

**Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова**

Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки
(повне найменування інституту, назва факультету)

Суднових електроенергетичних систем
(повна назва кафедри)

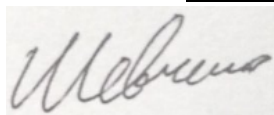
Рекомендовано до захисту
 Завідувач кафедри СЕЕС
д.т.н., доц. Обрубов А.В.
“05” червня 2026 року

Пояснювальна записка
до дипломної роботи
ОКР "Бакалавр"
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: Проектні дослідження асинхронного генератора у складі
вітроелектричної установки

Виконав: студент IV курсу, групи 4361
напряму підготовки (спеціальності)
141 "Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка"

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)



Шевченко Михайло Олегович

(прізвище та ініціали)



Керівник к.т.н., доц. Ставинський Р.А.

(прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н., доц. Білюк І.С.

(прізвище та ініціали)

м. Миколаїв 2026 р.

**Національний університет кораблебудування імені адмірала
Макарова**

Інститут Навчально-науковий інститут автоматики і електротехніки
Кафедра Суднових електроенергетичних систем
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Напрямок підготовки 271 "Річковий та морський транспорт"
(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Гарант освітньої програми

д. т. н., проф.

Волянська Я. Б.



"15" лютого 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Шевченко Михайло Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Проектні дослідження асинхронного генератора у складі вітроелектричної установки.

керівник роботи Ставинський Р.А., к.т.н., доцент,

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

затверджені наказом НУК від "22" квітня 2026 р. №286-уч.

2. Строк подання студентом роботи до 15.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: номінальна потужність генератора 110 кВт; синхронна частота обертання $n_1=1500$ об/хв.; номінальна напруга 380/220 В.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 4.1. Аналіз конструктивних схем вітроелектричних установок.

4.2. Вітроелектричні установки с асинхронними генераторами.

4.3. Розрахунок асинхронного генератора для комплектації ВЕУ.

4.4. Охорона праці.

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

5.1. Конструктивні схеми ВЕУ.

5.2. Загальна схема побудови вітроелектростанції.

5.3. Модуль головки вітроелектричної установки.

5.4. Асинхронний генератор для комплектації ВЕУ.

6. Консультанти розділів роботи

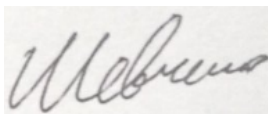
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
4	Ставинський Р.А., доцент		
			3.06.2026

7. Дата видачі завдання 15.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз конструктивних схем вітроелектричних установок.	6.04.2026	виконано
2	Вітроелектричні установки с асинхронними генераторами.	20.04.2026	виконано
3	Розрахунок асинхронного генератора для комплектації ВЕУ.	7.05.2026	виконано
4	Охорона праці.	3.06.2026	виконано

Студент

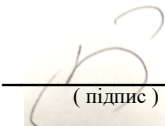


(підпис)

Шевченко М.О.

(прізвище та ініціали)

Керівник



(підпис)

к.т.н., доц. Ставинський Р.А.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У дипломній роботі розглядаються питання обґрунтування конструкторсько-технологічних рішень та проектування асинхронного генератора вітроенергетичної установки (ВЕУ).

Виконано аналіз особливостей схем генерування електроенергії, основних конструктивних типів вітроелектричних установок, а також доцільність використання вітроустановок на Півдні України, зокрема в Миколаївській області. Розглянуті фізичні процеси електромеханічного перетворення енергії в електричних генераторах, пристрій типових ВЕУ і генераторів, загальні схеми генерування та використання електроенергії, енергетичні характеристики. Основним вузловим питанням проекту є формування оптимального технічного рішення по розробці асинхронного генератора для комплектації ВЕУ. Відповідно завданню на дипломне проектування виконано аналіз технічних рішень, визначена методика та виконано розрахунок асинхронного генератора з короткозамкненим ротором.

Ключові слова: вітроелектрична установка, асинхронний генератор.

ANNOTATION

Thesis deals with the issues of substantiation of design and technological solutions and design of asynchronous wind turbine generator.

The main key issue of the project is the formation of the optimal technical solution for the development of an asynchronous generator for wind turbines. According to the task for diploma design the analysis of technical decisions is executed, the technique is defined and the calculation of the asynchronous generator with a short-circuited rotor is executed.

Keywords: Wind Power Plant, Asynchronous Generator.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ СХЕМ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК	7
1.1. Постановка загальної мети дипломної роботи	8
1.2. Фізичні основи використання енергії вітру	12
1.3. Різновиди вітроелектричних установок	15
1.4. Висновки до розділу 1	19
2. ВІТРОЕЛЕКТРИЧНІ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ	20
2.1. Схеми генерування і використання електроенергії при різноманітних режимах роботи ВЕУ	21
2.2. Мереживі вітроелектричні установки з асинхронними генераторами ..	30
2.3. Особливості роботи ВЕУ з асинхронним генератором паралельно з мережею	38
2.4. Висновки до розділу 2	42
3. РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦІЇ ВЕУ	43
3.1. Розрахунок головних розмірів та геометрії статора і ротора	44
3.2. Розрахунок магнітного кола	51
3.3. Розрахунок параметрів робочого режиму	53
3.4. Розрахунок втрат	56
3.5. Розрахунок робочих характеристик	58
3.6. Тепловий розрахунок	65
3.7. Висновки до розділу 3.....	68
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	69

4.1. Аналіз впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що впливають на людину	72
4.2. Заходи з техніки безпеки	77
ВИСНОВКИ.....	81
ЛІТЕРАТУРА	82

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Характерною рисою розвитку сучасної енергетики є широке залучення до енергобалансу передових країн світу поновлюваних джерел енергії. Впровадження вітроенергетичних установок (ВЕУ) є досить перспективним напрямком в енергетиці. При цьому можливе вирішення не тільки енергетичної проблеми, пов'язаної з вичерпанням традиційних енергоносіїв, а ще й покращення загальної екологічної обстановки за рахунок зменшення викидання в атмосферу шкідливих речовин тепловими електростанціями. Становлення вітроенергетики як нової і перспективної складової паливно-енергетичного комплексу базується на потужному науково-технічному потенціалі країни.

Найбільш поширеними є ВЕУ, які працюють паралельно з енергосистемою. Вони більш надійні та дешеві ніж автономні вітроелектростанції, а також мають відносно нескладну систему керування і менш енергоємні. Використання вказаних ВЕУ дозволяє отримати значний економічний ефект [1].

Енергія вітру протягом тривалого часу розглядається в якості екологічно чистого невичерпного джерела енергії. Перш ніж енергія вітру зможе принести значну користь, повинні бути вирішені багато проблем, головні з яких: висока вартість вітроенергетичних установок, їхня здатність надійно працювати в автоматичному режимі протягом багатьох років і забезпечувати безперебійне електропостачання. Тому, сьогодні найбільш важливим завданням перед вітроенергетикою є зниження питомої вартості електроустаткування ВЕУ. Одним зі шляхів зниження вартості є застосування більше економічних структур електроустаткування ВЕУ.

В дипломній роботі розглядаються питання вдосконалення системи електропостачання, за рахунок впровадження вітроенергетичної установки, на яку запропоновано встановити асинхронний генератор.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. АНАЛІЗ КОНСТРУКТИВНИХ СХЕМ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

1.1. Постановка загальної мети дипломної роботи

Характерною рисою розвитку сучасної енергетики є широке залучення в енергобаланс передових країн світу відновлюємих джерел енергії (ВДЕ). В європейському співтоваристві ставиться задача подвоїти долю ВДЕ в загальному енергоспоживанні до 2020 року (з 6% в наш час до 12% в 2020 році) [1]. Фактично ці плани реалізуються з упередженням, при цьому відносний приріст потужностей ВДЕ значно перевищує цей показник для традиційних джерел – теплових і ядерних електростанцій. На початок 2016 року сумарна світова встановлена потужність електростанцій на ВДЕ склала біля 30 тис. МВт, а перше місце серед них займають вітроелектричні установки (ВЕУ) і вітроелектростанції (ВЕС) – близько 20000 МВт. І пов'язано це з практично повсемісцевій розповсюдженістю енергії повітряного потоку, його великим потенціалом та значними успіхами, досягнутими в світовій вітроенергетики за останні 10 – 15 років.

Європа, де вже зараз виробляється 70 - 75 % усієї вітротехніки, являється лідером в світовому виробництві та використанні енергії вітру. По даним Європейської енергетичної комісії протягом поточного десятиліття потужність ВДЕ в країнах Європи збільшиться до 40000 МВт і до 100000 МВт до 2020 року. Такий інтенсивний розвиток вітроенергетики спостерігається не тільки в Європі, а і в багатьох країнах світу. Це свідчить про те, що вітроенергетика як екологічно чисте відновлюєме джерело енергії в майбутньому стане одним з важливих джерел задоволення енергетичних потреби людства.

Орієнтирами для України можуть служити Національні програми США – до 2020 року ввести в стрій ВЕС загальною потужністю МВт; Данія – 9000 МВт до 2030 року. В Німеччині, яка займає по розвитку вітроенергетики друге місце після США, вже експлуатується близько 5000 установок загальної

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужності більш ніж 1500 МВт і планується до 2020 року подвоїти цю потужність.

Провідні країни планують до 2030 року довести долю вітрової енергії в національних енергобалансах до 15-50 % (Данія - 50 %, Германия - 30 %, США - 25 %, Китай - 15 %, Австралія -15%). Аналогічні програми мають Голландія, Іспанія, Англія і інші країни, при цьому потужність окремих вітроустановок збільшилася від 500 до 5000 кВт (виробники - провідні світові фірми Vestas, GET, Enron, Tacke, Nordex, Micon, Yakods, Sudwind, Genesys).

Реалізація цих планів в світовому масштабі в значній мірі призвана вирішити не тільки енергетичну проблему, пов'язану з неминучою вичерпністю традиційних енергоносіїв (вугілля, нафта, газ), але і стримати глобальне потепління на Землі, погіршення загальної екологічної ситуації, зв'язане з викидом в атмосферу, в основному з ТЕС, парникових газів (СО, СО₂) та інших шкідливих речовин (окислів сірки, азоту та ін.), руйнівні наслідки яких все ясніше проявляються в останні роки.

Практика показує, що швидше розвивається ВЕУ, працюючі паралельно з енергосистемою. Автономні установки через складності системи керування не завжди надійні та менш енергомісткі, і цей напрямок стримується через ряд проблем технічного та теоретичного характеру. Однак це не заважає їх широкому практичному використанню. Так, в 2000 році в світі функціонувало більш ніж 1 млн. ВЕУ потужністю 0,5 – 5 кВт, які використовувались в основному для господарських потреб. За останні 7 років приблизно 100 фірмами випущено більш ніж 100 тис. одиниць ВЕУ загальною потужністю 2 млн. кВт і вартістю близько 3 млрд. дол.; як правило з каталогів, їх вартість складає в середньому 900-2200 дол. США за 1 кВт встановленої потужності. Вироблена цими ВЕУ електроенергія тільки за один рік складала більш ніж 3,2 млрд. кВт·ч.

І все одно ринок автономних ВЕУ зовсім не наповнений; ВЕУ невеликої потужності (1–15 кВт) користуються широким попитом як більш дешеві, ніж дизельні установки, автономні джерела енергії, при цьому

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вартість виробляємої ними електроенергії сумісна з її вартістю на вугільних теплових електростанціях. Зі зростанням потужності ВЕУ собівартість електроенергії що виробляється падає; наприклад, при переході до потужності ВЕУ від 15 на 200 кВт вона зменшується в два з лишнім рази. Крім цього, зростає експлуатаційна надійність, а річні витрати на експлуатацію і технічне обслуговування не перевищує 2% від вартості установки [1].

Плани України по впровадженню вітроенергетики дійсно непогані. Стартувавши на початку 90-х років і пройшовши ряд невдалих випробувань, сьогодні вона впевнено виходить на збалансований і більш реальний план розвитку. Тут інтенсивне впровадження вітроенергетики ведеться в співвідношенні з Комплексною програмою будування ВЕУ, розробленої відповідно Указу Президента України [2]. Виготовлені та експлуатуються на кінець 2010 року ВЕУ сумарною потужністю 12,7 МВт. Загальна кількість ВЕУ українського виробництва потужністю більш 100 кВт, встановлених на існуючих ВЕУ, перевищує 500 одиниць. В основному це ліцензійні ВЕУ серії USW56-100 номінальної потужності 107,5 кВт виробництво СП Уінденерго ЛТД. В подальшому це ВЕУ АВЭ-250С (200 кВт при діаметрі вітроколеса 25 м і 250 кВт при діаметрі вітроколеса 31,4 м), ВЕУ-220 (250 кВт) і ВЕУ-500 (500 кВт), розроблені ГКБ «Южне» та виготовлені ПО «Зоря». На Євпаторійській ВЕУ в 1997 році змонтована єдина в своєму роді вертикально-осьова ВЕУ ЕСО-420 потужність 420 кВт розробки та виробництва фірми «Енергетичні системи та обладнання». Опит експлуатації всіх названих ВЕУ характеризується відносно невисоким коефіцієнтом використання встановленої потужності (6 –15 %), що з'єднано, з однією стороною, зі слабким вітровим потенціалом в місцях розміщення деяких ВЕУ, а з іншої – з недостатньою надійністю окремих вузлів і зв'язаними з цим зупинками ВЕУ для профілактики і ремонту.

По планам розвитку ВЕУ в Україні до 2020 року загальна потужність ВЕУ повинна досягти 1990 МВт, а до 2030 року – 16000 МВт, при цьому

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

річне виробництво електроенергії на базі ВЕУ планується вивести на рівень 20 – 35 % від загальної кількості електроенергії що виробляється в країні [2].

Перспективними для залучення вітроенергетики України являються райони, де середньорічні швидкості вітру перевищують 5 м/с. Це Азово-Чорноморська зона, до якої входить Миколаївська область, де середньорічні швидкості вітру досягають 6,5 - 7,5 м/с. В Україні зараз працює 6 вітроелектричних станцій, а усього змонтовано (і монтується) 11 ВЕУ з названою вище встановленою потужністю. В складі існуючих енергосистем планується будівництво ВЕУ в Харківській області (Старий Салтов, Печенежське і Комсомольське водозбереження) і інші райони.

Відомо, що енергетичний потенціал вітру на воді вище, ніж на суші, в 2 - 3 рази. Тому в ряді країн вітростанції розміщують на мілководдя, що дозволяє підвищити ефективність їх використання. Так, наприклад, пілотний проект офшорної ВЕС «Борлум Вест» в Німеччині включає 12 вітротурбін по 5 МВт кожна, розміщених в 45 км на північ від острова Борлум в північному морі. В подальшому планується довести потужність цієї ВЕС до 1000 МВт. В планах розвитку вітроенергетики України - будівництво офшорних ВЕС на мілководних акваторіях Сиваша, Азовського і Чорного морів, Дніпробугського лиману, внутрішніх водоймищ. Сюди ж відносяться пропозиції про створення ВЕУ на понтонах або на сваях. Розрахунки показують, що за допомогою вітроустановок з таким розміщенням можна отримати 10 - 15 % усієї електроенергії, що виробляється в Україні.

Виходячи зі сказаного вище впровадження ВЕУ є досить перспективним напрямком в енергетиці. Основним завданням дипломної роботи є розробка вітроелектростанції, яка працює паралельно з мережею, що дозволить знизити енерговитрати та підвищити сумарну енергозабезпеченість, щодо встановлення новітнього обладнання. В роботі розглянуті фізичні процеси аеродинамічного і електромеханічного перетворення енергії в електричних генераторах, пристрій типових ВЕУ і генераторів, а також розраховано асинхронний генератор ВЕУ.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Фізичні основи використання енергії вітру

Вітер виникає в результаті постійного циркуляційного нерівномірного нагріву сонцем земної поверхні і є одним з невичерпних і достатньо могутніх природних енергетичних джерел.

Найважливішою енергетичною характеристикою вітру є його швидкість v . Під дією ряду метеорологічних чинників (обурення атмосфери, зміни сонячної активності і ін.), а також із-за впливу рельєфу місцевості швидкість і напрям вітру змінюються по випадковому закону.

Для визначення миттєвої швидкості вітру v_i , тобто швидкості за проміжок часу, вимірюваний секундами або навіть її долями, користуються спеціальними приладами – анемометрами.

Миттєва швидкість вітру визначає динамічну дію повітряного потоку на вітродвигун і впливає на роботу автоматичних систем регулювання. Кількість енергії, яку зможе виробляти вітроелектрична установка, залежить в першу чергу від середньої швидкості вітру як в часі, так і за площею поверхні.

Середня швидкість вітру v_{cp} за вибраний проміжок часу визначається відношенням суми виміряних значень миттєвої швидкості v_i до вимірювань n :

$$v_{cp} = \sum v_i / n [\text{м/с}] \quad (1.1)$$

Середньодобову швидкість $v_{доб}$ знаходять діленням на 24 суми середньогодинних швидкостей $v_{г}$, а середньорічну v_p – діленням на 365 сум всіх $v_{доб}$ за рік.

Оскільки швидкості вітру змінюється в різний час доби, різні місяці і сезони, при виборі місця розміщення вітростанції, при аеродинамічних і міцністних розрахунках ВЕУ, при проектуванні механізму, їх регулюванні і орієнтації розглядають графіки добового, місячного і сезонного розподілу швидкостей. Тому макроструктуру повітряного потоку, граничні значення швидкостей вітру, дані про його інтенсивність і мікроструктуру потоку за

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відносно короткі інтервали часу є важливими режимними характеристиками вітрового потоку.

Існує критерій, побудований на основі середньорічної швидкості вітру, при якій ВЕУ рентабельна і окупає себе. Ця швидкість знаходиться в діапазоні 5,1 – 5,9 м/с. Відповідно [3] на південному сході України середня швидкість вітру близька до такого показника, а отже, є всі умови для розміщення в цих регіонах як автономних ВЕУ, так і великих мережевих вітропарків.

Вітер – це складний геофізичний процес, який можна прогнозувати тільки з певним ступенем вірогідності, використовуючи методи стохастичної мінливості інтенсивності потоку як у вибраному інтервалі часу, так і на обмеженому просторі.

Важливою його характеристикою є також вертикальний профіль швидкостей вітру в приземному шарі. Вплив земної поверхні на швидкість і напрям вітру зменшується у міру збільшення висоти, коли швидкість поступово зростає, а поривчастість і прискорення потоку знижується. Градієнт швидкостей влітку, як правило, менше, ніж взимку, коли вертикальний перепад температур відносно невеликий.

При адіабатичному градієнті вертикальний профіль вітру $v = f(h)$ апроксимується залежно від виду [4]

$$v = v_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^{\frac{1}{5}}, \text{ або } v = v_1 \frac{l_g \frac{h}{h_0}}{l_g \frac{h_1}{h_0}}, \quad (1.2)$$

де v_1 – швидкість вітру, виміряна поблизу землі на висоті h_1 ; v – шукана швидкість на висоті h ; h_0 – висота, на якій швидкість вітру рівна нулю. Величина h_0 залежить від жорсткості підстилаючої поверхні (для сніжного покриву $h_0 \approx 0,5$ см, для поверхонь з низькою травою $h_0 \approx 3,2$ см, з вищими рослинами $h_0 \approx 5 - 7$ см, $h_{0max} \approx 20$ см).

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Встановлена залежність розрахункової швидкості вітру від заданої середньорічної швидкості вітру. Для вибору розрахункової або, як її називають, встановленої швидкості вітру v_y по відомій середньорічній швидкості вітру $v_{\text{ср.год}}$ за допомогою таблиці М.М. Поморцева, приведеною в роботі [5], були проведені вибірки річного вироблення $v^3 t_p$, де v – робоча швидкість вітру, а t_p - повторюваність цієї швидкості за рік, виражена в годинах.

Напрямок вітру зазвичай грає меншу роль з точки зору ефективності роботи ВЕУ. Проте в різних ландшафтах вітри різних румбів мають неоднакову поривчастість і швидкість. Їх повторюваність визначають по розі вітрів – графіку, що показує, який відсоток залежно від часу пори року вітер має той чи інший напрям. Кутові градієнти швидкості істотно впливають на роботу механізмів автоматичної орієнтації і на величину гіроскопічних навантажень.

Кінетична енергія повітряного потоку визначається відомим співвідношенням

$$E_{\text{нов}} = \frac{1}{2} m v^2 \text{ [Дж]}. \quad (1.3)$$

Маса m повітря, що протікає із швидкістю v через перетин s в 1с,

$$m = \rho s v \left[\frac{\text{кг}}{\text{с}} \right], \quad (1.4)$$

де ρ – щільність повітря ($\rho = 1,23 \text{ кг/м}^3$ при температурі $t=15^\circ\text{C}$ і атмосферному тиску 760 мм рт. ст.); s – площа перетину, м^2 .

Підставляючи (1.3) в (1.4), отримуємо енергію повітряного потоку

$$E_{\text{нов}} = \frac{1}{2} \rho s v^3 \quad (1.5)$$

Співвідношення (1.5) для круглого перетину $s = \pi R^2$ може бути записано у вигляді

$$E_{\text{нов}} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3, \quad (1.6)$$

де R – радіус перетину, м.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, кінетична енергія вітру пропорційна кубу його швидкості і площі поперечного перетину s . Енергії вітру властива низька щільність і нестабільність. Саме ця обставина обумовлює складність і створює обмеження для його використання в широких масштабах. Для збільшення вихідної потужності ВЕУ доводиться збільшувати діаметр вітроколеса і забезпечувати оптимальні параметри профілю лопотів.

1.3. Різновиди вітроелектричних установок

Сучасна вітроенергетика базується в основному на застосуванні вітродвигунів (ВД) двох основних видів – горизонтально-осьові пропелерні ВД з горизонтальною віссю обертання (рис. 1.1) і вертикально-осьові ВД (або ортогональні) з вертикальною віссю обертання (рис. 1.2). Ротори останніх виконуються у вигляді вертикально розташованих лопастей або в спеціальному виконанні – ротори «Дарині».

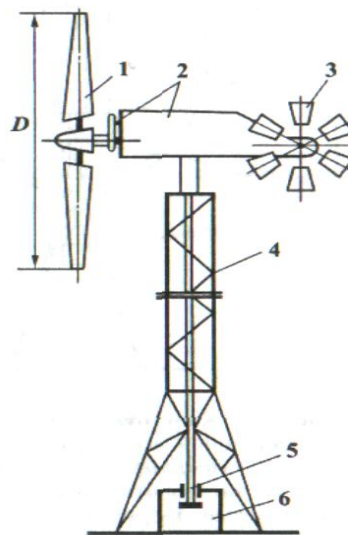


Рис. 1.1. Конструктивна схема ВЕУ з горизонтальною віссю обертання типу «Пропелер»: 1 – робоча лопасть; 2 – трансмісія (мультиплікатор); 3 – віндроза; 4 – вежа; 5 – вал відбору потужності; 6 – електрогенератор.

В горизонтально-осьових ВД вітрове колесо має крилоподібну форму і обертається у вертикальній площині, перпендикулярній напрямку вітру, а

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вісь вітроколеса паралельно потоку. Основною обертаючою силою у коліс цього типу є підйомна сила лопастей.

Щодо вітру вітроколесо в робочому стані може розташовуватися перед опорною вежею або за нею. При передньому розташуванні вітроколесо повинне мати аеродинамічний стабілізатор або який-небудь інший пристрій, що утримує його в робочому положенні. При задньому розташуванні вежа частково затінює вітроколесо і турбулізує набігаючий на нього потік.

При роботі колеса в таких умовах виникають циклічні навантаження, підвищений шум і флуктуації вихідних параметрів вітрової установки. Напрямок вітру може змінюватися досить швидко і вітроколесо повинне чітко відстежувати ці зміни, повертаючись на крилі за рахунок серводвигуна.

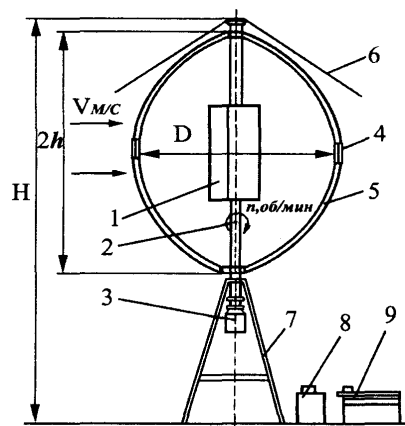


Рис. 1.2. Конструктивна схема ВЕУ з вертикальною віссю обертання типу «Дарье»: 1 – стартер (ротор Савоніуса); 2 – вал; 3 – електрогенератор; 4 – гальмівний пристрій; 5 – робоча лопасть; 6 – розтяжки; 7 – рама; 8 – перетворювач напруги; 9 – акумулятор.

В таких ВЕУ звичайно використовуються двох-, трилопасні вітроколеса, при цьому останні відрізняються дуже плавним ходом. Електрогенератор і редуктор, що сполучає його з вітроколесом, розташовані звичайно нагорі опорної башти в поворотній частині. З погляду експлуатації зручніше розміщувати їх внизу, але виникаючі при цьому складності з передачею моменту, знижують переваги такого розміщення.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Горизонтально-осьова вітроенергетична установка на рис. 1.1 містить трилопасну головку вітродвигуна 1, трансмісію – мультиплікатор 2, віндроузу 3, вал відбору потужності 5 і електрогенератор 6. Гондола встановлена на ферменній зварній вежі 4.

Головка вітродвигуна має пристрій ручного управління і автоматичної стабілізації швидкості обертання вітроколеса у разі зміни швидкості вітру v . Для орієнтації вітродвигуна за напрямом вітру в задній частині гондоли встановлена віндроуза 3, що приводить в рух механізм повороту гондоли при зміні напрямку вітру. До вихідного валу трансмісії редуктора приєднаний вертикальний вал відбору потужності 5 з електрогенератором 6.

Вітроколесо ВЕУ з вертикальною віссю обертання в наслідок своєї геометрії при будь-якому напрямі вітру знаходиться в довільному положенні. Крім того, така схема дозволяє за рахунок тільки подовження валу встановити редуктор з генераторами в підставі башти (рис. 1.2). До найпоширеніших типів вертикально-осьових установок відноситься ротор «Дарье». В ньому обертаючий момент створюється підйомною силою, яка виникає на двох або трьох тонких зігнутих несучих поверхнях, що мають аеродинамічний профіль. Підйомна сила максимальна в той момент, коли лопасть з великою швидкістю перетинає набігаючий повітряний потік. Ротор «Дарье» розкрутитися самостійно, як правило, не може, тому для його запуску звичайно використовується генератор, що працює в режимі двигуна, або статор, що носить назву ротора Савоніуса. Це колесо також обертається силою опори. Його лопасті виготовленні з тонких зігнутих листів прямокутної форми, відрізняються простотою й дешевизною. Обертаючий момент створюється завдяки різному опору повітряному потоку, що набігає, між вгнутою і вигнутою лопастями ротора. Через велике геометричне заповнення це вітроколесо має великий обертовий момент і використовується для перекачування води.

Широке застосування у якості генераторів вітрових установок знаходять наступні типи електричних машин – синхронні, асинхронні, з постійними

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

магнітами, індукторні, в яких перетворення енергії відбувається за рахунок зміни індуктивності (потокощеплення) обмоток, розташованих на двох основних частинах – статорі і роторі.

За родом струму вони розподіляються на машини змінного і постійного струму. Машини змінного струму діляться на синхронні і асинхронні, а також на колекторні машини змінного струму.

В синхронних машинах кутова швидкість обертання ротора Ω_p і кутова швидкість обертання магнітного поля статора Ω_1 рівні між собою. Частота ЕРС і струмів, що генерується в статорі визначається швидкістю обертання ротора n і числом пар полюсів p його обмотки збудження

$$f = \frac{pn}{60}.$$

В асинхронних машинах кутові швидкості Ω_p і Ω_1 не рівні між собою, при цьому в генераторному режимі роботи $\Omega_p > \Omega_1$.

Частота генеруємих ЕРС і струму в асинхронних генераторах і його ковзання рівні:

$$f = \frac{pn_p}{60}(1-s);$$

$$s = \frac{\Omega_p - \Omega_1}{\Omega_p}.$$

Колекторні машини відрізняються від синхронних і асинхронних тим, що мають механічний перетворювач частоти і числа фаз – колектор, який сполучений з обмоткою статора або ротора [8].

Машини постійного струму також мають на роторі колектор, який виконує функцію механічного випрямляча в генераторах і механічного інвертування в двигунах.

Якщо в електричній машині обертається тільки один елемент – ротор, то вона називається одновимірною.

Електромагнітний момент в машині, створений внаслідок взаємодії магнітних полів і струмів в обмотках, в рівному ступені діє на статор і ротор.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому можливі конструктивні виконання, коли обертаються в протилежні сторони статор, і ротор. В цьому випадку електрична машина є двомірною (її називають ще біротативною).

Ротор електричної машини змінного струму не має обмоток збудження. В таких машинах магнітне поле збудження створюється постійними магнітами і вони називаються генераторами з постійними магнітами.

Явно виражені конструкції полюсів на статорі і роторі належать індукторним або параметричним машинам, в яких перетворення енергії здійснюється за рахунок періодичної зміни магнітного опору повітряного зазору. Конструктивні виконання індукторних машин дуже різноманітні. Вони можуть мати два статори з розміщеною між ними обмоткою збудження і два ротори, або один статор і ротор з явно вираженими, так званими кігтевидними полюсами, при цьому обмотка збудження розташовується або на роторі, або в торцевих частинах статора.

1.4. Висновки до розділу 1

1.4.1. Характерною рисою розвитку сучасної енергетики є широке залучення в енергобаланс відновлюємих джерел енергії, одним з видів яких є вітроенергетичні установки, використання яких дозволяє отримати значний економічний ефект.

1.4.2. Миколаївська область є перспективною для встановлення та експлуатації вітроелектричних установок. Середня швидкість вітру сягає 5,2 м/с, а використання ВЕУ доцільно коли середньорічна швидкість вітру знаходиться в діапазоні 5,1 – 5,9 м/с.

1.4.3. Для впровадження доцільно використовувати конструктивну схему ВЕУ з горизонтальною віссю обертання. Вказана схема має достатній пусковий момент і легко розкручується та вмикається до роботи при швидкостях вітру 3...5 м/с.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. ВІТРОЕЛЕКТРИЧНІ УСТАНОВКИ С АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

2.1. Схеми генерування і використання електроенергії при різноманітних режимах роботи ВЕУ

В даний час розроблено і застосовується значна кількість схем для перетворення енергії вітру в електричну енергію постійної або змінної напруги або для виконання механічної роботи.

Можливі технологічні схеми ефективного отримання електричної енергії за рахунок енергії вітру для автономної і мереженої роботи ВЕУ представлені на рис. 2.1.

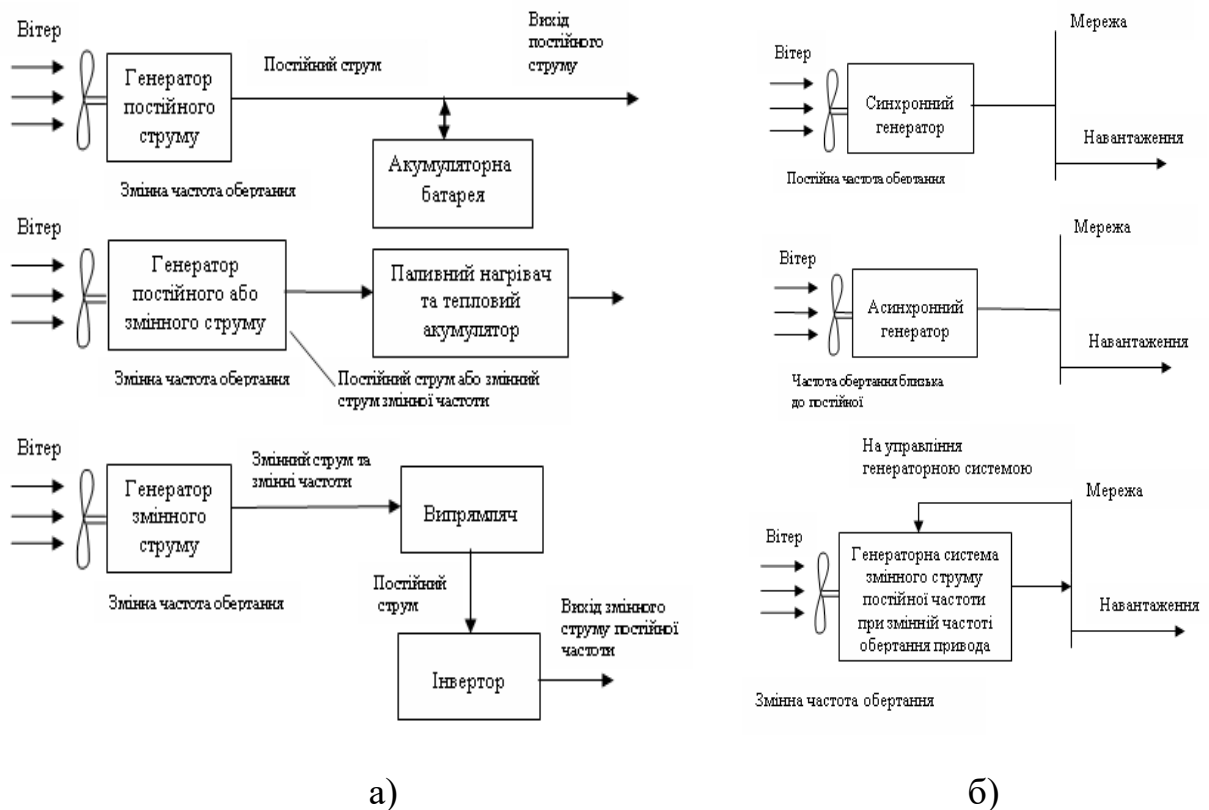


Рис. 2.1. Схеми генерування та використання електроенергії при автономній (а) та мережній (б) роботі ВЕУ

Генерація постійного струму здійснюється в даний час практично тільки на малих ВЕУ потужністю не більше 1–10 кВт. В цьому випадку не

потрібна постійна частота обертання вітродвигуна і звичайно застосовуються акумуляторні батареї.

В сучасних ВЕУ перетворення енергії вітру здійснюється в основному тільки в схемах з генерацією змінного струму. Наприклад, акумуляція енергії у вигляді теплоти з використанням її для опалювання приміщень може бути здійснена при застосуванні ВЕУ змінної напруги з частотою, що змінюється, або ВЕУ постійної напруги (рис. 2.1, а). Частота обертання вітродвигуна в цьому випадку не обов'язково повинна бути постійною. Застосування випрямляючих пристроїв дає можливість отримати постійну напругу, яка може бути використана безпосередньо або після її перетворення в змінну напругу постійної частоти [6].

Система з синхронною машиною. Для перетворення механічної енергії ВЕУ в електричну енергію змінної напруги постійної частоти в схемі генерації використовують синхронний генератор, що працює паралельно з мережею (рис. 2.1, б), при цьому потужність енергосистеми набагато більше потужності ВЕУ і електрична машина знаходиться в синхронізмі з мережею в широкому діапазоні потужності, розвивається вітродвигуном. До недоліків такої схеми відноситься те, що за певних вітрових умов синхронна машина може переходити в руховий режим і споживати енергію з мережі, а при різких поривах вітру з'являється імовірність її випадання з синхронізму. На рис. 2.2 наведений приклад, варіант синхронної тиристорної машини [6], яка складається із статора 1 з обмотками V , U , W , ротора 2, є постійним магнітом, і індикатора 3 кутові положення ротора, приєднаного до схеми 4 вмикання тиристорів.

Обмотки статорів машини приєднані до джерела 7 постійного струму через трифазний тиристорний перетворювач 5 і згладжуючий дросель 6. В блок управління введена схема 8 примусової комутації, що складається з трифазного діодного мосту 12, допоміжних тиристорів 13, 14, 15, джерела постійного струму 18, конденсатора 10, індуктивної котушки 16, резистора 17 і діодів 9, 11.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

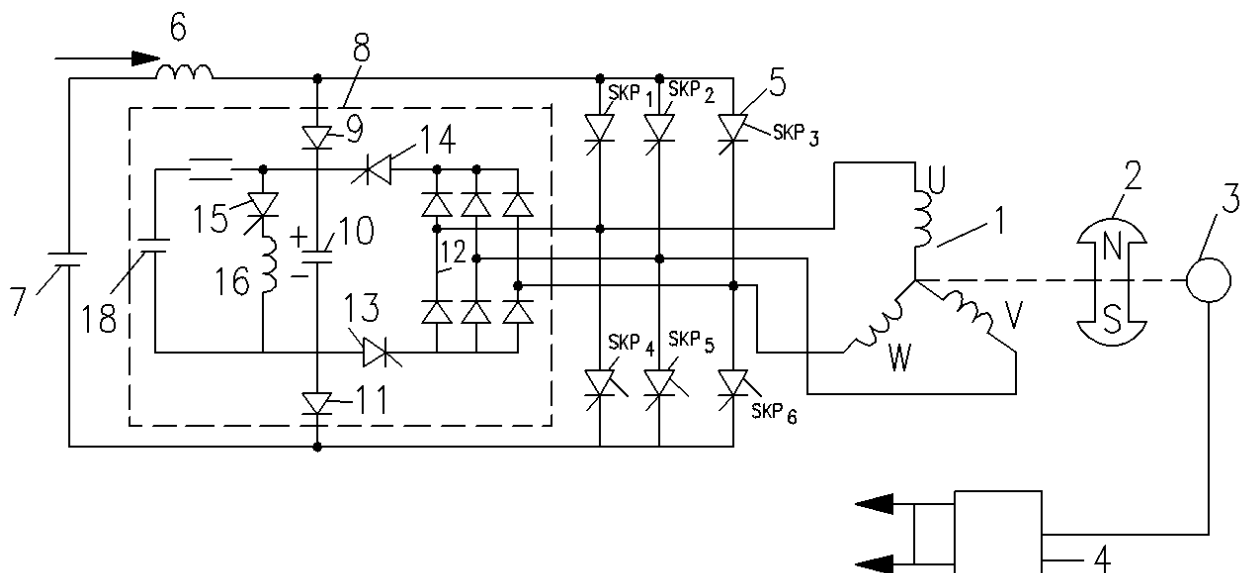


Рис. 2.2. Схема тиристорної синхронної машини

Схема вмикання 4 відкриває тиристор 13 одночасно з тиристорами SCR1, SCR2, SCR3 перетворювача 5, тиристор 14 – одночасно з тиристорами SCR4, SCR5 і SCR6, а тиристор 15 включається при кожному вмиканні перетворювача 5. В результаті такої комутації конденсатор 10 резонансного контуру з індуктивною котушкою 16 і допоміжним тиристором 15 підключається до тиристора перетворювача 5, який повинен переходити в непровідний стан. В ці моменти конденсатор 10 заряджений до напруги джерела постійного струму 18, яке прикладається до силових електродів відповідного тиристора у зворотному напрямі.

З інших схем з синхронним генератором представляє цікавість перетворювальна схема з вихідною напругою, модульованою низькою частотою [8]. В цій схемі напруга збудження синхронного генератора змінна з частотою 50 Гц. Вихідна напруга, модульована синусоїдальними коливаннями, випрямляється і подається на фільтр для отримання на виході змінної напруги з частотою 50 Гц. Принципово можливо створення ВЕУ, в якій вітрова двигун обертається із змінною частотою, а генеруюча система забезпечує отримання змінної напруги незмінної частоти, при якій електроенергія може бути подана в мережу. В такій ВЕУ використовуються

варіатори, тобто мультиплікатори із змінним передаточним відношенням або пристрої з гідравлічною передачею потужності.

На рис. 2.3. показана принципова схема генератора з постійними магнітами і перетворювачем. При допустимості прямокутної форми вихідної напруги на частоті 50 Гц можливий варіант перетворення на цій частоті, що дає можливість застосування генератора в трифазному виконанні, має в порівнянні з однофазним менший габарит і більш високий ККД.

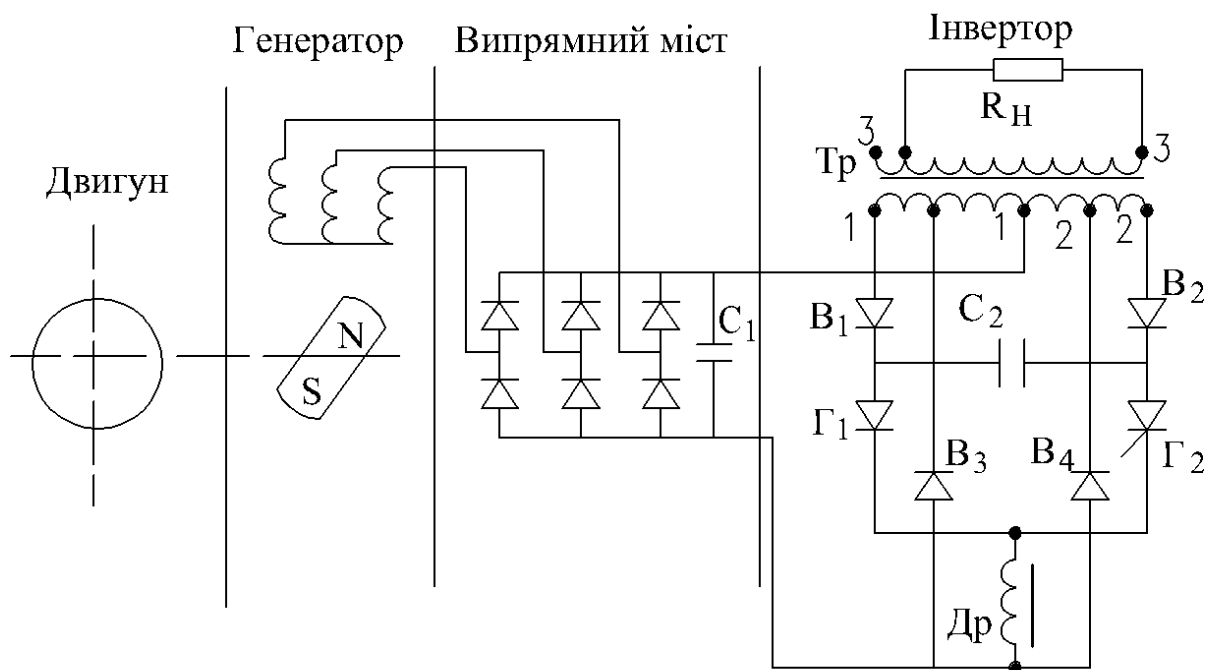


Рис. 2.3. Принципова схема синхронного генератора з постійними магнітами і інвертором

У ряді випадків виправданий перехід на частоту 400 Гц, що можливе при використанні електронного перетворювача з ланкою постійного струму. Як перетворювач може бути застосовано напівмостове інвертування або інвертування типу «Мак-Морі», що володіє стійкою комутацією при інвертуванні і допускаючий можливість регулювання напруги на виході. Як ланка постійного струму можливо використовувати трифазну схему випрямлення акад. А.Н. Ларіонова.

Працює інвертування таким чином. Постійна напруга з випрямного мосту подається на середню точку 1.2 трансформатори, тиристори T_1 і T_2

почергово відкриваються імпульсами з схеми управління. При відкритті, наприклад, тиристора T_1 конденсатор C_2 розряджається і замикає тиристор T_2 , і навпаки. При цьому у вторинній обмотці трансформатора T_p індукується змінна напруга.

Система з асинхронним генератором (рис. 2.1, б). Застосування асинхронного генератора (АГ) як перетворювач енергії вітрового потоку в електричну енергію дуже перспективно. Переваги АГ широко відомі. Це простота конструкції, висока надійність в експлуатації, що особливо важливо для ВЕУ, достатньо прості схеми включення на паралельну роботу з мережею і іншими джерелами електроенергії. Широкому використанню АГ у ВЕУ сприяє також, що як генератори можуть застосовуватися звичайні асинхронні двигуни.

Як відомо, асинхронна машина, підключена до трифазної мережі змінного струму при частоті обертання $n_2 > n_1$ (n_2 – частота обертання ротора, n_1 – частота обертання магнітного поля статора), автоматично переходить в генераторний режим. При цьому реактивну потужність, необхідну для створення магнітного поля, що обертається, машина отримує з мережі [10].

Робота асинхронної машини як автономного генератора може бути забезпечена, якщо подавати в обмотку статора реактивну потужність від батареї конденсаторів (рис. 2.4). В цьому випадку до виходу АГ, що приводиться в обертання вітроподвигуном, паралельно навантаженню Z_n в кожен фазу підключають конденсатор C . При активному навантаженні реактивна потужність Q_c що поступає від конденсатора 3, повинна дорівнювати реактивній потужності генератора Q_g , необхідної для створення магнітного потоку. При активно-індуктивному навантаженні потужність Q_c повинна покривати також реактивну потужність Q_n навантаження.

Самозбудження АГ можливо за наявності потоку залишкового намагнічування $\Phi_{ост}$ у феромагнітній частині магнітного ланцюга, який при обертанні ротора АГ наводить в обмотці статора ЕРС залишкового поля $E_{ост}$.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Звичайно при шихтованому роторі $E_{ост} = (0,02 - 0,03)U_{ном}$. Під впливом $E_{ост}$ в ланцюзі паралельної місткості виникає струм місткості (випереджаючий), який і підмагнічує машину.

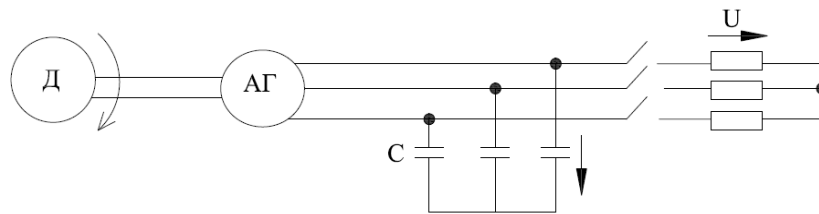


Рис. 2.4. Принципова схема асинхронного генератора з конденсаторним збудженням

Головна перевага асинхронного генератора полягає в тому, що напруга на його виході має постійну частоту при зміні частоти обертання ротора в деяких межах і йому властива велика стійкість при роботі на мережу, ніж у синхронної машини. Остання обставина дуже важлива в зв'язку з тим, що ВЕУ стають все більш потужнішими.

Недоліком цієї схеми є те, що при одному і тому ж вітровому режимі вона виробляє менше енергії, ніж синхронна машина, це пов'язано з меншим коефіцієнтом потужності, обумовленим великими струмами намагнічування, які приблизно пропорційні квадрату напруги. Слід також відзначити, що останній недолік компенсується зниженням витрат на механізми системи регулювання, оскільки у разі використання асинхронного генератора допускається менш точна підтримка частоти обертання вітроколеса.

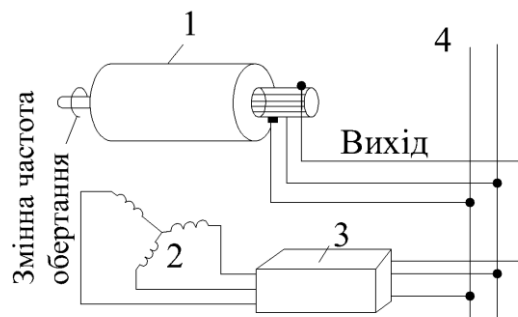


Рис. 2.5. Конструктивна схема колекторного генератора змінного струму:

1 – ротор генератора; 2 – обмотка збудження; 3 – блок керування.

Перевагами системи (рис. 2.5) є те, що частота напруги на виході генератора рівна частоті напруги збудження незалежно від обертання ротора.

В цьому відношенні машина колектора змінного струму подібна машині постійного струму. Якщо збудження машини здійснюється струмом з частотою 50 Гц, машина генеруватиме змінну напругу тієї ж частоти.

Конструктивно ця машина достатньо проста, її якір подібний якору машини постійного струму. Вартість колекторного генератора змінного струму близька до вартості генератора постійного струму.

Схему асинхронного генератора з живлячим ротором показано на рис. 2.6. Цей генератор подібний асинхронному генератору з фазним ротором із контактними кільцями, що дає можливість живлення обмоток ротора від додаткового генератора, що виробляє напругу з частотою ковзання. При цьому як величина, так і фаза вказаної напруги можуть змінюватися, що дозволяє підвищити коефіцієнт потужності генератора, а отже, і економічність цієї схеми в цілому.

Перевага такого асинхронизованого генератора полягає в тому, що напруга на його виході має незмінну частоту при зміні частоти обертання ротора в деяких межах і йому властива більша стійкість, ніж у синхронної машини. Остання обставина особливо важлива для ВЕУ великої потужності [11].

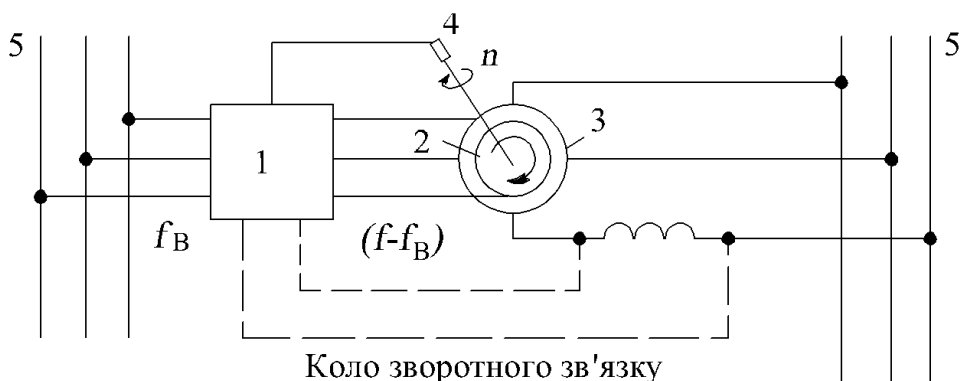


Рис. 2.6. Схема асинхронного генератора з живлячим ротором:

1 – генератор, що виробляє напругу з частотою ковзання; 2,3 – ротор і статор АГ; 4 – датчик частоти обертання; 5 – мережа.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Альтернативою конденсаторному збудженню АГ ВЕУ великої потужності є вентильне збудження генератора. При цьому використання автономного інвертування (АІН) дозволяє обмежитися для збудження АГ конденсаторами меншої ємності. Відповідно до методики розрахунку, приведеної в роботі [12], зробимо оцінку ємності конденсатора необхідної для схеми ВЕУ малої потужності з автономним інвертуванням. Вважається, що між АІН і АГ включений ідеальний фільтр (ІФ) (рис. 2.7, а). В цьому випадку при куті управління ключами в 180° струми фаз будуть синусоїдальними (рис. 2.7, б).

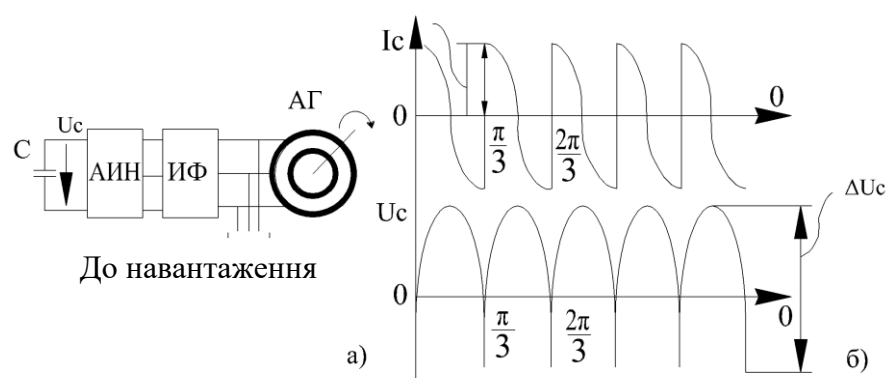


Рис. 2.7. Схема асинхронного генератора з вентильним збудженням (а) і форми кривих струму та напруги на конденсаторі (б)

На рис. 2.8 показана схема, в якій як керуючі ключі АІН використані тиристори, а інвертування забезпечує прямокутну форму вихідної напруги. ККД такої схеми вище, ніж конденсаторної, отже, збільшується ресурс акумуляторної батареї (АБ), що живить інвертор.

Розглянуті варіанти систем генерації електроенергії ВЕУ не вичерпують всього їх різноманіття. Розроблені і застосовуються синхронні генератори з частково-поперечним збудженням [13], генератори з випрямлячами і суміщеними обмотками [14], що обертаються, індукторні генератори з різнойменною полюсністю, асинхронні генератори з фазним ротором [5] та інші типи.

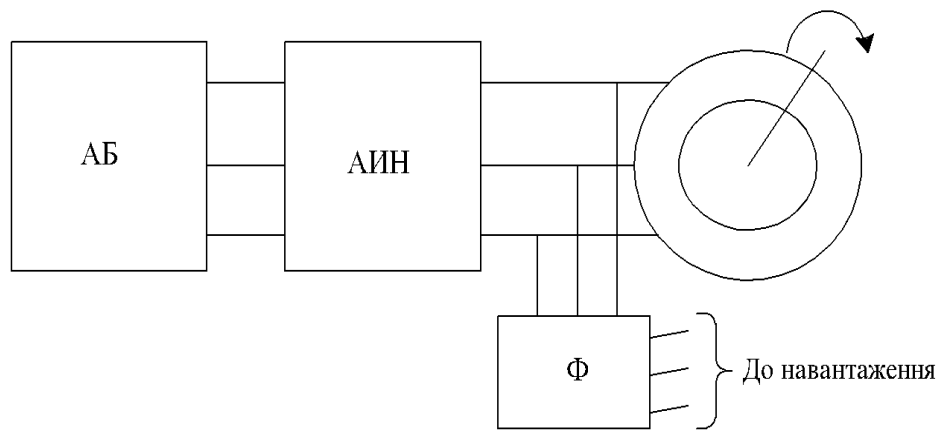


Рис. 2.8. Загальна схема генерування ВЕУ з асинхронним генератором з вентильним збудженням

Для асинхронної ВЕУ великої потужності дуже ефективним способом підвищення економічності, стабілізації напруги і частоти може бути використання синхронного компенсатора, який забезпечує асинхронну ВЕУ реактивним струмом намагнічення і дає можливість повної автоматизації процесу регулювання реактивної потужності, коефіцієнта потужності $\cos\phi$ і в певних межах стабілізувати напругу на клеммах генератора.

ВЕУ з асинхронним генератором з фазним ротором забезпечує відбір електромагнітної потужності як з боку статора, так і з боку ротора. При підключенні статора до енергосистеми в режимі генерації електромагнітна потужність безпосередньо поступатиме від нього в енергосистему з частотою мережі. Якщо при роботі асинхронної ВЕУ ротор асинхронного генератора замкнутий накоротко, то в каскадному варіанті він повинен з'єднуватися з перетворювальною схемою, що збільшує повний опір ланцюга ротора, що розширює робочий діапазон частот обертання в межах $n_o < n_p < 2n_o$ (де n_o – синхронна частота обертання, n_p – частота обертання ротора АГ).

Струм змінної амплітуди і частоти, що генерується ротором асинхронної машини, після регульованого випрямляча повинен фільтруватися для зниження пульсацій струму і вищих гармонійних складових в кривій напруги після випрямляча і інвертування.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Мереживі вітроелектричні установки з асинхронними генераторами

На рис. 2.9 зображена загальна схема побудови вітроелектростанцій, які споруджуються у теперішній час в Україні.

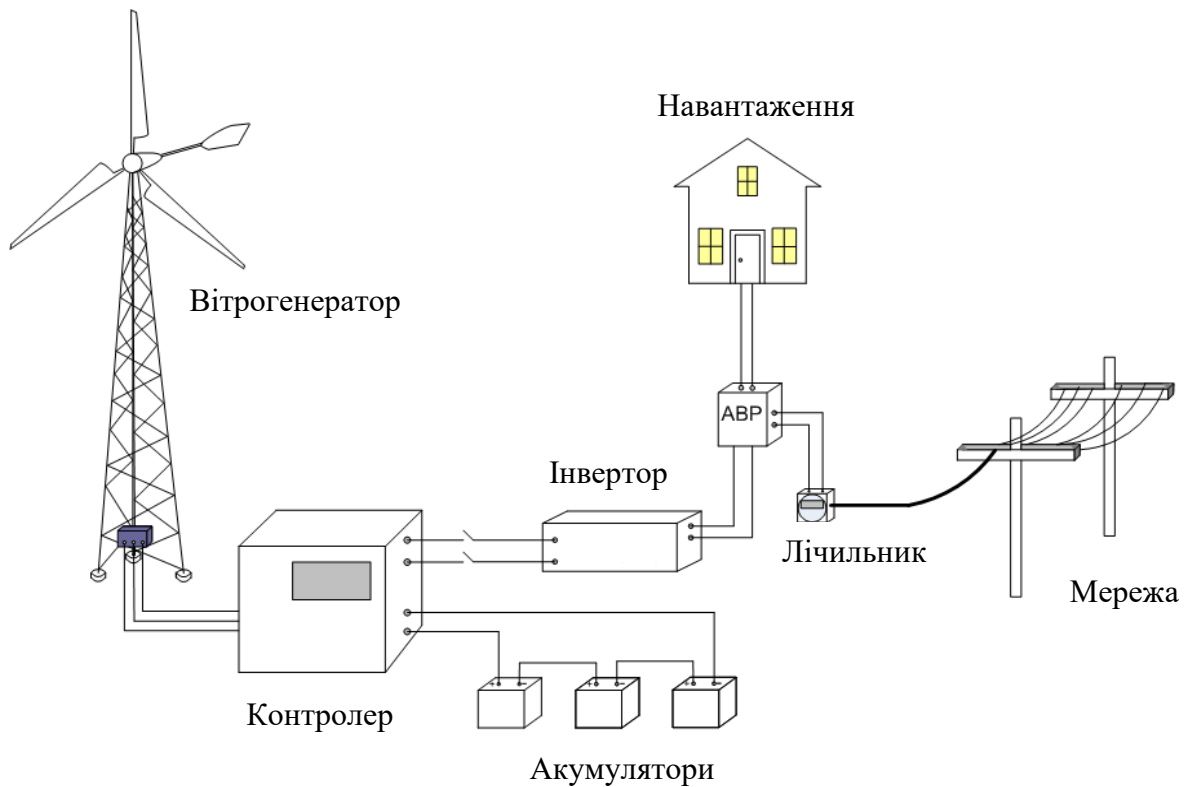


Рис. 2.9. Загальна схема побудови вітроелектростанції

До складу вітроелектростанції (ВЕС) окрім вітротурбіни входять: система управління ВЕС; метеовишки; комплектні трансформаторні підстанції; підстанції.

Система управління ВЕС забезпечує управління, контроль і облік роботи електростанції в цілому і вітрогенератора окремо.

Метеовишка призначена для визначення швидкості і напрямку вітру і передачі до системи управління цієї інформації.

Комплектна трансформаторна підстанція обслуговує групу вітрогенераторів і забезпечує підвищення напруги від генераторів вітротурбін до значення лінії електропередачі на підстанцію.

Підстанція призначена для передачі енергії від ВЕС в мережу і оснащена запобіжним обладнанням.

Конструктивна схема ВЕУ з асинхронним генератором представлена на рис. 2.10.

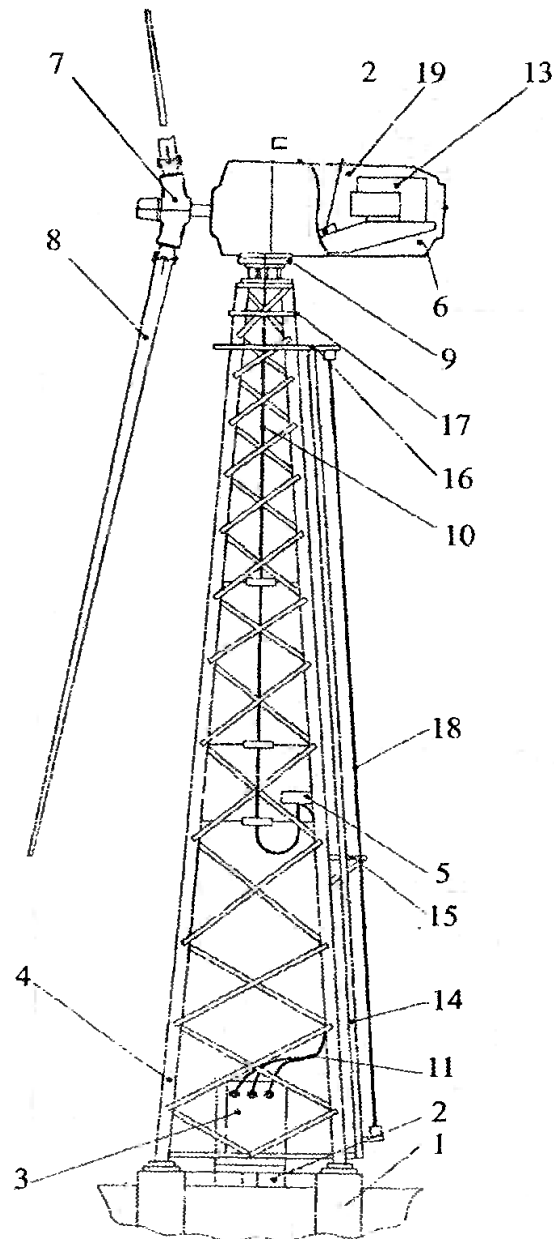


Рис. 2.10. Конструктивна схема вітроустановки:

- 1,2 – фундамент; 3 – шафа керування; 4 – башта; 5 – коробка з'єднувальна;
 6 – модуль вітротурбіни; 7 – маточина; 8 – лопать; 9 – головна опора;
 10, 11 – кабелі; 12 – розподільна коробка; 13 – генератор; 14 – дробина;
 15, 16 – площадки; 17, 18 – кільце та пристрій безпеки; 19 – гондола.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Лопать має вигин, що зберігає постійний кут атаки по всій її довжині, компенсуючи на вершині вищу відносну швидкість вітру.

Маточина з закріпленими на ній лопатями являє конструкцію, що реалізує перетворення обертового моменту від набігаючого потоку повітря в обертальний рух жорстко пов'язаного з нею головного валу.

Лопаті кріпляться до валів маточини, які розташовані в підшипниках і мають можливість керованого розвороту для вибору оптимального утла атаки лопаті. Обертання вала лопаті забезпечується шатунами, що переміщаються разом з валом управління питчем. Вал управління питчем вставляється в шліці сполучної пластини маточини.

Головний вал (низькообертовий) з'єднує ротор зі входом трансмісії. Головний вал змонтований на головній рамі в комплекті з дворядним конічним і сферичним роликовими підшипниками, які служать в якості опори для ротора і передачі навантаження, створюваної вітром щодо осі ротора на головну раму і конструкцію вежі. Мастило подається з внутрішнього масляного резервуара.

Модуль трансмісії являє собою двоступеневий шестерний підвищувач редуктор і забезпечує підвищення швидкості обертання головного валу через два комплекти косозубих прискорюючих шестерень з передавальним, числом 20,632. Спереду трансмісії знаходиться опора для тахометра, яка також обертається зі швидкістю приводного вала. Змащення забезпечується з внутрішнього масляного, резервуара – пульверизатора.

Приводний вал забезпечує з'єднання високошвидкісного вала трансмісії з генератором і являє собою, конструкцію з двома напівжорсткими напівмуфтами, пов'язаними між собою шліцьовим рухомим з'єднанням, що забезпечують компенсацію несоосности осей валів генератора і трансмісії.

Генератор являє собою трифазну асинхронну машину, частота обертання ротора якої для генерування електроенергії кілька перевищує синхронну (1500 об/хв). Під синхронною частотою розуміється частота обертання магнітного поля машини при частоті 50 Гц.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У момент досягнення синхронної частоти обертання включення генератора в мережу здійснює контактор, встановлений в шафі управління. Команду на включення контактора видає мікропроцесорний пристрій керування. У міру збільшення швидкості генератор виробляє електроенергію тієї ж частоти і напруги, що і в мережі.

Механізм управління поворотом лопатів називається пітчем. Пітч складається з наступних кінематически пов'язаних частин:

- двигун, кінематично пов'язаний через черв'ячний редуктор, гайка пітчу, вал пітчу, шарнірні тяги і кривошип з лопатями;
- муфта електромагнітна, кінематично пов'язана з гайкою пітчу, головним валом і редуктором;
- гальмо електромагнітний, кінематично пов'язане з гайкою пітчу і валом редуктора приводу пітчу;
- датчик пітчу, кінематично пов'язаний овалом пітчу.

Двигун приводу пітчу призначений для створення обертального руху і передачі його через черв'ячний редуктор на гайку пітчу. Двигун пітчу є трифазним асинхронним реверсивним електродвигуном.

Черв'ячний редуктор призначений для передачі обертання від двигуна приводу пітча до приводного валу гайки пітчу. Вал черв'ячного редуктора з'єднаний з приводним валом райки пітчу за допомогою шліцьового з'єднання.

Механізм пітчу і гайка пітчу; з'єднані між собою гвинтовий передачею і призначені для передачі і перетворення обертального руху валу двигуна приводу пітча в поступальний рух вала механізму пітчу, кінематично пов'язаного через кривошип з лопатями.

Електромагнітна муфта з якорем служить для утримання валу приводу пітчу в нерухомому щодо головного валу стані з метою збереження незмінним заданого кута положення лопаті.

Електромагнітне гальмо призначене для утримання гайки пітчу від обертання і забезпечує приведення лопатей у флюгерне положення при

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аварійних ситуаціях, коли зупинка вітротурбіни розворотом лопатей у флюгерне положення приводом пітчу неможлива. Гальмо виконує функції незалежної системи гальмування, яка зупиняє вітротурбіну в разі відключення напруги мережі. Гальмо може також приводитися в дію за командою пристрою управління.

Система управління вітротурбін складається з електрично з'єднаних між собою мікропроцесорного пристрою управління, датчика пітчу, датчика нищпорення, тахогенератора, датчиків активної потужності, виконавчих реле і контакторів, елементів, захисту електричної схеми вітротурбіни.

Управління вихідною потужністю. Мета управління - підтримувати постійну вихідну потужність генератора якомога ближче до розрахункового значення 107,5 кВт. Мікропроцесор зчитує показання вихідної потужності з перетворювача потужності і видає сигнал двигуну пітчу відповідним чином змінити пітч. При досягненні розрахункової потужності мікропроцесор використовує сервопрограму для підтримання значення напруги 107,5 кВт. Якщо вихідна потужність знаходиться між встановленими верхнім і нижнім межами, корекція пітчу не виконується. Якщо вихідна потужність знаходиться вище встановленого, але в рамках допустимої межі, мікропроцесор усереднює вихідну потужність і виконує корекції пітчу кожні 3,2 с.

Якщо вихідна потужність перевищує будь-якої з меж, мікропроцесор миттєво виконує корекцію пітчу. Якщо вихідна потужність перевищує верхню допустиму межу і повторні корекції пітчу її повертають в потрібні межі до отримання кута пітчу величиною 260, система відключається за сигналом *HI* (сильний вітер).

Якщо розрахункова потужність не досягається, коли лопаті ротора повністю розгорнуті, робота триває при зниженій потужності без спроб зміни кута пітчу. При зменшенні вітру і зменшенні вихідної потужності нижче запрограмованого усередненого рівня за встановлений період часу система відключається сигналом *LOW* (слабкий вітер).

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мікропроцесор являє собою комп'ютер і виконує роль «мозкової» частини вітротурбіни. Він приймає вхідні сигнали, обробляє їх і видає керуючі команди для турбіни.

Якщо важіль датчика півчу заходить за межі доріжки вмикається відповідний кінцевий перемикач, який зупиняє привід півчу для попередження механічного пошкодження, а на мікропроцесор посилає сигнал, що викликає установку аварійних сигналів «Межа флюгерне положення» (*FRO*) і «Межа харчування» (*Pro*), що викличе відключення ветроагрегата.

Датчик вузла нищпорення призначений для формування аварійного сигналу у разі, якщо кут між поздовжньою віссю модуля вітротурбіни і напрямком вітрового потоку становитиме величину близько 90°. Датчик вузла нищпорення, змонтований нагорі гондоли, складається з флюгера, сполученого з пластиною, що діє на магнітний язичковий перемикач. Пластина обертається разом з флюгером і таким чином орієнтована відносно вітру. Нормально замкнутий язичковий перемикач зорієнтований щодо машини. Якщо пластина і перемикач зміщуються відносно один одного, кут більше 90°, перемикач розмикається, викликаючи тривожний сигнал вузла нищпорення. Датчик електрично підключений до мікропроцесора через клемну коробку.

Тахогенератор монтується на корпусі трансмісії, обертається зі швидкістю приводного вала генератора і призначений для формування частотного сигналу, що відповідає частоті обертання ротора генератора.

Тахогенератор являє собою датчик з високою роздільною здатністю. Він складається з світлодіода з фокусуванням на фотоеlementі через обертовий скляний диск-кодувальник, який має 1200 світлих і темних ділянок. За один оборот диска генерується 1200 імпульсів; при швидкості приводного вала 1500 об/хв частота тахометра становить 50 Гц. За такої високої роздільної

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здатності будь-яка незначна зміна швидкості приводного валу посилюється на виході тахометра.

Вихідний сигнал тахогенератора надходить на вхід пристрою управління.

Виконавчі реле і контактори спрацьовують по командам пристрою управління і забезпечують подачу напруги живлення на різні пристрої вітротурбіни в моменти часу, які визначаються робочою програмою пристрою управління.

Елементами захисту електричної схеми є запобіжники, розрядники, автоматичні вимикачі, реле контролю величини напруги в мережі і т. п.

Датчики активної потужності призначені для вимірювання активної потужності на виході генератора, перетворення: і передачі на вхід пристрою управління частотного сигналу, пропорційного потужності на виході генератора. Пристрій керування за даними датчиків активної потужності керує кутом повороту лопатей в цілях підтримки заданого рівня вихідної потужності.

Реле перевантаження генератора з'єднані послідовно з перетворювачем потужності. Це реле керує виходом генератора, попереджаючи появу надлишкового струму і розузгодження фаз. Реле порівнює струм в кожній фазі за свідченнями трьох струмових трансформаторів і формує аварійний сигнал при перевищенні максимуму струму або меж різниці фаз.

Головна опора призначена для розміщення модуля вітротурбіни на башті. Вітротурбіна має пасивну систему рискання тобто орієнтується у просторі за напрямком вітру силою вітру.

Головна опора кріпиться до верхньої частини башти. Всі механічні компоненти вітротурбіни змонтовані на головній рамі, з'єднаній з головною опорою підшипником нишпорення, який складається з одного ряду шарикопідшипників. Це дозволяє всьому вузлу вітротурбіни вільно повертатися на 360°. Обертання може бути припинено ручним регулюванням гальма нишпорення при перебуванні персоналу на вежі поворотом рукоятки

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

гальма нищпорення. Для цього в одне з восьми отворів, вироблених на зовнішній біговій доріжці підшипника, встановлюється обмежувальний ключ, що замикає вітротурбіну на вежі, припиняючи рискання.

Гондола являє собою виливок з скловолокна, яка вміщує в себе підвузли вітротурбіни. Під час роботи вітротурбіни гондола закривається і замикається з обох сторін. Відкрити гондолу для підступу до подузлам вітротурбіни можна за допомогою направляючих. Для цього необхідно зняти частини гондоли з штифтів в кінці кожної доріжки.

Модуль головки ВЕУ (рис. 2.11) зібраний на головній рамі. Ведуча механічна лінія складається з вала ротора, трансмісії, еластичного карданного з'єднання і генератора.

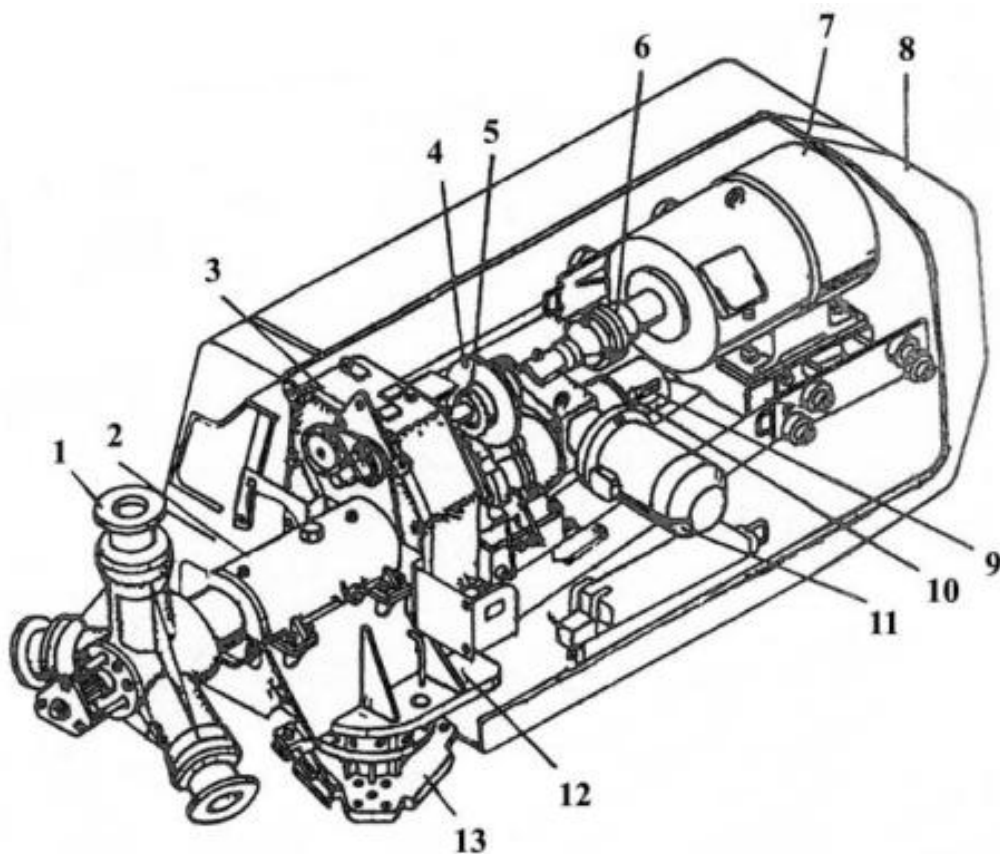


Рис. 2.11. Модуль головки вітроелектричної установки:

- 1 – маточина; 2 – вузол вала; 3 – трансмісія; 4 – дискове гальмо;
 5 – гнучка муфта; 6 – ведучий вал; 7 – генератор; 8 – кожух;
 9, 10, 11 – система зміни кута атаки лопастів; 12 – головна рама;
 13 – головна опора.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3. Особливості роботи ВЕУ з асинхронним генератором паралельно з мережею

Робота ВТ повністю автоматизована і відбувається під управлінням робочій програмі вбудованого мікропроцесорного пристрою управління. Запуск робочої програми, здійснюється спеціальною командою, що надходить з комп'ютера управління і контролю системи управління ЄЕС, При експлуатації невеликої кількості вітротурбін, не об'єднаних загальною системою управління, запуск кожної ВТ здійснюється від автономного пристрою - диспетчерського управління або пульта управління ВТ.

Після запуску вітротурбіна працює автономно і в разі недостатньої або занадто великій швидкості вітру або при появі несправностей самостійно зупиниться, переведе лопаті в нейтральне положення і повідомить про свій стан системи управління ВЕС, зазначивши при цьому причину зупинки.

Вітротурбіна реалізує наступні режими роботи:

- вихідне положення;
- оцінка швидкості вітру;
- розгін до синхронної частоти обертання;
- генерація потужності;
- виключення;
- аварійне вимкнення.

Вихідне положення (Feathered): лопаті знаходяться в положенні «флюгер» (кут пітча близько 82°), трифазна напруга 380В, 50 Гц з КТП подано на вхід шафи управління, всі автоматичні вимикачі в шафі керування включені, головний контактор розімкнений» пристрій управління запитано і самоініціалізовалося. Живляча напруга на обмотки гальма і муфти подано; пристрій керування виробляє безперервний опитування датчиків системи управління вітротурбіни і підтримує зв'язок з системою управління ВЕС.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перехід вітротурбіни в режим оцінки швидкості вітру можливий тільки після отримання пристроєм управління спеціальної адресної команди з системи управління ВЕС.

Оцінка швидкості вітру (Wind sensing). Робота вітротурбіни в режимі Wind sensing починається з оцінки швидкості вітру після отримання дозволу на запуск із системи управління ВЕС, після чого всі операції виконуються під управлінням робочої програми мікропроцесорного пристрою управління вітротурбіни наступним чином.

Включається двигун приводу пітча, розгортає лопаті з флюгерне положення на кут пітча, рівний 35° , і залишає їх у ротом положенні. Розворот лопатей виконується за 5...8 з, залежно від початкового кута пітча і швидкості обертання конкретного пітча. На час включення приводу двигуна пітча муфта вимикається, а по закінченні розвороту знову включається.

Далі під дією сили вітру лопаті починають обертати головний вал вітротурбіни, а отже і ротор генератора через підвищує редуктор трансмісії. Оцінка швидкості вітру проводиться за кількістю оборотів в хвилину ротора генератора, досягнутих за певний час. Ці параметри (число оборотів в хвилину і час) можуть бути, заздалегідь задані кожної вітротурбін індивідуально оператором системи управління ВЕС. Якщо це не зроблено, то (за замовчуванням) керуюча програма використовує наступний алгоритм: швидкість вітру вважається прийнятною, якщо протягом однієї хвилини обертів генератора знаходилися в інтервалі 56...248 об/хв або якщо: протягом 8с з хвилинного інтервалу вони були більше 352 об/хв. При виконанні будь-якої з цих умов вітротурбіна переходить до; наступного режиму розгону до синхронної частоти обертання. Якщо умови не виконані, пристрій управління поверне лопаті у флюгерне положення і передасть в систему управління повідомлення «LOW»- слабкий вітер; Повторний запуск можливий тільки по команді системи¹ управління ВЕС.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розгін до синхронної частоти обертання (Starting Up). Режим починається ступінчастим зменшенням кута півча, тобто розворотом лопатей в бік "потужність". Двигун приводу півча періодично включається на короткий час, щоразу повертаючи лопаті на $1...3^{\circ}$. Періодичність включень - кілька секунд. Кожна зміна кута півча викликає нарощування оборотів ротора генератора. При досягненні синхронної частоти обертання пристрій управління видає команду на включення головного контактора. Синхронна частота обертання $N_{\text{сxp}}$ розраховується пристроєм управління за формулою $N_{\text{сxp}} = 30f$, де f - поточне значення частоти мережі, Гц.

Після спрацювання головного контактора на обмотки асинхронного генератора подається напруга мережі трифазне. По закінченні перехідного процесу, який триває долі секунди, генератор почне віддавати енергію в мережу. З цього моменту управління кутом півча буде проводитися з урахуванням показань датчиків активної потужності, що виробляється генератором, тобто вітротурбіна переходить в режим генерації потужності.

Генерація потужності (Running). Через 2...3 с після замикання плавного контактора до трифазної мережі підключається коригуючий конденсатор ступені А. Лопаті продовжують безперервний розворот в напрямку «потужність» аж до кута півча 00, поки не буде досягнута номінальна потужність.

Пристрій управління, зчитуючи показання датчиків активної потужності, визначає необхідність зміни кута півча, використовуючи наявні в програмі ВТ наступні константи: 107,5 кВт - номінальна потужність; від 97,5 кВт до 117,5 кВт - зона точного регулювання; від 80 кВт до 97,5 кВт - нижня зона грубого регулювання; від 117,5 кВт до 40 кВт - верхня зона грубого регулювання.

Якщо регульована потужність знаходиться в зонах грубого, регулювання, пристрій управління імпульсно включає електродвигун приводу півча і, кроками розгортає лопаті у відповідному напрямку чином, щоб встановити генеровану потужність в зоні точного, регулювання, де зміна

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кута пітча не проводиться. Константи зон регулювання можуть бути змінені оператором системи управління ВЕС встановлені для кожної вітротурбіни індивідуально.

Якщо швидкість вітру невелика (менше 12 м/с) і лопаті розгорнулися на мінімальний кут пітча, тобто, на 0° , а вироблювана потужність не досягла номінального значення, то лопаті залишають у цьому крайньому дозволеному положенні і регулювання кута пітча не проводиться до тих пір, поки не буде, досягну та потужність верхньої зони грубого регулювання. При досягненні рівня потужності 40 кВт, включиться щабель коригувальних конденсаторів.

При сильному, вітрі пристрій управління, прагнучи зберегти заданий рівень потужності генерації, буде розгортати лопаті в напрямку "флюгер", поки не досягне граничного значення кута датчика пітча {за замовчуванням - 24°). Якщо при цьому генерується потужність знаходиться у верхній зоні грубого, регулювання, пристрій управління вимкне вітротурбіну і передасть в систему управління сигнал НІ – сильний вітер.

Вимкнення (Shutdown). Вимкнення вітротурбіни з режиму генерації потужності проводиться або по команді оператора системи управління ВЕС (для кожної вітротурбіни індивідуально), або за рішенням керуючої програми, у разі виявлення будь-якої несправності, або за умовами вітру.

Вимикання проводиться розворотом лопатей в напрямку "флюгер" кроками з періодичністю близько 1с. У міру збільшення кута пітча при даній швидкості вітру обертів головного вала, а отже, і генератора почнуть зменшуватися, при досягненні частоти обертання менше синхронної розімкнеться головний контактор і генератор відключиться від мережі. Коли лопаті досягнутий положення "флюгер", тобто кута пітча близько 82° , їх розворот припиниться, і пристрій управління переведе вітротурбіну в режим «вихідне положення».

Аварійних вимикання (Fail-safe) вітротурбіни відбувається після зняття живлення з обмотки гальма, тобто після включення гальма. Аварійне вимкнення є резервним, енергонезалежним способом зупинки вітротурбіни і

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проводиться в наступних випадках: при раптовому вимиканні напруги мережі, коли система управління вітротурбіни знеструмлюється; за командою пристрою управління вітротурбіни у випадку виникнення відмови будь-якого з виконавчих механізмів, що забезпечують розворот лопатів, або при раптовому різкому збільшенні обертів генератора, пов'язаних з втратою навантаження або значним збільшенням швидкості вітру.

В якості генератора в вітротурбіні USW 56-100 використовується трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Робота машини при негативному ковзанні ($s < 0$) можлива за умови, що її ротор приводиться примусово в обертання в тому ж напрямку, що і напрямок обертання магнітного поля статора. Оскільки при цьому ротор обертається швидше поля, той напрямок, у якому лінії магнітного поля перетинають провідники ротора, змінюється на протилежне порівняно з випадком, коли машина працює як двигун. Отже, напрям ЕРС струмів ротора також змінюється на протилежне. Зміна напрямку струмів ротора викликає зміна знака електромагнітного моменту, який діє проти обертаючого моменту вітроколеса. Зміна знака моменту і напрямку струму ротора, а отже, і напрямлення відповідної складової струму статора означає перехід машини в режим роботи генератором, коли механічна енергія, що надходить ззовні на вал ротора, перетворюється в ній в електричну енергію і віддається в мережу.

2.4. Висновки до розділу 2

2.4.1. Існує три основні системи перетворення енергії вітру в електричну енергію основою яких є генератор постійного струму, синхронний генератор, асинхронний генератор.

2.4.2 При побудові ВЕУ, яка підключена безпосередньо в енергосистему і ведена нею найбільш доцільним є використання асинхронного генератора, який більш надійний та дешевий.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. РОЗРАХУНОК АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦІЇ ВЕУ

3.1. Розрахунок головних розмірів та геометрії статора і ротора

Нижче наводиться розрахунок асинхронної машини з короткозамкненим ротором, при цьому передбачається, що відношення для розрахунку параметрів схеми заміщення, обліку явищ насичення і витиснення в рівній мірі справедливі як для режиму двигуна так і для генераторного режиму роботи. В якості вихідних даних прийняті параметри (потужності і основні геометричні співвідношення) реального генератора АГВ280М4, який застосовується у ВЕУ USW 56-100.

Початкові дані:

Номінальна потужність $P_n = 110 \text{ кВт}$;

синхронна частота обертання $n_1 = 1500 \text{ об/хв}$;

номінальна напруга $U_{1н} = 220/380 \text{ В}$.

Висота осі обертання і відповідний їй діаметр статора:

$h = 250 \text{ мм}$; $D_a = 437 \text{ мм}$.

Внутрішній діаметр статора

$D_i = K_D \cdot D_a = 0,663 \cdot 437 = 290 \text{ мм}$; $K_D = 0,663$.

Полісний розподіл визначається як

$$\tau = \pi \frac{D_i}{2p} = 3,14 \cdot \frac{290}{2 \cdot 2} = 288 \text{ мм}.$$

Електромагнітні навантаження, обмотувальний коефіцієнт для двошарової обмотки і енергетичні показники (попередньо) такі [15]:

$A = 39 \text{ А/мм}$; $B_\delta = 0,78 \text{ Тл}$; $k_{об1} = 0,91$; $\cos\varphi \approx 0,86$; $\eta \approx 0,94$.

Розрахункова потужність при $k_E = 0,98$ становить

$$S'_{\text{расч}} = P_n \frac{k_E}{\eta \cdot \cos\varphi} = 110000 \frac{0,98}{0,94 \cdot 0,86} = 1333,3 \text{ кВт}.$$

Розрахункова довжина повітряного зазору

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$l_{\delta} = \frac{S'_{расч}}{D_i^2 \cdot \kappa_B \cdot \kappa_{об1} \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot \Omega} = \frac{133,3 \cdot 10^3}{290^2 \cdot 1,11 \cdot 0,91 \cdot 39 \cdot 0,78 \cdot 157,08} = 329 \text{ мм},$$

де Ω – синхронна кутова швидкість обертання магнітного поля

$$\Omega = 2\pi \frac{n1}{60} = 2 \cdot 3,14 \frac{1500}{60} = 157,08 \text{ с}^{-1},$$

K_B – коефіцієнт форми поля,

$$K_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = \frac{3,14}{2\sqrt{2}} = 1,111.$$

Відносна довжина машини

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau} = \frac{329}{288} = 1,142,$$

що знаходиться в рекомендованих межах [15].

Визначимо геометрію пазів і обмоткові дані статора.

Попередні значення зубцевого ділення (для всипної обмотки):

$$t_{1\min} = 14,3 \text{ мм}; t_{1\max} = 16,3 \text{ мм}.$$

Граничні числа пазів статора визначаються як

$$Z_{1\max} = \frac{\pi D_i}{t_{1\min}} = \frac{3,14 \cdot 290}{14,3} = 63,7, \quad Z_{1\min} = \frac{\pi D_i}{t_{1\max}} = \frac{3,14 \cdot 290}{16,3} = 55,9.$$

Приймаємо $Z_1 = 60$.

Число пазів на полюс і фазу

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{60}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 5.$$

Скорочення кроку становить

$$\beta = 0,8.$$

Зубцевий розподіл статора (остаточно)

$$t_1 = \pi \frac{D_i}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = 3,14 \frac{290}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5} = 15 \text{ мм}.$$

Номінальний струм обмотки статора знаходиться наступним чином:

$$I_{1н} = \frac{P_{н}}{m \cdot U_{1н} \cdot \cos(\varphi) \eta} = \frac{110000}{3 \cdot 220 \cdot 0,86 \cdot 0,94} = 206,169 \text{ А}.$$

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Число ефективних провідників в пазу статора (попередньо)

$$u'_n = \frac{\pi D_i \cdot A}{I_{1H} \cdot Z_I} = \frac{3,14 \cdot 290 \cdot 39}{206,169 \cdot 60} = 2,871.$$

Приймаємо число паралельних гілок фази $a_1=4$, при цьому отримуємо

$$u_n = a \cdot u'_n = 4 \cdot 3 = 12.$$

Остаточного маємо:

- послідовно з'єднаних витків у фазі

$$W_I = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{12 \cdot 60}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 30;$$

- лінійне навантаження статора

$$A = \frac{2 \cdot I_{1H} \cdot W_I \cdot m}{\pi \cdot D_i} = \frac{2 \cdot 206,169 \cdot 30 \cdot 3}{3,14 \cdot 290} = 41 \cdot 10^3 \text{ A/м};$$

- повний магнітний потік пари полюсів

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1H}}{4 \cdot K_B \cdot W_I \cdot K_{обб} \cdot f_I} = \frac{0,98 \cdot 220}{4 \cdot 1,111 \cdot 30 \cdot 0,91 \cdot 50} = 0,036 \text{ Вб};$$

- максимальне значення магнітної індукції на ширині полюсного поділу

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D_i \cdot l_\delta} = \frac{2 \cdot 0,036}{290 \cdot 10^{-3} \cdot 329 \cdot 10^{-3}} = 0,755 \text{ Тл}.$$

Щільність струму в обмотці статора (попередньо)

$$J_I = 5,5 \cdot 10^6 \text{ A/мм}^2.$$

Переріз ефективного провідника (попередньо)

$$q_{эф} = \frac{I_{1H}}{a J_L} = \frac{206 \cdot 169}{4 \cdot 5,5} = 9,371 \text{ мм}^2.$$

Вибираємо обмотувальний дріт ПЕТ-155 з такими параметрами [15]:

- номінальний діаметр неізолюваного проводу $d_{ел} = 1,58 \text{ мм};$

- площа поперечного перерізу неізолюваного проводу $q_{ел} = 1,9 \text{ мм}^2;$

- середнє значення діаметра ізолюваного проводу $d_{із} = 1,63 \text{ мм}.$

Тоді

$$q_{эф} = q_{ел} n_{ел} = 1,9 \cdot 5 = 9,5 \text{ мм}^2.$$

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Щільність струму в обмотці статора (остаточно)

$$J_1 = \frac{I_{1н}}{a \cdot q_{ел} \cdot n_{ел}} = \frac{206,169}{4 \cdot 1,9 \cdot 5} = 5,426 \text{ А/мм}^2.$$

Розрахунок параметрів зубцевої зони статора і повітряного зазору

Приймаємо трапецеїдальну форму паза при значенні індукції в зубці

$B_{ZI} = 1,9$ Тл та в ярмі статора $B_a = 1,6$ Тл.

Тоді при $l_{cm1} = l_\delta$ та $k_c = 0,97$ (для оксидованої сталі) маємо:

- ширину зубця

$$b_{ZI} = \frac{B_\delta \cdot t_I \cdot l_\delta}{B_{ZI} \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,755 \cdot 15,184 \cdot 329}{1,9 \cdot 329 \cdot 0,97} = 6,22 \text{ мм}^2;$$

- висоту ярма статора

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,036}{2 \cdot 1,6 \cdot 329 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 0,035 \text{ м} = 35 \text{ мм}.$$

Розміри пазу у штампі приймаємо слідуючи:

- середнє значення ширини шліца $b_{ш1} = 3,7$ мм;

- висота шліца $h_{ш} = 0,7$ мм.

Висота паза

$$h_n = (D_a - D_i)/2 = h_a \frac{437 - 290}{2} - 35 = 38,5 \text{ мм}.$$

Внутрішні розміри пазу у штампі складають:

$$b_1 = \frac{\pi(D_I + 2h_n)}{Z_I} - b_{Z1} = \frac{3,14(290 + 2 \cdot 38,5)}{60} - 6,22 = 13 \text{ мм};$$

$$b_2 = \frac{\pi(D_I + 2h_{ш} - b_{ш1}) - Z_I \cdot b_{Z1}}{Z_I - \pi} = 9,3 \text{ мм};$$

$$h_I = h_n - \left(h_{ш} + \frac{b_2 - b_{ш1}}{2} \right) = 38,5 - \left(0,7 + \frac{9,3 - 3,7}{2} \right) = 35 \text{ мм}.$$

Розміри паза у світі з урахуванням припуску на збірку такі:

$\Delta b_n = 0,2$ мм; $\Delta h_n = 0,2$ мм;

$b_1 = b_1 - \Delta b_n = 13 - 0,2 = 12,8$ мм;

$b_2 = b_1 - \Delta b_n = 9,3 - 0,2 = 9,1$ мм;

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h_1 = h_{1n} - \Delta h_n = 35 - 0,2 = 34,8 \text{ мм.}$$

Площа поперечного перерізу паза для розміщення провідників визначається з урахуванням ізоляції і прокладок:

- одностороння товщина ізоляції $b_{iz} = 0,37 \text{ мм}$;

- площа корпусної ізоляції

$$S_{iz} = b_{iz}(2h_n + b_1 + b_2) = 0,37(2 \cdot 38,5 + 13 + 9,3) = 36,7 \text{ мм}^2;$$

- площа прокладок у пазу

$$S_{пр} = 0,4b_1 + 0,9b_2 = 0,4 \cdot 13 + 0,9 \cdot 9,3 = 13,6 \text{ мм}^2;$$

Площа поперечного перерізу паза, яка залишилася для розміщення провідників обмотки

$$S_n' = \frac{b_{1'} + b_2}{2} h_{1'} - S_{iz} - S_{пр} = \frac{12,8 + 9,1}{2} \cdot 35 - 36,7 - 13,6 = 331 \text{ мм}^2.$$

Коефіцієнт заповнення паза міддю,

$$K_3 = \frac{d_{iz}^2 \cdot u_h \cdot n_{el}}{S_n} = \frac{1,63^2 \cdot 12 \cdot 5}{331} = 0,482,$$

який не перевищує прийнятого зазвичай граничного значення $K_3 = 0,72$ [15].

Розрахунок ротора

Повітряний зазор

$$\delta = \frac{D_i}{1,2} \left(1 + \frac{9}{2p} \right) 10^{-6} = \frac{290}{1,2} \left(1 + \frac{9}{2 \cdot 2} \right) 10^{-3} = 0,79 \text{ мм.}$$

Число пазів ротора $Z_2 = 50$.

Зовнішній діаметр ротора

$$D_2 = D_i - 2\delta = 290 - 2 \cdot 0,79 = 288,42 \text{ мм.}$$

Активна довжина ротора

$$l_1 = l_2 = l_\delta = 329 \text{ мм.}$$

Зубцовий розподіл ротора

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{3,14 \cdot 288,42}{50} = 18 \text{ мм.}$$

Внутрішній діаметр ротора

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$D_j = k_B D_a = 0,2 \cdot 437 = 87,4 \text{ мм},$$

де $k_B = 0,2$ [15].

Струм в стрижні ротора

$$I_2 = K_i \cdot v_i \cdot I_{1H} = 0,9 \cdot 3,276 \cdot 206,169 = 608 \text{ А},$$

де $K_i = 0,9$ – коефіцієнт, який враховує вплив струму намагнічування та опору обмоток на відношення I_1 / I_2 ; v_i – коефіцієнт приведення струмів для двигунів,

$$v_i = \frac{2 \cdot m \cdot W_1 \cdot k_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 0,91}{50} = 3,276.$$

Площа поперечного перерізу стрижня клітини ротора

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{608}{2,5} = 243,1 \text{ мм}^2,$$

де $J_2 = 2,5 \text{ А/мм}$ – щільність струму в стрижні литий клітини [15].

Розміри паза ротора приймаються наступні:

- середнє значення ширини шліцьових пазів ротора $b_{ш} = 3,7 \text{ мм}$;
- висота шліца $h_{ш} = 0,7 \text{ мм}$;
- висота перемички над пазом $h_{ш}' = 0,3 \text{ мм}$.

Ширина зубців ротора (при $B_{Z2} = 1,8 \text{ Тл}$)

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 - 2 \cdot h_{ш} - 2 \cdot h_{ш}') - Z_2 \cdot b_{Z2}}{\pi + Z_2} = 9,6 \text{ мм},$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{9,6^2 \left(\frac{50}{3,14} + \frac{3,14}{2} \right) - 4 \cdot 243}{\frac{50}{3,14} - \frac{3,14}{2}}} = 6,6 \text{ мм}.$$

Висота спинки ротора

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Z_2}{2\pi} = (9,6 - 6,6) \frac{50}{2 \cdot 3,14} = 23,4 \text{ мм}.$$

Остаточнo приймаємо:

$$b_1 = 9,6 \text{ мм}; b_2 = 6,6 \text{ мм}; h_1 = 23,4 \text{ мм}.$$

Повна висота паза ротора

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$h_{n2} = h_{ш} + h_{ш} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0,3 + 0,7 + \frac{9,6}{2} + 23,4 + \frac{6,6}{2} = 32,5 \text{ мм.}$$

Перетин стрижня обмотки ротора

$$q_c = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} (b_1 + b_2) h_1 = 242,8 \text{ мм}^2.$$

Щільність струму в стержні (остаточно)

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{608}{242,8} = 2,504 \text{ А/мм}^2.$$

Короткозамкнені кільця:

- струм у короткозамикаючому кільці

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{607,869}{0,25} = 2,431 \cdot 10^3 \text{ А,}$$

де Δ - коефіцієнт приведення до стрижня [15],

$$\Delta = 2 \sin \left(\frac{\alpha_z}{2} \right) = 2 \sin \left(\frac{0,251}{2} \right) = 0,25,$$

$$\alpha_z = \frac{2p\pi}{Z_2} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 3,14}{50} = 0,251;$$

- щільність струму у кільці

$$J_{кл} = 0,85 \cdot 2,504 = 2,128 \text{ А/мм}^2;$$

- площа поперечного перерізу кільця

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{2,431 \cdot 10^3}{2,128} = 1,142 \cdot 10^3 \text{ мм}^2.$$

Розміри короткозамкнених кілець:

- середня висота кільця

$$b_{кл} = 1,25 \cdot h_{n2} = 1,25 \cdot 32,5 = 40,6 \text{ мм;}$$

- ширина кільця

$$a_{кл} = \frac{q_{кл}}{b_{кл}} = \frac{1,142 \cdot 10^3}{40,6} = 28,1 \text{ мм;}$$

- середній діаметр кільця

$$D_{кл.ср} = D_2 - b_{кл} = 288,42 - 40,6 = 247,8 \text{ мм.}$$

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2. Розрахунок магнітного кола

Значення магнітної індукції на ділянках магнітного кола:

- в зубцях статора

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{Z1} \cdot l_{CT1} \cdot \kappa_c} = \frac{0,755 \cdot 15,2 \cdot 329}{6,2 \cdot 329 \cdot 0,97} = 1,9 \text{ Тл};$$

- у зубцях ротора

$$B_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{Z2} \cdot l_{CT1} \cdot \kappa_c} = \frac{0,755 \cdot 15,2 \cdot 329}{7,8 \cdot 329 \cdot 0,97} = 1,52 \text{ Тл};$$

- у ярмі статора

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{CT1} \cdot \kappa_c} = \frac{0,036}{2 \cdot 35 \cdot 10^{-3} \cdot 329 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,61 \text{ Тл};$$

- у ярмі ротора

$$B_J = \frac{\Phi}{2 \cdot h_J \cdot l_{CT1} \cdot \kappa_c} = \frac{0,036}{2 \cdot 68 \cdot 10^{-3} \cdot 329 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 0,83 \text{ Тл},$$

де h_J' - розрахункова висота ярма ротора,

$$h_{J'} = \frac{D_2 - D_J}{2} - h_{n2} = \frac{288,4 - 87,4}{2} - 32,5 = 68 \text{ мм.}$$

МРС ділянок магнітного кола:

-МРС зазору

$$F_{\delta} = 1,59 \cdot 10^3 \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \sigma = 1,59 \cdot 10^3 \cdot 0,755 \cdot 1,133 \cdot 0,79 = 1,074 \cdot 10^3,$$

де k_{δ} - коефіцієнт повітряного зазору,

$$k_{\delta} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \cdot \delta} = \frac{15,2}{15,2 - 2,265 \cdot 0,79} = 1,133,$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{ш1}}{\delta}\right)}{\left(5 + \frac{b_{ш1}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{3,7}{0,79}\right)^2}{\left(5 + \frac{3,7}{0,79}\right)} = 2,265.$$

МРС зубцевих зон для сталі 2013:

- статора

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 38,5 \cdot 2070 \cdot 10^{-3} = 154,9 \text{ А},$$

де $H_{z1}=2070 \text{ А/м}$ при $B_{z1}=1,9 \text{ Тл}$ [15]; $h_{z1}=h_{n1}=38,5 \text{ мм}$;

- ротора

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 31,84 \cdot 722 \cdot 10^{-3} = 46 \text{ А},$$

де $H_{z2} = 722 \text{ А/см}$ при $B_{z2}=1,52 \text{ Тл}$; $h_{z2} =$

$$h_{n2} - 0,1 \cdot b_2 32,5 - 0,1 \cdot 6,6 = 31,8 \text{ мм}.$$

Коефіцієнт насичення зубцевої зони:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{159,39 + 46}{1,074 \cdot 10^{-3}} = 1,19.$$

МРС ярма статора і ротора слідує:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 315,6 \cdot 850 \cdot 10^{-3} = 268,3 \text{ А},$$

де $H_a=850 \text{ А/м}$ при $B_a=1,61 \text{ Тл}$; L_a - довжина середній магнітної лінії потоку ярма статора,

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2p} = \frac{3,14 \cdot (437 - 35)}{2 \cdot 2} = 315,6 \text{ мм};$$

$$F_J = L_J \cdot H_J = 15,2 \cdot 262 \cdot 10^{-3} = 3,982 \text{ А},$$

де $H_J = 262 \text{ А/м}$ при $B_J = 0,83 \text{ Тл}$; h_J - висота спинки ротора;

$$h_{J'} = \frac{D_2 - D_J}{2} - h_{n2} = \frac{288,4 - 87,4}{2} - 32,5 = 68 \text{ мм}.$$

L_J - довжина середньої магнітної лінії потоку в ярмі ротора,

$$L_J = \frac{\pi \cdot (D_B - h_J)}{2p} = \frac{3,14(87,4 - 68)}{2 \cdot 2} = 15,2 \text{ мм}.$$

МРС магнітного ланцюга пар полюсів

$$F_{\Pi} = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_J = 1,552 \cdot 10^3 \text{ А}.$$

Коефіцієнт насичення магнітного ланцюга

$$k_u = \frac{F_{\Pi}}{F_\delta} = \frac{1,552 \cdot 10^3}{1,074 \cdot 10^3} = 1,445.$$

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Намагнічувальний струм

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{II}}{0,9 \cdot m \cdot W_1 \cdot K_{об1}} = \frac{2 \cdot 1,552 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 3 \cdot 30 \cdot 0,91} = 42,1 \text{ А.}$$

Відносне значення намагнічувального струму

$$I'_{\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{1н}} = \frac{42,1}{206,169} = 0,204.$$

3.3. Розрахунок параметрів робочого режиму

Параметри робочого режиму

Активний опір фази обмотки статора

$$r_1 = \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\Phi} \cdot a} = 2,439 \cdot 10^{-5} \frac{41,07 \cdot 10^3}{9,5 \cdot 4} = 0,026 \text{ Ом,}$$

де L_1 - загальна довжина ефективних провідників фази обмотки,

$$L_1 = l_{cp} \cdot W_I = 1,369 \cdot 30 = 41,07 \text{ м;}$$

l_{cp} - середня довжина вітку обмотки,

$$l_{cp} = 2(l_{n1} + l_{л1}) = 2(329 + 355,4) = 1,369 \text{ мм;}$$

$l_{л1}$ - довжина лобової частини,

$$l_{л1} = K_{л} \cdot b_{КТ} + 2 \cdot B = 1,3 \cdot 258 + 2 \cdot 10 = 355,4 \text{ мм;}$$

$b_{КТ}$ – середня ширина котушки,

$$b_{КТ} = \frac{\pi \cdot (D_i + h_{n1})}{2p} = \frac{3,14(290 + 38,5)}{2 \cdot 2} = 258 \text{ мм;}$$

$l_{п1}$ – довжина пазової частини,

$$l_{п1} = l_1 = 329 \text{ мм;}$$

B - довжина вильоту прямолінійної частини котушок з паза від торця сердечника до початку відгину торцевої частини $K_{л} = 1,3$, $B = 10 \text{ мм}$ [15]; ρ_{115} - питомий опір матеріалу обмотки при розрахунковій температурі $\gamma_{расч} = 115^{\circ}\text{C}$,

$$\rho_{115} = \frac{10^{-3}}{41} = 2,439 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{мм.}$$

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відносне значення активного опору фази

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,026 \cdot \frac{206,17}{220} = 0,024.$$

Активний опір фази ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 6,61 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 6,647 \cdot 10^{-7}}{0,25^2} = 8,737 \cdot 10^{-5} \text{ Ом},$$

$r_{кл}$ – опір ділянки, що замикає кільця між двома замикаючими стрижнями,

$$r_{кл} = \rho_{Al} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.ср}}{z_2 \cdot q_{кл}} = 4,878 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{3,14 \cdot 247,8}{50 \cdot 1,142 \cdot 10^3} = 6,647 \cdot 10^{-7} \text{ Ом},$$

для литої алюмінієвої обмотки ротора

$$\rho_{Al} = \frac{10^{-3}}{20,5} = 4,878 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{мм};$$

r_c - опір стрижня,

$$r_c = \rho_{Al} \cdot \frac{l_2}{q_c} = 4,878 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{329}{242,8} = 6,61 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}.$$

Приведений активний опір фази ротора

$$r'_2 = r_2 \cdot \frac{4m \cdot (W_1 \cdot K_{об1})^2}{z_2}$$

$$r'_2 = 8,737 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (30 \cdot 0,91)^2}{50} = 0,016 \cdot 10^{-5} \text{ Ом},$$

Відносне значення:

$$r'_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,016 \cdot \frac{206,169}{220} = 0,015.$$

Індуктивний опір розсіювання фази обмотки статора:

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{W_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{II} + \lambda_{Л1} + \lambda_{Д1}) = 0,122 \text{ Ом}.$$

$\lambda_{Л1}$ - коефіцієнт магнітної провідності лобового розсіювання,

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\lambda_{Л1} = 0,34 \frac{q}{l_{\delta'}} \cdot (l_{Л1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 1,074,$$

$$l_{\delta''} = l_{\delta'} = 329 \text{ мм};$$

$\lambda_{Д1}$ - коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання:

$$\lambda_{Д1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi = \frac{15,2}{12 \cdot 0,79 \cdot 1,133} \cdot 0,957 = 1,347;$$

λ_{II} - де коефіцієнт магнітної провідності пазової розсіювання,

$$\lambda_{II} = \frac{h_3}{3 \cdot b} k_{\beta} + \left(\frac{3 \cdot h_1}{b + 2 \cdot b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) k_{\beta'} = 2,8,$$

де при двошарової обмотки з укороченням кроку $2/3 \leq \beta < 1$:

$$k_{\beta'} = 0,25(1+3 \cdot \beta) = 0,25(1+3 \cdot \beta) = 0,85;$$

$$k_{\beta} = 0,25(1+3 \cdot k_{\beta'}) = 0,25(1+3 \cdot 0,85) = 0,888;$$

$$\xi = 2 \cdot k_{CK'} \cdot k_{\beta} - k_{\sigma 1}^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 = 2 \cdot 1,2 \cdot 0,888 - 0,91^2 \left(\frac{18,1}{15,2} \right) = 0,957;$$

$$k_{CK'} = 1,2 [15].$$

Відносне значення індуктивного опору:

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,122 \frac{206,169}{220} = 0,114.$$

Індуктивний опір фази обмотки ротора

$$x_2' = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{II2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}) \cdot 10^{-9} = 6,224 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

λ_{II2} - коефіцієнт магнітної провідності пазової розсіювання

$$\lambda_{II2} = \left[\frac{h_1}{3 \cdot b_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right) + 0,66 - \frac{b_{III}}{2 \cdot b_1} \right] k_{Д} + \frac{h_{III}}{b_{III}} + 1,12 \frac{h_{III}'}{I_2} = 2,535;$$

$$h_1 = h_{II2} - h_{III} - h_{III}' = 32,5 - 0,7 - 0,3 = 31,5 \text{ мм};$$

$k_{Д}=1$ - для робочого режиму; λ_{II2} - коефіцієнт магнітної провідності

лобового розсіювання:

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл.ср}}{z_2 \cdot l_{\delta} \cdot \Delta^2} \cdot \log \left(\frac{4,7 \cdot D_{кл.ср}}{a_{кл} + 2 \cdot b_{кл}} \right) = 0,569;$$

$\lambda_{л2}$ -коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання при $\varepsilon = 1$,

$$\lambda_{л2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \varepsilon = \frac{18,1}{12 \cdot 0,79 \cdot 1,133} = 1,685.$$

Приведений x_2 до числа витків статора:

$$x_{2'\varepsilon} = x_2 \cdot \frac{4m \cdot (W_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 72,383 \cdot \frac{4 \cdot 3(30 \cdot 0,91)}{50} = 1,295 \cdot 10^4 \text{ Ом.}$$

3.4. Розрахунок втрат

Основні втрати в сталі складають

$$P_{см.осн} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{\beta} \left(k_{да} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{дз} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} \right) = 1,788 \text{ кВт},$$

де $p_{1,0/50} = 2,6 \text{ Вт/кг}$ - питомі втрати в сталі 2013, $\beta = 1,5$; $k_{да} = 1,6$, $k_{дз} = 1,6$ – коефіцієнти, які враховують вплив на втрати у сталі нерівномірного розподілу потоку по перерізу ділянок магніто проводу і технологічних факторів; h_a – висота ярма статора,

$$h_a = 0,5(D_a - D_1) - h_{ш} = 0,5 \cdot (437 - 290) - 38,5 = 35 \text{ мм};$$

де m_{z1} - маса сталі зубців статора,

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot z_1 \cdot l_{см1} \cdot K_c \cdot \gamma_c = 35,65 \text{ кг};$$

m_a – маса сталі ярма статора:

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) h_a \cdot l_{см1} \cdot K_c \cdot \gamma_c = 110 \text{ кг},$$

$$\gamma_c = 7,8 \cdot 10^{-6} \text{ кг/мм}^3 \text{ – питома маса сталі.}$$

Поверхневі втрати в роторі складають

$$P_{пов2} = p_{пов2}(t_2 - b_{ш})l_{ст1} = 5,219 \text{ Вт},$$

де $p_{пов2}$ – поверхневі питомі втрати;

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{\text{пов2}} = 0,5 \cdot k_{O2} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{O2} \cdot t_1)^2 = 19,1 \text{ Вт/кг},$$

$k_{O2}=1,5$ – коефіцієнт, який враховує вплив обробки поверхні головок зубців ротора на питомі втрати;

$$B_{O2} = 0,075 \text{ при } b_{\text{ш}}/\delta = 1,5/0,79 = 1,9;$$

B_{O2} – амплітуда пульсації в повітряному зазорі над коронками зубців ротора

$$B_{O2} = B_{O2} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0,075 \cdot 1,133 \cdot 0,755 = 0,064 \text{ Тл.}$$

Пульсації втрати в зубцях ротора

$$P_{\text{нул2}} = 0,11 \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{1000} \cdot B_{\text{нул2}} \right)^2 m_{Z2} = 154 \text{ Вт},$$

m_{Z2} – маса сталі зубців ротора,

$$m_{Z2} = Z_2 \cdot h_{Z2} \cdot b_{Z2} \cdot l_{CT1} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 30,87 \text{ кг};$$

$B_{\text{нул2}}$ – амплітуда пульсації індукції в середньому перетині зубців,

$$B_{\text{нул2}} = \frac{\gamma \cdot \delta}{2 \cdot t_2} B_{Z2} = \frac{2,265 \cdot 0,79}{2 \cdot 18,1} 1,52 = 0,075 \text{ Тл.}$$

Сума додаткових втрат

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов2}} + P_{\text{нул2}} = 5,219 + 154,717 = 159,94 \text{ Вт.}$$

Повні втрати в сталі

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} = 1,788 \cdot 10^3 + 159,94 = 1,948 \text{ кВт.}$$

Механічні втрати:

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n_1}{10} \right)^2 \cdot (D_a)^4$$

$$P_{\text{мех}} = 0,732 \left(\frac{1500}{10} \right)^2 \cdot (437 \cdot 10^{-3})^4 = 600 \text{ Вт},$$

де K_T – коефіцієнт для двигунів с $2p=4$,

$$K_T = 1,3(1 - D_a) = 1,3(1 - 437 \cdot 10^{-3}) = 0,732.$$

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Додаткові втрати при номінальному режимі

$$P_{\text{доб.п}} = 0,005 \frac{P_{\text{н}}}{\eta} = 0,005 \frac{110 \cdot 10^3}{0,94} = 585 \text{ Вт.}$$

Параметри неробочого руху асинхронного генератора:

- електричні втрати у статорі при неробочому русі

$$P_{\text{ел.хх}} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 42,1^2 \cdot 0,026 = 138,248 \text{ Вт};$$

- активна складова струму неробочого руху

$$I_{\text{хх.а}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{ел.хх}}}{m \cdot U_{1\text{н}}} = \frac{1,948 \cdot 10^3 + 600,647 + 138,248}{3 \cdot 220} = 4,071 \text{ А};$$

- коефіцієнт потужності при неробочому русі

$$\cos \varphi_{\text{хх}} = \frac{I_{\text{хх.а}}}{I_{\text{хх}}} = \frac{4,071}{42,296} = 0,096.$$

3.5. Розрахунок робочих характеристик

Відношення для розрахунку параметрів схеми заміщення і характеристик генератора:

- активний опір

$$R = c_1 \cdot r_1 + c_1^2 \frac{r_2'}{S};$$

- індуктивний опір

$$X = c_1 \cdot x_1 + c_1^2 \cdot x_2;$$

де c_1 – поправочний коефіцієнт для Г-образної схеми заміщення,

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}}$$

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{н}}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{42,1} - 0,122 = 5,104 \text{ Ом};$$

- повний опір

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2};$$

- повний струм та його складові:

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_1 = \sqrt{(I_{1a})^2 + (I_{1p})^2};$$

$$I_{1a} = I_{0a} + I_2' \cdot \cos \varphi_2; \quad \cos \varphi_2 = \frac{R}{Z};$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \sin \varphi_2' \quad \sin \varphi_2' = X / Z;$$

$$I_2' = c_1 \cdot I_2'';$$

$$I_2'' = U_{1H} / Z,$$

де I_{0a} та I_{0p} – активна та реактивна складні струму ідеального неробочого руху,

$$I_{0a} = \frac{P_c + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_{1f}} = \frac{1,788 \cdot 10^3 + 3 \cdot 42,1^2 \cdot 0,026}{3 \cdot 220} = 2,919 \text{ А},$$

$$I_{0p} = I_\mu = 42,1 \text{ А};$$

- потужності та втрати:

$$P_1 = 3 \cdot U_{1H} \cdot I_{1a};$$

$$P_{эл1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1;$$

$$P_{эл2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2';$$

$$P_{доб} = P_{доб.н} \left(\frac{I_1}{I_{1H}} \right)^2$$

$$\Sigma P = P_{ст} + P_{эл1} + P_{эл2} + P_{мех} + P_{доб}$$

$$P_2 = P_1 - \Sigma P;$$

- енергетичні показники:

$$\eta = 1 - \left(\frac{\Sigma P}{P_1} \right);$$

$$\cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_1};$$

- втрати, які не змінюються при зміні ковзання,

$$P_{ст} + P_{мех} = 1,948 \cdot 10^3 + 600,647 = 2,549 \text{ кВт}.$$

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За приведеними відношеннями розраховані робочі характеристики при ковзаннях s , які дорівнюють 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,03.

Результати розрахунку наведені у таблиці 3.1 та на їх основі уточнено значення номінального ковзання. Воно складає $s_n = 0,015$.

Номінальні дані асинхронного генератора наступні:

$P_n = 110 \text{ кВт}$; $U_{1n} = 220/380 \text{ В}$; $I_{1n} = 206,17 \text{ А}$; $\cos \varphi_n = 0,86$; $\eta = 0,94$; $2p=4$;
 $r_1 = 0,026 \text{ Ом}$; $r_2 = 0,016 \text{ Ом}$; $I_{0a} = 3 \text{ А}$.

Таблиця 3.1

Результати розрахунку робочих характеристик АГ

Параметр	Од. вим.	Ковзання				
		0,005	0,01	0,015	0,02	0,03
R	Ом	3,38	3,38	1,70	1,15	0,87
X	Ом	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Z	Ом	3,38	3,38	1,71	1,15	0,87
I_2'	А	65,00	65,00	128,73	190,9 8	251,5 6
$\cos \varphi_2'$	-	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99
$\sin \varphi_2'$	-	0,04	0,04	0,07	0,11	0,14
I_{1a}	А	67,88	67,88	131,30	192,7 6	251,8 7
I_{1p}	А	44,51	44,51	51,56	62,92	78,22
I_1	А	81,17	81,17	141,06	202,7 7	263,7 4
I_2'	А	66,56	66,56	131,82	195,5 6	257,6 0
P_1	кВт	44,80	44,80	86,66	127,2 2	166,2 3
$P_{\text{эл1}}$	кВт	0,51	0,51	1,55	3,21	5,43
$P_{\text{эл2}}$	кВт	0,21	0,21	0,83	1,84	3,19
$P_{\text{доб}}$	кВт	0,09	0,09	0,27	0,57	0,96
ΣP	кВт	3,37	3,37	5,21	8,16	12,12
P_2	кВт	41,43	41,43	81,45	119,0 6	154,1 2
η	-	0,92	0,92	0,94	0,94	0,93

$\cos \varphi$	-	0,84	0,84	0,93	0,95	0,96
----------------	---	------	------	------	------	------

Виконаємо розрахунок характеристик при великих ковзаннях.

Вказані характеристики розраховані для ковзань $s = 1; 0,8; 0,5; 0,2$ та $0,1$. При цьому детальний розрахунок наведено для ковзання $s = 1$, результати розрахунку інших ковзань зведені у таблиці 3.2.

Параметри схеми заміщення при великих ковзаннях розраховуються з урахуванням витіснення струму в роторі і насичення магнітного кола за співвідношенням:

- наведений активний опір ротора з урахуванням дії ефекту витіснення струму

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r_2 = 1,497 \cdot 8,737 \cdot 10^{-5} = 1,308 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

де K_R – коефіцієнт витіснення,

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = 1 + \frac{6,61 \cdot 10^{-5}}{8,737 \cdot 10^{-5}} \cdot (1,657 - 1) = 1,497;$$

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{242,8}{146,5} = 1,657;$$

h_r – глибина проникнення струму,

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{31,5}{1 + 0,9} = 16,58 \text{ м};$$

$$q_r = \frac{\pi \cdot b_2^2}{8} + \frac{b_2 + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_2}{2} \right) = 146,5 \text{ мм}^2,$$

$$b_r = b_2 - \frac{b_2 - b_1}{h_1} \cdot \left(h_r - \frac{b_2}{2} \right) 10^{-3} = 9,54 \text{ мм};$$

h_c – висота стрижня в пазу,

$$h_c = h_{п2} - h_{ш} - h_{ш}' = 32,5 - 0,7 - 0,3 = 31,5 \text{ мм};$$

- індуктивний опір обмотки ротору

$$x'_{2\xi} = K_X \cdot x'_2 = 6,224 \cdot 10^{-4} \cdot 0,856 = 5,328 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

де K_X – коефіцієнт насичення,

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{д1}}{\lambda_{n2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д1}} = \frac{1,843 + 0,569 + 1,685}{2,535 + 0,569 + 1,685} = 0,856;$$

$$\lambda_{n2\xi} = \left[\frac{h_1}{3 \cdot b_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{III}}{2 \cdot b_1} \right] \cdot K_{д} + \frac{h_{III}}{b_{III}} = 1,843.$$

Струм ротора наближено без врахування впливу насичення:

$$I'_2 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2\xi}}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_{2\xi})^2}} = 1,756 \cdot 10^3 \text{ А}.$$

Середня МРС обмотки, віднесена до одного паза обмотки статора,

$$F_{n.cр} = 0,7 \frac{(k_{нас} \cdot I_1) \cdot u_{n'}}{a} \cdot \left(k'_\beta + k_{y1} \cdot k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 9,034 \cdot 10^3 \text{ А}.$$

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n.cр}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-3} = \frac{9,034 \cdot 10^3}{1,6 \cdot 0,79 \cdot 1,025} = 6,973 \text{ Тл},$$

$$\text{де } C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,79}{15,18 + 18,1}} = 1,025.$$

Для $B_{\phi\delta} = 6,972 \text{ Тл}$ знаходимо $\chi_\delta = 0,46$ [15].

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас} = 2,8 - 0,331 = 2,469,$$

$$\text{де } \Delta\lambda_{n1нас} = \frac{h_{u1} + 0,58 \cdot h'}{b_{u1}} \cdot \frac{c_1}{c_1 + 1,5 \cdot b_{u1}} = \frac{0,7 + 0,58 \cdot 2,8}{3,7} \cdot \frac{6,2}{6,2 + 1,5 \cdot 3,7} = 0,331;$$

$$c_1 = (t_1 - b_{u1}) \cdot (1 - x_\delta) = (15,18 - 3,7) \cdot (1 - 0,46) = 6,2;$$

$$h' = h_{п1} - h_{ш} - h_1 = 38,5 - 0,7 - 35 = 2,8.$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки статора з урахуванням впливу насичення:

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot x_\delta = 1,347 \cdot 0,46 = 0,62.$$

Індуктивний опір фази обмотки статора з урахуванням впливу насичення:

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1} = 0,122 \cdot \frac{4,163}{5,221} = 0,097 \text{ Ом},$$

де

$$\sum \lambda_{1нас} = \lambda_{н1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1} = 2,469 + 0,62 + 1,074 = 4,163,$$

$$\sum \lambda_1 = \lambda_{л1} + \lambda_{л2} + \lambda_{л3} = 2,8 + 1,074 + 1,374 = 5,221.$$

Коефіцієнт магнітної провідності диференціального розсіювання обмотки ротора з урахуванням впливу насичення:

$$\lambda_{д2нас} = \lambda_{д2} - \chi \delta = 1,685 - 0,46 = 0,775,$$

Наведений індуктивний опір фази обмотки ротора з урахуванням впливу витіснення струму насичення:

$$x'_{2\xi нас} = x'_2 \cdot \frac{\sum \lambda_{2\xi нас}}{\sum \lambda_2} = 6,224 \cdot 10^{-4} \frac{2,787}{4,789} = 3,622 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

$$\text{де } \sum \lambda_{2\xi нас} = \lambda_{л2\xi нас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2} = 1,443 + 0,775 + 0,569 = 2,787;$$

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{л2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л3} = 2,535 + 0,569 + 1,685 = 4,789;$$

Опір взаємної індукції обмоток та поправочний коефіцієнт:

$$x_{12л} = x_{12} \cdot \frac{F_{\psi}}{F_{\delta}} = 5,104 \cdot \frac{1,522 \cdot 10^3}{1,074 \cdot 10^3} = 7,376 \text{ Ом};$$

$$c_{1л нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12л}} = 1 + \frac{0,097}{7,376} = 1,013.$$

Струми ротора та статора при ковзанні $s=1,0$ такі:

$$I'_2 = \frac{U_{1н}}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0,026)^2 + (0,097)^2}} = 2,191 \cdot 10^3 \text{ А};$$

$$a_n = r_1 + c_{1л.нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s} = 0,026 + 1,013 \cdot \frac{1,308 \cdot 10^{-4}}{1} = 0,026 \text{ Ом};$$

$$b_n = x_{1нас} + c_{1л.нас} \cdot x'_{2\xi нас} = 0,097 + 1,013 \cdot 3,622 \cdot 10^{-4} = 0,097 \text{ Ом}.$$

Відносні значення струму та моменту при $s = 1,0$ слідуючи:

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{n'} = \frac{I'_1}{I_{1H}} = \frac{2,191 \cdot 10^3}{206,169} = 10,627;$$

$$M_{\Pi*} = \left(\frac{I'_{2n}}{I'_{2H}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_H}{s_n} = \left(\frac{2,191 \cdot 10^3}{2,191 \cdot 10^3} \right)^2 \cdot 1,497 \cdot \frac{0,015}{0,01} = 2,2.$$

Критичне ковзання визначається по середньому опору $x_{1нас}$, $x'_{1\xi нас}$, розрахованого при ковзаннях $s = 0,2 \dots 0,1$, після чого знаходять значення струму та моменту:

$$s_{кр} = \frac{r_{2'}}{\frac{x_{1нас}}{c_{1П.нас}} + x'_{2\xi нас}} = \frac{0,016}{\frac{0,097}{1,013} + 3,622 \cdot 10^{-4}} = 0,166.$$

Максимальне значення моменту $M_{max}' = 4,548$.

Результати розрахунку характеристик асинхронного генератора при великих ковзаннях зведені у табл. 3.2.

Коефіцієнти, що враховують ефекти витіснення і насичення, для довільних ковзань визначаються по наступних співвідношеннях:

$$\xi = 63,61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s};$$

$$k_r = \frac{q}{\frac{\pi \cdot b_2^2}{8} + \frac{b_2 + \left[b_2 - \frac{b_2 - b_1}{h_1} \left(\frac{h_c}{1 + \varphi} - \frac{b_2}{2} \right) \right] \left(\frac{h_c}{1 + \varphi} - \frac{b_2}{2} \right)};$$

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1); \quad r_{2'\xi} = K_R \cdot r_2;$$

$$\lambda_{П2\xi нас} = \left[\left[\frac{h_1}{3 \cdot b_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{III}}{2 \cdot b_1} \right] k_D + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right];$$

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{Д2насc}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{Д2}}; \quad x_{2'нас} = K_x \cdot x_2;$$

$$x_{n2\xi нас} = \frac{\lambda_{n2\xi нас} + \lambda_{Д2нас} + \lambda_{П2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{Д2}}.$$

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2

Характеристики асинхронного генератора при великих ковзаннях

Параметр	Одиниці вимірювання	Ковзання				
		1	1	0,8	0,5	0,2
ξ	-	2004	2004	1792	1417	896
φ	-	0,9	0,9	0,9	0,26	0,9
k_r	-	1,59	1,59	1,31	0,99	0,83
k_R	-	1,45	1,45	1,23	0,99	0,87
$r_{2\xi}$	Ом	0,023	0,023	0,020	0,016	0,014
κ_D	-	0,75	0,75	0,87	0,91	0,96
$\lambda_{П2_2} \xi_{нас}$	-	1,27	1,27	1,40	1,45	1,50
K_X	-	1,16	1,16	1,22	1,24	1,26
$x_{2\xi}$	Ом·10 ³	0,723	0,723	0,759	0,771	0,786
$x_{2_2} \xi_{нас}$	Ом·10 ³	0,723	0,723	0,759	0,771	0,786
a_n	Ом	0,049	0,049	0,051	0,058	0,097
I'_2	А	2008	2008	1996	1934	1598
I_1	А	2009	2009	1996	1934	1599
I'_1	-	9,91	9,91	9,84	9,54	7,88
M'	-	2,29	2,29	2,40	2,91	4,38

3.6. Тепловий розрахунок

Перевищення температури внутрішньої поверхні сердечника статора над температурою повітря всередині двигуна визначаються за співвідношенням

$$\Delta v_{нов1} = K \cdot \frac{P'_{э.л.1} + P_{ст.осн}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 18,8^\circ\text{C},$$

де $K=0,2$, $\alpha=122$ [15].

Електричні втрати у пазовій зоні обмотки статора складають

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P'_{\text{э.н1}} = k_{\rho} \cdot P_{\text{э1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср1}}} = 1,07 \cdot 3,207 \cdot \frac{2 \cdot 329}{1,369 \cdot 10^3} = 1,649 \text{ кВт},$$

де $P_{\text{э1}} = 3,207 \text{ кВт}$.

Перепад температури в ізоляції пазової частини обмотки статора:

$$\Delta v_{\text{уз.н1}} = \frac{P'_{\text{э.н1}}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{н1}} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{\text{уз.н1}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = 2,912^{\circ}\text{C},$$

де $\Pi_{\text{н1}}$ – розрахунковий периметр поперечного перерізу паза статора; $\lambda_{\text{эКВ}} = 0,16$ – середня еквівалентна теплопровідність пазової ізоляції для ізоляції класу нагрівостійкості F ; $\lambda'_{\text{эКВ}} = 1,45$ – середнє значення коефіцієнта теплопровідності внутрішньої ізоляції котушки всипною обмотки з емальованих провідників з урахуванням нещільності прилягання провідників один до одного.

Перепад температури по товщині ізоляції лобових частин

$$\Delta v_{\text{уз.л1}} = \frac{P'_{\text{э.л1}}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{л1}} \cdot l_{\text{л1}}} \cdot \left(\frac{b_{\text{уз.л1}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{h_n}{12 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = 0,931^{\circ}\text{C},$$

де $P'_{\text{э.л1}}$ - електричні втрати по товщині ізоляції лобових частин,

$$P'_{\text{эл1}} = k_{\rho} \cdot P_{\text{э16}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} = 1,07 \cdot 3,207 \cdot 10^3 \cdot \frac{2 \cdot 355,4}{1369} = 1,782 \text{ кВт};$$

$\Pi_{\text{л1}}$ – периметр умовної поверхні охолодження лобовій частині однієї котушки

$$\Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{н1}} = 99,31 \text{ мм};$$

$b_{\text{уз.л1}}$ – одностороння товщина ізоляції лобової частини котушки.

Перевищення температури зовнішньої поверхні лобових частин над температурою повітря всередині машини:

$$v_{\text{нов.л1}} = \frac{K \cdot P'_{\text{эл1}}}{2 \cdot \pi \cdot D_i \cdot l_{\text{вильл}} \cdot a_1} = \frac{0,2 \cdot 1,782 \cdot 10^3}{2 \cdot 3,14 \cdot 290 \cdot 10^{-3} \cdot 113,2 \cdot 122} = 19,92^{\circ}\text{C},$$

де $l_{\text{вильл}}$ - довжина вильоту частини котушки,

$$I_{\text{вил}} = K_{\text{вил}} \cdot b_k + B = 0,4 \cdot 258 + 10 = 113,2;$$

$$K_{\text{вил}} = 0,4.$$

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою повітря всередині машини буде:

$$\Delta v'_1 = \frac{(\Delta v_{нов1} + \Delta v_{из.л1}) \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp}} + \frac{(\Delta v_{нов.л1} + \Delta v_{из.л1}) \cdot 2 \cdot l_{л1}}{l_{cp}} = 19,92^\circ C.$$

Перевищення температури повітря всередині машини над температурою навколишнього середовища:

$$\Delta v_\epsilon = \frac{\sum P'_\epsilon}{S_{кор} \cdot \alpha_\epsilon} = \frac{5,2210^3}{2,762 \cdot 25} = 75,6^\circ C,$$

де $\Pi_p = 0,45$.

Коефіцієнт підігріву повітря, що враховує тепловіддачу здатність поверхні корпусу і інтенсивність перемішування повітря всередині машини, $a_\epsilon = 25$ [15].

Складові втрат і сумарні втрати:

$$P_{\epsilon 1H} = 1,836 \text{ кВт}; \quad \sum P_H = 8,157 \text{ кВт};$$

$$\sum P' = \sum P_H + (\kappa_p - 1) \cdot (P_{\epsilon 1H} + P_{\epsilon 2H}) = 8,51 \text{ кВт}.$$

Еквівалентна поверхня охолодження корпусу

$$S_{кор} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) = 2,7 \text{ м}^2.$$

Сума всіх втрат у двигуні при номінальному режимі і розрахунковій температурі

$$\sum P'_\epsilon = \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{\epsilon n.1} + P_{ст.осн}) = 5,22 \text{ кВт}.$$

Середнє перевищення температури обмотки статора над температурою навколишнього середовища:

$$\Delta v_1 = \Delta v'_1 + \Delta v_\epsilon = 19,92 + 75,6 = 95,52^\circ C.$$

Оцінка ефективного зовнішнього обдування

Необхідні для охолодження витрати повітря:

$$Q_\epsilon = \frac{k_m \cdot \sum P'_\epsilon}{1100 \cdot \Delta v_\epsilon} = \frac{14,647 \cdot 5,22 \cdot 10^3}{1100 \cdot 75,6} = 0,919 \text{ м}^3/\text{с}.$$

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де k_m – коефіцієнт, який враховує зміни умов охолодження по довжині поверхні корпусу, обдування зовнішнім вентилятором,

$$k_m = m \cdot \sqrt{\frac{n}{100}} \cdot D_a = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{1500}{100 \cdot 437 \cdot 10^{-3}}} = 14,647.$$

Витрати повітря, що забезпечується зовнішнім вентилятором:

$$Q_{\epsilon} = 0,8 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n_1}{100} = 0,8 \cdot (437 \cdot 10^{-3})^3 \cdot \frac{1500}{100} = 1 \text{ м}^3/\text{с},$$

$$Q'_{\epsilon} \leq Q_{\epsilon}.$$

Зовнішній вентилятор забезпечує необхідне охолодження генератора.

3.7. Висновки до розділу 3

Розрахований асинхронний генератор за своїми енергетичними показниками відповідає технічному завданню.

Номінальні дані асинхронного генератора наступні:

$$P_H = 110 \text{ кВт}; U_{1H} = 220/380 \text{ В}; I_{1H} = 206,17 \text{ А}; \cos \varphi_H = 0,86; \eta = 0,94; 2p=4;$$

$$r_1 = 0,026 \text{ Ом}; r_2 = 0,016 \text{ Ом}; I_{0a} = 3 \text{ А}.$$

Кратність пускових струму та моменту складає:

$$I_{\Pi'} = 10,627;$$

$$M_{\Pi*} = 2,2.$$

Критичне $s_{кр} = 0,166$.

Кратність максимального моменту $M_{max}' = 4,548$.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це система законодавчих актів, соціально-економічних, організаційних, технічних і лікувально-профілактичних заходів і засобів, що забезпечують безпеку, збереження здоров'я і працездатність людини у процесі праці.

Охорона праці виявляє і вивчає можливі причини виробничих нещасливих випадків, професійних захворювань, аварій, вибухів, пожеж і розробляє систему заходів і вимог з метою усунення цих причин, і створення безпечних і сприятливих для людини умов праці.

З дня незалежності України охороні праці приділили значну увагу. В зв'язку з цим було створено у 1992 році Закон України "Про охорону праці", завдяки якому було багато приділено уваги життю та здоров'ю громадян України; але чомусь у XXI століття ми увійшли з рівнем травматизму, який перевищує всі розумні межі.

Все різноманіття нормативних документів, що включають поняття охорона праці, передбачає створення таких умов, за яких виключено або значно послаблено вплив на працюючих шкідливих та небезпечних факторів трудового середовища.

З питаннями охорони праці нерозривно пов'язане і вирішення питань охорони природи.

Оскільки головним об'єктом охорони праці є людина в процесі праці, то при розробці вимог виробничої санітарії використовуються результати досліджень ряду медичних і біологічних дисциплін.

Особливо тісний зв'язок існує між охороною праці, науковою організацією праці, ергономікою, інженерною психологією і технічною естетикою.

Вимоги законодавства про працю забезпечуються системою санітарного нагляду, органам Держнаглядохоронпраці, а також контролем

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

служб охорони праці та профспілкових органів. Проте дотримання вимог нормування напружується на ряд об'єктивних труднощів, пов'язаних з дискусійністю проблеми визначення норми здоров'я та норми впливу того або іншого виробничого фактору.

Успіх у вирішенні проблем охорони праці здебільшого залежить від якості підготовки фахівців у цій області, від їхнього уміння приймати правильні рішення в складних і мінливих умовах сучасного виробництва.

Проте існують професії та виробничі ситуації (аварії, робота в екстремальних умовах навколишнього середовища та інше), коли вибір компромісних стратегій діяльності ускладнений або неможливий. Тоді можна говорити про гетерогенність (неоднорідність) професій, оскільки одні ставлять дуже жорсткі вимоги до характеристики особистості та психофізіологічних якостей людини, а інші - включають можливості компенсації поведінкою вимог до задовільного виконання посадових обов'язків. Викладене підкреслює необхідність існування ще однієї категорії нормативів до роботи в окремих професіях – нормативів психологічних та психофізіологічних.

Під шкідливим виробничим фактором розуміємо такий фактор виробничого середовища, вплив якого на працюючого завдає шкоди його здоров'ю та умов впливу шкідливих факторів може стати небезпечним. До них належать такі фактори трудового середовища, вплив яких на працюючих у певних умовах призводить до різкого погіршення здоров'я або до травми.

При впливі на організм декількох факторів ефект комплексу може дорівнювати сумі впливу окремих факторів, що визначається як адитивний вплив. Іноді спільний вплив менший за адитивний. Особливу небезпеку становить підсилення одних факторів іншими, що свідчить про наявність потенціювання їх дії. Окрім того, взаємодія комплексу виробничих факторів може стати причиною виникнення акумулюючого ефекту (а у випадку неадитивного впливу комплексу факторів цей ефект може бути підсилений), що завдає значно більшої шкоди здоров'ю, ніж дія одного з них.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Широкомасштабні заходи, спрямовані на поліпшення здоров'я людей, повинні здійснюватися як у суспільстві в цілому, так і безпосередньо на кожному підприємстві та установі у встановленому законодавством порядку. Суворе дотримання вимог гігієни та фізіології праці є не тільки особистою справою окремої людини, але й будь-якого колективу – виробничого, учбового, наукового і тому подібне, оскільки порушення принципів гігієни позначається не тільки на здоров'я порушника, але й на здоров'я інших членів колективу.

Складність задач, які стоять перед охороною праці, вимагає використання досягнень і висновків багатьох наукових дисциплін, прямо або побічно пов'язаних із задачами створення здорових і безпечних умов праці.

4.1. Аналіз впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, що впливають на людину

Аналіз впливу шуму і вібрації на людину при виробництві

Шумом називають усякий несприятливо діючий на людину звук. З фізичної точки зору звук являє собою механічні коливання пружного середовища .

Слуховий орган людини сприймає у вигляді чутного звуку коливання пружного середовища, які мають частоту приблизно від 20 до 20000 Гц, але найбільш важливий для слухового сприйняття інтервал від 45 до 10000 Гц.

Сприйняття людиною звуку залежить не тільки від його частоти, але і від інтенсивності і звукового тиску.

Несприятлива дія шуму на людину залежить не тільки від рівня звукового тиску, але і від частотного діапазону шуму, а також від рівномірності впливу протягом робочого часу.

У результаті несприятливого впливу шуму на працюючу людину відбувається зниження продуктивності праці, збільшується брак у роботі, створюються передумови до виникнення нещасливих випадків. Усе це

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обумовлює велике оздоровче й економічне значення заходів щодо боротьби із шумом.

Для вимірювання шуму застосовують різні шумовимірювачі, частотні аналізатори та інші прилади. Частотні аналізатори служать для виділення будь-якої смуги частот для подальшої направленої корекції шуму як за об'єктивними показниками, так і згідно з суб'єктивним сприйняттям. Вимірювання шуму на робочих місцях здійснюється згідно з ДСТУ 12.1.050-86 та ДСТУ 23941-79.

Нормованими параметрами шуму на робочих місцях є рівні середньоквадратичних звукових тисків (дБ) та рівні звука (дБА), що вимірюється по шкалі "А" шумовимірювача. Останні найбільш близькі до фізіологічного сприйняття людиною [16].

Оцінка електробезпеки

Електрообладнання, яким доводиться користуватись працівникам судна, являє собою потенційну небезпеку. Електричний струм. Проходячи крізь тіло людини, чинить на нього складний вплив:

- а) термічний – нагрівання тканини живого організму (електричні знаки, ожоги I, II та III ступіню);
- б) біологічний – подразнення і збудження нервових волокон та інших тканин організму;
- в) електролітичний – розпад крові та плазми;
- г) механічний – розрив шкіри, вивихи, переломи кісток.

Поріг відчуття струму залежить від стану нервової системи та фізичного розвитку людини. У більшості випадків – це струм 1 мА при змінній частоті 50 Гц. Для жінок порогове значення струму в два рази нижче ніж для чоловіків. При струмі 10-15 мА виникає судорожне скорочення м'язів, яке весь час підсилюється, і людина не може самостійно звільнитись від контакту зі струмопровідною частиною обладнання.

Слід пам'ятати, що основними причинами враження електричного струму є:

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- а) випадкове доторкання до струмопровідних частин, що перебувають під напругою;
- б) несправність захисних засобів, якими потерпілий доторкається до струмопровідних частин;
- в) поява напруги на металевих частинах електрообладнання (огорожах, карнізах, кожухах) у результаті пошкодження ізоляції струмопровідних частин електрообладнання, замикання фази на землю;
- в) поява напруги на відключених частинах електрообладнання у результаті поломки обладнання, помилкового включення обладнання, коротких замикань струмопровідних частин, розряду блискавки та інше;
- г) виникнення кропової напруги на поверхні землі або підлоги, на якій стоїть людина, в результаті замикання проводу на землі, несправності заземлення.

Параметри мікроклімату

Відчутний вплив на стан організму людини (під час виробництва електроприводу системи кондиціонування), його працездатність виявляє мікроклімат (метеорологічні умови) у виробничих приміщеннях, під яким розуміють клімат внутрішнього середовища цих приміщень, який визначається діючими на організм людини поєднаннями температури, вологості, швидкості руху повітря та теплового випромінювання нагрітих поверхонь.

Параметри мікроклімату можуть мінятися в широких межах, в той час як необхідною умовою життєдіяльності людини є підтримка сталості температури тіла завдяки терморегуляції, тобто здатності організму регулювати віддачу тепла в навколишнє середовище. Принцип нормування мікроклімату – створення оптимальних умов для теплообміну тіла людини з навколишнім середовищем.

Обчислювальна техніка, яка застосовується для розробки та виробництва електроприводу, є джерелом істотного тепловиділення, яке

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може привести до підвищення температури і зниження відносної вологості в приміщенні.

У приміщеннях, де встановлені комп'ютери, повинні дотримуватися визначені параметри мікроклімату. У санітарних нормах СН-245-71 встановлені величини параметрів мікроклімату, що створюють комфортні умови. Ці норми встановлюються в залежності від пори року, характеру трудового процесу і характеру виробничого приміщення [16].

Вплив шкідливих речовин на організм людини

Хімічні речовини (шкідливі та небезпечні) у відповідності з ГОСТ 12.0.003-74 по характеру дії на організм людини підрозділяються на:

- а) загальнотоксичні, що викликають отруєння всього організму (ртуть, окис вуглецю, анілін);
- б) подразнюючі – ті, що викликають подразнення дихальних шляхів та слизових оболонок (хлор, аміак, сірчана кислота);
- в) сенсibiliзуючі, діючі як алергени (альдегіди, розчинники, лаки на основі нітроз'єднань);
- г) канцерогенні, що викликають ракові захворювання (аміноз'єднання);
- д) мутагенні, що призводять до зміни спадкової інформації (свинець, формальдегід);
- е) ті, що мають вплив на репродуктивну функцію (бензол, свинець, марганець) [16].

Виробничий пил достатньо розповсюджений шкідливий та небезпечний виробничий фактор. Пил може виявляти на людину фіброгенну дію, при якій в легенях відбувається розростання з'єднувальних тканин, котрі порушують нормальну побудову та функцію органа.

Пайка дрібних виробів сплавами, що вміщують свинець, виготовляється при температурі 180–350° вручну за допомогою електропаяльника, на автоматах різної конструкції, методом окунання (луження) та хвильової пайки.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для операції пайки використовуються свинцеві сплави різних марок. Найбільш розповсюджені марки – ПОС-40 (40% олова та 60% свинцю) і ПОС-60 (60% олова і 40% свинцю). В якості флюсу частіше за все використовується каніфоль, або в різних комбінаціях каніфоль зі стеарином. В останній час його склад все більш різноманітний, здебільшого з невідомою пропорцією елементів та їх найменуванням.

Паяльні роботи виконуються на окремих ділянках виробництва або чергуються з монтажними та з процесом збірки. Процес пайки може супроводжуватись забрудненням повітряного середовища свинцем як безпосередньо при пайці, так й в періоди, коли паяльники і ванночки знаходяться в робочому стані. Може також відбуватися забруднення свинцем робочих поверхонь та шкіри рук працівників.

В цілях профілактики хронічних професійних отруєнь свинцем серед робітників, зайнятих пайкою дрібних виробів на відповідних ділянках підприємств, належить виконувати стандартні вимоги, передбачені нинішніми правилами.

Тривале перебування людини у зоні комбінованого впливу різних несприятливих факторів може призвести до розвитку професійного чи професійно зумовленого захворювання. Наслідком спільної дії несприятливих факторів виробничого середовища є зниження резистентності (опірності) організму. У випадку, коли складові трудового навантаження перевищують функціональні резерви організму, напруження фізіологічних функцій може виявитися надмірним і викликати ознаки перенапруження, яке поступово переходить у патологію.

Аналіз освітлення робочого місця

Результати дослідження показали, що виникнення одного з істотних джерел негативних фізіологічних впливів на працівників, під час розробки та виробництва електроприводу системи кондиціонування повітря, пов'язане з дискомфорtnими зоровими умовами через неправильне спроектоване освітлення. Наближено можна вважати, що при 10 відсотковому зменшенні

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

освітленості працездатність знижується на 1 відсоток. Коли за характером роботи вимагається комбінація носіїв інформації, освітленість можна варіювати від 300 до 700 лк, причому чим рідшою є зміна полів зору в процесі роботи (наприклад, з екрана на документ та навпаки), тим вищим може бути рівень освітленості.

Штучне освітлення у приміщеннях треба здійснювати у вигляді комбінованої системи освітлення з використанням люмінесцентних джерел світла у світильниках загального освітлення, які слід розташовувати над робочими поверхнями у рівномірно-прямокутному порядку. Для запобігання засвітлення, лінії світильників повинні бути розташовані з достатнім бічним зміщенням відносно рядів робочих місць або зон, а також паралельно до світлових отворів. Бажане розміщення вікон з одного боку робочих приміщень. При цьому кожне вікно повинно мати світлорозсіюючі штори з коефіцієнтом відбивання 0,5-0,7.

Освітлення робочого місця може бути природним і штучним. Природне освітлення – освітлення приміщення прямим і відбитим денним світлом, яке проникає через вікна та інші конструкції. Штучне освітлення передбачається для всіх виробничих приміщень та побутових приміщень. Штучне освітлення ділиться на робоче, аварійне, чергове та евакуаційне. У лабораторії використовується загальне робоче освітлення.

4.2. Заходи з техніки безпеки

Організація і поліпшення умов праці на робочому місці є одним з найважливіших резервів продуктивності праці й економічної ефективності виробництва, а також подальшого розвитку самої працюючої людини. У цьому головний прояв соціального й економічного значення організації і поліпшення умов праці.

Нижче приведені найбільш розповсюджені організаційні заходи і технічні засоби захисту людей, від шкідливих виробничих факторів.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Шум і вібрація

Зниження шуму, створюваного на робочих місцях внутрішніми джерелами, а також шуму проникаючого ззовні, є дуже важливою задачею. Зниження шуму в джерелі надходження можна забезпечити застосуванням пружних прокладок між підставою машини, приладу й опорною поверхнею. В якості прокладки використовуються гума, повсть, пробка, різної конструкції амортизатори. Під настільні шумливі апарати можна підкладати м'які ковдри із синтетичних матеріалів, а під ніжки столів, на яких вони встановлені, – прокладки з м'якої гуми, повсті, товщиною 6-8 мм. Кріплення прокладок можливе шляхом приклейки їх до опорних частин.

Можливе також застосування звукоізолюючих кожухів, що не заважають технологічному процесу. Не менш важливим для зниження шуму в процесі експлуатації є питання правильного і своєчасного регулювання, змазування і заміни механічних вузлів шумливого устаткування.

Раціональне планування приміщення і розміщення устаткування є важливим чинником, що дозволяє знизити шум при існуючому устаткуванні ЕОМ, або при випробуваннях роботи окремих частин та електроприводу у цілому. Приміщення необхідно розташовувати в далечині від шумливого і вібруючого устаткування.

Зниження рівня шуму, що проникає у виробниче приміщення ззовні, може бути досягнуте збільшенням звукоізоляції конструкцій, ущільненням по периметру притворів вікон, дверей.

Таким чином для зниження шуму, створюваного на робочих місцях внутрішніми джерелами, а також шуму, що проникає з поза, слід:

- а) послабити шум самих джерел (застосування екранів, звукоізолюючих кожухів);
- б) знизити ефект сумарного впливу відбитих звукових хвиль (звуковбирні поверхні конструкцій);
- в) застосовувати раціональне розташування устаткування;

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

г) використовувати архітектурно-планувальні і технологічні рішення ізоляцій джерел шуму.

Техніка безпеки при роботі з електрообладнанням

При роботі з електрообладнанням необхідно виконувати такі правила техніки безпеки:

- а) перед включенням електроприладів візуально перевірити шнури на наявність механічних порушень;
- б) забороняється працювати з електроприладами вологими руками;
- в) не залишати електроприлади без нагляду на довгий час;
- г) після закінчення роботи вимкнути електроприлади;
- д) при виявленні або виникненні несправності в електроустаткуванні негайно викликати електрика, що його обслуговує;
- е) категорично забороняється самостійно проводити будь-які ремонтні роботи;
- ж) вміти надати лікарську допомогу при ураженні електричним струмом.

Мікроклімат

Нормалізація мікроклімату приміщення може бути досягнута поліпшенням вентиляції приміщення за рахунок витяжних вентиляторів і нормального функціонування вбудованої вентиляції будинку (або кают риболовецького судна).

Захист від шкідливих речовин на виробництві

Загальні міри та засоби передбачення забруднення повітряного середовища на виробництві і захисту робітників включають:

- а) конфіскація шкідливих речовин з технологічних процесів, заміна шкідливих речовин менш шкідливими тощо;
- б) покращення технологічних процесів та устаткування;
- в) автоматизація та дистанційне управління технологічними процесами і устаткуванням, які виключають безпосередній контакт робітників з шкідливими речовинами;

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

г) герметизація виробничого устаткування, робота технологічного устаткування у вентиляційних укриттях, локалізація шкідливих виділень за допомогою місцевої вентиляції, аспіраційних установок;

д) нормальне функціонування системи опалення, вентиляції, кондиціонування повітря, очистки викидів в атмосферу;

е) попередні і періодичні медичні огляди робітників, в шкідливих умовах, профілактичне харчування, виконання правил власної гігієни;

ж) контроль за складом шкідливих речовин в повітрі робочої зони;

з) використання засобів індивідуального захисту.

До області та порядку застосування правил пайки відносяться:

а) для знову організованих ділянок, на яких намічено введення паяльних робіт, правила вступають в силу в повній дії негайно після їх затвердження. У відношенні діючих робочих ділянок вимоги теперішніх правил вводяться в строки, відповідно до місцевих органів санепідемслужби.

б) з затвердженням теперішніх правил “Санітарні правила по улаштуванню, обладнанню та утримання ділянок, на яких проводиться пайка дрібних деталей, сплавами, вміщуючи свинець” № 381-61 відміняються.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Характерною рисою розвитку сучасної енергетики є широке залучення в енергобаланс передових країн світу відновлюємих джерел енергії, одним з видів яких є вітроелектростанції. Завдяки великій енергоємності, більшій надійності та простоті конструкції найбільш розповсюджені ВЕУ, які працюють паралельно з мережею. Визначено, що Миколаївська область за кліматичними умовами є достатньо перспективною для впровадження ВЕУ.

Виходячи з виконаного аналізу існуючих конструктивних схем ВЕУ можна зробити висновок, що найбільш доцільним для використання є класична горизонтально-осьова пропелерна схема з заднім розташуванням трилопастного вітроколеса, яке само орієнтується по вітру під дією флюгерного моменту. Вказана схема має достатній пусковий момент і легко розкручується та вмикається до роботи при швидкостях вітру 3...5 м/с.

Виконано аналіз особливостей схем генерування електроенергії, основні конструктивні типи електричних генераторів. Найбільш доцільною для використання визначено схему генерування з асинхронним генератором.

Основним вузловим питанням проекту є формування оптимального технічного рішення по розробці асинхронного генератора для комплектації ВЕУ. Відповідно завданню на дипломне проектування виконано аналіз технічних рішень, визначена методика та виконано розрахунок асинхронного генератора з короткозамкненим ротором.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЛІТЕРАТУРА

1. Відновлені джерела енергії. Нові перспективи [Текст]// Електропанорама. – 2001. - № 3. – С. 43 – 45.
2. Шихайлов Н.А. Развитие ветроэнергетики в Украине [Текст]/ Н.А. Шихайлов// Нетрадиционные источники, передающие системы и преобразователи энергии. – Х.: ХАИ. – 1997. – Ч. 1. – С. 9 – 10.
3. Ветроенегетика [Текст] /Под ред. Д. Рензо: Пер. с англ.; Под ред. Я. И. Шефтера. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 28с.
4. Шефтар Я.И. Использование энергии ветра [Текст]/ Я.И. Шефтар. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 193с.
5. Фатеев Е.М. Ветродвигатели и ветроустановки [Текст] /Е.М. Фатеев – М.: Сельхозгиз, 1948. – 544 с.
6. Неисчерпаемая энергия. Кн 1. Ветроэлектрогенераторы [Текст] / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев – Харьков.: ХАИ, 2003. – 400с.
7. Бут Д.А. Электрические машины для летательных аппаратов [Текст]/ Д.А. Бут. – М.: Изд-во МАИ, 1976. – 63с.
8. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов [Текст] / А. В. Иванов-Смоленский. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
9. Яцун М. А. Електричні машини: Навчальний посібник [Текст] / М.А. Яцун. – Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 1999. – 427 с.
10. Алексеевский Д.Г. Оптимизация рабочего скольжения асинхронных генераторов ветроэлектрических установок на базе сверхсезонного вентильного каскада [Текст] /Д.Г. Алексеевский, В.В. Семенов// Техническая электродинамика. – К.: Ин-т электродинамика НАН Украина. – 2000. – Ч.8. – С. 81 – 84.
11. Алексеева И.И. Машинные генераторы повышенной частоты [Текст]/ И.И. Алексеева. – Л.: Энергия, 1967. – 344 с.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Яковлев А.И. Автоматическое регулирование возбуждения низкооборотного индуктивного генератора для ветроэлектрической установки [Текст] / А.И. Яковлев, Р. Ммаси, А.А. Баяркин // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: ХАИ. – 1998. - № 3. – С. 237 – 241.

13. Энергетические и регулировочные характеристики ветроколес типа Дарье с учетом коэффициента заполнения [Текст] / А.И. Яковлев, И.И. Москва// Авиационно-космическая техника и технология. – Х.:ХАИ. – 1996. – С. 264 – 269.

14. Галиновский А. М. Исследование бесконтактного асинхронизированного генератора с модулированным возбудителем [Текст]/ А.М. Галиновський, Н.Н. Васылив, Е.А. Ленская// Вісник НТУ «ХПІ». – Х. – 2001. - № 16. – С.41 – 46.

15. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин [Текст]/ О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.

16. Пряник Г.М. Охорона праці [Текст]/ Пряник Г.М., Лехман С.Д., Бутко Д.А. – К.: Урожай, 1994. – 272 с.

					141.4361.БР.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		