

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Електротехнічний факультет

# Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи бакалавра

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»

## Тема роботи:

**Лабораторний стенд «Вітрогенератор» при дослідженні характеристик  
роботи генератора електроенергії при зміні навантаження електричної  
мережі**

Виконав: студент групи ЕЕМ – 20

Андрій ОМЕЛЬЧЕНКО

Керівник випускової 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**

на розрахунково-графічну роботу студента

Омельченко Андрій Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема проекту(роботи): «Лабораторний стенд «Вітрогенератор» при дослідженні характеристик роботи генератора електроенергії при зміні навантаження електричної мережі»

1. Термін подання студентом роботи: 13 червня 2024

2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є створення функціонуючого лабораторного стенду «Вітрогенератор» для дослідження його режимів роботи. Завданням є розрахувати основні параметри вітрогенератора, розробити макет стенду та провести практичні дослідження.

3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити):I. Дослідження загальних тенденцій розвитку вітроенергетики в світі та Україні. II. Розрахунок вітрогенеруючої установки та елементів стенду. III. Моделювання режимів роботи вітрогенератора. IV. Практичні дослідження режимів роботи стенду «Вітрогенератор».

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): I. Розвиток вітроенергетики в світі та Україні. II. Модель елементів вітрогенератора та його зовнішні характеристики. III. Макет стенду «Вітрогенератор» та його елементів. IV. Модель реальної загальної вітроустановки.

## 5. Консультанти підрозділів

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор Пересунько		
II	Ігор Пересунько		
III	Ігор Пересунько		
IV	Ігор Пересунько		

## 6. Календарний план

№	Етап роботи	Термін виконання
1	Ознайомлення з основними принципами та тенденціями вітрової енергетики	30.04.2024
2	Ознайомлення з заданою вітроустановкою та її обладнанням	31.04.2024
3	Аналіз та розрахунок ротора вітрових установок, обґрунтування отриманих результатів	04.05.2024
4	Розрахунок синхронного генератора СГ, встановленого в вітрогенератор, побудова його зовнішніх характеристик	17.05.2024
5	Розробка моделі стенду вітрогенератора	18.05.2024
6	Обґрунтування вибору необхідних елементів для створення лабораторного стенду	25.05.2024
7	Моделювання роботи установки в середовищі MatLab	27.05.2024
8	Практичні дослідження роботи вітроустановки при різних типах навантаження	29.05.2024
9	Аналіз недоліків установки. Обґрунтування шляхів вдосконалення її	02.06.2024

Дата видання завдання: 29.04.2024р

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_

(підпис)

Андрій Омельченко

(прізвище та ініціали)

Керівний роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

Ігор Пересунько

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи бакалавра на тему: «Лабораторний стенд «Вітрогенератор» при дослідженні характеристик роботи генератора електроенергії при зміні навантаження електричної мережі».

**ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18**

**84 с., 68 рис., 11 табл., 26 літературних джерел.**

Мета роботи – проектування та дослідження лабораторного стенду «Вітрогенератор» при зміні навантаження.

В даній кваліфікаційній роботі бакалавра була розрахована та побудована приблизна модель стенду «Вітрогенератора».

В першому розділі розглянута концепція вітрогенеруючих потужностей у світі. Нові перспективи, переваги та недоліки цієї галузі енергетики. Наведені приклади реального використання вітрогенеруючих установок в Україні та світі.

Другий розділ - це безпосередній розрахунок та збір стенду. Представлене вихідне обладнання у вигляді самого вітрогенератора та випрямляча напруги. Підібране необхідне обладнання для стенду, з рекомендації щодо покращення роботи заданого вітрогенератора.

Третій розділ розглядає модель вітрогенератора в програмному забезпеченні MatLab з подальшими тестами при різних значеннях швидкості вітру. Враховується, що модель показує очікування від роботи установки при різних заданих вихідних параметрах.

В четвертому розділі, практичному, наведені результати реальних тестів вітроустановки. Розглянута її робота на трифазне навантаження з відповідними включеннями опорів на виході генератора і на зарядку акумуляторної батареї(АКБ).

**ВІТРОВА УСТАНОВКА, ВІТРОЕНЕРГЕТИКА, РОТОР, СИНХРОННИЙ**

ГЕНЕРАТОР, СТЕНД, МОДЕЛЮВАННЯ					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.Р		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат			
Розробив		Омельченко А.Ю.			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І.І.				5	1
Н. Контр.		Пересунько І.І.			КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.		Федотов В.О.					

## Зміст

Розділ 1	Вітроенергетика в світі та Україні.....	8
1.1	Світовий досвід розвитку вітроенергетики .....	8
1.2	Перспективи та розвиток вітроенергетики в Україні .....	11
1.3	Принцип роботи сучасних вітроустановок .....	15
	Висновок до розділу один .....	16
Розділ 2	Розрахунок стенду вітрогенератора.....	18
2.1	Надане обладнання .....	18
2.2	Розрахунок моделі ротора вітрогенератора.....	22
2.3	Розрахунок синхронного генератора вітрової установки.....	25
2.3.1	Відомості про СГ .....	25
2.3.2	Розрахунок та порівняння головних розмірів СГ .....	26
2.3.3	Розрахунок опорів СГ .....	29
2.3.4	Зовнішні характеристики генератора .....	36
2.4	Вибір обладнання для стенду .....	53
2.4.1	Вибір системи ПЧ-АД .....	54
2.4.2	Вибір елементів навантаження .....	56
2.4.3	Вибір вимірювальних пристроїв та захисту .....	57
2.5	Збір стенду з основних компонентів.....	60
2.6	Можливі способи вдосконалення самої вітроустановки .....	62

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат	
Розробив		Омельченко А.Ю.			Лім.
Перевірів		Пересунько І.І.			Арк.
					Акрушів
					6
					2
Н. Контр.		Пересунько І.І.			КНУ
Затвердж.		Федотов В.О.			гр. ЕЕМ-20

Висновок до розділу два.....	63
Розділ 3 Моделювання вітрогенераючої установки за допомогою програмного забезпечення MatLab.....	66
3.1 Опис використаної моделі Simulink.....	66
3.2 Моделювання різних ситуацій генерації вітроустановки.....	68
Висновок до розділу три.....	72
Розділ 4 Експериментальне дослідження стенду .....	74
4.1 Варіанти підключення навантаження до стенду .....	74
4.2 Робота стенду на різний тип навантаження .....	75
4.2.1 Робота стенду на чисто активне навантаження.....	75
4.2.2 Робота стенду на активно-індуктивне навантаження.....	75
4.3 Робота стенду на заряд АКБ через контролер.....	76
4.4 Робота стенду при різних опорах на кожній з фаз .....	77
Висновок до розділу чотири.....	78
Висновок до дипломної роботи.....	80
Список використаних джерел.....	82

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.3	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Вступ

Вітроенергетика розглядається як одна з відновлювальних джерел енергії(ВДЕ), яка має великий потенціал розвитку. Станом на 2022 рік приріст генеруючих потужностей у світі склав 265 ТВт/год, тобто 14 %, що означає друге місце за темпами розвитку серед усіх видів нетрадиційних джерел енергії. Таким чином, загальна вироблена потужність досягала близько 2100 ТВт/год[1]. Слід зазначити, що така тенденція стрімкого росту спостерігається в 2023 та 2024 роках та прогнозується до 2050 року.

У Європі вітер задовольняє 17% усіх потреб, а в деяких країнах навіть набагато більше: Данія – 55%; Ірландія – 34%; Великобританія – 28%; Португалія – 26%; Німеччина – 26%; Іспанія – 25% [6]. Розвиток даної галузі генерації електроенергії для України є лише питанням часу та визначається особливостями нашого часу – військового конфлікту. Основна перевага надається прибережним типам вітрогенераторів, що обмовлено їх високою ефективністю 30 – 45% та перевагами ВДЕ. Крім того, отримані потужності з ВЕС при такій ефективності тільки в Україні мають більшу енергоефективність, на що вказує значення ринкових цін на 2024 рік: 90.5 євро за 1 МВт/год середньої ціни в порівнянні з 88 євро за 1 МВт/год за енергію з ВЕС. Вітроенергетика не має викидів в атмосферу вуглецю, твердих частинок та інших токсичних сполук, а при поломці або закінченню терміну експлуатації прості в обслуговуванні та мають 80 – 90 % частин доступних для вторинної переробки.

Зважаючи на всі описані нюанси та аргументи, вітроенергетика має великий потенціал розвитку, що обумовлює її домінування серед інших джерел традиційної та нетрадиційної генерації.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.ВС			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив		Омельченко А.Ю.			Вступ	Лім.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І.І.					8	1
Н. Контр.		Пересунько І.І.				КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.		Федотов В.О.						

# Розділ 1

## Вітроенергетика в світі та Україні

### 1.1 Світовий досвід розвитку вітроенергетики

Більша частина виробленої енергії вітрогенераторами, а саме 85%, припадає на країни Європи, США та найбільшого виробника – Китай. Акцент робиться на її дешевизну, простоту та доступність.

На сьогодні перше місце серед країн світу за розвитком та потужностями ВЕС займає Китай, маючи в розпорядженні найбільші вітрові ресурси, більшість з яких розташована в береговій зоні. Тут же працює найбільша в світі ВЕС – Гуаньсу.



Рис.1.1 – Сукупна встановлена потужність вітрової енергії в Китаї з 2014 по 2023 рік[8]

Однак, попри такі значні обсяги потужностей, Китай має частку лише в 8.7 % виробленої енергії з відновлювальних джерел живлення в порівнянні з традиційними[9].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.01			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив		Омельченко А.Ю.			Розділ 1	Лім.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І.І.					9	9
Н. Контр.		Пересунько І.І.				КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.		Федотов В.О.						



Сполучені Штати Америки також певною мірою націлені на перехід з традиційних джерел електроенергії. До 2003 року США були на першому місці серед потужностей ВЕС, після чого їх обігнав Китай. Станом на 2017 рік вітрова енергетика стала головним типом ВДЕ в США, а в таких штатах, як Айова, Канзас та Південна Дакота доля виробленої потужності з ВЕС досягла 29 – 30% [10]. На кінець 2019 року було отримано більше енергії з вітряків, ніж з гідроелектростанцій.

**Table 10.1 Renewable Energy Production and Consumption by Source**

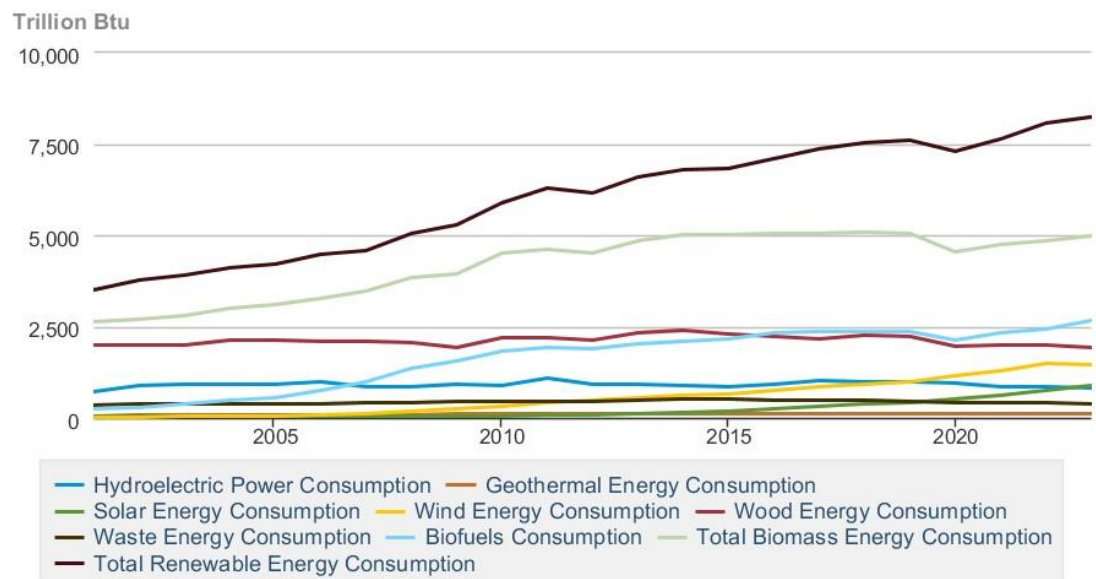


Рис.1.2 – Використання електроенергії від різних типів генерації в США[27]

За останніми дослідженнями, вітроенергетику США випереджає лише біопаливна галузь енергетики, яка достатньо розвинута в США.

На сьогодні країни Європи досягли найбільших результатів у сфері ВЕС і націлені на подальший повний перехід лише на нетрадиційні джерела електричної енергії, з часткою останніх в 80% і більше. Лідерами є Данія (56%) та Ірландія (36%), далі по черзі Німеччина (31%), Великобританія (29%), Нідерланди та Іспанія ( по 27%), Швеція та Португалія(по 26%), Литва (21%) та Греція (20%) відповідно[11].

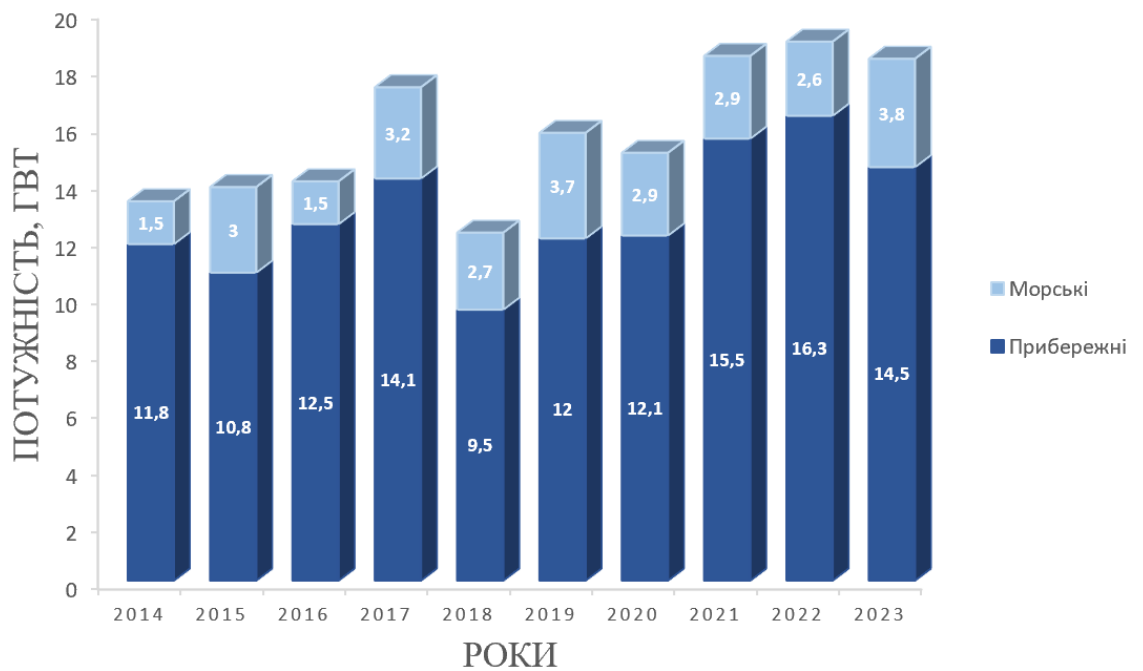


Рис.1.3 – Встановлення нових ВЕС Європи на суші та в морі, темно-синій колір – прибережні, світло синій – морські [11]

Причому найбільші тенденції розвитку та інвестицій вітроенергетики спостерігаються Німеччині.

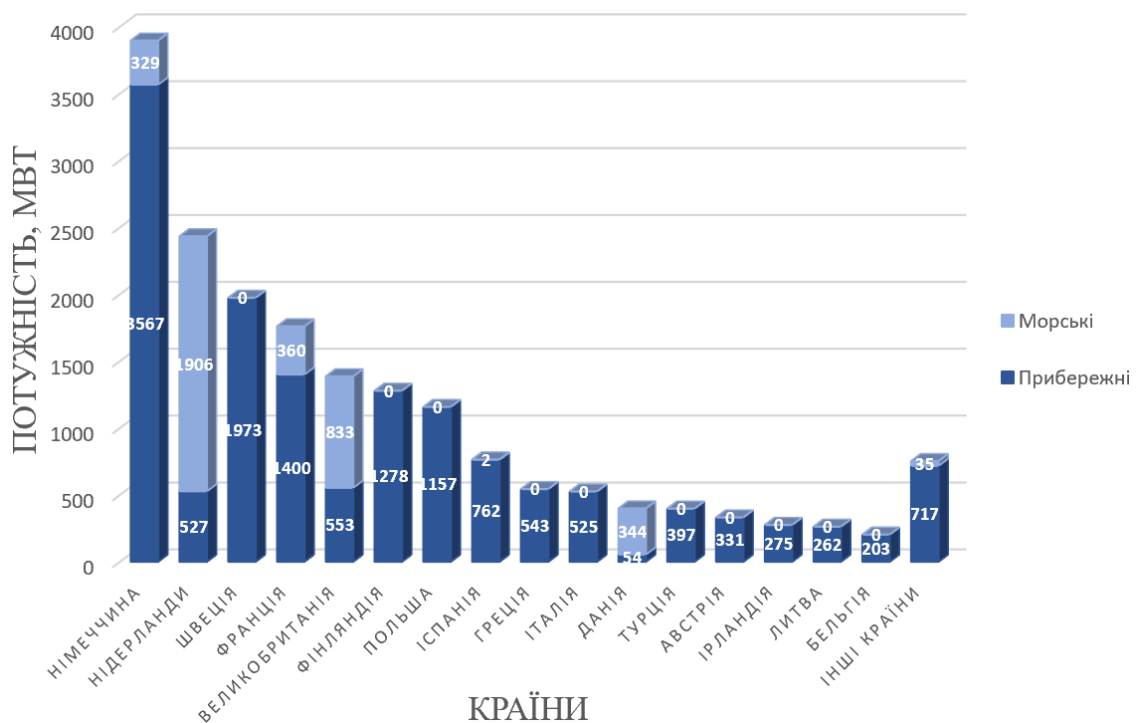


Рис.1.4 – Встановлення нових ВЕС для країн Європи на суші та в морі[11]

Очікується, що ЄС встановить додаткові вітроенергетичні потужності на 200 ГВт протягом 2024 – 2030 років (по 29 ГВт на рік). Для досягнення своїх

поставлених кліматичних та енергетичних цілей на 2030 рік, ЄС має будувати ВЕС потужністю по 33 ГВт на рік.

## 1.2 Перспективи та розвиток вітроенергетики в Україні

Україна активно нарощує свій розвиток альтернативних джерел енергії. За даними Міністерства енергетики України частка генерації ТЕС з 2016 по 2022 роки скоротилася на 5% з 32,2% до 27,2%. Сьогоднішні дані по розвитку ВДЕ відсутні через російсько-український збройний конфлікт.

Згідно інформації Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, на початок 2021 року загальна потужність ВДЕ зросла на 278,4 МВт[12].

Загалом тенденцію розвитку ВДЕ України можна показати наступною діаграмою.

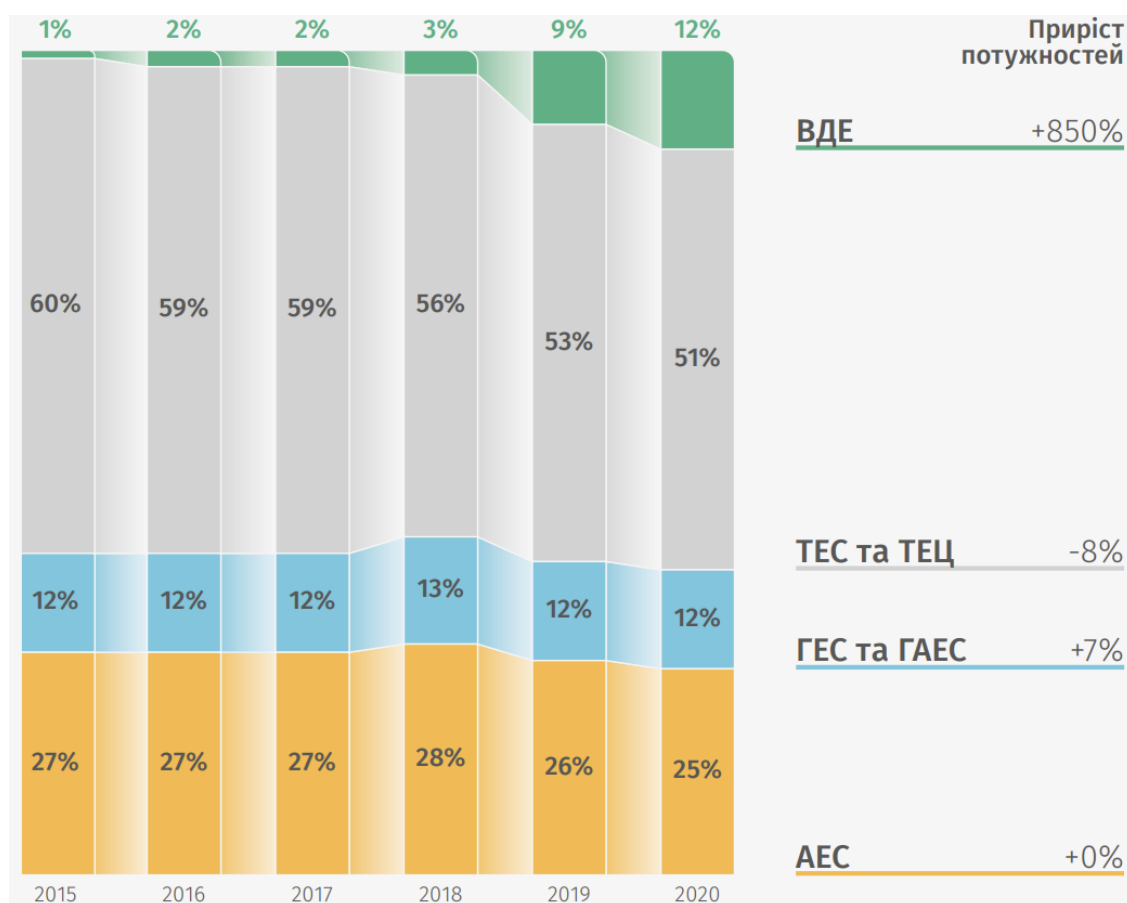


Рис 1.5 – Зміни долі виробництва електроенергії для різних видів електростанцій[13]

Приріст потужностей ВДЕ в 850 відсотків пояснюється збільшенням споживання електроенергії кожного року, побудовою нових генеруючих установок та скорочення, але не відмова, від ТЕС та ТЕЦ.

Розподіл генеруючих потужностей для сонячних та вітрових електростанцій виглядає наступним чином: більша перевага надається сонячним електростанціям, що обмовлено специфікою використання та місцями концентрації вітряків та вітрових ресурсів України.

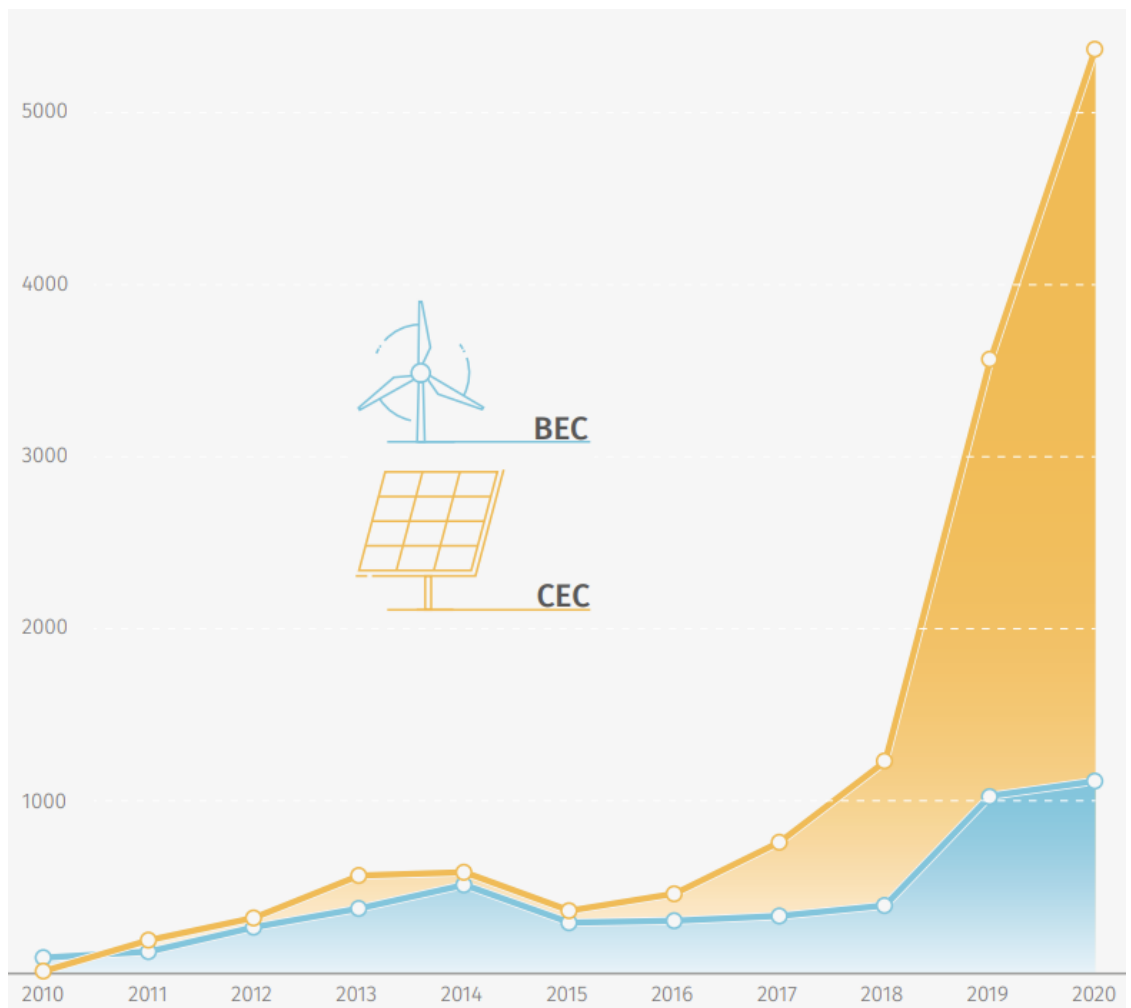


Рис. 1.6 – Співвідношення ВЕС та СЕС[13]

Причому, Україна має в розпорядженні як прибережну зону для будівництва морських вітряків, так і берегових. Маються на увазі прибережні зони Чорного і Азовського морів, Крим та невелику частину Карпатських гір. Саме в цих районах швидкість вітру дозволяє стабільно та з максимальною ефективністю використовувати ВСЕ.

Ці зони чітко видно на карті середньорічної швидкості вітру.



Рис. 1.7 – Середньорічна швидкість вітру по Україні[14]

Якщо порівняти карти розташування усіх ВЕС та кліматичну карту, можна побачити взаємозв'язок між ними, однак розвиток прибережних типів ВЕС в нашій державі ускладнюється військовим конфліктом з 2022 року.



Рис. 1.8 – Карта розташування ВЕС України[18]

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Найпотужніші ВЕС України представлені в наступній таблиці(19).

Назва ВЕС	Розташування	Встановлена потужність, МВт	Загальна кількість встановлених турбін	Рік введення в експлуатацію
Ботієвська ВЕС	с. Ботієво, Запорізька область	200	64	64
Приморська ВЕС	селі Борисівка Запорізька область	200	52	2019
Мирненська ВЕС	Мирненської об'єднана територіальна громада, Херсонська область	163	35	2019
Орлівська ВЕС	Приморський район, Запорізька область	100	26	2019
Новотроїцька ВЕС	Новотроїцький район, Херсонська область	72.6	12	2019
Овер'янівська ВЕС	Генічеський район,	68,4	20	2019

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.01

Арк.

14

	Херсонської області			
Новоазовську ВЕС	Новоазовський район, Донецька область.	80	23	2011

Табл.1.1 – Найпотужніші ВЕС України [19].

### 1.3 Принцип роботи сучасних вітроустановок

Принцип дії вітроустановки майже нічим не відрізняється від більшості інших способів отримання електричної енергії, лише силою, яка є початковим джерелом енергії. Кожна установка має від двох і більше лопастей, які мають спільну точку в центрі деякої окружності та кріпляться до горизонтальної осі ротора. Окремих випадках, тобто побутових вітрогенераторах малої потужності, осі обертання лопастей та ротора вертикальні. На наступному рисунку наведені можливі типи роторів вітрогенератора [20]:

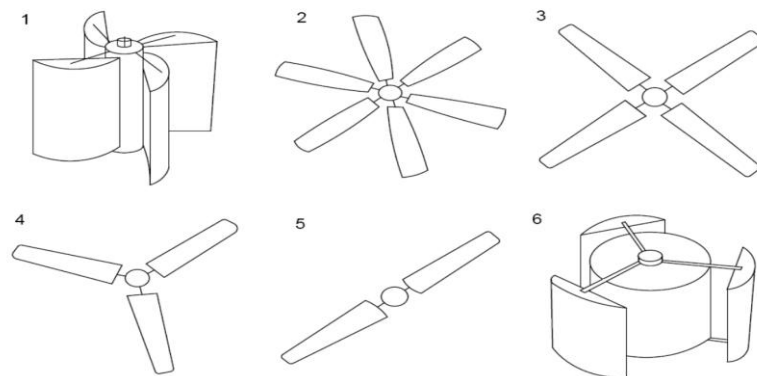


Рис. 1.19. – Типи вітродвигунів: 2 –5 – вітродвигуни з горизонтальною віссю обертання (крильчасті); 1, 6 – вітродвигуни з вертикальною віссю обертання (карусельні: лопатеві (1) і ортогональні (6))



Рис.1.10 – Вигляд сучасної вітрогенеруючої установки [17]

Потік повітря, який рухається з деякою швидкістю, тиснучи на лопасті, змушує останні обертатися з пропорційною швидкістю. В свою чергу, такої ж швидкості набуває і ротор. Далі у великих промислових вітряках знаходиться так званий мультиплікатор, редуктор, який збільшує чи зменшує початкову швидкість обертання ротору. Наявність такого елемента напряму залежить від потужності, типу та марки вітрогенератора. Отримана швидкість на одному із останніх етапів досягає електричного двигуна, який може представляти собою як асинхронну, так і синхронну машини. Далі іде процес перетворення кінетичної енергії на електричну, однак зміну вітру не можливо контролювати, через це генератор видає «брудну», за нормами, електроенергію з стрибкоподібною частотою, коливаннями напруги, гармоніками тощо. Такі перепади виправляють за допомогою декількох ступенів перетворення з змінного на постійний та назад в змінний струм або створюється мультиплікатор, який може регулювати коефіцієнт свого підсилення та підлаштовуватися під кожну швидкість вітру. Крім того самі лопасті та вся верхня конструкція вітрогенератора спроможна повертатися в оптимальному напрямку до вітру, що збільшує діапазон регулювання.

### Висновок до розділу один

Вітроенергетика має великий потенціал розвитку в Україні та світі. Значних успіхів в розробці та введені в експлуатацію вітрових турбін досягли Китай, країни Європейського союзу та Сполучені Штати Америки. Станом на

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.01	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



2023 рік генеруючі потужності досягли 500 ГВт, 85 % з яких належать Китаю. Європейський союз має стратегію переходу на відновлювальні джерела електроенергії до 2030 – 2050 років, з метою скорочення викидів в атмосферу шкідливих речовин.

Розвиток вітроенергетики в Україні лише питання часу. Маючи значні потенціали в прибережних зонах та на Закарпатті, будівництво нових потужностей обмежено лише нестабільною ситуацією в нашому регіоні. Це досить добре помітно на графіку потужностей вироблених за допомогою вітра та Сонця, де останнє випереджає в декілька разів, у зв'язку з кліматичними умовами нашої держави.

В цілому, вітроенергетику можна розглядати, як одну з найперспективніших галузей ВДЕ, на рівні атомних та гідроелектростанцій.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.01	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Розділ 2 Розрахунок стенду вітрогенератора

### 2.1 Надане обладнання

Усі розрахунки та збір стенду головним чином опираються на базове обладнання що використовується. В даній дипломній роботі ним виступає вітрогенератор китайського походження з наступними параметрами за виробником[26]:

- Номінальна потужність: 400 Вт
- Максимальна потужність: 410Вт
- Номінальна напруга: 24В
- Мінімальна швидкість вітру: 2м/с
- Номінальна швидкість вітру: 13м/с
- Максимальна швидкість вітру: 50м/с
- Вага: 6,8 кг
- Кількість лопатей: 5
- Матеріал лопатей: нейлон
- Матеріал корпусу: алюміній
- Метод гальмування: електромагнітний
- Регулювання напрямку вітру: автоматичне

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив	Омельченко А.Ю.				Розділ 2	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевірів	Пересунько І.І.						18	46
Н. Контр.	Пересунько І.І.					КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.	Федотов В.О.							

Фото реальної вітроустановки з мачтою представлені на рисунку 2.11.



Рис.2.11 – Вигляд тестової вітроустановки

Розміри захисного корпусу генератора та конусу зображені відповідно на рисунку 2.12(а та б).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)

б)

Рис.2.12 – Вигляд та розміри з права на ліво: а) корпусу СГ та б) захисного конусу

Можливість установки підлаштовуватися під будь-який напрямок вітру забезпечується наявністю ковзаючого контакту в самому корпусі, що достатньо зручно, але такий технічний підхід потребує додаткового обслуговування.



Рис.2.13 – Щітковий ковзкий контакт

Також в комплект входить власний контролер, який має три входи та два виходи: трифазний вхід від генератора в контролер та виводи постійної напруги на акумуляторну батарею АКБ від контролера. Контролер представляє собою випрямляч, з контролем зарядки батареї, індикатором стану роботи установки та можливістю електромагнітного гальмування самої установки(рис 2.14).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Охолодження забезпечується сталевим радіатором, що кріпиться на стінку самого контролера.

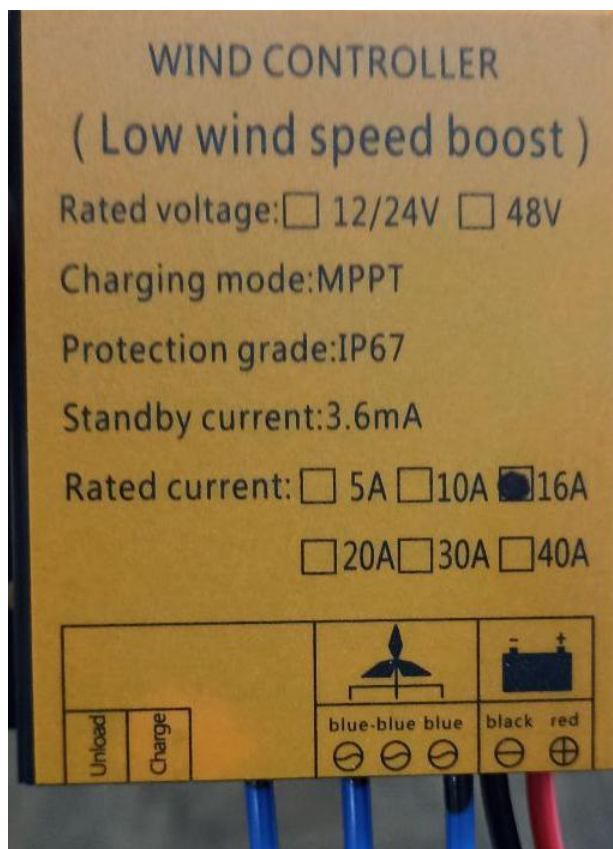


Рис.2.14 – Комплектний контролер для підключення вітроустановки до АКБ

Така установка при підключенні усіх елементів може бути використана для підзарядки наступного АКБ(рис 2.15) з'єднаних паралельно з 4 елементів:



Рис.2.15 – Вигляд АКБ для тестів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21



## 2.2 Розрахунок моделі ротора вітрогенератора

Розглянутий нижче розрахунок параметрів ротора здійснений за літературою [21] та [22].

Перетворення енергії вітру в момент на валу генератора здійснюється за допомогою ротора. У випадку крильчастого типу ротора він представляє собою жорстку конструкцію з двох і більше лопастей, які мають спільну точку з'єднання в центрі описуючого ними кола. Реальний ротор та його модель даного вітрогенератора показані на рисунках 2.16 (а та б) та 2.17 з відповідними розмірами окремих частин.

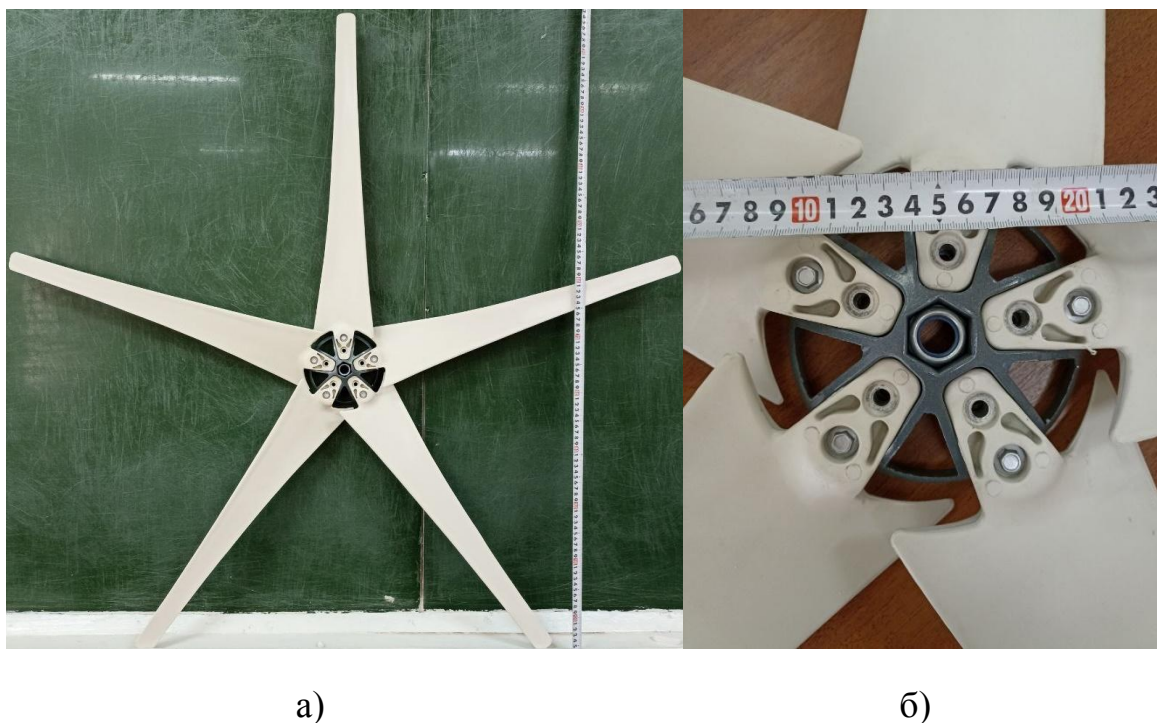


Рис.2.16 – Розміри ротора вітроустановки: а) повний та б) центрального кільця

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

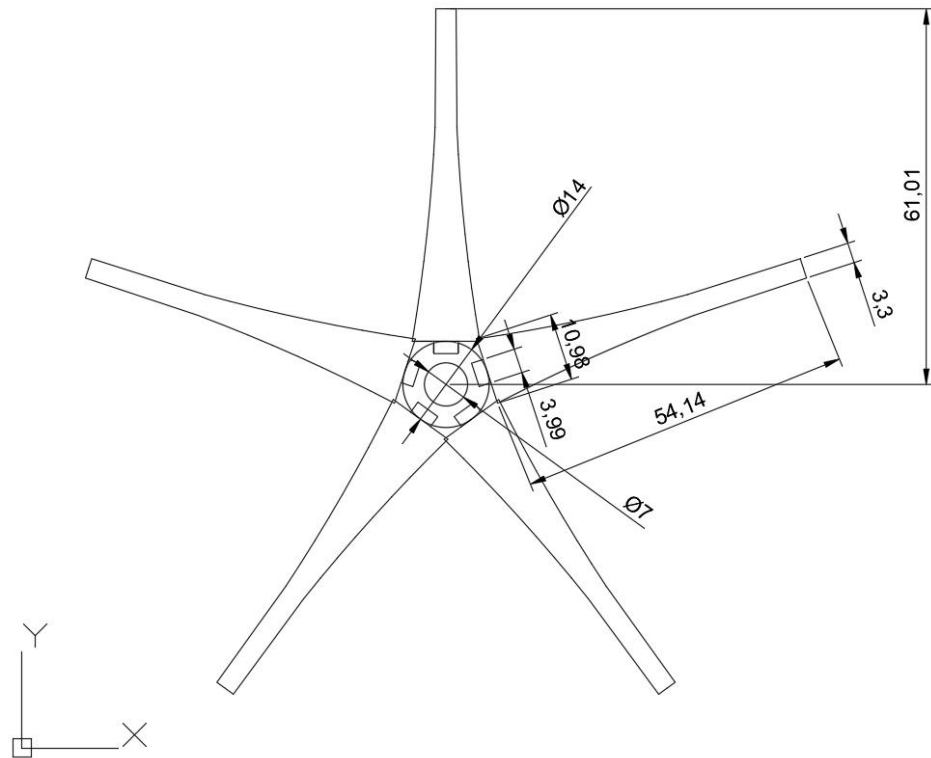


Рис.2.17 – Креслення ротора у програмному забезпеченні AutoCad

Охоплювана площа такого ротора знаходиться за наступною формулою:

$$S = \pi \cdot R_{12}^2, \quad (2.1)$$

Де  $R_{12}$  – ефективний радіус ротора від центра осі обертання до кінця лопастей.

Приймається, що через дану площину проходить потік повітря, що віддає частину своєї кінетичної енергії. Припускається, що маса виражається пройденим об'ємом повітря з певною густиною за 1с часу:

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

де  $v_{\text{пов}}$  – швидкість повітряного потоку,  $\frac{\text{м}}{\text{с}}$ ;

$m_{\text{пов}}$  – маса повітря за 1с через площину  $S$  зі швидкістю  $v_{\text{пов}}$ ,  $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ;

$\rho_{\text{пов}}$  – густина повітря,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ;

$S$  – площа, через яку проходить даний об'єм повітря,  $\text{м}^2$ .

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
							23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Маємо наступне рівняння енергії вітрового потоку:

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

де  $E_{\text{к.пов}}$  – кінетична енергія повітря, що проходить через площину  $S$  зі швидкістю  $v_{\text{пов}}$ .

Враховуючи, що маса повітря визначається як  $p_{\text{пов}} \cdot S \cdot v_{\text{пов}}$ , можна припустити, що:

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

При цьому значення маси повітря настільки мале, що :

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

З рівняння потужності вітроустановки, якщо взяти від зворотного, можна визначити, при якій швидкості вітру дана вітрова установка буде генерувати номінальні 400 Вт:

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

$$v_{\text{пов}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P_{\text{уст}}}{k \cdot p_{\text{пов}} \cdot \xi \cdot S'}} \quad (2.6)$$

де  $P_{\text{уст}}$  – значення вихідної потужності установки при номінальному режимі роботи;

$k$  – коефіцієнт узгодження системних одиниць виміру, для розрахунку в СІ рівний  $\frac{1}{102}$ .

$\xi$  – коефіцієнт потужності ротора, відношення енергії вітрового потоку, до енергії, що сприймається ротором; для ідеального ротора 0,593, приймається 0.35.

Щодо мультиплікатора, то він не використовується в малопотужних моделях вітрових установок. Але для стенду можливе його використання при переході з валу двигуна на вал генератора.

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
							24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			



## 2.3 Розрахунок синхронного генератора вітрової установки

### 2.3.1 Відомості про СГ

Синхронний генератор даної вітроустановки представляє собою конструкцію з нерухомими обмотками в статорі, з'єднаними схемою зірка та 12 постійними магнітами, вмонтованими в рухомий ротор (рис 2.18).



а)

б)

Рис.2.18 – Розміри окремих частин головного корпусу: а) загальний вигляд головного корпусу та знятого СГ; б) статор з обмоткою та ротор з магнітами.

Розраховуючи синхронний генератор (СГ) маємо наступні вихідні дані:

1. число фаз генератора  $m = 3$ ;
2. номінальна активна потужність, що віддається генератором у мережу  $P_{\text{ном}} = 0.4 \text{ кВт}$ ;
3. номінальний коефіцієнт потужності  $\cos(\varphi)_{\text{ном}} = 0.8$ ;
4. номінальна лінійна напруга генератора  $U_{\text{ном}} = 24 \text{ В}$
5. номінальна частота  $f_{\text{ном}} = 50 \text{ Гц}$ ;
6. номінальна частота обертання  $n = 500 \text{ об/хв}$ .

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 2.3.2 Розрахунок та порівняння головних розмірів СГ

Розрахунок береться з досліджень [23], [24], [25]. Причому матеріали [23] та [24] мають деяку розбіжність в способах обчислення окремих величин, тому усі формули додатково порівнювались та комбінувались за допомогою іншого джерела [25].

Для співставлення розрахункових та реальних значень, спочатку розрахуємо габарити, які повинен мати СГ. За формулою машинної постійної Арнольда  $C_A$  знаходяться діаметр магнітопроводу статора  $D_{СТ}$  та осьова довжина повітряного зазору  $l_{\delta}$  [23]:

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

де  $n_{НОМ}$  - ;

$S_{РОЗ}$  – розрахункове значення ефективної площі вітроустановки;

$\alpha_{\delta}$  – коефіцієнт полюсного перекриття машини, приймається рівним близько 0.6;

$k_{\Phi}$  – коефіцієнт форми поля, приймається рівним 1.11 ;

$k_{об}$  – коефіцієнт обмотки статора, зазвичай приймається 0.92;

$B_{\delta}$  – значення максимальної магнітної індукції в повітряному зазорі між статором та ротором машини, рекомендується брати 0.8 Тл;

$A_{СН}$  – навантаження статора лінійне, рекомендується брати близько  $22000 \frac{А}{м}$ .

Розрахункова повна потужність СГ для номінального режиму знаходиться за наступною формулою:

$$S_{РОЗ} = \frac{k_E \cdot P_{НОМ}}{\cos(\varphi)_{НОМ}}, \quad (2.8)$$

де  $k_E$  – коефіцієнт ЕРС, відношення якірної ЕРС до напруги при номінальному режимі, попередньо 1;

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
							26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$\cos(\varphi)_{\text{ном}}$  – коефіцієнт потужності, який встановлений на рівні 0.8.

Між головними розмірами машини встановлюється деяка залежність  $\lambda$ :

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

де  $\tau$  – полюсна поділлка, яку можна представити як:

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

Тоді коефіцієнт  $\lambda$  можна переписати як:

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

Сам коефіцієнт підбирається за наступним графіком:

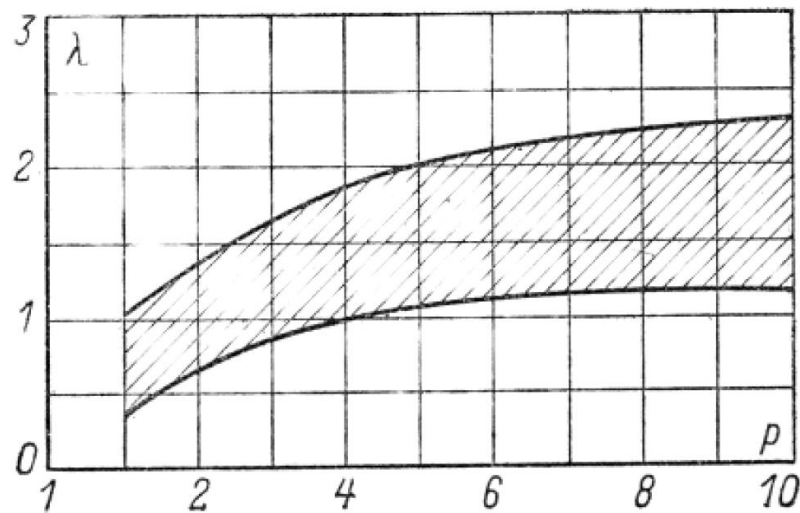


Рис. 2.19 – Графік визначення коефіцієнта  $\lambda$  в залежності від числа пар полюсів

Підставивши отримані вирази в формулу машинної постійної Арнольда 22222 виражаємо значення діаметру магнітопроводу статора  $D_{\text{ст}}$  та осьову довжину повітряного зазору  $l_{\delta}$  [23]:

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

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

У подальшому для точних розрахунків саме заданого генератора, будуть використовуватися зняті показники реального СГ.

Розрахуємо необхідні значення, підставивши дані у раніше задані формули:

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

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

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

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

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

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

Порівняльна таблиця головних розмірів СГ:

	Розраховані	Реальні
Діаметр магнітопроводу статора $D_{\text{ст}}$ , м	0.118	0.11
Осьова довжина повітряного зазору $l_{\delta}$ , м	0.04	0.037

Табл. 2.2 – Порівняння розрахункових та реальних головних розмірів СГ

Відхилення значень обов'язково має бути, адже розрахунок вівся для ідеального СГ, з максимально наближеними реальними значеннями. До того ж будова самого реального СГ має деякі не точності.

### 2.3.3 Розрахунок опорів СГ

Перед розрахунком опорів СГ та побудовою необхідних характеристик слід уточнити ряд значень, які використовуються в подальших розрахунках.

Полюсна поділлка[24]:

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

Величина магнітного потоку полюсу при роботі в режимі холостого ходу Х.Х.:

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

Значення фазної напруги та індукованої ЕРС при Х.Х. [23]:

$$U_{\phi.н.} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} \quad (2.16)$$

$$E_0 = k_E \cdot U_{\phi.н.} \quad (2.17)$$

З отриманих значень можна знайти кількість витків у одній фазі обмотки статора:

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

Знаючи фазну напругу, активну потужність установки та коефіцієнт потужності, знаходимо номінальне значення фазного струму:

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

Активний опір якоря синхронного генератора знаходимо за наступним виразом[24]:

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

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $l_{\text{сер}}$  – середнє значення одного витка, як подвійна сума осьової довжини статора та лобової довжини обмотки, для даного генератора рівна 0.128 м;

$q_{\text{ел}}$  – поперечний переріз провідника в обмотці статора, для даного типу СГ 0.2 мм<sup>2</sup>;

$\rho_{\text{Cu}}$  – питомий опір міді при 20° С –  $1.75 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;

$k_T$  – температурний коефіцієнт опору, визначається як 1.22.

Причому значення  $l_{\text{сер}}$  та  $q_{\text{ел}}$  відомі з розбірки вітрової установки.

Індуктивний опір розсіювання СГ [25]:

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

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

Для їх розрахунку необхідно знати ряд значень розмірів пазу СГ та провідника вкладеного в нього. Сам паз виконаний по типу напівзакритий і виглядає наступним чином:

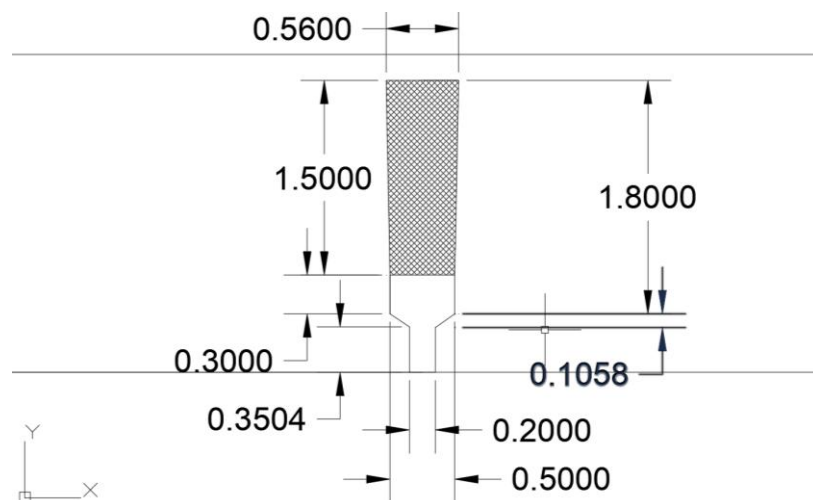


Рис. 2.20 – Вигляд пазу статора СГ в програмному забезпеченні AutoCad

Наступні параметри визначені для розрахунку:

$h_1$  – довжина скосу пазу, 1мм;

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
							30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$h_2$  – довжина від кінця займаної площини провідника до початку скосу, 3 мм;

$h_3$  – довжина займаного проміжку пазу провідником, 1.5 см;

$b$  – загальна ширина пазу якоря, 5 мм;

$b_{ш}$  – ширина вхідного отвору для пазу, 2 мм;

$h_{ш}$  – довжина від кінця внутрішнього радіусу статора, до початку скоса пазу, 0.75 мм;

$l_{лоб}$  – лобова довжина одного витку обмотки статора СГ, 0.05 м;

$\delta$  – величина повітряного зазору між статором і ротором, 2 мм;

$\beta_{ст}$  – коефіцієнт шагу обмотки статора, приймається у межах від 0.8 до 0.86(0.8).

Відповідно можна знайти значення коефіцієнтів магнітної провідності[23]:

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

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

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

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

$k_{\beta}$  та  $k_{\beta}'$  - деякі коефіцієнти для визначення коефіцієнту магнітної провідності пазового розсіювання:

$t_z$  – зубцевий поділок внутрішнього кола якоря;

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

$k_{\delta}$  – коефіцієнт, що визначає повітряний зазор.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнти  $k_\beta$  та  $k_\beta'$  визначаються:

$$k_\beta' = 0.25 \cdot (3 \cdot \beta + 1) \quad (2.25)$$

$$k_\beta = 0.25 \cdot (3 \cdot k_\beta' + 1) \quad (2.26)$$

Зубцевий поділок внутрішнього кола якоря  $t_z$ :

$$t_z = \frac{\pi \cdot D_{ст}}{N}, \quad (2.27)$$

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

Коефіцієнт повітряного зазору[1]:

$$k_\delta = \frac{t_z}{t_z - y \cdot \delta} \quad (2.28)$$

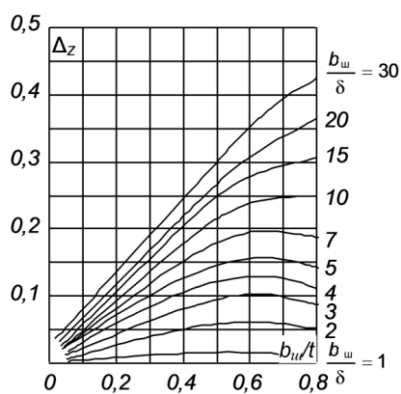
$$y = \frac{\left(\frac{b_{ш}}{\delta}\right)^2}{5 + b_{ш} \cdot \delta} \quad (2.29)$$

Значення параметру  $\xi_{ст}$  за формулою:

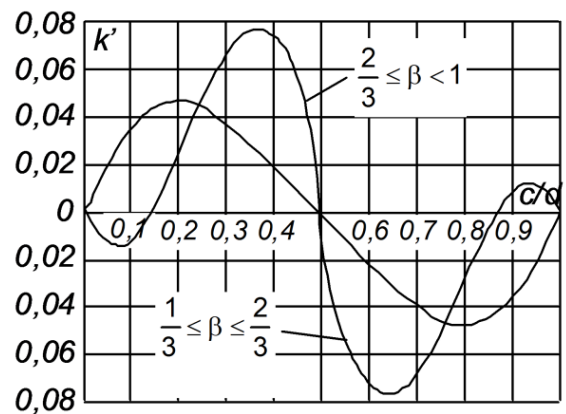
$$\xi_{ст} = k'' \cdot q^2 + 2k''_\beta - \frac{k'}{q} - k_{об} \cdot \left(\frac{1}{d^2} + \Delta_z\right), \quad (2.30)$$

де  $d$  – знаменник дробового числа при значенні  $q$ ;

$k''$ ,  $k'$ ,  $k''_\beta$  і  $\Delta_z$  – коефіцієнти, що визначаються за графіками.



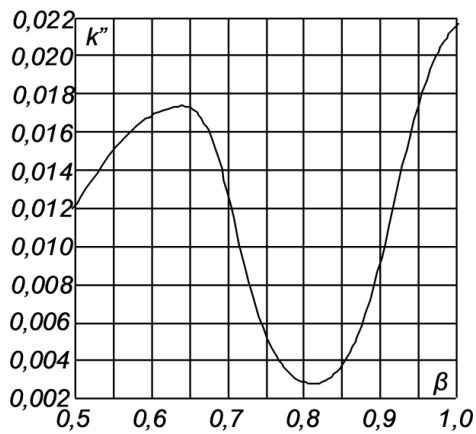
а)



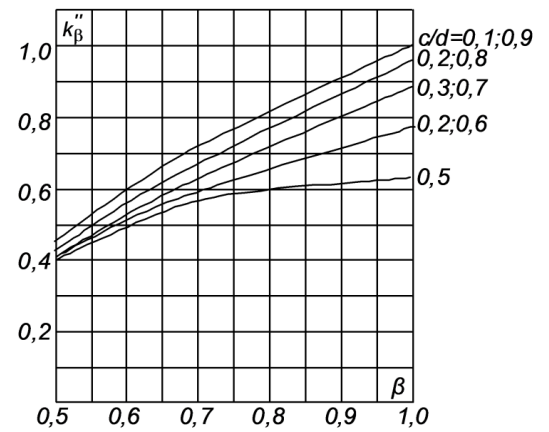
б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
------	------	----------	--------	------





в)



г)

Рис. 2.21 – Графіки визначення коефіцієнтів: а)  $\Delta_z$ , б)  $k'$ , в)  $k''$ , г)  $k''_\beta$ .

Головні індуктивні опори даного СГ по повздовжній та поперечній осям пропонується розрахувати за наступними виразами[24]:

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

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

де  $\Lambda_{ad}$  – коефіцієнт провідності СГ по повздовжній осі;

$\Lambda_{aq}$  – коефіцієнт провідності СГ по поперечній осі;

$\mu_0$  – магнітна стала або магнітна проникність вакууму, в СІ рівна  $1.2566 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ .

Через  $\Lambda_{ad}$  та  $\Lambda_{aq}$  позначаються магнітні провідності генератора по повздовжній та поперечній осях. Їх знаходимо за наступними виразами[25]:

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

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

де  $k_{\text{фпз}}$  – коефіцієнт, що характеризує форму поля збудження, 1.1;

$k_{ad}$  – реакція якоря по повздовжній вісі;

$\Lambda_{\delta d}$  – магнітна провідності повітряного зазору повздовжньої осі;

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\Lambda_{nd}$  – магнітна провідності полюса в повздовжньому напрямку;

$k_{aq}$  – реакція якоря по поперечній вісі;

$\Lambda_{\delta q}$  – магнітної провідності повітряного зазору поперечній осі;

$\Lambda_{nq}$  – магнітна провідності полюса в поперечному напрямку.

Для визначення необхідних невідомих використовувалися наступні формули:

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

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

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

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

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

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

де  $\delta_p$  – довжина силової лінії у зазорі, визначається за формулою:

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

Повні ж значення індуктивних опорів по поперечній та повздовжній осях дорівнюють[25]:

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

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

Проводимо розрахунки вище зазначених параметрів:

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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

$$U_{\phi.H.} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{24}{\sqrt{3}} = 13.856 \text{ В}$$

$$E_0 = k_E \cdot U_{\phi.H.} = 1 \cdot 13.856 = 13.856 \text{ В}$$

$$W_{\phi} = \frac{E_0}{4 \cdot k_E \cdot k_{o6} \cdot f_{HOM} \cdot \Phi_{\delta 0}} = \frac{13.856}{4 \cdot 1 \cdot 0.92 \cdot 50 \cdot 6.001 \cdot 10^{-4}} = 113.056 \text{ ШТ}$$

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

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

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

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

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

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

$$\xi_{CT} = k'' \cdot q^2 + 2k''_{\beta} - \frac{k'}{q} - k_{o6} \cdot \left( \frac{1}{d^2} + \Delta_z \right) = 0.003 \cdot 1.25^2 + 2 \cdot 0.75 - \frac{0.045}{1.25} - 0.92 \cdot \left( \frac{1}{4^2} + 0.01 \right) = 1.402$$

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

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

$$\lambda_{II} = \frac{t_z}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi_{CT} = \frac{0.012}{12 \cdot 0.002 \cdot 1.036} \cdot 1.402 = 0.656$$

										Арк.
										35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02					

$$X_{\sigma} = 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{f}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{\pi} + \lambda_{\lambda} + \lambda_{\mu}) = 15.8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{50}{100}\right)^2 \cdot \frac{0.04}{6 \cdot 2} \cdot (2 + 0.36 + 0.656) = 0.102 \text{ Ом}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 2.3.4 Зовнішні характеристики генератора

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Зовнішні характеристики генератора представляються собою залежності лінійних напруги від струму. Таким чином, можна спрогнозувати, які значення навантажень краще всього брати для дослідів, щоб не тільки мінімізувати шанс несприятливо-аварійних ситуацій, а й зняти та якісно порівняти отримані та розрахункові значення.

Навантаження стенду обирається декількох типів: чисто активне та активно – індуктивне. Тому для усіх варіантів необхідно розрахувати зовнішні характеристики.

Значення коефіцієнта потужності напряду залежить від типу навантаження, що буде враховуватися у розрахунках.

Кожне розраховане значення буде заводитися в таблицю, окрему для кожного дослідів. Для наочності графіки кожної таблиці будуть окремі, а для порівняння вкінці розміщені на одній координатній площині.

Необхідні розрахункові формули для побудови зовнішніх характеристик наведені нижче.

Значення реактивного опору навантаження  $X_{\text{нав}}$  через активний опір  $R_{\text{нав}}$  та коефіцієнт потужності  $\text{tg}(\varphi)_{\text{нав}}$  [23]:

$$X_{\text{нав}} = R_{\text{нав}} \cdot \text{tg}(\varphi)_{\text{нав}} \quad (2.44)$$

При розрахунках будуть задаватися як значення активного, так і реактивного опорів.

Параметри А, В, С та D для комфортного розрахунку:

$$A = -\frac{E_{f0}}{I_{d0}} \quad (2.45)$$

$$B = E_{f0} \quad (2.46)$$

$$C = \frac{(R_{\text{нав}} + R)^2}{X_{\text{нав}} + X_q} + X_{\text{нав}} + X_d \quad (2.47)$$

$$D = \frac{(X_{\text{нав}} + X_d)(X_{\text{нав}} + X_q)}{R_{\text{нав}} + R} + R_{\text{нав}} + R \quad (2.48)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Струми поперечної і повздовжньої осей та ЕРС збудження:

$$I_d = \frac{B}{C - A} \quad (2.49)$$

$$E_f = A \cdot I_d + B \quad (2.50)$$

$$I_q = \frac{E_f}{D} \quad (2.51)$$

Поперечна та повздовжня отримувані напруги:

$$U_d = I_d \cdot R_{\text{наб}} - I_q \cdot X_{\text{наб}} \quad (2.52)$$

$$U_q = I_d \cdot X_{\text{наб}} + I_q \cdot R_{\text{наб}} \quad (2.53)$$

Результуючі струм та напругу знаходимо як квадратний корінь із суми квадратів складових поперечної та повздовжньої осей:

$$U_{\text{рез}} = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (2.54)$$

$$I_{\text{рез}} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (2.55)$$

Підставивши усі значення в формули 2.2 2.2 можна вивести залежність фазних струму та напруги від різних значень навантаження:

$$U_{\text{ф.рез}} = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (2.56)$$

$$I_{\text{ф.рез}} = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (2.57)$$

Оскільки з'єднання виконано схемою «Зірка», то фазний струм рівний лінійному, а отримане фазне значення напруги можна конвертувати в лінійне безпосереднім помноженням на квадратний корінь з 3:

$$U_{\text{л.рез}} = U_{\text{ф.рез}} \cdot \sqrt{3} \quad (2.58)$$

$$I_{\text{л.рез}} = I_{\text{ф.рез}} \quad (2.59)$$

В таблицю заносяться розрахункові дані при таких значеннях активного навантаження: 0, 10, 20 Ом. Граничне значення в 20 Ом обране через значе

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

зменшення фазного струму (0.5 А і менше). Індуктивне значення опору обирається таким самим чином. Таблиці складаються наступним чином: обирається постійне значення активної складової фазного опору і під нього підбирається по черзі значення реактивної складової опору (від 0 до 20 Ом), при незмінній швидкості вітру, частоті обертання валу та частоті напруги.

$X_{\text{наб}},$ Ом	C	D	$I_d,$ А	$E_f,$ В	$I_q,$ А	$U_d,$ В	$U_q,$ В	$U_{\phi},$ рез, В	$I_{\phi,\text{рез}},$ А	$U_{\text{л.рез}},$ В	$I_{\text{л.р}}\text{ез},$ А
0	0.11	$1.7 \cdot 10^5$	58.1	6.34	$3.8 \cdot 10^{-5}$	0	0	0	58.13	0	58.13
5	5.11	$3.386 \cdot 10^8$	2.64	13.5	$3.992 \cdot 10^{-8}$	$-1.996 \cdot 10^{-7}$	13.22	13.23	2.6	22.9	2.6
10	10.11	$1.3 \cdot 10^9$	1.3	13.6	$1.03 \cdot 10^{-8}$	$-1.03 \cdot 10^{-7}$	13.5	13.5	1.3	23.4	1.3
15	15.11	$2.9 \cdot 10^9$	0.91	13.7	$4.7 \cdot 10^{-9}$	$-6.9 \cdot 10^{-8}$	13.6	13.6	0.91	23.6	0.91
20	20.1	$5.2 \cdot 10^9$	0.68	13.8	$2.6 \cdot 10^{-9}$	$-5.3 \cdot 10^{-8}$	13.69	13.69	0.69	23.72	0.69
$\infty - X.X.$	$\infty$	$\infty$	0	13.8	0	0	13.8	13.8	0	24	0

Табл. 2.3 – Таблица розрахункових значень при постійному значенні активної складової опору  $R_{\text{наб}} = 0$  Ом

$X_{\text{наб}},$ Ом	C	D	$I_d,$ А	$E_f,$ В	$I_q,$ А	$U_d,$ В	$U_q,$ В	$U_{\phi,\text{рез}},$ В	$I_{\phi,\text{рез}},$ А	$U_{\text{л.рез}},$ В	$I_{\text{л.рез}},$ А
0	843.9	10	0.1	13.8	1.38	0.16	13.8	13.8	1.3	23.9	1.3
5	24.65	12.6	0.56	13.7	1.09	0.13	13.72	13.7	1.2	23.7	1.2
10	19.99	20.2	0.68	13.76	0.68	0.081	13.69	13.692	0.968	23.716	0.968
15	21.7	32.84	0.63	13.774	0.419	0.05	13.705	13.705	0.76	23.738	0.76
20	25.1	50.456	0.55	13.785	0.273	0.032	13.725	13.725	0.614	23.773	0.614

Табл. 2.4 – Таблица розрахункових значень при постійному значенні активної складової опору  $R_{\text{нав}} = 10 \text{ Ом}$

$X_{\text{нав}}, \text{ Ом}$	C	D	$I_d, \text{ А}$	$E_f, \text{ В}$	$I_q, \text{ А}$	$U_d, \text{ В}$	$U_q, \text{ В}$	$U_{\text{ф.рез}}, \text{ В}$	$I_{\text{ф.рез}}, \text{ А}$	$U_{\text{л.рез}}, \text{ В}$	$I_{\text{л.рез}}, \text{ А}$
0	$3.3 \cdot 10^3$	20.0	$4.1 \cdot 10^{-3}$	13.85	0.69	0.08	13.85	13.85	0.69	23.9	0.69
5	83.2	21.3	0.166	13.835	0.649	0.077	13.81	13.81	0.67	23.9	0.6
10	49.6	25.1	0.278	13.82	0.55	0.065	13.79	13.79	0.617	23.8	0.6
15	41.5	31.4	0.332	13.813	0.44	0.05	13.77	13.77	0.551	23.8	0.5
20	39.9	40.2	0.345	13.81	0.343	0.04	13.77	13.77	0.487	23.8	0.4

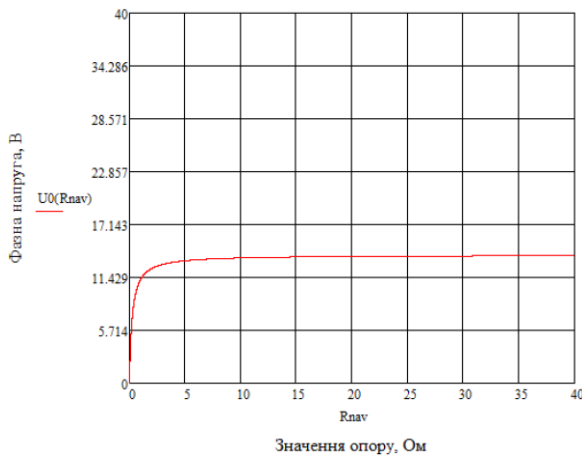
Табл. 2.5 – Таблица розрахункових значень при постійному значенні активної складової опору  $R_{\text{нав}} = 20 \text{ Ом}$

Відповідні графіки будуються у програмному забезпеченні MathCad та за іншим принципом. Оскільки програма дозволяє збільшити кількість точок, тобто кількість різних значень опорів, то інтервал з 0 до 40 буде розбитий на більшу кількість точок, з мінімально доступним інтервалом, що дасть змогу не тільки зобразити більше точок на координатній площині, а й перетворити ламану лінію на досить плавну.

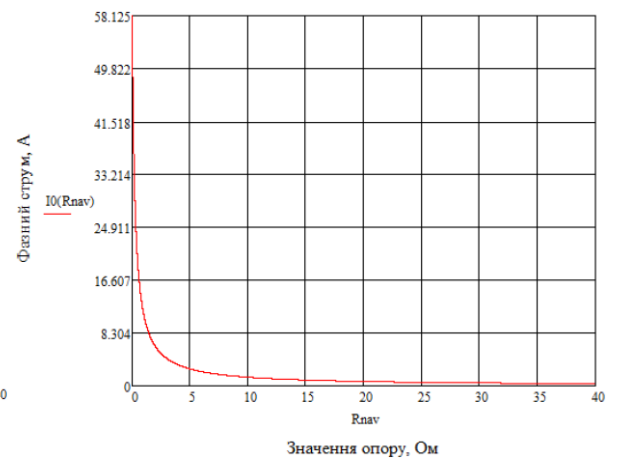
Значення активної складової опору з інтервалом  $R_{\text{нав}} = 0 - 40 \text{ Ом}$ , з відповідно постійним значенням реактивного опору  $X_{\text{нав}} = 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 \text{ Ом}$  і навпаки.



Побудовані графіки зовнішніх характеристик при фіксованих значеннях  $X_{\text{нав}}$  (рисунки 2.22 – 2.30):

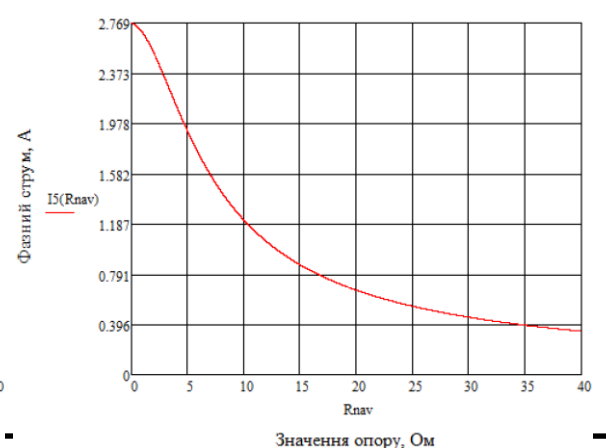
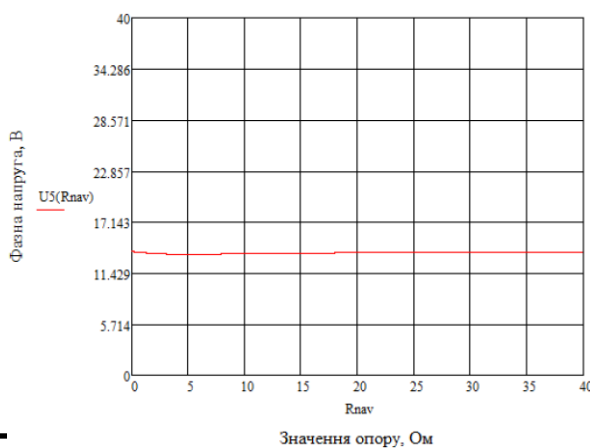


а)



б)

Рис.2.22 – Графіки а) напруги та б) струму при  $X_{\text{нав}} = 0$  Ом та змінному  $R_{\text{нав}}$  на інтервалі від 0 до 40

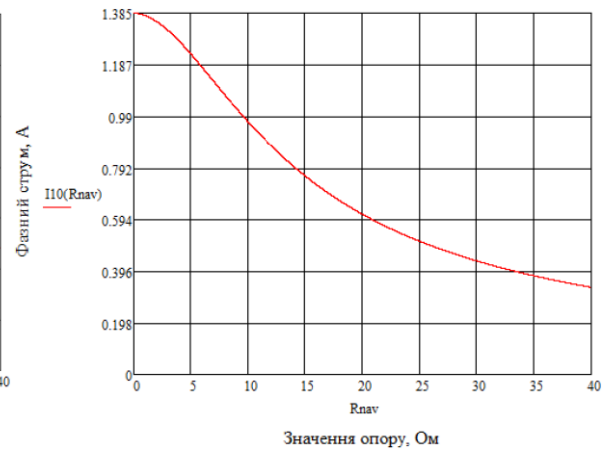
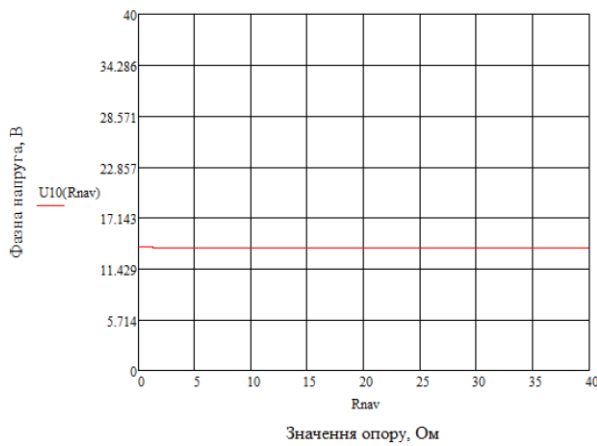


Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

а)

б)

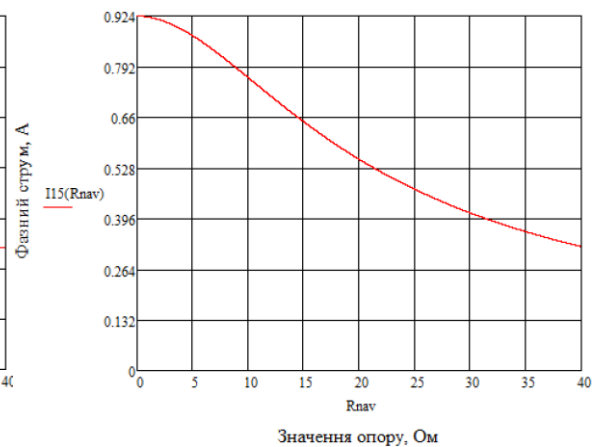
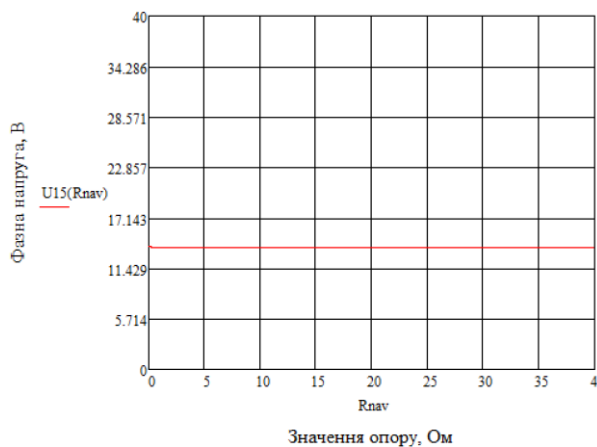
Рис.2.23 – Графіки а) напруги та б) струму при  $X_{\text{наВ}} = 5 \text{ Ом}$  та змінному  $R_{\text{наВ}}$  на інтервалі від 0 до 40



а)

б)

Рис.2.24 – Графіки а) напруги та б) струму при  $X_{\text{наВ}} = 10 \text{ Ом}$  та змінному  $R_{\text{наВ}}$  на інтервалі від 0 до 40



а)

б)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Рис.2.25 – Графіки а) напруги та б) струму при  $X_{\text{наВ}} = 15 \text{ Ом}$  та змінному  $R_{\text{наВ}}$  на інтервалі від 0 до 40

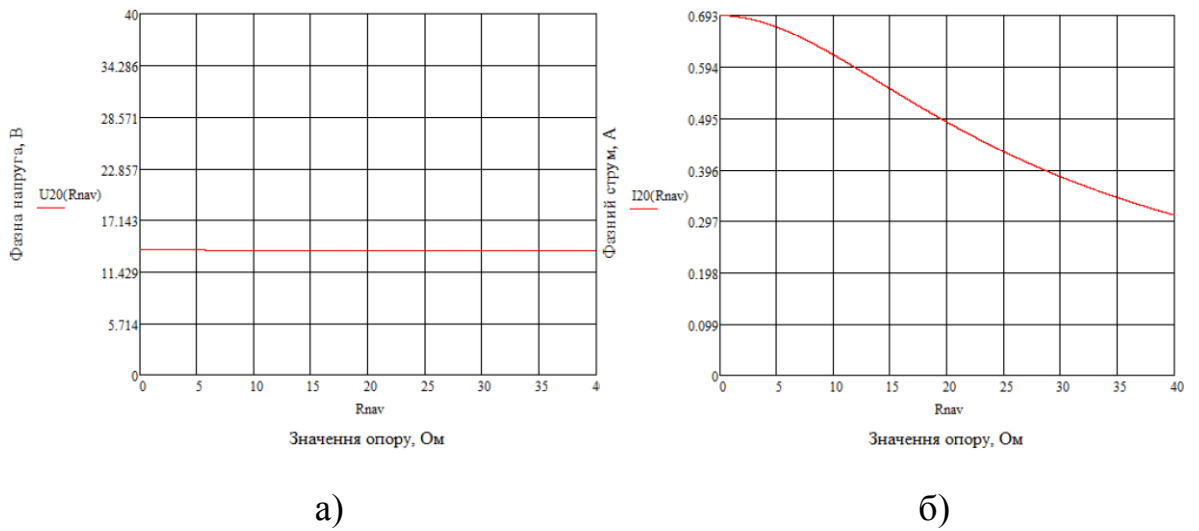
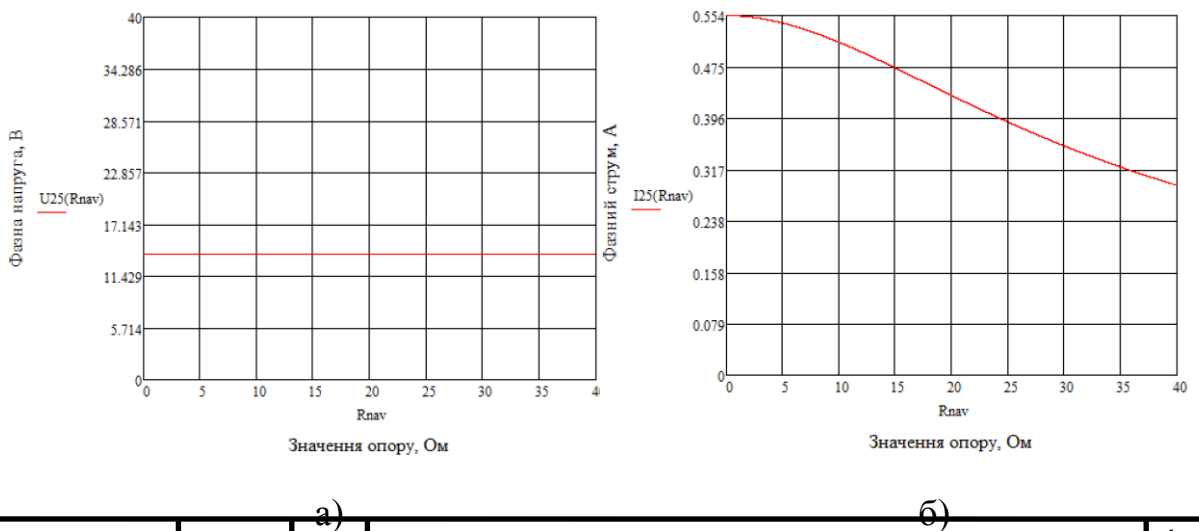


Рис.2.26 – Графіки а) напруги та б) струму при  $X_{\text{наВ}} = 20 \text{ Ом}$  та змінному  $R_{\text{наВ}}$  на інтервалі від 0 до 40



Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Рис.2.27 – Графіки а) напруги та б) струму при  $X_{\text{наВ}} = 25 \text{ Ом}$  та змінному  $R_{\text{наВ}}$  на інтервалі від 0 до 40

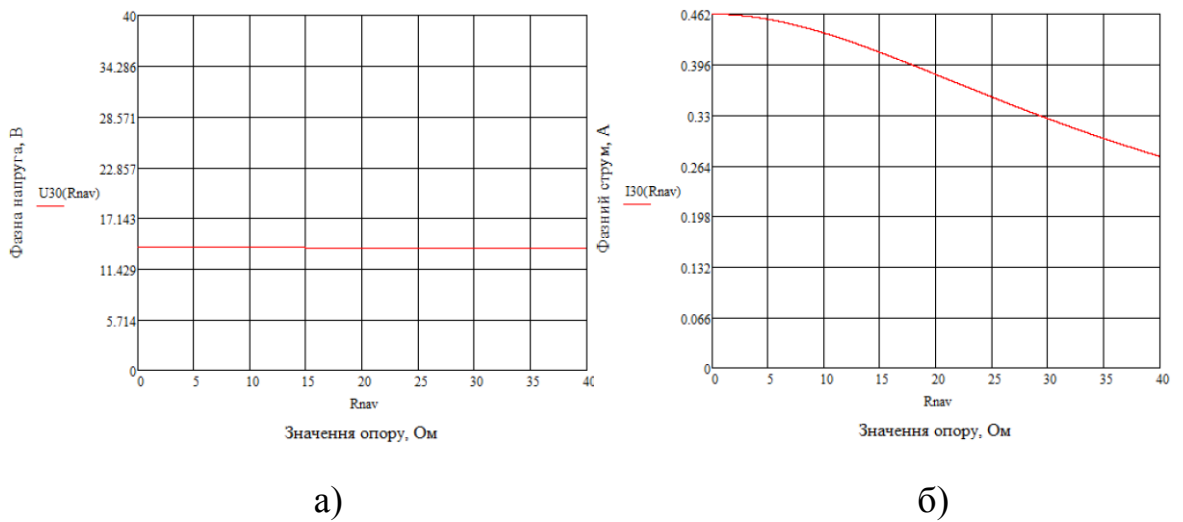


Рис.2.28 – Графіки а) напруги та б) струму при  $X_{\text{наВ}} = 30 \text{ Ом}$  та змінному  $R_{\text{наВ}}$  на інтервалі від 0 до 40

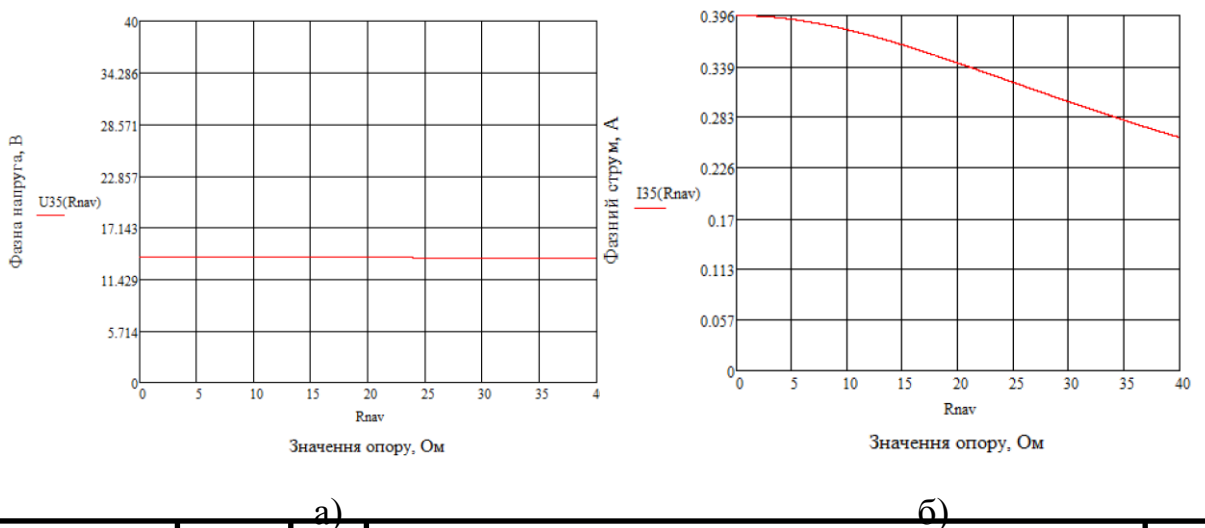


Рис.2.29 – Графіки а) напруги та б) струму при  $X_{\text{наВ}} = 35 \text{ Ом}$  та змінному  $R_{\text{наВ}}$  на інтервалі від 0 до 40

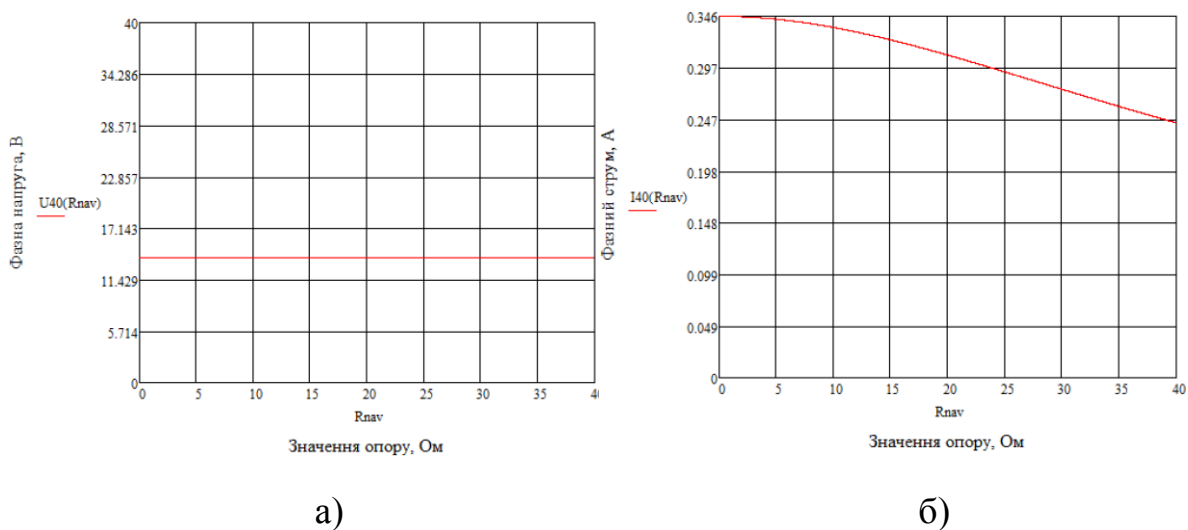
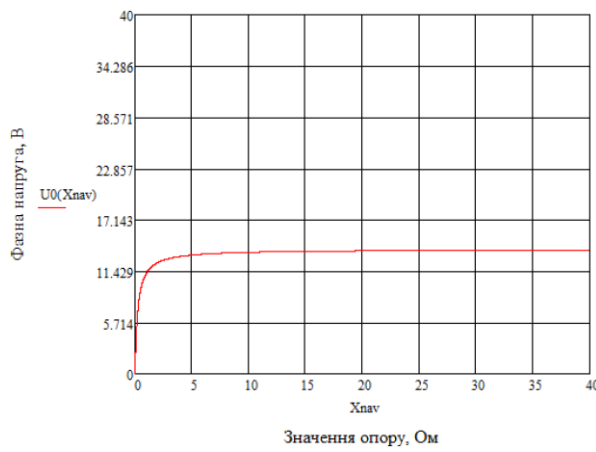
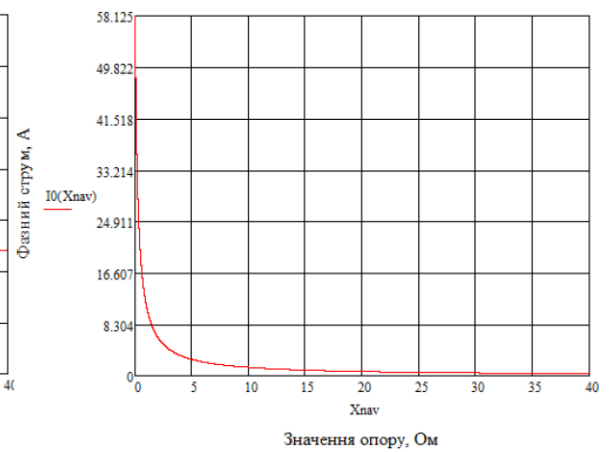


Рис.2.30 – Графіки а) напруги та б) струму при  $X_{\text{наВ}} = 40 \text{ Ом}$  та змінному  $R_{\text{наВ}}$  на інтервалі від 0 до 40

Побудовані графіки зовнішніх характеристик при фіксованих значеннях  $R_{\text{наВ}}$  (рисунки 2.31 – 2.39):

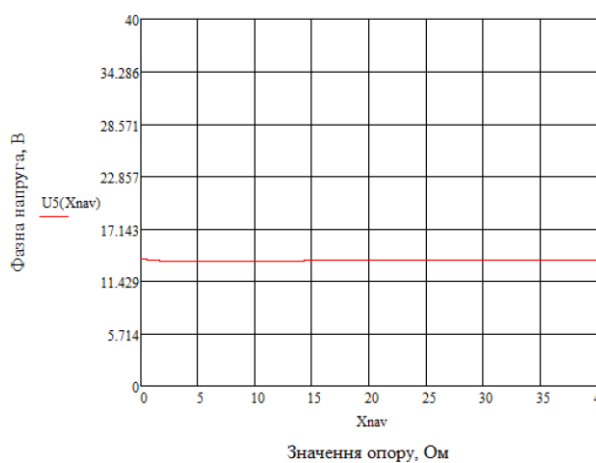


а)

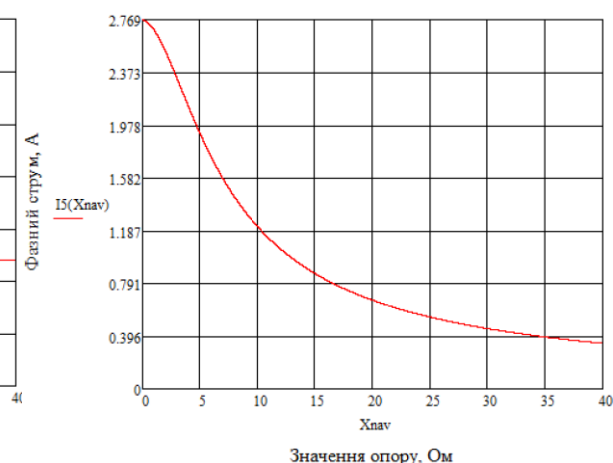


б)

Рис.2.31 – Графіки а) напруги та б) струму при  $R_{\text{нав}} = 0$  Ом та змінному  $X_{\text{нав}}$  на інтервалі від 0 до 40



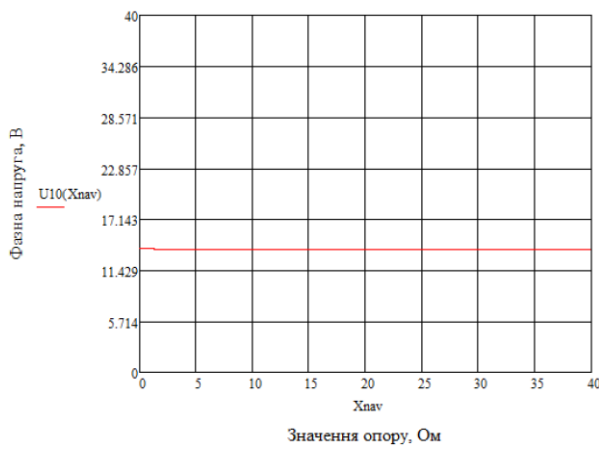
а)



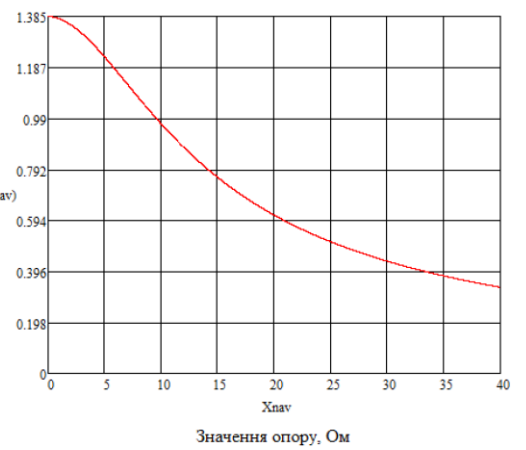
б)

Рис.2.32 – Графіки а) напруги та б) струму при  $R_{\text{нав}} = 5$  Ом та змінному  $X_{\text{нав}}$  на інтервалі від 0 до 40

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

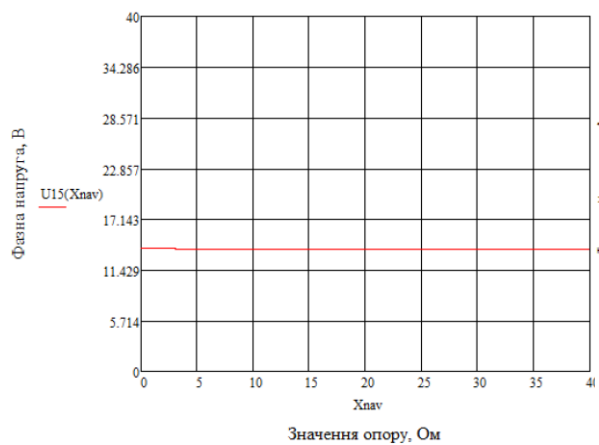


а)

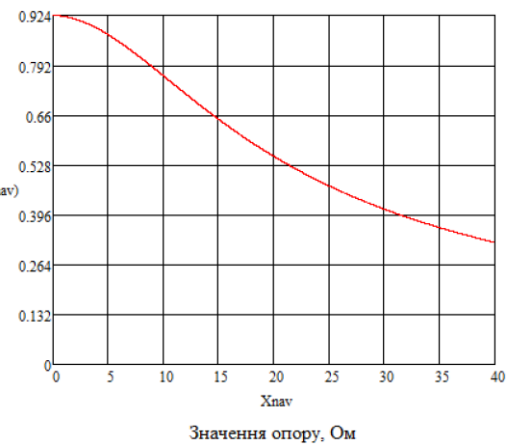


б)

Рис.2.33 – Графіки а) напруги та б) струму при  $R_{нав} = 10$  Ом та змінному  $X_{нав}$  на інтервалі від 0 до 40



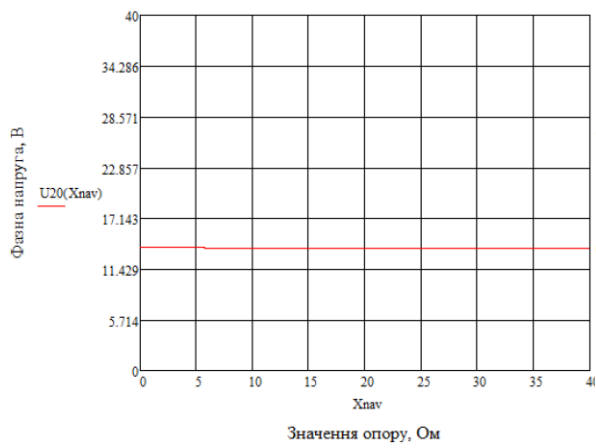
а)



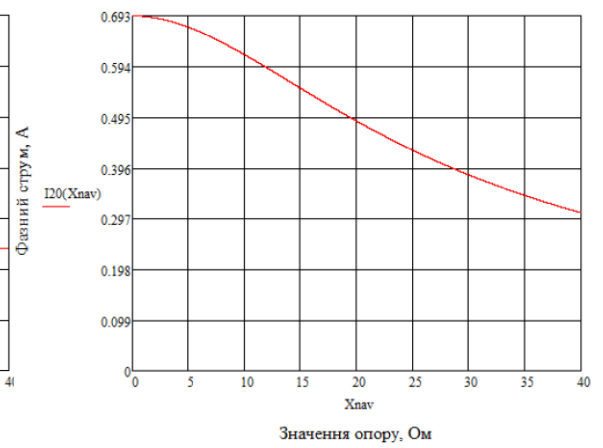
б)

Рис.2.34 – Графіки а) напруги та б) струму при  $R_{нав} = 15$  Ом та змінному  $X_{нав}$  на інтервалі від 0 до 40

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

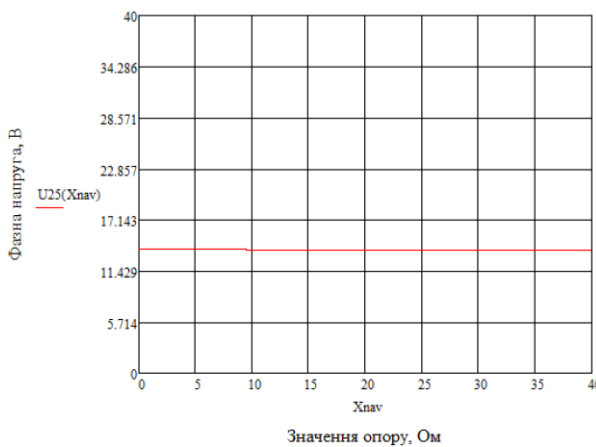


а)

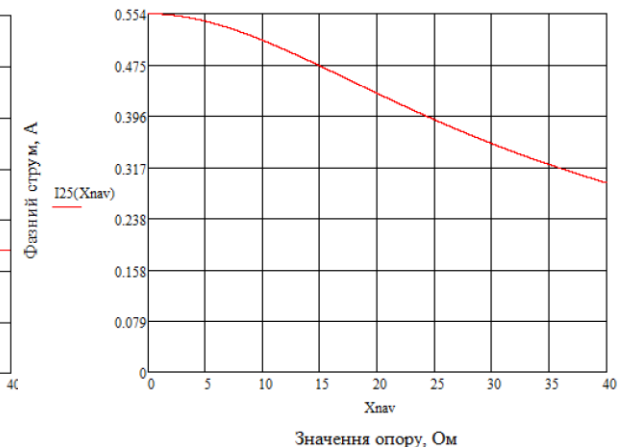


б)

Рис.2.35 – Графіки а) напруги та б) струму при  $R_{нав} = 20$  Ом та змінному  $X_{нав}$  на інтервалі від 0 до 40



а)

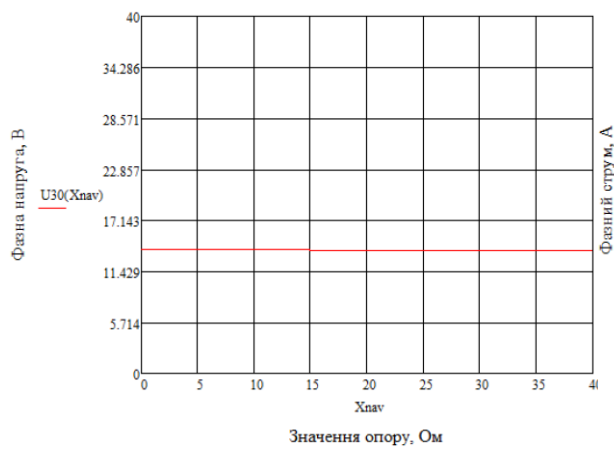


б)

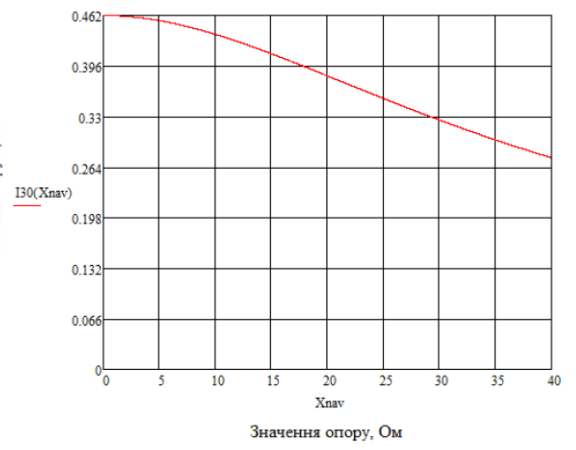
Рис.2.36 – Графіки а) напруги та б) струму при  $R_{нав} = 25$  Ом та змінному  $X_{нав}$  на інтервалі від 0 до 40

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



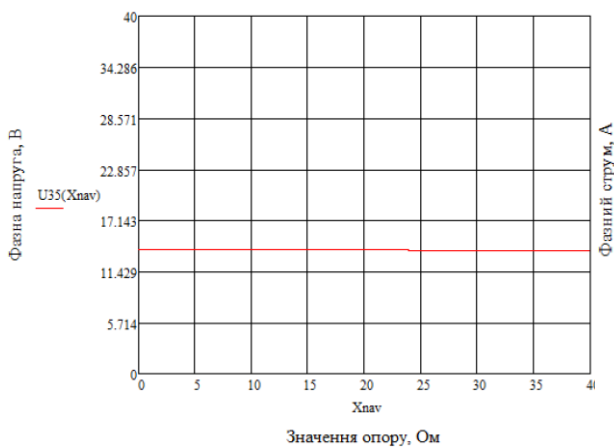


а)

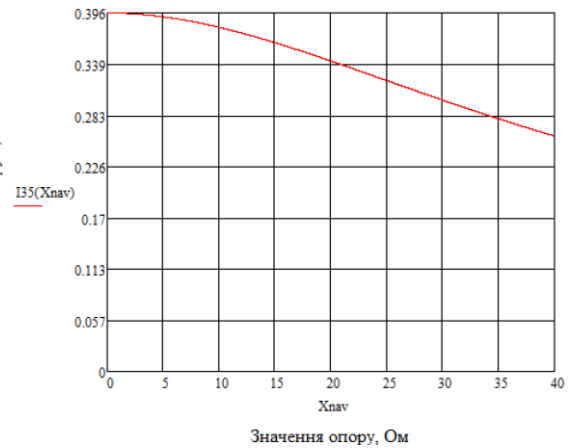


б)

Рис.2.37 – Графіки а) напруги та б) струму при  $R_{\text{нав}} = 30 \text{ Ом}$  та змінному  $X_{\text{нав}}$  на інтервалі від 0 до 40



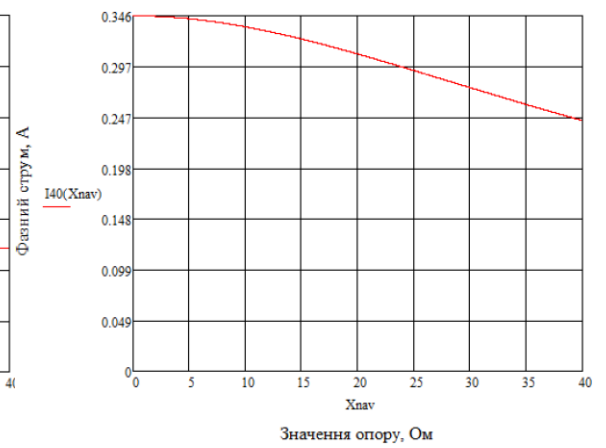
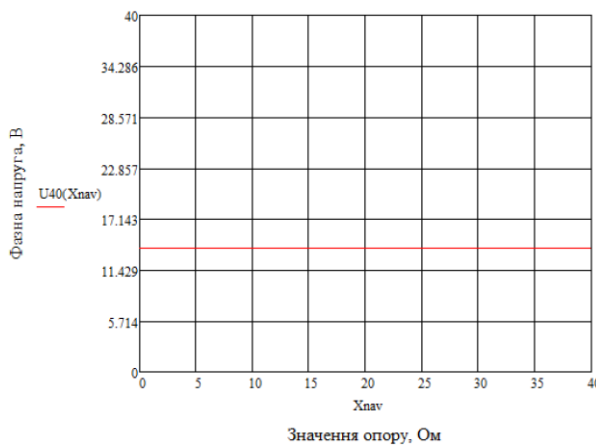
а)



б)

Рис.2.38 – Графіки а) напруги та б) струму при  $R_{\text{нав}} = 35 \text{ Ом}$  та змінному  $X_{\text{нав}}$  на інтервалі від 0 до 40

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



а)

б)

Рис.2.39 – Графіки а) напруги та б) струму при  $R_{\text{нав}} = 40 \text{ Ом}$  та змінному  $X_{\text{нав}}$  на інтервалі від 0 до 40

Показавши відповідні графіки напруги і струму на одній координатній площині, можна краще побачити різницю та зміну значень. Нижче на рисунках 2.40 – 2.43 показані ці самі графіки відповідно для фіксованих значеннях спочатку  $X_{\text{нав}}$ , а потім  $R_{\text{нав}}$ :

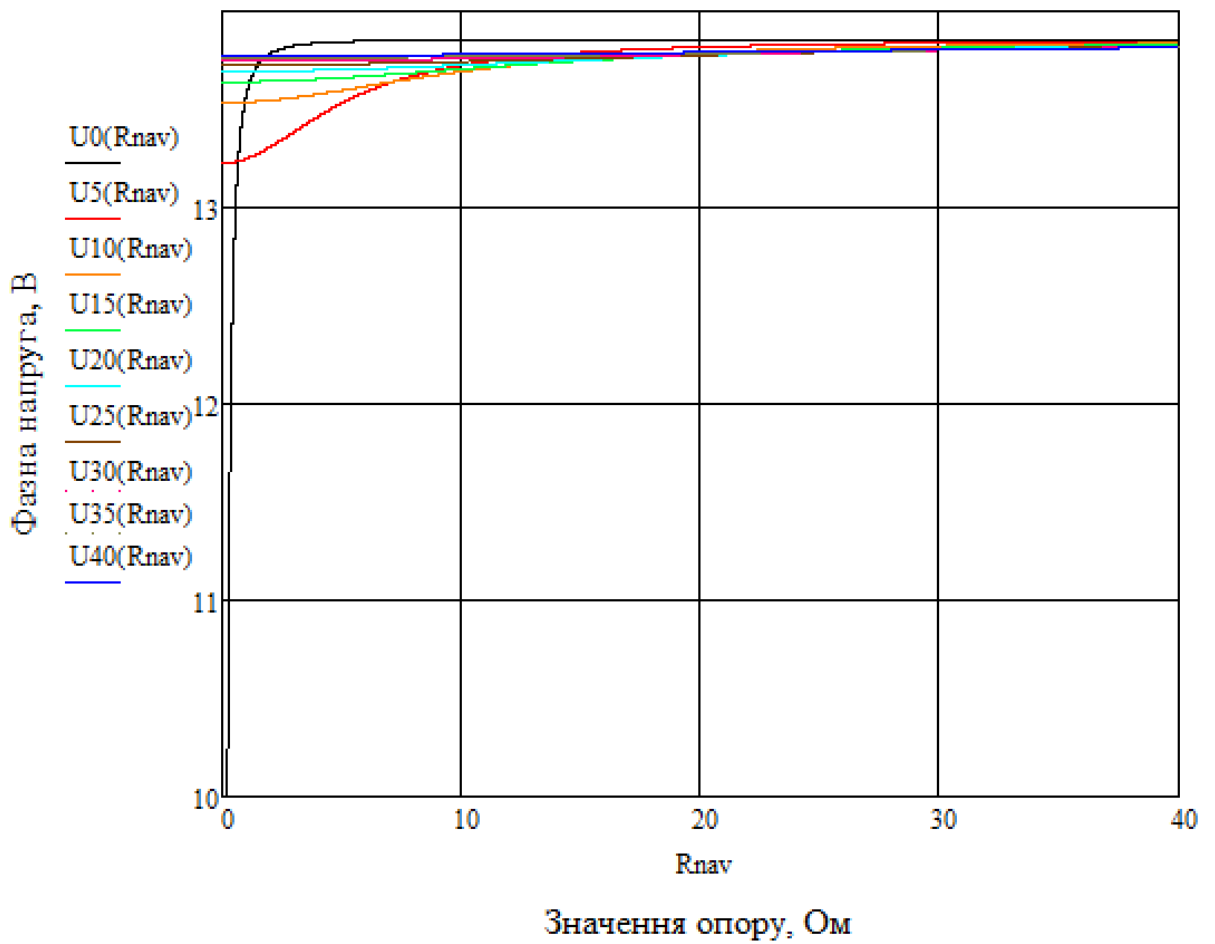


Рис.2.40 – Графік напруг при ряді значень  $X_{\text{нав}}$  та змінному  $R_{\text{нав}}$  на інтервалі від 0 до 40

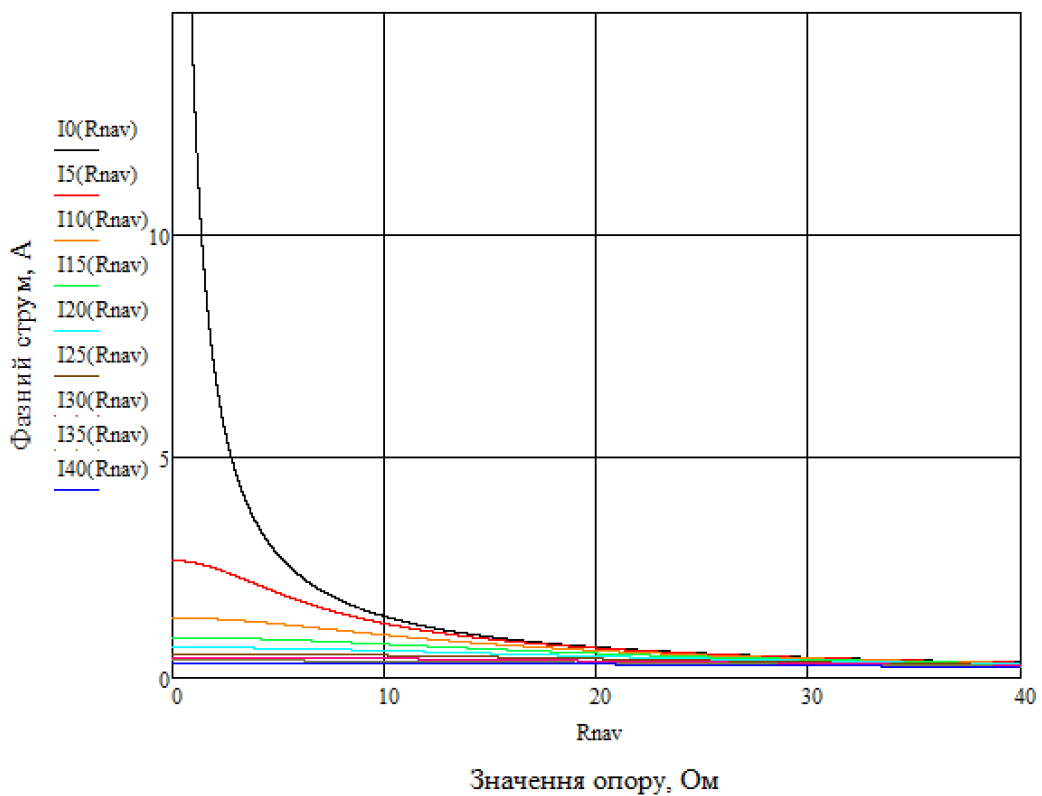


Рис.2.41 – Графік струмів при ряді значень  $X_{\text{нав}}$  та змінному  $R_{\text{нав}}$  на інтервалі від 0 до 40

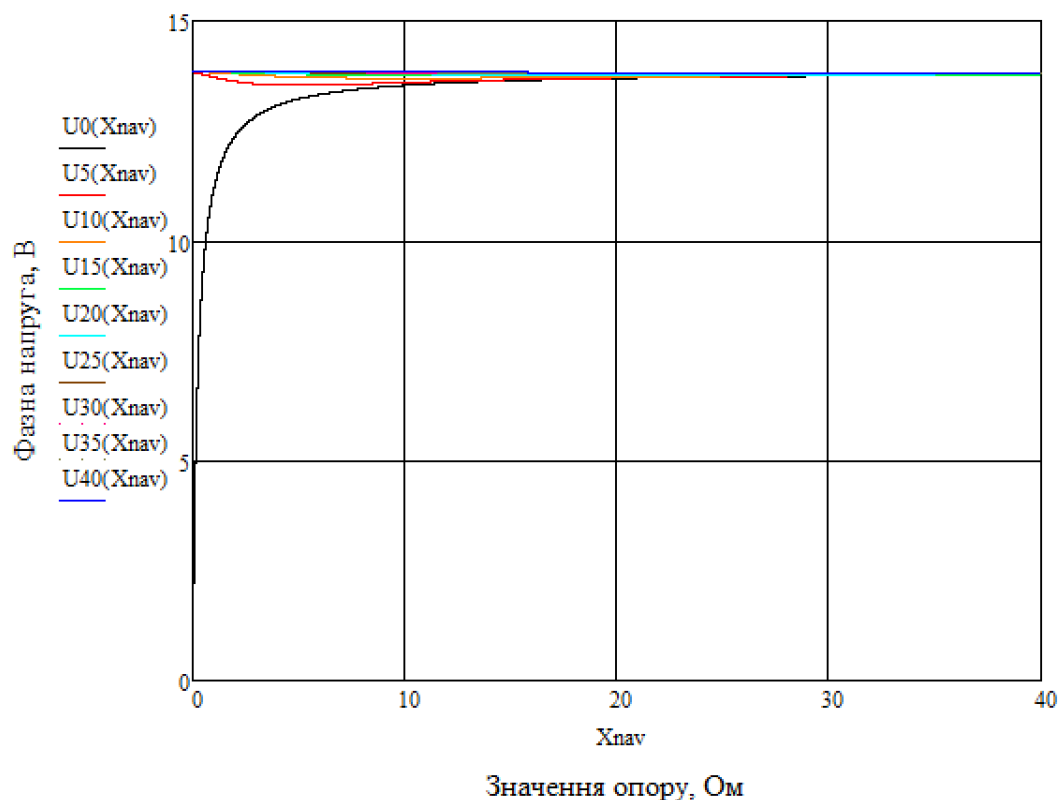


Рис.2.42 – Графік напруг при ряді значень  $R_{\text{нав}} = 0$  Ом та змінному  $X_{\text{нав}}$  на інтервалі від 0 до 40

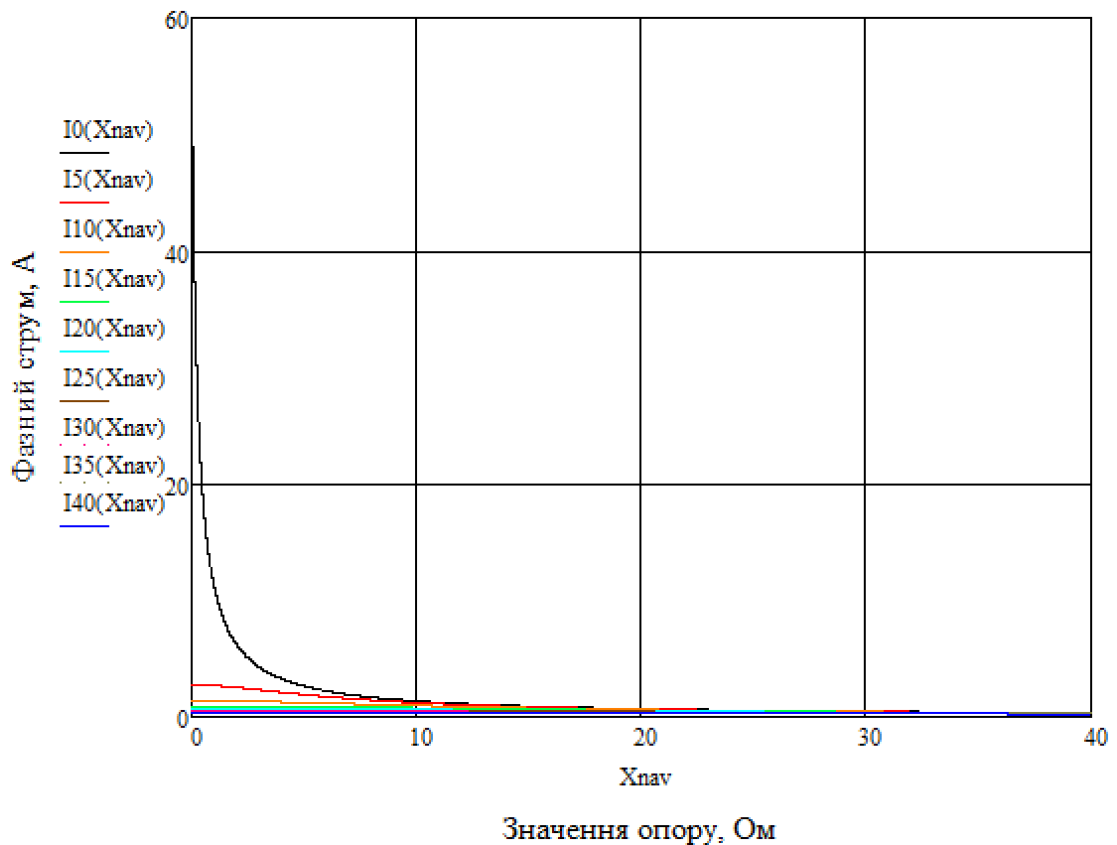


Рис.2.43 – Графік струмів при ряді значень  $R_{нав} = 0$  Ом та змінному  $X_{нав}$  на інтервалі від 0 до 40

## 2.4 Вибір обладнання для стенду

Стенд вітрогенеруючої установки містить у собі декілька компонентів. На сам перед сам генератор, який представлений синхронною машиною. Передавати на нього обертовий момент буде асинхронний двигун до 1000 обертів на хвилину, як імітатор вітру, регулювання яким буде здійснюватися за допомогою системи ПЧ-АД. Отримувана змінна напруга з синхронного генератора подається на випрямляч, для отримання постійної напруги. Це необхідно, адже робота даної моделі вітрогенератора передбачає буфер у вигляді акумуляторних батарей, які також використовуються в стенді. Крім того необхідна реалізація роботи одразу на трифазне навантаження, тобто відповідні опори, котушки та конденсатори. Вимірювання при цьому струмів та напруги буде здійснюватися за допомогою вбудованих амперметрів та вольтметрів, з можливістю використання сторонніх мультиметрів та інших

вимірювальних приладів, що робить стенд більш гнучким в середовищі експериментів.

Загальний перелік компонентів стенду виглядає наступним чином:

1. Вітроустановка (СГ).
2. Система ПЧ – АД: перетворювач частоти та асинхронний двигун.
3. Випрямляч напруги (комплект з СГ).
4. Резистори, котушки (навантаження).
5. Амперметри, вольтметри та інші (вимірювальні пристрої).
6. Стороннє ТО (за необхідності).

#### **2.4.1 Вибір системи ПЧ-АД**

Обертання валу СГ та регулювання його швидкості передбачається системою ПЧ-АД. Орієнтуючись на значення швидкості обертання валу в 500 обертів на хвилину та потужність в 400 Вт, необхідно обрати відповідний АД та ПЧ до нього, враховуючи, що система ПЧ-АД повинна працювати від мережі 220 В.

Для стенду пропонується двигун АІР71В6 (рис. 2.44) з наступними паспортними даними:

1. Номінальна потужність – 0.55 кВт;
2. Частота обертання – 1000 обертів на хвилину;
3. Номінальний струм – 1.8 А;
4. ККД – 65 %;
5. Коефіцієнт потужності – 0.72;
6. Пусковий коефіцієнт – 1.9;
7. Коефіцієнт кратності максимального моменту – 2.1;
8. Коефіцієнт пускового струму – 4.7;
9. Маса – 10 кг.

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			54



Рис.2.44 – Вигляд обраного асинхронного двигуна АД

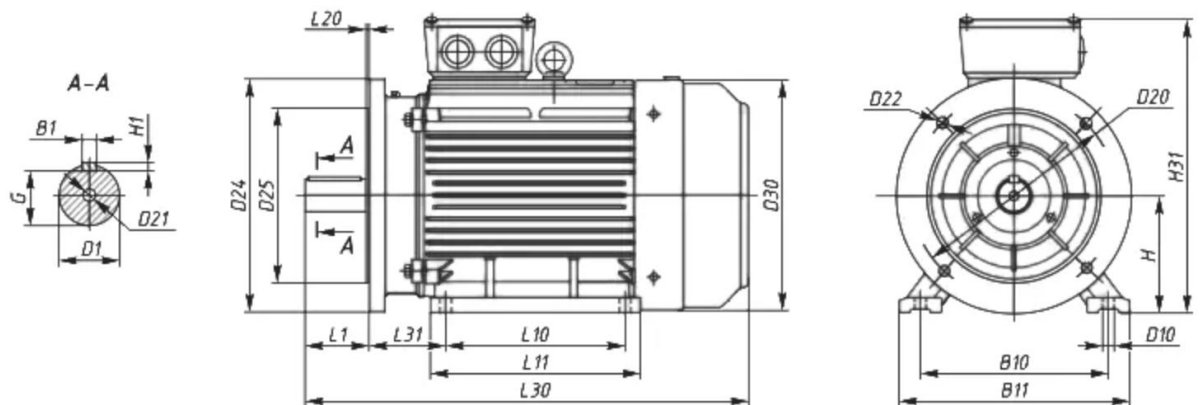


Рис.2.45 – Габарити обраного АД

Параметри	L1	D1	G	B1	H	B11	D10	L11	L30	D30	H31	L31	D24	D20	D25
Розмірність, мм	40	19	21,5	6	71	150	7	90	270	145	195	45	200	165	130

Табл. 2.6 – Параметри габаритів обраного АД

Керування здійснюється за допомогою перетворювача частоти CFM210, з вбудованою функцією розщеплення однофазної мережі на трифазну, з наступними паспортними даними:

- Потужність: 1.1 кВт.
- Напруга на вході: 1 фаза – 220 В.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02										Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата											55

- Число фаз та напруга на виході: 3 фази – 220 В
- Максимальна частота: 800 Гц
- Тип управління: скалярний



Рис.2.46 – Перетворювач частоти CFM210

### 2.4.2 Вибір елементів навантаження

Елементи навантаження представляють собою набір з резисторів номіналом від 0 до 40 Ом та котушок різного значення індуктивності. Причому вмикатися таке навантаження повинно як базовою схемою «Зірка» для цього СТ, так і схемою «Трикутник».

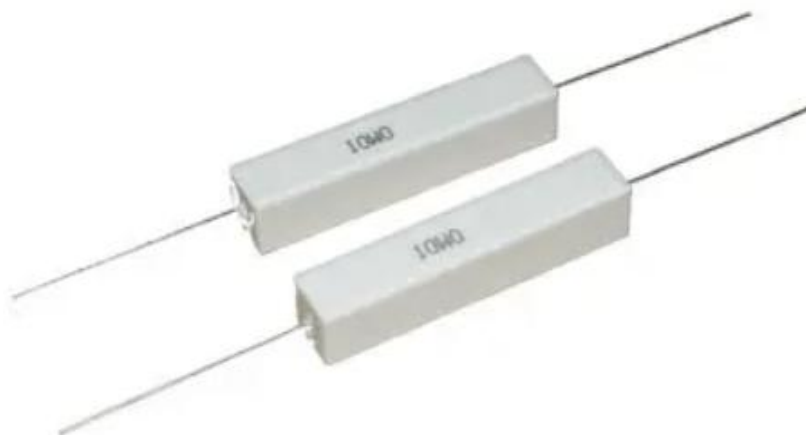


Рис.2.47 – Вигляд обраних цементних опорів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56



### 2.4.3 Вибір вимірювальних пристроїв та захисту

Передусім, зняття даних для розрахунку виконувалося за допомогою універсальних мультиметрів, таких як UT33B+, UT33D+ та Meatrol ME440 (рис 2.48(а,б)). Сам стенд потребує комбінованого підходу до виміру: можливість знімати дані як за допомогою вмонтованих, так і для використання зовнішніх приборів.



а)



б)

Рис.2.48 – Вигляд використаних вимірювальних пристроїв: а) мультиметр UT33D+ та б) Meatrol ME440

На розробку стенда знадобляться:

- вольтметри АС/DC;
- амперметри АС/DC;
- тахометр;
- пристрої АВ (автомати).

Дипломною роботою пропонується використати універсальний машинний цифровий вольтметр-амперметр АС100/10 (рис. 2.49), що дає змогу згрупувати відповідні значення струму та напруги для окремих фаз, ліній, тощо.

										ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
											57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							



Рис.2.49 – Універсальний автомобільний цифровий вольтметр – амперметр АС100/10, з можливістю виміру змінної та постійної напруги

Стеження за швидкістю обертання валу виконується за допомогою тахометра з датчиком Хола (рис. 2.50).



Рис.2.50 – Тахометр з датчиком Хола, магніт кріпиться до валу двигуна/генератора

Захист передбачає собою три окремих вузла.

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			58

Перший вузол: встановлення автоматичного вимикача на включення однофазної мережі змінного струму 220 В, який знеструмлює повністю весь стенд.

Другий вузол: встановлення три автомата на кожну з фаз асинхронного двигуна, що відповідно знеструмлює тільки двигун.

Третій вузол: захист генератора з номінальною напругою 24 В здійснюється за допомогою плавких запобіжників, причому з можливістю вставлення простих перемичок, якщо необхідно.

Відповідно обраний наступний автоматичний вимикач:

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

Плавкий запобіжник обирається на 10 А E.Next:

- Максимальний струм: 10 А
- Номінальна частота: 50 Гц
- Номінальна напруга: 500 В
- Номінальний струм: 10 А



а)



б)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

Рис.2.51 – Загальний вигляд а) автоматичного вимикача та б) плавкого запобіжника

## 2.5 Збір стану з основних компонентів

Стенд повинен представляти собою реалістичну модель вітроустановки, для дослідження її режимів роботи, бути захищеним від перенавантажень та аварійних ситуацій. У разі, якщо необхідно дослідити, як генератор веде себе в таких режимах, то такі досліди повинні проходити з максимальним захистом людини, та з можливістю знеструмлення всього стану цілком.

Стенд виконаний у формі п'єдесталу для асинхронного двигуна та генератора, що встановлюються зверху. Їх вали з'єднуються муфтою для передачі обертового моменту з АД на СГ.

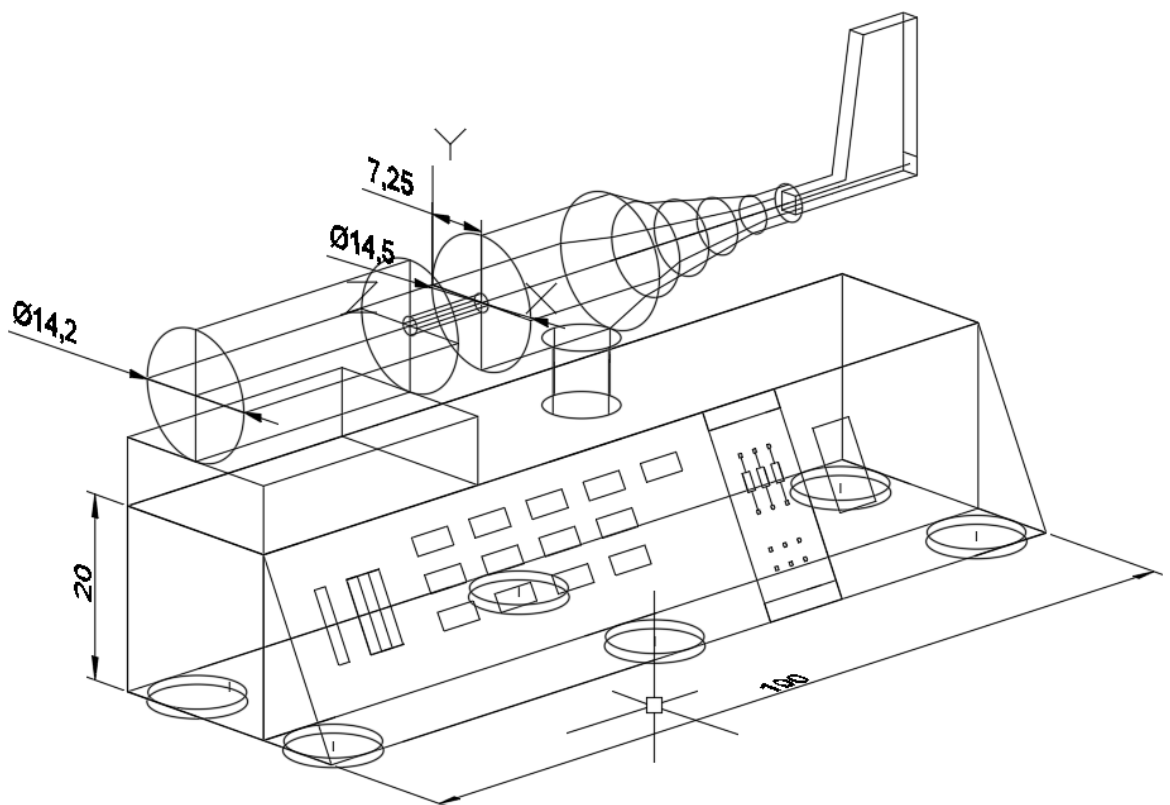


Рис.2.52 – Приблизний вигляд стану в програмному забезпеченні Auto-Cad

Нижче розміщення приборна панель. Тут знаходяться пристрій АВ для СГ та АД, лівіше попарно розміщенні комбіновані амперметри-вольтметри, для

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			60

заміру лінійних-фазних струмів та напруги. Вкінці них встановлено тахометр, що показує миттєве значення швидкості обертання валу.

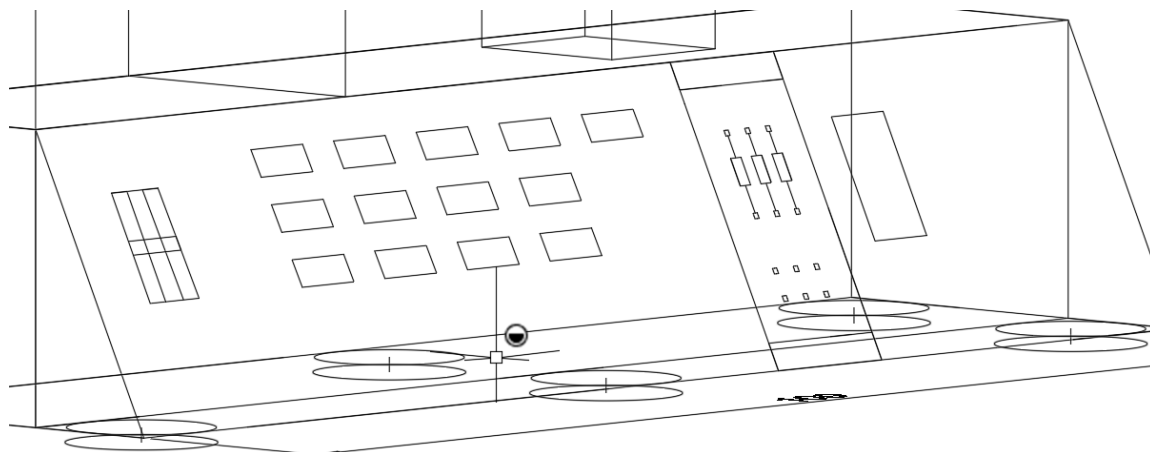
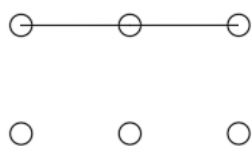
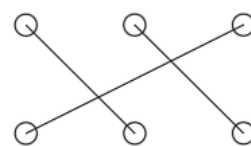


Рис.2.53 – Вигляд приборної панелі в програмному забезпеченні MatCad

Далі частина з вставними опорами. Передбачається, що в перші два зверху отвори вставляються різні навантаження, а останні два нижні дають змогу обрати, якою схемою їх зібрати: «Зірка» чи «Трикутник» відповідно. Модернізація стенду зі збільшенням кількості включення різних опорів на одну фазу, дозволить більш гнучкіше дослідити роботу під навантаженням СГ.



а)



б)

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Рис.2.54 – Варіанти підключення навантаження на стенду: а) схемою «Зірка» та б) схемою «Трикутник»

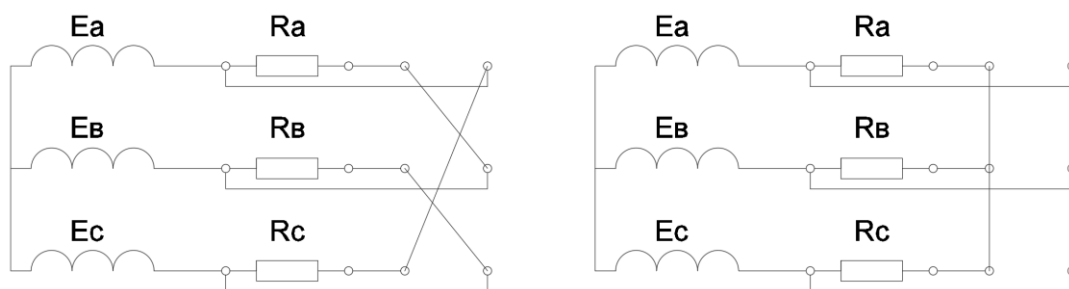


Рис.2.55 – Електрична схема з'єднання навантаження на стенду: а) схемою «Зірка» та б) схемою «Трикутник»(виведені контакти початку фаз не підключаються)

Таким чином, стенд дозволяє зручно оперувати різними значеннями струмів та напруги, регулювати значення опору навантаження і при цьому слідкувати за обертами на валу СГ за допомогою тахогенератора та перетворювача частоти.

## 2.6 Можливі способи вдосконалення самої вітроустановки

Аналізуючи технічне рішення з конструювання даної вітрової установки виникало питання, чи можна вдосконалити її при готовій збірці[26],[27]. Сама установка має деякі недоліки, як і схожі з нею моделі, але більших потужностей. Головна проблема – вплив швидкості вітру на швидкість обертання ротора та генеруючу напругу. Пропонується два способи рішення:

1. Необхідно зменшити зазор між статором та ротором, що дає виграш в скороченні втрат магнітного потоку ротора до мінімального значення. Оскільки конструкція генератора уже зібрана, то виконати цю умову можливо, лише з металевими підкладками для магнітів, які вирізаються під габарити магнітів. Слід зазначити, що підкладки повинні бути відокремлені і для кожного магніту свої.

2. Регулювання кута нахилу кінців лопастей відносно площини обертання ротора. Виробник з самого початку акцентує увагу на обертанні ротора починаючи з швидкості вітру  $1 \frac{m}{c}$ , однак такий підхід має суттєвий

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

програш в підйомній силі крила, через що необхідно, щоб був сильний вітер, бо за інших умов напруга генератора буде мізерною. Також, оскільки лопасті уже спроектовані і зроблені з пластику, то регулювання можливе лише через кріплення самих лопастей. Вони кріпляться за допомогою 3 болтів з гайками і, якщо правильно підставити шайби в одне з кріплень, можна добитися зменшення початкового кута.

Слід звернути увагу на те, що установка погано підлаштовується з подальшим рознесенням під будь-яку зміну напрямку вітру. Рішення: необхідно подовжити хвіст в два рази, що достатньо для стабільності системи.

Для використання генератора як джерела змінного струму 220 В необхідно підключити АКБ, що заряджається, до інвертора. В побутовому середовищі таке рішення дозволить підключити весь дім та забезпечити роботу освітлення, телевізора, малопотужних пристроїв. Для підключення ж енергоємних пристроїв типу пральної машинки та холодильника знадобляться дещо потужніші вітрогенератор та АКБ відповідно.

### **Висновок до розділу два**

Проведено основні розрахунки стенду «Вітрогенератор» та його окремих частин.

Основні отримані значення при розрахунках:

1.  $S = 1.208 \text{ м}^2$
2.  $v_{\text{пов}} = 12.301 \frac{\text{м}}{\text{с}}$
3.  $S_{\text{роз}} = 500 \text{ В} \cdot \text{А}$
4.  $D_{\text{ст}} = 0.118 \text{ м}$
5.  $l_{\delta} = 0.04 \text{ м}$
6.  $U_{\text{ф.н.}} = 13.856 \text{ В}$
7.  $E_0 = 13.856 \text{ В}$
8.  $w_{\phi} = 113.056 \text{ шт}$

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
							63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

9.  $I_{н.ф.} = 12.028 \text{ А}$
10.  $R_{syn} = 7.724 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}$
11.  $X_{\sigma} = 0.102 \text{ Ом}$
12.  $X_{ad} = 0.006761 \text{ Ом}$
13.  $X_{aq} = 0.016 \text{ Ом}$
14.  $X_d = 0.109 \text{ Ом}$
15.  $X_q = 0.119 \text{ Ом}$

Ефективна площа роботи складає 1.2 метри квадратних при вказаній максимальній потужності 400 Вт. Розрахункове значення вітру в 12.3 метри на секунду майже відповідає рекомендованим 13.

Розрахунки головних розмірів синхронного генератора мають відхилення в 1 см. Слід зазначити, що відхилення допускаються через можливі різні методології розрахунків та коефіцієнти, використані виробником.

Розрахунок зовнішніх характеристик показав залежність струму фази при підключенні різних значень опорів та при різному типі навантаження: чисто активне та активно-індуктивне.

Обрані додаткові комплектуючі у вигляді системи ПЧ-АД, вимірювальних приладів, автоматичних вимикачів, навантаження тощо, поєднуються в лабораторний стенд на рисунку 2.53. Сам стенд виконаний у формі п'єдесталу, де зверху стоїть двигун та сам генератор, а на панелі приладів, яка для зручності розташована під кутом, розташоване керування. Вмикання навантаження через вмонтовані роз'єми, з окремими виводами для з'єднань схемами «Зірка» або «Трикутник» або окремі виводи для АКБ.

Сама вітроустановка може бути використана в побутових цілях, як додаткове або навіть основне джерело електричної енергії при наступних умовах:

1. Збільшення потужності установки;

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			64



2. Доопрацювання конструкції, а саме: зменшення кута нахилу кінчиків лопастей, зменшення зазору між статором та ротором та збільшення хвостової частини в два рази, для стабільної роботи, при зміні напрямку вітру.

3. Для роботи на трифазне навантаження 220 В необхідно ряд елементів: потужніше АКБ та інвертор напруги.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.02	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Розділ 3

### Моделювання вітрогенераючої установки за допомогою програмного забезпечення MatLab

#### 3.1 Опис використаної моделі Simulink

Використовувана модель вітрогенератора в програмному забезпеченні MatLab Simulink складається з декількох блок схем всередині схеми, кожна з яких дозволяє налаштувати окремий параметр. Моделювання проводиться на самперед для аналізу показників, що очікуються в реальних умовах і не враховують особливості даної вітроустановки, однак беруться параметри останнього. Вигляд моделі на рисунку 3.56.

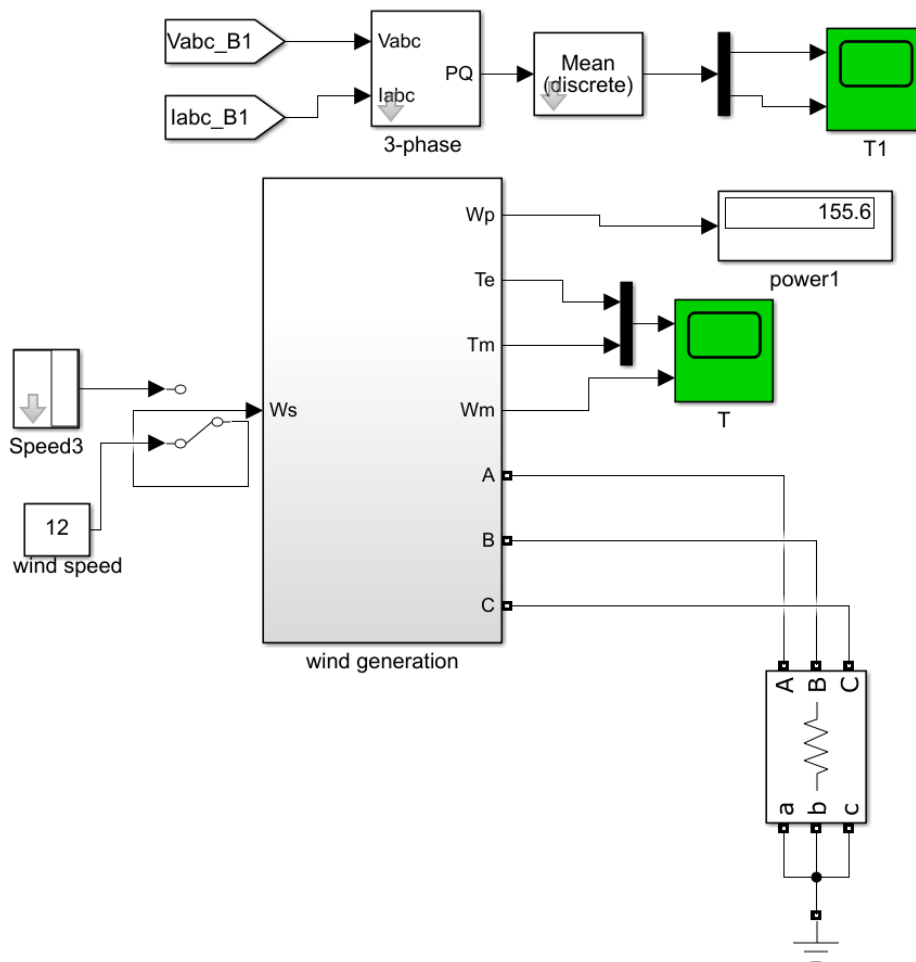


Рис.3.56 – Вигляд тестової моделі для моделювання в Simulink

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.03			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив		Омельченко А.Ю.			Розділ 3	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевірів		Пересунько І.І.					64	8
Н. Контр.		Пересунько І.І.				КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.		Федотов В.О.						

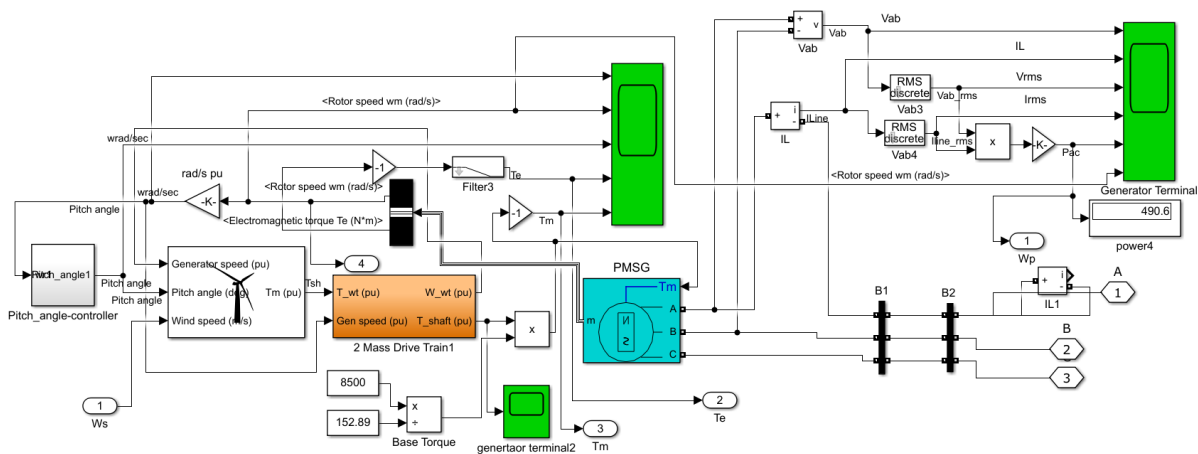


Рис.3.57 – Внутрішній вигляд тестової моделі для моделювання в Simulink

Також є можливість вибору трифазного навантаження. Слід зазначити, що задана вітроустановка передбачає роботу на АКБ, в якості буферу між генератором та навантаженням. У випадку моделювання навантаження одразу підключене напряму до виводів генератора.

Вписавши параметри, можна розрахувати енергетичні характеристики вітрової турбіни у відносних одиницях:

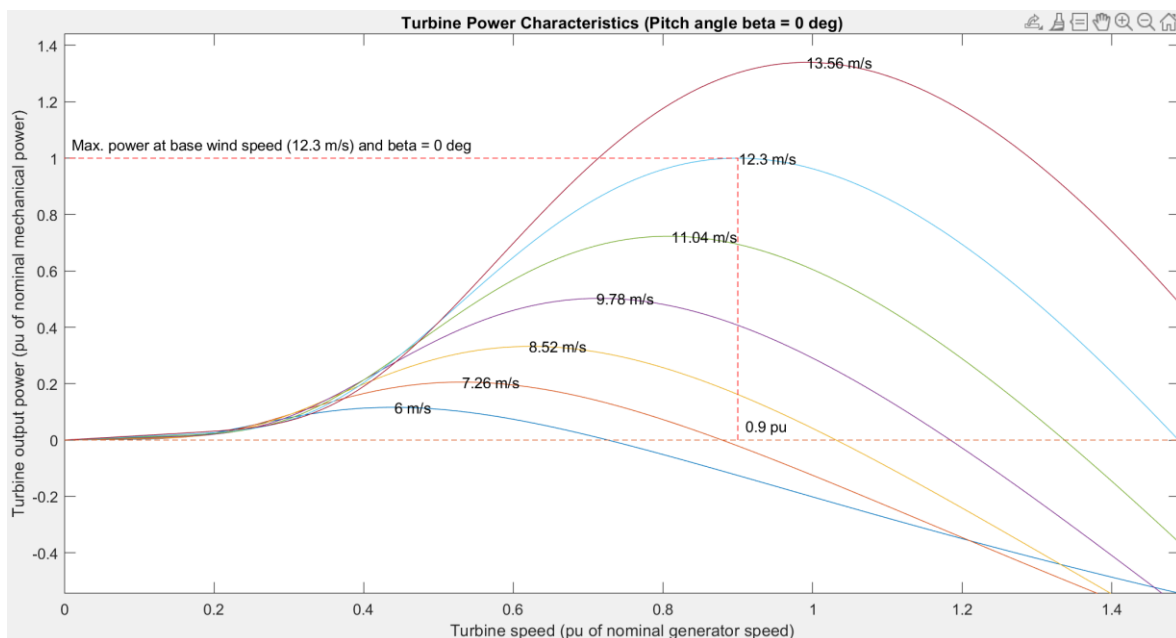


Рис.3.58 – Енергетичні характеристики вітрової турбіни

Досягнення максимально вихідної потужності, за графіками можливо при вітрах зі швидкостями близько  $13.2 \frac{M}{C}$ , при рекомендованому значенні в  $12 \frac{M}{C}$

отримуємо 0.76 від номінальної потужності. Характеристика при  $14 \frac{м}{с}$  не є коректною, адже генератор обмежений своїми ресурсами та не може генерувати більше за свою номінальну потужність.

### 3.2 Моделювання різних ситуацій генерації вітроустановки

Задаючись рядом значень опорів навантаження 1, 5, 10 та 20 Ом проводимо моделювання параметрів та стану установки. Змінюючи тип навантаження з R на RL можна змоделювати роботи при активно-індуктивному опорі. Індуктивний опір взятий опираючись на використовувані котушки в блоці живлення та додатково знайдений в мережі інтернет. Загалом індуктивність варіюється від 5 до 10 мГн. Враховуючи постійну частоту на валу двигуна, а отже і постійну частоту струму та напруги в 50 Гц, без проблем можна розрахувати реактивний та повний опір такої котушки. Активна складова опору таких котушок варіюється в межах від 0.7 до 1 Ом, оскільки котушки не є надто потужними. Згідно закону Ома для мережі змінного струму отримуємо наступні формули:

$$X_L = \omega_m \cdot L_{\text{кот}} = 2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot L_{\text{кот}}, \quad (2.60)$$

де  $\omega_m$  – циклічна частота мережі;

$L_{\text{кот}}$  – індуктивність котушки, від 5 до 10 мГн;

$f_m$  – частота струму мережі, в даному випадку 50 Гц.

Повний опір при цьому:

$$Z_L = \sqrt{X_L^2 + R_L^2}, \quad (2.61)$$

де  $R_L$  – активний опір котушки індуктивності, береться приблизно 0.8 Ом.

Розрахунок значень:

$$X_{L5} = \omega_m \cdot L_{\text{кот}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 1.571 \text{ Ом}$$

$$X_{L7} = \omega_m \cdot L_{\text{кот}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 7.8 \cdot 10^{-3} = 2.45 \text{ Ом}$$

$$X_{L10} = \omega_m \cdot L_{\text{кот}} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 3.142 \text{ Ом}$$

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.03	Арк.
							68
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

$$Z_{L5} = \sqrt{X_L^2 + R_L^2} = \sqrt{1.571^2 + 0.61^2} = 1.685 \text{ Ом}$$

$$Z_{L7} = \sqrt{X_L^2 + R_L^2} = \sqrt{2.45^2 + 0.73^2} = 2.556 \text{ Ом}$$

$$Z_{L10} = \sqrt{X_L^2 + R_L^2} = \sqrt{3.142^2 + 0.87^2} = 3.26 \text{ Ом}$$

При чисто активному навантаженні маємо наступні графіки основних параметрів(лінійна напруга та струм , їх миттєве значення, активна потужність та швидкість обертання ротору):

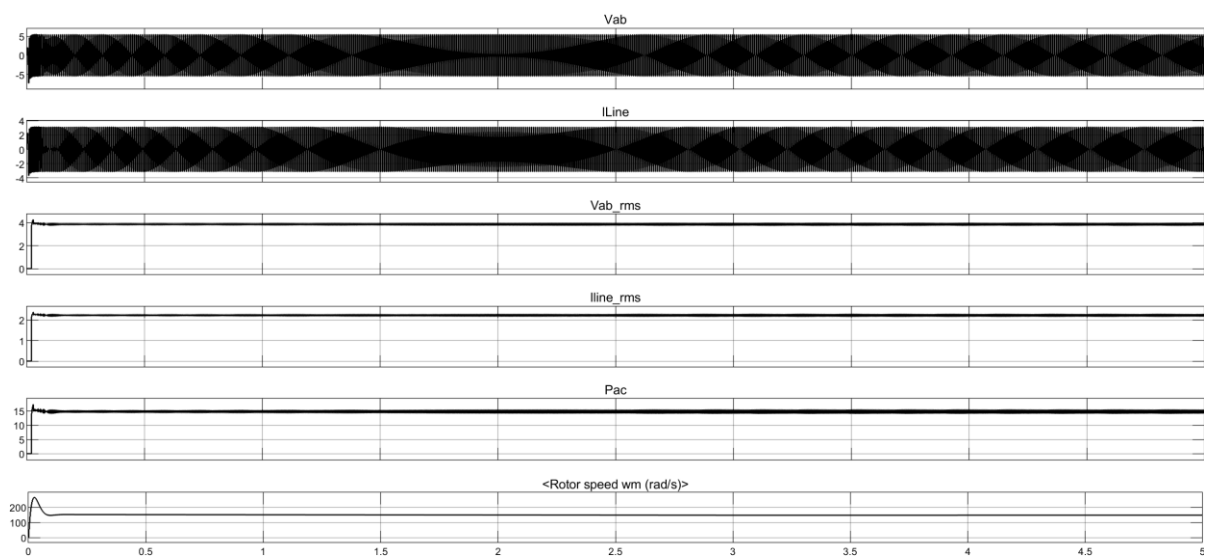


Рис.3.59 – Графіки основних параметрів при 1 Ом

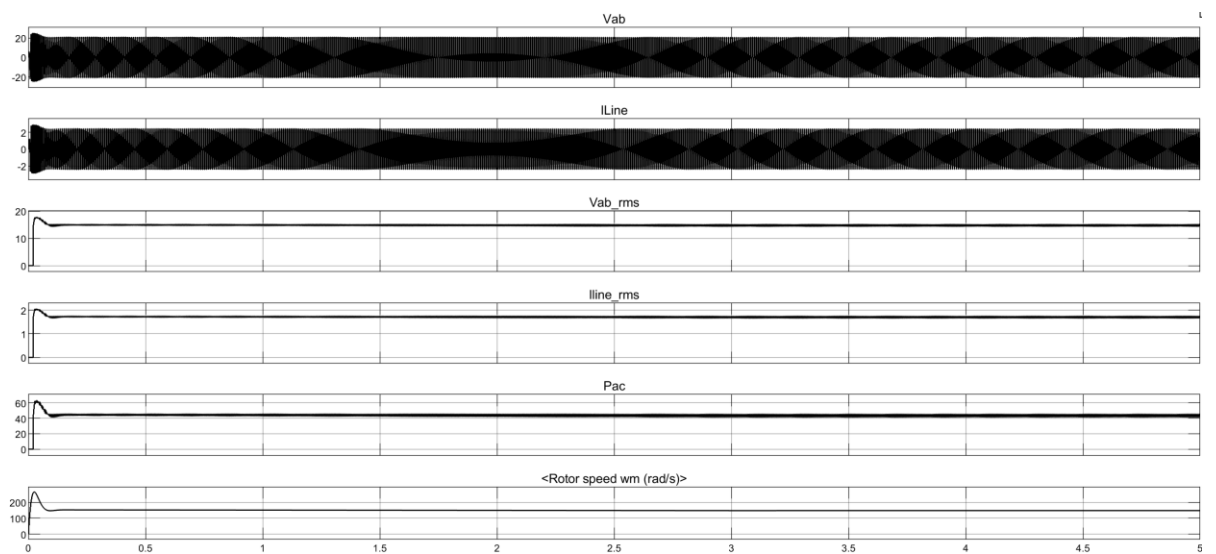


Рис.3.60 – Графіки основних параметрів при 5 Ом

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

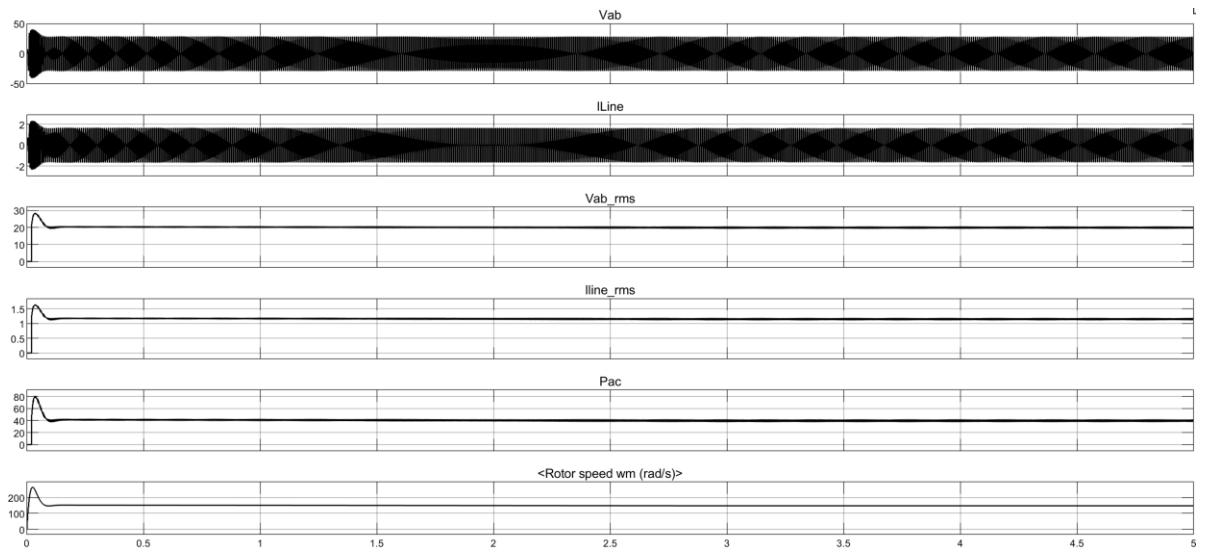


Рис.3.61 – Графіки основних параметрів при 10 Ом

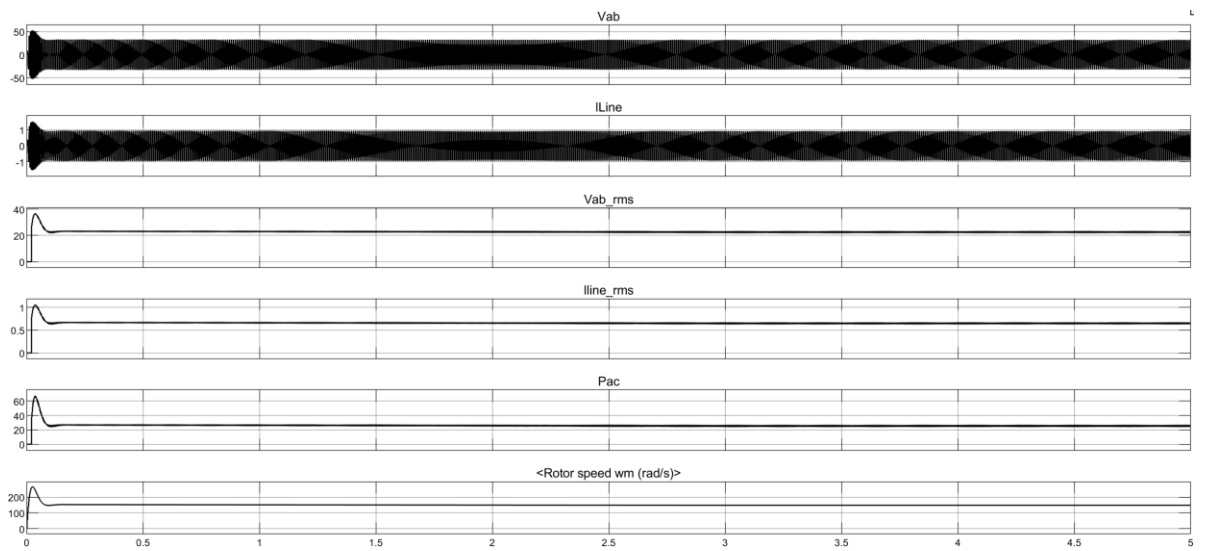


Рис.3.62 – Графіки основних параметрів при 20 Ом

Отримані графіки при активно-індуктивному навантаженні з 5, 7.8 та 10

мГн:

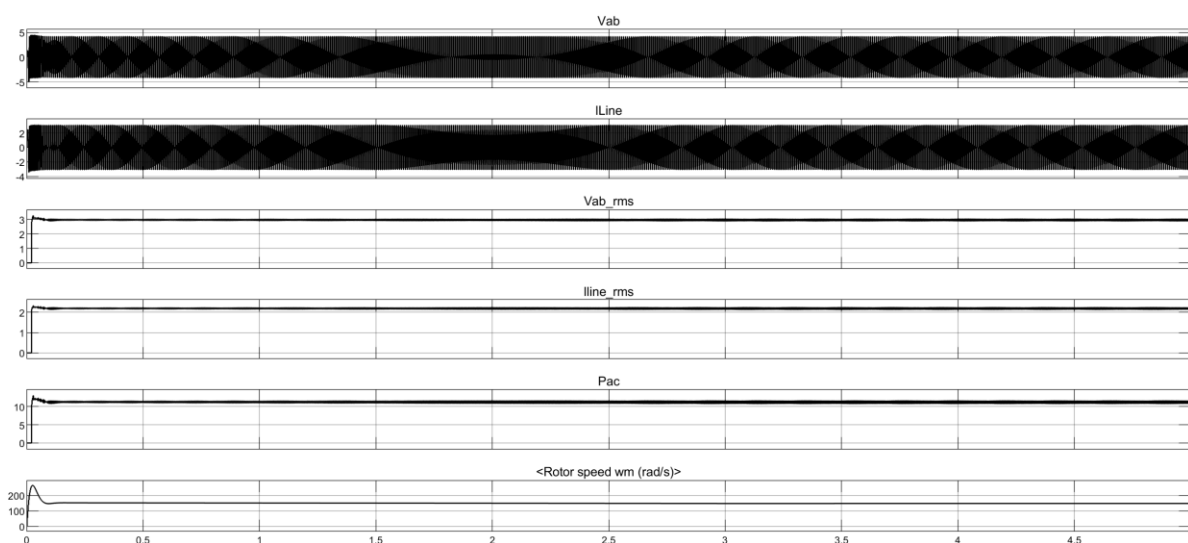


Рис.3.63 – Графіки основних параметрів при 5 Гн та 0.8 Ом

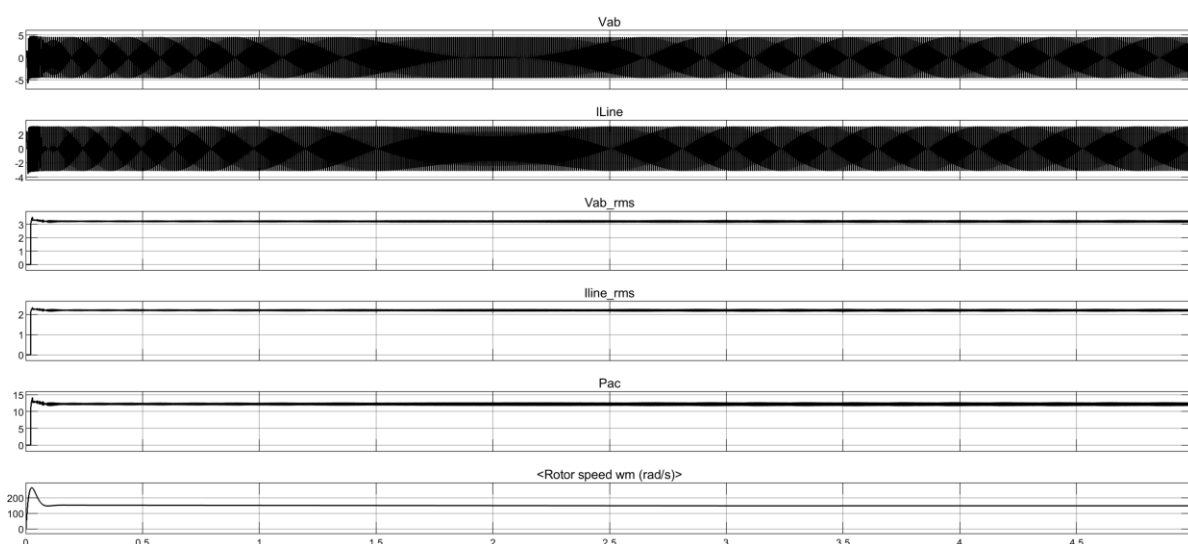


Рис.3.64 – Графіки основних параметрів при Гн та 7.8 Ом

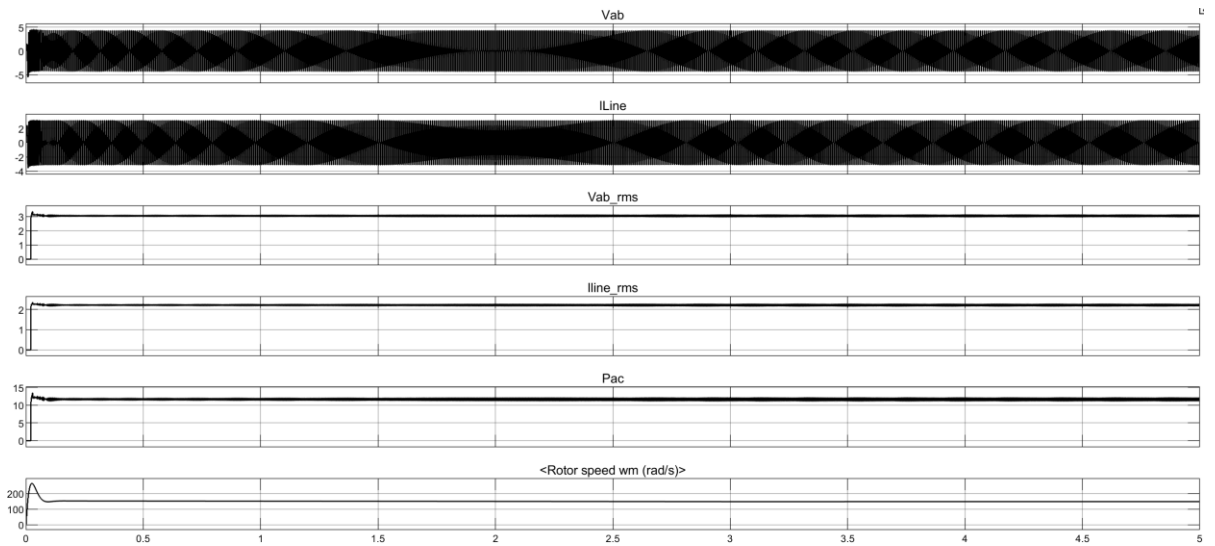


Рис.3.66 – Графіки основних параметрів при 10 Гн та 0.8 Ом

Проведемо дослід при додаванні до котушки 0.01 Гн опір 20 Ом. Тоді отримаємо наступні показники:

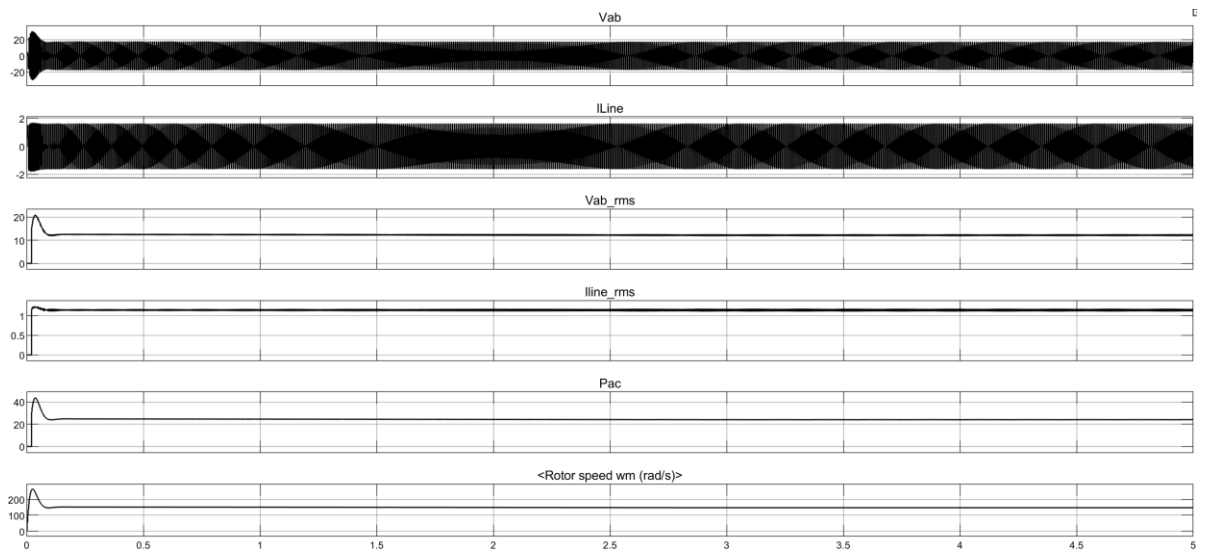


Рис.3.66 – Графіки основних параметрів при 5 Гн та 20 Ом

Тобто при значеннях обороту 2 – 4 Ом для генератора це рівнозначно режиму К.З..

### Висновок до розділу три

Проведені моделювання виконані як передумови для реальних експериментів.



Обрані значення активних опорів: 5 та 10 Ом – симетричне навантаження; котушки індуктивності: 5, 7.8 та 10 мГн – стандартні доступні індуктивності, що використовуються в блоках живлення.

Для 5 та 10 Ом спостерігається зміна потужності та струму у межах 40 Вт та від 1 до 2 А, при лінійному значенні напруги близько 24 В.

Моделювання показало очікувані значення параметрів кола живлення при постійному значенні вітрового потоку. Малі значення опору навантаження сприймаються СГ як К.З., тому моделювання показує значне зниження напруги.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.03	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Розділ 4

### Експериментальне дослідження стенду

#### 4.1 Варіанти підключення навантаження до стенду

В раніше описаному стенду було показано, як можна змінювати значення опору навантаження. Експериментальне дослідження стенду відповідно до теми дипломної роботи передбачає ступінчасту зміну цих значень та зняття при цьому значень струмів та напруги. Крім того попередньо були заміряні значення міжфазного опору самого генератора, та проведено дослід Х.Х.

Фази	А - В	В - С	С - А
Опір, Ом	2.1	2.0	2.3

Табл. 4.7 – Зняті значення міжфазних опорів

Значення опорів взяті найменші з виміряних, так як при оберті СГ по вертикальній осі, зміщується контакт з'єднання щіткового типу, та значення змінюється.

Дослід холостого ходу показав значення напруги холостого ходу та при яких обертах вона досягається.

Параметр	Напруга, В	Оберти, об\хв
Числове значення	23 - 26	500 -750

Табл. 4.8 – Отримані результати холостого ходу

Більш точний замір покажем, що 24 вольт досягається все таки при 500 об/хв.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.04			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив		Омельченко А.Ю.			Розділ 4	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевірів		Пересунько І.І.					72	5
Н. Контр.		Пересунько І.І.				КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.		Федотов В.О.						

## 4.2 Робота стенду на різний тип навантаження

### 4.2.1 Робота стенду на чисто активне навантаження

Робота стенду на чисто активне навантаження означає включення до трифазних виводів генератора опорів з однаковим номіналом, тобто робота при симетричному режимі. Обрані номінали 5 та 10 Ом, включені за схемою «Зірка».

Підключивши опори та починаючи розвивати швидкість обертання валу СГ до номінального, можна чітко помітити, що в міру того, як набирається швидкість, стає дедалі складніше розкручувати СГ. Це означає, що зі збільшенням струму в обмотках статора, збільшується й магнітний потік реакції якоря.

Особливо це видно, якщо спробувати прокрутити ротор самотужки. При цьому при знятті зусиль, ротор практично одразу зупиняється, на відміну від режиму холостого ходу.

Зняті значення струму та напруги при 5 та 10 Ом:

Номінали резисторів, Ом	5	10
Струм, А	2.769	1.385
Фазна напруга, В	13.845	13.853

Табл. 4.9 – Отримані результати при включенні резисторів 5 та 10 Ом

Значення дещо відрізняються від розрахункових, що пояснюється особливостями конструкції реального СГ з лабораторного стенду: наявність ковзаючого контакту та специфікою обмотки статора(один з витків має інший крок укладки).

### 4.2.2 Робота стенду на активно-індуктивне навантаження

Робота стенду активно індуктивне навантаження забезпечується включенням схемою «Зірка» котушок з різним значенням індуктивності, ,

розрахованих за формулами 2.60 та 2.61. Такі котушки відповідно встановлюються в блоках живлення. Схема включення наведена на рисунку 3.67:

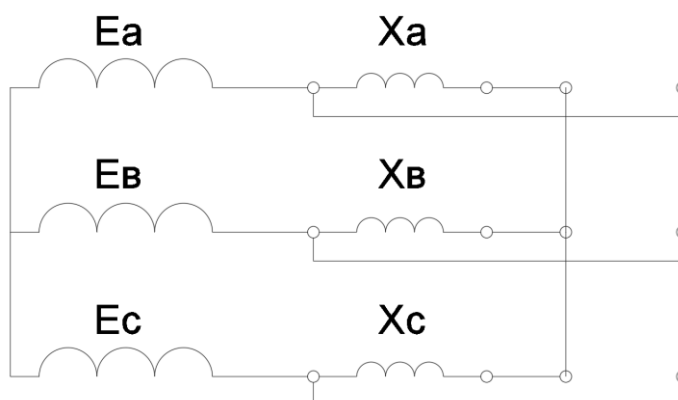


Рис.3.67 – Включення котушок індуктивності схемою «Зірка»

Отримані значення напруги та струму:

Індуктивність, мГн	5	7.8	10
Струм, А	7.006	4.915	3.97
Фазна напруга, В	12.352	12.745	12.943

Табл. 4.10 – Отримані результати при включенні котушко з різними значеннями індуктивності

Оскільки генератор сконструйовано на основі постійних магнітів в роторі, то регулювати їх, як обмоткою збудження неможливо, тому отримуємо такі значення напруги та струму.

### 4.3 Робота стенду на заряд АКБ через контролер

Робота вітроустановки передбачена на буфер у вигляді АКБ між СГ та навантаженням. В залежності від типу АКБ зарядна напруга та струм може бути різною. В даній роботі використовується чотири АКБ GP12200M5, які з'єднано послідовно-паралельно, з напругою в 24 В, при такій схемі.

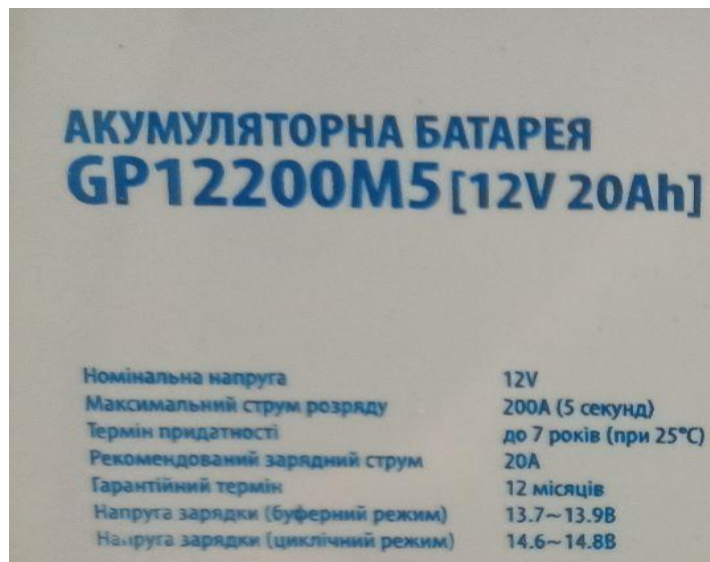


Рис.4.68 – Паспортні дані підключеного АКБ

Така робоча напруга обрана у зв'язку з середньою швидкістю вітру в Дніпропетровському районі (4- 5 м/с). При таких швидкостях вітру генератор максимум може видавати близько 30 - 35 В. Підключення до АКБ виконано за допомогою комплектного випрямляча напруги, представленого в розділі 2.1. Причому, при досягненні максимальної напруги на затискачах АКБ, випрямляч автоматично виконує електричне гальмування.

При досягненні більшої напруги на затискачах випрямляча, ніж на АКБ, з'являється струм зарядки, що коливається разом з зміною швидкості обертання ротора, відповідно і напруги. Проведені дослідження показали, що такий генератор при сильних поривах вітру видає постійний струм до 8 А з напругою на затискачах 23 - 24 В.

#### 4.4 Робота стенду при різних опорах на кожній з фаз

Дане дослідження не є цілком безпечним, тому проходило під серйозним наглядом. До трифазних виводів СГ схемою «Зірка» були підключені опори з наступним номіналом: два цементних резистора по 11 Ом (реальних 10.7 Ом) та один номіналом 1 Ом (реальних 1.1 Ом). Оберти СГ задавались номінальними в 500 об/хв. За допомогою Meatrol ME440 були зняті струми, що коливалися в межах від 2 до 16 А. При такому режимі роботи, тобто несиметричному, без

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.04	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нульового провідника, створюється небезпечний потенціал на нулі навантаження.

	Напруга, В	Струм, А
Фаза А	21.005	1.91
Фаза В	21.006	1.91
Фаза С	3.545	3.545

Табл. 4.11 – Отримані результати при несиметричному навантаженні

Крім того, витримавши роботу стенду близько 30 секунд можна спостерігати суттєвий нагрів резисторів з певною закономірністю: спочатку нагрівається резистор з меншим, а за ним і з високим значенням опору. Причому до температур, що можуть викликати невеликий опік.

Слід зазначити, що для даного генератора вмикання резистора номіналом 1 Ом майже відповідає режиму міжфазного КЗ, що вплинуло на такий нагрів.

#### **Висновок до розділу чотири**

В цьому розділі були проведені реальні експерименти з трифазним навантаженням та на зарядку АКБ.

Попередньо експерименти були проведені на реалістичній моделі вітрогенератора в середовищі MatLab Simulink. Змодельовані та реальні значення мають практично ідентичний характер, відрізняючись на 5 – 15 %.

Також був проведений експеримент з несиметричним навантаженням, де в дві фази вмикаються опори номіналом 11 Ом, а в останню – 1 Ом. Аналіз такого режиму вказує на його небезпечність, з сильним неоднорідним нагрівом спочатку меншого номіналу, а потім і більшого. Відповідно без нульового проводу та з несиметричним навантаженням отримали наступне: підвищення напруги на фазах з 11 Ом до 34 В та спад до 6 В відповідно з 1 Ом. Відповідно

						ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.04	Арк.
							78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

значення струмів для двох фаз – 3.2 А, для останньої близько 15 А з швидким набором температури.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.04	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Висновок до дипломної роботи

Вітроенергетика є і залишається одною з перспективних галузей ВДЕ. На сьогоднішній день більшість країн світу налагоджує свої виробничі потужності вітрогенераторів.

У дипломній роботі було розраховано та створено стенд одної з таких малопотужних установок, з заявленою номінальною потужністю 400 Вт швидкістю вітру  $12.3 \frac{m}{c}$ . Площа ефективної робочої площі ротора складає близько  $1.2 m^2$ . При цьому значення головних розмірів СГ (діаметр та довжина) складають 11 см та 4 см.

Проведені розрахунки СГ при різних значеннях та типу навантаження показали, що вітрова установка ефективно працює при трифазному симетричному навантаженні 5 Ом і струмі 5 А, однак основний режим роботи залишається зарядка АКБ (до 8 А) з подальшим підключенням навантаження.

Сам стенд для дослідів складається системи ПЧ-АД, вітроустановки (СГ), вимірюючих приладів та роз'ємів під навантаження. Можливість регулювання швидкості обертання валу, тобто імітація зміни вітрового потоку, та зміни навантаження дозволить наочно продемонструвати значення струмів та напруги для різних режимів роботи та провести відповідні дослідження, що і було виконано в даній бакалаврській дипломній роботі.

Опираючись на практичні досліді було запропоновано декілька варіантів рішень проблем вітроустановки, а саме: зменшення зазору між статором та ротором та зміна кута нахилу кінців лопастей. Для повноцінної роботи на трифазне навантаження необхідно додатково мати інвертор напруги.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.В			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив		Омельченко А.Ю.			Висновок	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевірів		Пересунько І.І.					77	2
Н. Контр.		Пересунько І.І.				КНУ гр. ЕЕМ-20		
Затвердж.		Федотов В.О.						



Проведені моделювання схожої вітроустановки показало, що максимальна потужність при номінальному потоці вітру та трифазному навантаженні в 10 Ом складає близько 40 Вт, причому слід зазначити, що 400 Вт відповідає максимальній потужності при роботі на АКБ, а моделювання проводилося для демонстрації принципу генерації вітроустановки.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.В	Арк.
						81
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## Список використаних джерел

1. IEA50 Wind: веб сайт. URL: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/wind>.
2. Виробництво електроенергії з ВДЕ у 2023 році. SAF Sustainable Agribusiness Forum: веб сайт. URL: <https://saf.org.ua/news/1866/>.
3. Швидке та демократичне розгортання відновлювальної енергетики. Екодія: веб сайт. URL: [https://ecoaction.org.ua/diyalnist/vde?gad\\_source=1&gclid=CjwKCAjwo6GyBhBwEiwAzQTmc3VmMye8RrmTYPxDK8M0vPEM1EldCVPK0ymQqNDO6bOKdNS7B6sOLxoC2V0QAvD\\_BwE](https://ecoaction.org.ua/diyalnist/vde?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwo6GyBhBwEiwAzQTmc3VmMye8RrmTYPxDK8M0vPEM1EldCVPK0ymQqNDO6bOKdNS7B6sOLxoC2V0QAvD_BwE).
4. Вітрогенерація України у 2022 р. через війну додала в потужності в 10 разів менше запрогнозоване. Interfax Ukraine: веб сайт. URL: <https://interfax.com.ua/news/general/880088.html>.
5. Компанія ДТЕК ВДЕ взяла участь у Wind Europe 2024. DTEK зелена енергетика: веб сайт. URL: <https://renewables.dtek.com/media-center/press/dtek-renewables-took-part-in-windeurope-2024/>.
6. Wind energy today: about wind and energy today. Wind Europe: веб сайт. URL: <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-today/>.
7. Іван Гавриляк. Вітряна електроенергія в Україні стала дешевше за звичайну. Нова енергія. Главком: веб сайт. URL: [https://glavcom.ua/new\\_energy/photo/vitrjana-elektroenerhija-v-ukrajini-stala-deshevshe-za-zvichajnu-878015.html#google\\_vignette](https://glavcom.ua/new_energy/photo/vitrjana-elektroenerhija-v-ukrajini-stala-deshevshe-za-zvichajnu-878015.html#google_vignette).
8. Cumulative installed wind power capacity in China from 2014 to 2023. Statista: веб сайт. URL: <https://www.statista.com/statistics/950342/china-accumulated-installed-wind-power-capacity/>.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.Л			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат				
Розробив		Омельченко А.Ю.			Список використаних джерел	Літ.	Арк.	Акрушіє
Перевірів		Пересунько І.І.					79	3
Н. Контр.		Пересунько І.І.						
Затвердж.		Федотов В.О.						
						КНУ гр. ЕЕМ-20		

9. Аналіз розміру та частки китайського ринку відновлюваної енергії – тенденції зростання та прогнози (2024–2029 рр.). Mordor Intelligence: веб сайт. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2017/02/11/620565/>.
10. Wind energy in Europe: 2023 Statistics and the outlook for 2024-2030. Wind Europe: веб сайт. URL: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2023-statistics-and-the-outlook-for-2024-2030/>.
11. Вітрова енергетика в Україні та світі. Хмарочос: веб сайт. URL: <https://hmarochos.kiev.ua/2022/01/18/vitrova-energetyka-v-ukrayini-ta-sviti/>.
12. Енергетика України 2021. Business Views: вебсайт. URL: [https://businessviews.com.ua/ru/get\\_file/id/energy-of-ukraine-2021.pdf](https://businessviews.com.ua/ru/get_file/id/energy-of-ukraine-2021.pdf).
13. Вітрогенератор – як не викинути гроші на вітер? Trueelectro: веб сайт. URL: <https://trueelectro.com.ua/wind-power/>.
14. Що варто знати про вітрові електростанції України. Na chasi: веб сайт. URL: <https://nachasi.com/tech/2018/04/19/wind-stations-ukr/>.
15. УВЕА Українська вітроенергетична асоціація: веб сайт. URL: <https://uwea.com.ua/ua/>.
16. Принцип роботи вітрогенератора. Венкон: веб сайт. URL: <https://vencon.ua/ua/articles/printsip-raboty-vetrogeneratora>.
17. Володимир Омельченко. Сектор відновлювальної енергетики України до, під час та після війни. Разумков центр: веб сайт. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sector-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pid-chas-ta-pislya-viyny>.
18. Вітрова енергетика в Україні: 7 найпотужніших станцій. #ШОТАМ: веб сайт. URL: <https://shotam.info/vitrova-enerhetyka-v-ukraini-7-naypotuzhnishykh-stantsiy/>.
19. Розрахунок вітрогенератора. Державний університет «Житомирська політехніка». Освітній портал. 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%20E2%84%964.pdf](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%20E2%84%964.pdf).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.Л	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

20. Аеродинамічний розрахунок ротора вітроустановки. StudFiles файловий архів для студентів. URL: <https://studfile.net/preview/9708344/page:8/#17>.

21. Вітроенергетика [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка» / Головка В. М. ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 5,5 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 88 с.

22. 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. – 31 с.

23. Проектування електричних машин : навч. посіб. / Д.В. Циценков, О.Б. Іванов, О.В. Бобров, В.В. Кузнецов, В.В. Артемчук, М.О. Баб'як ; Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Д. : НТУ «ДП», 2020. – 408 с.

24. Youtube. (2023, October 02). «Большой обзор ветрогенератора с АлиЭкспрес на 1000 ватт» [Video file]. Retrieved from: <https://www.youtube.com/watch?v=KUAFxK3geOo>.

25. Youtube. (2023, November 07). «Модернизация ветряка с АлиЭкспресс/ Новый винт/ Работа на 12/24/48 вольт/ Будущие модернизации» [Video file]. Retrieved from: <https://www.youtube.com/watch?v=9DNTnhzfoV4>.

26. Total energy: Renewable Energy Production and Consumption by Source. Eia U.S. Energy Information Administration: Independent Statistics and Analysis. 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>.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.24.303-18.Л	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84