

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і механотроніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))


Пояснювальна записка

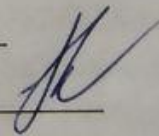
до кваліфікаційної роботи

бакалавр
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему Проектування вітрогенератору для фермерського господарства

Виконав: студент 4 курсу, групи 401-МЕ
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Вертій Д.В. 
(прізвище та ініціали)

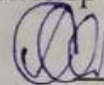
Керівник Кислиця С.Г. 
(прізвище та ініціали)

Рецензент Галай В.М.
(прізвище та ініціали)

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»
Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та
робототехніки
Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій
Ступінь вищої освіти Бакалавр
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматичної,
електроніки та телекомунікацій



Шефер О.В.

«01» квітня 2024 р.

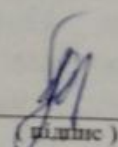
ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРУ СТУДЕНТУ Вертію Дмитру Владиславовичу

1. Тема роботи «Проектування вітрогенератора для фермерського господарства»
керівник роботи Кислиця Світлана Григорівна, к.т.н., доцент
затверджена наказом вищого навчального закладу від 08.12.23, 2024 року №1481/1
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 10.06.2024 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Дані для розрахунку вітряного колеса.
Номінальна напруга 380/220В, частота 50 Гц. Спроектувати вітрогенератор для
електропостачання фермерського господарства.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити) Аналітичний огляд. Проектні дослідження. Розрахункова частина.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):
 - 1) Ескіз геометричних параметрів профілю лопаті типу «Есперо»;
 - 2) Ескіз статорного паза синхронного генератора;
 - 3) Схема обмотки статора;
 - 4) Схема обмотки на одне чергування;
 - 5) Ескіз магнітної системи генератора;
 - 6) Додатковий ескіз магнітної системи генератора;
 - 7) Робоча діаграма магніта;
 - 8) Схема синхронного генератора.
6. Дата видачі завдання 01.04.2024 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Пор. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Термін виконання етапів роботи			Примітки (плакати)
		Дата	Курс	Відсоток	
1	Постановка задач на кваліфікаційну роботу. Аналітичний огляд.	25.04.24	I	20%	
2	Проектні дослідження	08.05.24		40%	
3	Вибір обладнання для простованої вітряної установки. Розрахунок вітрового колеса.	23.05.24	II	60%	Пл. 1
4	Розрахунки вітрогенератора.	30.05.24		80 %	Пл. 3,4
5	Висновки по роботі. Оформлення кваліфікаційної роботи бакалавра	10.06.24	III	100%	Пл. 5-8

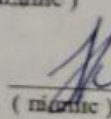
Студент


(підпис)

Вертій Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Кислиця С.І.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Вертій Д. В. Проектування вітрогенератора як альтернативного джерела енергії для фермерського підприємства.

Робота містить 79 сторінок, де розглядається тема проектування вітрогенератора. Вона включає 23 ілюстрації, що візуалізують ключові точки теми, а також 9 таблиць, які демонструють деталізовану інформацію. Для створення цієї роботи було використано 8 надійних джерел.

Ключові слова, що описують суть теми цієї роботи: вітрогенератор, вітрова установка, вітрова турбіна.

Предметом дослідження кваліфікаційної роботи є проектування вітрового генератора. Цей генератор призначений для забезпечення альтернативної енергії, з метою задоволення потреб фермерського підприємства.

Спроектований вітрогенератор дозволить забезпечити фермерське підприємство енергією, альтернативною традиційним джерелам. Це може бути корисним у випадках, коли традиційні джерела не доступні або їх використання не є економічно виправданим.

Робота має практичну цінність, оскільки її результати можуть бути використані в реальних умовах. Після більш детальної доробки, ці результати можуть бути розглянуті для використання на практиці.

ABSTRACT

Vertiy D. V. Designing a wind generator as an alternative source of energy for a farm enterprise.

The work contains 59 pages, where the topic of wind generator design is considered. It includes 22 illustrations that visualize the key points of the topic, as well as 9 tables that demonstrate detailed information. 8 reliable sources were used to create this work.

Keywords describing the essence of the topic of this work: wind generator, wind installation, wind turbine.

The subject of the qualification work research is the design of a wind generator. This generator is designed to provide alternative energy to meet the needs of the farm enterprise.

The designed wind generator will provide the farm enterprise with energy alternative to traditional sources. This can be useful in cases where traditional sources are not available or their use is not economically justified.

The work has practical value, as its results can be used in real conditions. After more detailed refinement, these results can be considered for use in pract

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД.....	9
1.1 Застосування і загальна інформація вітрогенераторів.....	9
1.2 Вітрогенератори з горизонтальними обертовими валами.....	12
1.3 Однолопатеві вітрові генератори.....	14
1.4 Дволопатеві вітрові генератори.....	15
1.5 Трилопатеві вітрові генератори.....	16
1.6 Багато лопатеві вітрові генератори.....	17
1.7 Вітрогенератори з вертикальними обертовими валами.....	19
2. ПРОЕКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	25
2.1 Обладнання для вітрової установки.....	25
2.2 Область застосування та параметри вітрової установки.....	26
2.3 Вибір обладнання для проєктованої вітряної установки.....	28
3. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	33
3.1 Розрахунок вітрового колеса.....	33
3.2 Розрахунок генератора.....	37
3.3 Визначення основних розмірів.....	38
3.4 Розрахунок обмотки та магнітопроводу статора.....	42
3.5 Мінімальна ширина зубця.....	44
3.6 Крок обмотки статора.....	48
3.7 Параметри схеми заміщення обмотки.....	52
3.8 Розраховуємо характеристики ротора.....	56
3.9 Розрахунок провідностей розсіювання індуктора.....	58
3.10 Розрахунок магнітного ланцюга та побудова робочої діаграми магнітів..	60
3.11 Визначення маси активних матеріалів, втрат та ККД генератора.....	65
ВИСНОВКИ.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	69
ДОДАТКИ.....	72

ВСТУП

Завдяки екологічній та енергетичній кризі, актуальність пошуку нових, інноваційних способів генерування електричної енергії, або удосконалення та оптимізації вже існуючих методів, стає надзвичайно важливою. Опанування нових видів енергії, які є дешеві, екологічно чисті та відновлювані, є насущним та першочерговим завданням для всього людства в сучасному світі. Протягом останніх кількох десятиліть використання електростанцій та установок, що виробляють електроенергію з енергії вітру, є основною тенденцією в секторі альтернативної енергетики. Ці станції використовують "м'які" відновлювані джерела енергії (ВДЕ), які не викидають CO₂ в атмосферу і є екологічно безпечними.

Окрім великої енергетики, де широко використовуються потужні вітроелектростанції, останнім часом все більшої популярності набувають менші та ефективніші вітрові турбіни (ВЕУ). Вони можуть задовольнити потреби індивідуальних споживачів електроенергії та сприяти децентралізованому виробництву. Співпраця цих установок є особливо ефективною, оскільки їхні робочі інтервали часто нерегулярні, тому вони доповнюють одна одну і можуть повністю задовольнити енергетичні потреби споживачів. Тому використання вітрових електростанцій є важливим для індивідуальних споживачів сьогодні.

Актуальність теми. На даний період переважна більшість енергогенеруючих систем та мереж електропостачання є застарілими та неефективними. Більшість теплових електростанцій перебувають за межею фізичного зносу і потребують значної модернізації або заміни. Баланс потужності української електроенергетичної системи характеризується дефіцитом регулюючих потужностей, що призводить до нерационального використання наявних потужностей та високого рівня втрат. У найближчому майбутньому використання інших джерел енергії, в тому числі відновлюваних

джерел енергії (ВДЕ), буде пріоритетним через неминуче скорочення споживання викопних видів палива.

Тому, останнім часом вітрова енергія дуже ефективно використовується в певних секторах енергетичного сектору в ряді країн і успішно конкурує з традиційними джерелами енергії. Особлива увага приділяється середнім і великим вітроелектростанціям, які є частиною розподільчих і передавальних мереж. В даний час відомо, що світовий ринок малих ВЕС розвивається дуже динамічно за рахунок побутових споживачів, сільськогосподарських підприємств та інших автономних споживачів електроенергії.

На даний час вітроенергетику визнають перспективним сектором виробництва енергії. Використання відновлюваної та екологічно чистої енергії вітру може допомогти компенсувати зростаюче споживання електроенергії через збільшення чисельності населення планети. Найбільшою перешкодою для використання вітру як джерела енергії є нестабільність швидкості вітру та пов'язані з цим зміни енергії з часом. Вітер не тільки піддається довгостроковим і сезонним коливанням, але і його активність протягом дня може змінюватися за дуже короткі проміжки часу.

Крім того, вітрові електростанції можуть частково вирішити проблему енергозбереження. Це дуже серйозна проблема в наш час, коли безперервний розвиток промисловості і технологій призводить до значного збільшення споживання електроенергії і зростання витрат на виробництво продукції. Ця тенденція змушує компанії та різні організації шукати шляхи зменшення енергоспоживання та підвищення енергоефективності.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є дослідження та визначення оптимальних технічних характеристик вітрогенератора, який буде використовуватися для забезпечення якісного альтернативного джерела живлення.

Об'єктом дослідження є альтернативне електропостачання фермерського підприємства.

Предметом дослідження є проектування вітрової турбіни для забезпечення альтернативної енергії для задоволення потреб фермерського підприємства.

Практичне значення. Отримані результати кваліфікаційної роботи полягає в тому, щоб спроектований вітрогенератор був використаний як альтернативне джерело електроенергії для фермерських господарств.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Застосування і загальна інформація вітрогенераторів

Загальна інформація

Вітрогенератор або вітрова турбіна є важливою інженерною спорудою в сучасному світі, перетворює потік вітру на корисну енергію - електричну або механічну, яка потім може бути використана споживачами для різноманітних потреб. Вітрові турбіни відіграють важливу роль у вітроенергетиці, і їх активно використовують по всьому світу. На сьогоднішній день використовуються два основних типи вітрових турбін, відмінність між якими полягає в розташуванні осі обертання елемента, який "вловлює" енергію вітру і перетворює її в електричну. Перший тип - це вітрові турбіни з горизонтальною віссю обертання, що є найбільш поширеними. Другий тип, який стає все більш популярним, - це вітрові турбіни з вертикальною віссю обертання.. (рис. 1.1).

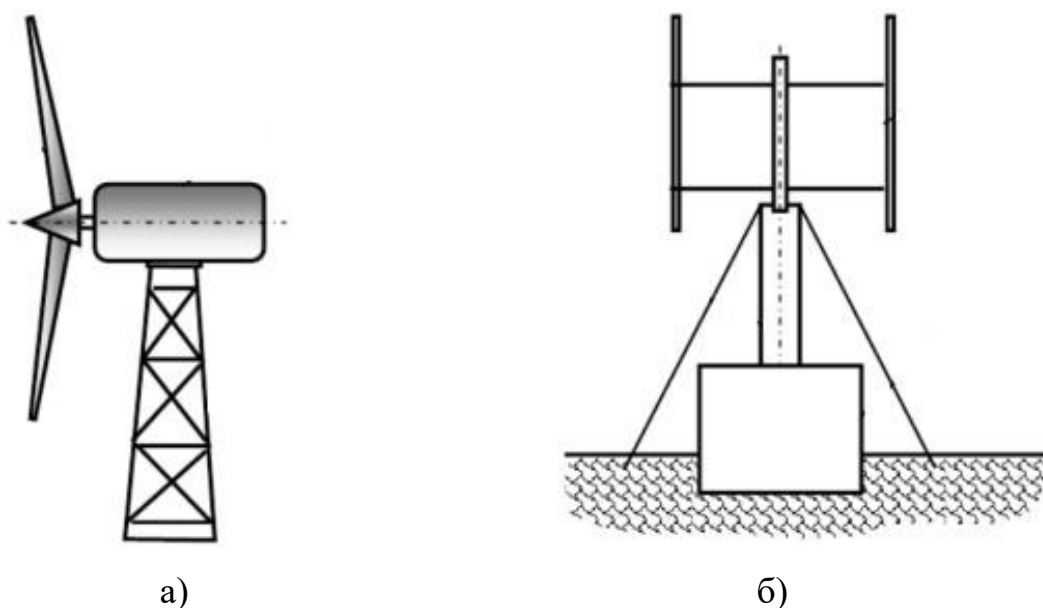


Рисунок 1.1 – Вітрова установка з горизонтальною віссю обертання (а) і з вертикальною віссю (б)

Вітрова турбіна працює за досить простим принципом (див. рис. 1.2). Коли потік вітру проходить, він створює тиск на 12 лопатей вітрогенератора, які спеціально розташовані таким чином, щоб максимально використовувати енергію вітру. Ротор 1 вітрогенератора прикріплений до низькошвидкісного валу 2, який починає обертатися під дією тиску вітру. Це обертання перетворює енергію вітру в механічну енергію. Далі ця механічна енергія від тихохідного валу передається через редуктор 3 на вал 8 генератора 4. Редуктор, в свою чергу, забезпечує збільшення швидкості обертання вала. При обертанні ротора генератора 4, який є основним елементом перетворення енергії, механічна енергія перетворюється в електричну. Це відбувається за допомогою магнітного поля, яке створюється при обертанні вала генератора.

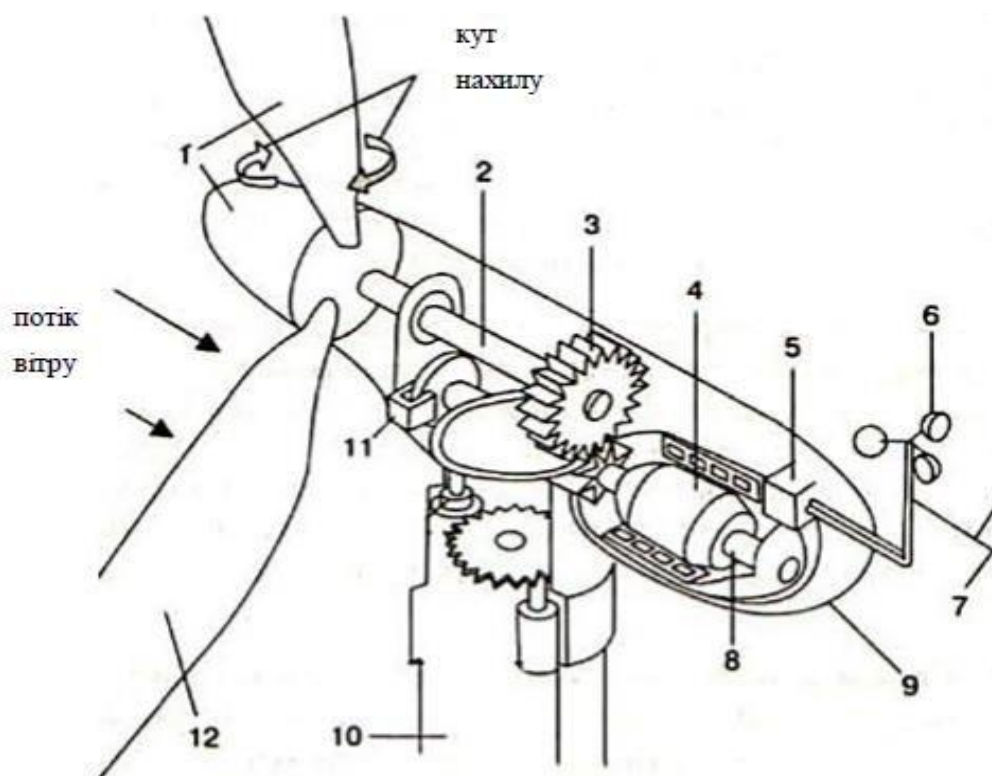


Рисунок 1.2 - Вітроустановка з горизонтальною віссю обертання
(а) і з вертикальною віссю (б)

На (рис. 1.2) представлена основна схема вітрової установки, яка ілюструє структуру електроустановки. Ця структура складається з ряду ключових елементів, які спільно забезпечують її функціонування.

1. Ротор вітряної турбіни, який відіграє ключову роль, перетворюючи енергію вітру на механічну енергію.

2. Низькошвидкісний вал, який служить для передачі механічної енергії від ротора.

3. Редуктор, важливий компонент, який збільшує швидкість обертання ротора вітряка.

4. Генератор, використовується для вироблення електроенергії та має високошвидкісний вал.

5. Контролер, який керує всією установкою. Автоматично запускає і гальмує вітряну турбіну.

6. Анемометр, пристрій, що вимірює швидкість вітру і передає цей параметр у контролер.

7. Флюгер, який відповідає за визначення напрямку вітру й обертання вітряної турбіни в потрібному напрямку.

8. Високошвидкісні вали, що обертають ротори генераторів.

9. Гондола - несуча верхня частина конструкції вітротурбіни з валом, редуктором, генератором, контролером і гальмівним механізмом.

10. Щогли, які представляють собою порожнисту металеву або бетонну конструкції.

11. Гальмівні механізми, важливі для безпеки, використовуються для запобігання поломки установки і використовуються для гальмування або зупинки ротора в критичних ситуаціях.

12. Лопаті, які використовуються для зловлення вітрової енергії. Вони активно використовуються пристроєм під час роботи. Коли потік вітру

потрапляє на лопаті, вони рухаються і обертають ротор, виробляючи електроенергію.

На перший погляд може здатися, що між різними типами вітрогенераторів, такими як горизонтально-осьові і вертикально-осьові, існує схожість. Однак це не так. Існують досить великі відмінності в параметрах цих двох типів вітрогенераторів, і параметри вертикально-осьових вітрогенераторів насправді також можуть суттєво відрізнятися. Крім того, важливо розглянути технічні можливості вітрогенераторів обох типів конструкцій. Це включає детальний аналіз їх потужності, ефективності, надійності, а також інших важливих технічних характеристик.

1.2 Вітрогенератори з горизонтальними обертовими валами

На перший погляд може здатися, що між різними типами вітрогенераторів, такими як горизонтально-осьові і вертикально-осьові, існує схожість. Однак це не так. Існують досить великі відмінності в параметрах цих двох типів вітрогенераторів, і параметри вертикально-осьових вітрогенераторів насправді також можуть суттєво відрізнятися. Крім того, важливо розглянути технічні можливості вітрогенераторів обох типів конструкцій. Це включає детальний аналіз їх потужності, ефективності, надійності, а також інших важливих технічних характеристик.

На сучасному етапі розвитку альтернативних джерел енергії найбільшого поширення набули вітряні турбіни з горизонтальною віссю обертання. Ці вітряки відрізняються від інших моделей тим, що вісь обертання вітряка паралельна поверхні землі, а лопаті обертаються проти напрямку вітру. Через таку конструкцію цей тип вітряків часто отримує назву "вітряна турбіна".

Горизонтальні вітряні турбіни мають особливу конструкцію, що дозволяє передній частині вітряка автоматично повертатися в пошуках вітру. Така автоматична реорієнтація оптимізує вплив вітру на лопаті, що забезпечує

високу ефективність роботи цього обладнання. Додатково, кут нахилу лопатей може бути змінений для вловлювання вітру, що має низьку швидкість.

Більшість горизонтальних вітряних турбін використовуються для вироблення великої кількості електроенергії. Ці вітрогенератори мають високий ККД (близько 50 %), тому цей тип вітрогенераторів є найпопулярнішим під час будівництва систем вітряних електростанцій.

Вітряки з горизонтальною віссю обертання можуть мати різну кількість лопатей, від однієї до декількох. Завдяки цьому варіативності, можна вибрати оптимальний варіант вітрогенератора для конкретних умов експлуатації. Вітрогенератори можна розділити на однолопатеві, дволопатеві, трилопатеві та багатолопатеві.

Однак, для забезпечення орієнтації ротора вітрогенераторів з горизонтальною віссю обертання в пошуках вітру, потрібні додаткові конструктивні елементи. Ці елементи ускладнюють загальну конструкцію вітрогенератора і вважаються одним з основних недоліків цього типу вітротурбін.

Основна перевага вітряних турбін з горизонтальним обертовим валом полягає в тому, що вони набагато ефективніші за інші типи з вертикальним обертовим валом. Вісь обертання розташована вертикально. Це можна пояснити тим, що кут атаки в робочому режимі менший. Як наслідок, вітряні турбіни з горизонтальним обертовим валом мають меншу масу і габарити, ніж вітрогенератори з вертикальним обертовим валом. У результаті вітряні турбіни з горизонтальною віссю обертання мають меншу вагу і габарити, ніж вітряні турбіни з вертикальною віссю обертання, які генерують однакову робочу потужність. Далі виконаємо аналіз конструктивного виконання горизонтальних вітроенергетичних установок.

1.3 Однолопатеві вітрові генератори

Однолопатеві вітрогенератори мають кілька переваг, найбільш значущою з яких є висока швидкість обертання. Ці вітрогенератори мають унікальну конструкцію, в якій замість другої лопаті використовується противага. Ця противага має мінімальний вплив на опір повітря, що дає їм перевагу і дозволяє використовувати їх у складі високошвидкісних генераторів, в тому числі асинхронних. Важливо відзначити, що ці вітрогенератори можуть працювати навіть при дуже низьких швидкостях вітру, що є ще однією важливою перевагою.

Однак, як і інші технології, однолопатеві вітрогенератори мають недоліки. Наприклад, висока швидкість обертання призводить до значного гіроскопічного ефекту. В результаті обертання ротора сповільнюється при зміні напрямку вітру, що створює додаткове навантаження на точки повороту лопатей. Крім того, лопаті повинні бути точно збалансовані через підвищені експлуатаційні ризики під час роботи установки. Це пов'язано з тим, що лопаті, які швидко рухаються, можуть спричинити набагато більше пошкоджень, ніж лопаті, які рухаються повільно. На рисунку 1.3 показано приклад типової однолопатевої вітрової турбіни.



Рисунок 1.3 – Однолопатева вітрова турбіна

1.4 Дволопатеві вітрові генератори

Вітрові турбіни з двома лопатями відрізняються унікальною конструкцією, яка чимось схожа на однолопатевий тип. Ця різниця в кількості лопатей не є випадковою, адже вона надає дволопатеvim вітровим генераторам особливих перевагу. Однією з них є те, що через парну кількість лопатей, ротор вітроколеса завжди збалансований незалежно від кутового положення лопатей. Це відрізняє дволопатеві вітрові генератори від однолопатевих, які потребують додаткових конструктивних елементів для

збереження балансу. Крім того, завдяки цій простоті конструкції, вартість дволопатевих вітрових генераторів може бути нижчою порівняно з однолопатевиими. Але, як і будь-яка інша технологія, дволопатеві вітрові генератори мають свої недоліки. Одним з них являється значний шум, а також вони створюють вібрації, які можуть стати проблемою у деяких випадках. На рисунку 1.4 показано приклад дволопатевої вітроустановки.



Рисунок 1.4 – Дволопатева вітрова турбіна

1.5 Трилопатеві вітрові генератори

Вітрогенератори з трьома лопатями стали найпопулярнішою модифікацією моделей з горизонтальною віссю обертання віротурбіни. Вчені з усього світу, які проводили дослідження в минулому столітті, довели, що оптимальна кількість лопатей для горизонтальної віротурбіни - три. Ці висновки, засновані на наукових дослідженнях, були прийняті найбільшими

світовими виробниками вітрогенераторів. Завдяки цьому, вітрові генератори з трьома лопатями стали найбільш широко представленими на ринку вітроенергетики. Вони можуть виробляти різну потужність - від декількох ватт до декількох мегаватт, що робить їх надзвичайно універсальними і дозволяє використовувати в різних умовах. На сьогоднішній день, ці трилопатеві вітрові генератори продовжують набувати високого попиту, завдяки їхній ефективності і надійності. На рисунку 1.5 показано приклад трилопатевої вітроустановки.



Рисунок 1.5 – Трилопатева вітрова турбіна

1.6 Багато лопатеві вітрові генератори

Багатолопатеві вітрогенератори представляють собою особливий тип горизонтальних вітрогенераторів, що відрізняються кількістю лопатей від

чотирьох до п'ятидесяти. Важливою особливістю цих вітрогенераторів є те, що ротор вітряка з великою кількістю лопатей здатний генерувати досить сильний крутний момент. Ця властивість надає їм значну перевагу порівняно з іншими типами вітряків, оскільки дозволяє ефективно конвертувати вітрову енергію в електричну. Проте, цей тип вітрогенераторів має і свої недоліки. Зокрема, вони характеризуються великим моментом інерції, що робить їх тихохідними, тобто вони повільно реагують на зміни в швидкості вітру, що може обмежити їх ефективність в умовах нестабільного вітру. На рисунку 1.6 показано приклад багатолопатевої вітрової установки.



Рисунок 1.6 – Багатолопатева вітрова турбіна

1.7 Вітрогенератори з вертикальними обертовими валами

Вертикальні вітряні турбіни менш ефективні, ніж горизонтальні, при цьому, згідно з деякими дослідженнями, коефіцієнт корисної дії втричі нижчий, ніж у горизонтальних вітряних турбін. Лопаті вертикальних вітряків обертаються перпендикулярно до землі за будь-якої сили і напрямку вітру. Це означає, що половина загальної кількості лопатей таких вітрогенераторів завжди обертається в напрямку, протилежному напрямку вітру, тому вітрогенератор з вертикальною віссю обертання не може використовувати половину енергії вітру, що знижує його енергоефективність. Це головний недолік цього типу вітрогенераторів. До інших недоліків цього типу належать:

- Відсутність можливості незалежного обертання лопатей;
- Високі навантаження на елементи конструкції;
- Усі лопаті мають бути однаковими, а їхні профілі - ідеально підібраними;
- високий рівень шуму під час роботи.

Попри ці недоліки, вітряні турбіни з вертикальним обертовим валом мають низку переваг. Зокрема, вертикальні вітряні турбіни з редуктором і генератором, встановлені на землі, простіші в установці та експлуатації.

Їхня перевага також у тому, що вони прості в експлуатації, оскільки не потребують флюгера. Крім того, такі вітряки можуть працювати незалежно від повітряного потоку, що є важливим аспектом їхньої роботи.

Конструкція вертикальних вітрогенераторів значно варіюється у зв'язку з різними модифікаціями вітроустановок. Проте, найпоширеніші варіанти розглянемо далі.

Ротор Савоніуса. На рис. 1.7 показано приклад конструкції ротора, в якого лопаті ротора сконструйовані у вигляді циліндричних поверхонь.



Рисунок 1.7 – Ротор Савоніуса

Переваги даної установки:

- Проста конструкція, що складається з двох або більше S-подібних лопатей, які менше схильні до поломки і простіші у виробництві;
- Може виробляти енергію вітру незалежно від того, з якого напрямку дме вітер;
- Починає обертатися при низькій швидкості вітру;
- Конструкцію можна встановити в обмежених просторах.

Вітряні турбіни з роторами типу Савоніуса мають ті самі недоліки, що й усі вітряні турбіни з вертикальними валами ротора. Зокрема, до них належать вібрації, шум, який утворюється при сильних вітрах, а так же низька ефективність використання вітрової енергії.

Ротор Дар'є. Вітрогенератор з вертикальним ротором Дар'є був розроблений трохи пізніше, ніж звичайні класичні вітрогенератори.

Такі вітрогенератори складаються з двох або трьох лопатей, які згинаються в еліптичну форму (рис.1.8) .



Рисунок 1.8 – ротор Дар'є

Вітряні турбіни з ротором Дар'є дуже прості у виготовленні та встановленні. До переваг цих вітрогенераторів належать їхня незалежна орієнтація щодо напрямку повітряного потоку. Технічне обслуговування дуже зручне, оскільки головний приводний вал розташований близько до землі. Ще однією перевагою проста кінематична схема. Основними недоліками цього типу вітрогенераторів є те, що ротор потрібно запускати вручну. Крім того, динамічні ефекти повітряного потоку створюють високе навантаження на опорний вузол. Для того, щоб правильно експлуатувати вітряну турбіну потрібно суворо дотримуватися заданого профілю лопатей по всій їхній довжині. Вітряні турбіни Даріуса створюють високий рівень шуму в ході своєї роботи.

Гелікоїдний ротор. Гелікоїдний ротор – прототип вертикально-осьового вітроколеса(рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Гелікоїдний ротор

Лопаті цієї вітряної турбіни виконані у формі гвинтової кривої, що забезпечує більш плавне обертання і знижує навантаження на опорі частини установки. Має високу швидкість обертання завдяки косому вигину лопатей ротора. Ефективно використовує вітровий потік, чим схожий на горизонтальні пристрої, але під час своєї роботи вони генерують шум. Гелікоїдні ротори значно дорожчі у виробництві через складну конструкцію повітряних крил.

Багатолопатеві ротори. Багатолопатевий ротор - це вдосконалена версія конструкції вітрогенератора з вертикальною віссю, що підтримується зовнішніми нерухомими лопатями(рис 1.10).



Рисунок 1.10 – Багатолопатевий ротор

Він підтримується зовнішнім кільцем нерухомих лопатей. Така схема збільшує ефективну площу захоплення вітрового потоку і полегшує стиснення і прискорення вітру, тим самим підвищуючи загальну ефективність вітрогенератора. Варто зазначити, що така конструкція чутлива до низьких швидкостей вітру. Однак такі вітрогенератори коштують недешево. Під час роботи вітрогенераторів з багатолопатевиими роторами збільшує звуковий фон.

Провівши аналітичний огляд промислових вітроенергетичних установок, можна зробити такі висновки.

1. Вертикальний тип вітрогенератора відрізняється тим, що має менший пусковий момент, що дозволяє йому працювати при мінімальних швидкостях вітру. З іншого боку, горизонтальний тип вітрогенератора є значно потужнішим і здатний продукувати достатню кількість енергії для електроприймачів великої потужності.

2. Оскільки вертикально-осьові типи вітроенергетичних установок зазвичай розміщують на землі, це значно спрощує доступ до генератора для його обслуговування і ремонту.

3. Вертикальні типи вітрогенераторів також мають можливість працювати при високих швидкостях вітру і можуть бути встановлені неподалік житлових будинків, включаючи міську інфраструктуру, що робить їх особливо привабливими для використання в урбанізованих областях.

4. Аналітичні дослідження показали, що одним з недоліків горизонтальних вітрогенераторів є необхідність постійного пошуку вітру за допомогою спеціального пристрою - флюгера. Цей додатковий елемент вітроенергетичної установки не тільки ускладнює конструкцію, але і підвищує її вартість.

5. Проте, враховуючи перераховані вище переваги горизонтально-осьових вітроенергетичних установок, а також їх широке промислове виробництво, можна зробити висновок про доцільність встановлення таких установок як альтернативного джерела енергії для живлення на фермерському господарстві.

2 ПРОЕКТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Обладнання для вітрової установки

Ураховуючи факт, що для різних вітрових режимів і електричних навантажень на одну й ту саму типову вітроенергетичну установку можна встановлювати інвертори різної потужності, а також різну кількість акумуляторів, додаткове обладнання для базового комплексу не передбачається. Вибір такого обладнання вимагає індивідуального підходу до кожного об'єкта окремо.

Додаткове обладнання складається з акумуляторної батареї, стабілізатора напруги, керуючого пристрою, автоматичного включення резерву, випрямляча і інвертора. Поглянемо більш детально на характеристики цих компонентів.

Акумуляторна батарея призначена для зберігання надлишкової електроенергії, яка виробляється вітроенергетичною установкою в умовах недостатнього споживання. Це важливий компонент, що дозволяє оптимізувати виробництво і використання електроенергії.

Стабілізатор напруги використовується для забезпечення стабільної роботи електричних приладів при коливаннях напруги в мережі. Це критично важливий елемент, що забезпечує безперебійність роботи електроустаткування.

Керуючий пристрій відповідає за автоматизацію процесів управління виробництвом та розподілу електроенергії. Це ключовий елемент, що дозволяє оптимізувати і ефективно керувати ресурсами.

Автоматичне включення резерву дозволяє швидко підключити додаткове джерело живлення в разі відмови основного джерела. Це забезпечує надійність і безперебійність живлення.

Випрямляч та інвертор відповідають за перетворення постійного струму в змінний та навпаки, що є необхідним для забезпечення роботи електричних пристроїв з різним типом живлення. Ці компоненти є важливими елементами для забезпечення гнучкості і ефективності системи живлення.

2.2 Область застосування та параметри вітрової установки

Використання енергії вітрового потоку для вироблення електроенергії за допомогою вітряних електростанцій має свої складності. Найбільш оптимальним варіантом використання вітрогенератора такої потужності є отримання електроенергії для автономного використання, оскільки частота вихідної напруги, як правило, нестабільна внаслідок нестабільності вітрового потоку. Для зниження вартості та збільшення економічної ефективності проєктованого генератора доцільно використовувати його для забезпечення електроенергією споживачів, які не пред'являють високих вимог до стабільності параметрів електроенергії.

Необхідно враховувати, що найбільш сприятливі вітрові умови, як правило, в малонаселених районах. Однак енергосистеми в сільській місцевості зазвичай малопотужні та відносно низьковольтні (менше 33 кВ), і тому при передачі на великі відстані виникає багато проблем, пов'язаних з втратами. Для виключення перебоїв в електропостачанні в безвітряні періоди необхідно передбачити використання акумуляторів енергії або дублювання вироблення енергії установками інших типів.

Для проєктованого ветрігенератора потужністю 7 кВт вибираємо вітроколесо горизонтально-осьового типу, що має 3 лопасті типу “Есперо” п'ятнадцятивідсоткової товщини.

Для забезпечення узгодження обертів генератора і вітроколеса використовуємо підвищуючий редуктор, який забезпечить швидкість обертання ротора генератора 250 об/хв.

Для орієнтації горизонтально-осьового вітродвигуна на напрямок вітру використовується активна система за допомогою хвостового оперення.

Для надійного зупинення працюючого вітродвигуна використовується в якості гальмівного пристрою лебідка, що виводить хвіст з-під вітру.

Башта для установки вітроколеса тип А.

2.1 - Таблиця параметрів проектованої вітрової установки

Діаметр крильчатки, м	6.5
Кількість лопатей	3
Матеріал лопатей	Стіклопластик
Напрямок крутіння	По часовій стрілці
Номінальна швидкість вітру, м/с	10
Тип генератора	Трьохфазний синхронний генератор с постійними магнітами
Номінальна потужність, Вт	7000
Максимальна потужність, Вт	9500
Максимальний струм на виході генератора, А	58.6
Акумуляторна напруга, В	220
Початкова швидкість вітру, м/с	3
Робоча швидкість вітру, м/с	3-15
Максимальна швидкість вітру, м/с	30
Висота щогли, м	15
Повна маса, кг	220

2.3 Вибір обладнання для проєктованої вітряної установки

Для зберігання надлишкової електроенергії, яка виробляється вітроенергетичною установкою в умовах недостатнього споживання буде використано акумулятор 5-7 кВт, 12V 17A AGM (рис 2.1).

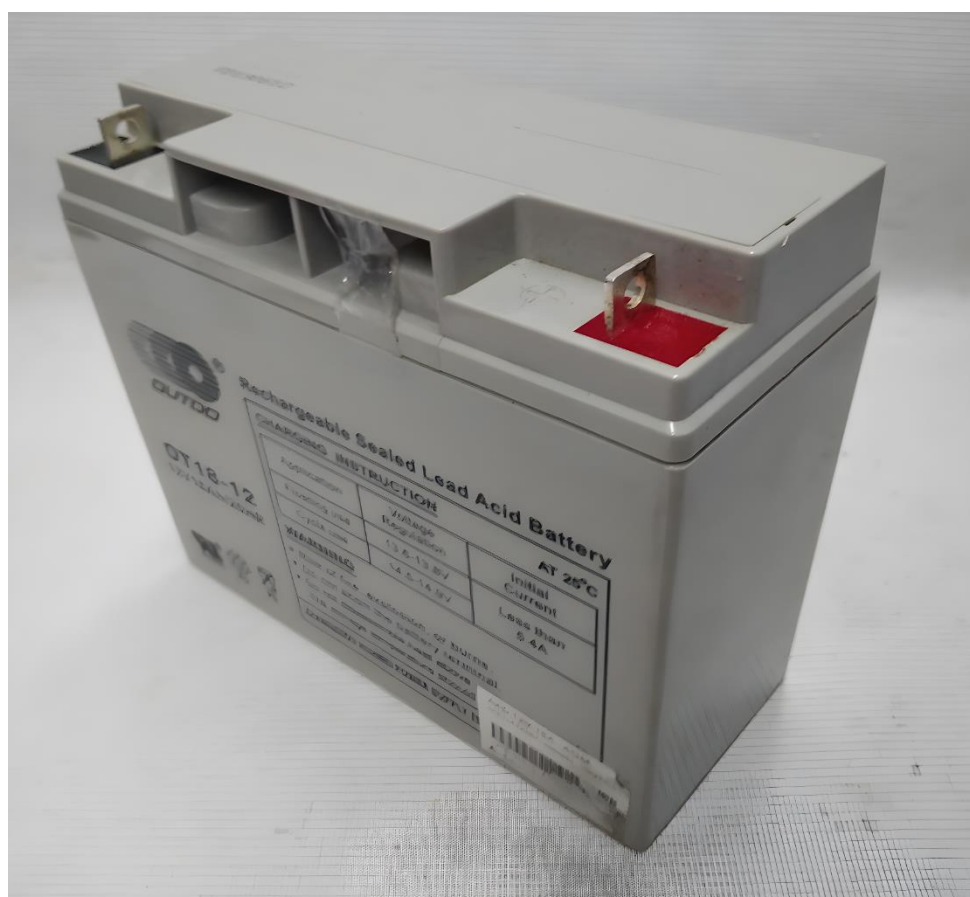


Рисунок 2.1 - акумулятор 5-7 кВт, 12V 17A AGM

Таблиця 2.2 – характеристики акумулятор 5-7 кВт, 12V 17A AGM

Розміри, мм	181x77x167
Дата виготовлення, год	2019
Тип	AGM
Номінальна напруга, В	12
Ємність акумулятора, А	17

Для забезпечення стабільної роботи електричних приладів при коливаннях напруги в мережі будемо використовувати стабілізатор напруги Gemix GDX-500 (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 - стабілізатор напруги Gemix GDX-500

Таблиця 2.3 - характеристики стабілізатор напруги Gemix GDX-500

Вихідна потужність, кВт	500
Похибка стабілізації, %	6
Діапазон стабілізації, В	140 - 260
Діапазон робочих температур, °С	0 - 40
Номінальна напруга, В	220
Крок ступені, В	12
Кількість ступенів	9
Частота, Гц	50
Номінальна вихідна потужність, кВт	0.35
Розміри, мм	160x115x235

Для того, щоб автоматизувати процес управління виробництвом та розподілу електроенергії ми установимо АВР EnerSol EATS-7500S (рис. 2.3)



Рисунок 2.3 - АВР EnerSol EATS-7500S

Таблиця 2.4 – характеристики АВР EnerSol EATS-7500S

Модель	EATS-7500S
Максимальна потужність, кВт	7.5
Вихідна напруга, В	220
Рівень захисту	IP54

Для запобігання скачків і коливання напруги в електричній мережі та забезпечення стабільного електричного живлення ми використовуємо стабілізатор напруги Стабілізатор напруги Елекс Гібрид 7 кВА симисторно-релейний (Гібрид У 9-1/32 v2.0) (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 - Стабілізатор напруги Елекс Гібрид 7 кВА симисторно-релейний (Гібрид У 9-1/32 v2.0)

Таблиця 2.5 – характеристики Стабілізатор напруги Елекс Гібрид 7
кВА симисторно-релейний (Гібрид У 9-1/32 v2.0)

Робочий струм, А	32
Номинальна потужність, кВт	7
Кількість ступенів стабілізації	9
Споживана активна потужність на холостому ході, Вт	35
Номинальна вхідна напруга, В	220
Діапазон стабілізації, В	135 - 315
Діапазон роботи, В	110 - 325
Частота мережі, Гц	45 - 65
Діапазон роботи в режимі байпас, В	120 - 265
Точність підтримки вихідної напруги в діапазоні стабілізації, %	7.5
Час реакції на зміну вхідної напруги, мс	100
Розміри, мм	460x275x178

3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

3.1 Розрахунок вітрового колеса

Умови МСА:

- Температура повітря $t=15^{\circ}\text{C}$.
- Щільність повітря $\rho = 1,226 \text{ кг/м}^3$.
- Атмосферний тиск $1013,1 \text{ гПа}$.

Таблиця 3.1 – Вихідні дані для розрахунку

Найменування	Позначення	Величина
Швидкість вітру, м/с	V	10
Потужність, що розвивається вітроколесом, Вт	P	7000
Кількість лопатей	Z	3
Радіус неробочої частини ротора	R _n	0.2*R
Діаметр маточини лопаті, м	d	0.67

Додаткові дані

Згідно з досвідом створення вітрогенераторів подібного класу, значення відносної швидкості знаходиться в діапазоні 6...8. Коефіцієнт використання енергії вітру (або коефіцієнт потужності C_p) у існуючих вітрогенераторів становить 0,43...0,47. Швидкість кінця лопасті не перевищує 80...100 м/с. Це обмеження пов'язане з аеродинамічним шумом та ерозійним зносом лопасті. В якості аеродинамічного профілю сегментів лопасті вітрогенератора використовується профіль типу "Есперо" п'ятнадцятипроцентної товщини. Застосування ламінарних профілів дозволяє отримати вищі характеристики,

але за умови високої точності виготовлення, відсутності забруднень поверхні лопасті, відсутності вібрацій конструкції та турбулентності потоку вітру. Недотримання вищезазначених умов знижує характеристики вітрогенераторів з ламінарними профілями лопастей на 25...30%.

Розподіл відносних товщин профілів по довжині лопаті пов'язаний як з аеродинамікою, так і з необхідною міцністю та жорсткістю. Зазвичай його уточнюють у процесі розрахунку лопаті на міцність та жорсткість. Для аеродинамічного розрахунку приймають статистичний розподіл відносних товщин по довжині лопаті.

Кількість розрахункових перерізів, що рекомендується, по радіусу лопаті 10...20.

Геометричні параметри профілю лопаті типу “Есперо” представлені на (Рис.2.1) .

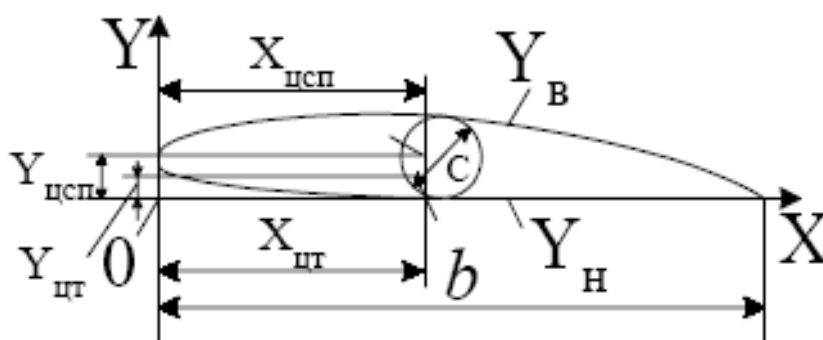


Рисунок 3.1 - Ескіз геометричних параметрів профілю лопаті типу “Есперо”

Таблиця 3.2 - Аеродинамічні характеристики профілю типу “Есперо” п'ятнадцяти відсоткової товщини

Найменування параметрів		Кут атаки	Коефіцієнт підйомної сили	Коефіцієнт зворотної аеродинамічної якості
Позначення		α	C_{y_a}	μ_a
Одиниці виміру		град.	о.е.	о.е.
Номери точок характеристик	1	-6°	0.10	0.1250
	2	-4°	0.30	0.0417
	3	-2°	0.50	0.0250
	4	0°	0.65	0.0192
	5	1°	0.76	0.0197
	6	2°	0.85	0.0182
	7	4°	1.03	0.0194
	8	6°	1.12	0.0268
	9	8°	1.16	0.0410
	10	10°	1.18	0.0593
	11	12°	1.16	0.0862
	12	14°	1.13	0.1217
	13	16°	1.10	0.1568
	14	18°	1.05	0.2071
	15	20°	0.99	0.2626

Тоді приймаємо:

- Відносна швидкість $\lambda=7$.
- Для проєктувального розрахунку $C_p=0,44$.
- Аеродинамічний профіль лопаті типу “Есперо”
- Кількість розрахункових перерізів – 15.

Розрахунок потужності енергії вітру:

$$P = 0.6 * S * V^3 \quad (3.1)$$

Де P – потужність Вт.

S – площа кидання кв.м.,

V^3 - швидкість вітру в куб м/с

Додатково формула розрахунку площі кола

$$S = \pi * r^2 \quad (3.2)$$

Де π – 3.14

r – радіус кола в квадраті

Приймемо діаметр вітроколеса рівним 6,5м. Тоді Потужність енергії вітру

$$P = 0.6 * \pi * r^2 * V^3 = 0.6 * 3.14 * 3.25^2 * 10^3 = 19890 \text{ Вт} \quad (3.3)$$

3.2 Розрахунок генератора

Оскільки передбачається використання проектованого генератора для живлення стандартної мережі, то як вихідні дані приймаємо:

- Номінальну потужність $P = 7000$ Вт,
- Номінальна напруга $U = 220$ В,
- Номінальна частота обертання $n = 250$ об/хв,
- Номінальна частота струму $f = 50$ Гц
- Число фаз $m = 1$ (з можливістю переходу на $m=3$)

Розрахунок генератора проводимо трифазного варіанта підключення генератора, по пристрої однофазні генератори відрізняються від трифазних співвідношенням потужностей

$$P_{1\phi} = 0.7 * P_{3\phi} \quad (3.4)$$

Методи визначення основних розмірів генератора у трифазних та однофазних генераторів подібні, використовуються лише деякі особливості. Для трифазних генераторів, що працюють в однофазному режимі, число пазів на полюс та фазу вибирається дробовим. Розрахунковий магнітний потік у обох генераторів однаковий.

Для переходу генератора однофазний режим роботи дві фази з'єднуються послідовно, у своїй відбувається перерозподіл струмів в обмотці.

3.3 Визначення основних розмірів

Головними розмірами синхронної машини є внутрішній діаметр статора D і довжина розрахунку l_δ . Вони визначаються із основного рівняння для розрахунків посійних електричних машин [1].

$$C_a = \frac{D^2 * n * l_\delta}{P_p} = \frac{6.1}{a_\delta * k_\phi * A * B_\delta * k_0} \quad (3.5)$$

Де P' – розрахункова потужність, a_δ – Розрахований коефіцієнт перекриття полюсів, k_ϕ - коефіцієнт форми поля, k_0 – Коефіцієнт намотування обмотки статора, A – лінійне навантаження статора, B_δ – максимальне значення індукції в повітряному зазорі при номінальному навантаженні [2].

Основні розміри електричних машин переважно залежить від розрахункової потужності P' . Розрахункову потужність визначають за формулою

$$P' = P_H * \frac{k_e}{\cos\phi} \quad (3.6)$$

де P_H – номінальна активна потужність генератора, МВт;

$\cos\phi_H$ – номінальний коефіцієнт потужності;

Згідно з даними розрахункової практики для синхронних генераторів з постійними магнітами, величина k_e вибирається в межах 1,2...1,4 [3]. Для генератора, що розраховується, вибираємо $k_e = 1,2$., коли струм затримується для генератора, його зазвичай приймають за $\cos = 0.8$ м.

Розраховуючи основні розміри, виходячи з трифазної схеми. Співвідношення потужності для однофазного і трифазного джерела живлення може бути прийнято як

$$P_{1\phi} = 0.7 * P_{3\phi} \quad (3.7)$$

$$P_{3\phi} = \frac{P_{1\phi}}{0.7} = \frac{7000}{0.7} = 10 \text{ кВт} \quad (3.8)$$

$$P_W = P^* = 10000 * \frac{1.2}{0.8} = 15 \text{ кВт} \quad (3.9)$$

Розрахункове значення коефіцієнта перекриття полюсів залежить від кількості пар полюсів. Кількість полярних пар визначається співвідношенням

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60*50}{250} = 12 \quad (3.10)$$

Приймається коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha\delta = 0,8$, а коефіцієнт форми поля $k_f = 1,11$.

Коефіцієнт намотування в разі використання двошарової обмотки, що має відносний крок укорочення $y = 0.8 \dots 0.87$, прийmemo $k_0 = 0.92$.

Величина лінійного навантаження, заснована на тривалому режимі роботи під час продувки, вибираємо $A = 22000 \text{ А/м}$.

Величина магнітної індукції в порожнечі в основному обмежена насиченістю магнітного ланцюга. Приймаємо $B_\delta = 0.8 \text{ Тл}$.

Існує певне співвідношення між основними розмірами синхронного генератора

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} \quad (3.11)$$

Де τ – полюсний поділ $\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot \delta}$ відповідно після підстановки

отримуємо:

$$\lambda = \frac{2 \cdot l_\delta \cdot p}{\pi \cdot D} \quad (3.12)$$

“Даний параметр залежить від кількості пар полюсів і для синхронних машин, що випускаються в даний час, зазвичай знаходиться в межах $\lambda = 1.2 \dots 2.3$. Прийємо попереднє значення $\lambda = 1.5$, тоді розрахункова довжина визначатиметься залежністю” [4].

$$l_{\delta} = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D}{2 \cdot p} \quad (3.13)$$

Підставляючи отриманий вираз у машинну формулу постійної, отримаємо формулу для визначення діаметра розточування статора

$$D = \sqrt[3]{\frac{6.1 \cdot 2 \cdot p \cdot P}{\lambda \cdot \pi \cdot k_{\phi} \cdot a_{\delta} \cdot k_0 \cdot A \cdot B_{\delta} \cdot n}} = \sqrt[3]{\frac{6.1 \cdot 2 \cdot 15000}{1.5 \cdot 3.14 \cdot 1.11 \cdot 0.8 \cdot 0.92 \cdot 220 \cdot 10^2 \cdot 0.8 \cdot 250}} = 0.506 \text{ м} \quad (3.14)$$

Приймаємо $D = 0,5$ м і визначаємо величину полюсного поділу:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{3.14 \cdot 0.5}{2 \cdot 12} = 0.0654 \text{ м} \quad (3.15)$$

Тоді розрахункова довжина статора:

$$l_{\delta} = \lambda \cdot \tau = 1.5 \cdot 0.0654 = 0.098 \text{ м} \quad (3.16)$$

Приймаємо $l_{\delta} = 0,1$ м

Для контролю вибору основних розмірів скористаємося методом універсальної машинної постійної.

$$C_s = \frac{1}{\sqrt[4]{K_w * K_\phi * \gamma * B_z}} \quad (3.17)$$

Де C_s - універсальна машинна постійна для статора, K_ϕ - повний коефіцієнт заповнення, K_w - обмотувальний коефіцієнт, γ - щільність струму в обмотці статора, B_z - середня магнітна індукція в зубцях статора. За приймаємо величини коефіцієнтів $K_w = 0.92$, $K_\phi = 0.1$. Для малих синхронних генераторів густина струму $\gamma = 6 * 10^2 \text{ A/m}^2$. З досвіду проектування малошумного синхронного двигуна $B_z = 1,4 \text{ Тл}$. Тоді величина універсальної машинної постійної становитиме:

$$C_s = \frac{1}{\sqrt[4]{0.92 * 0.1 * 600000 * 1.4}} = 0.0337 \quad (3.18)$$

Тоді величину полюсного поділу визначаємо як:

$$\tau = C_s * \sqrt[4]{\frac{\beta * P_p}{2 * p * f * \sqrt{2} * \lambda_1}} = 0.0337 * \sqrt[4]{\frac{0.66 * 15000}{2 * 12 * 50 * \sqrt{2} * 0.4}} = 0.0659 \text{ м} \quad (3.19)$$

D_1 - Розрахункова потужність, $\beta = \tau / l_1 = 1 / 1,5 = 0,66$, $f = 50 \text{ Гц}$, універсальна машинна постійна для статора, $\lambda_1 = (h * n) / \tau = 0.4$ - відносна глибина паза. Таким чином, діаметр розточування статора:

$$D_i = \frac{2 * p * \tau}{\pi} = \frac{24 * 0.0659}{3.14} = 0.503 \text{ м} \quad (3.20)$$

Цілком відповідає значенню, отриманому на основі методу машинної постійної.

3.4 Розрахунок обмотки та магнітопроводу статора

“Використовуйте двошарову петлеву обмотку для статора. Це знижує витрату міді та ізоляційних матеріалів і покращує форму кривої ЕРС. Розрахункове значення магнітного потоку полюсів в режимі холостого ходу визначається як:” [5] :

$$\Phi_{\delta 0} = B_{\delta 0} * l * \tau * a_i = 1.07 * 0.1 * 0.0659 * 0.716 = 0.00504 \text{ Вб} \quad (3.21)$$

ЕРС холостого ходу, що обчислюється при природній стабілізації напруги та підмагнічування спинки якоря:

$$E_0 = k_e * U_{\phi} = 1.2 * 127 = 152 \text{ В} \quad (3.22)$$

$$\text{де } U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В} \quad (3.23)$$

Число витків у фазі обмотки якоря (попередньо)

$$w_{\phi} = \frac{E_0}{4 * k_b * k_{\phi} * f * \Phi_{\delta 0}} = \frac{152}{4 * 1.11 * 0.906 * 50 * 0.00504} = 149.68 \quad (3.24)$$

Приймаємо $w_{\phi} = 150$

Розраховуємо номінальний струм фази

$$I_{\text{н}\phi} = \frac{P_{\text{н}}}{m * U_{\phi} * \cos \varphi} = \frac{10000}{3 * 127 * 0.8} = 32.81 \text{ А} \quad (3.25)$$

Число пазів статора $Z = 2p * m * q$, де

q – число пазів на полюс та фазу.

При числі полюсів $2p > 8$ і малому полюсному розподілі вибирають q дробовим. Для дробів негативний вплив гармонік на ЕРС зменшується. Тому приймаємо $q = 1\frac{1}{4}$, , тоді

$$Z = 2 * 12 * 3 * 0.25 = 90 \quad (3.26)$$

Кількість ефективних провідників у пазі

$$N_n = \frac{w_z * a}{q * p} \quad (3.27)$$

Де a - число паралельних гілок обмотки фази.

При виборі числа паралельних гілок необхідно, щоб струм у паралельній гілці знаходився в межах 50 ... 150 А. У нашому випадку $a = 1$ тоді

$$N_n = \frac{150 * 1}{0.25 * 12} = 10 \quad (3.28)$$

Приймаємо $N_n = 10$, уточнюємо число витків у фазі

$$w_z = \frac{N_n * q * p}{a} = \frac{10 * 0.25 * 12}{1} = 150 \quad (3.29)$$

Перевіряємо умови симетрії двошарової якірної обмотки. Для виконання цієї вимоги повинні дотримуватися таких умов:

$$\frac{Z}{m * t} = \frac{90}{3 * 3} = 10 - \text{ціле число} \quad (3.30)$$

$$\frac{2 * p}{d} = \frac{24}{4} = 6 - \text{ціле число} \quad (3.31)$$

Де t – найбільший спільний дільник z та p , d – знаменник простого дробу числа q . Умови симетрії двошарової якірної обмотки дотримуються.

Зубцевий поділ

$$t = \frac{\pi * D}{z} = \frac{3.14 * 0.5}{90} = 0.0174 \quad (3.32)$$

Уточнене значення лінійного навантаження:

$$A = \frac{Z * Nn * I_{н\phi}}{\pi * D * a} = \frac{90 * 10 * 32.81}{3.14 * 0.5 * 1} = 18808.3 \text{ А/м} \quad (3.33)$$

Розмір магнітного потоку в режимі холостого ходу:

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{E_0}{4k_b * k_0 * f * w_{\phi}} = \frac{152}{4 * 1.11 * 0.906 * 50 * 150} = 0.00504 \text{ Вб} \quad (3.34)$$

3.5 Мінімальна ширина зубця

“Для зменшення опору повітряного зазору і зменшення пульсації зубців статусний паз напіввідкритий. При виготовленні обмоток якоря з прямокутних проводів пази виходять прямокутними, а зубці-трапецієподібними” [6].

$$b_{zmin} = \frac{\Phi_{\delta 0} * t * Z}{b_{zmax} * k_c}, \text{ де} \quad (3.35)$$

$$B_{\delta 0} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{l * \tau * a_i} = \frac{0.00504}{0.1 * 0.0659 * 0.716} = 1.068 \text{ Тл} \quad (3.36)$$

$B_{z \max} = 1.6 \dots 1.9 \text{ Тл}$ (для сталі 1411) - допустиме значення індукції в зубців, при товщині листа $\Delta l = 3.5 * 10^{-4} \text{ м}$ - коефіцієнт заповнення сталлю магнітопроводу.

Таким чином, маємо:

$$b_{zmin} = \frac{1.068 \cdot 0.0174}{1.9 \cdot 0.95} = 0.0103 \text{ м} \quad (3.37)$$

Попереднє значення ширини паза

$$b_{\Pi} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_k)}{z} - b_{zmin} \quad (3.38)$$

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

З урахуванням цих параметрів отримуємо

$$b_{\Pi} = \frac{3.14 \cdot (0.5 + 2 \cdot 0.0015)}{90} - 0.0103 = 0.00704 \text{ м} \quad (3.39)$$

Перетин ефективного провідника статора обмотки де $j_1 = (5 \dots 12) \cdot 10^6$ А/м² – допустима густина струму. Приймаємо $j_1 = 5 \cdot 10^6$ А/м², тоді

$$q_{\text{еф}} = \frac{I_{\text{н}}}{a \cdot j_1} \quad (3.40)$$

Розрахункова ширина ізольованого провідника

$$q_{\text{еф}} = \frac{32.81}{1 \cdot 5} = 6.562 \text{ мм}^2 \quad (3.41)$$

Де $n_{\text{ш}}$ - Число ефективних провідників по ширині паза, Δ_n - товщина пазової ізоляції. Як пазова ізоляція використовуємо склослюдинити та поліамідну плівку. У цьому випадку товщина ізоляції $\Delta_n = 0,00018 \dots 0,00022$ м.

Розрахункова ширина неізольованого дроту:

$$a_{\text{низ}} = a_{\text{из}} - \Delta_{\text{из}} = 0.0022 - 0.0004 = 0.0018 \text{ м} \quad (3.42)$$

Де $\Delta_{\text{из}}$ – товщина ізоляції дроту на обидві сторони.

Для обмотки статора застосовують дроти ПНСДК та ПНСДКТ з двосторонньою товщиною ізоляції $\Delta_{\text{из}} = 0,0002 \dots 0,0003 \text{ м}$.

Підбираємо провідник стандартного перерізу:

$$a = 1,8 \text{ мм}, b = 4,0 \text{ мм}, q = 6,84 \text{ мм}^2$$

тоді уточнена ширина паза

$$b_n = n_{\text{ш}} * (a + \Delta_{\text{из}}) + 2 * \Delta n = 3 * (1.8 + 0.3) + 2 * 0.2 = 6.7 \text{ мм} \quad (3.43)$$

Висота паза:

$$h_n = n_{\text{ш}} * (b + \Delta_{\text{из}}) + 3 * \Delta n + hk + \Delta_{\text{из}} = 4 * (4 + 0.3) + 3 * 0.2 + 1.5 + 0.6 = 19.9 \text{ мм} \quad (3.44)$$

Де n_b - Число провідників по висоті паза, $h = (0,5 \dots 0,8) \text{ мм}$ - Висота клина. Ширина щілини напіввідкритого паза

$$b_{\text{ш}} = a + \Delta_{\text{из}} + \Delta_{\text{ш}} = 1.8 + 0.3 + 0.8 = 2.9 \text{ мм} \quad (3.45)$$

$\Delta_{\text{ш}} = (0,7 \dots 0,8) \text{ мм}$ - припуск по ширині щілини.

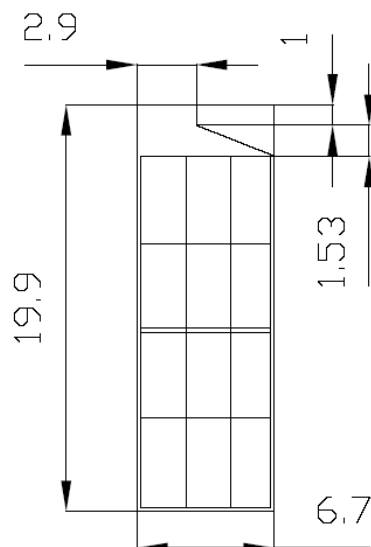


Рисунок 3.2 - Ескіз статорного паза синхронного генератора
Уточнена щільність струму

$$j_a = \frac{I_{\text{нф}}}{q_a} = \frac{32.81}{6.84} = 4.8 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \quad (3.46)$$

Уточнюємо мінімальну ширину зубця

$$b_{z\text{min}} = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_k)}{Z} = \frac{3.14 \cdot (0.5 + 2 \cdot 0.0015)}{90} = 0.0109 \text{ Тл} \quad (3.47)$$

Уточнена індукція у вузькому перерізі зубця

$$B_{z1\text{max}} = \frac{B_{\delta 0} \cdot t_z}{b_{z\text{min}} \cdot k_c} = \frac{1.068 \cdot 0.0174}{0.0109 \cdot 0.95} = 1.795 \text{ Тл} \quad (2.48)$$

Розраховуємо висоту статорної спинки

$$h_a = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2 \cdot l \cdot k_c \cdot B_{\delta 0}} = \frac{0.00504}{2 \cdot 0.1 \cdot 0.95 \cdot 1.5} = 0.0177 \text{ м} \quad (3.49)$$

$B_d \leq 1.5 \text{ Тл}$ - допустима індукція у спинці статора для сталі 1411.

Зовнішній діаметр статора

$$D_d = D + 2 * h_n + 2 * h_a = 0.5 + 2 * 0.0199 + 2 * 0.0177 = 0.5752 \text{ м} \quad (3.50)$$

Отримане значення округляємо до найближчого нормалізованого

$$D_{dcc} = 0.59 \text{ м}$$

Уточнена висота спинки статора

$$h_a = \frac{(D_d - D)}{2} - h_d = \frac{0.59 - 0.5}{2} - 0.0199 = 0.0251 \text{ м} \quad (3.51)$$

Уточнена індукція у спинці статора

$$B_d = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2 * l * k_c * h_a} = \frac{0.00504}{2 * 0.1 * 0.95 * 0.0251} = 1.057 \text{ Тл} \quad (3.52)$$

3.6 Крок обмотки статора

Двошарові обмотки статора, як правило, виконують із укороченим кроком

$$y_1 = (0.8 - 0.86) * \tau_{\Pi} \text{ де } \tau_{\Pi} = 3q_1 = 3,75, \text{ тоді} \quad (3.53)$$

$$y_1 = (0.8 - 0.86) * 3.75 = 3 \dots 3.225 \quad (3.54)$$

Приймаємо $y_1 = 3$ тоді

$$\beta = \frac{y_1}{\tau_{\Pi}} = \frac{3}{3.75} = 0.8 \quad (3.55)$$

Коефіцієнт укорочення

$$k_y = \sin \frac{\pi * \beta}{2} = \sin \frac{3.14 * 0.8}{2} = 0.951 \quad (3.56)$$

Коефіцієнт розподілу

$$k_p = \frac{0.5}{(b \cdot d + c) \cdot \sin\left(\frac{30}{b \cdot d + c}\right)} \quad (3.57)$$

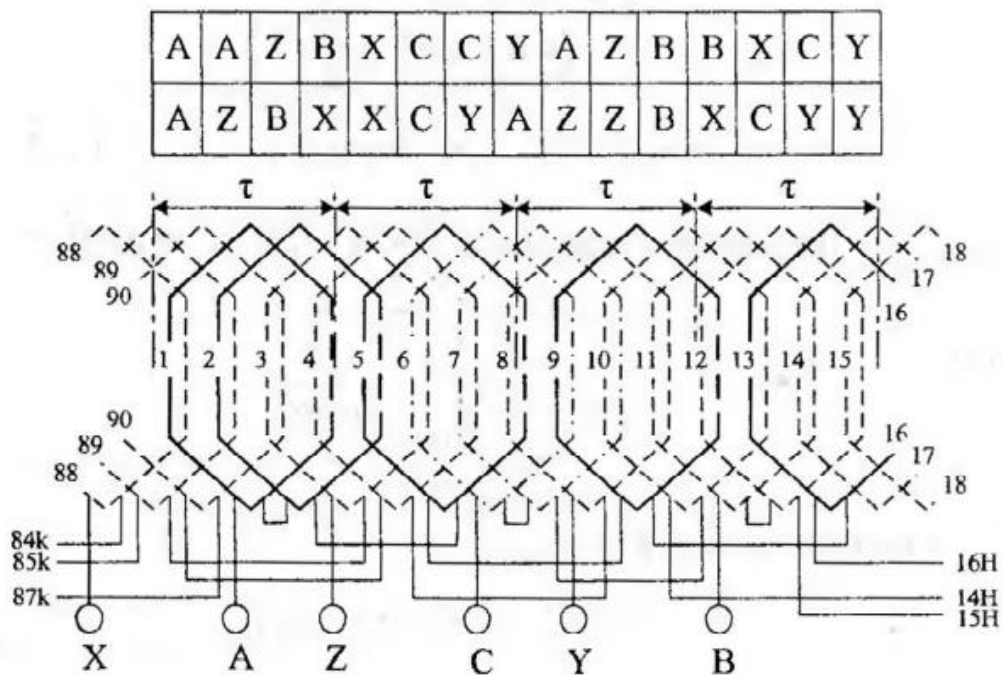


Рисунок 3.3 - Схема обмотки статора

Відомо, що для обмотки з дробовим q $q_1 = b + \frac{c}{d}$ де b ціле число, c/d - правильна нескоротна дріб. Звідси $(b \cdot d + c) = 5$, тоді

$$k_p = \frac{0.5}{5 \cdot \sin\left(\frac{30}{5}\right)} = 0.958 \quad (3.58)$$

Коефіцієнт обмотки

$$k_a = k_y * k_p = 0.951 * 0.958 = 0.91 \quad (3.59)$$

Коефіцієнт повітряного зазору при $\delta = 0,6$ мм

$$k_\delta = \frac{t_z + \frac{5 \cdot t_z \cdot \delta}{b_{III}}}{t_z - b_{III} + \frac{5 \cdot t_z \cdot \delta}{b_{III}}} = \frac{17.4 + \frac{5 \cdot 17.4 \cdot 0.6}{2.9}}{17.4 - 2.9 + \frac{5 \cdot 17.4 \cdot 0.6}{2.9}} = 1.089 \quad (3.60)$$

Таблиця 3.3 - Порядок з'єднання котушок фаз обмотки

А — 1Н	В — 11Н	С — 6Н
1К — 2Н	11К — 12Н	6К — 7Н
2К — 5Н	12К — 15Н	7К — 10Н
5К — 2Н	15К — 19Н	10К — 14Н
9К — 13Н	19К — 23Н	14К — 18Н
13К — 16Н	23К — 26Н	18К — 21Н
16К — 17Н	26К — 27Н	21К — 22Н
17К — 20Н	27К — 30Н	22К — 25Н
20К — 24Н	30К — 34Н	25К — 29Н
24К — 28Н	34К — 38Н	29К — 33Н
28К — 31Н	38К — 41Н	33К — 36Н
31К — 32Н	41К — 42Н	36К — 37Н
32К — 35Н	42К — 45Н	37К — 40Н
35К — 39Н	45К — 49Н	40К — 44Н
39К — 43Н	49К — 53Н	44К — 48Н
43К — 46Н	53К — 56Н	48К — 51Н
46К — 47Н	56К — 57Н	51К — 52Н
47К — 50Н	57К — 60Н	52К — 55Н
50К — 54Н	60К — 64Н	55К — 59Н
54К — 58Н	64К — 68Н	59К — 63Н
58К — 61Н	68К — 71Н	63К — 66Н
61К — 62Н	71К — 72Н	66К — 67Н
62К — 65Н	72К — 75Н	67К — 70Н
65К — 69Н	75К — 79Н	70К — 74Н
69К — 73Н	79К — 83Н	74К — 78Н
73К — 76Н	83К — 86Н	78К — 81Н
76К — 77Н	86К — 87Н	81К — 82Н
77К — 80Н	87К — 90Н	82К — 85Н
80К — 84Н	90К — 4Н	85К — 89Н
84К — 88Н	4К — 8Н	89К — 3Н
88К — X	8К — Y	3К — Z

3.7 Параметри схеми заміщення обмотки

Активний опір фази обмотки якоря

$$R_d = \rho_0 \frac{w_\Phi * l_{\text{сер}}}{q_d * a} * k_t \quad (3.61)$$

Де $\rho_0 = 1.75 * 10^{-8}$ Ом·м – питомий опір при $t = 20$ °C, l_s – середня довжина витка, $k_t = 1.22$ – температурний коефіцієнт опору.

Середня довжина витка

$$l_{\text{сер}} = 2 * (l + l_\Delta) \quad (3.62)$$

$$l_\Delta = 1.4 * \tau = 1.4 * 0.0654 = 0.09156 \text{ м} \quad (3.63)$$

$$l_{\text{сер}} = 2 * (0.1 + 0.09156) = 0.383 \text{ м} \quad (3.64)$$

$$R_d = 1.75 * 10^{-8} * \frac{150 * 0.383}{6.84 * 10^{-6} * 1} * 1.22 = 0.179 \text{ Ом} \quad (3.65)$$

Індуктивний опір розсіювання фази обмотки якоря

$$x_q = 4\pi * f * \mu_0 \frac{w_\Phi^2}{p * q} * ((\lambda_\Pi + \lambda_\Delta) * 1 + \lambda_\Delta * l_\Delta) \quad (3.66)$$

$\lambda_\Delta, \lambda_\Delta, \lambda_\Pi$ - питомі провідності пазового, диференціального та лобового розсіювання відповідно

$$\lambda_\Pi = \frac{(h_n - h_k) k_{y1}}{3b_n} + \frac{h_k k_{y2}}{b_\Pi}, \text{де} \quad (3.67)$$

k_{y1}, k_{y2} - коефіцієнти, що враховують скорочення обмотки:

$$k_{y1} = \frac{1+3\beta}{4} = \frac{1+3*0.8}{4} = 0.85 \quad (3.68)$$

$$k_{y2} = \frac{1+3k_{y1}}{4} = \frac{1+3*0.85}{4} = 0.8875 \quad (3.69)$$

$$\lambda_{\Pi} = \frac{(19.9-1.5)*0.85}{3*6.7} + \frac{1.5*0.8875}{2.9} = 1.237 \quad (3.70)$$

$$\lambda_{д} = \frac{\delta_p a_i}{b_{\text{ш}} + 0.8\delta_p} (0.25 + 0.75\beta) \quad (3.71)$$

Де a_i - розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття

$$a_i = a_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta_p} + \frac{6}{1-a_p}} \quad (3.72)$$

А δ_p коефіцієнт розраховується за формулою

$$\delta_d = k_{\delta} * \delta = 1.089 * 0.6 = 0.6534 \quad (3.73)$$

$$a_i = 0.68 + \frac{4}{\frac{0.0654}{0.654*10^{-3}} + \frac{6}{1-0.68}} = 0.7137 \quad (3.74)$$

$$\lambda_{д} = \frac{0.6534*0.7137}{2.9+0.8*0.6534} (0.25 + 0.75 * 0.8) = 0.116 \quad (3.75)$$

Питома провідність лобового розсіювання

$$\lambda_{л} = \frac{0.34q1(l_{л}-0.64\beta\tau)}{l} = \frac{0.34*1.25*(0.09156-0.64*0.8*0.0654)}{0.1} = 0.247 \quad (3.76)$$

Таким чином

$$x_q = 4 * 3.14 * 50 * 3.14 * 10^{-7} * \frac{150^2}{12 * 1.25} * ((1.237 + 0.116) * 1 + 0.247 * 0.09156) = 0.1296 \text{ Ом} \quad (3.77)$$

Індуктивний опір якоря по поздовжній $x_{\sigma d}$ та поперечній $x_{\sigma q}$ осях відповідно

$$x_{ad} = \frac{4\mu_0}{\pi d} * m * f * (w_\phi k_0) * \Delta_{ad} \quad (3.78)$$

$$x_{aq} = \frac{4\mu_0}{\pi d} * m * f * (w_\phi k_0) * \Delta_{aq} \quad (3.79)$$

Де Δ_{ad} , Δ_{aq} - коефіцієнти провідності машини по поздовжній і поперечній осях відповідно.

$$\Delta_{ad} = k_b * k_{ad} \frac{\Delta_{\delta q} * \Delta_{nd}}{\Delta_{\delta d} + \Delta_{nd}} \quad (3.80)$$

$$\Delta_{aq} = k_b * k_{aq} \frac{\Delta_{\delta q} * \Delta_{nq}}{\Delta_{\delta d} + \Delta_{nq}} \quad (3.81)$$

“ $\Delta_{b\delta}$ -коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по поздовжній осі,

Δ_{nd} -коефіцієнт магнітної провідності полюса в поздовжньому напрямку,

$\Delta_{\delta d}$ -коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по поперечній осі,

Δ_{nq} -коефіцієнт магнітної провідності полюса в поперечному напрямку,

k_{ad} - коефіцієнт реакції якоря по поздовжній осі,

$k_b = 1,05 \dots 1,1$ - коефіцієнт форми поля збудження (при типовому співвідношенні розмірів індуктора та рівномірному повітряному зазорі)” [6].

Коефіцієнт реакції якоря по поздовжній осі визначаємо за формулою:

$$k_{ad} = \frac{a_p * \pi + \sin(a_p * \pi)}{4 * \sin(a_p * \frac{\pi}{2})} = \frac{0.68 * \pi + \sin(0.68 * \pi)}{4 * \sin(0.68 * \frac{\pi}{2})} = 0.85 \quad (3.82)$$

Коефіцієнт реакції якоря по поперечній осі

$$k_{aq} = \frac{a_p * \pi + \sin(a_p * \pi) + \frac{2}{3} \cos(a_p * \pi)}{4 * \sin(a_p * \frac{\pi}{2})} = \frac{0.68 * \pi + \sin(0.68 * \pi) + \frac{2}{3} \cos(0.68 * \pi)}{4 * \sin(0.68 * \frac{\pi}{2})} = 0.46 \quad (3.83)$$

Коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по поздовжній осі

$$\Delta_{b\delta} = \frac{\tau * l}{k_{uq} * \delta_p} = \frac{0.0654 * 0.1}{1.2 * 0.06534 * 10^{-3}} = 8.341 \quad (3.84)$$

$k_{\mu d} = 1,1 \dots 1,3$ – коефіцієнт, що враховує насичення провідності повітряного зазору поздовжньої осі.

Коефіцієнт магнітної провідності повітряного зазору по поперечній осі

$$\Delta_{\delta b} = \frac{\tau * l}{k_{uq} * \delta_p} = \frac{0.0654 * 0.1}{1.3 * 0.06534 * 10^{-3}} = 7.70 \quad (3.85)$$

$k_{\mu d} = 1,2 \dots 1,4$ – коефіцієнт, що враховує насичення провідності повітряного зазору поперечної осі.

Коефіцієнт магнітної провідності полюса у поздовжньому напрямку

$$\Delta_{nd} = \frac{\mu_{bnM} * b_m * l_m}{h_m} \quad (3.86)$$

μ_{bnM} - магнітна проникність повернення матеріалу постійного магніту, для магніту з матеріалу $Nd_2Fe_{14}B_2 = 1,23$ $b_m = 45$ мм $l_m = 100$ мм $h_m = 24$ мм - ширина, довжина і висота магніту відповідно.

$$\Delta_{nd} = \frac{1.23 * 0.045 * 0.1}{0.024} = 0.231 \quad (3.87)$$

Коефіцієнт магнітної провідності полюса у поперечному напрямку

$$\Delta_{nq} = \frac{2 * \mu_0 * h_m * l_m}{b_m} = \frac{2 * 1.23 * 0.024 * 0.1}{0.045} = 0.131 \quad (3.88)$$

Коефіцієнт провідності машини по поздовжній осі

$$\Delta_{ad} = 1.11 * 0.85 \frac{8,341 * 0.231}{8,341 + 0.231} = 0.212 \quad (3.89)$$

Аналогічно розрахуємо провідності поперечної осі

$$\Delta_{aq} = 1.11 * 0.46 \frac{7.7 * 0.131}{7.7 + 0.131} = 0.0658 \quad (3.90)$$

Індуктивні опори обмотки якоря по поздовжній та поперечній осях складуть:

$$x_{ad} = \frac{4 * 4 * 3.14 * 10^{-7}}{3,14 * 12} * 3 * 50 * (150 * 0.91)^2 * 0.212 = 0.079 \quad (3.91)$$

$$x_{aq} = \frac{4 * 4 * 3.14 * 10^{-7}}{3,14 * 12} * 3 * 50 * (150 * 0.91)^2 * 0.0658 = 0.0245 \quad (3.92)$$

Повні індуктивні опори обмотки якоря вздовж поздовжньої та поперечної осей відповідно дорівнюють

$$x_d = x_\sigma + x_{ad} = 0.02196 + 0.079 = 0.268 \quad (3.93)$$

$$x_q = x_\sigma + x_{aq} = 0.02196 + 0.0245 = 0.02441 \quad (3.94)$$

3.8 Розраховуємо характеристики ротора

Згідно з чинним стандартом, промисловість випускає постійні призматичні магніти на основі рідкоземельних матеріалів. У зв'язку з цим збірна конструкція ротора (котушки індуктивності) синхронного генератора з порушенням від постійного магніту знайшла широке застосування в практичному проектуванні. До проєктованого генератора застосуємо ротор з призматичним магнітом типу "Зірочка". У такому роторі використовуються магніти з радіальною намагніченістю.

Конструкція збірного ротора типу "Зірочка" включає в себе радіально намагнічений постійний магніт, внутрішній кінець якого примикає до магнітомягкої втулці, прикріпленою до валу генератора.

Допускається наявність повітряного зазору між статором і ротором $\delta = 0,6$ мм.

Розраховуємо зовнішній діаметр ротора:

$$D_p = D = 2\delta = 0.5 - 2 * 0.0006 = 0.4994 \text{ м} \quad (3.95)$$

Приймемо конструктивний коефіцієнт полюсного перекриття $a_p = 0,68$

Тоді розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття

$$a_i = a_p + \frac{4}{\frac{\tau}{\delta p} + \frac{6}{1 - a_p}} = 0.68 + \frac{4}{\frac{0.0654}{0.6534} + \frac{6}{1 - 0.68}} = 0.892 \quad (3.96)$$

Розраховуємо ширину полюса:

$$b_m = a_p * \tau = 0.68 * 0.0654 = 0.045 \text{ м} \quad (3.97)$$

Приймаємо висоту полюса $h_m = 0,034$ м.

Довжину полюса приймаємо рівною довжині статора $l_M = l = 0,1$ м

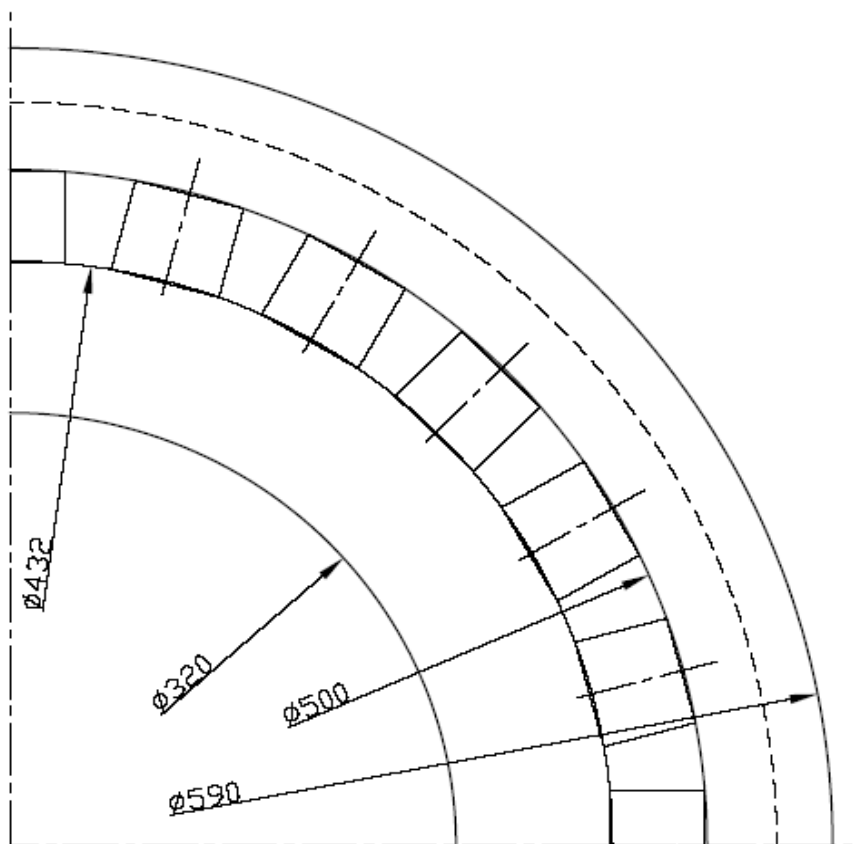


Рисунок 3.6 - Ескіз магнітної системи генератора

3.9 Розрахунок провідностей розсіювання індуктора

Додаткові геометричні розміри, що використовуються в розрахунках, показані на малюнку.

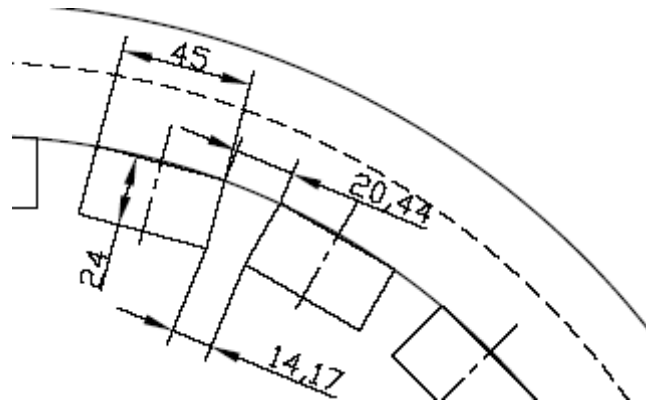


Рисунок 3.7 - Додатковий ескіз магнітної системи генератора

Провідність розсіювання магніту визначаємо за формулою

$$A_{SM} = K_{\lambda} * \Delta_{em} \quad (3.98)$$

$K_{\lambda} = 0.15$ - коефіцієнт ослаблення потоку розсіювання, який залежить від конфігурації міжполюсного простору, коефіцієнта проникності магніту і визначається за графіками, наведеними в, залежно від відношення та величини $\Delta_{min} / \Delta_{max}$ і величини ε . Для нашого випадку $\Delta_{min} / \Delta_{max} = 14/20 = 0,76$.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{h_m * \Delta_{FI}}{p_b * l_m * b_m}} \quad (3.99)$$

$$\Delta_{em} = \left(5l_i \frac{h_m \varphi_a}{\Delta_{max}} + 1.6h_v * \varphi_b \right) * 10^{-6}, \text{де} \quad (3.100)$$

$$\varphi_a = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \left[1 - \frac{\Delta_{min}}{\Delta_{max} - \Delta_{min}} \ln\left(\frac{\Delta_{max}}{\Delta_{min}}\right) \right] \quad (3.101)$$

$$\varphi_a = \frac{0.02}{0.02 - 0.014} \left[1 - \frac{0.014}{0.02 - 0.014} \ln\left(\frac{0.02}{0.014}\right) \right] = 0.56 \quad (3.102)$$

$$\varphi_b = \frac{\pi * b_m}{2 * \Delta_{max}} + \ln\left(1 + \frac{\pi * b_m}{2 * \Delta_{max}}\right) - \left(\frac{\pi * b_m}{2 * \Delta_{max}}\right)^2 \ln\left(\frac{2 * \Delta_{max}}{\pi * b_m}\right) \quad (3.103)$$

$$\varphi_b = \frac{\pi * 0.045}{2 * 0.02} + \ln\left(1 + \frac{\pi * 0.045}{2 * 0.02}\right) - \left(\frac{\pi * 0.045}{2 * 0.02}\right)^2 \ln\left(\frac{2 * 0.02}{\pi * 0.045}\right) = 1.93 \quad (3.104)$$

$$\Delta_{em} = \left(5 * 0.1 \frac{0.024 * 0.56}{0.02} + 1.6 * 0.024 * 1.91 \right) * 10^{-6} = 0.41 * 10^{-6} \quad (3.105)$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{0.024 \cdot 0.41 \cdot 10^{-6}}{1.586 \cdot 10^{-6} \cdot 0.1 \cdot 0.045}} = 6.01 \quad (3.106)$$

$$S_b = \frac{B_r}{H_c} = \frac{1.23}{880 \cdot 10^3} = 1.4 \cdot 10^{-3} \quad (3.107)$$

$$A_{SM} = 0.15 \cdot 0.41 \cdot 10^{-6} \quad (3.108)$$

3.10 Розрахунок магнітного ланцюга та побудова робочої діаграми магнітів

МДС повітряного зазору, А,

$$F_{\delta a} = 0.8 B_{\delta 0} \delta_p \cdot 10^6 = 0.8 \cdot 1.068 \cdot 0.6534 \cdot 10^3 = 558.3 \text{ А} \quad (3.109)$$

$$B_{\delta 0} = \frac{\Phi}{l \cdot \tau \cdot a_i} = \frac{0.00504}{0.1 \cdot 0.0659 \cdot 0.716} = 1.068 \text{ Тл} \quad (3.110)$$

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{E_0}{4k_p \cdot k_0 \cdot f \cdot w_{\Phi}} = \frac{152}{4 \cdot 1.11 \cdot 0.906 \cdot 50 \cdot 50} = 0.00504 \text{ Вб} \quad (3.111)$$

Розрахункова індукція у зубцях

$$B_{Z0} = \frac{B_{\delta 0} \cdot t_z}{b_z \cdot k_{3c}} \quad (3.112)$$

b_z - розрахункова ширина зубця

$$b_z = \frac{\frac{\pi(D+2hn)}{Z} - b + 2b_{zmin}}{3} \quad (3.108)$$

b_{zmin} - мінімальна ширина зубів

$$b_{zmin} = \frac{\pi(D+2hn)}{Z} - b = \frac{\pi(0.5+2 \cdot 0.0015)}{90} - 0.0067 = 0.0108 \text{ м} \quad (3.113)$$

Таким чином

$$b_z = \frac{\frac{\pi(0.5+2 \cdot 0.0015)}{90} - 0.0067 + 2 \cdot 0.0108}{3} = 0.0112 \text{ м} \quad (3.114)$$

$$B_{Z0} = \frac{1.068 \cdot 0.0174}{0.0112 \cdot 0.95} = 1.747 \text{ Тл} \quad (3.115)$$

Напруженість поля в зубці визначаємо по кривій намагнічування сталі 1411 $H_z = 17100$ А/м.

МРС, необхідна для проведення потоку через зубцеву зону:

$$H_{z0} = h_n H_z = 0.0199 * 1710 = 340.3 \text{ А} \quad (3.116)$$

Розрахункова індукція у спинці якоря

$$B_{d0} = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2l * h_d * k_0} = \frac{0.00504}{2 * 0.1 * 0.0174 * 0.95} = 1.524 \text{ Тл} \quad (3.117)$$

Напруженість поля в спині якоря визначаємо по кривій намагнічування сталі 1411 $H_d = 4420$ А/м.

МРС на проведення потоку через стінку якоря:

$$F_{da} = L_a H_d \quad (3.118)$$

L_a - середня довжина силової лінії у спинці якоря:

$$L_a = \frac{\pi(D + 2h_n + 2h_a)}{2p} = \frac{\pi(0.5 + 2 * 0.0199 + 2 * 0.0174)}{24} = 0.0752 \quad (3.119)$$

Таким чином

$$F_{da} = 0.0752 * 4420 = 332.2 \text{ А} \quad (3.120)$$

Сумарна МРС на пару полюсів, необхідна для проведення магнітного потоку

$$F_{ha} = 2F_{\delta a} + 2F_{za} + F_{da} = 2 * 558.3 + 2 * 340.3 + 323.3 = 2120.5 \text{ А} \quad (3.121)$$

Індукція в тілі ротора

$$B_{dp} = \frac{\Phi_{\sigma 0} * \sigma}{2 * S_{ap}} \quad (3.122)$$

де S_{ap} – перетин спинки ротора

$$S_{ap} = h_{ap} * l_{ap} \quad (3.123)$$

σ - коефіцієнт розсіювання магніту, $l_{ap} = l = 0,1\text{м}$, $d_b = 0,32\text{м}$ - внутрішній діаметр розточування спинки ротора, h_{ap} - висота спинки ротора

$$h_{ap} = \frac{D_a - 2h_m - d_b}{2} = \frac{0.4988 - 2 * 0.024 - 0.32}{2} = 0.0654 \text{ м} \quad (3.124)$$

$$S_{ap} = 0.0654 * 0.1 = 0.00654 \quad (3.125)$$

Коефіцієнт розсіювання магніту

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_{sm}}{\Phi_{\delta 0}}, \text{де} \quad (3.126)$$

Φ_{sm} - потік розсіювання магніту

$$\Phi_{sm} = 0.5 F_{10} * \Delta_{sm} = 0.5 * 2120.5 * 0.6765 * 10^{-7} \text{ Вб} \quad (3.127)$$

$$\sigma = 1 + \frac{0.0000717}{0.00504} = 1.014 \quad (3.128)$$

$$B_{dp} = \frac{0.00504 * 1.014}{2 * 0.00654} = 0.391 \text{ Тл} \quad (3.129)$$

Напруженість магнітного поля в спинці ротора визначаємо по кривій намагнічування сталі 1411 $H_{ap} = 137 \text{ А/м}$.

МДС, що витрачається на проведення потоку через спинку ротора:

$$F_{ap} = L_{ap} * H_{ad} \quad (3.130)$$

L_{ad} - середня довжина силової лінії у спинці ротора

$$L_{ad} = \frac{\pi(D-2h_n+h_{ap})}{2p} = \frac{\pi(0.4988-2*0.024-0.0334)}{24} = 0.0546 \text{ м} \quad (3.131)$$

Таким чином

$$F_{ap} = 0.0546 * 137 = 7.481 \text{ А} \quad (3.132)$$

Індукція у стику магніту

$$B_{СТ.М} = \frac{\Phi_{\delta_0} * \sigma}{b_M * l_M} = \frac{0.00504 * 1.014}{0.045 * 0.1} = 1.136 \text{ Тл} \quad (3.133)$$

Падіння МДС у стиках магніту на один полюс

$$F_{СТ.М} = 1.6 B_{СТ.М} \delta_{СТ.М} * 10^6 = 1.6 * 1.136 * 5 * 10^{-5} * 10^{-6} = 90.9 \text{ А} \quad (3.134)$$

$\delta_{СТ.М} = 5 * 10^{-5}$ м - розрахунковий розмір стиків магнітів з магнітопровідною втулкою.

МРС магніту на пару полюсів

$$F_{МА} = F_{10} + 2F_{СТ.М} + F_{ap} = 2120.5 + 2 * 90.9 + 7.481 = 2309.8 \text{ А} \quad (3.135)$$

З даних, отриманих при розрахунку магнітного ланцюга машини, створюється схема роботи магніту.

У разі магнітів, виготовлених з рідкоземельних матеріалів і кобальту, крива розмагнічування збігається з кривою прямого повернення. Ми будемо її по двох точках: залишкового потоку Φ_s і коерцитивної сили – МДС F_c .

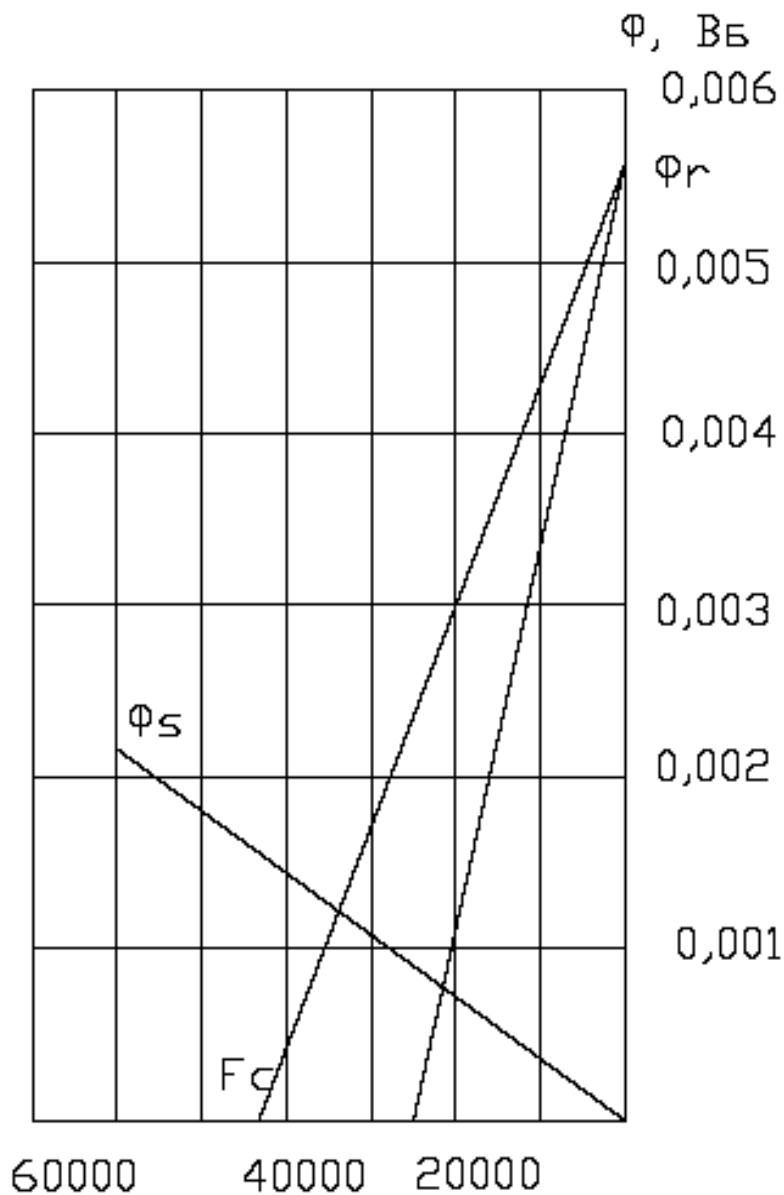


Рисунок 3.8 – Робоча діаграма магніта

Для нашої конструкції індуктора типу “збірна зірка”

$$F_c = 2 * h_M * H_c = 2 * 0.024 * 880 * 10^3 = 42240 \text{ A} \quad (3.136)$$

$$\Phi_r = B_r * S_M = B_r * b_M * l_M = 1.23 * 0.045 * 0.1 = 0.005535 \text{ Вб} \quad (3.137)$$

$B_r = 1,23$ Тл нашого матеріалу – залишкова індукція у матеріалі магніту.

Будуємо пряму сумарного розсіювання Φ_r ; віднімаючи графічно цю характеристику з прямого розмагнічування, отримуємо лінію поздовжнього потоку Φ_d ; магнітні властивості на холостому ходу визначаються характеристиками зовнішнього магнітного ланцюга, і якщо в сталевій частині магнітного ланцюга немає насичення, то вона має форму прямої лінії [9].

Потік магніту визначається за формулою

$$\Phi_{ma} = \Phi_{\delta a} + \Phi_{SM} = 0.00504 + 0.00000717 = 0.0051117 \text{ Вб} \quad (3.138)$$

3.11 Визначення маси активних матеріалів, втрат та ККД генератора

Маса мідної обмотки якоря

$$M_{od} = m * w_{\phi} * l_{cp} * q_a * \gamma_M = 3 * 150 * 0.383 * 6.84 * 8.9 * 10^3 * 10^{-6} = 10.49 \text{ кг} \quad (3.139)$$

Маса зубців якоря

$$M_Z = \left[\left(\frac{\pi}{4} (D + 2 * h_n)^2 - D^2 \right) - z * b_n * h_n \right] * l k_0 \quad (3.140)$$

$$M_Z = \left[\left(\frac{\pi}{4} (0.5 + 2 * 0.0199)^2 - 0.5^2 \right) - 90 * 6.7 * 19.9 * 10^{-6} \right] * 0.1 * 0.95 * 8 * 10^3 = 15.57 \text{ кг} \quad (3.141)$$

Маса спинки якоря

$$M_{a1} = \pi (D + 2 * h_n + h_a) * h_a * l * k_s \gamma_{cs} = \pi (0.5 + 2 * 0.0199 + 0.0179) * 0.0179 * 0.1 * 0.95 * 8 * 10^3 = 23.82 \text{ кг} \quad (3.142)$$

Маса активних матеріалів статора

$$M_1 = M_{od} + M_Z + M_{a1} = 10.49 + 15.57 + 24.82 = 49.88 \text{ кг} \quad (3.143)$$

Маса постійних магнітів

$$M_{nM} = 2p * b_M * l_{сер} * h_M * \gamma_M = 24 * 0.045 * 0.1 * 0.024 * 8.4 * 10^3 = 21.77 \text{ кг} \quad (3.144)$$

Маса ярма індуктора

$$M_{a2} = \frac{\pi}{4} [(D_{a2} + 2 * h_{ap})^2 - D_{a2}^2] * l * k_{am} * k_c = \frac{\pi}{4} [(0.33 + 2 * 0.33)^2 - 0.33^2] * 0.1 * 1.2 * 8 * 10^3 = 34.21 \text{ кг} \quad (3.145)$$

Маса активних матеріалів ротора

$$M_2 = M_{nm} + M_{a2} = 21.77 + 34.21 = 55.98 \text{ кг} \quad (3.146)$$

Маса активних матеріалів генератора

$$M_{mg} = M_m + M_{pm} = 49.88 + 21.77 = 71.65 \text{ кг} \quad (3.147)$$

Повна маса генератора

$$M_{\Gamma} = M_{КОП} * M_{am} = 1.7 * 71.65 = 122 \text{ кг} \quad (3.148)$$

Втрати в міді якоря

$$P_M = t * I_{нф}^2 * K_a = 3 * 32.81^2 * 0.28 = 904 \text{ Вт} \quad (3.149)$$

Втрати в сталі зубців якоря

$$P_Z = k_{Tz} p_0 B_Z^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1.5} M_Z = 2.1 * 2 * 1.747^2 * \left(\frac{50}{50}\right)^{1.5} * 15.57 = 199.6 \text{ Вт} \quad (3.150)$$

Втрати в сталі ярма якоря

$$P_Z = k_{Tz} p_0 B_Z^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1.5} M_Z = 1.5 * 2 * 1.524 * \left(\frac{50}{50}\right)^{1.5} * 23.81 = 108.6 \quad (3.151)$$

Механічні втрати

$$P_{MECH} = 0.02 S_n * \cos\varphi * P_n = 0.02 * 7000 * 0.8 = 112 \text{ Вт} \quad (3.152)$$

Додаткові втрати

$$P_{\text{дод}} = 0.01 S_n * \cos\varphi * P_n = 0.01 * 7000 * 0.8 = 56 \text{ Вт} \quad (3.153)$$

Сумарні втрати

$$\Sigma P = P_M + P_Z + P_d + P_{mex} + P_{\text{дод}} = 904 + 199.6 + 108.6 + 112 + 56 = 1380.2 \text{ Вт} \quad (3.154)$$

ККД генератора

$$\eta = \frac{S_N * \cos\varphi}{S_N * \cos\varphi + \Sigma P} = \frac{7000 * 0.8}{7000 * 0.8 + 1380.2} = 0.81 \quad (3.155)$$

ВИСНОВКИ

У цій кваліфікаційній роботі представлені результати теоретичних досліджень, які об'єднуються з вирішенням конкретної науково-технічної задачі. Головною метою стала розробка вітрогенератора, який був спеціально призначений для використання як автономна вітроенергетична установка. Під час проведення дослідження, були визначені ключові розміри, розміри пазово-зубцевої зони, а також було проведено детальний розрахунок обмотки статора. В результаті, була створена схеми вітрогенератора.

У процесі розрахунку магнітної ланцюга, була визначена магнітна реакція її окремих ділянок і сумарна магнітна реакція на полюс. В роботі також були розраховані можливі втрати та коефіцієнт корисної дії. В результаті, коефіцієнт корисної дії склав 81%, що в повній мірі задовольняє технічне завдання.

Всі основні завдання, що були поставлені перед проектом, були вирішені. На думку автора, проект був виконано в повній мірі та відповідно до всіх вимог технічного завдання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вітроенергетика та енергетична стратегія / О. Ф. Оніпко, Б. П. Коробко, В. М. Мханюк. – К. : УАН, Фенікс, 2008.
2. Віроенергетика // Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження в Україні [Електронний ресурс].
3. Шефер, В.В. Електричні машини: навчальний посібник / В.В. Онушко, О.В. Шефер. – Полтава, ПолтНТУ, 2015.
4. Кудря С.А., Пермінов Ю.М., Буденний І.В. Особливості проектування вітрогенераторів. Відновлювальна енергетика. - Київ, 2014. № 3.
5. Боровик Ю. Т. ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ / Ю. Т. Боровик, Ю. В. Єлагін. 23. // Вісник економіки транспорту і промисловості № 65. – 2019.
6. Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Спеціальні електричні машини» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : М. Л. Глебова, О.Б. Єгоров, Я. Б. Форкун; Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 28 с.
7. Шефер О.В. Методичні вказівки до курсового проектування з дисципліни „Електричні машини” для студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”. – Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2020.
8. Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Спеціальні електричні машини» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : М. Л. Глебова, О.Б. Єгоров, Я. Б. Форкун; Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 37 с.
9. Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Спеціальні електричні машини» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм

- навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : М. Л. Глебова, О.Б. Єгоров, Я. Б. Форкун; Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022.
10. Камінський Ю. Вітрогенератори для дому: види, приблизні ціни, виготовлення своїми руками [Електронний ресурс] / Ю. Камінський // isu.org.ua. – Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/4e7twAi>.
 11. Куц Т. Горизонтальний або вертикальний вітрогенератор? За і проти [Електронний ресурс] / Т. Куц // Компанія "Концепція Енергозбереження". – 2016. – Режим доступу до ресурсу: <https://cutt.ly/Ge7tnGf>.
 12. Вітроенергетика України [Електронний ресурс] – режим доступу до даних: http://www.uwea.com.ua/ukraine_wind.php
 13. Перспективи світової вітроенергетики. Доповідь GWEC, Greenpeace International, DLR та Ecofys Spnsultancy / [під ред. Crispin Aubrey, Angelika Pullen, v Arthouros Zervos, Sven Teske], Berlin. 2007.
 14. Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Спеціальні електричні машини» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : М. Л. Глебова, О.Б. Єгоров, Я. Б. Форкун; Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 37 с.
 15. Гармаш, Є. В. "Розрахунок вітрогенератора в сільській місцевості". Thesis, Київський національний університет технологій та дизайну, 2017. <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/8607>.

ДОДАТКИ

2 PROJECT RESEARCH

2.1 Equipment for a wind installation

Given the fact that for different wind regimes and electrical loads, the same typical wind power plant can be installed with inverters of different power, as well as with different numbers of batteries, no additional equipment is provided for the basic kit. The choice of such equipment requires an individual approach to each object separately.

Additional equipment consists of a battery, a voltage stabilizer, a control device, automatic switching on of the reserve, a rectifier and an inverter. Let's take a closer look at the characteristics of these components.

The storage battery is designed to store excess electricity produced by the wind power plant in conditions of insufficient consumption. This is an important component that allows optimizing the production and use of electricity.

The voltage stabilizer is used to ensure stable operation of electrical devices during voltage fluctuations in the network. This is a critically important element that ensures uninterrupted operation of electrical equipment.

The control device is responsible for the automation of production management and electricity distribution processes. This is a key element that allows you to optimize and effectively manage resources.

Automatic activation of the reserve allows you to quickly connect an additional power source in case of failure of the main source. This ensures reliability and uninterrupted power supply.

The rectifier and inverter are responsible for converting direct current into alternating current and vice versa, which is necessary to ensure the operation of electrical equipment devices with different types of power supply. These components are important elements for ensuring the flexibility and efficiency of the power system.

2.2 Scope and parameters of the wind turbine

Using the energy of the wind flow to generate electricity with the help of wind farms has its own complexities. The most optimal option for using a wind generator of this power is to obtain electricity for autonomous use, since the frequency of the output voltage is usually unstable due to the instability of the wind flow. To reduce the cost and increase the economic efficiency of the designed generator, it is advisable to use it to provide electricity to consumers who do not make high demands on the stability of electricity parameters.

It should be taken into account that the most favorable wind conditions are usually in sparsely populated areas. However, power systems in rural areas are usually low-power and relatively low-voltage (less than 33 kV), and therefore long-distance transmission has many problems related to losses. In order to exclude interruptions in power supply during windless periods, it is necessary to provide for the use of energy accumulators or duplication of energy production with other types of installations.

For the designed wind generator with a capacity of 7 kW, we choose a wind wheel of the horizontal-axial type, which has 3 blades of the "Espero" type of fifteen percent thickness.

To ensure coordination of the rotations of the generator and the windmill, we use a step-up gearbox, which will ensure a rotation speed of the generator rotor of 250 rpm.

An active system using a tail fin is used to orient the horizontal-axis wind engine to the direction of the wind. To reliably stop a working wind engine, a winch is used as a braking device, which brings the tail out of the wind.

Type A windmill installation tower.

2.1 - Table of parameters of the designed wind installation

Impeller diameter, m	6.5
The number of blades	3
Blade material	Fiberglass
Direction of rotation	Clockwise
Nominal wind speed, m/c	10
Generator type	Three-phase synchronous generator with permanent magnets
Nominal power, W	7000
Maximum power, W	9500
The maximum current at the output of the generator, A	58.6
Battery voltage, V	220
Initial wind speed, m/s	3
Working wind speed, m/s	3-15
Maximum wind speed, m/s	30
Mast height, m	15
Full weight, kg	220

2.3 Selection of equipment for the designed wind turbine

A 5-7 kW, 12V 17A AGM battery will be used to store excess electricity produced by the wind power plant in conditions of insufficient consumption (Fig. 2.1).

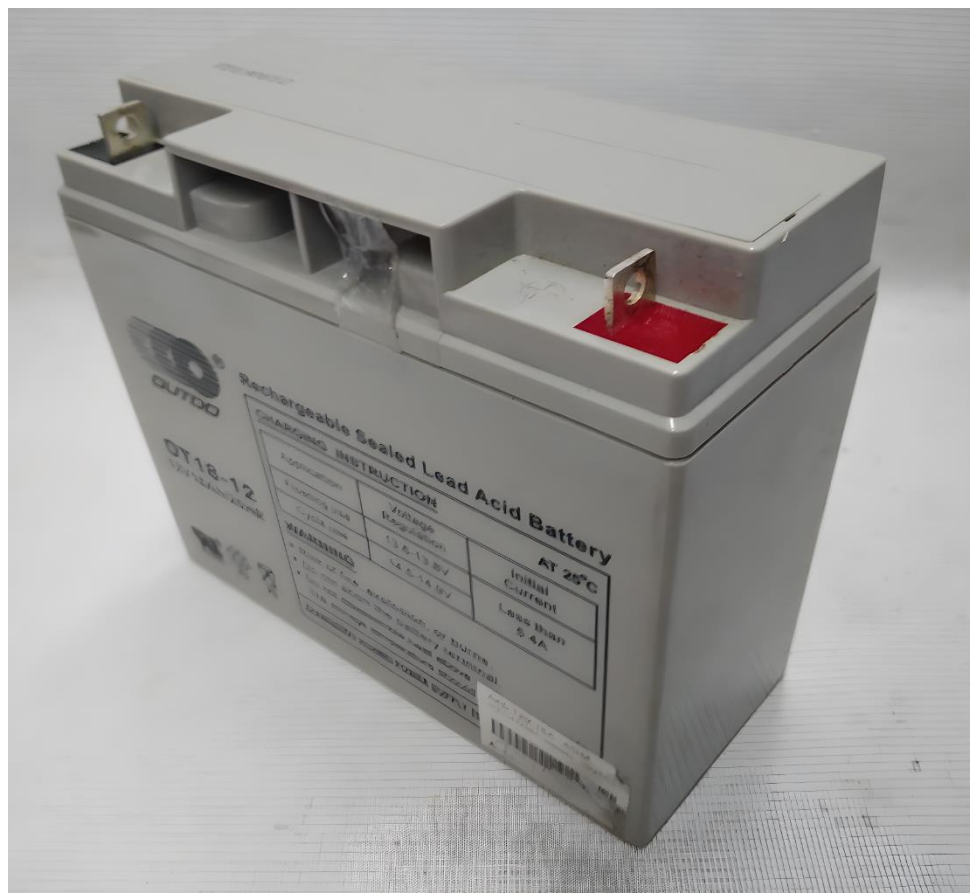


Figure 2.1 - 5-7 kW, 12V 17A AGM battery

Table 2.2 - characteristics of a 5-7 kW, 12V 17A AGM battery

Dimensions, mm	181x77x167
Date of manufacture, h	2019
Type	AGM
Nominal voltage, V	12
Accumulator capacity, A	17

To ensure the stable operation of electrical devices during voltage fluctuations in the network, we will use the Gemix GDX-500 voltage stabilizer (Fig. 2.2).



Figure 2.2 - voltage stabilizer Gemix GDX-500

Table 2.3 - characteristics of the voltage stabilizer Gemix GDX-500

Output power, kW	500
Stabilization error, %	6
Stabilization range, V	140 - 260
Operating temperature range, °C	0 - 40
Nominal voltage, V	220
Degree step, V	12
Number of degrees	9
Frequency, Hz	50
Nominal output power, kW	0.35
Dimensions, mm	160x115x235

In order to automate the process of power production management and distribution, we will install the EnerSol EATS-7500S AVR (Fig. 2.3)



Figure 2.3 - AVR EnerSol EATS-7500S

Table 2.4 - characteristics of EnerSol EATS-7500S AVR

Model	EATS-7500S
Maximum power, kW	7.5
Output voltage, V	220
Protection level	IP54

To prevent jumps and voltage fluctuations in the electrical network and to ensure a stable electrical supply, we will use a voltage stabilizer Eleks Hybrid 7 kVa triac-relay voltage stabilizer (Hybrid U 9-1/32 v2.0) (Fig. 2.4).



Figure 2.4 - Voltage stabilizer Eleks Hybrid 7 kVA triac-relay (Hybrid U 9-1/32 v2.0)

Table 2.5 - characteristics of the Elex Hybrid voltage stabilizer 7 kVA triac-relay
(Hybrid U 9-1/32 v2.0)

Operating current, A	32
Nominal power, kW	7
The number of degrees of stabilization	9
Consumed active power at idle, W	35
Nominal input voltage, V	220
Stabilization range, V	135 - 315
Range of work, V	110 - 325
Network frequency, Hz	45 - 65
Operating range in bypass mode, V	120 - 265
Accuracy of maintaining the output voltage in the stabilization range, %	7.5
Reaction time to a change in input voltage, ms	100
Dimensions, mm	460x275x178

Схема генератора

