

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені**  
**ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики**

**Кафедра автоматизації енергосистем**

До захисту допущено

Завідувач кафедри

Анатолій МАРЧЕНКО

«10» червня 2025 р.

**Дипломний проєкт**  
**на здобуття ступеня бакалавра**  
**за освітньо-професійною програмою**  
**«Управління захист та втоматизація енергосистем»**  
**спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та**  
**електромеханіка »**

Виконав:

студент IV курсу, групи ЕК-11 Олєфір Ілля  
Дмитрович

Керівник:

Доцент, к.т.н.,  
Марченко Анатолій Андрійович

Рецензент:

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Факультет електроенерготехніки та автоматики**  
**Кафедра автоматизації енергосистем**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій МАРЧЕНКО

«10» червня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на дипломний проєкт студенту**

Олефіру Іллі Дмитровичу

1. Тема проєкту «Вплив вітрової електростанції на процеси регулювання напруги у вузлі приєднання до енергосистеми», керівник проєкту Марченко Анатолій Андрійович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1720-с

2. Термін подання студентом проєкту: 10 червня 2025 р.

**3. Вихідні дані проєкту:**

3.1. Схема електричних з'єднань підстанції 110/10 кВ «Бруків» із вихідною інформацією.

3.2. Окремі блоки електромережі з ВЕС у програмному забезпеченні Simulink.

**4. Зміст пояснювальної записки:**

4.1. Опис підстанції 110/10 кВ «Бруків», розрахунок струмів короткого замикання

4.2. Математичне регулювання напруги компонентів вітрової турбіни з енергосистемою.

4.3. Моделювання елементів у системі MATLAB/SIMULINK

**5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):**

5.1. Схема головних електричних з'єднань підстанції 110/10 кВ «Бруків».

5.2. Результати досліджень режимів роботи вітрової турбіни паралельно з підстанцією «Бруків»

## 6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

## 7. Дата видачі завдання:

### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
	Підбір та аналіз електричної схеми підстанції	до 27.05.2025 р.	
	Розрахунок струмів короткого замикання	до 28.05.2025 р.	
	Матеріали, методи, та аналіз основних відомостей про ВЕС	до 30.05.2025 р.	
	Аналіз інформації про регулювання напруги у вузлі	до 31.05.2025 р.	
	Аналіз інформації про регулювання реактивної потужності	до 01.06.2025 р.	
	Створення електричної моделі енергосистеми з ВЕС	до 05.06.2025 р.	
	Оформлення графічної частини	до 07.06.2025 р.	
	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу.	до 08.06.2025 р.	
	Попередній захист	10.06.2025 р.	

Студент

Керівник проєкту

Ілля ОЛЕФІР

Анатолій МАРЧЕНКО

## ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	1	
2	A4	141.1119.011.ДБ	Пояснювальна записка	68	
3	A1	141.1119.011.ТК1	Схема електричних з'єднань підстанції 110/10 кВ	1	
4	A1	141.1119.011.ТК2	Засоби регулювання напруги в електричній мережі	1	
5	A1	141.1119.011.ТК3	Модель енергосистеми з вітровою установкою	1	
5	A1	141.1119.011.ТК4	Результати дослідження	1	

					<i>141.ЕК1119.011.ДБ</i>			
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Олефір І.Д.				Відомості дипломного проєкту	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Марченко А.А						3	1
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА гр.ЕК-11		
Н. Контр.	Шполянський О.Г.							
Затвердив	Марченко А.А							

Пояснювальна записка  
до дипломного проєкту

на тему: «Вплив вітрової електростанції на процеси регулювання напруги у вузлі  
приєднання до енергосистеми»

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломного проекту «Вплив вітрової електростанції на процеси регулювання напруги у вузлі приєднання до енергосистеми» містить 73 аркуші тексту, 55 ілюстрацій, 4 таблиці та 19 використані джерела.

**Об'єкт дослідження** – Вузол електричної мережі з вітровою електростанцією.

**Предмет дослідження** – Методи регулювання напруги у вузлі приєднання вітрової станції до енергосистеми.

**Мета дослідження** – Розробка моделі для дослідження режимів роботи вітрової станції, що працюють паралельно з енергосистемою.

**Результати роботи** – На основі аналізу літературних джерел створено окремі елементи та модель вітрової станції, що працюють паралельно з енергосистемою.

Використовуючи створену модель, виконано ряд досліджень для оцінки впливу збурень на зміну напруги у вузлі електричної мережі.

Отримані результати можуть бути використані при проектуванні вітрових станцій, що працюють паралельно з енергосистемою.

**Публікації за тематикою досліджень** - Марченко А. А., Олефір І. Д. Застосування алгоритму нечіткої логіки в системах автоматичного регулювання напруги. "Міжнародний науково-технічний журнал" Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – 2024. – С. 13-16.

**Ключові слова:** ПІДСТАНЦІЯ «БРУКІВ», ВІТРОВА ТУРБІНА, МОДЕЛЮВАННЯ, РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, НАПРУГА, ВІТРОВА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, МЕТОДИ РЕГУЛЮВАННЯ.

					141.ЕК1119.011.ДБ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ABSTRACT

The explanatory note to the diploma project “The influence of a wind power plant on the processes of voltage regulation at the grid connection point” contains 73 pages of text, 55 illustrations, 4 tables and 19 sources used.

**Object of study** - A power grid node with a wind power plant.

**Subject of research** - Methods of voltage regulation in the node of connection of a wind power plant to the power system.

**The purpose of bachelor work** - To develop a model for studying the operating modes of a wind power plant operating in parallel with the power system.

**Results** - Based on the analysis of literature sources, individual elements and a model of a wind power plant operating in parallel with the power system were created.

Using the created model, a number of studies have been performed to assess the impact of disturbances on voltage changes in the power grid node.

The obtained results can be used in the design of wind power plants operating in parallel with the power system.

**Publications on the subject of research** - Marchenko A. A., Olefir I. D. Application of fuzzy logic algorithm in automatic voltage control systems. "International Scientific and Technical Journal "Modern Problems of Electric Power Engineering and Automation." - 2024. - pp. 13-16.

**Keywords:** BROOKS SUBSTATION, WIND TURBINE, MODELING, REACTIVE POWER, VOLTAGE, WIND POWER PLANT, CONTROL METHODS.

					<i>141.EK1119.011.ДБ</i>	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



3.2.2 Блок Three-Phase Fault .....	51
3.2.3 Three-Phase Series RLC Load.....	52
3.3 Моделювання вітровою турбіни на 1,5 МВт .....	53
3.3.1 Дослідження перехідних процесів вітрової станції по потужності паралельно з енергосистемою. ....	55
3.4 Дослідження впливу вітрової електростанції на процеси регулювання напруги у вузлі з приєднання до енергосистеми.....	58
3.4.1 Дослідження впливу трифазного короткого замикання .....	62
3.4.2 Дослідження впливу зміни навантаження.....	65
Висновок до розділу 3 .....	67
ВИСНОВКИ .....	69
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	71

					<i>141.EK1119.011.ДБ</i>	Арк.
						8
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

КЗ – коротке замикання;

ПС – підстанція;

ВЕС – вітрова електростанція;

ВЕУ – вітрова електрична установка;

СГ – синхронний генератор;

АГ - асинхронний генератор;

РПН - регулювання перемикачів під напругою;

ПБЗ - перемикач без збудження;

САК – система автоматичного керування;

СК – синхронний компенсатор;

ШІМ - широтно-імпульсної модуляції;

					<i>141.ЕК1119.011.ДБ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

У той час як вітрова енергетика набуває все більшої популярності в світі, при побільшанні дефіциту традиційних джерел енергії, зниженні можливостей виробництва та тільки виборі рішення щодо зменшення викидів парникових газів, така ситуація. Інтеграція вітроелектростанцій в енергетичну систему – це один з дуже важливих етапів забезпечення енергетичної безпеки країни, а також багато інших креативних можливостей для адаптації та перетворення.

Незважаючи на це, спосіб роботи електростанцій, зокрема імпульсна електроенергія залежно від швидкості вітру, це створює ще кілька технічних проблем для електричної системи. Головне завдання цієї роботи – зберігання стабільності регулювання напруги в точках ланцюга підключення. Падіння і підймання напруги приводять не тільки до зниження якості електроенергії, а до перевірки, наскільки надійно працюють як вітроелектростанції, так і ті, що працюють для споживання одночасно з ними.

Забезпечення стабільного рівня напруги у вузлі з підключеною ВЕС є одним із ключових завдань для енергетичних інженерів. Системи керування повинні швидко реагувати на зміни у роботі вітрової генерації, коригуючи як активну, так і реактивну потужність. При цьому важливими залишаються такі функції, як автоматичний пуск, синхронізація з мережею та підтримка необхідної частоти обертання генераторного обладнання.

					<i>141.ЕК1119.011.ДБ</i>	Арк.
						10
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

# 1. ТЕХНІЧНИЙ ОПИС ПІДСТАНЦІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ 110/10 КВ

## 1.1 Показ підстанції та обладнання

Підстанція 110/10 кВ відіграє ключову роль у передачі та розподілі електроенергії, отриманої від вітроелектростанцій. Вона виконує функцію перетворення напруги з рівня 110 кВ до 10 кВ, що дозволяє ефективно передавати електроенергію до споживачів. Основними компонентами підстанції є:

- Силові трансформатори, що виконують зниження напруги.
- Роз'єднувачі, які забезпечують безпеку при проведенні ремонтних робіт.
- Вимикачі, що захищають систему від перевантажень та коротких замикань.
- Автоматизовані системи управління, які контролюють параметри мережі.

Вибір головної схеми відіграє ключову роль у проектуванні електричної частини підстанції, оскільки саме вона визначає склад елементів та їх взаємозв'язки. Обрана схема слугує основою для розробки принципової схеми електричних з'єднань, схем власних потреб, вторинних з'єднань, монтажних схем тощо. Головна схема електричних з'єднань підстанції, що аналізується, представлена на рис. 1.1.

На підстанції використовуються:

- Роз'єднувач РГП-110/10 1000 УХЛ1 з приводом ПР-05-2БУХП;
- Трансформатори струму НКФ-110-83У1;
- Силовий трансформатор ТДТН-6300/110У1;
- Вимикач елегазовий ВГТ-110-40/2500У1;
- Роз'єднувач РДЗ-2-110-1000У1 з приводом ПР-05-2БУХП.

					<i>141.ЕК1119.011.ДБ</i>			
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Олефір І.Д.				<b>ТЕХНІЧНИЙ ОПИС ПІДСТАНЦІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ 110/10 КВ</b>	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив	Марченко А.А						11	26
Реценз.								
Н. Контр.	Шполянський О.Г.							
Затвердив	Марченко А.А							
						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА гр.ЕК-11		

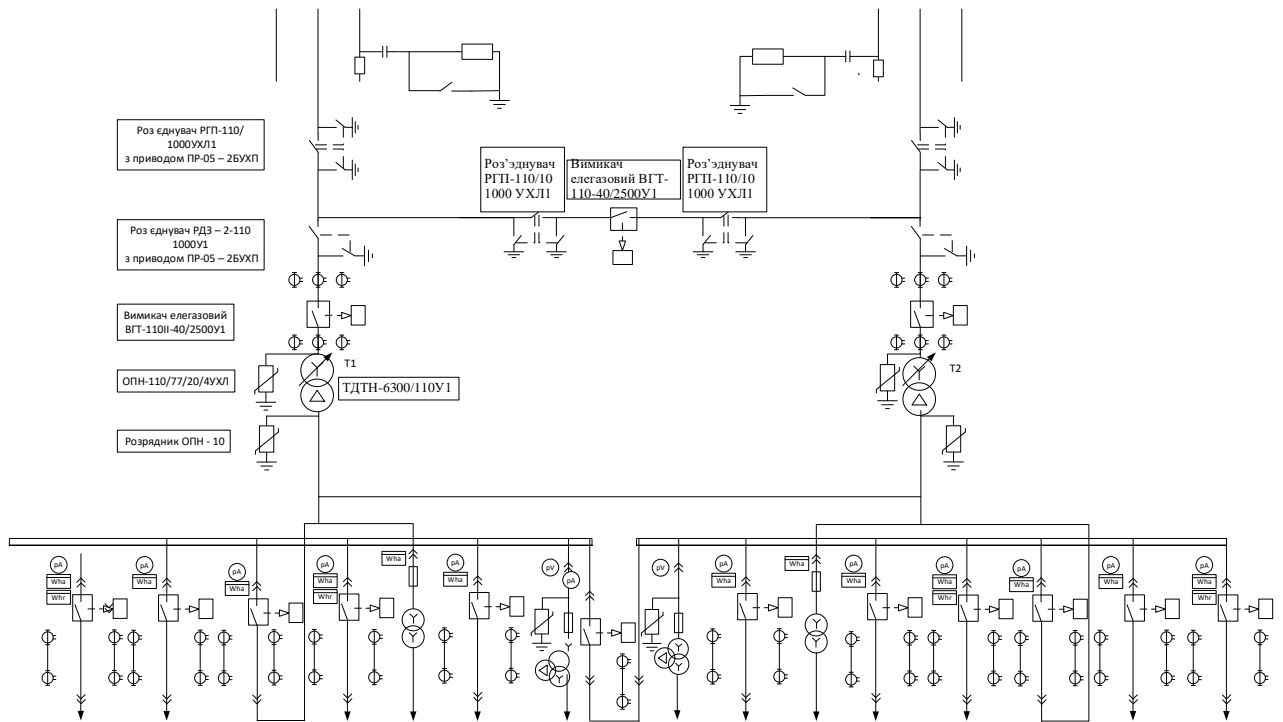


Рисунок 1.1- схема електричних з'єднань підстанції 110/10 «Бруків»

### 1.1.2 проведення струмів К.З з метою вибору обладнання

Зачення максимального перспективного навантаження на шинах 10 кВ, існуючих споживачів визначимо шляхом сумування розрахункових навантажень по головних ділянках відходящих ПЛ-10 кВ. Розрахункові навантаження по головних ділянках ПЛ-10 кВ, наведені в табл.1.1. Денне навантаження Вечірнє навантаження ПЛ 10 кВ № 80 ПЛ 10 кВ № 81 ПЛ 10 кВ № 82 ПЛ 10 кВ № 83 ПЛ 10 кВ № 84 Вечірнє навантаження ПЛ 10 кВ № 80 ПЛ 10 кВ № 81 ПЛ 10 кВ № 82 ПЛ 10 кВ № 83 ПЛ 10 кВ № 84

Таблиця 1.1. – Розрахункові навантаження мережі 10 кВ

Номер лінії	Рзаг (день), кВт	Рзаг (вечір), кВт
ПЛ 10 кВ № 80	2912,3	2845,2
ПЛ 10 кВ № 81	1885,5	1957,6

Таблиця 1.1. – продовження

ПЛ 10 кВ № 82	917,9	664,4
ПЛ 10 кВ № 83	586,2	544,3
ПЛ 10 кВ № 84	1106,6	1482,3

При визначенні повного навантаження підстанції «Бруків», потрібно знайти максимальне значення сумарним вечірнім та сумарним денним навантаженням. Максимальне навантаження розраховується за формулою:

$$S_{max} = \frac{P_{заг}}{\cos\varphi} * 1,12 \text{ кВА.}$$

де 1,12- коефіцієнт, який враховує електроенергетичні втрати;

$P_{заг}$  - найбільше значення навантаження . Сумарне денне навантаження складе:

$$P_{\Sigma \text{веч}} = 7493,8 \text{ кВт.}$$

$$P_{\Sigma \text{ден}} = 7418,5 \text{ кВт.}$$

Як ми бачимо денне навантаження менше за вечірнє, тому знаходимо максимальне навантаження РТП «Бруківка» за формулою:

$$S_{max} = \frac{P_{заг}}{\cos\varphi} * 1,12 = \frac{7493,8}{0,88} * 1,12 = 9441,7 \text{ кВА.}$$

Щоб забезпечити належний рівень надійності електропостачання на підстанції «Бруків» (Рис. 1.1), необхідно передбачити встановлення двох силових трансформаторів. Їх номінальна потужність має бути розрахована таким чином, щоб у разі виходу з ладу одного з трансформаторів, інший зміг передавати необхідну потужність споживачам без перевищення допустимого рівня перевантаження, встановленого ПТЕ.

									141.ЕК1119.011.ДБ	Арк.
										13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Відповідно до ДСТУ 3463-96, для масляних силових трансформаторів коефіцієнт перевантаження в умовах тривалих аварійних режимів становить 1,5. Отже, для РТП-110 «Бруків» розрахункова потужність одного трансформатора буде:

$$S_{T1} = \frac{S_{max}}{1,5} = \frac{9441,7}{1,5} = 6294,47 \text{ кВА}$$

Таким чином, для підстанції «Бруків» обираються два трансформатори типу ТМН-6300/110 із співвідношенням потужності обмоток 100:100:100. Основні технічні характеристики цих трансформаторів наведені в таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики ТМН-6300/110

Потужність, кВА	Регулювання напруги	Номинальна напруга, кВ (ВН)	Номинальна напруга, кВ (НН)	Втрати, кВт (XX)	Втрати, кВт (КЗ)	Напруга КЗ, %	Струм XX, %
6300	±9×1,7 8	115	11	11,5	44	10,5	0,8

На рис. 1.2 наведена структурна схему підстанції «Бруків» із вказаними точками КЗ, які будуть розглядатись.

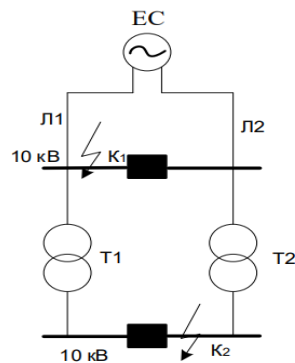


Рисунок 1.2 – Електрична схема заміщення підстанції «Бруків»



Тепер обчислимо значення трифазного КЗ. Зробимо перетворення відносно точок короткого замикання, що розглядаються.

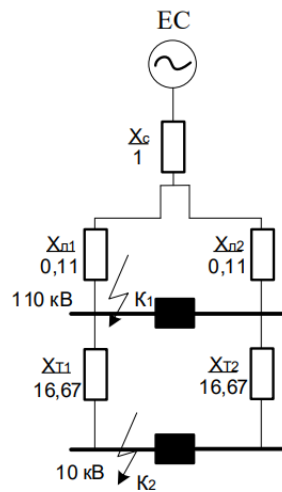


Рисунок 1.3 – Схема заміщення підстанції «Бруків»

Проведемо розрахунок для I станції шин 110 кВ точки К1, формула має вираз:

$$X_{E\_K1\_1} = X_c + X_{Л1} = 1 + 0,159 = 1,159 \text{ в. о.}$$

$$X_{E\_K1\_2} = X_c + X_{Л2} = 1 + 0,191 = 1,191 \text{ в. о.}$$

Проведемо розрахунок для періодичні складові струмів короткого замикання для I станції шин 110 кВ:

$$I_{П0\_K1\_1} = \frac{X_c}{X_{E\_K1\_1}} * I_{61} = \frac{1}{1,159} * 5,249 = 4,529 \text{ кА.}$$

$$I_{П0\_K1\_2} = \frac{X_c}{X_{E\_K1\_2}} * I_{62} = \frac{1}{1,191} * 5,249 = 4,409 \text{ кА.}$$

Проведемо розрахунок для ударних струмів короткого замикання для I станції шин 110 кВ:

$$i_{уд\_K1\_1} = \sqrt{2} * K_y * I_{П0\_K1\_1} = \sqrt{2} * 1,61 * 4,529 = 10,313 \text{ кА.}$$

$$i_{уд\_K1\_2} = \sqrt{2} * K_y * I_{П0\_K1\_2} = \sqrt{2} * 1,61 * 4,409 = 10,038 \text{ кА.}$$

Проведемо розрахунок для повних струмів короткого замикання для I станції шин 110 кВ:

									141.ЕК11119.011.ДБ	Арк.
										16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						



### 1.1.3 Перевірка обладнання

Згідно результатів розрахунків РТП «Бруків», для перевірки параметрів обладнання при короткого замикання на двох шинах, ми бачимо, що періодичні складові струму КЗ складають 4,529-3,39 кА., коли ударний струм КЗ дорівнює 10,313- 7,704 кА..

З цього ми можемо проаналізувати, що роз'єднувачі РГП-110/1000УХЛ1 з приводом ПР-05-2БУХП та РДЗ-2-110-1000У1 з приводом ПР-05-2БУХП, витримують ударні струми в 10,313 кА, бо їх паспортні характеристики ударного струму дорівнюють 63 кА, також вимикач елегазовий ВГТ-1100-40/2500У1, також витримає такі ударні струми бо він має ударний струм 100кА.

В цій частині розділі провели роботу аналізу підстанції класу напруг 110/10 кВ., включаючи характеристики основного обладнання та розрахунок струмів короткого замикання. Ця підстанція має дві лінії електропередач напругою 110 кВ з якої відходить лінії напругою 10 кВ. Для них встановлені два силові трансформатори ТДТН-6300/110У1, які працюють паралельно один з одним. Вони забезпечуються надійність при аварійних ситуаціях та планових ремонтах або КЗ.

Також при розрахунках КЗ на шинах підстанції видно, що максимальне значення: ударного струму – 10,313 кА., періодичного складового струму КЗ - 4,529 кА., повного струму КЗ – 5,982 кА.. Ці значення отримані шляхом поетапного перетворення схеми заміщення для шин підстанцій.

### 1.2 Загальні характеристики вітроустановок

Вітроустановки – це інженерні системи, що перетворюють кінетичну енергію вітру на електричну. Вони є ключовими компонентами вітроелектростанцій(ВЕС)та складаються з турбіни, генератора, системи управління, щогли та допоміжного обладнання.

Вітроенергетика є однією з найбільш швидкозростаючих галузей відновлювальної енергії у світі, завдяки екологічній чистоті, безпеці та відносно

					141.ЕК1119.011.ДБ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

низькій вартості виробництва електроенергії. Основне джерело енергії у вітроустановках – це вітер, тобто рух повітряних мас, зумовлений різницею атмосферного тиску та впливом сонячного випромінювання.

Сучасні вітроустановки можуть мати різну потужність – від кількох сотень ват для індивідуального використання до кількох мегават для промислових ВЕС. Найбільш поширені – це горизонтальні трилопатеві турбіни, які мають високу ефективність і здатні працювати за широкого діапазону швидкостей вітру.

Основні компоненти вітроустановки:

- Лопаті турбіни (ротор) – вловлюють енергію вітру та обертають вал генератора.
- Гондола – містить редуктор, генератор, систему охолодження і керування.
- Щогла (вежа) – конструкція, на якій закріплена гондола. Висота варіюється від 30 до 150м.
- Система орієнтації – повертає лопоті у напрямку вітру.
- Гальмівна система – зупиняє ротор у разі аварійної ситуації чи надмірної швидкості вітру.
- Система перетворення та передачі енергії – включає інвертори, трансформатори та кабелі для подачі електроенергії в мережу.

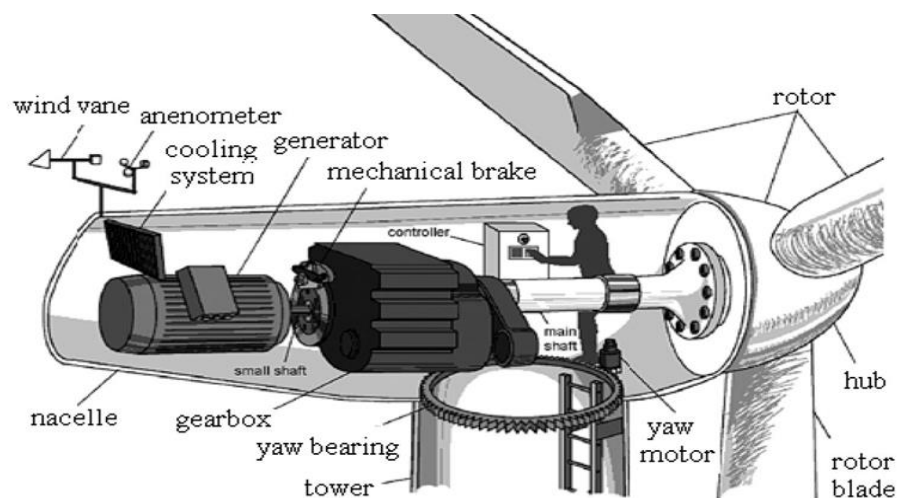


Рисунок 1.4 - Вітрогенератор з відкритою гондолою [16]

									Арк.
									19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Принцип роботи:

Повітряні маси, проходячи повз лопаті, створюють підйомну силу(аналогічно до крила літака), що обертає ротор. Обертання передається через редуктор на генератор, який виробляє змінний струм. Далі струм трансформується та подається в енергомережу.[1]

Класифікація ВЕУ:

1. За розміром та потужністю:

- Мікроустановки (до 1 кВт) – для приватних домогосподарств;
- Малі (1-100 кВт) – для фермерських господарств, невеликих підприємств;
- Середі (100-1000 кВт) – локальні мережі;
- Великі (від 1МВт ) – для промислових ВЕС.

1. За напрямком осі обертання

-Горизонтальні – найефективніші, потребують орієнтації за вітром;

-Вертикальні – простіші в обслуговуванні, менш чутливі до напрямку вітру.

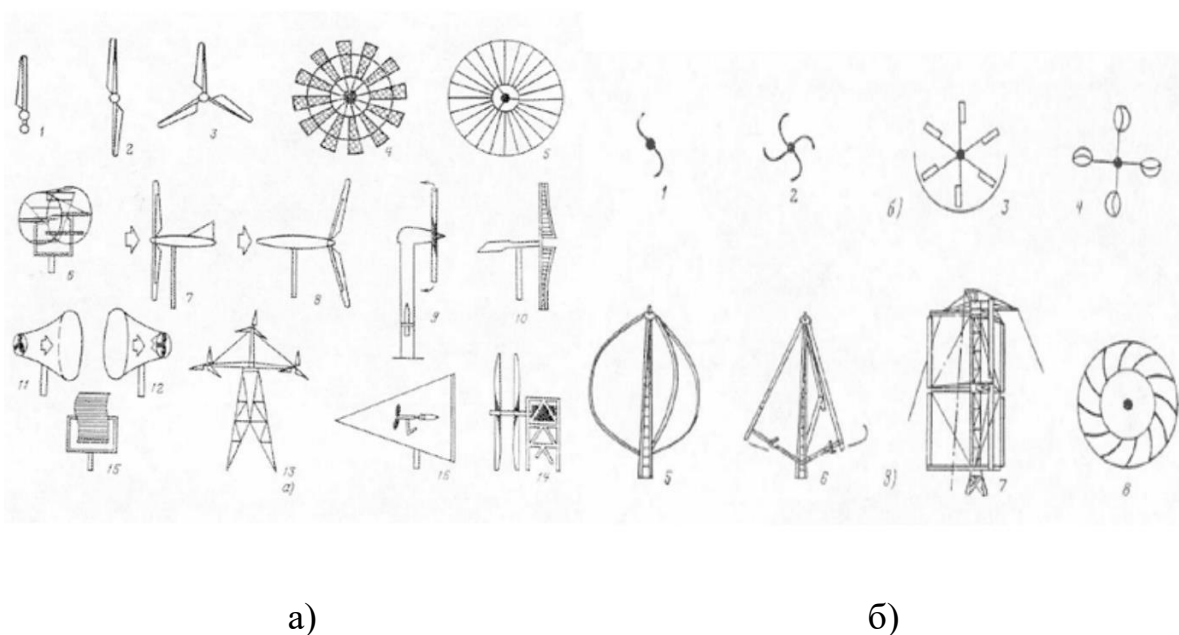


Рисунок 1.5 – Конструктивні виконання вітрогенераторів а) з горизонтальною віссю, б) вертикальною віссю. [16]

					141.ЕК1119.011.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

За місцем установки:

- Наземні ;
- Морські;

Ефективність ККД:

Коефіцієнт корисної дії сучасної вітроустановки коливається в межах 35-40%, залежно від моделі та умов. Найбільшу ефективність вони демонструють при швидкості вітру 10-15 м/с.

Переваги вітроустановок :

- Відсутність CO<sub>2</sub> та інших шкідливих речовин
- Незалежність від імпортного палива
- Тривалий термін служби (до 25-30 років)
- Можливість використання у відділених районах

Недоліки :

- Залежність від погодних умов (нестабільна генерація);
- Вплив на ландшафт і шумове забруднення;
- Необхідність великих площ для розміщення;
- Висока початкова вартість обладнання та будівництва.

Висновок:

Вітроустановки є важливим елементом переходу до сталої енергетики. Вони забезпечують екологічно чисте виробництво енергії, сприяють енергетичній незалежності та відповідають світовим трендам розвитку відновлюваних джерел.

									141.ЕК1119.011.ДБ	Арк.
										21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Завдяки зниженню вартості обладнання та вдосконаленню технологій, вітроенергетика має всі шанси стати ключовим джерелом енергії у майбутньому.

### 1.2.1 Схеми підключення ВЕУ

Параметрами, на які потрібно зважати під час вибору схеми та структури на вітроенергетичних установках, потрібних для того щоб перетворити енергії вітру на електроенергію, є:

- різновиди електроенергії яка виробляється (постійна напруга; змінна напруга змінної чи постійної частоти);
- частота обертання вітрової турбіни (близька до постійної, змінна, постійна);
- методи застосування вироблюваної електроенергії;
- характер застосування вироблюваної електроенергії.

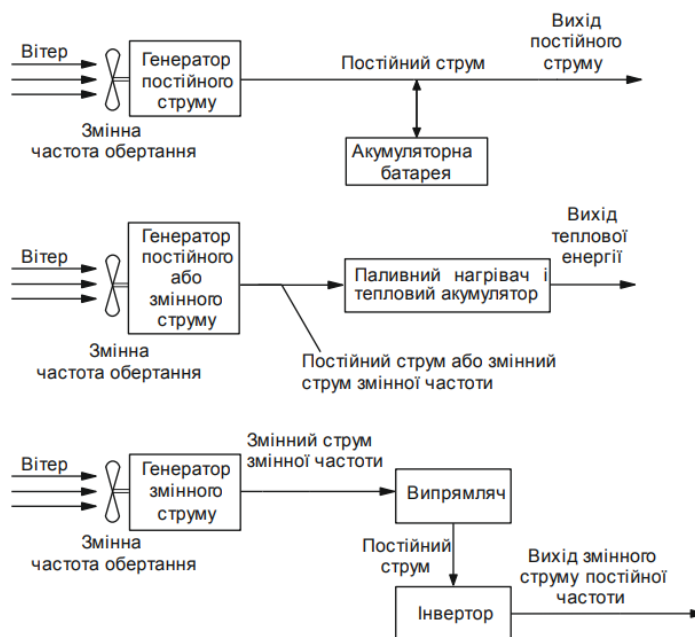


Рисунок 1.6 – Структурна схема системи генерування та споживання електроенергії під час автономної роботи ВЕУ

На сьогоднішній день розроблено та використовується велика маса схем для конвертації електроенергії вітру в електричну енергію змінної напруги або постійної, за допомогою, асинхронних або синхронних генераторів та

						141.ЕК1119.011.ДБ	Арк.
							22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

відповідно електричних генераторів постійного струму. Найпростіші системи зазвичай використовуються з електрогенератором на постійному струмі, через регулювання збудження, ми маємо постійну напругу в мережі при різних швидкостях вітру.

Є декілька схем для ефективного генерування електричної енергії з вітрової енергії для автономного функціонування ВЕУ є на рис. 1.6.

Постійний струм нині генерується виключно на невеликих вітрових енерго установках з потужністю приблизно 10-20 кВт. У цьому випадку немає необхідності в постійній частоті обертання вітротурбіни, в основному тут використовують акумуляторні батареї. У нових ВЕУ перетворення вітрової енергії застосовується в схемах з генерацією змінного струму. Це реалізується при використанні ВЕУ змінної частоти, напруги або постійної напруги. Не обов'язково, щоб частота обертання турбіни була постійною, у цьому випадку. За допомогою різних випрямлячів ми маємо можливість отримувати постійну напругу – це дає нам змогу використовувати її після перетворення у змінну напругу.

Змінність вітру та значна залежність потужності вітрових електричних установок від швидкості вітру не дає можливість мати високу якість електроенергії. Кількість годин, протягом яких ВЕУ може використовувати свою генерувальну потужність, залежить від середньої швидкості вітру і коливається в межах 2-4 тисяч годин на рік.

Кращий період для роботи ВЕУ є осінньо-зимовий та ранково-весняний періоди.

Вважається, що для масштабного отримання електричної енергії з вітру необхідно генерувати змінний струм з постійною частотою. Це забезпечує можливість інтеграції виробленої електроенергії в існуючі енергосистеми.

Створення потужних ВЕУ значною мірою залежить від використання вітротурбін зі стабільною частотою обертання, які можуть бути з'єднані з синхронними генераторами. У випадку асинхронних генераторів важливо

					141.ЕК1119.011.ДБ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



енергосистеми забезпечують дві групи засобів електричні та механічні пристрої.

Основною складністю реалізації таких схем є необхідність наявності елемента в системі (силовому ланцюгу або в керуванні вітродвигуном), котрий забезпечує узгодження частот та рівня напруги вітрової електричної установки (ВЕУ) з параметрами на точці підключення до енергосистеми.

Є декілька способів підключення вітрової електро установки (ВЕУ) до енергосистеми, які мінують відмінність за типом генератора та, а також наявністю і типами перетворювальних пристроїв. На рисунку 1.8 схеми підключення ВЕУ до енергосистеми: з синхронним генератором (рис. 1.8, а) та асинхронним генератором із короткозамкненим ротором (рис. 1.8, б), які з'єднані з вітродвигуном через редуктор.[7]

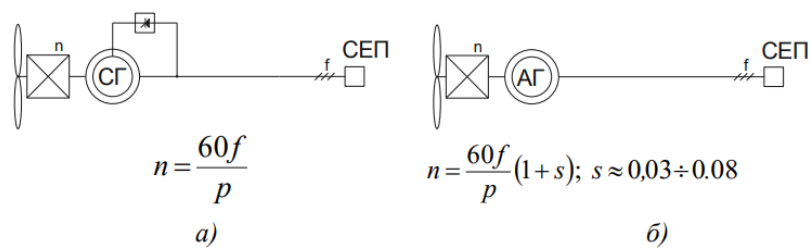


Рисунок 1.8 – Під'єднання ВЕУ до мережі з використанням: (а) синхронного, (б) асинхронного генератора.

Коли паралельно працюють декілька ВЕУ з синхронними генераторами, тоді частота обертання генераторів є стабільною, завдяки різним варіантам підключення:

- генератор має окремий пристрій синхронізації.
- спочатку синхронізують генератори між собою. У групах, потім групи синхронізують із мережею.
- генератори в групі, після цього групи синхронізують, потім синхронізація з мережею відбувається безпосередньо на головній підвищувальній підстанції.

					141.ЕК1119.011.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25



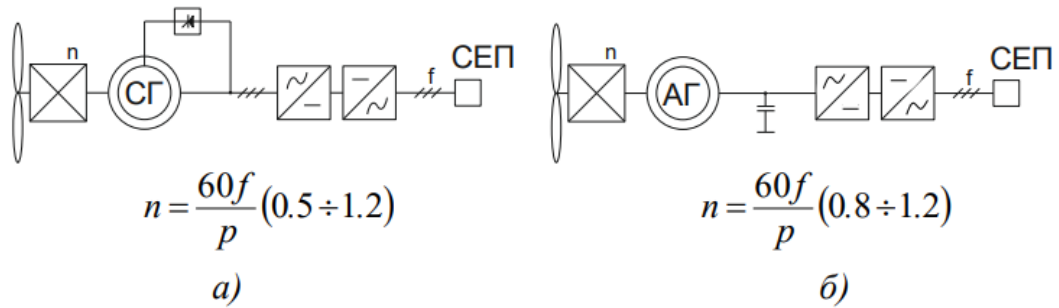


Рисунок 1.9 – Підключення до мережі вітрової електро установки, через випрямляч та інвертор із синхронним (а) і асинхронним (б) генератором.

На рисунку 1.9, а представлено схему підключення ВЕУ із СГ.. У цій схемі частота струму на виході СГ може змінюватися в широкому діапазоні в залежності від швидкості вітродвигуна. Змінний струм спочатку перетворюється на постійний у випрямлячі (В), а потім подається на інвертор (І), розташований у нижній частині вежі ВЕУ.

Інвертор функціонує як «grid-followed», що означає, що частота його виходу визначається фактичною частотою мережі в кожен момент часу. Інвертор дозволяє змінювати фазовий кут між напругою і струмом. Якщо струм запізнюється, генератор споживає реактивну потужність; коли струм випереджає напругу, у мережу подаються як активна так і реактивна потужність [7]

Виходячи з цього, ВЕУ може регулювати напругу там де вона підключена до мережі. Проте в цій конфігурації і випрямляч і інвертор необхідно проектувати на повну номінальну потужність генератора, що зумавлює підвищення вартості.

На рис. 1.9(б) показано схему підключення ВЕУ з АГ із короткозамкненим ротором до енергосистеми для паралельної роботи. Оскільки асинхронний генератор для намагнічування ротора потребує споживання реактивної потужності, а випрямляч та інвертор не можуть отримати її з мережі, у схемі для забезпечення необхідної реактивної потужності до виходу генератора під'єднано конденсаторну батарею.[7]

									Арк.
									27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

## Висновок до розділу 1

Виконано загальний аналіз підстанції 110/10 кВ. Розроблено схему заміщення та проведено розрахунок струмів короткого замикання з метою перевірки встановленого силового обладнання на підстанції.

Проведено огляд типових вітрових установок та способів підключень до мережі з метою вибору найбільш розповсюдженого типу, для подальших досліджень.

					141.ЕК1119.011.ДБ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТА ПОТУЖНОСТІ.

### 2.1 Загальні відомості по способу регулювання напруги та потужності .

Основний способом підтримання належного рівня напруги є локальне регулювання, що поділяється на групове та індивідуальне. Індивідуальне регулювання застосовують переважно у спеціалізованих цехах та на відповідальних установках, групове – охоплює сукупність споживачів.

Основні методів регулювання напруги на рис. 2.1.[5]

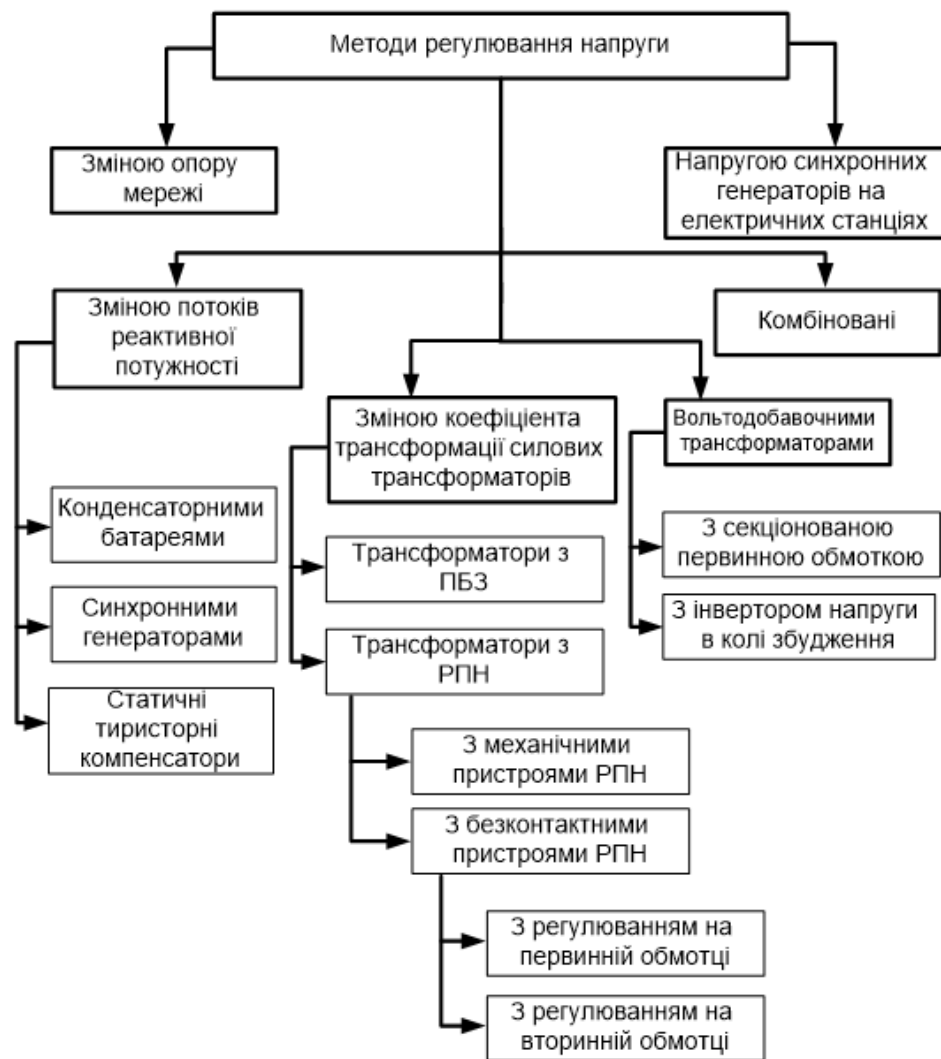


Рис. 2.1. Класифікація методів регулювання напруги [5]

Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Олефір І.Д.			<b>МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТА ПОТУЖНОСТІ.</b>	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Марченко А.А					29	21
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА гр.ЕК-11		
Н. Контр.		Шполянський О.Г.						
Затвердив		Марченко А.А						

## 2.2 Регулювання за допомогою трансформаторів РПН, компенсаторів.

Параметри навантаження трансформаторів мають добовий, сезонний або технологічний характер. Щоб утримувати значення електричної мережі споживачів у заданих параметрах потрібен механізм регулювання напруги - ключового параметра електроенергії, як для побутового, так і для промислового споживача.

У класичній схемі силових трансформаторів механізм регулювання реалізується за допомогою 2 типів спеціальних пристроїв, які є одночасно їхнім конструктивним елементом:

РПН - регулювання перемикачів під напругою.

ПБВ - перемикач без збудження (трансформатор знеструмлений з усіх боків).

Принцип регулювання обох пристроїв заснований на зміні числа витків обмотки у трансформатора. Змінюючи коефіцієнт трансформації, досягається рівень напруги необхідного значення для подальшого розподілу.

Принципова різниця між двома пристроями полягає в тому, що перемикач на ПБВ проводять тільки вручну і на відключеному трансформаторі. Регулювання напруги за допомогою РПН здійснюють через моторний привід у процесі експлуатації трансформатора і безпосереднього споживання електроенергії незалежно від навантаження, одним із 3 способів:

-дистанційне автоматичне керування

-дистанційне ручне керування

-місцеве ручне керування

Під час проведення ремонтних або регламентних робіт на трансформаторі за відсутності живлення власних потреб, РПН має можливість перемикачів через механізм ручного приводу.

										Арк.
										30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

## 2.2.1 Регулювання напруги силових трансформаторів без збудження за допомогою зміною коефіцієнта трансформації

Основним методом регулювання напруги в розподільчих мережах є трансформатори на районних підстанціях, оскільки вони здатні узгоджувати вимоги до напруги як для близьких, так і для віддалених споживачів.

Трансформатори можуть бути підключені в різних точках електричних мереж, де режим напруги, як правило, заздалегідь невизначений і може змінюватися протягом експлуатації мережі. Тому крім основних відгалужень, трансформатори обладнані додатковими регулювальними відгалуженнями. Зміна цих відгалужень дозволяє коригувати  $K_m$  в межах 10—20%.

Трансформатори за конструкцією поділяються на два типи: трансформатори з ПБЗ та РПН ;

Зазвичай регулювальні відгалуження розташовуються на стороні високої напруги (ВН) трансформатора, оскільки вона має менший робочий струм. Це дозволяє спростити конструкцію перемикаючого пристрою.

## 2.2.2 Трансформатори з ПБЗ.

Трансформатори з ПБЗ створюють з основним відгалуженням та чотирма додатковими. Принципова схема представлена на рисунку 2.2.

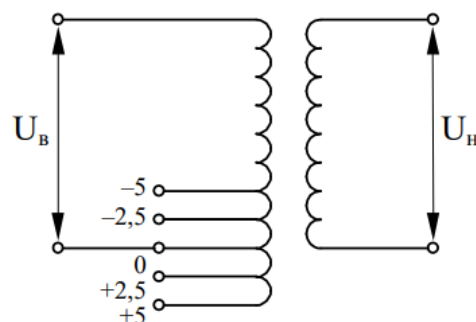


Рис. 2.2. Принципова схема трансформатора з ПБЗ

Відгалуження повинно мати напругу, яка відповідатиме  $U_{ном}$ , до якої підключений трансформатор (6,10,20 кВ). Коефіцієнт трансформації для основного відгалуження є номінальним.

Для того що, перемикнути регульовальне відгалуження трансформатор потрібно відключитися від мережі. Ці перемикання зазвичай виконуються рідко, переважно під час сезонних змін навантажень. Тому в умовах найменших і найбільших навантажень протягом доби трансформатор з ПБЗ працює на одному відгалуженні з постійним коефіцієнтом трансформації. Це обмежує можливість виконання зустрічного регулювання.

### 2.2.3 Трансформатори з механічними пристроями РПН

Трансформатори з піднавантажувальним регулюванням (РПН) обладнані спеціальними комутаційними механізмами, мають збільшену кількість регульовальних відгалужень та забезпечують ширший діапазон зміни напруги.

На рис. 2.3, б показана принципова схема трансформатора з РПН. Обмотка високої напруги складається з двох частин: нерегульованої та регульованої.

На регульованій частині є кілька відгалужень, які з'єднані з нерухомими контактами 1-4. Відгалуження 3-4 відповідають виткам, підключеним зустрічно до витків основної обмотки, і їх включення зменшує коефіцієнт трансформації, оскільки компенсує дію витків основної обмотки. Відгалуження 1-2 відповідають виткам, що підключені узгоджено з витками основної обмотки (направлення струму показано стрілками на рис. 2.3, б). Включення відгалужень 1-2 збільшує коефіцієнт трансформації. Основним виводом обмотки високої напруги є точка 0. Кількість витків, які діють узгоджено і зустрічно з витками основної обмотки, може бути різною. [5]

					141.1119.011.ДБ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

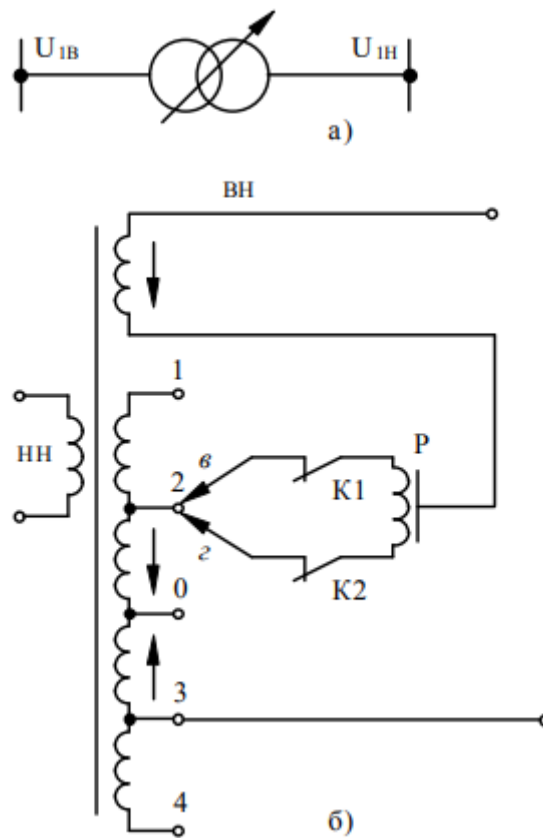


Рис. 2.3. Трансформатор з РПН: а – умовне позначення; б – принципова схема.

Завдяки РПН можливо перемикає відгалуження під навантаженням, таким чином змінюючи коефіцієнт трансформації протягом доби. Це дає змогу вибирати необхідні відгалуження в режимах найбільших і найменших навантажень, а також коригувати їх до найближчих значень, забезпечуючи вимоги зустрічного регулювання.

Основними недоліками трансформаторів з РПН є їх:

- висока вартість;
- обмежена кількість перемикачів, що може погіршити якість регулювання.

Для прикладу візьмемо трансформатор[17], який має дві гілки грубого регулювання і одну гілку тонкого регулювання. Зміна напруги, здійснюється через комбінації регульовальних гілок, з'єднаних послідовно або паралельно. Реалізація такого методу регулювання складніша, оскільки для отримання різних

комбінацій з'єднання гілок необхідно використовувати складний перемикаючий пристрій. [17]

Законами регулювання напруги регулюється частота трансформаторів з РПН. Найпростішим є регулювання за відхиленням напруги. Схема зображена на рис. 2.4.

Коли напруга перевищує верхню межу зони нечутливості, регулятор напруги надсилає короткочасний сигнал "Збільшити" на електропривод, щоб переключити відгалуження трансформатора на пониження напруги. Якщо ж напруга опускається нижче нижньої межі зони нечутливості, регулятор подає короткочасний сигнал "Зменшити" для підвищення напруги. Сигнали "Зменшити" та "Збільшити" також передаються на реле запам'ятовування циклу перемикання, яке продовжує надсилати команду на електропривод до завершення процесу перемикання.[5]

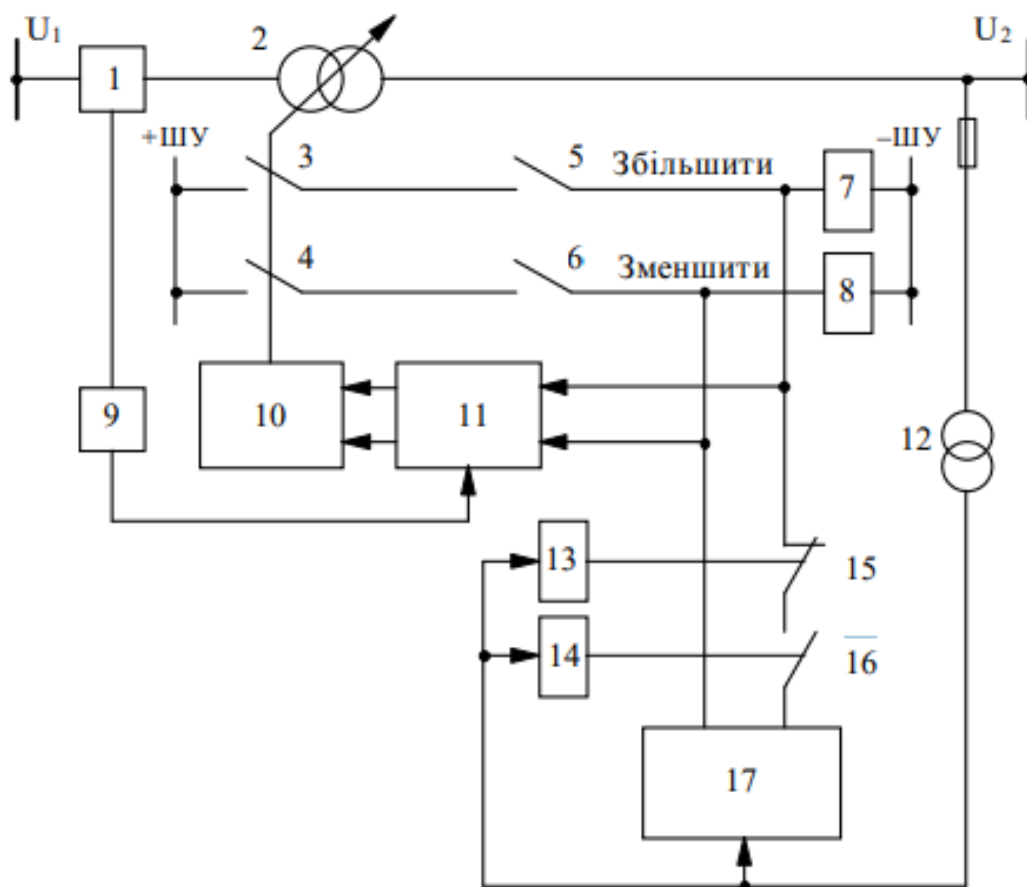


Рис. 2.4. Функціональна схема пристрою регулювання напруги силового трансформатора

Цей пристрій забезпечує блокування приводу в разі виникнення великих струмів у силовому трансформаторі під час перемикання, за допомогою реле максимального струму і блокуючого елемента 11. Як тільки надструми зникають, блокування знімається, і процес перемикання завершується. У разі значного зниження напруги сигнал "Збільшити" блокується, і перемикач не виконує перемикання.

Також більш ефективним є інтелектуальний регулятор системи регулювання напруги трансформаторних підстанцій, ніж класичне використання РПН. Пропоную його розглянути.

Почнемо з закону регулювання напруги в системі автоматичного керування (САК) трансформаторами із пристроями РПН, має вигляд:

$$u(t) = K_1 \left( (U(t) - U_y) - K_2 (I(t) - I_{\min}) \right);$$

$$K_m = \begin{cases} \frac{U_{i+1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } \begin{cases} u(t) \leq u_{н.з}; \\ u(t - \tau_3) \leq u_{н.з}; \\ \frac{dU_o}{dt} \leq 0; \end{cases} \\ \frac{U_i}{U_{н.н}}, & \text{якщо } u_{н.з} < u(t) < u_{в.з}; \\ \frac{U_{i-1}}{U_{н.н}}, & \text{якщо } \begin{cases} u(t) \geq u_{в.з}; \\ u(t - \tau_3) \geq u_{в.з}; \\ \frac{dU_o}{dt} \geq 0; \end{cases} \end{cases}$$

$$U(t) \xrightarrow{t_{\text{пер}} \rightarrow \min} U_{\text{ном}} \pm \Delta U, \text{ якщо } \begin{cases} u(t) < u_{н.з1}; \\ u(t) > u_{в.з1}; \end{cases}$$

де  $K_m$  — коефіцієнт трансформації силового трансформатора з РПН;  $u(t)$  — миттєва напруга на шинах підстанції з урахуванням струмової компенсації;  $u_{н.з}$ ,  $u_{в.з}$  — нижня та верхня межі зони нечутливості;  $U_y$  — уставка регулятора, що відповідає номінальній напрузі  $U_{\text{ном}}$  на шинах підстанції;  $U(t)$  — поточне







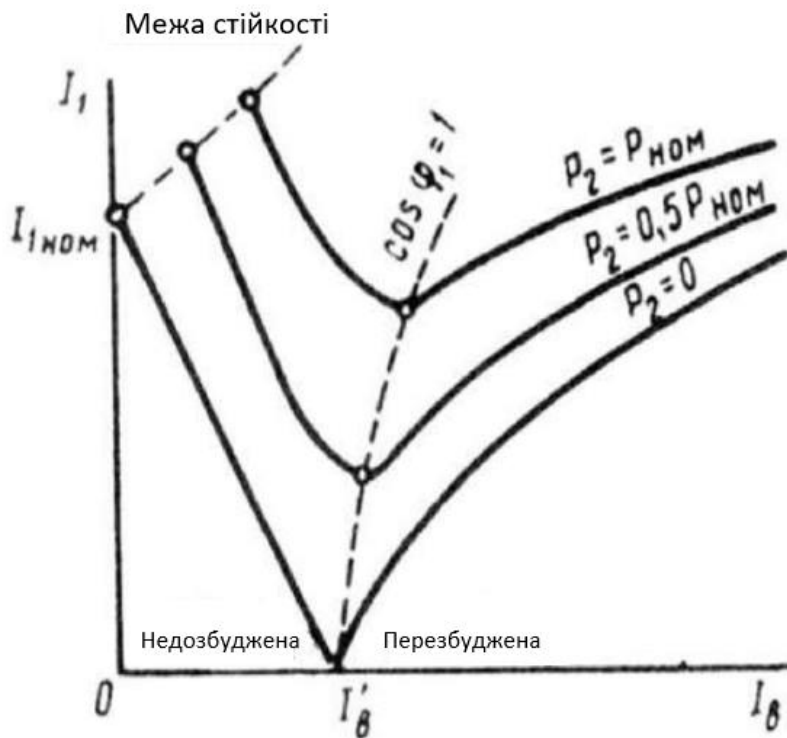


Рисунок 2.5 - U-подібна характеристики синхронної машини

Синхронний компенсатор являє собою синхронний електродвигун, не підключений до навантаження, з широким діапазоном регулювання струму збудження. При струмі збудження, рівному струму холостого ходу, компенсатор споживає мінімальну активну потужність, яка визначається його втратами. Коли струм збудження зменшується (режим недовозбудження), в споживаному компенсатором струмі з'являється індуктивна складова, що призводить до споживання реактивної потужності з мережі, збільшуючи втрати в ній. У режимі перевозбудження струм збудження перевищує струм холостого ходу, і синхронний компенсатор починає споживати випереджаючий струм, що відповідає видачі реактивної потужності в мережу. Таким чином, синхронний компенсатор діє в мережі як індуктивність або ємність, залежно від величини струму збудження, виконуючи роль споживача або джерела реактивної потужності.

### 2.2.5 Статичні компенсатори реактивної потужності (СТАТКОМ)

STATCOM - це шунтова компенсація реактивної потужності пристрій, який здатний генерувати або поглинати реактивну потужність, потужність якої

можна змінювати для керування конкретними параметрами електроенергетичної системи. [4] Використання самокомутованої (ШІМ) з відповідною схемою керування дозволяє реалізувати STATCOM з швидшою часовою характеристикою ніж основний енергетичний цикл. Твердотільні IGBT це відносно нова технологія в силовій електроніці, яка електроніці використовується в середніх і високих номінальних потужностях пристрої FACTS на основі ШІМ[6]. STATCOM може бути інвертором джерела напруги або інвертором джерела струму інвертором струму.

СТАТКОМ має кілька значних переваг:

- Покращені динамічні характеристики;
- Здатність підтримувати номінальний ємнісний струм за низької напруги системи, що забезпечує вищу динамічну стабільність передавання, порівняно зі статичними компенсаторами;
- Можливість здійснювати активну фільтрацію гармонійних струмів навантаження;
- Більш компактні розміри порівняно з традиційними джерелами реактивної потужності;
- Низький рівень активних втрат. Цей пристрій є джерелом напруги з керованим внутрішнім опором, який практично дорівнює нулю. Підключається до мережі через лінійний реактор, що дає змогу перетворювати різницю напруги мережі на вихідний струм СТАТКОМ, тобто фактично трансформує джерело напруги на джерело струму.

В нашому випадку розглядається схема VSI. Базова блок-схема STATCOM показана на рис.2.6. VSI перетворює постійну напругу на накопичувачі в набір трифазних вихідних напруг змінного струму. Ці напруги є фазними і з'єднані з системою змінного струму через опір і реактивний опір витоку. STATCOM на основі комутаційного пристрою може бути GTO для високовольтних, потужних застосувань або може бути IGBT для низьковольтних, потужних застосувань. IGBT для низьковольтних, малопотужних застосувань. При цьому Необхідно

										Арк.
										40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

відзначити, що розмір конденсатора постійного струму в STATCOM значно менший, ніж звичайний конденсатор змінного струму для прямої компенсації коефіцієнта потужності.

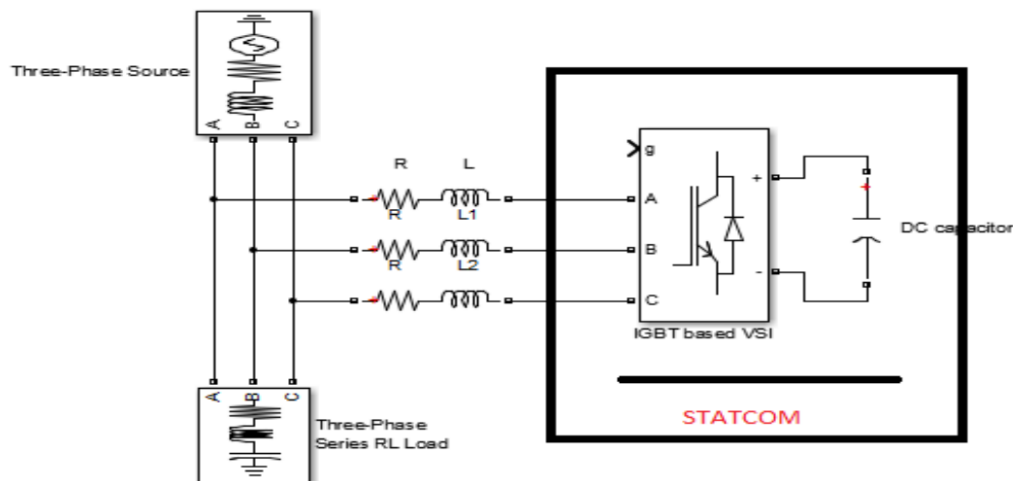


Рисунок 2.6 - Базова блок-схема STATCOM

STATCOM призначений для придушення коливань напруги та контролю реактивної потужності у фазі з напругою системи. Він може лінійно і безперервно компенсувати індуктивний і ємнісний струм. Напруга на виході  $V_{bus}$  дорівнює сумі напруги інвертора STATCOM і напруги на реактивному опорі витоку  $V_L$  та опорі в індуктивному та ємнісному режимах. Це означає, що якщо вихідна напруга  $V$  STATCOM збігається за фазою з напругою на клеммах шини  $V_{bus}$  і  $V$  STATCOM більша за  $V_{bus}$ , то STATCOM забезпечує реактивну живлення системи. Якщо  $V$  STATCOM менша за  $V_{bus}$ , STATCOM поглинає реактивну потужність з енергосистеми. Якщо  $V$  STATCOM і  $V_{bus}$  рівні, то ніякого обміну енергією не буде обміну, в цей час STATCOM буде працювати в плаваючому режимі. На рис. 2.7. показано принцип роботи STATCOM.[6]

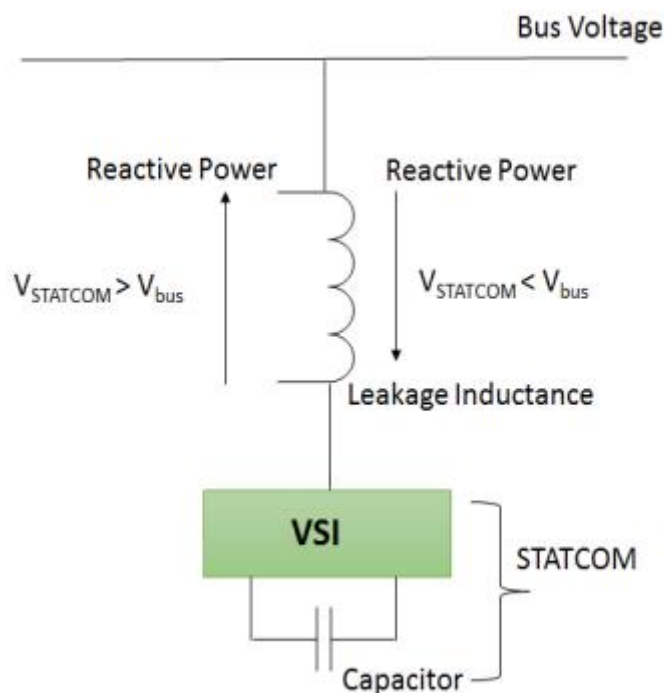


Рисунок 2.7 - Принцип роботи STATCOM

Напруга на затискачі  $V_{bus}$  (сторона змінного струму) дорівнює сумі статичної напруги вихідної напруги та падіння напруги на мережевому реакторі і опору.

$$V_{bus} = \text{bus terminal voltage}$$

$$V_{STATCOM} = \text{output voltage of STATCOM}$$

$$R + j\omega L = XL = \text{Inductive Reactance}$$

$$V_{dc} = \text{DC capacitor voltage}$$

Загальне математичне рівняння STATCOM для активної потужності, реактивної потужності та вихідної напруги статкому може бути можна подати у вигляді

$$P = (V_{bus} \times V_{STATCOM} \div XL) \sin \alpha$$

$$Q = (V_{bus} \times V_{bus} / XL) - (V_{bus} \times V_{STATCOM} \div XL) \cos \alpha$$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

## 2.2.6 Інверторні динамічні компенсатори

Сучасні технології інверторів на основі джерела напруги (VSI), що використовують метод широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) для формування напруги, вищої або нижчої за напругу шини, до якої підключені інвертори, сьогодні широко застосовуються на вітроелектростанціях для регулювання коефіцієнта потужності або напруги.

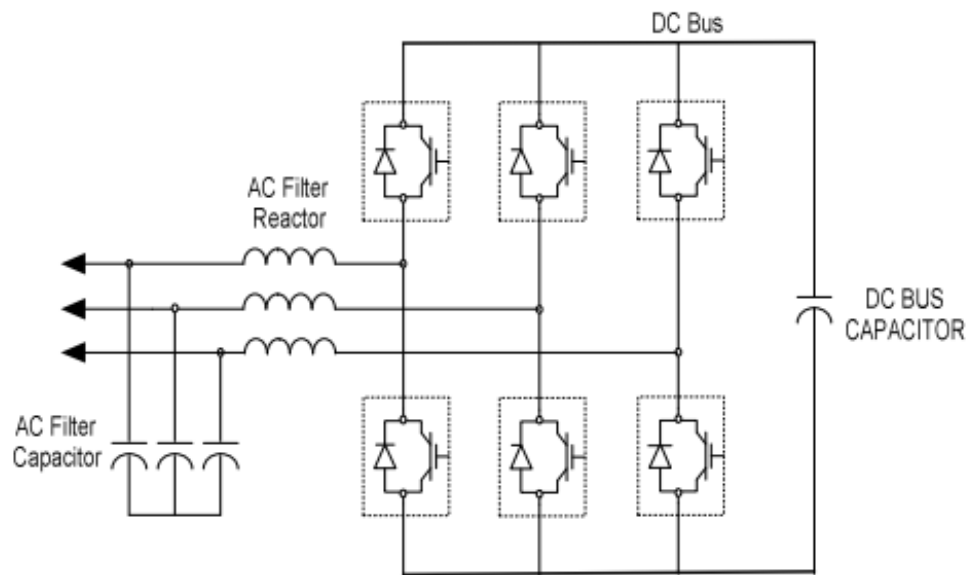


Рисунок 2.10 - Однолінійна схема  $\pm 1,25$  MVAR, джерело напруги 480 В  
інверторний модуль

Комерційні інверторні динамічні компенсатори постачаються у вигляді модулів потужністю  $\pm 1,25$  МВАр при напрузі 480 В і здатні короткочасно (до 3 секунд) працювати з потужністю 3,3 МВАр на модуль (тобто 264% від номінального значення в сталому режимі).[18]

Ці пристрої здатні перемикатися від повністю індуктивного до повністю ємнісного режиму (і навпаки) менш ніж за 2 мс, що визначається швидкодією контурів струмового регулювання.



номінального динамічного діапазону самого компенсатора (тобто від повністю індуктивного до повністю ємнісного режиму).

Динамічний компенсатор автоматично вмикає конденсатор, коли досягається певний рівень ємнісної реактивної потужності (МВАр). Аналогічно, при досягненні заданого рівня індуктивної реактивної потужності система може відключити конденсатор або включити реактор.

На рисунках 4 показано типову конфігурацію гібридної системи компенсації реактивної потужності та її фактичне фізичне розташування. У наведеному прикладі система включає:

- Динамічний компенсатор  $\pm 6,25$  МВАр
- Два банки шунтуючих конденсаторів по 8 МВАр на 33 кВ
- Один шунтуючий реактор на 8 МВАр

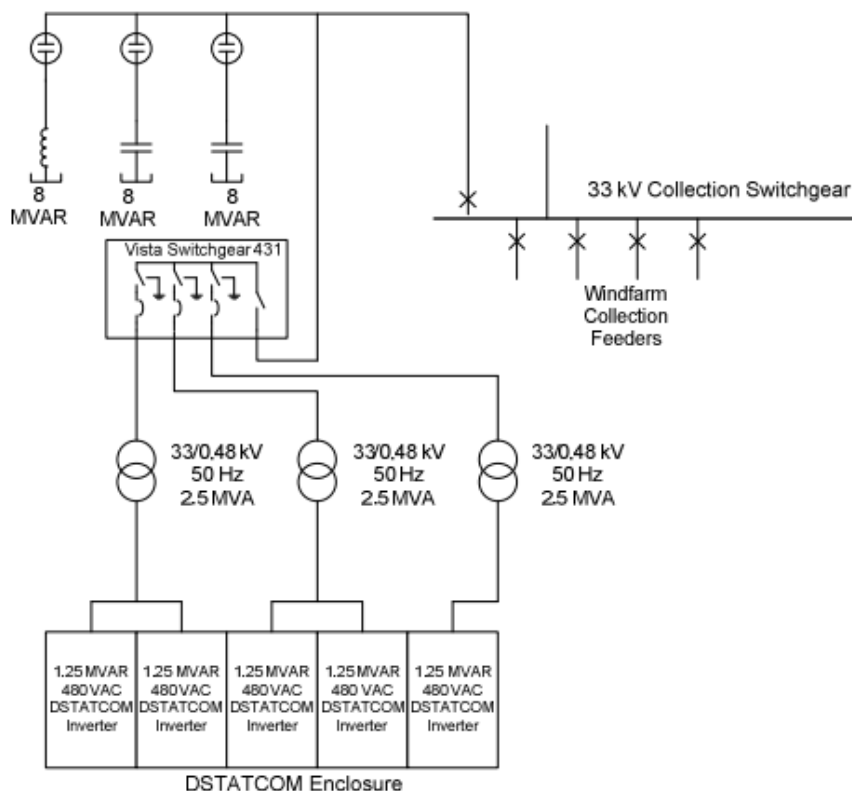


Рисунок 2.12 - Типова однолінійна схема гібридного компенсатора реактивної потужності.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Ця система забезпечує можливість регулювання реактивної потужності в межах від коефіцієнта потужності 0,95 індуктивного до 0,95 ємнісного на шині 33 кВ у точці приєднання вітроелектростанції потужністю 48 МВт.[18]

## Висновок до розділу 2

Розглянуто методи та засоби регулювання потужності та напруги у вузлі електричної мережі. Описано основні методи регулювання напруги за допомогою трансформаторів з РПН, синхронних та статичних компенсаторів реактивної потужності (СТАТКОМ).

Аналіз розглянутих методів показав, що регулювання за допомогою РПН та СТАТКОМ дозволяє забезпечити належну якість енергії при значних збуреннях.

					141.1119.011.ДБ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З ВІТРОВОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

#### 3.1 Моделювання системи вітрогенератора с енергосистемою

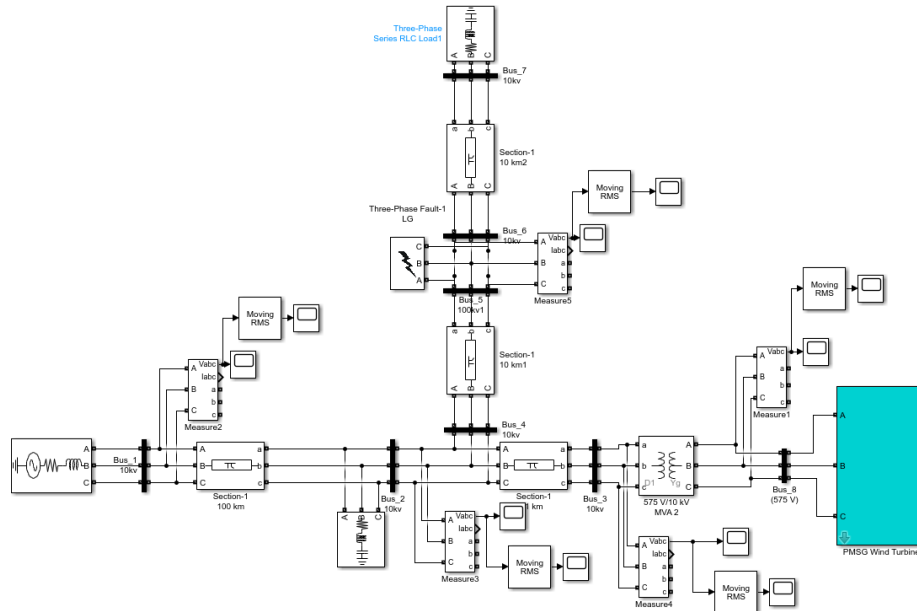


Рисунок 3.1 - Модель енергосистеми з ВЕС

Модель енергосистеми з вітрогенератором реалізована у MATLAB Simulink і складається з блоків, що імітують основні елементи реальної електричної мережі.

Електрична схема вітрової електростанції складається з: 1 вітрової турбіни потужністю 1,5 МВт, яка під'єднана до розподільчої системи з напругою 10 кВ. Розподільна мережа складається з: вихідного джерела енергії яке має напругу в 10 кВ, вхідної шини, навантаження 15 МВт, лінії передач на 100 км. та 1-10 км., які імітують відстань і електричні втрати між вузлами системи, шини 2 та 3 – це проміжні електричні вузли для підключення елементів, також блок трьох фазного КЗ, яке створює К.З. на три фази, потім йде 4 шина до якої приєднано блок навантаження, трансформатор та 5 шина між трансформатором і вітровою турбіною

Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив		Олефір І.Д.			<b>МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З ВІТРОВОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ</b>	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевірив		Марченко А.А					47	21
Реценз.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА гр.ЕК-11		
Н. Контр.		Шполянський О.Г.						
Затвердив		Марченко А.А						

Електроенергія між ВЕС передається в мережу за напругою 10 кВ, активне навантаження від Three-Phase Series RLC load дорівнює 10 МВт.

Система має можливість моделювання аварійних режимів, наприклад, трифазного короткого замикання на землю, що дозволяє дослідити динаміку трифазного переходу на стійкість системи. Також система має можливість змінювати швидкість вітру і нахил кута лопоті.

В системі вітрової турбіни буде використано два конвертора та синхронний генератор, які видають менше реактивної потужності ніж асинхронний генератор.

### 3.2 Моделювання кожного блоку в електростанції

#### 3.2.1 Блок Three-Phase Source

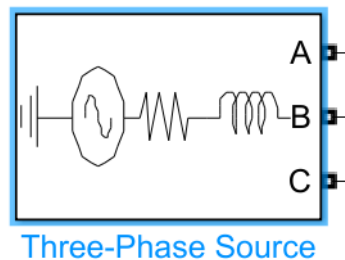


Рисунок 3.2 – Блок Three-Phase Source

Блок «Трифазне джерело» моделює симетричне трифазне джерело напруги з внутрішнім активним ( $R$ ) та індуктивним ( $L$ ) опором. Три однофазні джерела об'єднані за схемою зірки ( $Y$ ) з нейтраллю, яку, за потреби, можна або внутрішньо заземлити, або вивести назовні. Параметри  $R$  і  $L$  задають двома способами:

- прямим — безпосереднім введенням числових значень опору та індуктивності;
- непрямим — через зазначення рівня індуктивного струмового короткого замикання джерела та співвідношення  $X/R$ .

									Арк.
									48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



## Load Flow блоку Three-Phase Source :

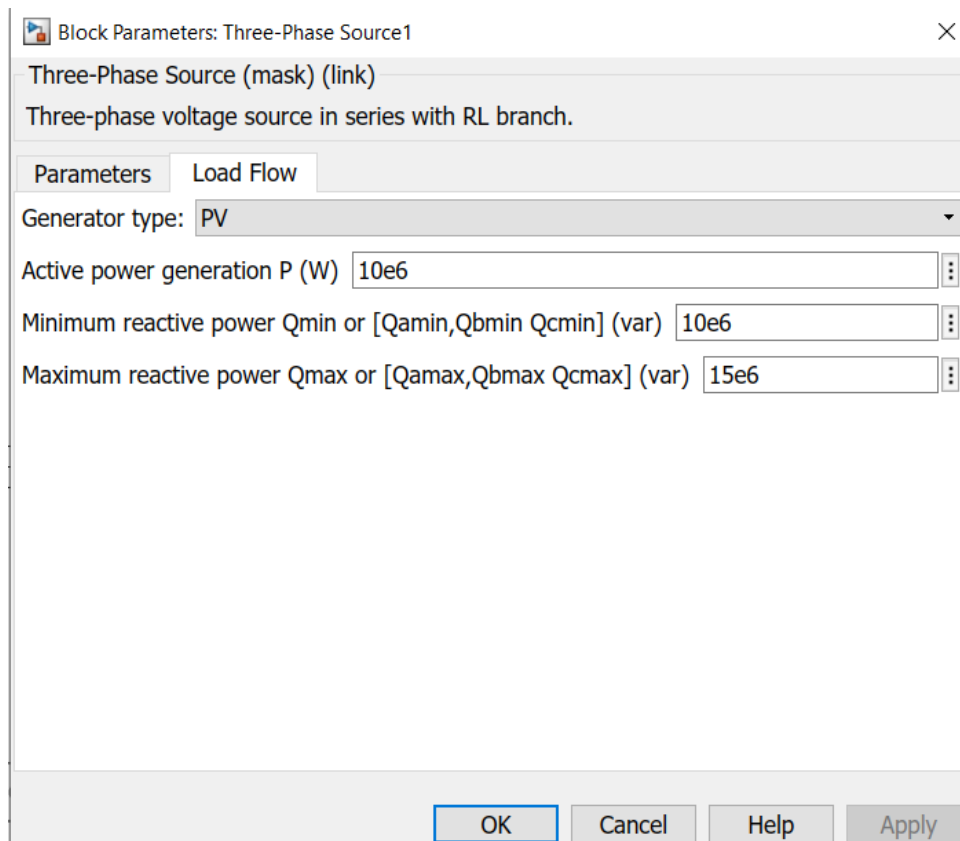


Рисунок 3.4 - Load Flow блоку Three-Phase Source

- Generator type PV – означає, що джерело задано з активною і реактивною потужністю.
- Active power generation P – активна потужність яке генерує джерело.
- Minimum reactive power Qmin – мінімальна реактивна потужність.
- Maximum reactive power Qmax – максимальна реактивна потужність.

### 3.2.2 Блок Three-Phase PI Section Line

									Арк.
									50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

141.1119.011.ДБ



Процес гасіння дуги в блоці трифазних замикань такий самий, як і в блоці вимикачів. Детальніше про моделювання однофазних вимикачів див. у блоці «Вимикач».

Опір заземлення  $R_g$  автоматично встановлюється на 106 Ом, якщо опція замикання на землю не запрограмована. Наприклад, щоб запрограмувати замикання між фазами А і В, потрібно вибрати тільки параметри блоку Фаза А і Фаза В. Щоб запрограмувати замикання між фазою А і землею, потрібно вибрати параметри Фаза А і Земля і вказати невелике значення опору заземлення.

Для наочності для замикання вимикачів зазвичай використовується сигнал 1. Якщо блок трифазних замикань встановлений у режим внутрішнього керування, час перемикання і стан задаються в діалоговому вікні блоку.

До складу моделі включено схеми Rs-Cs, що розщеплюють, серії Rs-Cs. Вони можуть бути додатково підключені до вимикачів. Якщо блок трифазних замикань з'єднаний послідовно з індуктивним контуром, обривом або джерелом струму, необхідно використовувати навантажувачі.

### 3.2.3 Three-Phase Series RLC Load

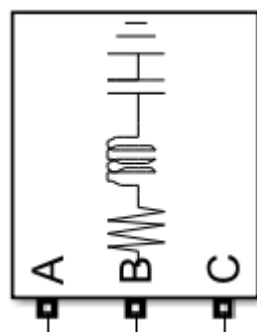


Рисунок 3.7 - Блок Three-Phase Series RLC Load

Трифазний блок RLC-навантаження реалізує трифазне навантаження. На заданій частоті навантаження має постійний імпеданс. Активна і реактивна потужності, що поглинаються навантаженням, пропорційні квадрату прикладеної напруги.

[14]

									Арк.
									52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



Основні блоки та їх призначення:

1. **Вхідні точки (А, В, С):** Трифазні сигнали, що надходять від мережі чи джерела напруги.
2. **Filter (фільтр):** Моделює LC-фільтр (конденсатори і індуктивності), який згладжує гармоніки та зменшує пульсації напруги і струму, що виникають у системі після конвертера.
3. **RL-блок:** Імітує опір та індуктивність в лінії, які мають вплив на динаміку струму і напруги.
4. **Grid-side Converter (Конвертер з боку мережі):** Вхідний інвертор/перетворювач, що забезпечує синхронізацію з мережею, керує потужністю і якістю струму, що повертається в мережу.
5. **Crow-bar (загороджувальний резистор):** Пристрій захисту генератора від перенапруг чи аварійних ситуацій. Вмикається при небезпечних станах, знижує струм і захищає інвертори.
6. **Capacitor (Конденсатор):** Частина фільтра або накопичувач енергії для стабілізації напруги між двома конвертерами.
7. **Machine-side Converter (Конвертер з боку машини):** Керує напругою і струмом генератора, забезпечує оптимальний режим роботи PMSG.
8. **PMSG (Постійномагнітний синхронний генератор):** Головний генератор системи, який перетворює механічну енергію вітру в електричну.

Видає такі параметри:

- Швидкість ротора (Rotor speed  $\omega_m$ )
- Кут ротора (Rotor angle  $\theta_m$ )
- Електромагнітний момент (Electromagnetic torque  $T_e$ )

					141.1119.011.ДБ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



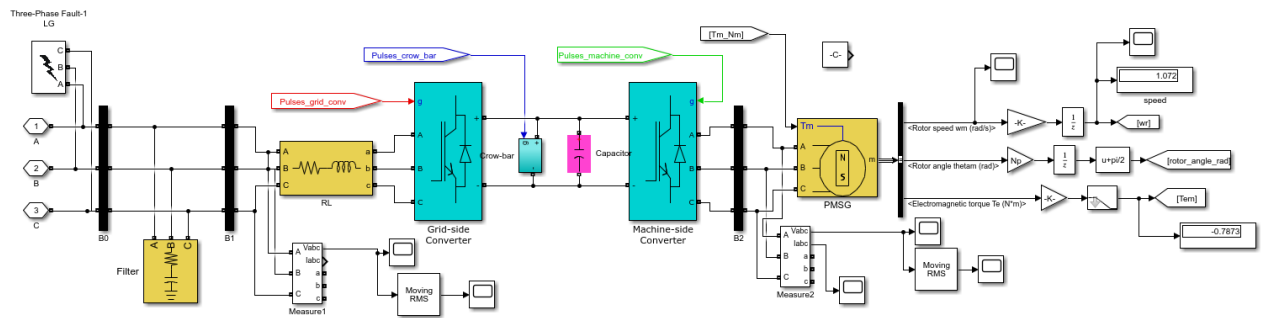


Рисунок 3.10 - Модель вітрової станції з моделюванням трьохфазного короткого замикання на шині B0.

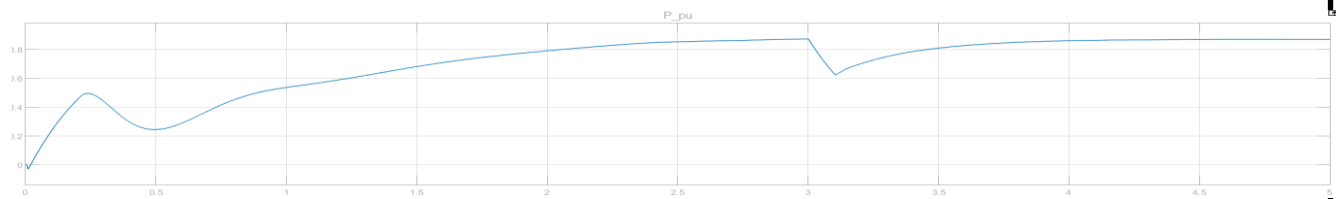


Рисунок 3.11 - Графік зміна активної потужності вітрової турбіни при трифазному КЗ на шині B0.

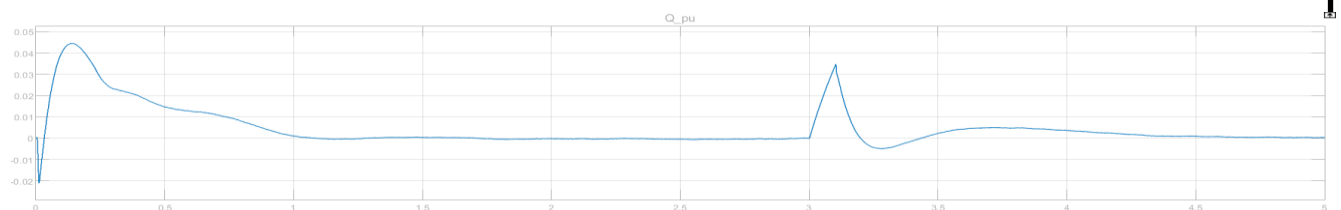


Рисунок 3.12 - Графік зміні реактивної потужності вітрової турбіни при трифазному КЗ на шині B0.

З рисунків 3.11 та 3.12 видно, що активна потужність зменшилась до 0.63 в.о., потім на 4.5 секунді знову вийшла на режим і дорівнює 0.85 в.о. Реактивна потужність збільшилась до 0.035 в.о. і знову на 4.5 секунді стала дорівнювати 0.

Для того щоб провести дослід зі збільшенням навантаження нам потрібно додати навантаження 10 МВт та блок Three Phase Breaker на шині B0 який на 3 секунді збільшить навантаження на 10 МВт та буде тримати його протягом 0.5 секунд. Вимірювання активної та реактивної потужності відбувається на Grid-side Converter.

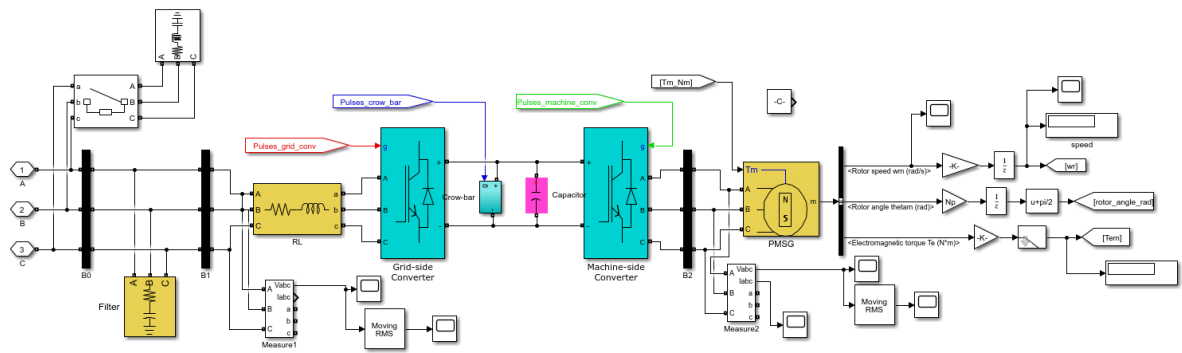


Рисунок 3.13 - Модель вітрової станції з моделюванням додаткового навантаження.

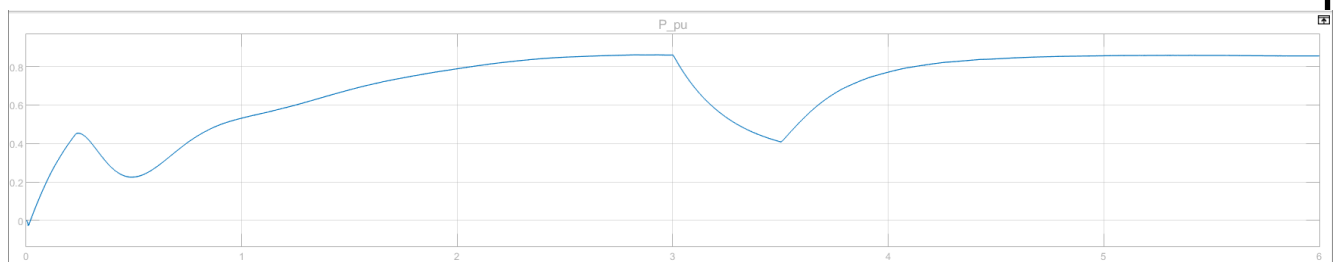


Рисунок 3.14 - Графік зміни активної потужності вітрової турбіни з додатковим навантаженням.

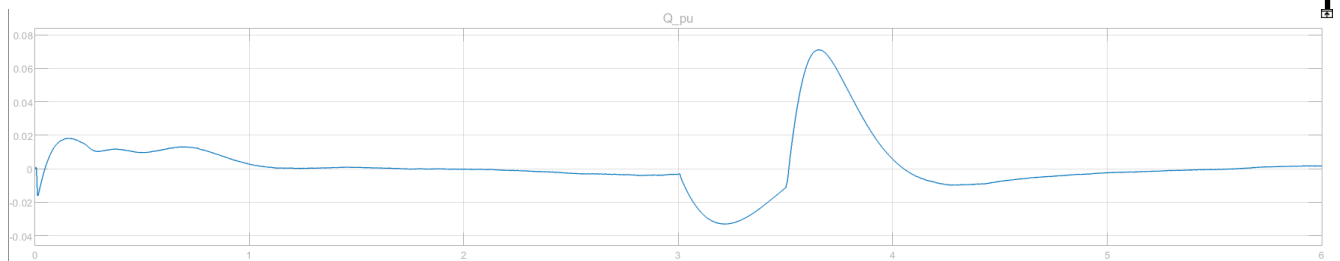


Рисунок 3.15 – Графік зміни активної потужності вітрової турбіни з додатковим навантаженням.

З рисунків 3.14 та 3.15 видно, що активна потужність зменшилась до 0.4 в.о., потім на 4.5 секунді знову вийшла на режим і дорівнює 0.85 в.о. Реактивна потужність збільшилась до 0.07 в.о. і знову на 4.5 секунді стала дорівнювати 0, тобто вийшла на режим.

### 3.4 Дослідження впливу вітрової електростанції на процеси регулювання напруги у вузлі з приєднання до енергосистеми

Для того, щоб дослідити впливу вітрової електростанції на процеси регулювання напруги у вузлі приєднання до енергосистеми, було змодельовано два режими роботи: з підключенням та відключенням вітрової турбіни на 1,5 МВт з синхронним генератором із постійними магнітами). Модель в середовищі Matlab Simulink передбачає підключення вітрової турбіни через трансформатор 575 V/10 kV 2 MVA, до вузла Bus\_3 10kv, що є точкою з'єднання з магістральною мережею.

Першим етапом було здійснено від'єднання вітровою турбіни від енергосистеми:

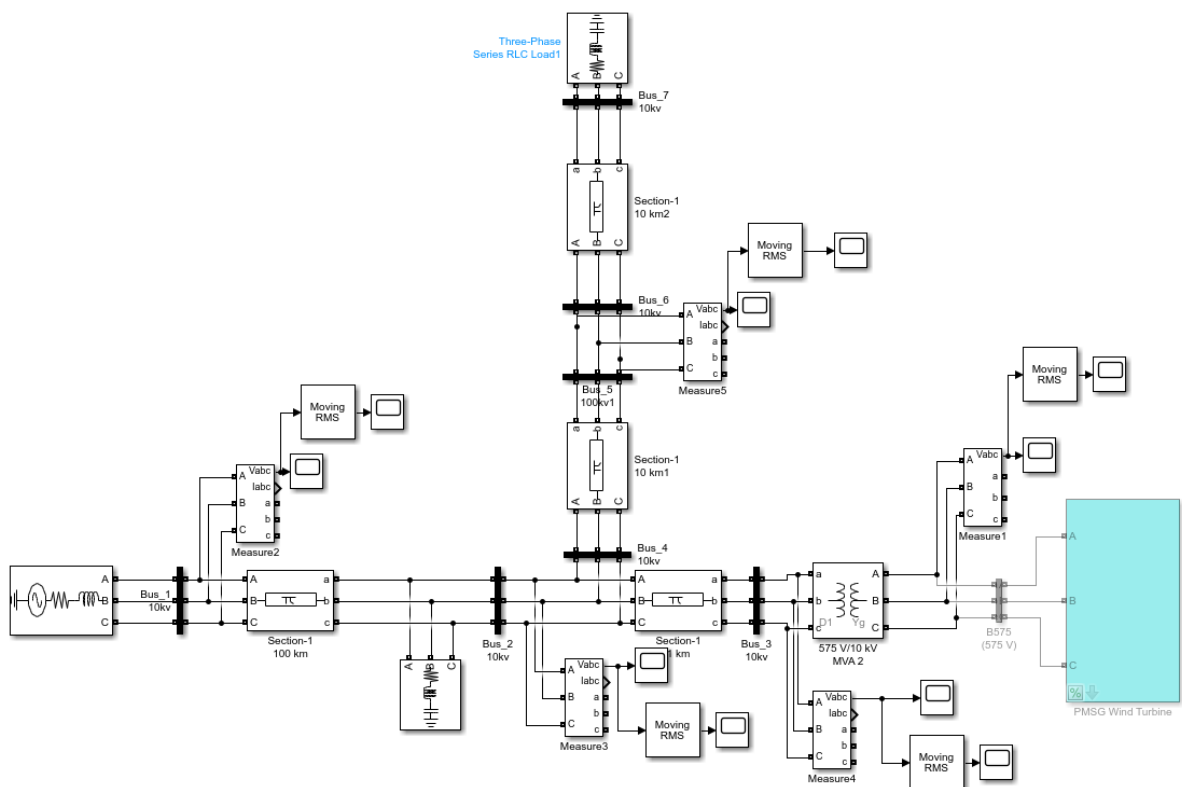


Рисунок 3.16 - Схема енергосистеми без вітрової установки.

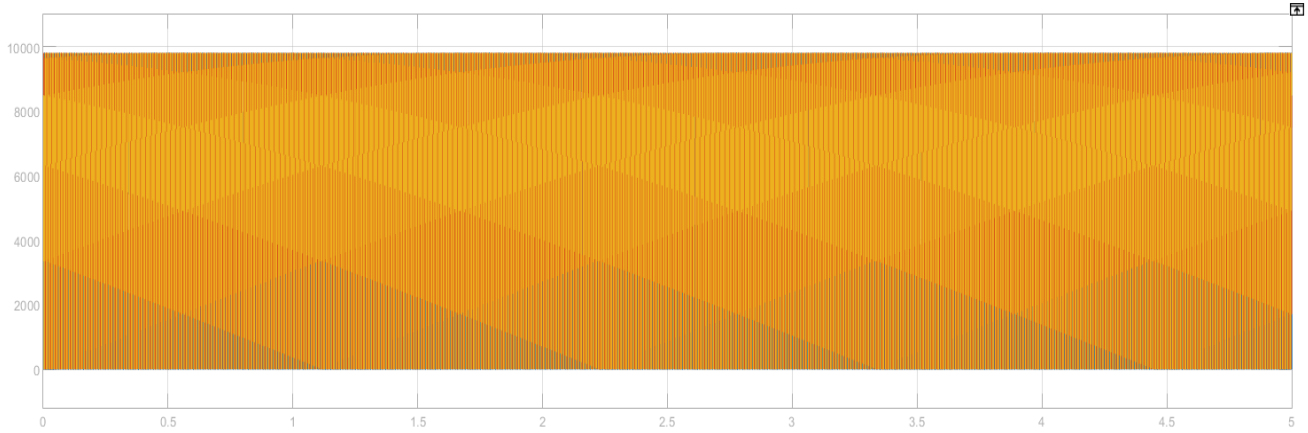


Рисунок 3.17 - Графік напруги на шині Bus\_1 енергосистеми без вітрової установки.

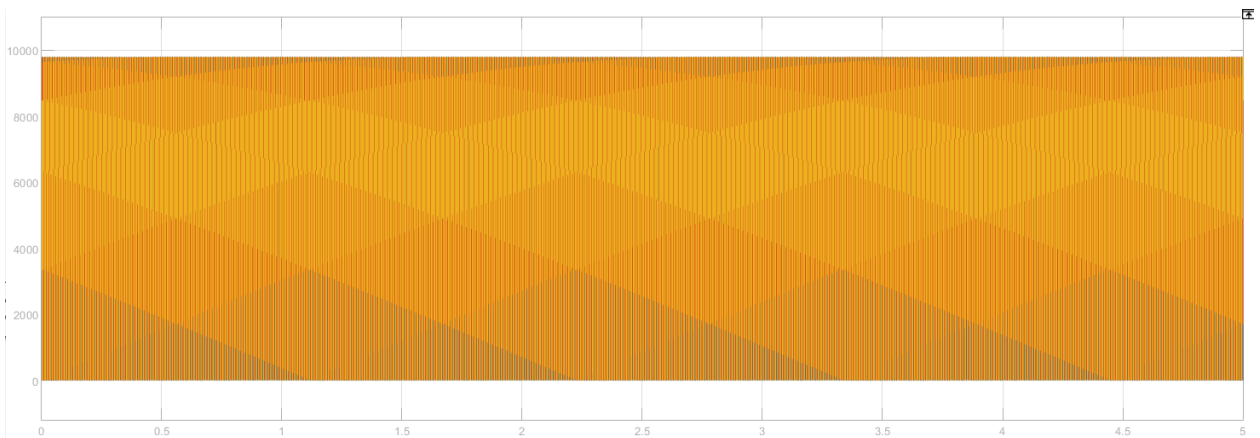


Рисунок 3.18 - Графік напруги на шині Bus\_2 енергосистеми без вітрової установки.

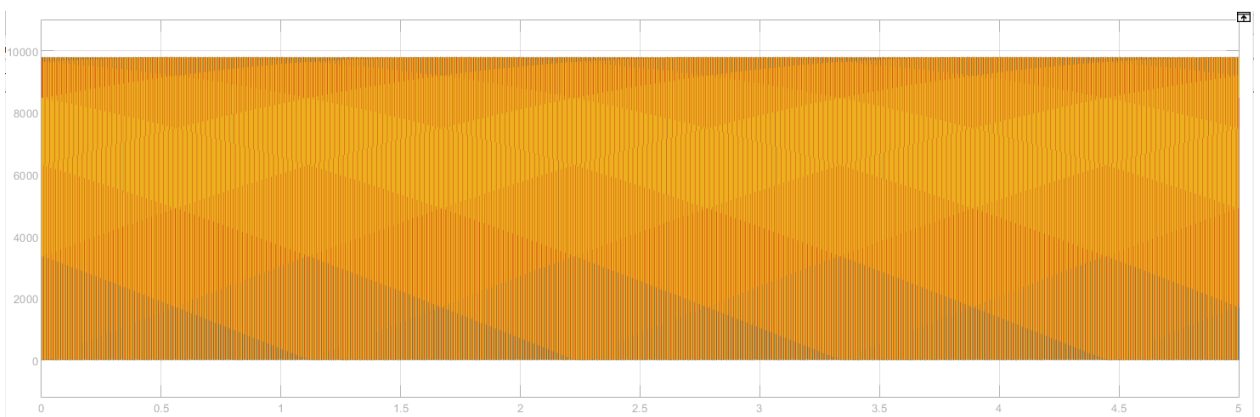


Рисунок 3.19 - Графік напруги на шині Bus\_3 енергосистеми без вітрової установки.





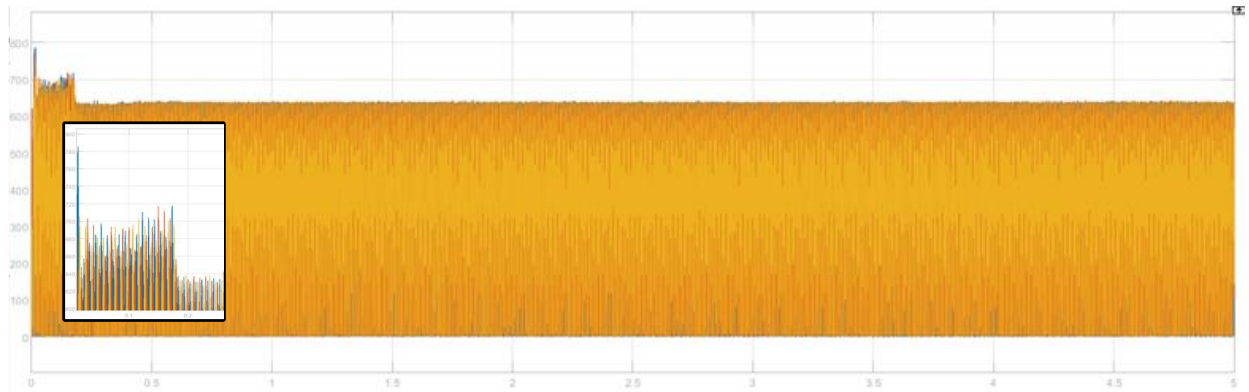


Рисунок 3.24 - Графік зміни напруги на шині Bus\_8 енергосистеми при приєднанні вітрової установки.

З цього ми можемо побачити, як змінюється напруга у двох випадках:

У першому випадку, коли вітрова турбіна відключена від енергосистеми напруга знаходиться в стабільному стані і дорівнює своїм усталеним значенням .

У другому випадку коли вітрова турбіна підключена до енергосистеми напруга знаходиться в нестабільному стані перші 0.2 секунди, це зумовлене ініціалізацією запуску турбіни, як видно, напруга на шині Bus\_8 досягає 780 В, але потім виходить на усталений режим і дорівнює 640 В.

### 3.4.1 Дослідження впливу трифазного короткого замикання

Виконаємо емуляцію трифазного короткого замикання. Воно буде відбуватися з 1 по 1.3 секунду емуляції, тобто тривалість КЗ буде 0,3 секунди. Моделювання буде відбуватися на протязі 5 секунд.

										141.1119.011.ДБ	Арк.
											62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

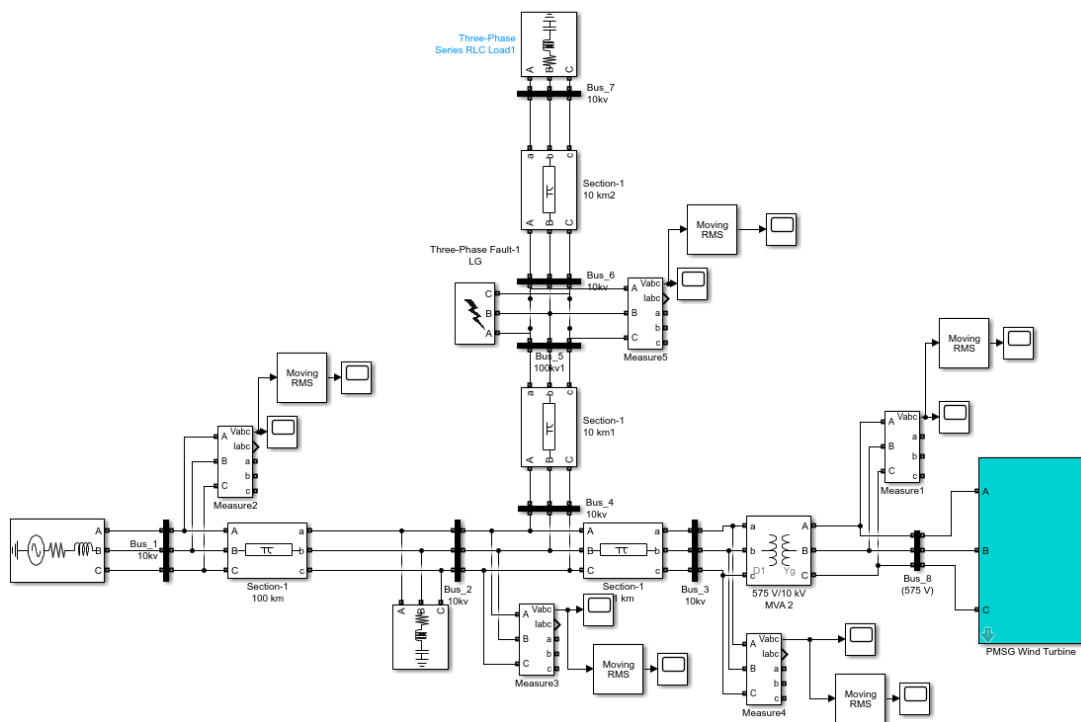
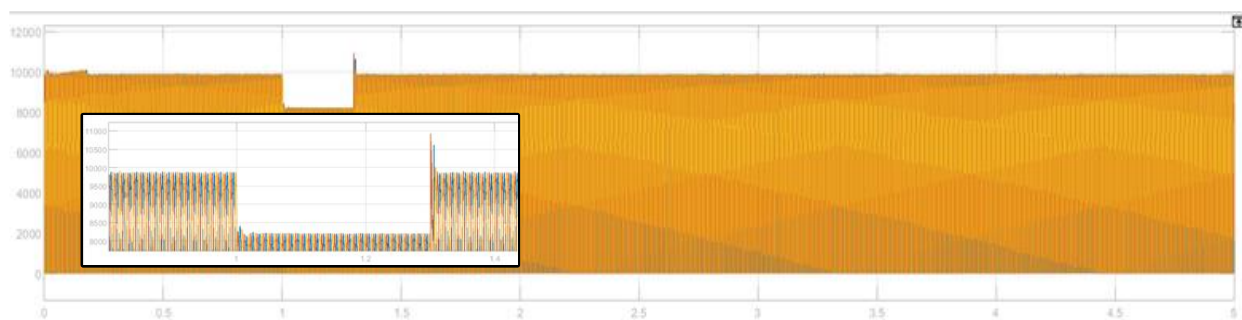
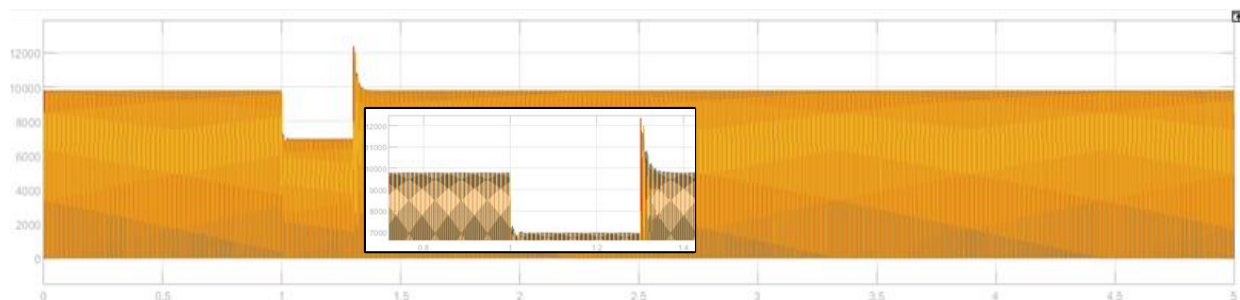


Рисунок 3.25 – Схема енергосистеми з вітровою установкою та трифазним КЗ.



а)



б)

Рисунок 3.26 – Графік зміни напруги на шині Bus\_1 енергосистеми а) з вітровою установкою та б) без неї при КЗ.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Через виникнення трифазного короткого замикання при  $t = 1$  секунди на рис 3.26, 3.27, 3.28 значення вихідної напруги на шинах з вітровою установкою: Bus\_1 = 8100 В, Bus\_2 = 4200 В Bus\_6 = 0 В , коли як без вітрової станції напруга на шинах: Bus\_1 = 7200 В, Bus\_2 = 1000 В Bus\_6 = 0 В. Також при зникненні КЗ напруги різко зростає, але коли вітрова установка підключена то стрибок струму менший.

### 3.4.2 Дослідження впливу зміни навантаження.

Для цього досліджу в точці Bus\_2 було додано навантаження 10 МВт. та блок Three Phase Breaker, в загальному навантаження складатиме 40 МВт: 15МВт. знаходиться на шині Bus\_2, 15 МВт на шині Bus\_7 та 80 МВт. (додаткове навантаження ) сна шині Bus\_2. Збурення створюється за рахунок збільшення навантаження на 80 МВт. на шині Bus\_2 на 2 секунді емуляції, впродовж 0.5 секунд. Моделювання відбувається протягом 5 секунд. Цю модель можемо побачити на рис.3.30.

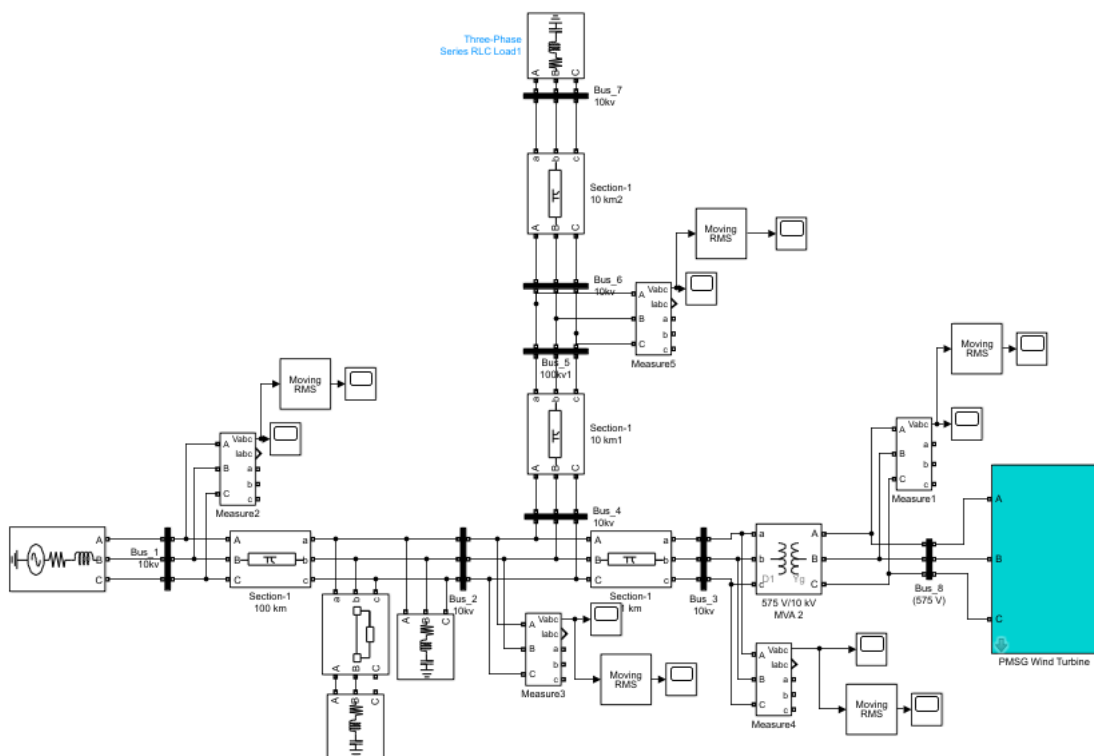
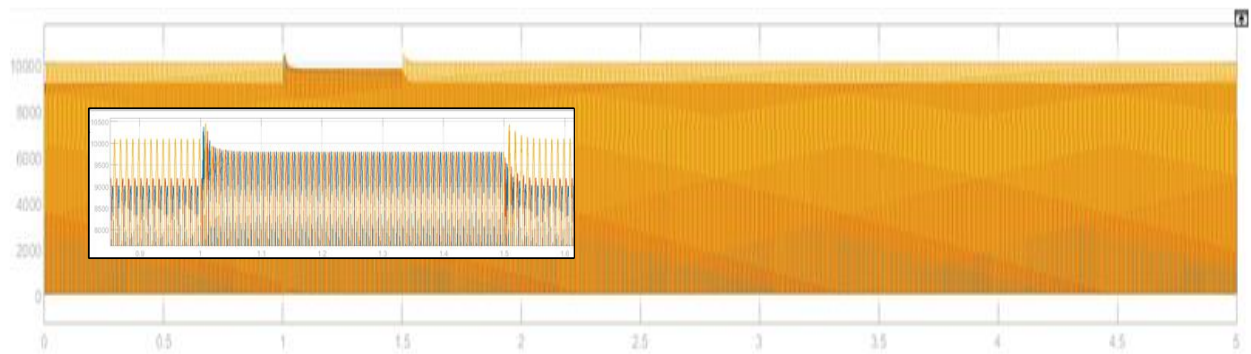
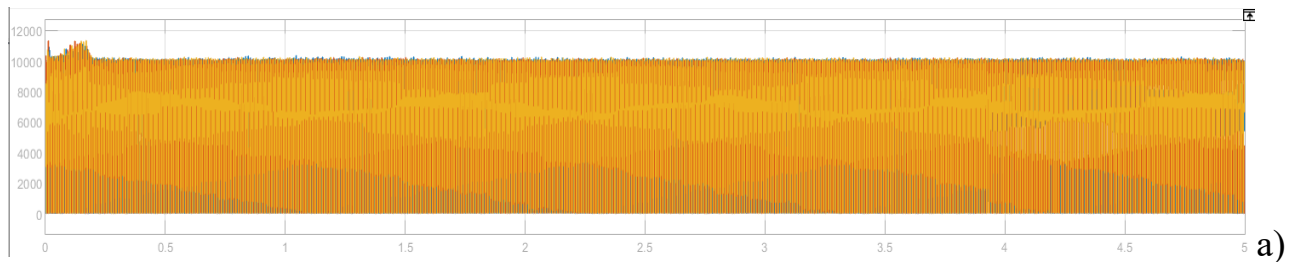


Рисунок 3.30 – Схема енергосистеми з вітровою установкою та додатковим навантаженням

					141.1119.011.ДБ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		





б)

Рисунок 3.33 – Графік зміни на шині Bus\_6 енергосистеми а) з вітровою установкою та б) без неї при додатковому навантаженні.

У випадку коли ми додали навантаження з вітровою станцією це майже не відобразилось на напрузі, але без вітрової станції напруга на шині Bus\_2, Bus\_6 напруга зменшилась в межах 5%.

### Висновок до розділу 3

Використовуючи елементи MATLAB Simulink створено модель вітрової станції та вузла енергосистеми з ВЕУ.

За допомогою створеної моделі виконано дослідження зміни напруги пов'язаної з приєднанням вітрової станції до мережі та ряду збурень у вузлі приєднання.

З виконаних досліджень можна виділити наступне:

- Підключення вітрової установки викликає коливання напруги в перші 0.2 секунди. Зміна навантаження ( збільшено на 10 МВт, Bus\_2) на 1 секунд, в схемі з вітровою установкою напруга не змінилась, в схемі без вітрової установки напруга впала в межах 5%

									Арк.
									67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					



## ВИСНОВКИ

Виконано загальний аналіз підстанції 110/10 кВ. Розроблено схему заміщення та проведено розрахунок струмів короткого замикання з метою перевірки встановленого силового обладнання на підстанції.

Проведено огляд типових вітрових установок та способів підключень до мережі з метою вибору найбільш розповсюдженого типу, для подальших досліджень.

Розглянуто методи та засоби регулювання потужності та напруги у вузлі електричної мережі. Описано основні методи регулювання напруги за допомогою трансформаторів з РПН, синхронних та статичних компенсаторів реактивної потужності (СТАТКОМ).

Аналіз розглянутих методів показав, що регулювання за допомогою РПН та СТАТКОМ дозволяє забезпечити належну якість енергії при значних збуреннях.

Використовуючи елементи MATLAB Simulink створено модель вітрової станції та вузла енергосистеми з ВЕУ.

За допомогою створеної моделі виконано дослідження зміни напруги пов'язаної з приєднанням вітрової станції до мережі та ряду збурень у вузлі приєднання.

З виконаних досліджень можна виділити наступне:

- Підключення вітрової установки викликає коливання напруги в перші 0.2 секунди. Зміна навантаження ( збільшено на 10 МВт, Bus\_2) на 1 секундi, в схемі з вітровою установкою напруга не змінилась, в схемі без вітрової установки напруга впала в межах 5%
- Трифазне коротке замикання на 1 секундi (рис 3.26, 3.27, 3.28) викликає з зміну вихідної напруги на шинах в схемі вітрової установки: Bus\_1 = 8100 В, Bus\_2 = 4200 В Bus\_6 = 0 В ,в схемі без вітрової установки напруга на шинах: Bus\_1 = 7200 В, Bus\_2 = 1000 В Bus\_6 = 0 В. Це обумовлено тим, що вітрова станція намагається утримувати напругу при короткому замиканні за допомогою Grid-side convertor, який обмінюється реактивною потужністю з мережею.

									Арк.
									69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

141.1119.011.ДБ

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1) Основи вітроенергетики URL:  
[https://pidru4niki.com/83008/tehnika/osnovi\\_vitroenergetiki](https://pidru4niki.com/83008/tehnika/osnovi_vitroenergetiki) (дата звернення 27.05.25)
- 2) Ernst Camm S&C Dynamic reactive power control for wind powe plants  
URL:<https://studylib.net/doc/12837076/dynamic-reactive-power-control-for-wind-power-plants> (дата звернення 27.05.25)
- 3) Саморобні вітрогенератори своїми руками URL:<https://alternative-energy.com.ua/samorobni-vitrogeneratori-svoimi-rukami/> (дата звернення 27.05.25)
- 4) С. М. Левицький, К. І. Колмачов Система автоматичного керування трансформатором з інтелектуальним регулятором напруги Монографія, Вінниця, ВНТУ, 2015  
URL:<https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/download/102/173/201-1?inline=1> (дата звернення 27.05.25)
- 5) Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН : моног. / Володимир Віталійович Грабко. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця  
URL:  
[https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4985/Grabko\\_\\_Modeli\\_i\\_zasoby\\_reguluyvannya\\_naprugy\\_115-6\\_2005.pdf?sequence=1](https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/4985/Grabko__Modeli_i_zasoby_reguluyvannya_naprugy_115-6_2005.pdf?sequence=1) (дата звернення 27.05.25)
- 6) Modeling and Simulation of STATCOM  
URL: <https://www.ijert.org/research/modeling-and-simulation-of-statcom-IJERTV3IS120248.pdf> (дата звернення 27.05.25)
- 7) Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, О75 Н. Нойбергер, Д. Циplenков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 335 с.
- 8) Рубаненко О. Є. Нейро-нечітке моделювання в задачах оперативного діагностування електрообладнання [Електронний ресурс]/ О. Є. Рубаненко // Вид-во Львівської політехніки. — 2007. — No 597. — С. 14—19.— Режим доступу : [http://vlp.com.ua/files/03\\_12.pdf](http://vlp.com.ua/files/03_12.pdf). (дата звернення 27.05.25)

					141.1119.011.ДБ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Ю.Н. Шафір (Україна); ВАТ "Запоріжтран сформатор".– № 93007732; Заявл. 07.09.93; Опубл. 15.09.2000.

18) Ernst Camm, Charles Edwards, Ken Mattern, Stephen Williams S&C Electric Company, 6601 N. Ridge Blvd, Chicago IL 60626 USA

URL: <https://studylib.net/doc/12837076/dynamic-reactive-power-control-for-wind-power-plants> (дата звернення 27.05.25)

19) URL:

univer.nuczu.edu.ua/ebooks/326/570.html#:~:text=Основною%20характеристикою%20синхронного%20двигуна%20ε%20U-подібна%20характеристика%20,0,%20M2%20<%20M3)%20подано%20на%20рис.%205.49. (дата звернення 27.05.25)

					141.1119.011.ДБ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		