

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

**на тему: Лабораторний стенд «Вітрогенератор» для дослідження процесу
зміни частоти обертання генератора**

Виконав: студент групи ЕЕМ-20

Данило МАЛОВІЧКО

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2024 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Маловічка Данила вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Лабораторний стенд «Вітрогенератор» для дослідження процесу зміни частоти обертання генератора
2. Строк подання студентом роботи 13 червня 2024 р.
3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи
Мета роботи – Проектування теоретичного лабораторного стенду вітроенергетичної установки для дослідження процесу зміни частоти обертання генератора
Завдання кваліфікаційної роботи: провести розрахунки та вивчити вплив швидкості обертання вала генератора на його вихідні данні. Побудувати теоретичний стенд для дослідження вітрогенератора.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)
1. Загальні положення та історія вітроенергетики у світі та Україні. 2. Розрахунки вітрогенератора та дослідження впливу швидкості обертання вала на роботу синхронного генератора. 3. Моделювання вітроенергетичної установки для демонстрації принципів її роботи. 4. Проектування стенду вітрогенератора.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
1. Карти потенціалу вітроенергетики України та структура вітрогенератора. 2. Графіки до розрахунків та фото наявного синхронного генератора. 3. Модель вітрогенератора графіки вихідних значень. 4. Фото наявного вітрогенератора та необхідного обладнання, проект теоретичного стенду
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Пересулько І.І.		
II	Пересулько І.І.		
III	Пересулько І.І.		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вивчення питання вітроенергетики з різних джерел</i>	
2	<i>Складання плану та структури дипломної роботи</i>	
3	<i>Написання теоретичної частини щодо вітроенергетики у світі та Україні</i>	
4	<i>Вивчення наданого обладнання, зняття його номінальних даних</i>	
5	<i>Розрахунок ротора та синхронного генератора</i>	
6	<i>Дослідження впливу швидкості обертання вітрогенератора на його вихідні дані</i>	
7	<i>Дослідження моделі вітрогенератора у програмному забезпеченні MatLab (Simulink)</i>	
8	<i>Розробка теоретичного лабораторного стенду та вибір обладнання для нього</i>	
9	<i>Обробка усіх отриманих даних та остаточні висновки щодо структури стенду</i>	

Дата видачі завдання 29.04.2024 р.

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

Маловічко Д.В.

(ПІБ)

Керівник роботи _____

(підпис)

Пересулько І.І.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:
«Лабораторний стенд «Вітрогенератор» для дослідження процесу зміни частоти обертання генератора»

КНУ.РБ.141.24.303-16

67 с., 43 рис., 6 табл., 16 літературних джерел.

Об'єктом дослідження є вітроенергетична установка, та дослідження впливу частоти обертання на її роботу.

Перший розділ розповідає про історію використання енергії вітру та її вплив на розвиток людства. Приведенні дані розвитку вітроенергетики та її перспективах у світі та Україні. Наведені дані щодо можливостей саме України у даній галузі відновлювальної енергетики.

Другий розділ складається з розрахунків даних заданого вітрогенератора, а точніше впливу швидкості обертання на вихідні дані. Також в ньому надана структурна схема лабораторного стенда вітрогенератора. А також виміряні дані з експериментів.

Третій розділ демонструє моделювання основного режиму роботи вітрогенератора з регулюванням як швидкості вітру, так і кута атаки вітру до лопатей, із можливістю відстеження усіх основних характеристик таких як генерація потужності напруги та струму у системі.

Четвертий розділ присвячено саме проєктування та побудову теоретичного стенда та необхідне для цього обладнання.

ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, ВІТРОВА УСТАНОВКА, СИНХРОННИЙ ГЕНЕРАТОР, РОТОР, СТЕНД, МОДЕЛЮВАННЯ.

					КНУ.РБ.141.24.303-16.Р			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	реферат	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розробив</i>	<i>Маловічко Д.В</i>						4	67
<i>Перевірів</i>	<i>Пересунько І.І</i>							
<i>Н. Контр.</i>	<i>Пересунько І.І</i>					КНУ гр. ЕЕМ-20		
<i>Затвердж.</i>	<i>Федотов В.О.</i>							

ЗМІСТ

ВСТУП	8
Розділ 1 Вітроенергетика її історія та використання	9
1.1 Історія використання вітрової енергії	9
1.1.1 Вітроенергетика у світі.....	11
1.1.2 Потенціал вітроенергетики в Україні	16
1.2 Структура Вітрогенератора та принцип його роботи	20
1.2.1 Структура Вітрогенератора	20
1.2.2 Принцип роботи.....	21
Висновок за розділом	21
Розділ 2 Розрахунок наданого вітрогенератора та вплив частоти обертання на його вихідні дані.	22
2.1 розрахунок ротора.....	22
2.2 Розрахунок синхронного генератора.....	24
2.2.1 Вхідні дані СГ	24
2.2.2 Розрахунок та порівняння габаритів СГ	25
2.2.3 Розрахунок активних та індуктивних опорів СГ	28
2.3 Вплив зміни частоти обертання генератора	35
Висновок за розділом	43
Розділ 3 Створення моделі вітрогенеруючої установки використовуючи програмне забезпечення MatLab	43
3.1 Опис моделі та що від неї очікується	43
3.2 Детальний опис моделі та на чому вона базується.....	43
3.3 Безпосереднє моделювання	44
Висновок за розділом	51
Розділ 4 Проектування лабораторного стенда	52
4.1 Наявне обладнання	52
4.2 Обране обладнання для стенда.....	55
4.2.1 Обрана система ПЧ-АД.....	55
4.2.2 Обрані елементи навантаження та захисту.....	57
4.2.3 Вимірювальні пристрої.....	59

					КНУ.РБ.141.24.303-16.3			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>		<i>Маловічко Д.В</i>			Зміст	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Перевірів</i>		<i>Пересунько І.І</i>					6	67
<i>Н. Контр.</i>		<i>Пересунько І.І</i>				КНУ гр. ЕЕМ-20		
<i>Затвердж.</i>		<i>Федотов В.О.</i>						

4.3 Проект стенда.....	61
Висновок за розділом.....	63
Висновок до дипломної роботи.....	65
Використана література.....	66

					КНУ.РБ.141.21.303-16.3	Арк.
						7
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

За останні роки ми маємо дійсно велике прискорення у розвитку поновлювальних джерел енергії Згідно зі статистичними даними засоби отримання електроенергії з відновлювальних джерел за швидкістю свого розвитку вже випереджають традиційні способи отримання електроенергії.

З серед усіх засобів та технологій які використовують одразу після гідроенергетики, вітроенергетика має велику перевагу над іншими джерелами

За останніми дослідженнями вітроенергетика матиме близько 7% зростання у середньому за рік. Тому маємо прогнози що до 2030 року загальна потужність наземної вітроенергетики зросте більш ніж в три рази

В Україні швидко розвивався комплекс відновлювальних джерел енергії, зокрема, і вітрова енергетика. За оцінкою міжнародної агенції IRENA, серед країн Південно-Східної Європи Україна має найбільші технічні можливості для розвитку відновлювальних джерел енергії, зокрема, саме вітрової енергетики. Потенціал лише однієї Херсонської області оцінюється в 3 ГВт.

Варто також зазначити, що і в Азовському, й у Чорному морях є найкращі метеорологічні умови для того, щоби розвивати вітрову енергетику. Своєю чергою їхня невелика глибина є перевагою, яка дає змогу для монтажу обладнання.

Проте зараз через акт російської агресії у 2022 доступ до більшої частини українських ВЕС заблоковано

					КНУ.РБ.141.24.303-16.ВС			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Маловічко Д.В			Вступ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І.І					8	1
Н. Контр.		Пересунько І.І				КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.		Федотов В.О.						

Розділ 1

Вітроенергетика її історія та використання

1.1 Історія використання вітрової енергії

Історія використання вітроенергії налічує понад шість тисяч років.

Стародавні греки приписували Прометею не лише відкриття вогню, але й винайдення вітрил для кораблів. До винаходу парової машини вітер був основним джерелом енергії у багатьох країнах. Торговельні й військові вітрильні судна використовували енергію повітряних потоків, а лопати вітряних млинів оберталися вітром, забезпечуючи помел зерна.

Перший вітродвигун мав вертикальну вісь обертання і використовувався у Персії приблизно 200 років до нашої ери для розмелення зерна. Такі пристрої згодом поширилися у країнах Близького Сходу. Пізніше з'явився млин з горизонтальною віссю обертання, що складався з десяти дерев'яних стійок з поперечними вітрилами. Цей тип вітряного млина досі використовується у багатьох країнах Середземномор'я.

У IX столітті вітряні млини широко використовувалися на Близькому Сході і потрапили до Європи у X столітті завдяки хрестоносцям. У середньовічній Європі місцеві закони часто регулювали використання вітряних млинів, забороняючи посадку дерев поблизу для забезпечення "вільного вітру". У XIV столітті голландці стали провідними у вдосконаленні вітряних млинів, використовуючи їх для осушення боліт і озер у дельті річки Рейн. Між 1608 і 1612 роками польдер Беємстер, що знаходився на три метри нижче рівня моря, був осушений за допомогою 26 вітродвигунів потужністю 37 кВт кожен.

Інженер-гідравлік Лігвотер, використавши 14 вітродвигунів продуктивністю 1000 м³/хв, осушив польдер Шермер за чотири роки. Потім 37 вітродвигунів перекачували воду з басейну у кільцевий канал, звідки вона потрапляла до Північного моря. У 1582 році у Голландії була побудована перша маслоробня, що використовувала енергію вітру, а через чотири роки — перша паперова фабрика.

					КНУ.РБ.141.24.303-16.01			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Розділ 1	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розробив</i>		<i>Маловічко Д.В</i>					9	13
<i>Перевірів</i>		<i>Пересунько І.І</i>						
<i>Н. Контр.</i>		<i>Пересунько І.І</i>				КНУ гр. ЕЕМ-20		
<i>Затвердж.</i>		<i>Федотов В.О.</i>						

У середині XIX століття у Голландії для різних цілей використовувалося близько 9 тисяч вітродвигунів. Голландці вдосконалили конструкцію вітряних млинів, поліпшивши аеродинамічну форму лопатей, замінивши вітрила на тонкий листовий метал, використовуючи сталеві махи й різні типи жалюзі для регулювання частоти обертання ротора при великих швидкостях вітру. Великі вітряні млини заводського виготовлення могли розвивати потужність до 66 кВт.

На початку XX століття інтерес до вітродвигунів зростав, особливо у сільському господарстві. Вітродвигуни використовувалися для приводу суднових механізмів. Наприклад, на відомому судні «Фрам» повітряний гвинт обертав динамомашину, а на вітрильниках вітряні млини приводили в дію насоси та якірні механізми.

У Європі до початку XX століття активно використовувалися вітряні млини. Зокрема, у Нідерландах працювало близько 9 тисяч вітродвигунів, що використовувалися для осушення боліт, перемелу зерна, виробництва паперу та інших завдань. Голландські інженери значно вдосконалили конструкції вітряних млинів, підвищивши їх ефективність та потужність. Так, у 1582 році в Нідерландах було збудовано першу маслоробню, що використовувала енергію вітру, а через чотири роки з'явилася перша паперова фабрика.

У середині XIX століття вітродвигуни досягли значних успіхів у розвитку. Для поліпшення аеродинамічної форми лопатей використовувалися тонкі листи металу, а також сталеві махи і різні типи жалюзі для регулювання частоти обертання ротора. Великі вітряні млини заводського виготовлення могли досягати потужності до 66 кВт.

На початку XX століття інтерес до використання вітроенергії зростав, особливо у сільському господарстві. Вітродвигуни застосовувалися для приводу суднових механізмів і насосів на вітрильниках. Наприклад, на судні «Фрам» повітряний гвинт обертав динамомашину.

В інших європейських країнах, таких як Данія і Німеччина, також спостерігався розвиток вітроенергетики. У 1891 році у Данії була побудована одна з перших вітрових турбін для виробництва електроенергії, яка забезпечувала електрикою невелику фабрику. У 1920-х роках у Німеччині почали використовувати вітродвигуни для виробництва електроенергії, що дозволило знизити залежність від імпортного вугілля.

					КНУ.РБ.141.21.303-16.01	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однак, у середині ХХ століття розвиток вітроенергетики в Європі загальмувався через дешевизну нафти та розвиток теплових і гідроелектростанцій. Лише наприкінці 1970-х років, після нафтової кризи, інтерес до використання відновлюваних джерел енергії, зокрема вітру, знову зріс. У 1980-х роках у Європі почали з'являтися перші великі вітропарки.

На сьогодні Європа є лідером у розвитку вітроенергетики. Країни, такі як Німеччина, Данія та Іспанія, активно інвестують у будівництво нових вітроелектростанцій. Вітроенергетика забезпечує значну частину потреб цих країн у чистій та відновлюваній енергії, сприяючи зниженню викидів парникових газів і боротьбі зі зміною клімату.

Таким чином, історія розвитку вітроенергетики охоплює тисячоліття еволюції технологій, удосконалення конструкцій та поширення використання вітрової енергії у різних регіонах світу. Від перших примітивних вітроподвигунів до сучасних високотехнологічних вітроелектростанцій, вітроенергетика продовжує відігравати важливу роль у забезпеченні людства чистою та відновлюваною енергією.

1.1. Вітроенергетика у світі та Україні

1.1.1 Вітроенергетика у світі

Станом на сьогодні, Азія займає провідну позицію у вітроенергетиці, її частка становить майже 48% із загальною потужністю 235 ГВт на кінець 2017 року. Європа займає другу позицію з часткою понад 30%, далі йдуть Північна Америка (14%), Латинська Америка та Карибський басейн (майже 6%).

Вітроенергетичний сектор став важливим "генератором" робочих місць, створивши понад 440 тисяч робочих місць по всьому світу. На кінець 2017 року лідерами за сумарною потужністю вітроенергетики на душу населення були Данія, Ірландія, Швеція, Німеччина та Португалія. Шістнадцять країн-членів ЄС мали понад 1 ГВт встановленої потужності кожна, а в дев'яти країнах цей показник перевищував 5 ГВт. Загалом, виробництво електроенергії з вітру в ЄС зросло на 12% порівняно з 2016 роком. Шість країн ЄС - Німеччина, Великобританія, Франція, Бельгія (0,5 ГВт), Ірландія (0,4 ГВт) та Хорватія (0,1 ГВт) - встановили рекорди за доданою потужністю.

За підсумками 2017 року, трійка лідерів за загальною потужністю вітроенергетики у світі залишилася незмінною: Китай (188,2 ГВт, 35%),

					КНУ.РБ.141.21.303-16.01	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

США (89 ГВт, 17%) та Німеччина (56,1 ГВт, 10%). Частка перших десяти країн у світовому вітроенергетичному балансі становить 85%.

За даними Міжнародного прогнозу розвитку енергетики, складеного Управлінням енергетичної інформації США (EIA), до 2040 року вітроелектростанції у світовому масштабі будуть забезпечувати виробництво близько 3 млн ГВт·год електроенергії щорічно.

Зважаючи на досвід і темпи зростання галузі за минулі роки, експерти Всесвітньої вітроенергетичної асоціації прогнозують, що світова вітроенергетика збереже свій динамічний розвиток і в майбутньому. Хоча короткострокові негативні впливи сучасної фінансової кризи ускладнюють прогнозування, у середньостроковій перспективі очікується, що вітроенергетичні проекти залучатимуть все більше інвесторів завдяки низькому ступеню ризику й зростаючій необхідності в чистих і надійних енергетичних ресурсах. Багато урядів світу створюють сприятливу законодавчу базу для розвитку галузі, включаючи закони, що стимулюють проєкт з децентралізованого виробництва енергії незалежними виробниками, малими й середніми підприємствами, а також проєкт, що реалізуються громадами. Всі ці ініціативи сприятимуть створенню більш стійкої енергетичної системи.

Розрахунки показують, що до 2020 року частка вітроенергетики може скласти мінімум 12% у глобальному споживанні електроенергії. Очікується, що до 2020 року у світі буде встановлено не менше 1500 ГВт вітроенергетичних потужностей. Дослідження Energy Watch Group передбачають, що в рамках одного з можливих сценаріїв до 2025 року буде встановлено 7500 ГВт потужностей, які вироблятимуть 16400 ГВт·год електроенергії, а частка всіх відновлюваних джерел енергії в глобальному електровиробництві перевищить 50%. Як результат, до 2019 року вітроенергетика разом із сонячною енергетикою завоюють 50%-ву частку світового ринку нових електростанцій. Виробництво енергії з невідновлюваних джерел досягне піка у 2018 році та може повністю припинитися до 2037 року.

Створення Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики, офіційне відкриття якого відбулося в січні 2009 року, сприятиме подальшому розвитку відновлюваної енергетики, надаючи ноу-хау своїм членам та виступаючи як лобі в міжнародних процесах, таких як переговори ООН зі зміни клімату.

Офшорна вітроенергетика. На кінець 2017 року встановлена потужність чинних офшорних вітроелектростанцій становила 18,8 ГВт, з яких понад 90%

					КНУ.РБ.141.21.303-16.01	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

працюють у Європі. Частка офшорної вітроенергетики у вітроенергетичному секторі становить не більше 3,5%. Протягом 2017 року було введено в експлуатацію 4,3 ГВт нових офшорних вітроустановок.

Вітроенергетика на континентах. Центр вітроенергетичного сектору зміщується з Європейського континенту в Азію й Америку. Частка Європи в сумарній світовій установленій вітроенергетичній потужності скорочується.

Чотири роки тому європейський ринок домінував у світі, встановлена потужність нових вітроагрегатів на континенті становила 70,7%. Однак, у 2008 році ситуація змінилася, і вперше частки Європи (32,8%), Північної Америки (32,6%) та Азії (31,5%) у нових встановлених вітропотужностях практично вирівнялися. Попри це, Європейський континент залишається сильним гравцем, хоча частка Північної Америки та Азії стрімко зростає.

Країни Південної Америки та Африки наразі мають лише 0,6% і 0,5% від загальної встановленої потужності світової вітроенергетики. Показники нових введених потужностей у 2008 році також були низькими, становлячи лише 0,4% і 0,3% відповідно.

Африка

Попри величезний вітроенергетичний потенціал, вітроенергетика відіграє незначну роль в енергозабезпеченні Африки – її сумарна потужність становить лише 563 МВт. Промислові вітростанції є в таких північноафриканських країнах, як Марокко, Єгипет та Туніс. До 2027 року потужності вітроенергетики в Африці зростуть утричі порівняно з 2018 роком. Основними ринками будуть ПАР, Саудівська Аравія, Єгипет та Іран.

У Південній Африці було збудовано першу вітростанцію, яка належить незалежному енерговиробнику. Уряд ПАР готує введення "зеленого" тарифу, що створить справжній ринок та стимулюватиме інвестування в галузь. Це сприятиме вирішенню енергетичної кризи в країні. Малі, децентралізовані вітроустановки, поєднані з іншими відновлюваними джерелами енергії, стануть ключовими технологіями для сільської електрифікації в Африці.

Азія

Зважаючи на те, що в Азії знаходяться дві провідні вітроенергетичні країни світу - Китай і Індія, встановлена потужність континентальної вітроенергетики перевищила 30 ГВт. Китай у 2018 році встановив більше вітроустановок морського базування (1,8 ГВт), ніж інші країни, і є світовим лідером за потужністю встановлених агрегатів. Офшорна вітроенергетика в азійсько-тихоокеанському регіоні до 2027 року виросте у 20 разів, від 2 ГВт

					КНУ.РБ.141.21.303-16.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

до 43 ГВт. Потужність офшорної вітроенергетики Китаю має зрости до 31 ГВт, роблячи його лідером у регіоні. У Тайвані до 2027 року очікується 8,7 ГВт чинних офшорних вітроустановок.

Вітроенергетичний ринок Індії у 2018 році продемонстрував твердий і стабільний ріст. Галузь вже добре розвинена і відіграє значну роль на світових ринках. Південна Корея та В'єтнам також розпочали широкомасштабні інвестиції у вітроенергетичний сектор, з багатьма компаніями, які працюють над створенням прототипів власних вітроустановок.

Європа

Європейський континент втратив свою панівну роль на ринку нових вітроенергетичних потужностей, але зберіг лідерство за сумарною встановленою потужністю - 189 ГВт. Німеччина й Іспанія залишаються лідерами ринку, демонструючи стабільний ріст. У 2018 році енергія вітру забезпечила 14% виробництва електроенергії в Європі (у 2017 році - 12%). У Данії вітрові електростанції виробили 41% електроенергії, в Ірландії - 28%, Португалії - 24%, Німеччині - 21%, Іспанії - 19%, Великобританії - 18%.

Прогноз розвитку вітроенергетики в Європі до 2030 року

За прогнозами, до 2030 року розподіл встановленої потужності в Європі буде таким, як показано на діаграмі. В наступному десятилітті частка вітроенергетики у виробництві електроенергії в Європі майже подвоїться, і в багатьох країнах ЄС вона стане основним джерелом електроенергії. Для досягнення цих цілей, країни-члени ЄС мають запровадити додаткові стимули для розвитку вітроенергетики, включаючи удосконалене тарифне законодавство.

Південна Америка

Латинська Америка та Карибський басейн додали близько 3,1 ГВт нових потужностей у 2018 році, що на 13% менше порівняно з 2016 роком. Загальна потужність 25 країн регіону становить 21,9 ГВт. Бразилія продовжує займати провідні позиції у світовому рейтингу, з 2 ГВт нових установок у 2017 році та загальною потужністю 12,8 ГВт на кінець року. Після дворічної перерви Бразилія відновила аукціони на нові проекти в кінці 2017 року.

					КНУ.РБ.141.21.303-16.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Інші країни регіону також збільшують потужності вітроенергетики. Мексика додала 0,5 ГВт нових установок, досягнувши загальної потужності 4 ГВт. Уругвай додав 0,3 ГВт, Чилі — 0,1 ГВт, а Коста-Рика — 59 МВт.

Північна Америка

Темпи зростання вітроенергетики в Північній Америці наведені на діаграмі. У 2018 році вітроенергетика США (89 ГВт) розвивалася потужними темпами завдяки високому попиту, низьким цінам та інноваційним турбінним технологіям. Кількість робочих місць у вітроіндустрії зросла на 8% до 114 тисяч. Продуктивність турбін досягла середнього коефіцієнта потужності понад 40%. Обсяг проєктів вітростанцій, що знаходяться на стадії будівництва або розробки, досяг 35 ГВт.

Інвестиції в галузь у 2018 році становили 12 млрд доларів, а платежі місцевим органам влади та приватним землевласникам досягли 1 млрд доларів, включаючи 761 млн доларів у вигляді державних і місцевих податків. Потужність офшорних вітростанцій також зростає, досягнувши 25,5 ГВт на кінець 2018 року. Розробники очікують введення в експлуатацію шести морських вітроенергетичних проєктів загальною потужністю 2,1 ГВт до 2023 року.

Вітростанції забезпечують понад 20% електроенергії в штатах Канзас, Айова, Оклахома, Північна Дакота, Південна Дакота і Мен. Загальна частка електроенергії, виробленої вітряними турбінами, становить 6,5%, що достатньо для енергозабезпечення 30 мільйонів домогосподарств. У найближчому майбутньому потужність вітроенергетичних установок має зрости на 36%, досягнувши понад 131 ГВт, що забезпечить енергією 42 мільйони домогосподарств. Вартість вітрової електроенергії знизилася на 69% з 2009 по 2018 рік, а викиди CO₂ скоротилися на 11% на рік.

У 2018 році вітроіндустрія заощадила 9,4 млрд доларів на охороні здоров'я, скоротивши забруднення повітря, яке викликає напади астми та створює смог. Завдяки чинним вітровим проєктам в США вдалося уникнути споживання 101 млрд галонів води, що еквівалентно 308 галонам (понад 1100 літрів) на людину. У галузі вітроенергетики працюють понад 500 заводів у 42 штатах, що виробляють компоненти для вітроустановок. Наприкінці 2018 року вітроенергетика забезпечила 24 тисячі робочих місць.

					КНУ.РБ.141.21.303-16.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.1.2 Потенціал вітроенергетики в Україні

Україна володіє значними ресурсами вітрової енергії, проте їхній розподіл по території країни є нерівномірним і залежить від кількох факторів. До них належать: швидкість та напрямок вітру біля земної поверхні, вертикальний профіль вітру, рельєф місцевості та відстань до великих водойм.

Аналіз багаторічних даних із 40 метеорологічних станцій показав, що середня багаторічна швидкість вітру на території України коливається від 2,5 м/с до 5,7 м/с на висоті 10 метрів. Найвищі швидкості вітру спостерігаються на Приазовській височині, Причорноморській низовині, у Кримських та Карпатських горах, а також на Волинській та Донецькій височинах.

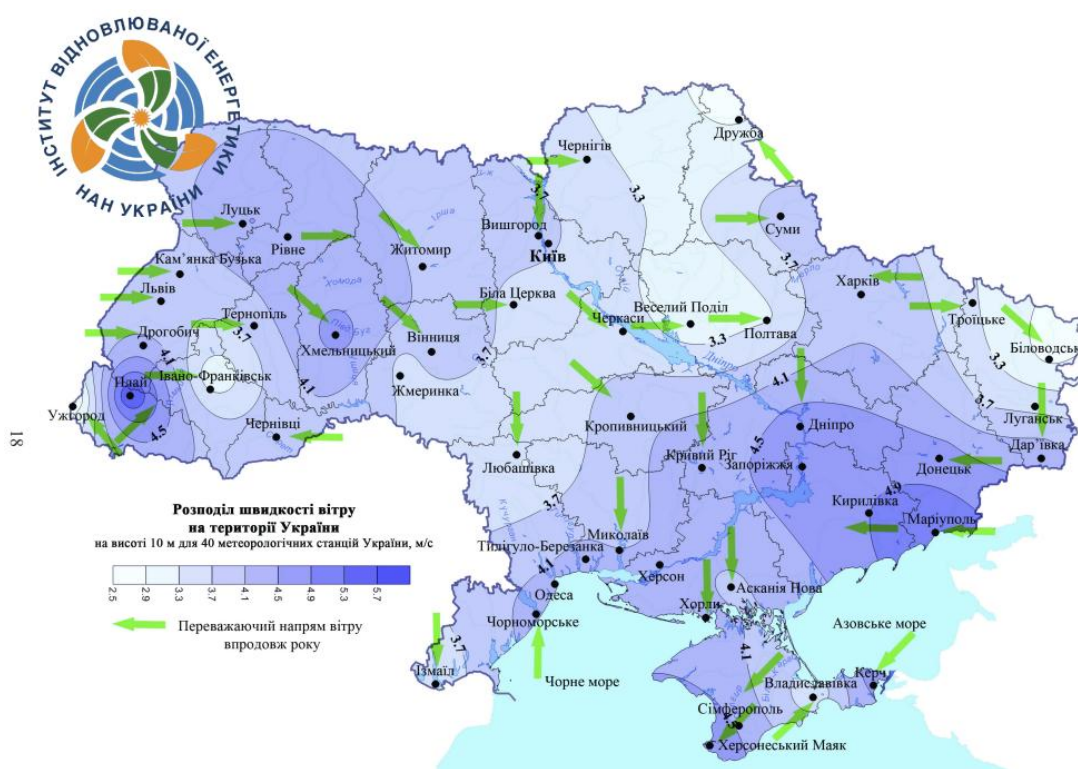


Рис.1.1 Швидкість вітру у різних регіонах України [8]

Параметр вертикального профілю вітру (α) було розраховано на основі даних реаналізу для висот 10 та 50 метрів. Значення цього параметра коливається в межах від 0,09 до 0,29. Розрахований коефіцієнт використання номінальної потужності (КВНП) для сучасних моделей вітрових електроустановок (ВЕУ) змінюється від 0,21 до 0,53.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

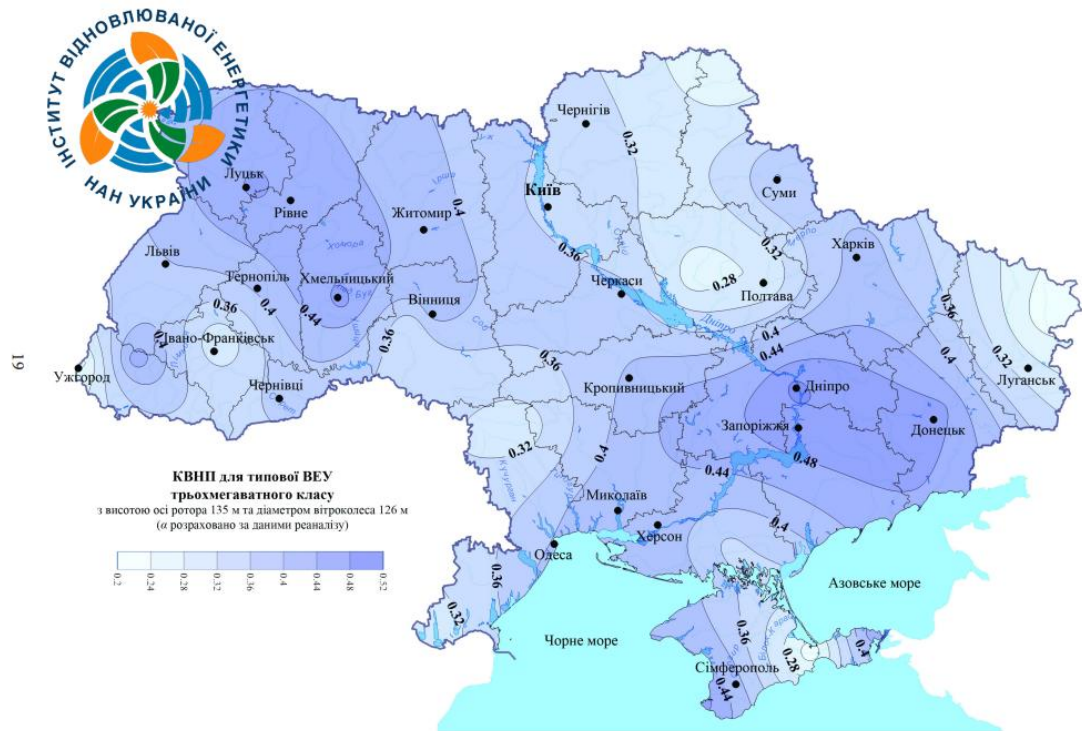


Рис.1.2 мапа коефіцієнту використання номінальної потужності (КВНП) [8]

Географічний підхід до оцінки потенціалу

Для оцінювання технічно-досяжного вітропотенціалу (ТДВП) територій України запропоновано географічний підхід, який є простішим та менш затратним порівняно з іншими методами. Територія України поділяється на чотири природні зони, кожна з яких має свої географічні умови. Найскладнішими для будівництва вітрових електростанцій (ВЕС) є гірські райони, де необхідно збільшувати витрати на вибір майданчиків, прокладання шляхів, ліній електропередачі та обслуговування.

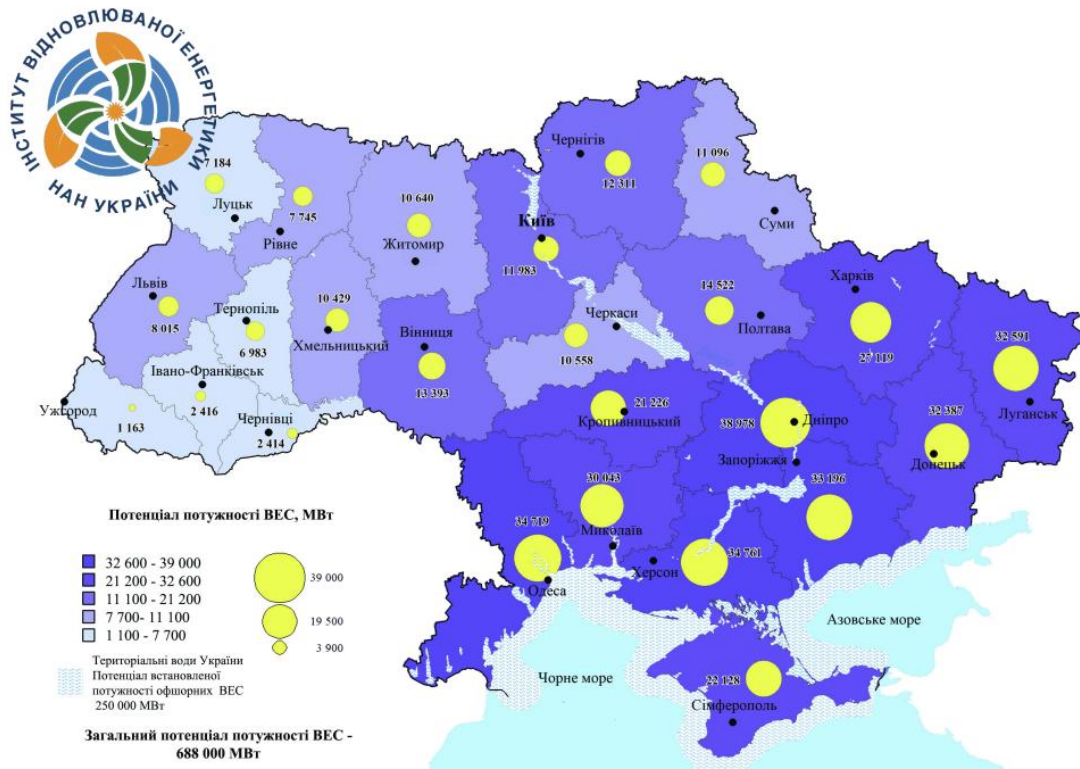


Рис.1.3 мапа потенціалу потужності ВЕС [8]

Лісова зона також є малопривабливою для будівництва ВЕС через природні перешкоди, які створюють ліси. Деревя, навіть якщо вони значно нижчі від нижнього краю вітроколеса ВЕУ, збільшують турбулентність вітрових потоків, що зменшує виробництво електроенергії та прискорює знос ВЕУ.

Натомість територія лісостепової зони, після видалення лісових ділянок та антропогенних перешкод, є цілком придатною для реалізації економічно ефективних проєктів ВЕС. Найбільш привабливою для реалізації таких проєктів є степова зона. У цій зоні сильні вітри в холодну пору року зменшуються в теплу пору року, але компенсуються додатковими локальними вітрами – бризами. Наявність потужних морських портів та мереж автошляхів у степовій зоні полегшує розв'язання логістичних проблем.

Вітрогенеруючі установи України

Миколаївська область

- Вітропарк «Причорноморський» встановлена потужність (10,1 МВт) віротурбіни (2×3,3 МВт WTU3,3 1 x 3,5 МВт WTU3,5)
- Вітропарк «Південний» встановлена потужність (7 МВт) віротурбіни (2 x 3,5 МВт WTU3,5)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

- Вітропарк «Очаківський» встановлена потужність (18,5 МВт) віротурбіни (1 x 4,5 МВт WTU4,5)

Донецька область

- «Атомвінд-Краматорськ» встановлена потужність (13,5 МВт) віротурбіни (3×45 МВт WTU4,5)

Запорізька область

- Приморська ВЕС ТОВ встановлена потужність (100 МВт) віротурбіни (26 x 3,8 МВт GE 3,8-130)
- Приморська ВЕС-2 встановлена потужність (100 МВт) віротурбіни (26 x 3,8 МВт GE 3,8-137)
- Орловська ВЕС встановлена потужність (100 МВт) віротурбіни (26 x 3,8 МВт VESTAS 3,8-126)

Херсонська область

- Новотроїцька ВЕС встановлена потужність (29,2 МВт) віротурбіни (8 x 3,65 МВт VESTAS V126)
- Овер'янівська ВЕС встановлена потужність (69,35 МВт) віротурбіни (19 x 3,65 МВт VESTAS V136)
- Сиваська ВЕС встановлена потужність (249,6 МВт) віротурбіни (64 ВЕУ N131 -3,9)
- Мирненська ВЕС встановлена потужність (163 МВт) віротурбіни (39 x 4,2 МВт VESTAS V150)

Одеська область

- ВЕС «Овід Вінд» встановлена потужність (32,4 МВт) віротурбіни (9 x 3,6 МВт GE 3,6-131)

Тернопільська область

- Зборівська ВЕС-2 встановлена потужність (0,66 МВт) віротурбіни (1 x 0,66 МВт VESTAS V47)

Економічний потенціал

Згідно з наявними даними, землі п'яти регіонів степової зони – Автономна Республіка Крим, Миколаївська, Херсонська, Запорізька та Луганська області – є низькопродуктивними для землеробства, але придатними для будівництва ВЕС. Загальна площа цих земель, придатних для вітроенергетики, становить 10 000 тисяч гектарів або 100 тисяч квадратних кілометрів.

					КНУ.РБ.141.21.303-16.01	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вітроенергетичні ресурси України у світовому контексті

За оцінками, потенціал вітроенергетики України дозволяє виробляти до 30 ГВт електроенергії щорічно. Це може суттєво знизити залежність країни від імпорту вугільного палива та сприяти забезпеченню енергетичної безпеки. Порівняно з іншими країнами, такими як Німеччина, де встановлена потужність вітрових електростанцій становить 56,1 ГВт, Україна має значні можливості для розширення своїх вітроенергетичних потужностей.

1.2 Структура Вітрогенератора та принцип його роботи

1.2.1 Структура Вітрогенератора

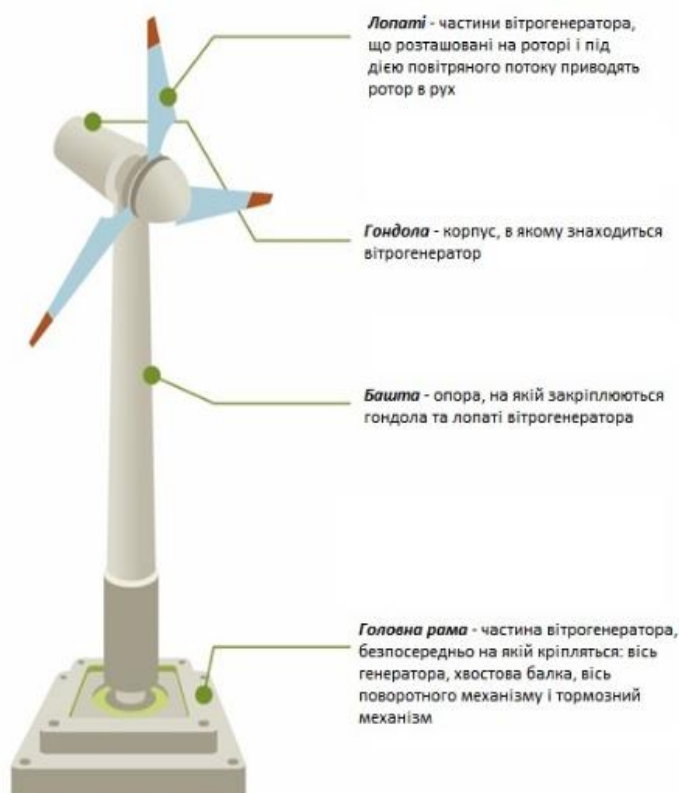


Рис. 1.4 Опис деяких частин вітрогенератора [12]

Основною частиною є лопаті або ротор, які захоплюють енергію вітру і перетворюють її на механічну енергію обертання. Ці лопаті виготовляються з легких та міцних матеріалів, таких як склопластик або вуглепластик, що забезпечує їхню довговічність та ефективність.

Механічна енергія, створена лопатями, передається через роторний вал. Він обертається разом з лопатями, передаючи обертальний рух до наступного важливого компоненту - коробки передач. Цей елемент перетворює

					КНУ.РБ.141.21.303-16.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

низькошвидкісне обертання валу у високошвидкісне, необхідне для ефективної роботи генератора. Конструкція коробки передач може варіюватися залежно від моделі вітрогенератора.

Генератор є серцем системи, який працює за принципом електромагнітної індукції, коли обертовий вал викликає обертання магнітів навколо котушок проводу, що призводить до створення електричного струму.

Усі ці основні компоненти розміщуються в захисному корпусі, який називається гондолою. Вона забезпечує захист обладнання від несприятливих погодних умов.

Для підтримки гондоли та лопатей на достатній висоті використовується башта, яка виконана зі сталі. Фундамент башти вітрогенератора, виконаний з бетону або інших міцних матеріалів, забезпечує стійкість і надійність всієї конструкції, витримуючи вагу установки та навантаження від вітру.

Важливою частиною є система управління, яка включає датчики, контролери та програмне забезпечення. Вона оптимізує роботу вітрогенератора, регулюючи кути нахилу лопатей, орієнтацію гондоли та інші параметри для максимального вироблення електроенергії.

Система орієнтації дозволяє гондолі повертатися таким чином, щоб лопаті завжди були спрямовані в напрямку вітру. Вона включає моторизовані механізми та датчики, що визначають напрямок вітру, забезпечуючи ефективне використання енергії.

1.2.2 Принцип роботи

Коли вітер обертає лопаті вітрогенератора, механічна енергія передається через роторний вал до коробки передач. Коробка передач збільшує швидкість обертання, яка необхідна для генератора, де механічна енергія перетворюється в електричну. Електрична енергія потім передається до мережі або зберігається в акумуляторах для подальшого використання.

Висновок за розділом

У даному розділі було розглянуто ситуацію щодо вітроенергетики у світі та історію вітроенергетики загалом. Також нашу увагу було спрямовано й на Україну її поточні потужності та її потенціал загалом.

					КНУ.РБ.141.21.303-16.01	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 2

Розрахунок наданого вітрогенератора та вплив частоти обертання на його вихідні дані.

2.1 розрахунок ротора

Данні розрахунки проводилися за даними з літератури [14] та [15]

Для перетворення енергії вітру у момент використовується ротор. Ротор це конструкція з деякої кількості лопатей (3 або більше) які мають спільну точку з'єднання на валу. У нашому випадку маємо наступний вид ротора рис. з вказаними розмірами

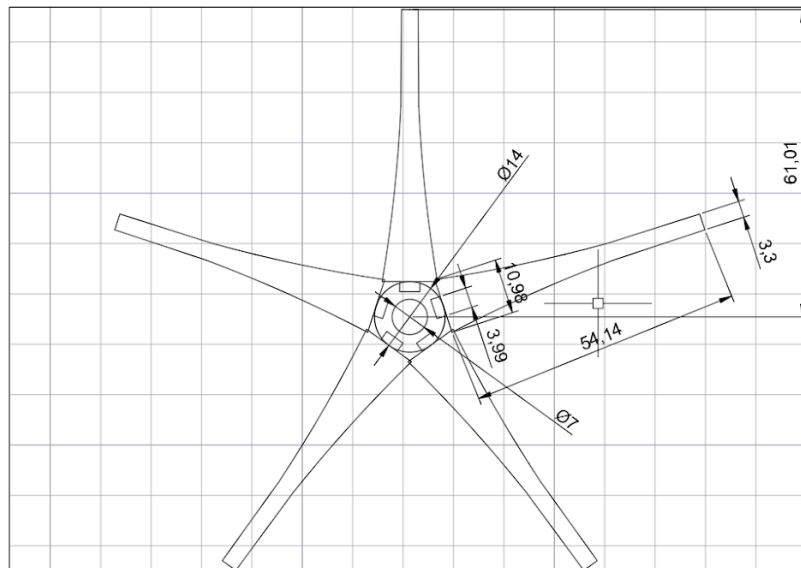


Рис. 2.5 приблизне креслення ротора наданого вітрогенератора

Площа яку охоплює даний тип ротора (S) знаходимо за формулою:

$$S = \pi \cdot R_{12}^2 = 3.14 \cdot 0.62^2 = 1.208 \text{ м}^2, \quad (2.1)$$

Де R_{12} – загальний радіус ротора.

					КНУ.РБ.141.24.303-16.02			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
		Розробив	Маловічко Д.В		Розділ 2	Літ.	Арк.	Акрушів
		Перевірів	Пересунько І.І				22	21
		Н. Контр.	Пересунько І.І			КНУ гр. ЕЕМ-20		
		Затвердж.	Федотов В.О.					

Вважаємо що через цю площину при проходженні вітер передає частину своєї кінетичної енергії. Щоб вирахувати масу пройденого повітря ($m_{\text{пов}} \frac{\text{кг}}{\text{с}}$;) ми вираховуємо об'єм повітря який має певну густину ($\rho_{\text{пов}} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;) і проходить з певною швидкістю ($v_{\text{пов}} \frac{\text{м}}{\text{с}}$;) через площину ротора ($S \text{ м}^2$):

$$m_{\text{пов}} = \rho_{\text{пов}} \cdot S \cdot v_{\text{пов}}, \quad (2.2)$$

З цього отримуємо рівняння вітрового потоку:

$$E_{\text{к.пов}} = \frac{m_{\text{пов}} \cdot v_{\text{пов}}^2}{2}, \quad (2.3)$$

У якому отримаємо кінетичну енергію повітря ($E_{\text{к.пов}}$).

З цього ми отримаємо наступне рівняння:

$$E_{\text{к.пов}} = \frac{m_{\text{пов}} \cdot v_{\text{пов}}^2}{2} = \frac{\rho_{\text{пов}} \cdot S \cdot v_{\text{пов}} \cdot v_{\text{пов}}^2}{2} = \frac{m_{\text{пов}} \cdot v_{\text{пов}}^3}{2}$$

Також можна констатувати що маса повітря має дуже мале значення на розрахунок з чого робимо наступний висновок:

$$E_{\text{к.пов}} = \frac{m_{\text{пов}} \cdot v_{\text{пов}}^2}{2}, \quad (2.3)$$

Кінетична енергія повітря, яке проходить через площину S з певною швидкістю, визначається за відповідною формулою з використанням швидкості вітру ($v_{\text{пов}}$).

Маса повітря обчислюється як добуток його щільності ($\rho_{\text{пов}}$), площі (S), через яку він проходить, та швидкості потоку ($v_{\text{пов}}$). Виходячи з цього, можна зробити висновок про взаємозв'язок між цими величинами, що дозволяє вивести наступну залежність.

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E_{к.пов} = \frac{m_{пов} \cdot v_{пов}^2}{2} = \frac{\rho_{пов} \cdot S \cdot v_{пов} \cdot v_{пов}^2}{2} = \frac{m_{пов} \cdot v_{пов}^3}{2} \quad (2.4)$$

При цьому значення маси повітря настільки мале, що :

$$E_{к.пов} \approx v_{пов}^3 \quad (2.1)$$

Маємо наступне рівняння потужності вітроенергетичної установки:

$$P_{уст} = \frac{k \cdot \rho_{пов} \cdot \xi \cdot S \cdot v_{пов}^3}{2} \quad (2.5)$$

Знаємо що необхідна вихідна потужність має дорівнювати 400 Вт ($P_{уст}$), тому можемо зворотним шляхом розрахувати приблизно необхідну для цього швидкість вітряного потоку:

$$v_{пов} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P_{уст}}{k \cdot \rho_{пов} \cdot \xi \cdot S}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 400 \cdot 102}{1.292 \cdot 0.3 \cdot \pi \cdot 0.61^2}} = 12.301 \frac{м}{с}, \quad (2.6)$$

Де k - коефіцієнт узгодження системних одиниць виміру, який дорівнює $\frac{1}{102}$ для розрахунків у системі СІ.

ξ – коефіцієнт потужності ротора, який являти собою відношення енергії яку має вітряний потік до енергії яку сприймає ротор; для теоретично ідеального ротора він дорівнює 0,593, тоді як у нашому випадку 0.35.

2.2 Розрахунок синхронного генератора

2.2.1 Вхідні дані СГ

Структурно маємо СГ з нерухомим статором в який вмонтовані обмотки з'єднані за схемою зірка та рухомий ротор у якому вмонтовано 12 постійних магнітів (рис)

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

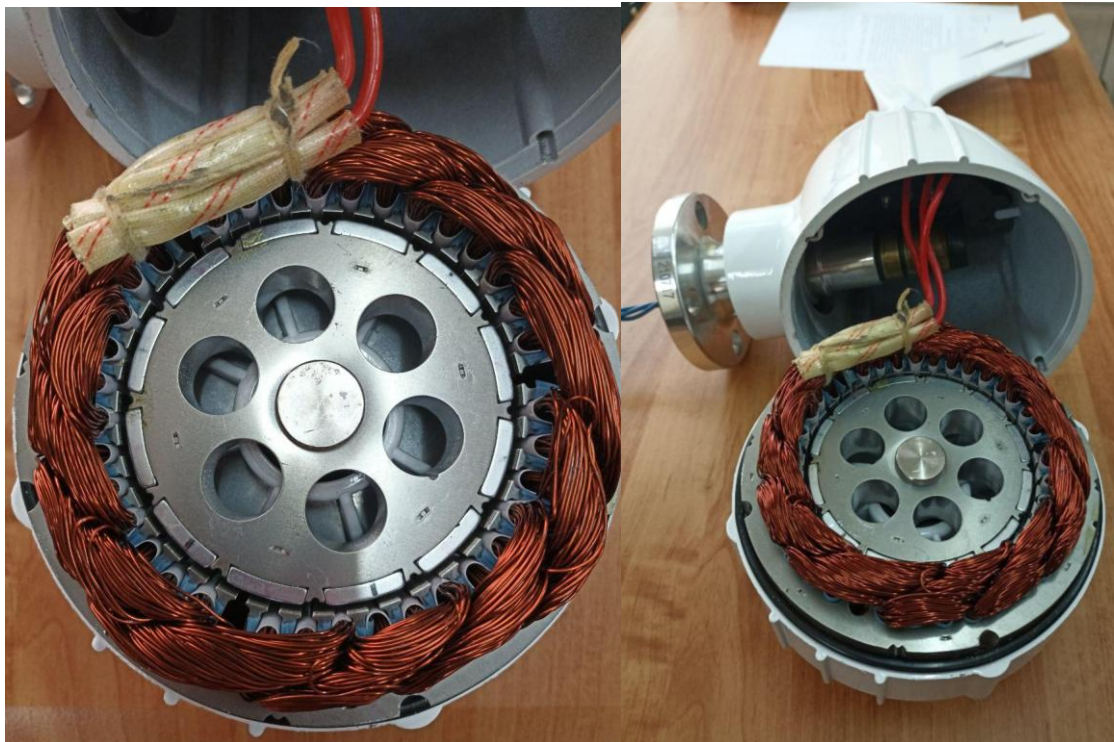


Рис. 2.6 Фото наданого вітрогенератора зі знятою кришкою

Генератор має наступні вхідні характеристики число фаз генератора (m) номінальна лінійна напруга генератора ($U_{\text{НОМ}}$ В) номінальний коефіцієнт потужності ($\cos(\varphi)_{\text{НОМ}}$) номінальна частота ($f_{\text{НОМ}}$ Гц) номінальна частота обертання (n) номінальна активна потужність, що віддається генератором у мережу ($P_{\text{НОМ}}$ кВт)

Хар-ка	m	$U_{\text{НОМ}}$ (В)	$\cos(\varphi)_{\text{НОМ}}$	$f_{\text{НОМ}}$ (Гц)	$n_{\text{НОМ}}$ (об/хв)	$P_{\text{НОМ}}$ (кВт)
величина	3	48	0,8	50	750	0,4

Табл.2.1 – Вхідні характеристики

2.2.2 Розрахунок та порівняння габаритів СГ

Розрахунок габаритів синхронного генератора здійснюється на основі результатів, отриманих у дослідженнях, зазначених у джерелах [3], [4], [5].

Для порівняння отриманих розрахованих даних та дійсних значень нам потрібно вирахувати габарити СГ. Використовуючи формулу машинної постійної Арнольда C_A знайдемо осьову довжину повітряного зазору l_δ , а також діаметр магнітопроводу статора $D_{\text{СТ}}$

$$C_A = \frac{D_{\text{СТ}}^2 \cdot l_\delta \cdot n_{\text{НОМ}}}{S_{\text{РОЗ}}} = \frac{6.1}{\alpha_\delta \cdot k_\Phi \cdot k_{\text{об}} \cdot B_\delta \cdot A_{\text{СН}}}, \quad (2.7)$$

де $n_{\text{ном}}$ - номінальна частота обертання машини, яка визначає, з якою швидкістю обертається ротор у стандартних умовах;

$S_{\text{роз}}$ – розрахункове значення ефективної площі вітроустановки;

α_{δ} – коефіцієнт перекриття полюсів, прийнятий рівним приблизно 0.6, що визначає відносну довжину зазору між полюсами;

k_{ϕ} – коефіцієнт, що враховує форму поля, зазвичай приймається рівним 1.11, що впливає на форму і розподіл магнітного поля;

$k_{\text{об}}$ – коефіцієнт обмотки статора, який зазвичай приймається рівним 0.92 і враховує ефективність обмоток;

B_{δ} – значення максимальної магнітної індукції у повітряному зазорі між статором та ротором машини, яке зазвичай беруть рівним 0.8, що визначає магнітні властивості машини;

$A_{\text{сн}}$ – лінійне навантаження статора, яке рекомендується брати близько 22000 А/м, визначає струм, що протікає через обмотки статора.

Знайдемо розрахункову повну потужність СГ при номінальному режимі використовуючи наступну формулу:

$$S_{\text{роз}} = \frac{k_E \cdot P_{\text{ном}}}{\cos(\varphi)_{\text{ном}}}, \quad (2.8)$$

де k_E – коефіцієнт електрорушійної сили, який відображає відношення між якірною електрорушійною силою та напругою при номінальному режимі, і зазвичай приймається рівним 1.2;

$\cos(\varphi)_{\text{ном}}$ - .

Знайдемо залежність між головними розмірами машини λ :

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau}, \quad (2.9)$$

де τ – полюсна поділлка, яка має наступну форму:

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{ст}}{2 \cdot p} \quad (2.10)$$

Тоді λ можливо отримати також наступним чином:

$$\lambda = \frac{l_{\delta} \cdot 2 \cdot p}{\pi \cdot D_{ст}} \quad (2.11)$$

Тоді як коефіцієнт треба обрати за графіком:

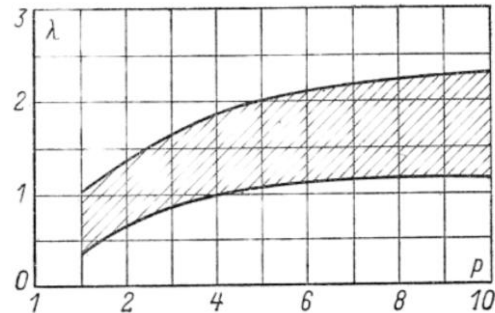


Рис. 2.7 Графік коефіцієнта залежності головних розмірів машини

Далі за допомогою вище зазначених формул виражаємо формулу за допомогою якої отримаємо осьову довжину повітряного зазору l_{δ} та діаметр магнітопроводу статора $D_{ст}$:

$$D_{ст} = \sqrt[3]{\frac{6.1 \cdot 2 \cdot p \cdot S_{роз}}{\lambda \cdot \pi \cdot n_{ном} \cdot \alpha_{\delta} \cdot k_{\Phi} \cdot k_{об} \cdot B_{\delta} \cdot A}} \quad (2.12)$$

$$l_{\delta} = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D_{ст}}{2 \cdot p}, \quad (2.13)$$

У подальших точних обчисленнях цього генератора будуть використані показники, отримані з реального наданого СГ.

Для того, щоб визначити необхідні параметри, скористаємося раніше наведеною формулою, підставивши в неї відповідні дані [3].

$$C_A = \frac{6.1}{\alpha_{\delta} \cdot k_{\Phi} \cdot k_{об} \cdot B_{\delta} \cdot A_{сн}}$$

Проведемо розрахунки

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$S = \pi \cdot R_{12}^2 = 3.14 \cdot 0.62^2 = 1.208 \text{ м}^2$$

$$C_A = \frac{6.1}{\alpha_\delta \cdot k_\Phi \cdot k_{об} \cdot B_\delta \cdot A_{сн}} = \frac{6.1}{0.6 \cdot 1.11 \cdot 0.92 \cdot 0.8 \cdot 22000} = 5.657 \cdot 10^{-4}$$

$$S_{роз} = \frac{k_E \cdot P_{ном}}{\cos(\varphi)_{ном}} = \frac{1 \cdot 400}{0.8} = 500 \text{ В} \cdot \text{А}$$

$$D_{ст} = \sqrt[3]{\frac{6.1 \cdot 2 \cdot p \cdot S_{роз}}{\lambda \cdot 3.14 \cdot 500 \cdot 0.6 \cdot 1.11 \cdot 0.92 \cdot 0.8 \cdot 22000}} = \sqrt[3]{\frac{6.1 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 500}{1.3 \cdot \pi \cdot n_{ном} \cdot \alpha_\delta \cdot k_\Phi \cdot k_{об} \cdot B_\delta \cdot A}} = 0.118 \text{ м}$$

$$l_\delta = \frac{\lambda \cdot \pi \cdot D_{ст}}{2 \cdot p} = \frac{1.3 \cdot 3.14 \cdot 0.118}{2 \cdot 6} = 0.04 \text{ м}$$

Після проведення розрахунків порівнюємо отримані данні

Діаметр магнітопроводу статора $D_{ст}$,

$$D_{ст, \text{Реальний}} = 0.11 \text{ м} \quad D_{ст, \text{Розрахований}} = 0.118 \text{ м}$$

Осьова довжина повітряного зазору l_δ ,

$$l_\delta, \text{Реальний} = 0.4 \text{ м} \quad l_\delta, \text{Розрахований} = 0.037 \text{ м}$$

Бачимо наявне відхилення проте їх можливо легко обґрунтувати погрішностями будови наявного СГ та тим що розрахунок побудований для Ідеального СГ що не відповідає дійсності.

2.2.3 Розрахунок активних та індуктивних опорів СГ

Для розрахунків опорів СГ та побудови характеристик потрібно ввести та обчислити деякі значення для подальших розрахунків.

Полюсна поділка [4]:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{ст}}{2 \cdot p} \quad (2.14)$$

Також необхідно розрахувати величину магнітного потоку полюса у режимі холостого ходу:

$$\Phi_{\delta 0} = B_\delta \cdot l_\delta \cdot \tau \cdot \alpha_\delta \quad (2.15)$$

Значення індукованої ЕРС та фазної напруги та при холостому ході.:

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{\text{ф.н.}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3}} \quad (2.16)$$

$$E_0 = \frac{l_{\text{сер}} \cdot w_1}{n_{\text{ел}} \cdot q_{\text{ел}} \cdot a} \cdot \rho_{\text{Cu}} \quad (2.17)$$

Після цього за допомогою розрахованих значень ми можемо знайти кількість витків у одній фазі обмотки статора:

$$w_{\phi} = \frac{E_0}{4 \cdot k_E \cdot k_{\text{об}} \cdot f_{\text{ном}} \cdot \Phi_{\delta 0}} \quad (2.18)$$

Далі за допомогою розрахованих даних ми отримуємо номінальне значення фазного струму за наступним виразом:

$$I_{\text{н.ф.}} = \frac{P_{\text{ном}}}{m \cdot U_{\text{ф.н.}} \cdot \cos(\varphi)_{\text{ном}}} \quad (2.19)$$

Розраховуємо активний опір якоря синхронного генератора [4] :

$$R_{\text{syn}} = \frac{l_{\text{сер}} \cdot w_{\phi}}{q_{\text{ел}} \cdot a} \cdot k_T \cdot \rho_{\text{Cu}}, \quad (2.20)$$

$$R_{\text{syn}} = \frac{l_{\text{сер}} \cdot w_{\phi}}{q_{\text{ел}} \cdot a} \cdot k_T \cdot \rho_{\text{Cu}}, \quad (2.20)$$

Розрахунок активного опору якоря синхронного генератора здійснюється, враховуючи середнє значення одного витка ($l_{\text{сер}}$), яке визначається як подвійна сума осьової довжини статора та лобової довжини обмотки. Для даного генератора це значення дорівнює 0.128 м. Поперечний переріз провідника в обмотці статора ($q_{\text{ел}}$), який становить 0.2 мм² для даного типу СГ, та питомий опір міді при 20° С, (ρ_{Cu}) рівний $1.75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, також враховуються у формулі. Температурний коефіцієнт опору (k_T), що становить 1.22, є важливим для коректного обчислення опору.

Всі ці значення були отримані під час розбирання вітрової установки. Також важливо врахувати індуктивний опір розсіювання СГ, який визначається через коефіцієнти магнітної провідності пазового, лобового та диференціального розсіювання:

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після цього, використовуючи розраховані значення, можна визначити кількість витків у одній фазі обмотки статора. Для цього застосовується відповідна формула.

$$X_{\sigma} = 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{f}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{д}}), \quad (2.21)$$

$\lambda_{\text{п}}, \lambda_{\text{л}}, \lambda_{\text{д}}$ – відповідно коефіцієнти магнітної провідності пазового, лобового та диференціального розсіювання.

Для подальших обчислень нам потрібно дізнатися розміри пазів СГ, а також провідника який використаний у його конструкції. Паз СГ за типом напівзакритий і має наступний вигляд:

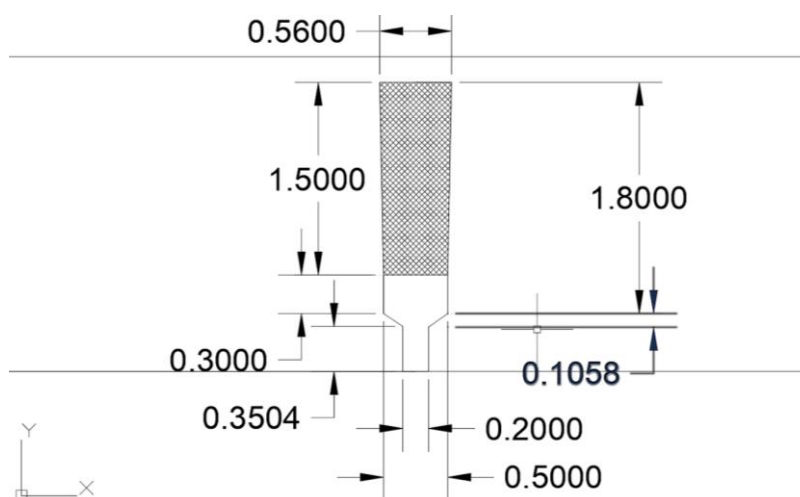


Рис. 2.8 приблизне креслення паза СГ

Перш за все, важливо визначити довжину скошу паза (h_1), яка становить 1 мм, а також довжину від кінця займаної площини провідника до початку скошу (h_2), що дорівнює 3 мм. Далі, довжина займаного проміжку паза провідником (h_3) складає 1.5 см, що є ключовим для ефективної роботи обмотки. Ширина паза якоря в цілому (b) дорівнює 5 мм, тоді як вхідний отвір для паза ($b_{\text{ш}}$) має ширину 2 мм.

Особливу увагу слід приділити довжині від кінця внутрішнього радіуса статора до початку скоса пазу ($h_{ш}$), яка становить 0.75 мм. Лобова довжина одного витка обмотки статора ($l_{лоб}$) визначається як 0.05 м, що впливає на індуктивні властивості системи. Величина повітряного зазору між статором і ротором (δ) складає 2 мм, що є важливим для належної роботи генератора. Крім того, коефіцієнт кроку обмотки статора, ($\beta_{ст}$) який приймається у межах від 0.8 до 0.86, також має значення для загальної ефективності та стабільності роботи системи.

Тоді ми маємо можливість отримати коефіцієнти магнітної провідності:

$$\lambda_{п} = k_{\beta} \cdot \left(\frac{h_3}{3 \cdot b}\right) + k_{\beta}' \cdot \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3 \cdot h_1}{b + 2 \cdot b_{ш}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}\right) \quad (2.22)$$

$$\lambda_{л} = 0.34 \cdot \frac{q}{l_{\delta}} \cdot (l_{лоб} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) \quad (2.23)$$

$$\lambda_{д} = \frac{t_z}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi_{ст}, \quad (2.24)$$

де q – коефіцієнт пазів на полюс двошарової петльової обмотки, приймається 1,25 з знаменником 4;

k_{β} та k_{β}' - деякі коефіцієнти для визначення коефіцієнта магнітної провідності пазового розсіювання:

t_z – зубцевий поділок внутрішнього кола якоря;

$\xi_{ст}$ – параметр визначення коефіцієнта магнітної провідності диференційного розсіювання;

k_{δ} – коефіцієнт, що визначає повітряний зазор.

Деякі коефіцієнти, такі як k_{β} та k_{β}' , необхідні для розрахунку магнітної провідності, визначаються за допомогою додаткових формул.

$$k_{\beta}' = 0.25 \cdot (3 \cdot \beta + 1), \quad (2.29)$$

$$k_{\beta} = 0.25 \cdot (3 \cdot k_{\beta}' + 1), \quad (2.30)$$

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Де t_z – Зубцевий поділок внутрішнього кола якоря

$$t_z = \frac{\pi \cdot D_{ст}}{N}, \quad (2.31)$$

де N – сумарна кількість пазів якоря, для заданого СГ дорівнює 32.

Коефіцієнт повітряного зазору[1]:

$$k_\delta = \frac{t_z}{t_z - y \cdot \delta} \quad (2.32)$$

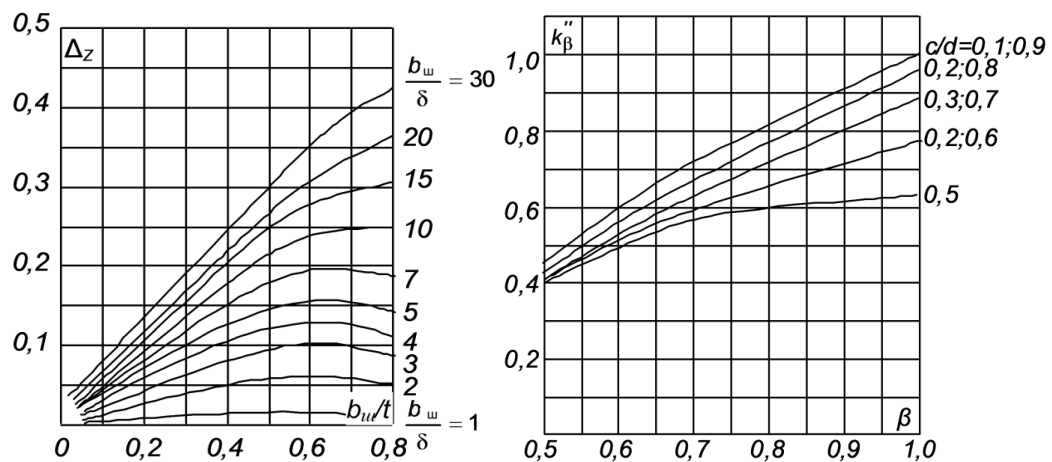
$$y = \frac{\left(\frac{b_{ш}}{\delta}\right)^2}{5 + b_{ш} \cdot \delta} \quad (2.33)$$

Де $\xi_{ст}$ ми отримуємо за наступною формулою:

$$\xi_{ст} = k'' \cdot q^2 + 2k''\beta - \frac{k'}{q} - k_{об} \cdot \left(\frac{1}{d^2} + \Delta_z\right), \quad (2.34)$$

d – знаменник дробового числа при значенні q ;

k'' , k' , $k''\beta$ і Δ_z – коефіцієнти, які ми визначаємо за допомогою графіків.



а)

б)

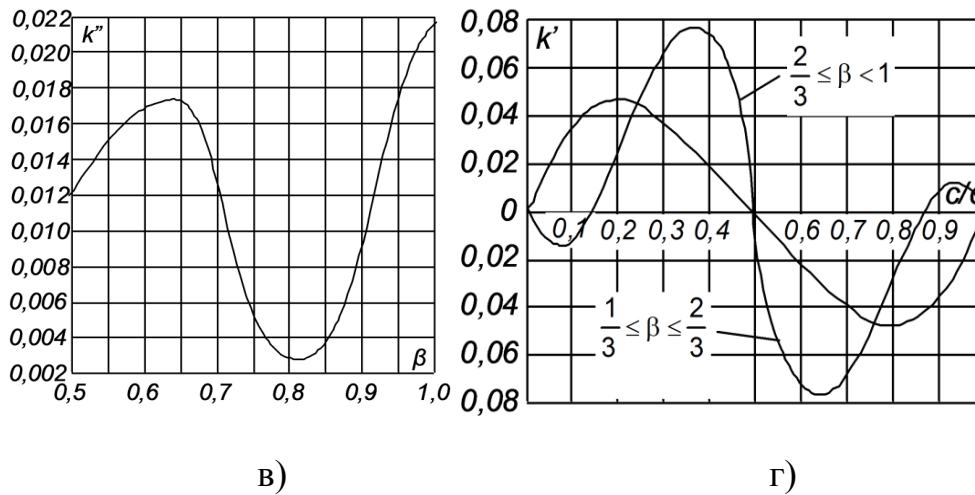


Рис. 2.9 – Графіки для різних коефіцієнтів: а) Δ_z , б) k''_β , в) k'' , г) k' , [4]

Для даного СГ головні індуктивні опори будемо знаходити за допомогою наступних виразів [4]:

$$X_{ad} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot m \cdot f_{\text{НОМ}} \cdot (k_{\text{об}w_\phi})^2}{\pi \cdot p} \cdot \Lambda_{ad} \quad (2.31)$$

$$X_{aq} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot m \cdot f_{\text{НОМ}} \cdot (k_{\text{об}w_\phi})^2}{\pi \cdot p} \cdot \Lambda_{aq}, \quad (2.32)$$

де Λ_{ad} – коефіцієнт провідності СГ по поздовжній осі;

Λ_{aq} – коефіцієнт провідності СГ по поперечній осі;

μ_0 – магнітна стала або магнітна проникність вакууму, в СІ рівна $1.2566 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$.

Λ_{ad} та Λ_{aq} магнітні провідності генератора по поздовжній та поперечній осях. Їх значення ми отримуємо з наступних виразів:

$$\Lambda_{ad} = k_{\text{фпз}} \cdot k_{ad} \cdot \frac{\Lambda_{\delta d} \cdot \Lambda_{nd}}{\Lambda_{\delta d} + \Lambda_{nd}} \quad (2.33)$$

$$\Lambda_{ad} = k_{\text{фпз}} \cdot k_{aq} \cdot \frac{\Lambda_{\delta q} \cdot \Lambda_{nq}}{\Lambda_{\delta q} + \Lambda_{nq}}, \quad (2.34)$$

Коефіцієнт, що характеризує форму поля збудження, позначений як $k_{фпз}$, має значення 1.1. Реакція якоря по поздовжній осі враховується через параметр k_{ad} . Магнітна провідність повітряного зазору в поздовжньому напрямку позначається як $\Lambda_{\delta d}$, тоді як магнітна провідність полюса у тому ж напрямку позначається як Λ_{nd} .

Щодо поперечної осі, реакція якоря визначається коефіцієнтом k_{aq} . Магнітна провідність повітряного зазору в поперечному напрямку представлена параметром $\Lambda_{\delta q}$, а магнітна провідність полюса у цьому напрямку позначається як Λ_{nq} .

Окремі магнітні провідності розраховуються за наступними формулами:

$$k_{ad} = \frac{\alpha_p \cdot \pi + \sin(\alpha_p \cdot \pi)}{4 \cdot \sin(\alpha_p \cdot \pi \cdot 0.5)} \quad (2.35)$$

$$\Lambda_{\delta d} = \frac{\tau \cdot l_\delta}{k_{\mu d} \cdot \delta_p} \quad (2.36)$$

$$\Lambda_{nd} = \frac{\mu_{bnM} \cdot b_M \cdot l_M}{h_M} \quad (2.37)$$

$$k_{aq} = \frac{\alpha_p \cdot \pi + \sin(\alpha_p \cdot \pi) + \frac{2}{3} \cdot \cos(\alpha_p \cdot \pi \cdot 0.5)}{4 \cdot \sin(\alpha_p \cdot \pi \cdot 0.5)} \quad (2.38)$$

$$\Lambda_{\delta q} = \frac{\tau \cdot l_\delta}{k_{\mu d} \cdot \delta_p} \quad (2.39)$$

$$\Lambda_{nq} = \frac{2 \cdot \mu_{bnM} \cdot b_M \cdot l_M}{h_M}, \quad (2.40)$$

Довжина силової лінії у зазорі (δ_p). ми отримуємо за наступною формулою

$$\delta_p = k_\delta \cdot \delta \quad (2.41)$$

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тоді отримуємо наступні повні значення індуктивних опорів на поперечній і повздовжній осях:

$$X_d = X_{ad} + X_\sigma, \quad (2.42)$$

$$X_q = X_{aq} + X_\sigma, \quad (2.43)$$

2.3 Вплив зміни частоти обертання генератора

За попередніми розрахунками було виявлено що частота обертання має прямий вплив як на напругу, так і на струм з його частотою та головним чином вплине на вихідну потужність. Таким чином можливо розрахувати залежності цих значень від швидкості обертання вала двигуна ($n_{ном}$)

Усі подальші розрахунки проходять з чисто активним навантаженням $R_{нав} = 10 \text{ Ом}$ через це у подальших формулах ми нехтуємо реактивним навантаженням оскільки $X_{нав} = 0$

Для цих розрахунків будуть використані наступні формули

Спершу знайдемо залежність номінальних значень напруги та частоти від обертів

$$f_n = \frac{P_1 \cdot n_{ном}}{60} \quad (2.44)$$

Де P_1 це кількість пар полюсів, у нашому випадку його значення дорівнює 6

Далі ми маємо можливість вивести наступні залежності

$$E_0 = f_n \cdot 0.277 \quad (2.45)$$

$$U_{фаз} = \frac{E_0}{k_e} \quad (2.46)$$

$$U_{лін} = U_{фаз} \cdot \sqrt{3} \quad (2.47)$$

Струми поперечної і повздовжньої осей та ЕРС збудження

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_d = \frac{E_{f0}}{\frac{(R_{\text{наб}} + R)^2}{X_q} + X_d - \left(-\frac{E_{f0}}{I_{d0}}\right)} \quad (2.48)$$

$$E_f = -\frac{E_{f0}}{I_{d0}} \cdot I_d + E_{f0} \quad (2.49)$$

$$I_q = \frac{E_f}{\frac{(X_d)(X_q)}{R_{\text{наб}} + R} + R_{\text{наб}} + R} \quad (2.50)$$

Поперечна та повздовжня напруга:

$$U_d = I_d \cdot R_{\text{наб}} \quad (2.51)$$

$$U_q = I_q \cdot R_{\text{наб}} \quad (2.52)$$

Далі розраховуємо результуючі струм та напругу. Знайти їх можливо як квадратний корінь із суми квадратів складових попередніх розрахунків поперечних та повздовжніх осей:

$$U_{\text{роз}} = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (2.53)$$

$$I_{\text{роз}} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (2.54)$$

Підставивши усі значення в формули ми можемо вирахувати напругу та струм на навантаженні:

$$U_{\text{ф.роз}} = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (2.55)$$

$$I_{\text{ф.роз}} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (2.56)$$

Далі легко переводимо отримані фазні значення у лінійні за допомогою множення на $\sqrt{3}$

$$U_{\text{л.роз}} = U_{\text{ф.роз}} \cdot \sqrt{3} \quad (2.57)$$

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_{л.роз} = I_{ф.роз} \cdot \sqrt{3} \quad (2.58)$$

Відразу констатуємо що через незмінні опори вплив обертів на струм є майже непомітним оскільки, він більш залежить від напруги ніж від фактора обертання валу, тому не має сенсу у його розрахунках для кожного значення обертання.

Тому буде побудований загальний графік струму який демонструє його зміни, а його точне значення буде розраховано лише для $n_{ном} = 750 \frac{Об}{ХВ}$. Також одразу треба відмітити що даний вітрогенератор має обмежені діапазони роботи за швидкістю обертання від $300 \frac{Об}{ХВ}$ до приблизно $900 \frac{Об}{ХВ}$ тому усі графіки залежності матимуть відповідні до цього діапазони по швидкості

Проводимо розрахунки за вище вказаними формулами:

Полюсна поділка:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_{ст}}{2 \cdot p} = \frac{3.14 \cdot 0.118}{2 \cdot 6} = 0.031 \text{ м}$$

Величина магнітного потоку полюса

$$\Phi_{\delta 0} = B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot \tau \cdot \alpha_{\delta} = 0.8 \cdot 0.04 \cdot 0.031 \cdot 0.6 = 6.001 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$$

частота

$$f_n = \frac{P_1 \cdot n_{ном}}{60} = \frac{6 \cdot 500}{60} = 50 \text{ Гц}$$

ЕРС

$$E_0 = f_n \cdot 0.277 = 50 \cdot 13.85 = 13.85 \text{ В}$$

Лінійна та фазна напруга

$$U_{лін.} = \frac{E_0}{k_e} = \frac{13.85}{1} = 13.85 \text{ В}$$

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$U_{\text{ф.н.}} = U_{\text{лн.}} \cdot \sqrt{3} = 13.85 \cdot \sqrt{3} = 24 \text{ В}$$

Кількість витків

$$W_{\phi} = \frac{E_0}{4 \cdot k_E \cdot k_{06} \cdot f_{\text{ном}} \cdot \Phi_{\delta 0}} = \frac{13.856}{4 \cdot 1 \cdot 0.92 \cdot 50 \cdot 6.001 \cdot 10^{-4}} = 113.056 \text{ шт}$$

Номинальний фазний струм

$$I_{\text{н.ф.}} = \frac{P_{\text{ном}}}{m \cdot U_{\text{ф.н.}} \cdot \cos(\varphi)_{\text{ном}}} = \frac{400}{3 \cdot 13.856 \cdot 0.8} = 12.028 \text{ А}$$

Активний опір СГ

$$R_{\text{syn}} = \frac{l_{\text{сер}} \cdot W_{\phi}}{q_{\text{ел}} \cdot a} \cdot k_T \cdot \rho_{\text{Cu}} = \frac{0.128 \cdot 113.056}{2 \cdot 2} \cdot 1.75 \cdot 10^{-8} \cdot 1.22 = 7.724 \cdot 10^{-8}$$

Ом

Інші коефіцієнти

$$k'_{\beta} = 0.25 \cdot (3 \cdot \beta + 1) = 0.25 \cdot (3 \cdot 0.8 + 1) = 0.85$$

$$k_{\beta} = 0.25 \cdot (3 \cdot k'_{\beta} + 1) = 0.25 \cdot (3 \cdot 0.85 + 1) = 0.888$$

$$\lambda_{\pi} = k_{\beta} \cdot \left(\frac{h_3}{3 \cdot b} \right) + k'_{\beta} \cdot \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3 \cdot h_1}{b + 2 \cdot b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) = k_{\beta} \cdot \left(\frac{0.015}{3 \cdot 0.005} \right) + k'_{\beta} \cdot \left(\frac{0.003}{0.005} + \frac{3 \cdot 0.001}{0.005 + 2 \cdot 0.002} + \frac{0.00075}{0.002} \right) = 2$$

$$\lambda_{\text{л}} = 0.34 \cdot \frac{q}{l_{\delta}} \cdot (l_{\text{лоб}} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0.34 \cdot \frac{1.25}{0.04} \cdot (0.05 - 0.64 \cdot 0.8 \cdot 0.031) = 0.36$$

$$\xi_{\text{ст}} = k'' \cdot q^2 + 2k''_{\beta} - \frac{k'}{q} - k_{06} \cdot \left(\frac{1}{d^2} + \Delta_z \right) = 0.003 \cdot 1.25^2 + 2 \cdot 0.75 - \frac{0.045}{1.25} - 0.92 \cdot \left(\frac{1}{4^2} + 0.01 \right) = 1.402$$

Коефіцієнти повітряного зазору

$$y = \frac{\left(\frac{b_{\text{ш}}}{\delta} \right)^2}{5 + b_{\text{ш}} \cdot \delta} = \frac{\left(\frac{0.002}{0.002} \right)^2}{5 + 0.002 \cdot 0.002} = 0.2$$

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

$$k_{\delta} = \frac{t_z}{t_z - y \cdot \delta} = \frac{0.012}{0.012 - 0.2 \cdot 0.002} = 1.036$$

Коефіцієнт магнітної провідності

$$\lambda_d = \frac{t_z}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi_{\text{СТ}} = \frac{0.012}{12 \cdot 0.002 \cdot 1.036} \cdot 1.402 = 0.656$$

$$X_{\sigma} = 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{f}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_d) = 15.8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{50}{100}\right)^2 \cdot \frac{0.04}{6 \cdot 2} \cdot (2 + 0.36 + 0.656) = 0.18 \text{ Ом}$$

$$\delta_p = k_{\delta} \cdot \delta = 1.036 \cdot 0.002 = 2.071 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Окремі магнітні провідності

$$k_{ad} = \frac{\alpha_{\rho} \cdot \pi + \sin(\alpha_{\rho} \cdot \pi)}{4 \cdot \sin(\alpha_{\rho} \cdot \pi \cdot 0.5)} = \frac{0.4 \cdot 3.14 + \sin(0.4 \cdot 3.14)}{4 \cdot \sin(0.4 \cdot 3.14 \cdot 0.5)} = 0.938$$

$$\Lambda_{\delta d} = \frac{\tau \cdot l_{\delta}}{k_{\mu d} \cdot \delta_p} = \frac{0.031 \cdot 0.04}{1.2 \cdot 2.071 \cdot 10^{-3}} = 0.503$$

$$\Lambda_{nd} = \frac{\mu_{bnM} \cdot b_M \cdot l_M}{h_M} = \frac{1.23 \cdot 0.019 \cdot 0.002}{0.00285} = 0.016$$

$$k_{aq} = \frac{\alpha_{\rho} \cdot \pi + \sin(\alpha_{\rho} \cdot \pi) + \frac{2}{3} \cdot \cos(\alpha_{\rho} \cdot \pi \cdot 0.5)}{4 \cdot \sin(\alpha_{\rho} \cdot \pi \cdot 0.5)} =$$

$$\frac{0.4 \cdot 3.14 + \sin(0.4 \cdot 3.14) + \frac{2}{3} \cdot \cos(0.4 \cdot 3.14 \cdot 0.5)}{4 \cdot \sin(0.4 \cdot 3.14 \cdot 0.5)} = 1.166$$

$$\Lambda_{\delta q} = \frac{\tau \cdot l_{\delta}}{k_{\mu q} \cdot \delta_p} = \frac{0.031 \cdot 0.04}{1.3 \cdot 2.071 \cdot 10^{-3}} = 0.503$$

$$\Lambda_{nq} = \frac{2 \cdot \mu_{bnM} \cdot b_M \cdot l_M}{h_M} = \frac{2 \cdot 1.23 \cdot 0.019 \cdot 0.002}{0.00285} = 0.032$$

$$\Lambda_{ad} = k_{\text{фпз}} \cdot k_{ad} \cdot \frac{\Lambda_{\delta d} \cdot \Lambda_{nd}}{\Lambda_{\delta d} + \Lambda_{nd}} = 1.07 \cdot 0.938 \cdot \frac{0.503 \cdot 0.016}{0.503 + 0.016} = 0.016$$

$$\Lambda_{aq} = k_{\text{фпз}} \cdot k_{aq} \cdot \frac{\Lambda_{\delta q} \cdot \Lambda_{nq}}{\Lambda_{\delta q} + \Lambda_{nq}} = 1.07 \cdot 1.166 \cdot \frac{0.503 \cdot 0.032}{0.503 + 0.032} = 0.037$$

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$X_{ad} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot m \cdot f_{\text{НОМ}} \cdot (k_{06} \cdot w_{\phi})^2}{\pi \cdot p} \cdot \Lambda_{ad} = \frac{4 \cdot 1.257 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 50 \cdot (0.92 \cdot 113.056)^2}{3.14 \cdot 6} \cdot 0.016 = 0.006761 \text{ Ом}$$

$$X_{aq} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot m \cdot f_{\text{НОМ}} \cdot (k_{06} \cdot w_{\phi})^2}{\pi \cdot p} \cdot \Lambda_{aq} = \frac{4 \cdot 1.257 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 50 \cdot (0.92 \cdot 113.056)^2}{3.14 \cdot 6} \cdot 0.037 = 0.016 \text{ Ом}$$

Повні індуктивні опори

$$X_d = X_{ad} + X_{\sigma} = 0.006761 + 0.102 = 0.109 \text{ Ом}$$

$$X_q = X_{aq} + X_{\sigma} = 0.016 + 0.102 = 0.119 \text{ Ом}$$

Струми поперечної і повздовжньої осей та ЕРС збудження

$$I_d = \frac{E_{f0}}{\frac{(R_{\text{НАВ}} + R)^2}{X_q} + X_d - \left(-\frac{E_{f0}}{I_{d0}}\right)} = \frac{13.85}{\frac{(10 + 0.077 \cdot 10^{-6})^2}{0.119} + 0.109 - \left(-\frac{13.85}{71.42}\right)} = 0.029 \text{ А}$$

$$E_f = -\frac{E_{f0}}{I_{d0}} \cdot I_d + E_{f0} = -\frac{13.85}{71.42} \cdot 0.029 + 13.85 = 13.844 \text{ В}$$

$$I_q = \frac{E_f}{\frac{(X_d)(X_q)}{R_{\text{НАВ}} + R} + R} = \frac{3.85}{\frac{(0.109)(X_q)}{10 + 0.077 \cdot 10^{-6}} + 10 + 0.077 \cdot 10^{-6}} = 1.384 \text{ А}$$

Таким чином графік для струму матиме наступний вигляд

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рис. 2.10 Графік залежності струму на навантаженні від обертів валу СГ
Через зазначені вище обмеження розрахунки будуть проводитись лише для 200, 300, 400, та 500 $\frac{\text{Об}}{\text{хв}}$.

Оберти n_n ,	Частота f Гц	Номінальна лінійна напруга	Номінальна фазна напруга	Лінійна Напруга на навантаженні	Фазна напруга на навантаженні	Вихідна повна потужність
200	20	9.596	5.54	9.595	5.539	15.945
300	30	14.393	8.31	14.39	8.308	35.867
400	40	19.191	11.08	19.184	11.076	63.743
500	50	23.989	13.85	23.975	13.842	99.555

Табл.2.2 Розраховані значення

Далі будемо графіки залежності напруги та потужності

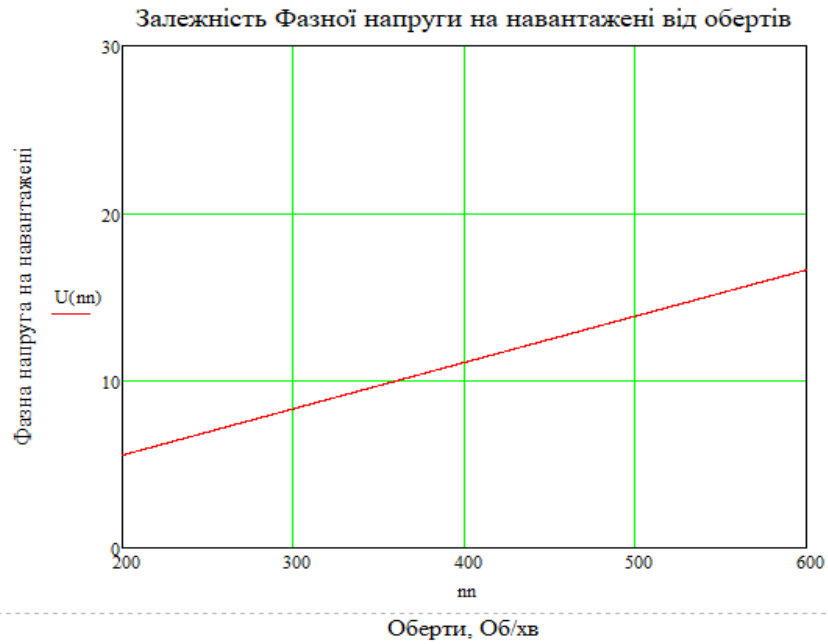


Рис. 2.11 Графік залежності вихідної фазної напруги на навантаженні від обертів валу СТ

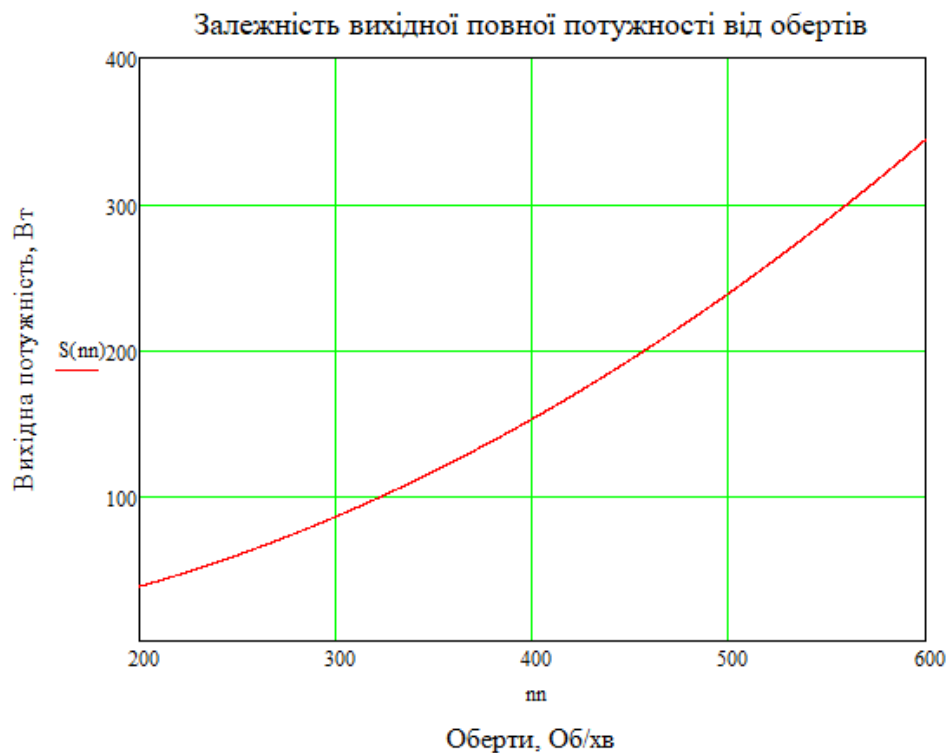


Рис. 2.12 Графік залежності вихідної повної потужності від обертів валу СТ

Висновок за розділом

Даний розділ було повністю присвячено розрахункам наявного вітрогенератора (його ротора та самого синхронного генератора).

А також порівнянню розрахованих значень з виміряними що не дивлячись на невеликі погрішності мають дуже наближені значення. Також були проведені розрахунки того як буде поводити себе даний генератор при обертах нижчих за номінальні значення, та продемонстрували результати своїх розрахунків.

					КНУ.РБ.141.21.303-16.02	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розділ 3

Створення моделі вітрогенеруючої установки використовуючи програмне забезпечення MatLab

3.1 Опис моделі та що від неї очікується

Даний розділ буде посвячений використанню програмного забезпечення **MatLab (a same Simulink)** для побудови та опису моделі наявної вітрогенеруючої установки.

Сама модель має являти собою повну вітрогенеруючу установку яка має виконувати свої функції, та мати можливість виводу даних щодо роботи установки.

3.2 Детальний опис моделі та на чому вона базується

Модель яку ми будемо використовувати, це модель з прикладів можливостей Simulink, яка представлена на сайті розробника програмного забезпечення. Щодо моделі до неї були внесені певні невеликі зміни для більш стабільної роботи оскільки представлена на сайті модель є дещо застарілою.

Загалом модель після змін має наступний вигляд

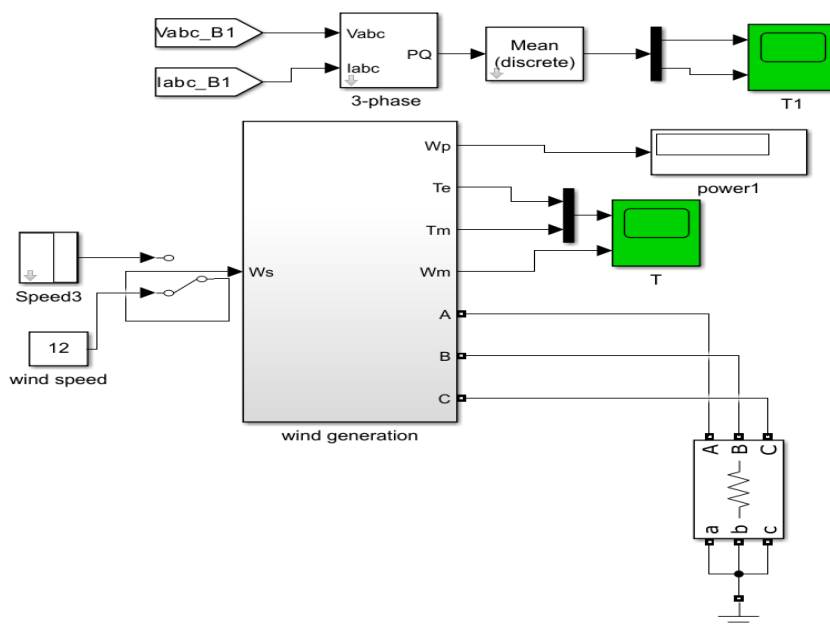


Рис. 3.13 Не розкрита модель

					КНУ.РБ.141.24.303-16					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 3					
Розробив	Маловічко Д.В							Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І.І								43	9
Н. Контр.	Пересунько І.І							КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.	Федотов В.О.									

Де у блоці «wind generation» маємо структуру що продемонстрована на наступному зображенні (Рис 3.14)

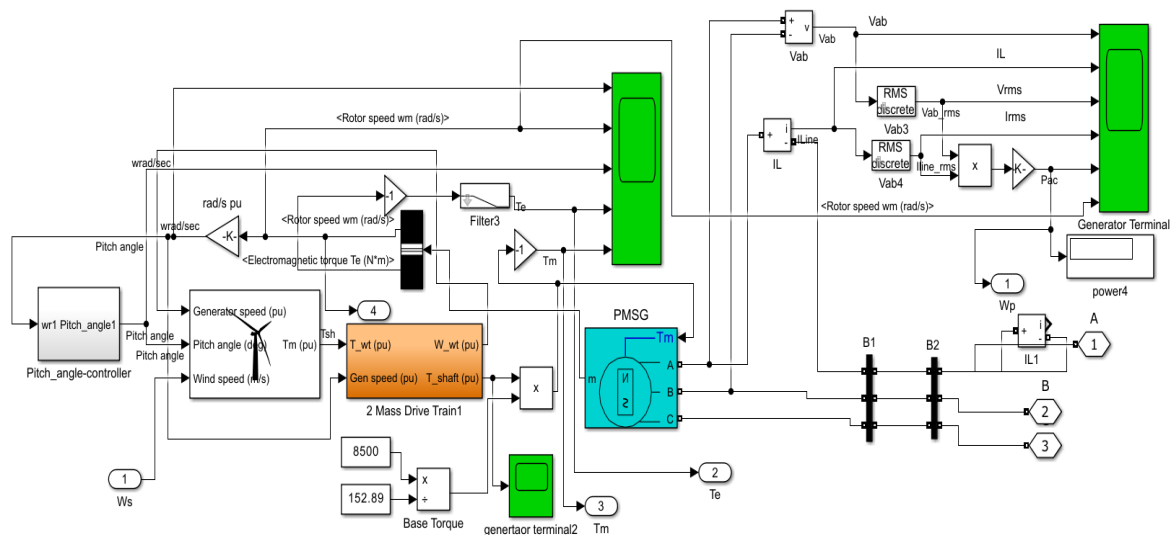


Рис 3.14 Повна модель

Ця структура є дещо складною, проте вона дозволяє нам побачити в цілому як поводить себе даний вітрогенератор при заданих вхідних умовах у тому числі саме те що нас і цікавить при різній швидкості вітру (блок "wind speed").

3.3 Безпосереднє моделювання

Для вітрової турбіни були задані наступні характеристики (рис. 3.15) які були знайдені у минулих розділах та усі моделювання проводились з незмінним навантаженням 10 Ом

Block Parameters: Wind Turbine

Wind Turbine (mask) (link)

This block implements a variable pitch wind turbine model. The performance coefficient C_p of the turbine is the mechanical output power of the turbine divided by wind power and a function of wind speed, rotational speed, and pitch angle (β). C_p reaches its maximum value at zero β . Select the wind-turbine power characteristics display to plot the turbine characteristics at the specified pitch angle.

The first input is the generator speed in per unit of the generator base speed. For a synchronous or asynchronous generator, the base speed is the synchronous speed. For a permanent-magnet generator, the base speed is defined as the speed producing nominal voltage at no load. The second input is the blade pitch angle (β) in degrees. The third input is the wind speed in m/s.

The output is the torque applied to the generator shaft in per unit of the generator ratings.

The turbine inertia must be added to the generator inertia.

Parameters

Nominal mechanical output power (W):

Base power of the electrical generator (VA):

Base wind speed (m/s):

Maximum power at base wind speed (pu of nominal mechanical power):

Base rotational speed (p.u. of base generator speed):

Pitch angle β to display wind-turbine power characteristics ($\beta \geq 0$) (deg):

Display wind turbine power characteristics

Рис. 3.15 характеристики вітрогенератора моделі

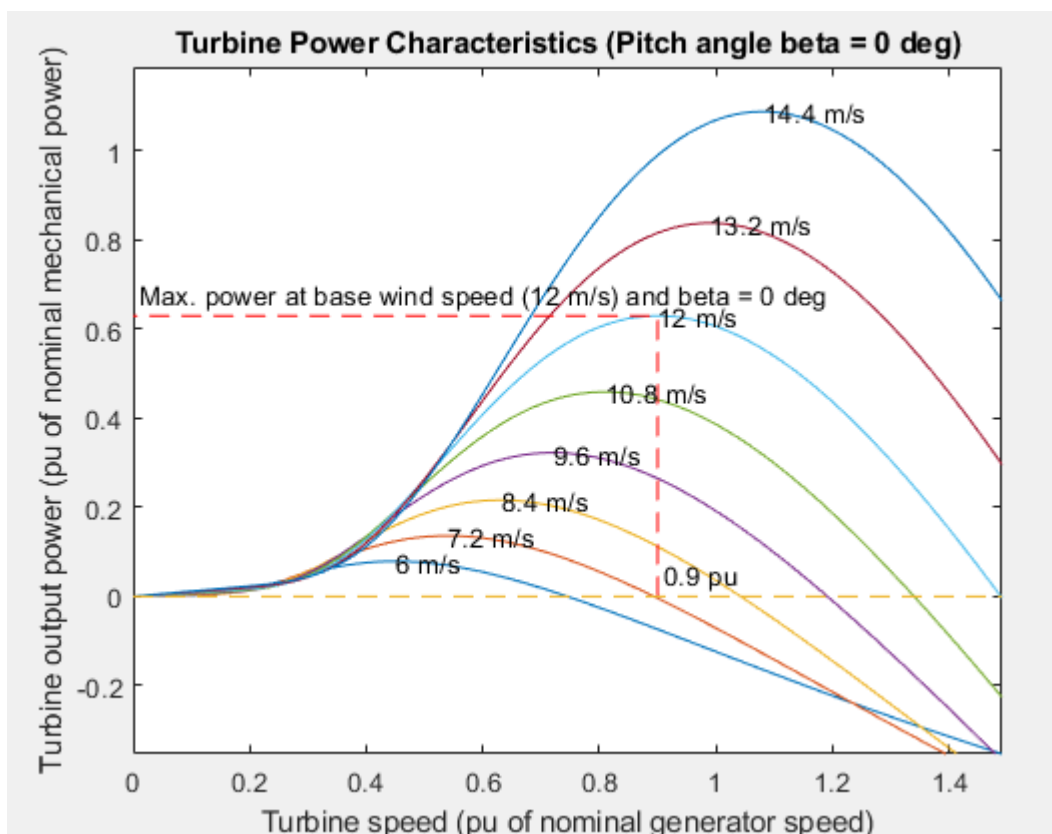


Рис. 3.15 Силова характеристика турбіни

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

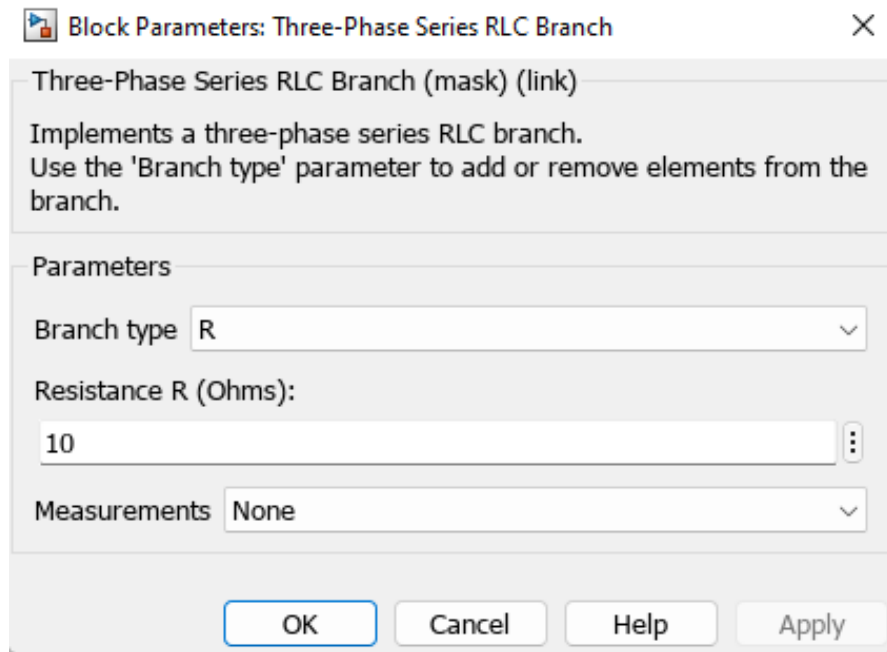


Рис. 3.16 Навантаження

Для синхронного генератора з постійними магнітами також задаємо свої параметри

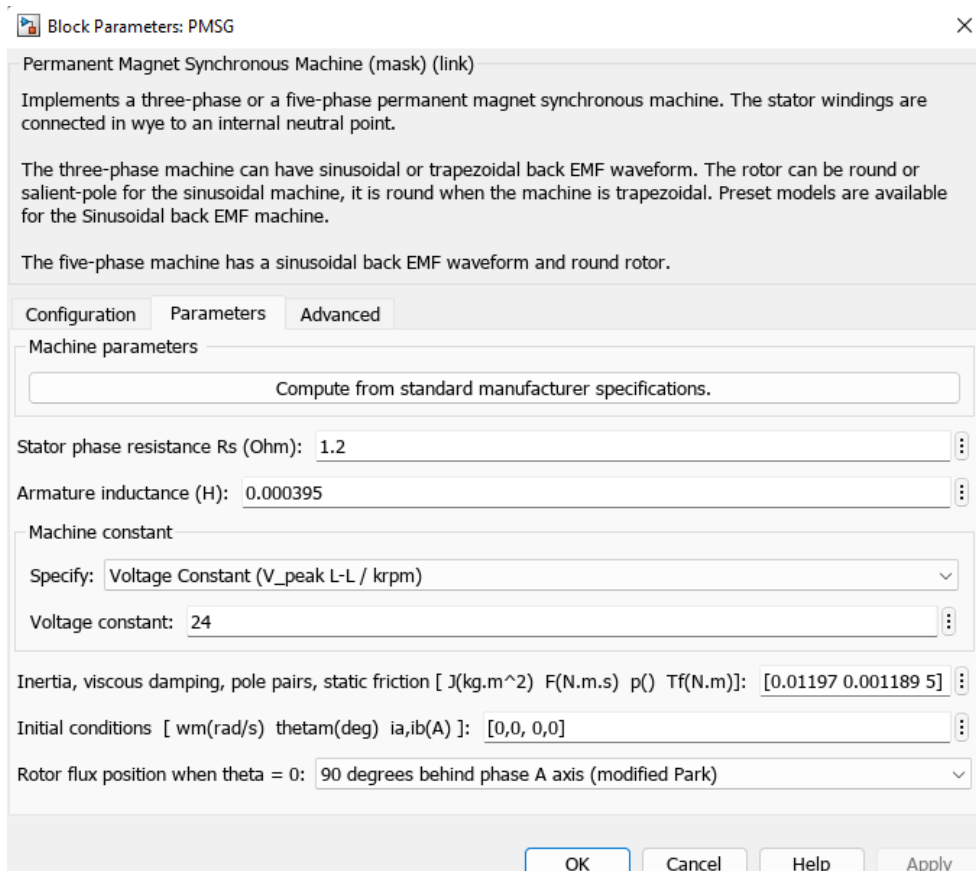


Рис. 3.17 характеристики генератора з постійними магнітами

Для номінальної швидкості вітру 12.3 м/с ми отримуємо наступні графіки

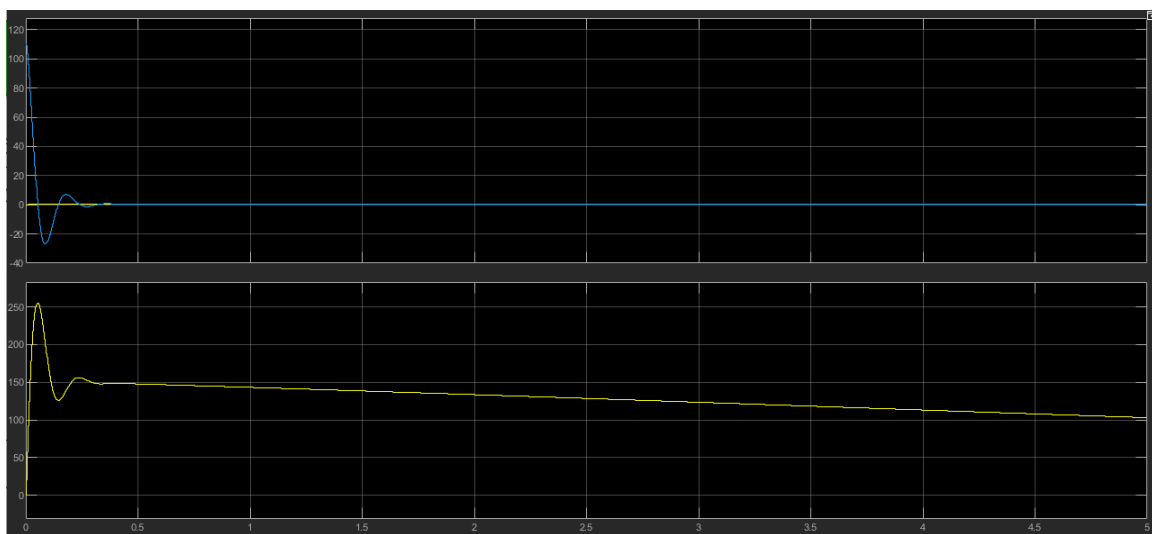


Рис. 3.18 Електромеханічний електромагнітний момент та швидкість ротора у радіанах за секунду при номінальній швидкості вітру

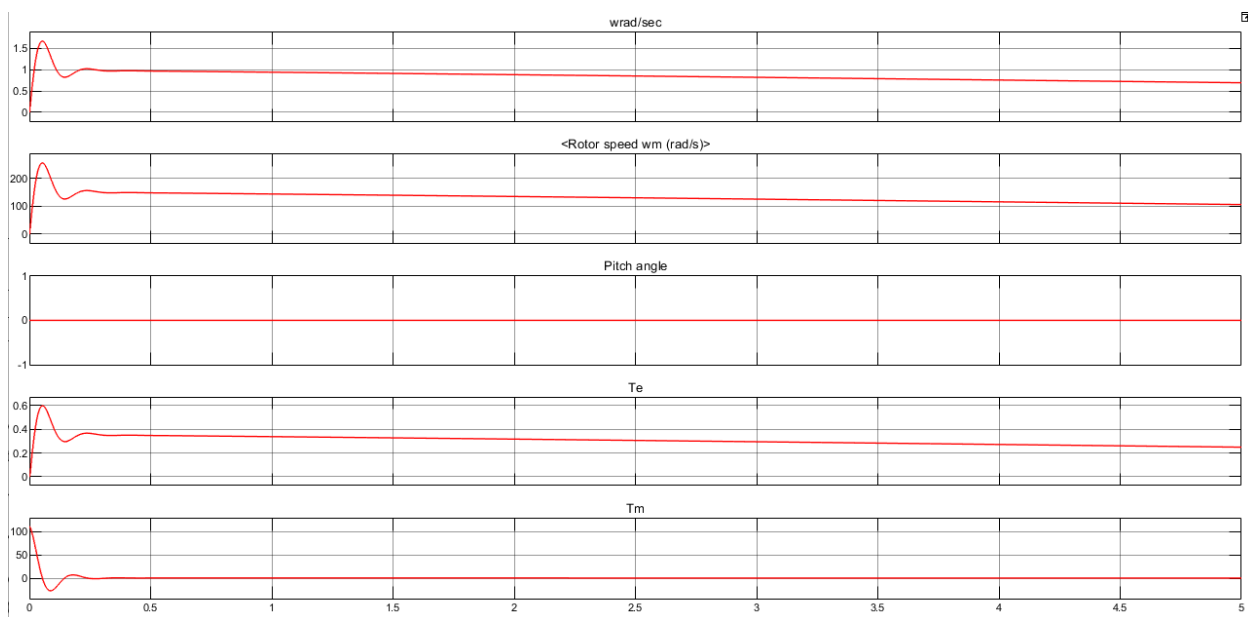


Рис. 3.19 Швидкість ротора кут повороту атаки вітру та момент ротора

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

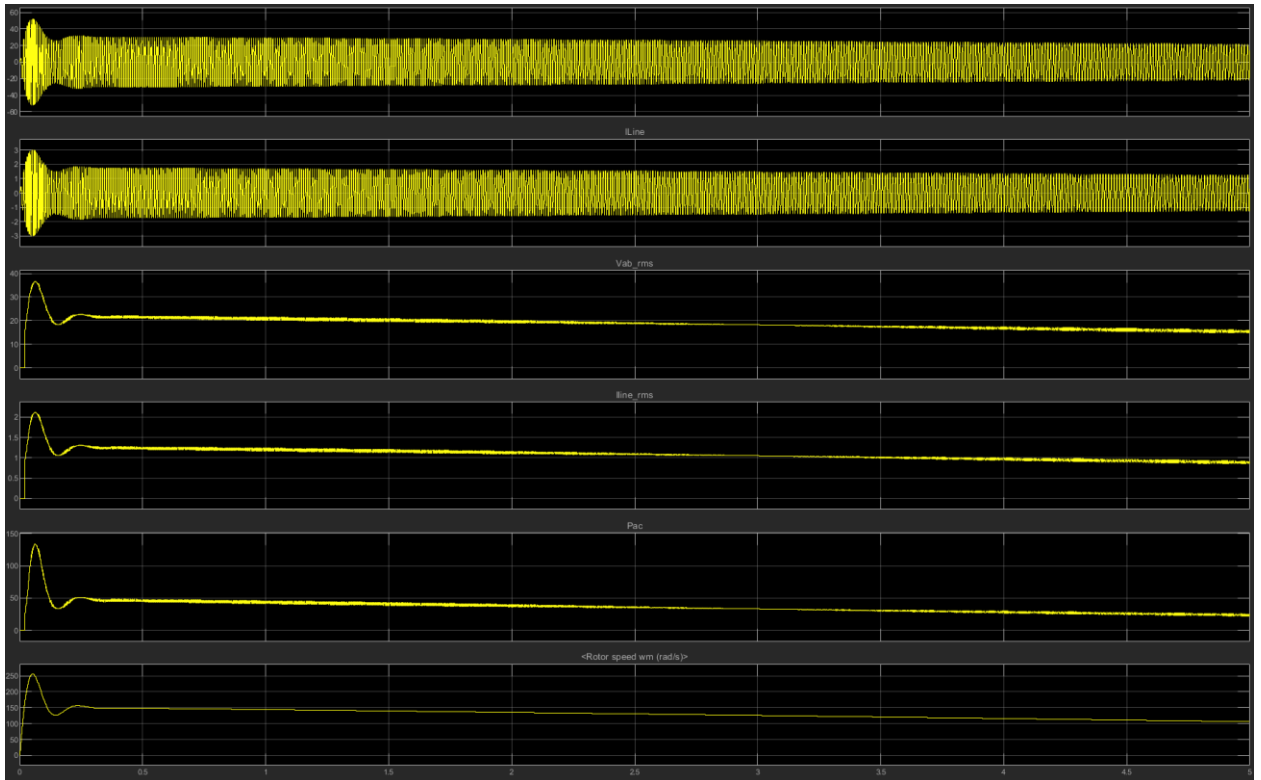


Рис. 3.20 Фазні та лінійні напруги та струми, швидкість ротора та активна потужність

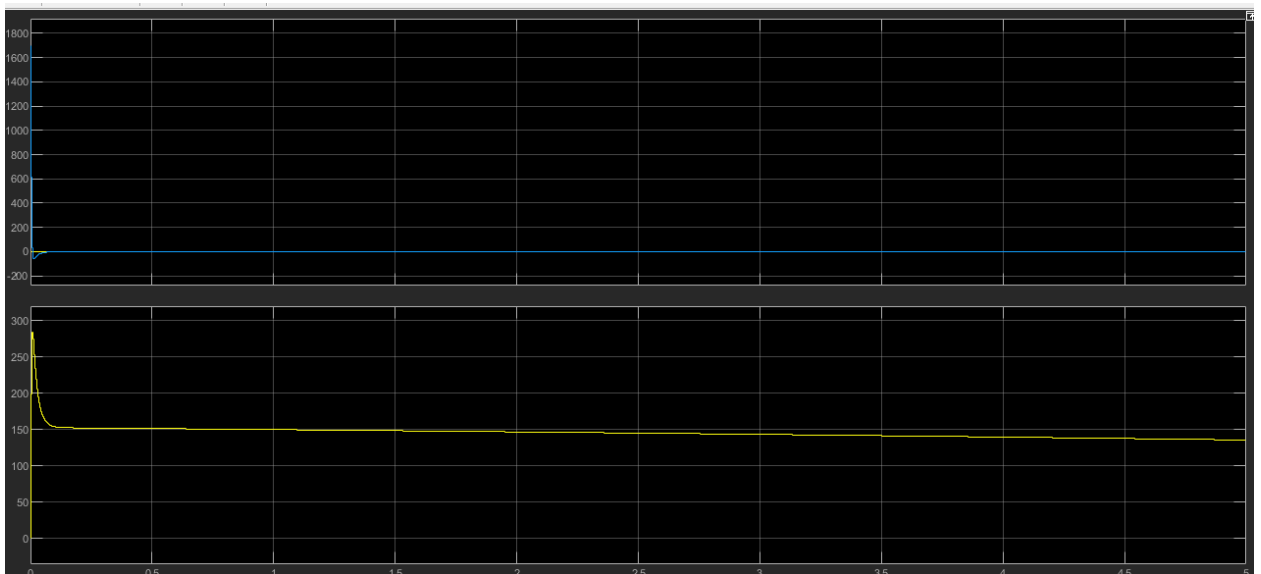


Рис. 3.21 Електромеханічний електромагнітний момент та швидкість ротора у радіанах за секунду при швидкості вітру 10 м/с

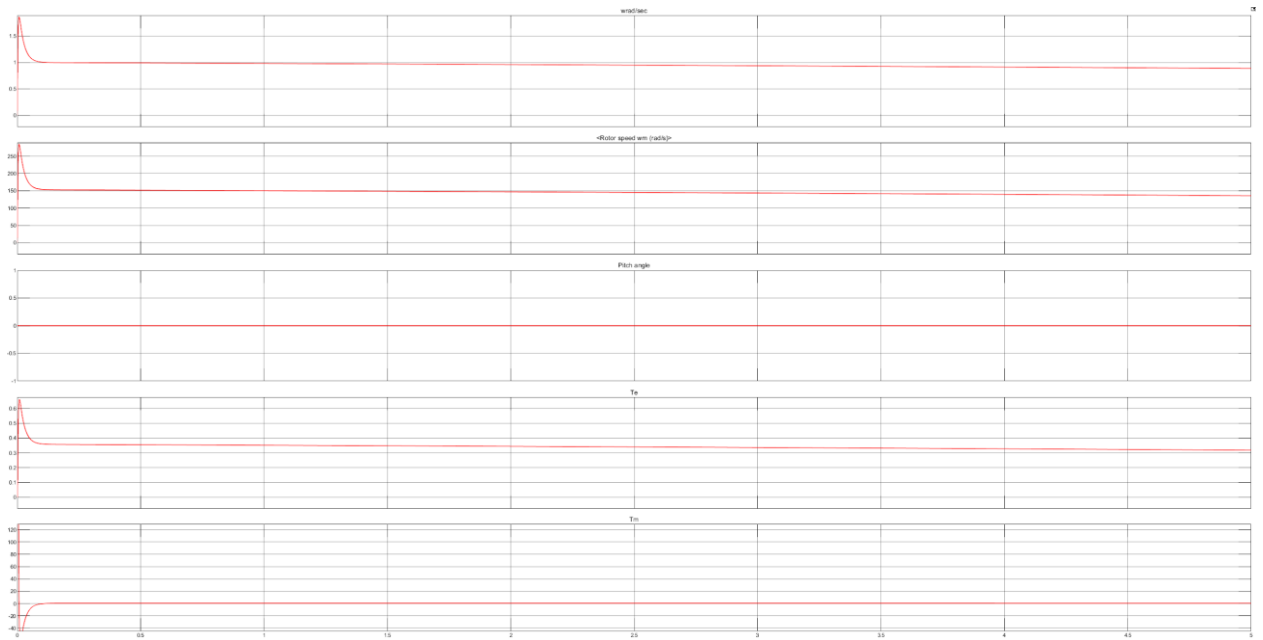


Рис. 3.22 Швидкість ротора кут повороту атаки вітру та момент ротора при швидкості вітру 10 м/с

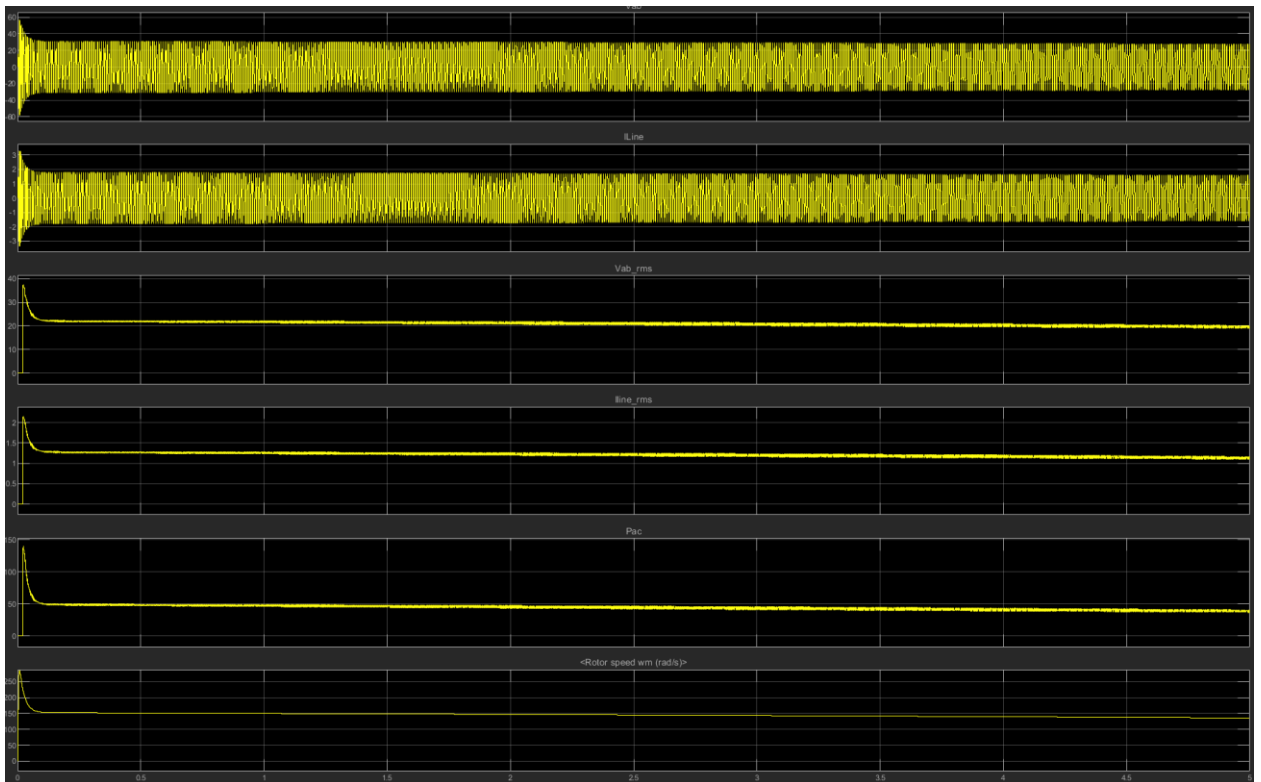


Рис. 3.23 Фазні та лінійні напруги та струми, швидкість ротора та активна потужність при швидкості вітру 10 м/с

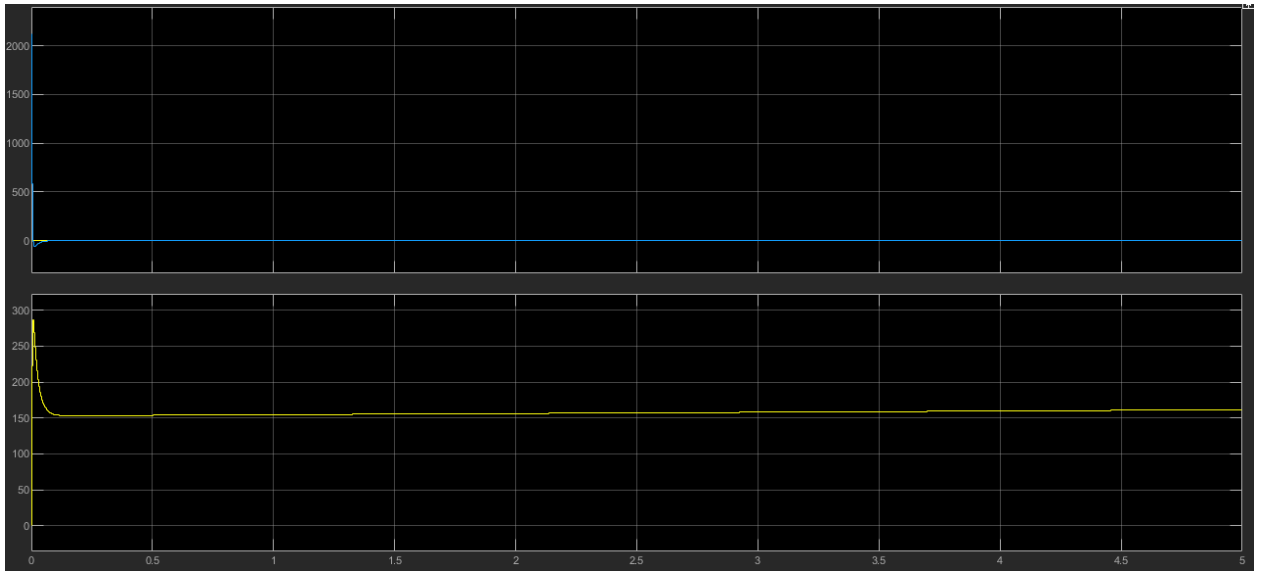


Рис. 3.24 Електромеханічний, електромагнітний момент та швидкість ротора у радіанах за секунду при швидкості вітру 6 м/с

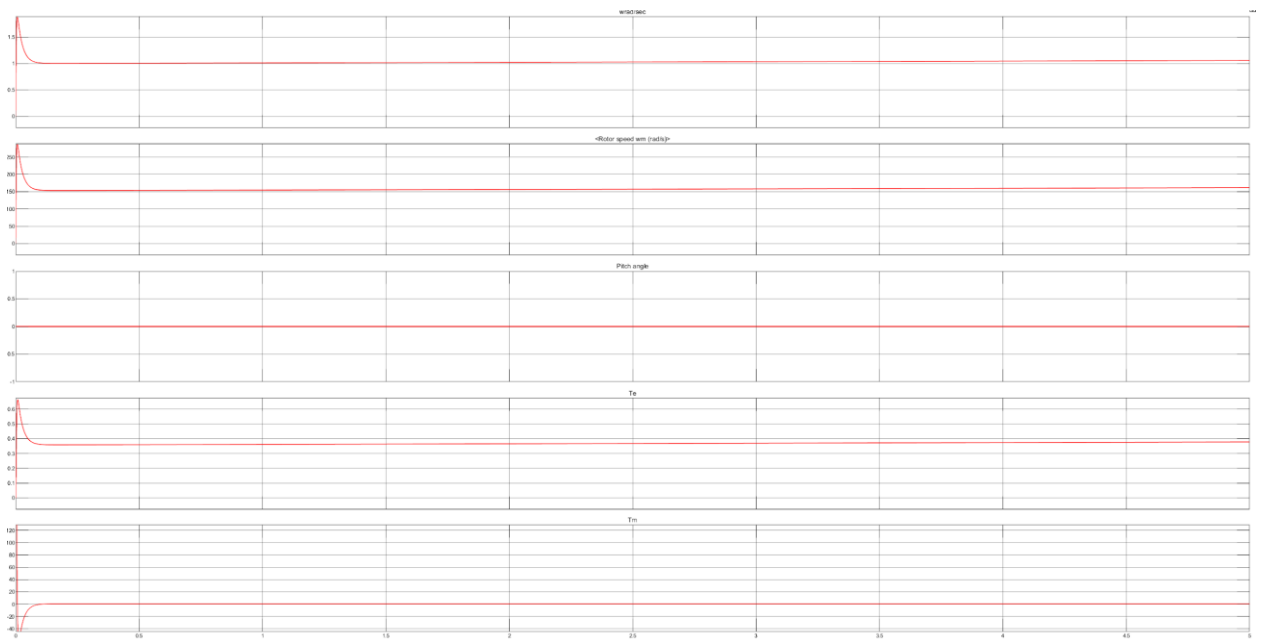


Рис. 3.25 Швидкість ротора кут повороту атаки вітру та момент ротора при швидкості вітру 6 м/с

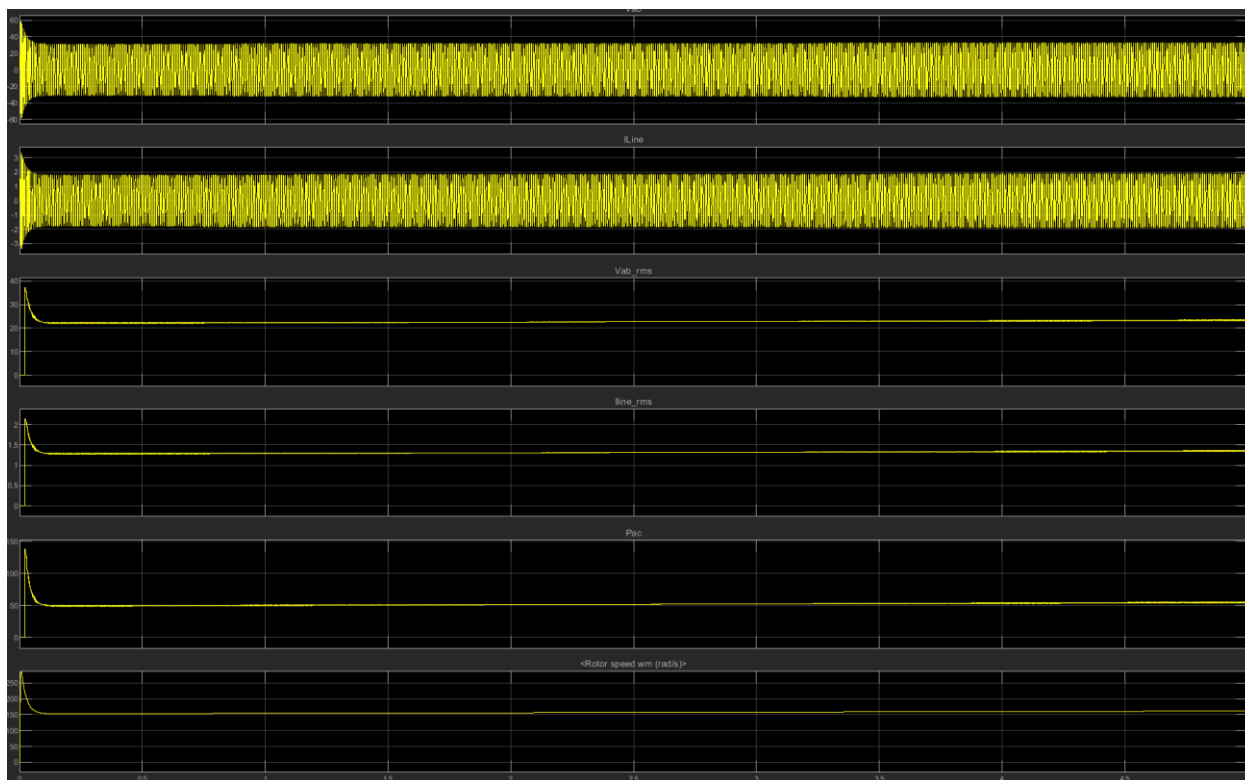


Рис. 3.26 Фазні та лінійні напруги та струми, швидкість ротора та активна потужність при швидкості вітру 6 м/с

Висновок за розділом

У даному розділі, використовуючи програмне забезпечення Matlab (simulink) була побудована модель вітрогенератора яка демонструє саме принципи роботи наявної установки. У цій частині роботи помітно що вихідні данні не відповідають ні дійсним ні розрахованим. Це сталося через те що дана модель не є досконалою навіть попри зміни які були внесені. Самою метою даного моделювання було продемонструвати як саме працює наявний вітрогенератор. Якщо ж нам потрібна дійсна модель саме наданого обладнання, то обрана модель потребує доопрацювання чи навіть повного створення нової відповідної моделі.

Розділ 4 Проектування лабораторного стенда

4.1 Наявне обладнання

У даній дипломній роботі використовується вітрогенератор китайського виробника невідомої марки:

Цей генератор здатен забезпечити номінальну потужність у 400 Вт. Номінальна напруга становить 24 В. З попередніх розрахунків було виявлено що оптимальна швидкість вітру близько до значення 12.3 м/с



Рис. 4.27 Фото наданого вітрогенератора на щоглі

					КНУ.РБ.141.24.303-16							
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розділ 4			Літ.	Арк.	Акрушів		
Розробив	Маловічко Д.В							52	13			
Перевірів	Пересунько І.І											
Н. Контр.	Пересунько І.І							КНУ гр. ЕЕМ-20				
Затвердж.	Федотов В.О.											



Рис. 4.28 – Вигляд тестової вітроустановки і її розміри

Здатність установки підлаштовуватися під будь-який напрямок вітру забезпечується наявністю ковзкого контакту в корпусі, що є дуже зручним рішенням. Проте, такий технічний підхід може знижувати надійність агрегату через можливі зноси контактів.

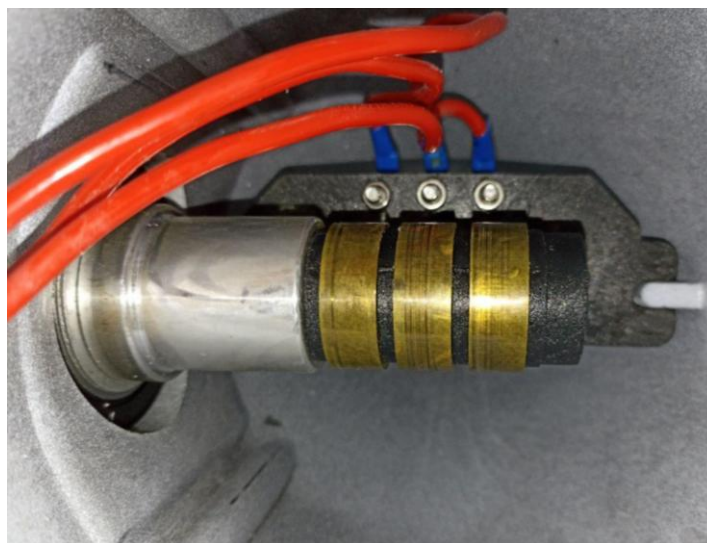


Рис. 4.29 – Ковзкий контакт

До комплекту також входить власний контролер, який має один вхід і вихід. Трифазний вихід від генератора підключається до контролера, а вихід з контролера веде до акумуляторної батареї. Контролер виконує функції випрямляча, контролера зарядку батареї, а також індукує стан роботи

установки та забезпечує можливість електромагнітного гальмування. Його охолодження здійснюється за допомогою сталевого радіатора, який кріпиться на корпусі контролера.

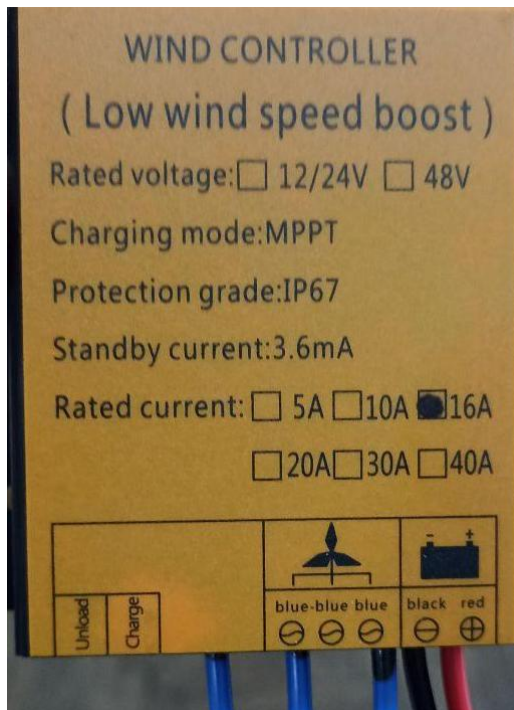


Рис. 4.30 – Контролер

Ця установка, при правильному підключенні усіх елементів, може використовуватися для зарядки акумуляторної батареї, що складається з чотирьох послідовно з'єднаних елементів:

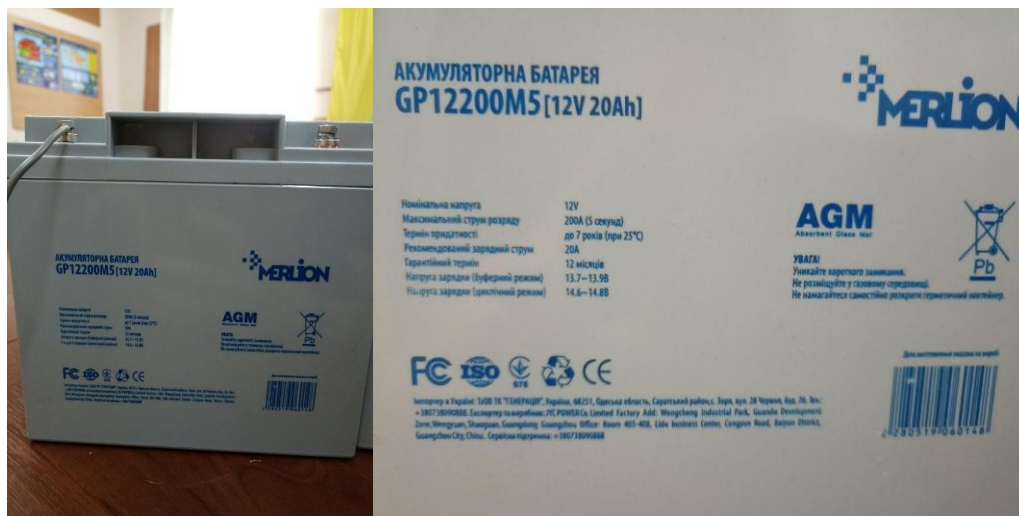


Рис. 4.31 – Акумуляторна батарея

					КНУ.РБ.141.21.303-16.Р4	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Обране обладнання для стенда

4.2.1 Обрана система ПЧ-АД

Для обертання наданого СГ та регулювання обертів у роботі буде використовуватися система ПЧ-АД. Вибір буде орієнтований на значення обертів 750 об/хв та потужності 400 Вт які стануть нашим обмеженням для вибору ПЧ-АД а також система повинна працювати від мережі 220 В

Для стенда пропонується двигун АІР71В6

Номинальна потужність, кВт	0.55
Частота обертання, А	1.8
ККД, %	65
Коефіцієнт потужності	0.72
Пусковий коефіцієнт	1.9
Коефіцієнт кратності максимального моменту	2.1
Коефіцієнт пускового струму	4.7
Маса, кг	10

					КНУ.РБ.141.21.303-16.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Табл.4.3 Характеристики двигуна АІР71В6



Рис. 4.32 – Вигляд тестової вітроустановки, а й б

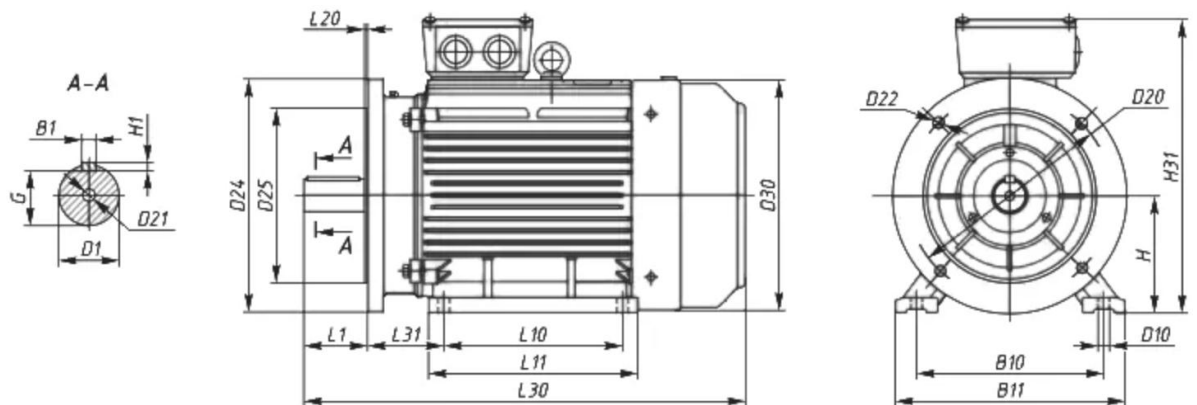


Рис. 4.33 – Вигляд тестової вітроустановки, а й б

Параметр	L3	D3	H3	L3	D2	D2	D2	L1	L	D	G	B	H	B1	D1
и	0	0	1	1	4	0	5	1	1	1		1		1	0
Розмірніс ть, мм	27	14	19	45	20	16	13	90	4	1	21,	6	7	15	7
	0	5	5		0	5	0		0	9	5		1	0	

Табл.4.4 розміри двигуна

Далі теоретичному стенду необхідно дати певний захист. Цю роль дуже добре виконують базові плавкі запобіжники та автоматичний вимикач (автомат) з номінальною напругою 24 В.

Тому були підібрані наступні компоненти:

EZ9F34110 Schneider:	
•	Номінальний струм: 10А
•	Номінальна напруга: 230В, 50 Гц змінного струму
•	Крива відключення: С (5-10 кратна Іном.)
•	Стійкість автомата до струму КЗ: 4,5 кА

Табл. 4.5 Характеристики обраного автоматичного вимикача

Та плавкий запобіжник з відповідним номіналом

E.Next:	
•	Максимальний струм: 10 А
•	Номінальна частота: 50 Гц
•	Номінальна напруга: 500 В
•	Номінальний струм: 10 А

Табл. 4.6 Характеристики обраного плавкого запобіжника



а)



б)

Рис.4.35 – Загальний вигляд а) автоматичного вимикача та б) плавкого запобіжника

4.2.3 Вимірювальні пристрої

Для розрахункової частини цієї роботи усі дані що були зняті з наданого обладнання вимірювалися універсальними мультиметрами, такими як UT33B+, UT33D+ та Meatrol ME440 (Рис. 4.34 та Рис. 4.35).

Стенд передбачає можливість зняття даних як за допомогою вмонтованих, так зовнішніх приладів виміру



Рис. 4.36 Фото мультиметра UT33D+

					КНУ.РБ.141.21.303-16.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59



Рис. 4.37 – фото Meatrol ME440

Для побудови стенда необхідні:

Вольтметри та амперметри АС/DC, для виміру напруги та струмів
тахометри для виміру обертання валу, та обов'язкові автоматичні
вимикачі АВ (автомат)

У цій роботі рекомендується до використання універсальний цифровий
вольтметр-амперметр АС100/10 (рис 4.36), що полегшить нам орієнтування у
струмі та напрузі для окремих фаз та ліній..



Рис. 4.38 – АС100/10 універсальний

Виміри швидкості будуть здійснюватися тахометром з датчиком Хола
(рис 4.37).

					КНУ.РБ.141.21.303-16.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60



Рис. 4.39 – Тахометр з датчиком Хола

4.3 Проєкт станда

Загалом проєктований стенд має на меті демонстрацію наближеної до справжньої вітрогенеруючої установки з можливістю дослідження різних режимів її роботи. Також стенд має бути як максимально захищеним від аварій та перевантажень, так і забезпечувати безпеку людини яка проводить експерименти. При дослідженні аварійних режимів треба приділяти найбільшу увагу безпеці та завжди мати можливість швидкого знеструмлення установки.

Теоретичний Стенд являє собою майданчик на якій розміщені асинхронний двигун та синхронний генератор вали яких з'єднані муфтою для передачі обертового моменту.

					КНУ.РБ.141.21.303-16.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

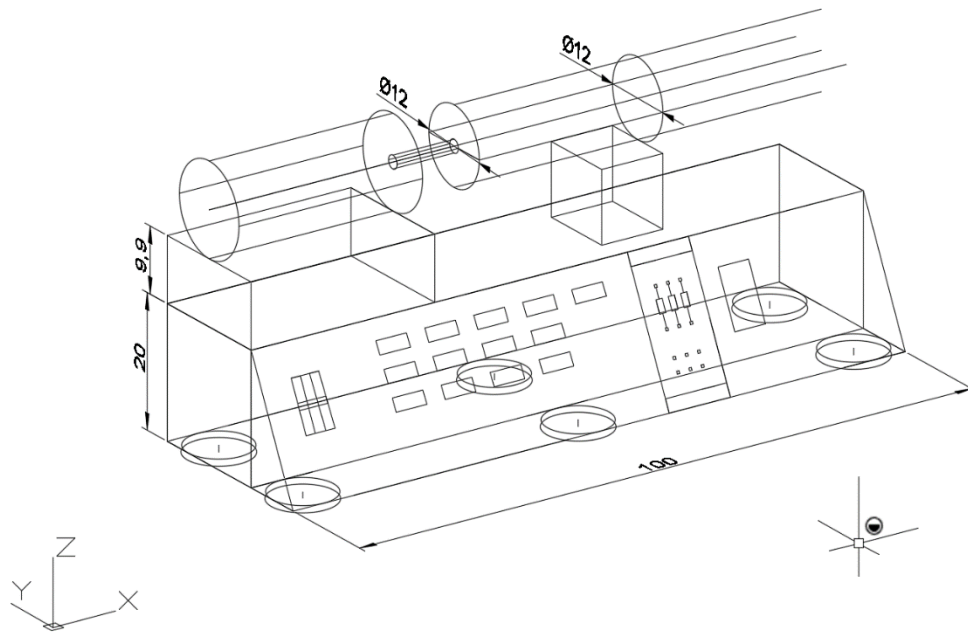


Рис. 4.40 – Загальний вигляд стенда

Під майданчиком для двигуна та генератора знаходиться панель на якій розміщені вище зазначені вольтметри-амперметри для зняття показників напруги та струмів, а також тахометр для виміру швидкості обертання.

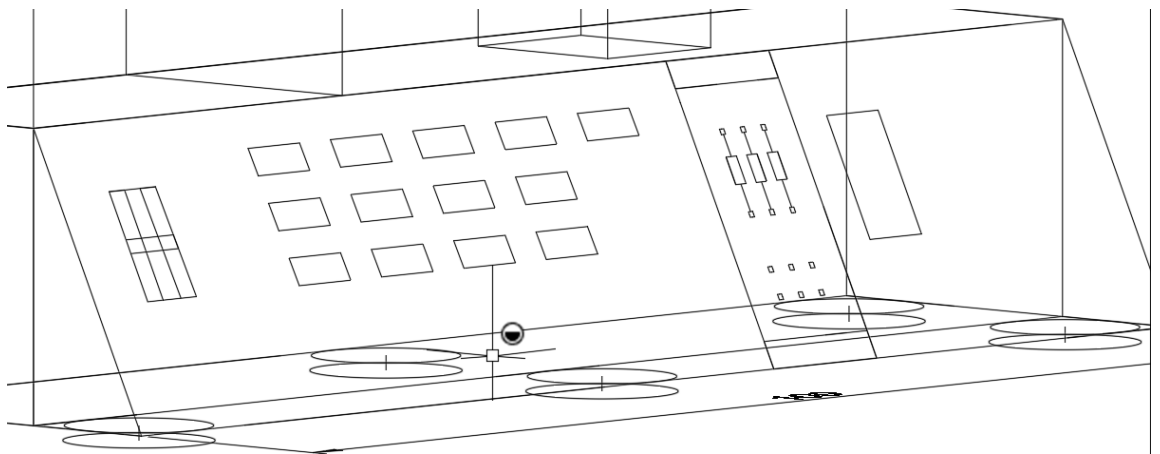


Рис. 4.41 – панель яка пропонується

Біля цієї панелі з датчиками бачимо панель на якій ми маємо можливість встановлювати різні види та номінали навантажень які розміщуються у передбачених для цього роз'ємах. Також нижче планується

надати можливість обирати схему підключення («Зірка» чи «Трикутник») як приклад було розглянуто барно звичайного трьох фазного двигуна.

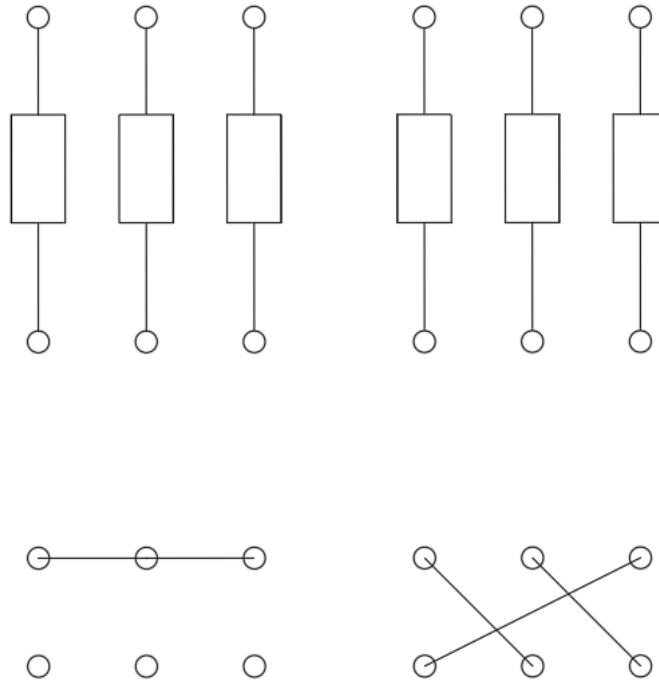


Рис. 4.42 – Приклад підключення як у звичайного трьох фазного двигуна «Зарка» або «Трикутник»

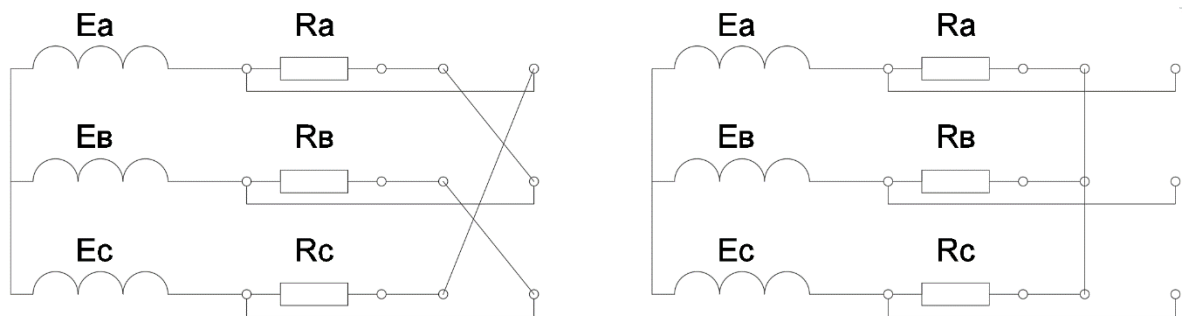


Рис .4.43 – Приклад електричної схеми з'єднання

Висновок за розділом

У цьому розділі було перераховано наявне та запропоноване ще необхідне обладнання для побудови теоретичного стенда. Далі була запропонована певна спрощена структура для теоретичного стенда.

Та завдяки наданим запропонованою структурою можливостям теоретичний стенд дозволяє нам проводити експерименти з різними видами як навантажень, так і швидкості обертання вала генератора. А також завжди відстежувати значення струмів та напруги як фазної, так і лінійної.

					КНУ.РБ.141.21.303-16.Р4	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

Висновок до дипломної роботи

Дана дипломна робота присвячена вивченню питання вітроенергетики, а точніше саме вітрогенеруючої установки.

У ході роботи були вивчені різні статистичні дані щодо стану вітроенергетики у світі та в Україні. Але найголовнішою частиною цієї роботи є розрахунок та проектування теоретичним стенда який буде демонструвати роботу справжньої вітрогенеруючої установки.

За темою роботи був розрахований вплив швидкості обертання валу наданого вітрогенератора на його вихідні дані. Це має на меті продемонструвати вплив швидкості вітру на те як саме змінюються характеристики машини. Звісно у випадку з теоретичним стендом використовувати справжній вітер не є можливим тому робота пропонує імітувати вітер. Його роль виконував асинхронний двигун, а для зміни швидкості його обертання у роботі пропонуємо використовувати перетворювач частоти. Далі за допомогою різного обладнання ми маємо можливість знімати вихідні дані та можемо проводити різні експерименти, звісно не забуваючи про безпеку за планом стенд має бути обладнаний базовим автоматом задля запобігання аварійних ситуацій.

З проведених розрахунків та дослідів було зазначено що вплив обертів на напругу та частоту має суто лінійний характер якщо не враховувати обмеження наданого обладнання. Проте вихідна потужність має вже іншу залежність більш схожу на експоненту.

Також для демонстрації принципів роботи було використано програмне забезпечення Matlab (simulink). Взнявши за основу одну з демонстраційних моделей запропонованих у програмі робота демонструє принципи роботи вітрогенератора з постійними магнітами.

І на насамкінець було запропоновано проєкт стенда як ми собі його уявляємо у плані зовнішнього виду та планування у цілому.

					КНУ.РБ.141.24.303-16.В			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Маловічко Д.В				Висновок до дипломної роботи	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І.І						65	1
Н. Контр.	Пересунько І.І					КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.	Федотов В.О.							

Використана література

1. <https://studfile.net/preview/9708344/page:8/#17>
2. Vitroenergetyka
3. ЕМП_КПddd
4. Глебова, Єгоров, 228М, 2022, pdf
5. ПроектированиеЕМ
6. <https://www.eia.gov/totalenergy/data/browser/index.php?tbl=T10.01#/?f=A&start=2001&end=2023&charted=6-7-8-9-10-12-13-14-15-16>
7. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f8ebe919-c814-4e26-abe1-60e492c23f76/content>
8. АТЛАС ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ Видання друге, оновлене та доповнене За загальною редакцією члена-кореспондента Національної академії наук України Кудрі С.О.
9. Аеродинамічний розрахунок ротора вітроустановки. Studfile: веб сайт.URL: <https://studfile.net/preview/9708344/page:8/#17> (дата звернення).
10. Renewable Energy Production and Consumption by Source. EIA: веб сайт.URL: <https://www.eia.gov/totalenergy/data/browser/index.php?tbl=T10.01#/?f=A&start=2001&end=2023&charted=6-7-8-9-10-12-13-14-15-16> (дата звернення).
11. Теоретичні основи електротехніки - 2: Лабораторний практикум. ЕЛА КРІ: веб сайт.URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f8ebe919-c814-4e26-abe1-60e492c23f76/content> (дата звернення).
12. Вітрова енергетика, переваги та недоліки. Тепла: веб сайт.URL: <https://tepla.com.ua/vitrova-energetika-perevagi-ta-nedoliki/> (дата звернення).
13. Виробництво електроенергії з ВДЕ у 2023 році. SAF Sustainable Agribusiness Forum: веб сайт.URL: <https://saf.org.ua/news/1866/> (дата звернення).
14. Рішення: відновлювана енергетика. Що ще нам дадуть сонце, вітер і вода? Rubryka: веб сайт.URL: <https://rubryka.com/article/renewable-energy/> (дата звернення).

					КНУ.РБ.141.24.303-16.Л			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Список використаних джерел	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив	Маловічко Д.В	Пересунько І.І				66	1	
Перевірів								
Н. Контр.	Пересунько І.І					КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.	Федотов В.О.							

15. Типи вітрових електростанцій (ВЕС) та їх різниця. ІКНЕТ: веб сайт.URL: <https://iknet.com.ua/uk/article/types-of-WPP> (дата звернення).

16. Розрахунок вітрогенератора. ZTU Learn: веб сайт.URL: https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/284297/mod_folder/content/0/%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D1%87%D0%BD%D0%B0%20%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%B0%20%E2%84%964.pdf (дата звернення).

					КНУ . РБ . 141 . 21 . 303 - 16 . Л	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		