м і потужністю 40 кВт. У тому ж році була введена в промислову експлуатацію ВЕУ VAWT-450 з ротором діаметром 25 м потужністю 130 кВт. У 1990 році була побудована установка VAWT-850 потужністю 500 кВт. Фірма приступила до розробки більшої установки VAWT -2400 з ротором діаметром 67 м потужністю 1.7 МВт.

В кінці 1980-х років в Україні виникла нова галузь науки і техніки - вітроенергетика. З самого початку розвиток вітроенергетики пішло по двох напрямках. Перший напрямок, що полягає в розробці і виробництві вітчизняних вітроустановок, було для України, яка має високим науковим, технічним та виробничим потенціалом, природним шляхом розвитку нової техніки. Основним принципом другого напрямку було виготовлення на українських підприємствах зарубіжних ліцензійних вітроустановок. У 1993 році в Україні були побудовані перші вітрові електростанції з горизонтально-осьовими вітроустановками: Актаська ВЕС на базі вітчизняних вітроустановок КБ «Південне» АВЕ-250 потужністю 200 кВт і

Донузлавська ВЕС на базі ліцензійних вітроустановок USW 56-100 американської фірми «Kenetech Windpower» потужністю 100 кВт, виробництва ПО «Південний машинобудівний завод» [1]. Після введення в 2009 році «зеленого тарифу» в країні почався новий етап розвитку вітроенергетики. У 2011 році в Україні були реалізовані перші приватні проекти промислових вітрових електростанцій, в основному, на базі німецьких горизонтально-осьових вітроустановок «Fuhrlander» потужністю 2,5 МВт.

У 1994 році вертикально-осьової вітроенергетичної тематикою почало займатися підприємство «Енергетичні системи та обладнання» (ЕСО), м. Дніпропетровськ, основним напрямком діяльності якого були розробка, виготовлення, будівництво і експлуатація вітроустановок для різних споживачів: від дрібних фермерських господарств та житлових будинків до великих промислових вітроелектростанцій. Стартовим проектом була обрана автономна вітроелектрична установки з Н-ротором Дар'є потужністю 20 кВт «ЕСО-0020» з відносно невеликим терміном розробки і низькою вартістю[2]. Для розробки і виготовлення обладнання вітроустановки були залучені спеціалізовані організації та підприємства України. У 1995 році дослідно-промисловий зразок вітроустановки пройшов сертифікаційні випробування в ЦАГІ. Проведені випробування показали, що динамічні характеристики та характеристики міцності конструкції забезпечують надійну працездатність вітроустановки в робочому діапазоні вітрів і достатню міцність при буревіях, енергетичні характеристики вітроустановки на 10-14% вище розрахункових, коефіцієнт потужності вітроустановки у всьому робочому діапазоні вітрів складає 0,4-0,43, ресурс вітрової турбіни дорівнює 18,9 років, а ресурс опорної конструкції - 23 роки, коефіцієнт встановленої потужності для районів із середнім вітровим потенціалом складає не менше 0,28 [3]. Вітроустановки «ЕСО-0020» були побудовані в Росії і Україні для електропостачання промислових і побутових споживачів.

З 2004 року роботи по вертикально-осьовим вітроустановкам з Н-ротором Дар'є з широким діапазоном потужностей проводяться Інститутом транспортних систем і технологій НАН України «Трансмаг», м. Дніпропетровськ в рамках проекту Міжнародної науково-промислової корпорації «ВЕСТА» «Розроблення і виробництво новітніх автономних інтегрованих систем електропостачання з використанням сонячних електричних систем, вітроенергоустановок та енергонакопичувачів», прийнятого Постановою Кабінету Міністрів України від 27 серпня 2002 року №1244. Фахівці інституту «Трансмаг» займаються дослідженнями питань аеродинаміки, міцності, динаміки, управління і розробкою методик розрахунків характеристик і проектування вертикально-осьових вітроустановок з Н-ротором Дар'є. Окремим напрямком діяльності інституту «Трансмаг» є теоретичні та експериментальні дослідження і розробка вертикально-осьових вітроустановок з ротором на магнітному підвісі. Вітроустановка малої потужності з ротором Савоніуса на магнітному підвісі відрізняється конструктивною простотою і підвищеними характеристиками за рахунок застосування принципу магнітної левітації ротора. Вітроустановка «WESTA-20» потужністю 20 кВт є більш ефективною модифікацією моделі «ЕСО-0020» за рахунок принципово нової системи генерування електроенергії і конструктивного виконання ротора. Нова вітроустановка «WESTA-30» потужністю 30 кВт розроблена з урахуванням недоліків моделі «ЕСО-0020», виявлених при більш ніж 10-річній її експлуатації в різних умовах, що дозволило в 1,5 рази зменшити вартість 1 кВт встановленої потужності. Вітроустановка мегаватного класу розробляється із застосуванням нових технічних рішень, що дозволяють в повній мірі реалізувати переваги схеми Н-ротора Дар'є. Окремим напрямком робіт інституту є дослідження в області створення на базі автономного вертикально-осьового вітроагрегату «WESTA-20» спеціалізованих промислових установок для опріснення води, збору і переробки водоростей річок і озер, плаваючої автономної вітро-сонячної системи електропостачання.

1.2 Особливості вертикально-осьових вітроенергетичних установок

В сучасних вітряних електроустановках енергія вітру перетворюється в 2 етапи:

1. Кінетична енергія вітру перетворюється в механічну.
2. Механічна енергія перетворюється в електричну.

Щоб енергія вітру перетворювалася в механічну використовують аеромеханічні пристрої або вітродвигуни. За кордоном їх називають вітряними турбінами.

Вітряний двигун бере у рухаючогося з певною швидкістю повітряного потоку частину його кінетичної енергії. Величина кінетичної енергії залежить від принципу роботи установки, габаритів рухомої частини і режиму роботи.

Вертикально-осьові вітроенергетичні установки підрозділяються на два класи: ротори Дар'є і ротори Савоніуса.

1.2.1 Ротори Дар'є

Ротор Дар'є використовує феномен підйомної сили крила, яке має відповідний аеродинамічний профіль і знаходиться в рухомому потоці повітря. Простіше кажучи - це вітродвигуни підйомної сили (рис.1.1).

Вітряний двигун підйомної сили має пульсуючий обертаючий момент і для запуску при деякому значенні швидкохідності в режимі авторотації найчастіше вимагає розкручування зовнішнім двигуном. Збільшення кількості лопатей до 3-х і їх закрутки навколо осі ротора (гелікоїдний ротор) збільшує C_p фактор від 0,3 до 0,4. Обертаючий момент стає постійним незалежно від положення лопатей щодо напрямку вітру, досить регулярно спостерігається самозапуск на холостому ході при швидкостях вітру 3 метри за секунду і вище. Оптимальний режим роботи даних вітряних двигунів (максимальне значення C_p) досягається при кількості лопатей від 3 до 5

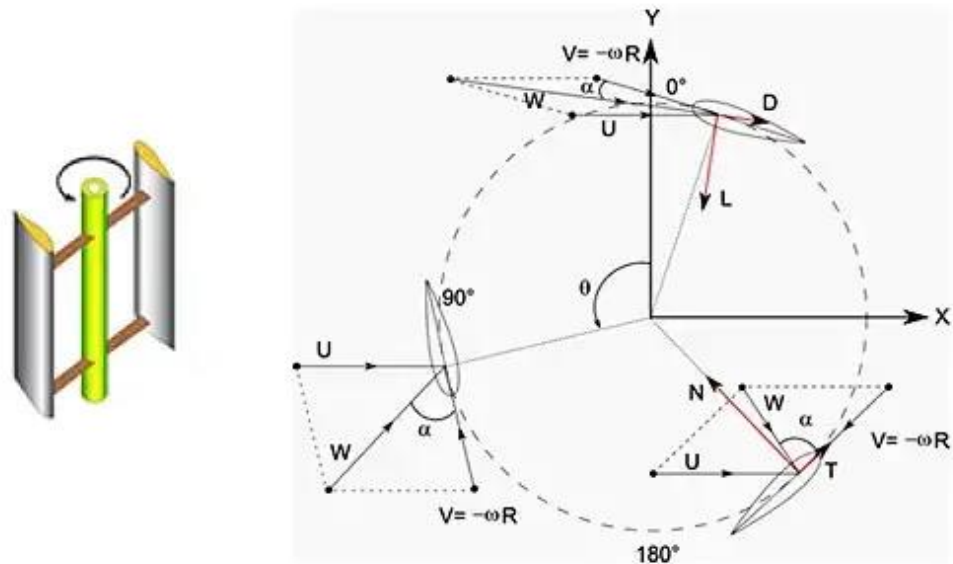


Рис. 1.1. U – швидкість вітру; V – тангенціальна швидкість руху лопаті;
 W – сумарна («уявна») швидкість повітряного потоку, що взаємодіє з лопаттю; α – кут атаки; T – сила, яка створює обертаючий момент;
 N – сила, прикладена до траверси, що з'єднує лопать з валом установки;
 L – підйомна сила лопаті; D – сила лобового опору лопаті

одиниць. Збільшення кількості лопатей ротора більше 5, як правило, знижує швидкохідність і зменшує C_p [5].

Основні параметри, які впливають на ефективність роботи та характеризують турбіну:

- кількість лопатей ротора
- відносна товщина лопатей
- кут встановлення лопатей
- омітаєма площа ротора
- коефіцієнт заповнення
- швидкохідність
- подовження ротора

Кількість N лопатей ротора. Збільшення кількості лопатей повинно призвести до збільшення рівномірності обертаючого моменту, але через взаємний вплив знижується ефективність кожної лопаті[4].

Відносна товщина лопатей. Для створення великої підйомної сили застосовуються профілі з більшою відносною товщиною від 12 до 25%. Зазвичай, тонкі лопаті добре працюють за великої швидкості (більше 5), а товсті – за малої (менше 4).

Кут установки лопатей. Оскільки кутові швидкості лопатей достатньо великі, то кут встановлення нульовий і рідко перевищує 4° .

Омітаєма площа ротора – це добуток діаметра ротора на його висоту H :

$$A_S = 2RH, \quad (1.1)$$

де R – радіус ротора, H – висота ротора.

Коефіцієнт заповнення – це відношення сумарної хорди лопатей до діаметру ротора:

$$\sigma = \frac{Nc}{2R}, \quad (1.2)$$

де c – хорда лопаті.

Швидкохідність – це відношення обертальної швидкості лопаті до швидкості U набігаючого потоку:

$$\lambda = \frac{\omega R}{U}, \quad (1.3)$$

де ω – кутова швидкість обертання ротора.

Зазвичай швидкохідність змінюється в широких межах: 2 ... 8.

Подовження ротора – це відношення висоти турбіни H до її діаметра:

$$AR = \frac{H}{2R}, \quad (1.4)$$

Зі збільшенням подовження коефіцієнт корисної дії (ККД) ротора дещо зростає.

Розглянемо основні різновиди ротора Дар'є:

- Н-ротор;
- ротори з лопатями вигнутими по окружності;
- ротори з гвинтоподібними лопатями (гелікоїдний ротор).

Н-ротор Дар'є (рис. 1.2), це ротор з прямими лопатями, паралельними осі обертання. Обертаний момент створюється підйомною силою вертикально розташованих лопатей з аеродинамічним профілем.

Вітродвигун з таким конструктивним рішенням має непостійний, пульсуючий обертаний момент. Внаслідок чого, для запуску при деякому значенні швидкості в режим авторотації найчастіше вимагає розкручування зовнішнім двигуном, або генератором, який може працювати в режимі двигуна. Такі ротори найпростіші в виготовленні, але через значні експлуатаційні навантаження (згинаючі моменти від відцентрових сил), термін служби може виявитися менше[4].

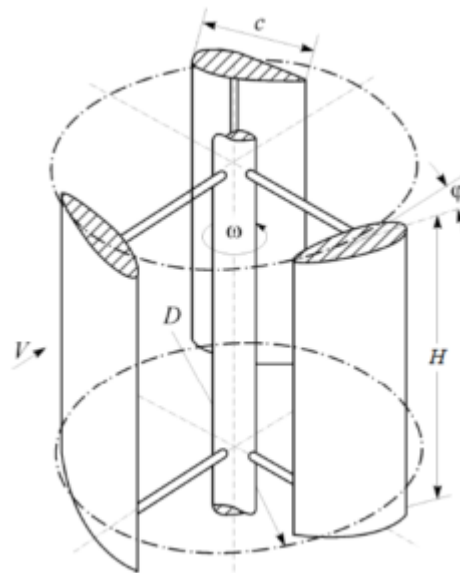


Рис. 1.2 – Н-ротор

Одним з різновиду Н-ротора Дар'є є ротор Масгрова (рис. 1.3). Винайдений англійським доктором Масгров з Рідінгського університету в

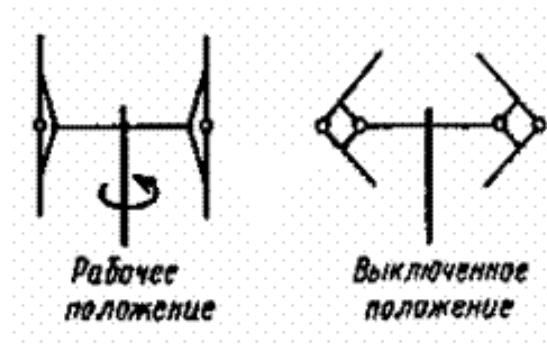


Рис. 1.3 – Ротор Масгрона

1975 році. Головною його відмінністю є лопаті, що складаються навколо горизонтальної осі. Обертювий момент створюється також підйомною силою. Дві лопаті ротора, що мають аеродинамічний профіль, в початковий стартовий момент розташовані вертикально.

По мірі зростання швидкості вітру лопаті складаються, що зменшує підйомну силу, а отже, і момент обертання, за рахунок зменшення омітаємої площі.

Є кілька варіацій даного виконання, але всі вони при сильному вітрі складаються (відключаються), так як конструкція з двома лопатями дуже сильно вібує при великій швидкості, що може призводити до швидкого виходу з ладу підшипників. При максимальній розрахунковій швидкості вітру вітроколесо зупиняється при повному складанні лопатей [6].

Зазвичай форма лопаті в роторах Дар'є з лопатями вигнутими по колу вибирається параболічної або так званої «ланцюгової лінії» (рис. 1.4).

У цьому випадку на лопать діють тільки розтягуючі зусилля і з точки зору забезпечення міцності ротор матиме найменшу вагу. Однак, прилеглі до осі обертання верхня і нижня ділянки лопаті, практично не працюють, оскільки тут малі кути атаки, радіуси і колові швидкості.

Ротор Дар'є з гвинтоподібними лопатями (гелікоїдний ротор або ротор Горлова). Винайдена професором Північно-Східного Університету Бостона (США) Олександром Горловим в 2001 році. Турбіну з невеликими відмінностями повторюють турбіни вітряних електроустановок "Tvister",



Рис. 1.4 – Ротор Дар'є з лопатями вигнутими по колу

"Turby", "Quitrevolution" і ін. Дана конструкція вітродвигуна – різновид Н-ротора Дар'є. Він має лопаті, закручені навколо осі ротора. При цьому коефіцієнт використання енергії вітру збільшується, до 0,4. Обертовий момент стає постійним незалежно від положення лопатей щодо напрямку вітру, і досить регулярно спостерігається самозапуск на холостому ходу при швидкостях вітру 3 м/с і вище. Нижче, на рисунку 1.5, показаний гелікоїдний ротор.



Рис. 1.5 – Гелікоїдний ротор або ротор Горлова

Оптимальний режим роботи даних вітряних двигунів (максимальне значення C_p) досягається при кількості лопатей від 3 до 5 одиниць. Збільшення кількості лопатей ротора більше 5, як правило, призводить до зниження швидкості і зменшення коефіцієнту використання енергії вітру[4, 5, 7].

1.2.2 Ротори Савоніуса

Перші вітряні двигуни з вертикальною віссю обертання працювали, використовуючи принцип диференціального лобового опору (Рис. 1.6). Він полягає в тому, що тверде тіло асиметричної форми (приклад, півсфера) при різній орієнтації в потоці повітря (рідини), який має постійну швидкість V , взаємодіють з потоком з різними зусиллями $F_{лс1}$ і $F_{лс2}$, відповідно. Тиск вітру на півсферу, орієнтовану до нього прогином, більш ніж в 4 рази перевищує тиск на ту ж півсферу, орієнтовану до вітру опуклою частиною. При цьому площа перерізу тіл однакова. Якщо півсфери закріплені на траверсі з 2-х сторін симетрично щодо осі обертання, то при взаємодії з рухомою повітряною масою з'являється обертовий момент, і пристрій буде обертатися з певною частотою ω .

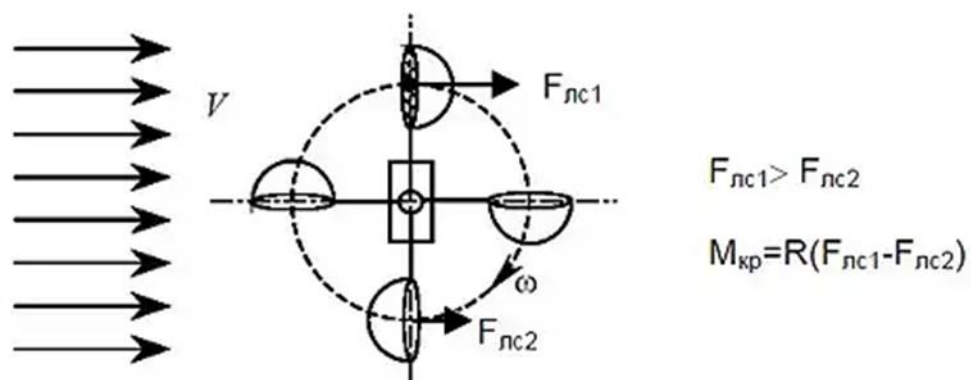


Рис. 1.6. Принцип роботи вітряного двигуна «диференціального лобового опору»

Серед вітряних двигунів, що діють за принципом диференціального лобового опору, найбільш відомі ротор Савоніуса (рис.1.7). і його модифікація – ротор Віндсайт (рис. 1.8).

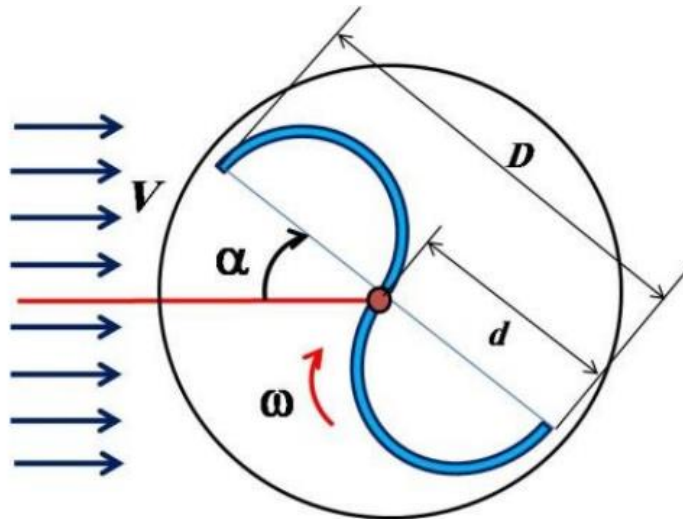


Рис. 1.7. Ротор Савоніуса.



Рис. 1.8. Ротор Віндсайт

Принцип роботи *ротора Савоніуса* базується на диференціальному (неоднаковому) лобовому опорі твердого тіла асиметричної форми, при його різній орієнтації щодо напрямку вітру. Це вітродвигуни диференціального лобового опору.

Величина обертового моменту залежить від різниці зусиль, що впливають на тіла, розташовані по різні боки від осі обертання, а ці зусилля визначаються швидкістю вітру, розмірами тіл (площею лобового розтину) і коефіцієнтом лобового опору.

Машини просто влаштовані, працюють навіть в умовах дуже низьких швидкостей вітру, але володіють невисоким C_p . Максимальне значення C_p фактора для ротора Савоніуса, наведене в джерелах, дорівнює 0,25. Номінальна бистрохідність цих турбін, як правило, менше одиниці, і у них відносно високий пусковий момент. Ротори створюють значний крутний момент завдяки великій площі лопатей. ККД таких роторів – близько 15% [6].

Ротори Савоніуса, модифіковані введенням проміжку між лопатями і перекриттям між ними (Рис. 1.9). Ці ротори мають більший ККД і обертовий момент. Можна досягти значень ККД до 0.22 шляхом підбору перекриття (e/d від 0.15 до 0.25) і проміжку ($a/d = 0.1$)[8],[9].

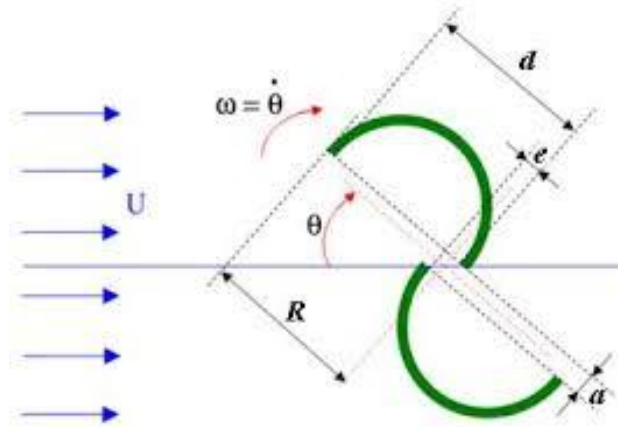


Рис. 1.9. Модифікований ротор Савоніуса

Модифікований ротор Савоніуса з профілем Бенеша (Benesh). Лопаті цього ротора мають профіль (рис. 1.10), який сильно нагадує вигнутий криловий профіль. Ротор с профілем Бенеша [10] – [12] дає деякий приріст обертового моменту і ККД.

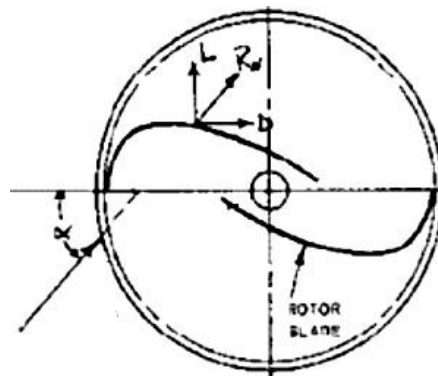


Рис. 1.10. Переріз ротора з профілем Бенеша

Вдосконалений ротор Савоніуса с профілем Баха (Bach). Профіль лопаття являє із себе пряму ділянку плавно перехідну у дугу кола (рис. 1.11). Параметричні дослідження [4] показують, при оптимальному виборі

параметрів p , q , s , a , ψ можливо отримати збільшення обертального моменту и ККД на 20–30 % в порівнянні з класичним ротором Савоніуса.

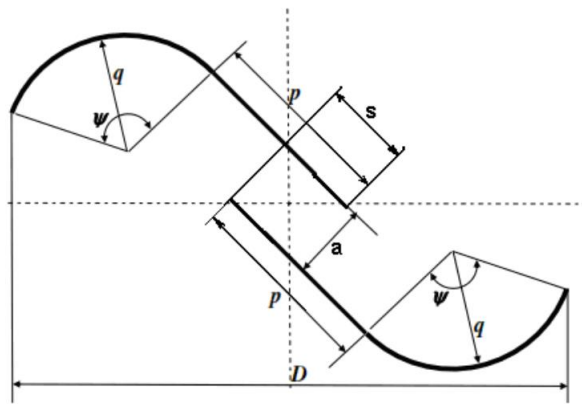


Рис. 1.11. Поперечний переріз лопатей ротора Савоніуса з профілем Баха

Варіант ротора Савоніуса з профілем Угрінського. Особливістю такого ротора (рис. 1.12) є то, що потік, проходячи через канал діє на лопаття два рази: при вході і на виході. Незважаючи на захоплюючі відгуки, вимагає ретельного вивчення для оцінки його ефективності[11].

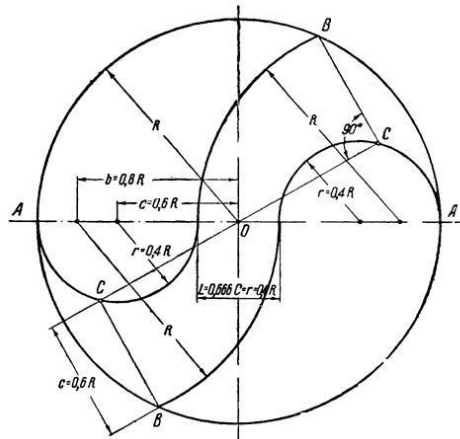


Рис. 1.12. Поперечний переріз ротора з профілем Угрінського

Поряд з двома розглянутими основними групами вертикально-осьових вітроподвигунів, що випускаються серійно, є установки, в яких поєднуються два описаних принципу дії (рис. 1.13).



Рис. 1.13. Конструкція вітродвигуна комбінованого типу

Ротор Савоніуса використовується для розкрутки ротора Дар'є до необхідної бистрохідності.

Також, перспективними вважаються вітродвигуни засновані на *ефекті Магнуса*.

Ефект Магнуса - фізичне явище, що виникає при обтіканні обертового тіла потоком рідини або газу. Утворюється сила, що впливає на тіло і спрямована перпендикулярно напрямку потоку. Це є результатом спільного впливу таких фізичних явищ, як ефект Бернуллі і виникнення граничного шару в середовищі навколо обтікаючого об'єкту[13].

За принципом приведення ротора в рух дана турбіна схожа з турбінами на основі підйомної сили крила. Графічно ефект Магнуса показаний нижче (рис. 1.14), де V - швидкість потоку повітря, F - сила, що виникає внаслідок ефекту Магнуса.

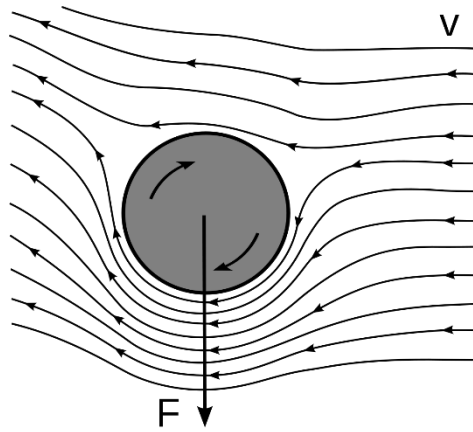


Рис. 1.14 - Графічна інтерпретація ефекту Магнуса

Обертання циліндрів забезпечується електродвигуном, який працює постійно. Але він споживає лише 1-2% від обсягу енергії, яку виробляє пристрій. Причому, в залежності від швидкості вітру можна змінювати швидкість обертання циліндра, тим самим контролюючи вітродвигун.

У подібних конструкцій кілька переваг: більший коефіцієнт використання енергії вітру (до 40%), ніж у інших конструкцій; контрольоване обертання як при дуже малих (1-2 м / с) швидкостях вітру, так і при високих (до 20 м / с); більш стабільна вироблення електроенергії, за рахунок регулювання швидкості обертання циліндрів.

Слід зазначити, що обертання турбін наведених конструкцій спостерігається при будь-якому напрямку вітру, і вони не потребують пристроях орієнтації і додаткових трансмісій, що знижують рівень надійності. Це одне з основних переваг установок даного типу при порівнянні з горизонтально-осьовими ВЕУ.

1.2.3 Енергетичні характеристики

Основні властивості вітряних двигунів повністю описує залежність $C_p = f(1)$. Її називають головною енергетичною характеристикою вітряного двигуна. На рис. 1.15 наведені основні енергетичні характеристики ряду поширених вітряних двигунів.

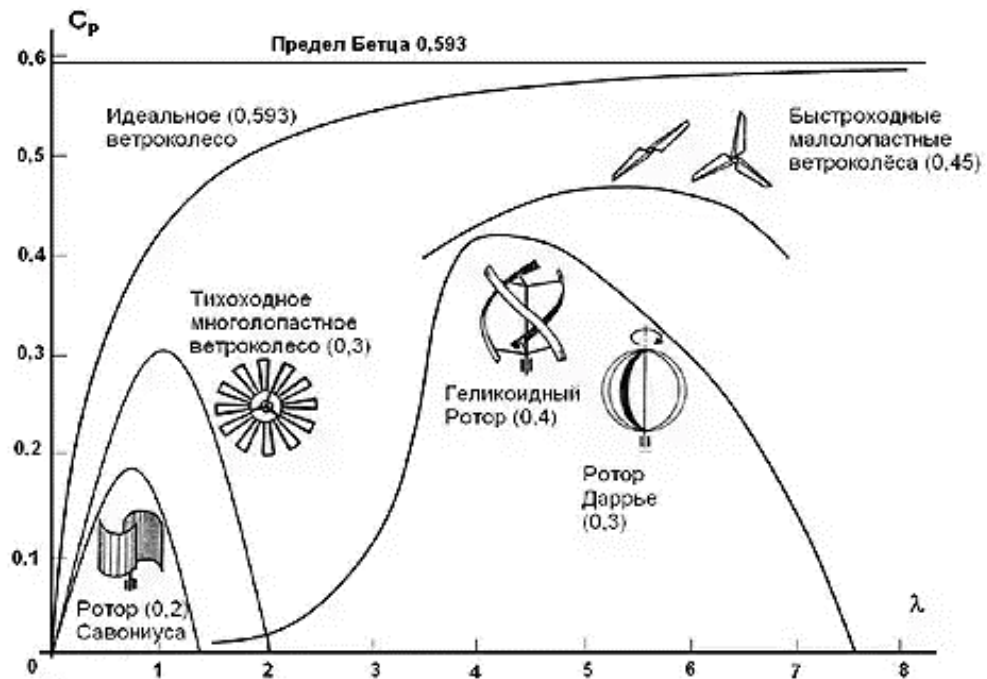


Рис. 1.15. Енергетичні характеристики вітряних двигунів

$C_{p_{\max}} = 0,593$, що було теоретично доведено російськими вченими (Сабінін та ін.) Ще в 1914 році, але за кордоном доказ було опубліковано в 1924 році німецьким фізиком Бетц, і тому величина 0,593 називається «межа Бетца» [14].

Рисунок 1.15 дуже добре показує, що вертикально-осьові вітряних турбін, які використовують підйомну силу крила, мають C_p за величиною, дуже близький до показника швидкохідних малоллопастних вітроколеса з горизонтальною віссю обертання. Ця обставина поряд з відносною простотою конструкції і відсутністю необхідності наведення на вітер, є причиною сучасного відродження інтересу до вертикальних вітряним двигунів.

Не менш важливою характеристикою вертикального вітродвигуна (і горизонтального), є крива потужності (рис. 1.16), що представляє собою залежність вихідної електричної потужності установки від швидкості вітру. Серйозні виробники вітрогенераторів обов'язково призводять таку криву в технічних характеристиках своєї продукції, так як говорити про потужність

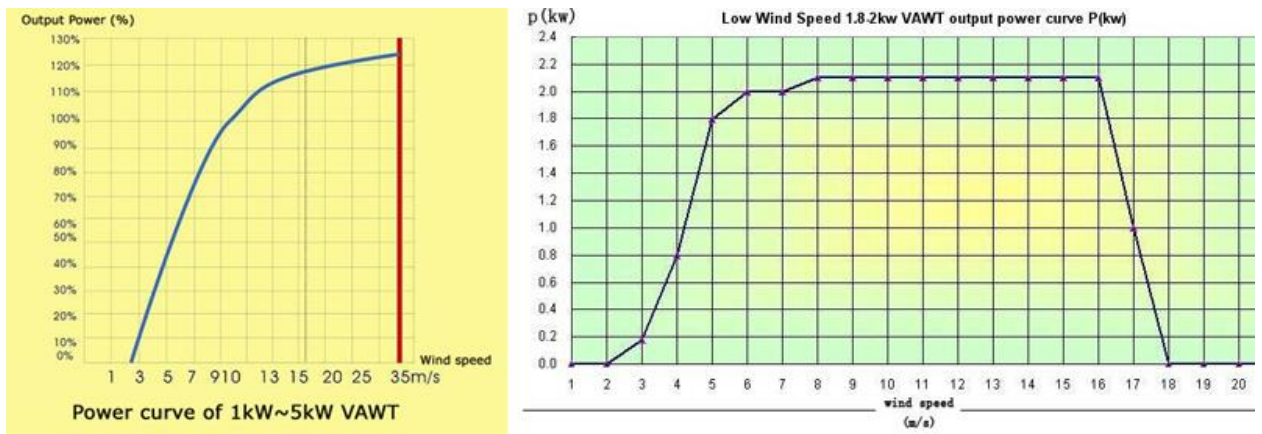


Рис. 1.16. Приклади кривих вихідної потужності двох вертикально-осьових ВЕУ

установки у відриві від швидкості вітру не має сенсу. При наявності статистики по частотах повторюваності швидкості вітру для цікавить нас місцевості крива потужності, що розвивається дозволяє зробити досить точний розрахунок вироблення електричної енергії.

1.3 Висновок за 1-м розділом

В даному розділі була розглянута класифікація та способи реалізації вертикально-осьових ВЕУ. Описані основні їх види, а також вказані параметри за якими визначають ефективність того чи іншого типу ротора.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК ВІТРОГЕНЕРАТОРА

Завданням дипломного проекту є дослідження ефективності вертикального вітрогенератора барабанного типу. А саме, знаходження основних аеродинамічних характеристик ротора Савоніуса барабанного типу на 16 лопатей, який розробляється на кафедрі. Даний ротор має такі характеристики:

- Діаметр вітроколеса D – 0,7 м;
- Діаметр лопаті d – 0,095 м;
- Висота вітроколеса H – 1 м;

Зовнішній вигляд вітроколеса представлено на рисунку 2.1.

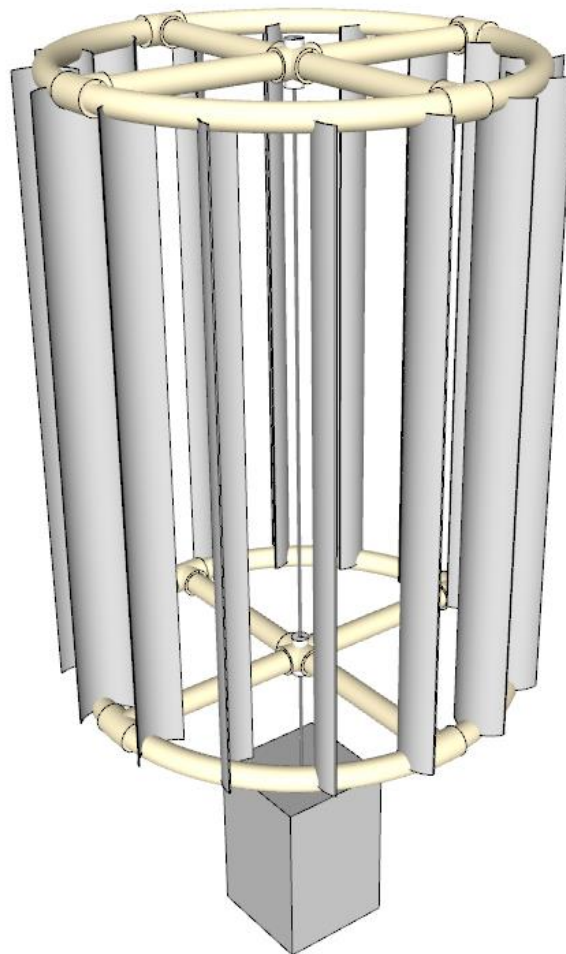


Рис.2.1 – Зовнішній вигляд вітроколеса барабанного типу на 16 лопатей.

2.1 Аеродинамічні параметри ротора Савоніуса

Експеримент, проведений за допомогою замкнутої аеродинамічної труби Саратовського наукового центра РАН при АГТУ[15], показав, що коефіцієнт опору напівциліндричної лопаті C залежить від куту повороту лопаті відносно повітряного потоку φ (Рис.2.2).

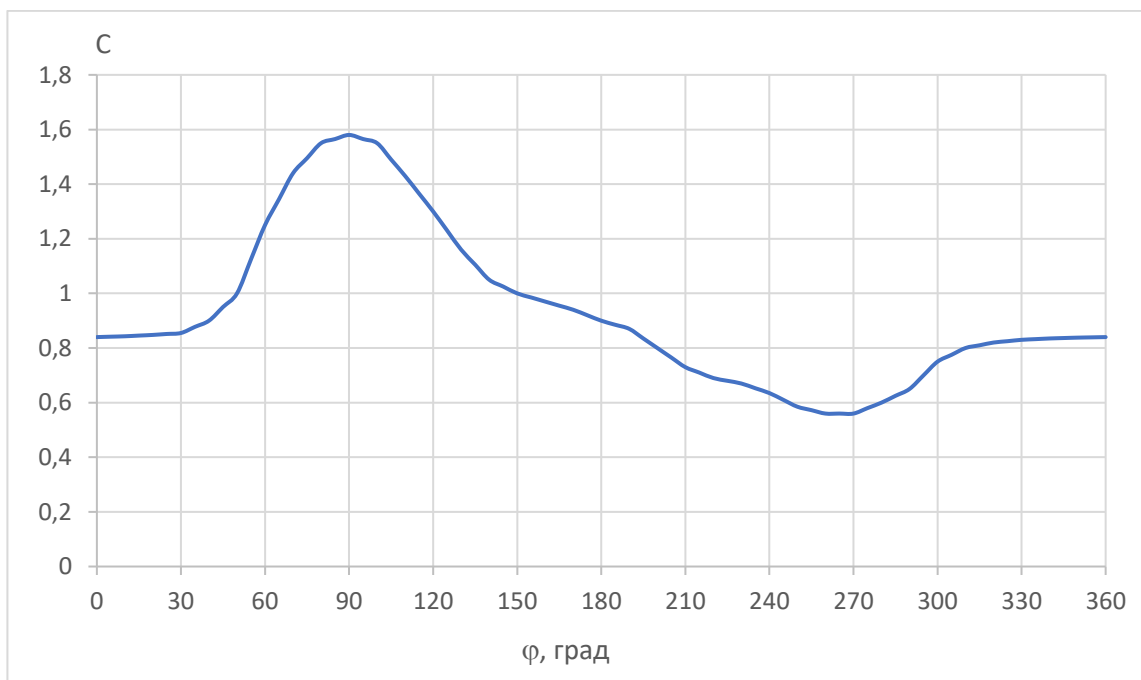


Рис.2.2 – Залежність коефіцієнта опору напівциліндричної лопаті від куту її повороту

Для даного ротора коефіцієнт опору C в залежності від куту повороту лопаті φ наведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Залежність коефіцієнту опору C в залежності від кута повороту лопаті φ

φ , град	C	φ , град	C	φ , град	C	φ , град	C
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,84	95	1,565	185	0,885	275	0,58
5	0,8415	100	1,55	190	0,87	280	0,6

1	2	3	4	5	6	7	8
10	0,843	105	1,49	195	0,835	285	0,625
15	0,8455	110	1,43	200	0,8	290	0,65
20	0,848	115	1,365	205	0,765	295	0,7
25	0,8515	120	1,3	210	0,73	300	0,75
30	0,855	125	1,23	215	0,71	305	0,775
35	0,8775	130	1,16	220	0,69	310	0,8
40	0,9	135	1,105	225	0,68	315	0,81
45	0,95	140	1,05	230	0,67	320	0,82
50	1,0	145	1,025	235	0,6526	325	0,825
55	1,125	150	1,0	240	0,635	330	0,83
60	1,25	155	0,985	245	0,61	335	0,8325
65	1,345	160	0,97	250	0,585	340	0,835
70	1,44	165	0,955	255	0,5725	345	0,8365
75	1,495	170	0,94	260	0,56	350	0,838
80	1,55	175	0,92	265	0,56	355	0,839
85	1,565	180	0,9	270	0,54	360	0,84
90	1,58						

Максимальне значення коефіцієнт опору C має при куті лопаті $\varphi = 90^\circ$ і дорівнює $C_{max} = 1.58$. Мінімальне значення $C_{min} = 0.56$ при $\varphi = 270^\circ$. Отримані значення коефіцієнту лобового опору будуть використані при знаходженні обертового моменту, потужності і коефіцієнта потужності.

2.2 Оцінка енергетичної ефективності використання ротора Савоніуса

Головна особливість ротора Савоніуса – можливість самозапуска при низьких швидкостях вітру[15]. Ротор Савоніуса звичайно має декілька лопатей ($n = 2 \div 3$), рідше зустрічаються багатолопатеві ($n = 4 \div 8$) або ротори

барабанного типу ($n > 9$). Лопаті можуть бути розташовані безпосередньо біля осі обертання або рознесені на значну відстань R від осі обертання (рис. 2.3).

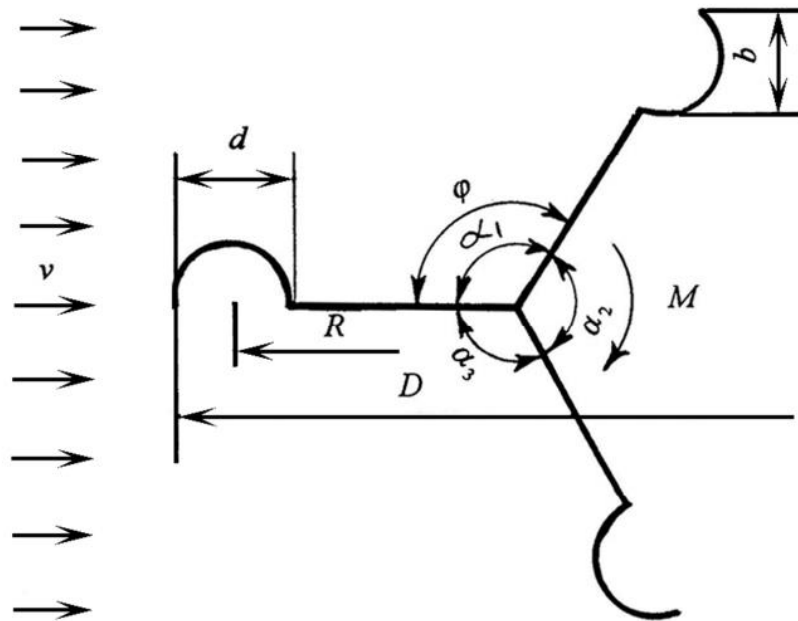


Рис.2.3 – Схема ротора Савоніуса при $n = 3$.

Обертний момент, що виникає за рахунок аеродинамічних сил на кожній із лопатей, дорівнює

$$M_i = 0.5C_i\rho S_i V^2 L_i, \quad (2.1)$$

де S_i – площа проекції лопаті, m^2 ; L_i – плече сили тиску, м.

Виражаючи площу проекції і плече сили лопаті ротора Савоніуса через кут φ (рис. 2), отримаємо на кожній з лопатей момент M

$$M = 0.125\rho V^2 dH(D - d)C(|\sin\varphi| + |\sin^2\varphi|), \quad (2.2)$$

і відносний обертний момент, Н·м

$$M^* = \frac{M}{M_{max}} = \frac{0.5C(|\sin\varphi| + |\sin^2\varphi|)}{C_{max}}, \quad (2.3)$$

де d – діаметр лопаті; H, D – висота і діаметр ротора; φ – кут між площиною, що проходить через кромки лопаті і напрямком повітряного потоку.

Результати розрахунку відносного обертового моменту для однієї лопаті $M1^*$ даного ротора в залежності від кута повороту φ приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Залежність відносного обертового моменту $M1^*$ в залежності від кута повороту лопаті φ

φ, град	M1*	φ, град	M1*	φ, град	M1*	φ, град	M1*
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,0000	95	0,9849	185	-0,0265	275	-0,3650
5	0,0252	100	0,9588	190	-0,0561	280	-0,3711
10	0,0544	105	0,8954	195	-0,0861	285	-0,3756
15	0,0872	110	0,8248	200	-0,1162	290	-0,3749
20	0,1232	115	0,7463	205	-0,1455	295	-0,3827
25	0,1620	120	0,6648	210	-0,1733	300	-0,3836
30	0,2029	125	0,5800	215	-0,2028	305	-0,3655
35	0,2506	130	0,4966	220	-0,2306	310	-0,3425
40	0,3007	135	0,4221	225	-0,2598	315	-0,3094
45	0,3629	140	0,3509	230	-0,2868	320	-0,2740
50	0,4281	145	0,2928	235	-0,3077	325	-0,2356
55	0,5305	150	0,2373	240	-0,3247	330	-0,1970
60	0,6393	155	0,1874	245	-0,3335	335	-0,1584
65	0,7354	160	0,1409	250	-0,3374	340	-0,1213
70	0,8306	165	0,0985	255	-0,3440	345	-0,0862

1	2	3	4	5	6	7	8
75	0,8984	170	0,0606	260	-0,3464	350	-0,0540
80	0,9588	175	0,0276	265	-0,3524	355	-0,0252
85	0,9849	180	0,0000	270	-0,3418	360	0,0000
90	1,0000						

Результати розрахунку показані на графіку (рис.2.4)

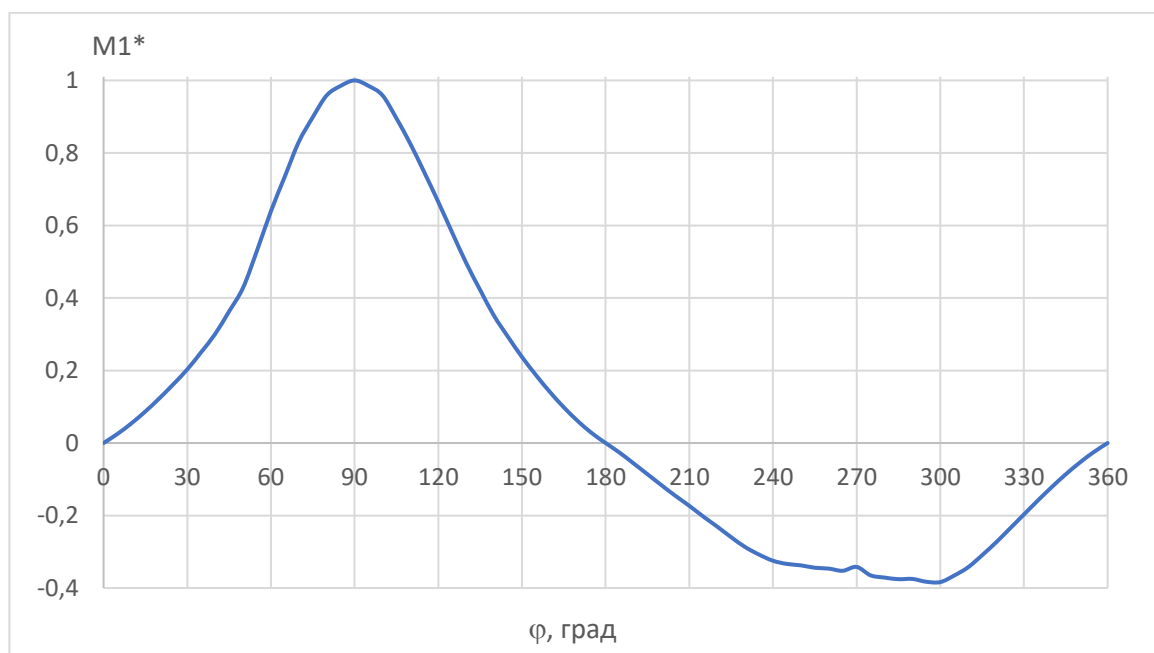


Рис. 2.4 – Графік залежності відносного обертового моменту $M1^*$ від кута повороту лопаті φ

Величина відносного обертального моменту вітроколеса з n лопатями в залежності від кута повороту φ може бути визначена як сума відносних моментів всіх лопатей при повороті вітродвигуна на кут φ .

Початком відліку вважається момент, коли кут φ між напрямом повітряного потоку і лопаттю 1 дорівнює 0. Ротор вітроколеса обертається за годинниковою стрілкою і на лопаті 1 з'являється деякий позитивний момент, а на лопаті 2 – негативний. Значення моменту береться з таблиці 2 зі зміщенням на кут α між лопатями. Нехай кут $\varphi = 115^\circ$. Тоді для лопаті 1 з

кутом повороту φ , відносний обертовий момент m_1 буде дорівнювати 0,8248, а для лопаті 2 с кутом повороту $\varphi + \alpha = 115^\circ + 180^\circ = 295^\circ$, відносний обертовий момент m_2 буде рівен -0,3827. Отже, відносний обертовий момент вітроколеса M при повороті на кут 115° буде дорівнювати сумі моментів першої і другої лопаті (рис.2.5).

$$M = m_1 + m_2 = 0.8248 + (-0.3827) = 0.4421$$

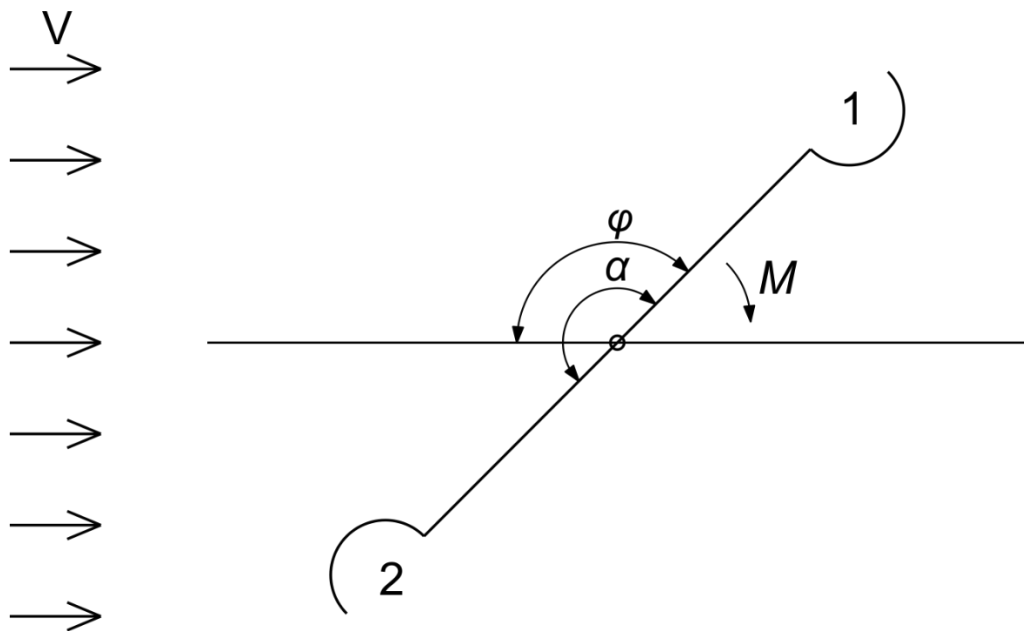


Рис. 2.5 – Схематичне зображення вітроколеса з двома лопатями

Нижче приведені розрахунки та графік відносного обертового моменту для вітроколеса з двома лопатями(табл. 2.3) (рис.2.6).

Таблиця 2.3. Залежність відносного обертового моменту вітроколеса з двома лопатями $M2^*$ в залежності від кута повороту вітроколеса φ

φ , град	$M2^*$	φ , град	$M2^*$	φ , град	$M2^*$	φ , град	$M2^*$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,0000	95	0,6199	185	-0,0013	275	0,6199
5	-0,0013	100	0,5876	190	-0,0017	280	0,5876

1	2	3	4	5	6	7	8
10	-0,0017	105	0,5198	195	0,0011	285	0,5198
15	0,0011	110	0,4499	200	0,0070	290	0,4499
20	0,0070	115	0,3636	205	0,0165	295	0,3636
25	0,0165	120	0,2813	210	0,0297	300	0,2813
30	0,0297	125	0,2146	215	0,0478	305	0,2146
35	0,0478	130	0,1541	220	0,0702	310	0,1541
40	0,0702	135	0,1127	225	0,1031	315	0,1127
45	0,1031	140	0,0769	230	0,1413	320	0,0769
50	0,1413	145	0,0571	235	0,2228	325	0,0571
55	0,2228	150	0,0403	240	0,3145	330	0,0403
60	0,3145	155	0,0290	245	0,4019	335	0,0290
65	0,4019	160	0,0196	250	0,4932	340	0,0196
70	0,4932	165	0,0122	255	0,5544	345	0,0122
75	0,5544	170	0,0066	260	0,6124	350	0,0066
80	0,6124	175	0,0024	265	0,6324	355	0,0024
85	0,6324	180	0,0000	270	0,6582	360	0,0000
90	0,6582						

Вітроколесо з 3-ма лопатями. Кут $\varphi = 15^\circ$. Тоді для лопаті 1 з кутом повороту φ , відносний обертовий момент m_1 буде дорівнювати 0,0872. Для лопаті 2 с кутом повороту $\varphi + \alpha = 15^\circ + 120^\circ = 135^\circ$, відносний обертовий момент m_2 буде рівен 0,4221. Для лопаті 3 с кутом повороту $\varphi + 2\alpha = 15^\circ + 240^\circ = 255^\circ$, відносний обертовий момент m_3 буде рівен -0,3440. Отже, відносний обертовий момент вітроколеса M при повороті на кут 15° буде дорівнювати сумі моментів першої, другої і третьої лопаті (рис. 2.7).

$$M = m_1 + m_2 + m_3 = 0.0872 + 0.4221 + (-0.3440) = 0.1653$$

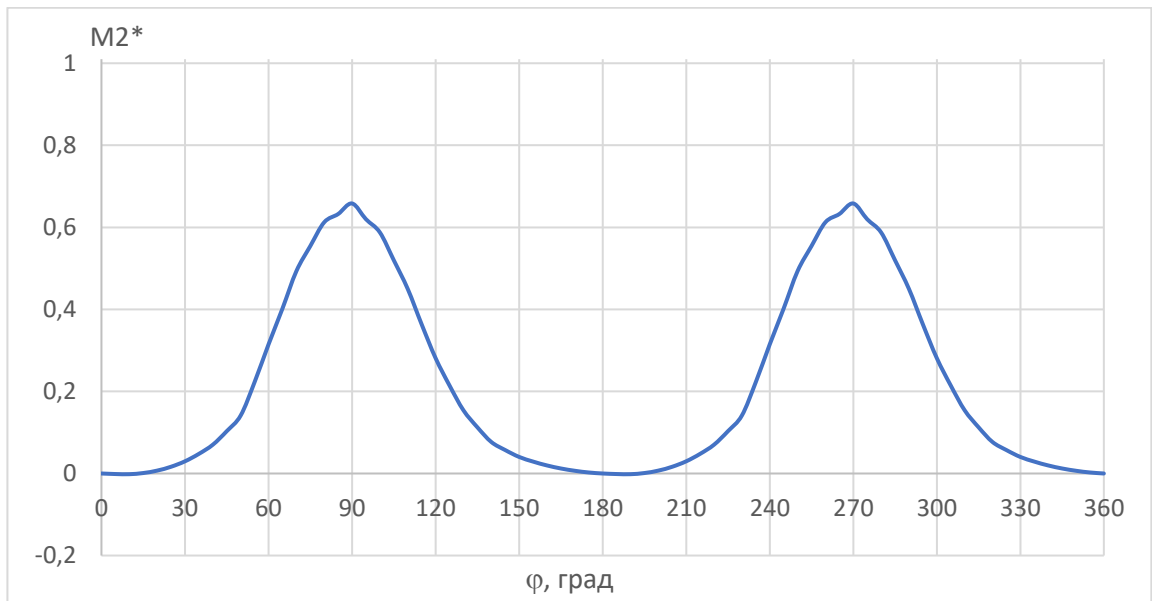


Рис. 2.6 – Графік залежності відносного обертового моменту вітроколеса з двома лопатями $M2^*$ від кута повороту вітроколеса φ

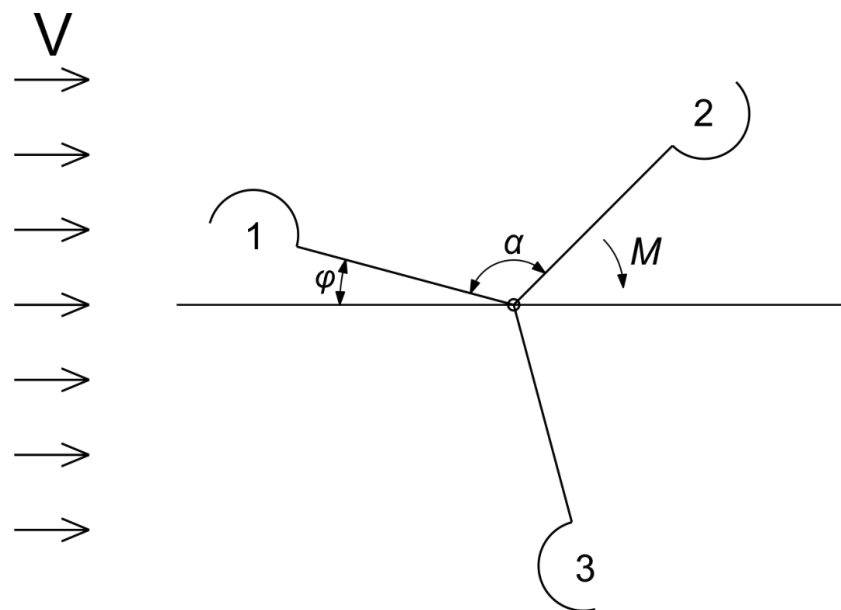


Рис. 2.7 – Схематичне зображення вітроколеса з двома лопатями.

Нижче приведені розрахунки та графік відносного обертового моменту для вітроколеса з двома лопатями (табл. 2.4) (рис.2.8).

Таблиця 2.4. Залежність відносного обертового моменту вітроколеса з трьома лопатями МЗ* в залежності від кута повороту вітроколеса φ

φ, град	МЗ*	φ, град	МЗ*	φ, град	МЗ*	φ, град	МЗ*
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,3401	95	0,6237	185	0,3434	275	0,0730
5	0,2718	100	0,6069	190	0,4320	280	0,0705
10	0,2136	105	0,5494	195	0,5029	285	0,0858
15	0,1652	110	0,4839	200	0,5686	290	0,1138
20	0,1277	115	0,4134	205	0,6037	295	0,1754
25	0,1024	120	0,3401	210	0,6297	300	0,2557
30	0,0985	125	0,2718	215	0,6237	305	0,3434
35	0,0730	130	0,2136	220	0,6069	310	0,4320
40	0,0705	135	0,1652	225	0,5494	315	0,5029
45	0,0858	140	0,1277	230	0,4839	320	0,5686
50	0,1138	145	0,1024	235	0,4134	325	0,6037
55	0,1754	150	0,0985	240	0,3401	330	0,6297
60	0,2557	155	0,0730	245	0,2718	335	0,6237
65	0,3434	160	0,0705	250	0,2136	340	0,6069
70	0,4320	165	0,0858	255	0,1652	345	0,5494
75	0,5029	170	0,1138	260	0,1277	350	0,4839
80	0,5686	175	0,1754	265	0,1024	355	0,4134
85	0,6037	180	0,2557	270	0,0985	360	0,3401
90	0,6297						

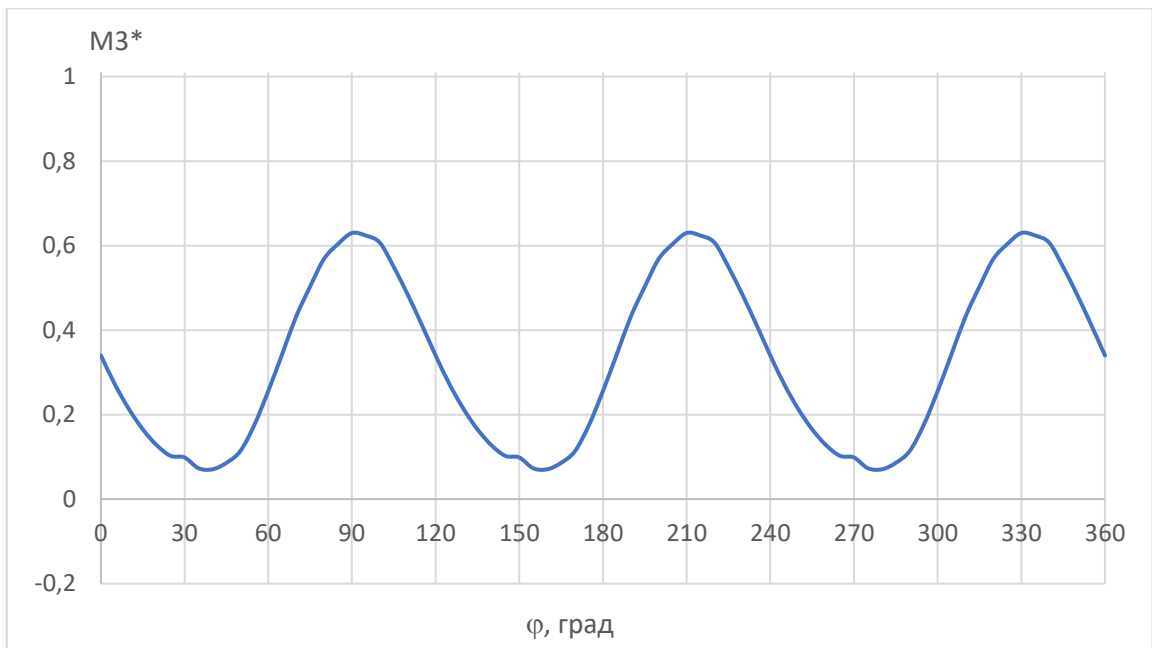


Рис. 2.8 – Графік залежності відносного обертового моменту вітроколеса з трьома лопатями $M3^*$ від кута повороту вітроколеса φ

По аналогії виконується розрахунок вітроколеса з більшою кількістю лопатей.

Результати розрахунку для вітроколеса з 4-ма лопатями (табл. 2.5) (рис. 2.9).

Таблиця 2.5. Залежність відносного обертового моменту вітроколеса з чотирма лопатями $M4^*$ в залежності від кута повороту вітроколеса φ

φ , град	$M4^*$	φ , град	$M4^*$	φ , град	$M4^*$	φ , град	$M4^*$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,6582	95	0,6186	185	0,6186	275	0,6186
5	0,6186	100	0,5859	190	0,5859	280	0,5859
10	0,5859	105	0,5209	195	0,5209	285	0,5209
15	0,5209	110	0,4569	200	0,4569	290	0,4569
20	0,4569	115	0,3800	205	0,3800	295	0,3800

1	2	3	4	5	6	7	8
25	0,3800	120	0,3109	210	0,3109	300	0,3109
30	0,3109	125	0,2624	215	0,2624	305	0,2624
35	0,2624	130	0,2243	220	0,2243	310	0,2243
40	0,2243	135	0,2158	225	0,2158	315	0,2158
45	0,2158	140	0,2181	230	0,2181	320	0,2181
50	0,2181	145	0,2799	235	0,2799	325	0,2799
55	0,2799	150	0,3549	240	0,3549	330	0,3549
60	0,3549	155	0,4309	245	0,4309	335	0,4309
65	0,4309	160	0,5128	250	0,5128	340	0,5128
70	0,5128	165	0,5666	255	0,5666	345	0,5666
75	0,5666	170	0,6190	260	0,6190	350	0,6190
80	0,6190	175	0,6349	265	0,6349	355	0,6349
85	0,6349	180	0,6582	270	0,6582	360	0,6582
90	0,6582						

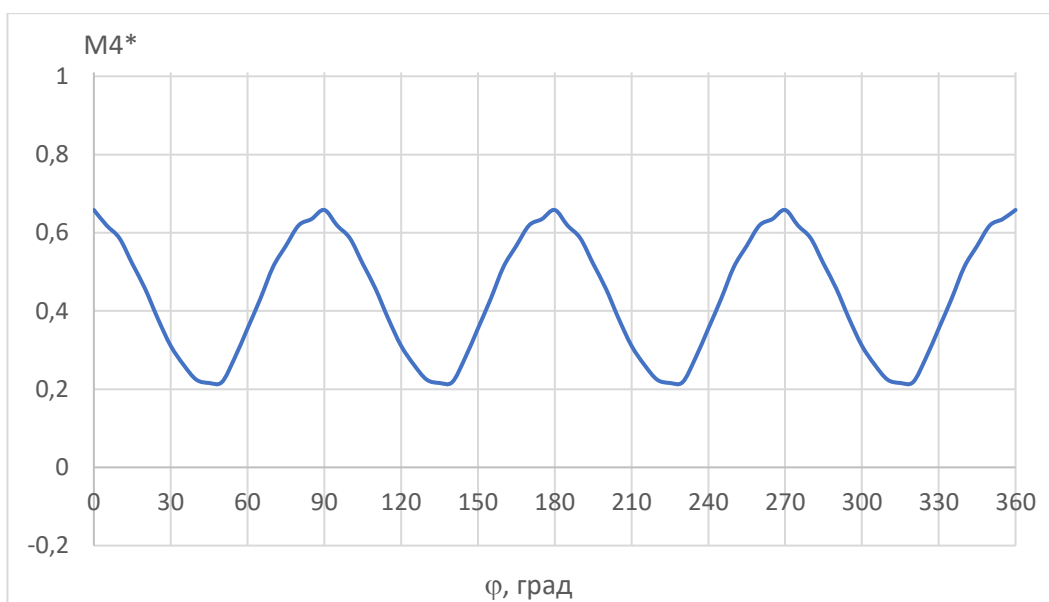


Рис. 2.9 – Графік залежності відносного обертового моменту вітроколеса з чотирма лопатями $M4^*$ від кута повороту вітроколеса φ .

Результати розрахунку для вітроколеса з 6-ма лопатями(табл. 2.6)
(рис. 2.10).

Таблиця 2.6. Залежність відносного обертового моменту вітроколеса з 6-ма лопатями M_6^* в залежності від кута повороту вітроколеса φ

φ , град	M_6^*	φ , град	M_6^*	φ , град	M_6^*	φ , град	M_6^*
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,5958	95	0,6967	185	0,6151	275	0,6967
5	0,6151	100	0,6774	190	0,6456	280	0,6774
10	0,6456	105	0,6352	195	0,6681	285	0,6352
15	0,6681	110	0,5978	200	0,6962	290	0,5978
20	0,6962	115	0,5888	205	0,7060	295	0,5888
25	0,7060	120	0,5958	210	0,7282	300	0,5958
30	0,7282	125	0,6151	215	0,6967	305	0,6151
35	0,6967	130	0,6456	220	0,6774	310	0,6456
40	0,6774	135	0,6681	225	0,6352	315	0,6681
45	0,6352	140	0,6962	230	0,5978	320	0,6962
50	0,5978	145	0,7060	235	0,5888	325	0,7060
55	0,5888	150	0,7282	240	0,5958	330	0,7282
60	0,5958	155	0,6967	245	0,6151	335	0,6967
65	0,6151	160	0,6774	250	0,6456	340	0,6774
70	0,6456	165	0,6352	255	0,6681	345	0,6352
75	0,6681	170	0,5978	260	0,6962	350	0,5978
80	0,6962	175	0,5888	265	0,7060	355	0,5888
85	0,7060	180	0,5958	270	0,7282	360	0,5958
90	0,7282						

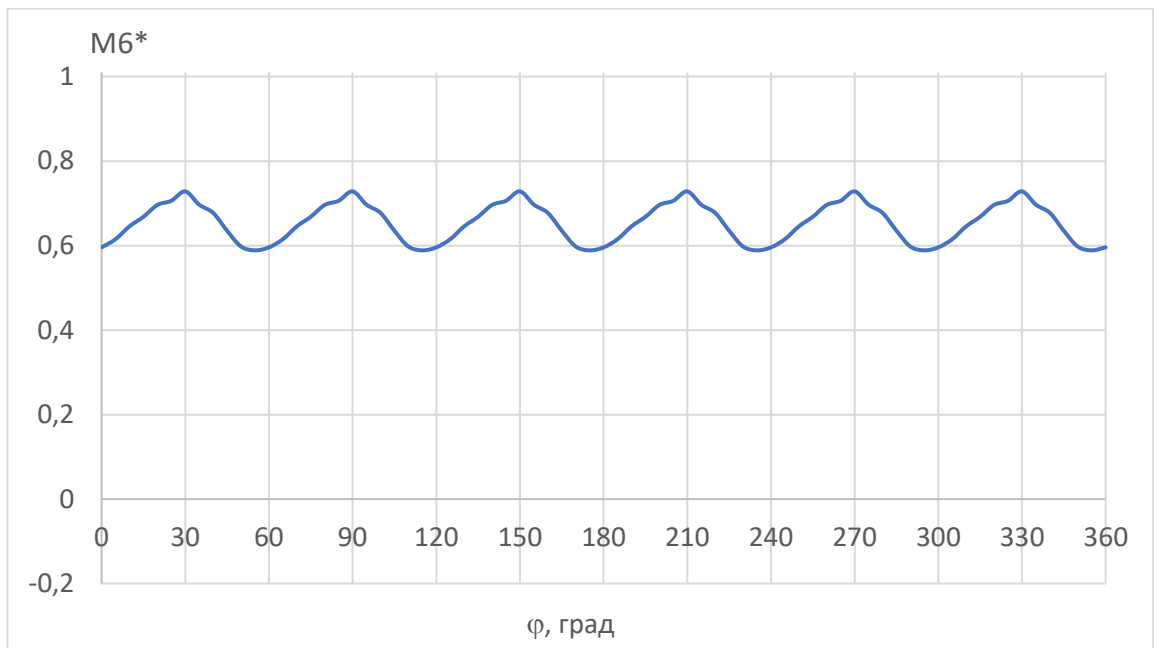


Рис. 2.10 – Графік залежності відносного обертового моменту вітроколеса з 6-ма лопатями $M6^*$ від кута повороту вітроколеса φ .

Результати розрахунку для вітроколеса з 8-ма лопатями (табл. 2.7) (рис. 2.11).

Таблиця 2.7. Залежність відносного обертового моменту вітроколеса з 8-ма лопатями $M8^*$ в залежності від кута повороту вітроколеса φ

φ , град	$M8^*$	φ , град	$M8^*$	φ , град	$M8^*$	φ , град	$M8^*$
1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,8741	95	0,8367	185	0,8367	275	0,8367
5	0,8367	100	0,8658	190	0,8658	280	0,8658
10	0,8658	105	0,8757	195	0,8757	285	0,8757
15	0,8757	110	0,8878	200	0,8878	290	0,8878
20	0,8878	115	0,8928	205	0,8928	295	0,8928
25	0,8928	120	0,8775	210	0,8775	300	0,8775
30	0,8775	125	0,8814	215	0,8814	305	0,8814

1	2	3	4	5	6	7	8
35	0,8814	130	0,8592	220	0,8592	310	0,8592
40	0,8592	135	0,8741	225	0,8741	315	0,8741
45	0,8741	140	0,8367	230	0,8367	320	0,8367
50	0,8367	145	0,8658	235	0,8658	325	0,8658
55	0,8658	150	0,8757	240	0,8757	330	0,8757
60	0,8757	155	0,8878	245	0,8878	335	0,8878
65	0,8878	160	0,8928	250	0,8928	340	0,8928
70	0,8928	165	0,8775	255	0,8775	345	0,8775
75	0,8775	170	0,8814	260	0,8814	350	0,8814
80	0,8814	175	0,8592	265	0,8592	355	0,8592
85	0,8592	180	0,8741	270	0,8741	360	0,8741
90	0,8741						

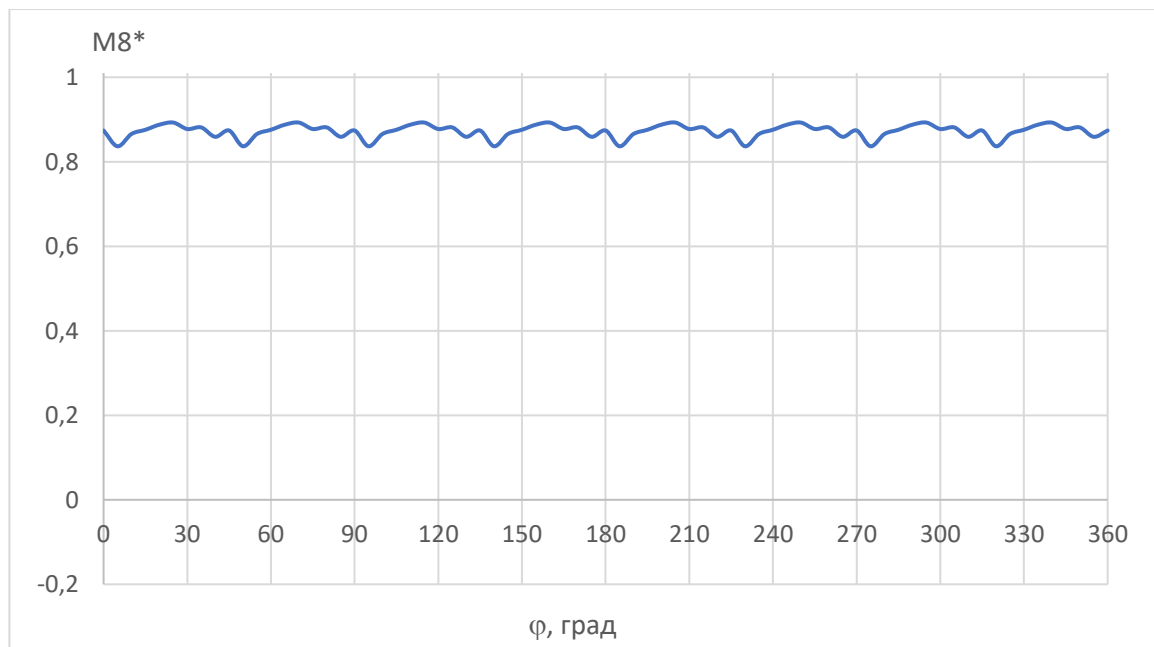


Рис. 2.11 – Графік залежності відносного обертового моменту вітроколеса з 8-ма лопатями $M8^*$ від кута повороту вітроколеса φ

Для вітроколеса з 12-ма лопатями розрахунок відносного обертового моменту дещо відрізняється. Якщо в попередніх випадках знаходилася сума моментів всіх лопатей, то для даного вітроколеса треба виключити лопаті в деяких секторах а ($90^\circ - 120^\circ$) і b ($240^\circ - 270^\circ$). Це зв'язано з тим, що ці лопаті знаходяться в «мертвій зоні» повітряного потоку, затіняються попередніми лопатями (рис. 2.12). Саме через це графік відносного обертового моменту став пульсуючим. Але результат став більш достовірний, в порівнянні з попереднім методом розрахунку.

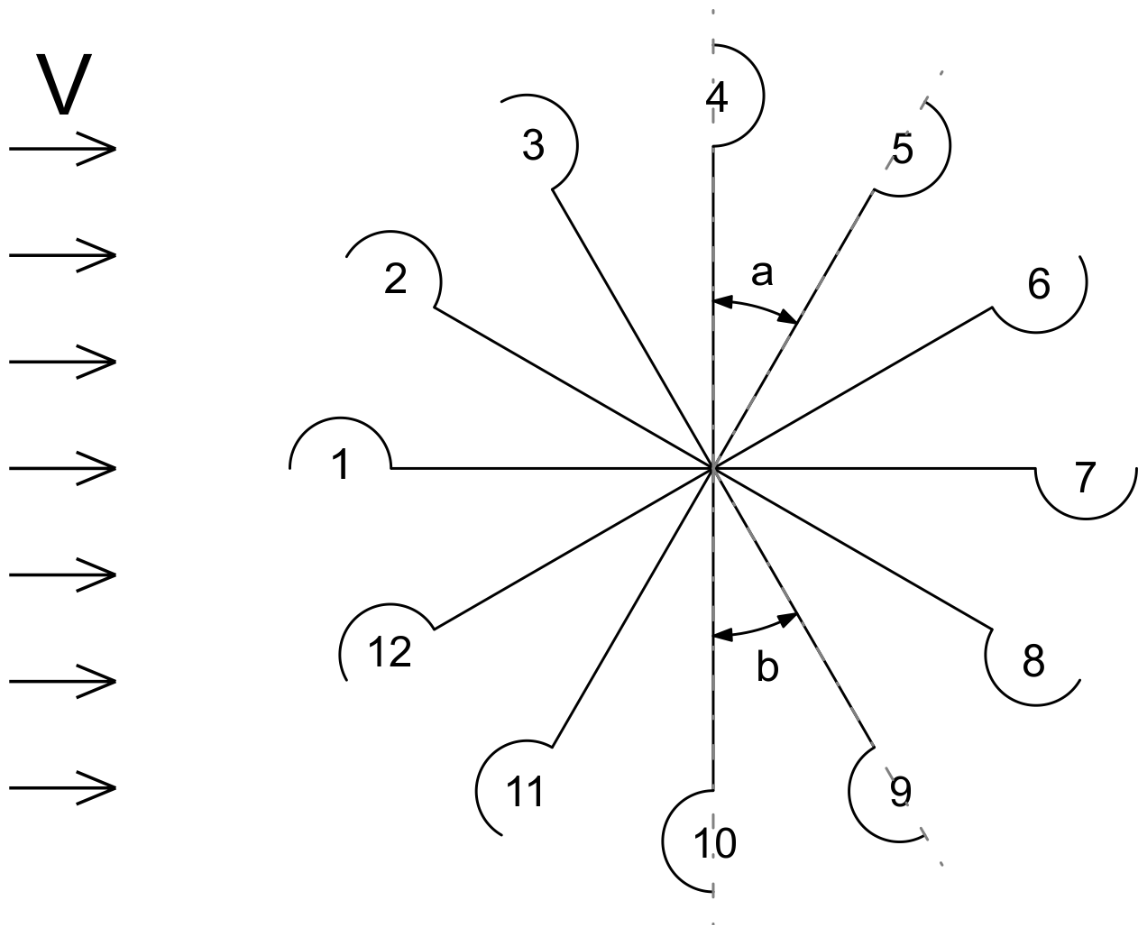


Рис. 2.12 – До розрахунку відносного обертового моменту вітроколеса з 12-ма лопатями

Результати розрахунку для вітроколеса з 12-ма лопатями (табл. 2.8)
(рис. 2.13).

Таблиця 2.8. Залежність відносного обертового моменту вітроколеса з 12-ма лопатями M12* в залежності від кута повороту вітроколеса φ

φ , град	M12*	φ , град	M12*	φ , град	M12*	φ , град	M12*
0	0,64876	95	0,66048	185	0,66048	275	0,66048
5	0,66048	100	0,70163	190	0,70163	280	0,70163
10	0,70163	105	0,75193	195	0,75193	285	0,75193
15	0,75193	110	0,81553	200	0,81553	290	0,81553
20	0,81553	115	0,90092	205	0,90092	295	0,90092
25	0,90092	120	0,64876	210	0,64876	300	0,64876
30	0,64876	125	0,66048	215	0,66048	305	0,66048
35	0,66048	130	0,70163	220	0,70163	310	0,70163
40	0,70163	135	0,75193	225	0,75193	315	0,75193
45	0,75193	140	0,81553	230	0,81553	320	0,81553
50	0,81553	145	0,90092	235	0,90092	325	0,90092
55	0,90092	150	0,64876	240	0,64876	330	0,64876
60	0,64876	155	0,66048	245	0,66048	335	0,66048
65	0,66048	160	0,70163	250	0,70163	340	0,70163
70	0,70163	165	0,75193	255	0,75193	345	0,75193
75	0,75193	170	0,81553	260	0,81553	350	0,81553
80	0,81553	175	0,90092	265	0,90092	355	0,90092
85	0,90092	180	0,64876	270	0,64876	360	0,64876
90	0,64876						

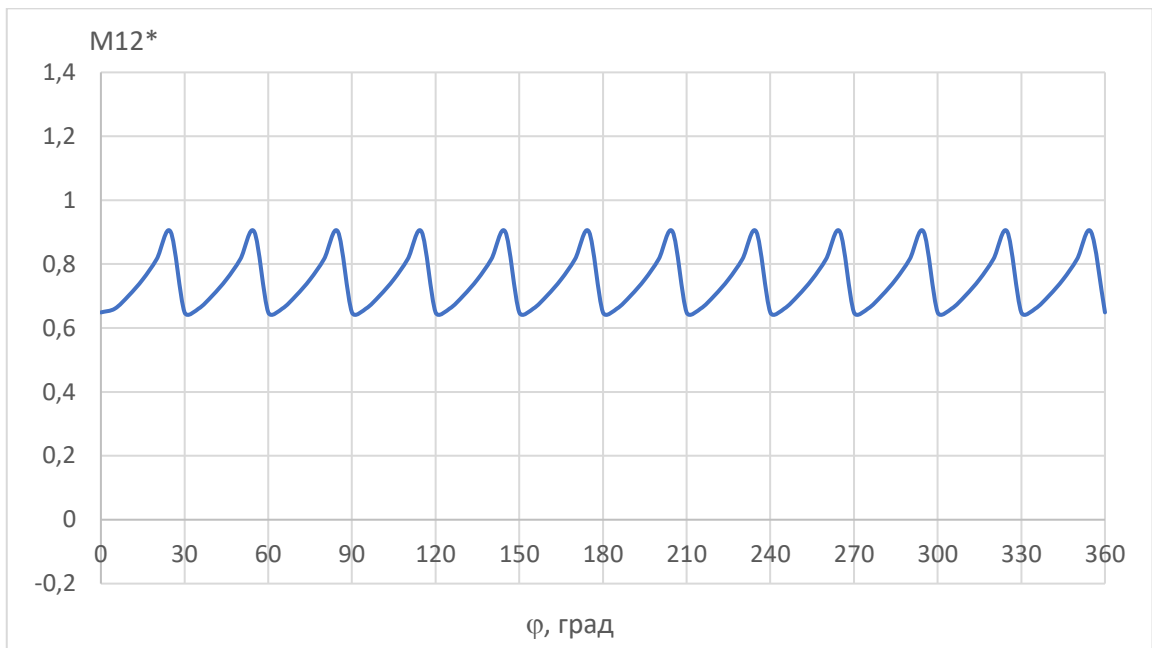


Рис. 2.13 – Графік залежності відносного обертового моменту вітроколеса з 12-ма лопатями M_{12}^* від кута повороту вітроколеса φ

У випадку з 16-ма лопатями розрахунок аналогічний попередньому, але з інакшими секторами a ($101.25^\circ - 146.25^\circ$) і b ($213.75^\circ - 258.75^\circ$) (рис. 2.14).

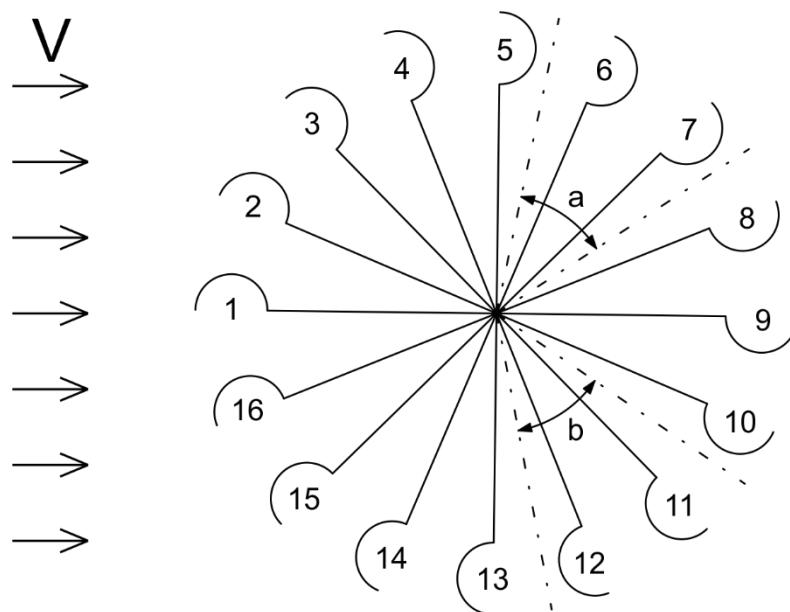


Рисунок 2.14 – До розрахунку відносного обертового моменту вітроколеса з 16-ма лопатями

Результати розрахунку для вітроколеса з 16-ма лопатями (табл. 2.9)
(рис. 2.15).

Таблиця 2.9. Залежність відносного обертового моменту вітроколеса з 16-ма лопатями M16* в залежності від кута повороту вітроколеса φ

φ , град	M16*	φ , град	M16*	φ , град	M16*	φ , град	M16*
0	1,1379	95	1,2985	185	1,2985	275	1,2985
5	1,2985	100	1,3861	190	1,3861	280	1,3861
10	1,3861	105	0,8527	195	0,8527	285	0,8527
15	0,8527	110	1,0440	200	1,0440	290	1,0440
20	1,0440	115	1,2231	205	1,2231	295	1,2231
25	1,2231	120	1,3861	210	1,3861	300	1,3861
30	1,3861	125	0,8527	215	0,8527	305	0,8527
35	0,8527	130	0,9457	220	0,9457	310	0,9457
40	0,9457	135	1,1379	225	1,1379	315	1,1379
45	1,1379	140	1,2985	230	1,2985	320	1,2985
50	1,2985	145	1,3861	235	1,3861	325	1,3861
55	1,3861	150	0,8527	240	0,8527	330	0,8527
60	0,8527	155	1,0440	245	1,0440	335	1,0440
65	1,0440	160	1,2231	250	1,2231	340	1,2231
70	1,2231	165	1,3861	255	1,3861	345	1,3861
75	1,3861	170	0,8527	260	0,8527	350	0,8527
80	0,8527	175	0,9457	265	0,9457	355	0,9457
85	0,9457	180	1,1379	270	1,1379	360	1,1379
90	1,1379						

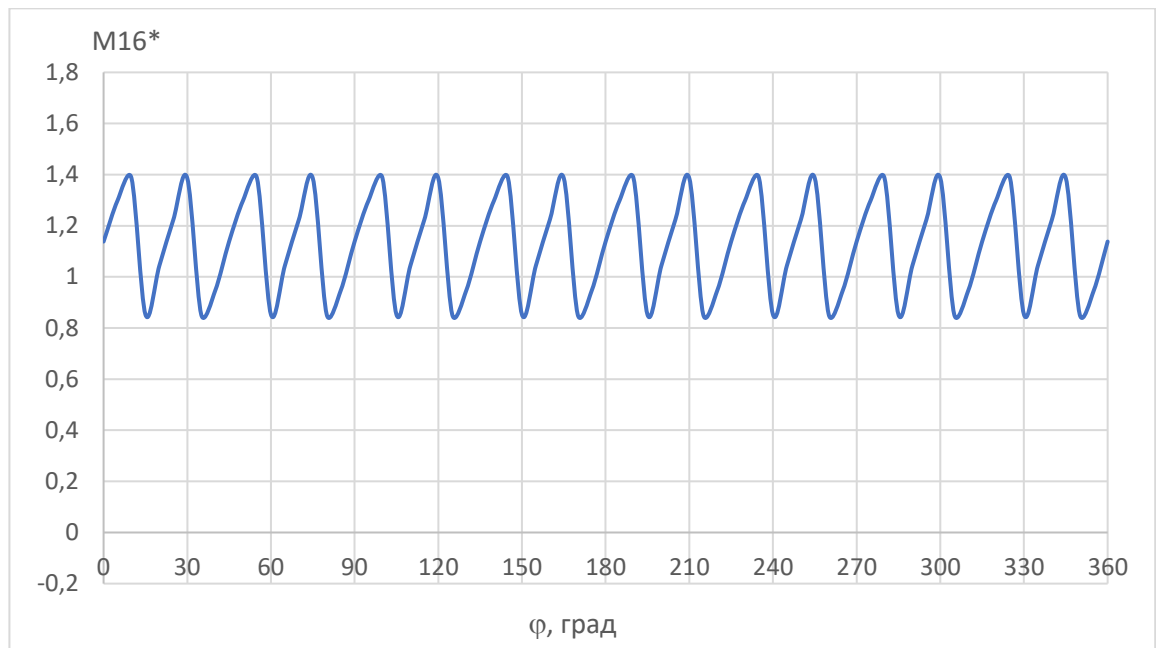


Рис. 2.15 – Графік залежності відносного обертового моменту вітроколеса з 16-ма лопатями M16* від кута повороту вітроколеса φ

Зведений графік з розрахунками відносного обертового моменту M^* для вітроколес з 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 та 16-ма лопатями (рис. 2.16).

Середнє значення відносного обертового моменту $M^*_{\text{ср}}$ для кожного вітроколеса приведенне в таблиці 2.10 та показано на рис. 2.16.

Таблиця 2.10. Середнє значення відносного обертового моменту $M^*_{\text{ср}}$ для кожного вітроколеса

M1* _{ср}	M2* _{ср}	M3* _{ср}	M4* _{ср}	M6* _{ср}	M8* _{ср}	M12* _{ср}	M16* _{ср}
0,1075	0,2151	0,3273	0,4392	0,6534	0,8723	0,7452	1,1254

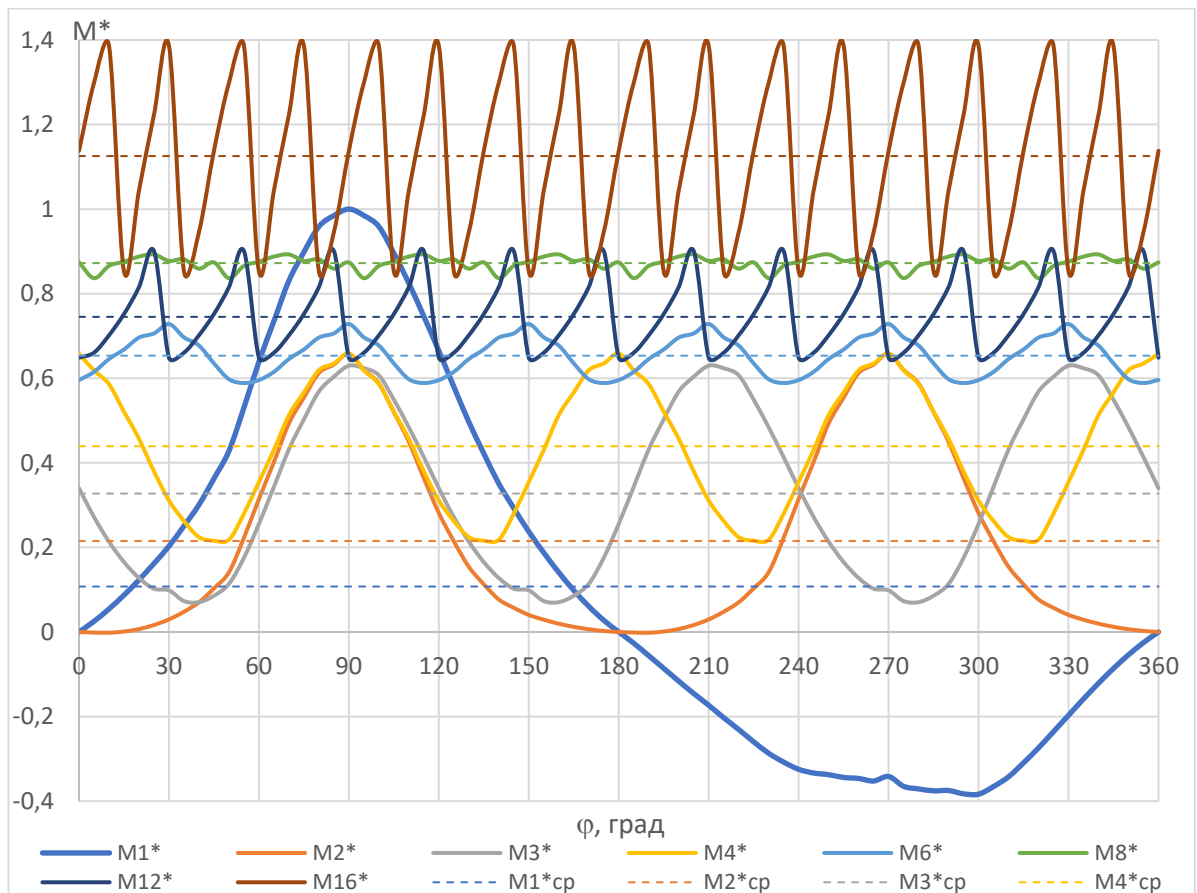


Рис. 2.16 – Графік залежності відносного обертового моменту вітроколес з різною кількістю лопатей M^* від кута повороту вітроколеса φ

На основі середнього значення відносного обертового моменту можна визначити середній обертовий момент даного в завданні ротора з 16-ма лопатями за допомогою формули:

$$M_{cp} = C_{max} \cdot M_{cp}^* \cdot \rho \cdot V^2 \cdot d \cdot D \cdot H, \quad (2.4)$$

де d – діаметр лопаті; D – діаметр ротора; H – висота ротора; V – швидкість повітряного потоку; ρ – щільність повітря; C_{max} – максимальне значення коефіцієнту опору (табл. 1).

$$M_{cp} = 1,58 \cdot 1,1254 \cdot 1,22 \cdot 3^2 \cdot 0,095 \cdot 0,7 \cdot 1 \approx 1,29 \text{ Н/м.}$$

Потужність даного ротора знаходиться за формулою:

$$P = \omega \cdot M_{\text{ср}}, \quad (2.5)$$

де ω – кутова швидкість;

$$\omega = \frac{Z \cdot R}{V},$$

де Z – бистрохідність, для даного ротора дорівнює 0,5; R – радіус ротора.

$$\omega = \frac{0,5 \cdot 0,35}{3} = 0,058;$$

$$P = 0,058 \cdot 1,29 = 0,075 \text{ Вт.}$$

Далі був проведений дослід який показує як впливає зміна діаметра, висоти та кількості лопатей ротора на потужність P ротора.

Номерам відповідають такі значення діаметру, висоти та кількості лопатей:

	1	2	3	4	5	6	7
D, м	0,5	0,7	1	1,5	2	2,5	3
H, м	0,5	0,7	1	1,5	2	2,5	3
Кількість лопатей	2	3	4	6	8	12	16

Результати приведені на графіках (рис. 2.17).

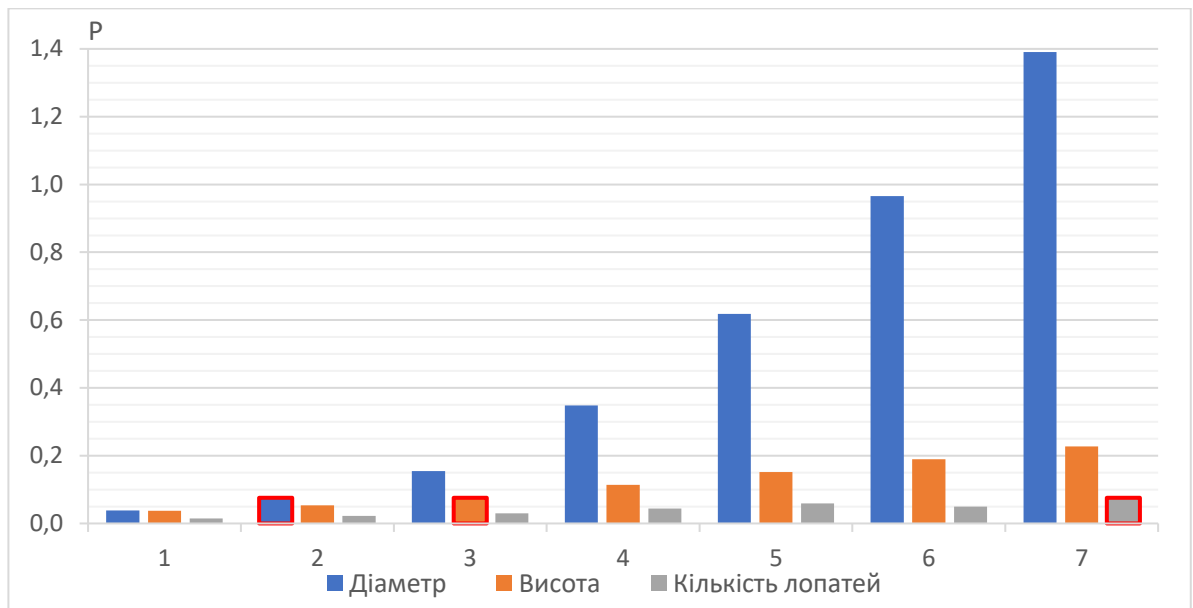


Рис. 2.17 – Залежність потужності від діаметру, висоти та кількості лопатей ротора.

З графіка видно, що найбільший вплив на потужність має діаметр вітроколеса.

Нижче, на рисунку 2.18, представлений загальний вигляд конструкції вітрогенератора.

2.3 Висновок за розділом 2

В даному розділі було досліджено аеродинамічні характеристики ротора Савоніуса барабанного типу в залежності від кількості лопатей. Треба зазначити, що даний аналіз проведено не враховуючи точну взаємодію великої кількості лопатей з повітряним потоком та вплив сильних повітряних вихорів, що утворюються лопатями під час розсікання повітряної маси, на точність розрахунку відносного обертового моменту. Тому треба проводити більш детальні дослідження аеродинаміки ротора Савоніуса та виконувати експериментальні дослідження в лабораторних та натурних умовах.

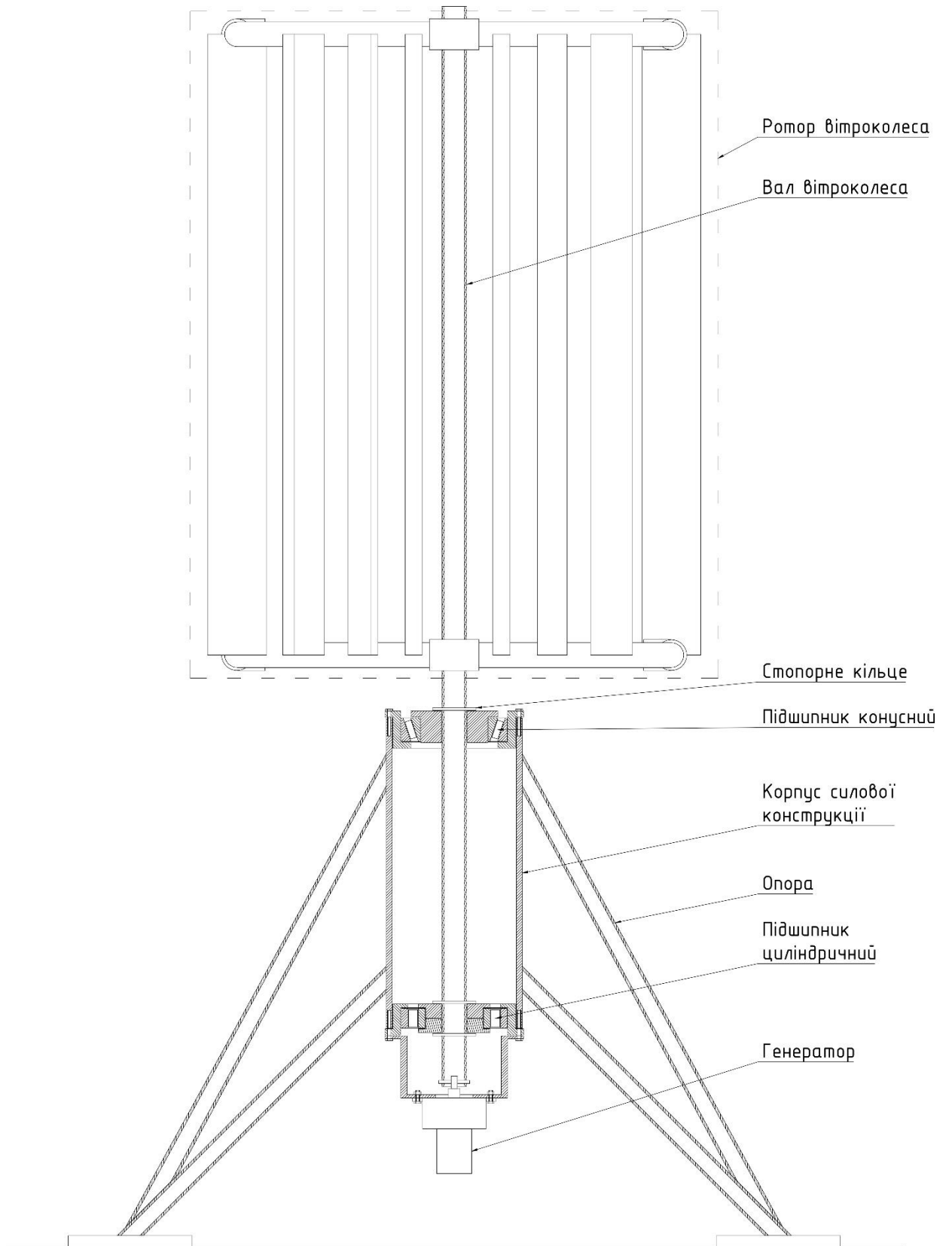


Рис. 2.18 – Загальний вигляд конструкції вітрогенератора

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

3.1 Вступ

Вітроенергетика – це ключова галузь альтернативної енергетики. Енергію вітру люди використовують вже протягом багатьох століть. Вітряки використовувалися ще до нашої ери, з їх допомогою молотили зерно. Такі млини широко використовувалися в ісламському світі того часу, а вже потім були хрестоносцями завезені в Європу. Вітряки використовувалися не тільки для розмелювання зерна, але за допомогою їх відкачували воду і організовували зрошення ґрунту. Перші вітряні млини, які виробляли електроенергію, з'явилися в 19 столітті, а в 1890р. була побудована перша вітроелектростанція. Але вже в середині 20 століття вітроенергетика переживає занепад. Інтерес до неї виник після нафтової кризи 1973р. Цей період можна сміливо вважати початком відродження вітроенергетики.

На сьогоднішній день вітроенергетика по потужності річного електроенергетичного приросту вийшла на перше місце, обігнавши природний газ і сонячну енергетику.

Так що ж лежить в основі вітроенергетики? Основою цієї галузі є перетворення кінетичної енергії вітру в механічну, з кінцевим перетворенням її в електричну.

За потужністю продукування енергії вітрові установки можна розділити на промислові, для побутових потреб і комерційні. З огляду на те, що потужність вітрогенератора безпосередньо залежить від потужності вітру, їх доцільно розміщувати в прибережних районах і інших районах, де переважає високий рівень вітру круглий рік. Промислові вітрові електростанції це об'єднання великої кількості окремих установок, і вони підключаються до загальної електромережі, а ось електростанції для

побутових потреб, як правило, можуть працювати автономно і забезпечувати електроенергією певні райони.

За типом конструкції вітрові установки бувають вертикальні і горизонтальні. У сучасній вітроенергетиці в основному використовуються горизонтальні вітрогенератори. Вони в свою чергу діляться на однолопатеві, дволопатеві, трилопатеві і багатолопатеві. Саме найбільшого поширення набули трилопатеві вітрогенератори, і їх номінальна потужність досягає 7 МВт. Однак в тих районах де швидкість вітру не дуже висока, набули поширення вертикальні вітрогенератори, через те, що використання їх в таких умовах більш продуктивно. Сучасні роторні вітрові установки оснащені новітніми гальмівними механізмами, і вони можуть легко переносити шквальний вітер, не виходячи з ладу.

Розвиток вітроенергетики дозволить значно знизити забруднення навколишнього середовища, і зменшити викид в атмосферу CO₂. Самовідновлювальність цього джерела енергії робить його невичерпним і в ньому закладено величезний потенціал. Хочеться відзначити що, незважаючи на величезну конструкцію вітрогенератора, землі що його оточують можна спокійно використовувати під сільськогосподарські насадження. І також до переваг можна віднести досить просте обслуговування.

Але є ще ряд недоліків, які гальмують розвиток і поширення вітрової енергетики. До них можна віднести високу вартість вітрогенераторів. Одним з головних чинників який істотно впливає на продуктивність вироблення електроенергії – це сила вітру. На жаль людина, не може ніяк на неї впливати. Шум вітрових електростанцій, теж один із головних негативних чинників. Розробникам на сьогоднішній день вдалося добре впоратися з механічним шумом, який створювався при роботі механізмів, а ось аеродинамічний шум, який виникає при взаємодії вітру з лопаттю, поки так і залишився. Не менш важливим недоліком є обмерзання лопатей в холодну пору року або при використанні вітрових установок в місцевості,

де обмерзання відбувається часто. Обледеніння лопатей небезпечно тим, що при запуску вітрогенератора відбувається розліт крижин в радіусі 60 м. Тому при таких погодних умовах обов'язково встановлюються попереджувальні знаки, щоб запобігти травматизму.

Однак виходячи з того що прогрес не стоїть на місці і деякі проблеми поступово вирішуються, вітроенергетика буде стрімко розвиватися. Вона особливо актуальна, де немає централізованого енергопостачання. Особливо ефективно використання вітроенергетики в комплексі з іншими видами альтернативної енергетики.

В основній частині даної роботи було досліджено основні аеродинамічні характеристики ротора вітрогенератора та представлено його конструкцію. Даний вітрогенератор буде використовуватися на кафедрі як установка для лабораторних робіт.

В економічній частині необхідно розрахувати затрати на виготовлення даного вітрогенератора.

3.2 Розрахунок витрат, пов'язаних з виготовленням установки

Виробнича собівартість вітроустановки визначається за формулою:

$$C_{\text{пр}} = Z_{\text{МУ}} + Z_{\text{у}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha + \beta}{100}\right), \text{ грн}, \quad (3.1)$$

де $Z_{\text{МУ}}$ – вартість основних матеріалів і комплектуючих виробів в запропонованій установці, грн; $Z_{\text{у}}$ – основна заробітна плата робочих, зайнятих виготовленням запроектованої установки, грн;

α – цехові видатки, %;

β – загальнозаводські видатки, %;

Вартість основних матеріалів $Z_{\text{МУ}}$ визначається на підставі норм їх видатку та оптових цін. Із загальної вартості матеріалів необхідно

відрахувати вартість зворотних відходів (в середньому 2%) і додати вартість транспортно-заготівельних видатків (3-5% від вартості матеріалів). Результати зведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Визначення вартості основних матеріалів запроектованої установки

№	Найменування	Одиниця виміру	Норма витрат на один виріб	Оптова ціна за одиницю, грн	Вартість матеріалів на один виріб, грн	Обґрунтування витрат та цін
1	Труба поліпропіленова 40мм	м	5	51,91	259,55	
2	Труба каналізаційна 110мм	м	9	43,96	395,64	
3	Хрест для труби 40мм	шт.	2	26,1	52,2	
4	Трійник для труби 40мм	шт.	8	15,37	122,96	
5	Труба металева 40мм	м	2	96,36	192,72	
6	Труба металева 200мм	м	0,5	1513,78	756,89	
7	Труба профільна 30x30x4	м	6	88,28	529,68	
8	Транспортно-заготівельні видатки				115,48	
9	Зворотні відходи				-46,19	
	Всього				2378,93	

Сума витрат на комплектуючі вироби визначається на підставі їх кількості і відповідних оптових цін. До одержаної суми додаються транспортно-заготівельні видатки (5-7% від загальної вартості комплектуючих виробів). Результати зведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Визначення вартості комплектуючих виробів запроєктованої установки

№	Найменування	Одиниця виміру	Норма витрат на один виріб	Оптова ціна за одиницю, грн	Вартість матеріалів на один виріб, грн	Обґрунтування витрат та цін
1	Конічний роликопідшипник	шт.	1	807,05	807,05	
2	Циліндричний роликопідшипник	шт.	1	251,86	251,86	
3	Генератор	шт.	1	280	280	
4	Транспортно-заготівельні видатки				93,72	
	Всього				1432,63	

Основна заробітна плата робочих Z_y визначається за укрупненим методом виходячи з ознак зіставляємості:

$$Z_y = Z_{МУ} \cdot \frac{U_3}{U_M}, \quad (3.2)$$

де U_3, U_M – питомі ваги заробітної плати та вартості матеріалів і комплектуючих в виробничій собівартості аналогу відповідно, %.

За відсутності фактичних значень використовуються середні значення цехових і загальнозаводських видатків а також середні значення U_3 та U_M .
 $\alpha = 120\%$, $\beta = 70\%$, $U_3 = 19\%$ та $U_M = 28\%$

$$Z_{МУ} = 2378,93 + 1432,63 = 3811,56 \text{ грн};$$

$$Z_y = 3811,56 \cdot \frac{0,19}{0,28} = 2586,42 \text{ грн};$$

$$C_{\text{пр}} = 3811,56 + 2586,42 \cdot \left(1 + \frac{1,2 + 0,7}{100}\right) = 6447,12 \text{ грн.}$$

Повна собівартість запроєктованої установки, необхідна для визначення економії на витратах виробництва, визначається як:

$$C_{\text{п}} = C_{\text{пр}} \cdot \left(1 + \frac{\gamma}{100}\right), \quad (3.3)$$

де γ – позавиробничі видатки підприємства - виробника, визначається за таблицею та дорівнює 5%.

$$C_{\text{п}} = 6447,12 \cdot \left(1 + \frac{0,05}{100}\right) = 6450,35 \text{ грн.}$$

Оптова відпускна ціна запроєктованої установки визначається за формулою:

$$Ц_{\text{п}} = C_{\text{п}} + \Pi + \text{ПДВ}, \quad (3.4)$$

де ПДВ – прибуток на додану вартість (20% від $C_{\text{п}} + \Pi$), грн; Π – прибуток, що включається в ціну установки, грн:

$$\Pi = \frac{C_{\text{п}} + R}{100}, \quad (3.5)$$

де R – очікувана рентабельність виробництва установки, % (в межах 30%).

$$\Pi = \frac{6450,35 + 0,3}{100} = 19,35 \text{ грн;}$$

$$\text{ПДВ} = (C_{\text{п}} + \Pi) \cdot 0,2 = (6450,35 + 19,35) \cdot 0,2 = 1293,94 \text{ грн;}$$

$$Ц_{\text{п}} = 6450,35 + 19,35 + 1292,94 = 7764 \text{ грн.}$$

3.3 Висновок за розділом 3

Отже, під час розрахунку економічної частини встановлено оптову відпускну ціну запроєктованої вітроустановки в розмірі 7764 гривень. Отримана вартість вітроустановки є набагато меншою ніж вартість аналогічних моделей на ринку, які коштують від 15000 гривень. Тому її виготовлення для цілей кафедри логічне ніж купівля нової.

ВИСНОВКИ

В ході даної роботи було виконано наступне:

- Розглянута класифікація та способи реалізації вертикально-осьових ВСУ. Описані основні їх види, а також вказані параметри за якими визначають ефективність того чи іншого типу ротора;
- Досліджено аеродинамічні характеристики ротора Савоніуса барабанного типу. Розраховано основні величини та встановлено як вони залежать від зміни геометричних розмірів ротора. Розроблена конструкція вітрогенератора;
- Проведено техніко-економічний розрахунок. Розраховані витрати, пов'язані з виготовленням вітроустановки.

Виходячи з вищесказаного, можна зробити висновок, що поставлені задачі були виконані. Подальші дослідження треба проводити в напрямку більш детальних дослідів аеродинаміки ротора Савоніуса та виконувати експериментальні дослідження в лабораторних та натурних умовах.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бордюгов В. Мифы и реалии украинской ветроэнергетики / В. Бордюгов, В. Подгуренко // Зеркало недели. – 2002. – № 17.
2. Костюков И. Ю. Вертикально-осевая ветроустановка мощностью 20 кВт / И. Ю. Костюков, В. А. Михайлов, П. Г. Капля, О. Л. Перфилов // Энергетик. – 1997. – № 10. – С. 14.
3. Виброусталостные испытания опорной башни ветроэнергетической установки ЭСО-0020: научно-технический отчет / ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского; рук. Стучалкин Ю. А.; исполн. Нестеренко Г. И. – 1996. – 41 с.
4. Яковлев А. И. Расчет ВЭУ с вертикальной осью вращения. Расчет ветротурбин с вертикальной осью вращения / А. И. Яковлев, М. А. Затучная. 146 – учеб. пособие по курсовому проектированию. – Харьков: Нац. аэрокосмический ун-т «Харьковский авиац. ин-т.», 2002. – 61 с
5. Anthony L. Rogers. Wind Turbine Acoustic Noise / Rogers L. Anthony // Renewable Energy Research Laboratory, Department of Mechanical and Industrial Engineering, – USA : University of Massachusetts, 2002. – 3 с.
6. Безруких П.П., П.П. Безруких (мл.), С.В. Грибков Ветроэнергетика. Справочно-методическое издание. «Теплоэнергетик» Москва, 2014 – Том 1, УДК 621.47
7. Some aspects of Vertical Axis Wind Turbines (WAVTs) A Review / Ghosh Animesh, Gupta Rajat, Sinha Abhigit, etc. // ISESCO Journal of Science and Technology, November 2013. – Vol. 9. – pp. 68–73.
8. Sharma K. K. Performance Measurement of a Three-Bladed Combined Darrieus-Savonius Rotor / Sharma K. K., Biswas A., Gupta R. // International Journal of Renewable Energy Research. – Vol 3. – No 4, – 2013.
9. M. Ragheb. Vertical Axis Wind Turbines / Ragheb M.

10. IEC 61400-12-1 Ed.1: Wind turbines - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines, AWEA, 2009;
11. IEC 61400-2:2006: Wind turbines - Part 2: Design requirements for small wind turbines, AWEA, 2009;
12. International Electrotechnical Commission IEC 61400-11 Standard: Wind Turbine Generator Systems – Part II: Acoustic noise measurement techniques (IEC, 2001). МЭК 61400-11:2002 (E).
13. Успехи физических наук: научно-популярный журнал: Эффект Магнуса и ветряной корабль. 1925
14. EnergyLand: Интернет портал сообщества ТЭК: ВЭУ с вертикальной осью вращения: сравнительная оценка технических решений и перспективы развития. Режим доступа: <http://www.energyland.info/analitic-show-51412>.
15. Шишкин Н. Д. Эффективное использование возобновляемых источников энергии для автономного теплоснабжения различных объектов: моногр. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2012. 208 с.

ДОДАТОК А

Відомість матеріалів магістерської дисертації

№ п/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість аркушів	Примітка
1	A4		Пояснювальна записка	61	
2	A4		Графічні матеріали презентації	13	

ВІДГУК

на магістерську роботу студента групи 141м-17-3 Борща І.О.
на тему Дослідження ефективності вертикального вітрогенератора
барабанного типу

Магістерська кваліфікаційна робота представлена пояснювальною запискою обсягом 61 сторінка, яка складається з пояснювальної записки обсягом 58 сторінок, списку використаної літератури з 15 найменувань на 2-х сторінках та 1 додатку. Графічна частина, представлена презентацією яка містить 14 слайдів формату А4.

Об'єктом дослідження є вертикальний вітрогенератор барабанного типу.

Мета даної роботи – дослідити енергетичні та аеродинамічні процеси у вертикальних вітрогенераторах барабанного типу.

Сучасна вітроенергетика базується в основному на застосуванні вітродвигунів двох основних видів: із горизонтальною віссю обертання та з вертикальною віссю обертання. Ротори останніх виконуються у вигляді вертикально розташованих лопатей. Вітроколесо вітроенергетичної установки з вертикальною віссю обертання внаслідок своєї геометрії за будь-якого напрямку вітру знаходиться у довільному положенні, крім того, така схема дозволяє за рахунок тільки подовження вала встановити редуктор з генераторами в основі вежі.

До найпоширеніших типів вертикально-осьових установок належить ротор Дар'є та ротор Савоніуса.

Ротор Савоніуса - це самі тихохідні установки, і як наслідок мають низький КВЕВ. Функцію лопатей виконують дві циліндричні поверхні. Момент, що обертає створюється завдяки різному опору, що чиниться повітряному потоку лопатями ротора. Для ротора Савоніуса притаманні великі пускові крутний момент, робота при відносно низьких швидкостях вітрах (3-5 м/сек) і відносно висока технологічність виробництва. Недоліками ротора Савоніуса є – менша ефективність роботи лопатевої системи; велика

матеріаломісткість; низький коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ близько 15%).

Один з варіантів ротора Савоніуса - ротори барабанного типу. Дослідження таких роторів і було доручено магістру. На кафедрі відновлюваних джерел енергії було створено конструкцію такого ротору і в межах магістерської дисертації він був досліджен. В результаті виконаного аналізу не враховано точну взаємодію великої кількості лопатей з повітряним потоком та вплив сильних повітряних вихорів, що утворюються лопатями під час розсікання повітряної маси. Це впливає на точність розрахунку відносного обертового моменту. Тому треба проводити більш детальні дослідження аеродинаміки ротора Савоніуса та виконувати експериментальні дослідження в лабораторних та натурних умовах.

Не зважаючи на це з поставленою задачею студент впорався.

Зауважень до магістерської дисертації немає.

В цілому, магістерська робота виконана на високому рівні, простежується логічний зв'язок між розділами, всі розрахунки проведені у відповідності із загальноприйнятими методиками. Основна мета досягнута, поставлені задачі виконані.

Виконана робота заслуговує оцінки «відмінно» (98 балів), а його автор Борщ Іван Олегович присвоєння кваліфікації "інженер-електрик в електроенергетичній сфері".

Керівник,

к.т.н, доцент,

доцент кафедри

відновлюваних джерел енергії

Д.В. Ципленков