

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет будівництва, транспорту та енергетики
Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЄШКОВ
“__” _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:
«Дослідження впливу відновлювальних джерел
енергії на стійкість енергетичної системи
Study of the influence of renewable energy sources on the
sustainability of the energy system»

Виконала здобувачка вищої освіти
II курсу магістратури, групи ЕЕ-23М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
_____Надія ЩУКІНА
«__» _____ 2024 р.

Керівник роботи
к.т.н, доцент
_____Олександр СІРІКОВ
«__» _____ 2024 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна (освітньо-наукова) програма

Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ Петро ПЛЄШКОВ

«_____» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Щукіної Надії Андріївни

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Дослідження впливу відновлювальних джерел енергії на стійкість енергетичної системи

Study of the influence of renewable energy sources on the sustainability of the energy system

2. Керівник роботи Сіріков Олександр Іванович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання роботи до захисту 02.12.2024 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Метою кваліфікаційної роботи є дослідження статичної та динамічної стійкості енергосистеми під час впровадження відновлювальних джерел енергії.

Завдання роботи: технічні аспекти та робота ВДЕ; аналіз впливу ВДЕ на стабільність енергетичної системи; статична та динамічна стійкість; аналітичне дослідження статичної та динамічної стійкості системи з СЕС.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І.В.</i>		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Вступ</i>	<i>11.10.24</i>	
2	<i>Технічні аспекти та робота ВДЕ</i>	<i>15.10.24</i>	
3	<i>Аналіз впливу ВДЕ на стабільність енергетичної системи</i>	<i>22.10.24</i>	
4	<i>Статична та динамічна стійкість</i>	<i>26.10.24</i>	
5	<i>Аналітичне дослідження статичної та динамічної стійкості системи з СЕС</i>	<i>02.11.24</i>	
6	<i>Охорона праці</i>	<i>15.11.24</i>	
7	<i>Висновки</i>	<i>01.12.24</i>	
8	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи та презентації до неї</i>	<i>06.12.24</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2024 р.

Підпис керівника

_____ Сіріков О.І.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2024 р.

Підпис здобувача

_____ Щукіна Н. А.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Щукіна Н. А. Дослідження впливу відновлювальних джерел енергії на стійкість енергетичної системи.

Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) рівнем вищої освіти за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження статичної та динамічної стійкості енергосистеми під час впровадження відновлювальних джерел енергії.

Дослідження впливу відновлювальних джерел енергії на статичну та динамічну стійкість системи полягало у аналізі джерел енергії, самої системи та розрахунку ризиків перед впровадженням системи у роботу. Були розглянуті проблеми та виклики, пов'язані зі стохастичністю роботи ВЕС та СЕС через погодні умови, такі як нестабільність генерації, наведені шляхи їх вирішення, у тому числі, акумулюванням енергії та впровадження інтелектуальних мереж. Проведено аналіз поточного стану та перспектив розвитку відновлюваних джерел енергії.

В роботі проведені розрахунки по аналітичному дослідженню статичної та динамічної стійкості енергосистеми з сонячною електростанцією. А саме досліджено поведінку коефіцієнту запасу статичної стійкості від потужності, що передається від станції в мережу, не порушуючи при цьому її стійкість. Оскільки при роботі з ВДЕ потужність може коливатись, подібні дослідження є необхідними при визначенні стійкості. На основі цих даних побудовано кутові характеристики, що відображають залежність між кутом ротора генератора і переданою потужністю в різних режимах. Визначення постійної інерції дозволило розрахувати граничний час, протягом якого коротке замикання повинно бути усунене для збереження динамічної стійкості системи.

Ключові слова: статична стійкість, динамічна стійкість, збурення, відновлювальні джерела енергії, потужність споживання.

ABSTRACT

Schukina N. A. Study of the influence of renewable energy sources on the sustainability of the energy system.

Qualification work for the second (master's) level of higher education in the specialty 141 "Electric Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics," educational and professional program "Electrical Systems of Energy Consumption," Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024.

The purpose of the qualification work is to study the static and dynamic stability of the power system during the implementation of renewable energy sources.

The study of the impact of renewable energy sources on the static and dynamic stability of the system consisted in the analysis of energy sources, the system itself and the calculation of risks before the system was put into operation. Problems and challenges associated with the stochastic operation of wind and solar power plants due to weather conditions, such as generation instability, were considered, and ways to solve them were given, including energy storage and the implementation of smart grids. An analysis of the current state and prospects for the development of renewable energy sources was conducted.

The work carried out calculations for the analytical study of the static and dynamic stability of the power system with a solar power plant. Namely, the behavior of the static stability reserve coefficient from the power transmitted from the plant to the network was studied, without violating its stability. Since when working with renewable energy sources, power may fluctuate, such studies are necessary when determining stability. Based on these data, angular characteristics were constructed, reflecting the relationship between the generator rotor angle and the transmitted power in different modes. The determination of the constant inertia allowed us to calculate the maximum time during which the short circuit must be eliminated to maintain the dynamic stability of the system.

Keywords: static stability, dynamic stability, disturbances, renewable energy sources, power consumption.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ	відновлювальні джерела енергії
ВЕС	вітрові електростанції
СЕС	сонячні електростанції
ТЕС	теплові електростанції
ГАЕС	гідроакumuлювальні станції
ЛЕП	лінії електропередач
СД	синхронні двигуни
АРЗ	автоматичні регулятори збудження

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ТА РОБОТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ	8
1.1. Законодавча база та політика впровадження ВДЕ.....	8
1.2. Стан розвитку та перспективи ВДЕ в Україні та світі	11
1.3. Технологічні особливості та інновації в області ВДЕ.....	15
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВДЕ НА СТАБІЛЬНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ	19
2.1. Збурення та поняття стійкості системи.....	19
2.2. Технічні проблеми пов'язані з провадженням ВЕС в енергосистему.....	21
2.3. Технічні проблеми пов'язані з провадженням СЕС у енергосистему.....	31
2.4. Питання балансування системи з ВДЕ	37
РОЗДІЛ 3 СТАТИЧНА ТА ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ	43
3.1. Методи забезпечення запасу статичної стійкості енергосистеми.....	43
3.2. Методи забезпечення запасу динамічної стійкості енергосистеми	53
РОЗДІЛ 4 АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОЇ ТА ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ З СЕС	56
4.1. Розрахунок запасів статичної стійкості системи	56
4.2. Розрахунок динамічної стійкості системи.....	62
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ	66
5.1. Загальні положення з охорони праці.....	66
5.2. Аналіз умов праці на СЕС	67
5.3. Заходи з охорони праці на СЕС	73
5.4. Пожежна безпека та екологічна складова	75
ВИСНОВКИ.....	78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	80

ВСТУП

Головним недоліком відновлювальних джерел енергії є нестабільність потужності, що подається в мережу. Нестабільність генерації створює додаткові виклики для підтримки статичної та динамічної стійкості системи, що може призводити до дисбалансів та зниження надійності енергопостачання.

Особливе значення має розробка і впровадження ефективних методів оцінки та управління запасами стійкості. Це передбачає аналіз змінних режимів роботи системи, визначення критичних точок, розробку механізмів швидкого реагування на збурення, а також використання сучасних програмних інструментів для моделювання і прогнозування. Кваліфікаційна робота спрямована на аналіз та розробку рішень, що сприятимуть підвищенню надійності та ефективності енергетичних систем із відновлювальними джерелами енергії, забезпечуючи їх стійкість і стабільність в умовах змінного енергетичного середовища.

Актуальність теми. Відновлювальні джерела енергії є важливим напрямком для України через енергетичний дефіцит і екологічні проблеми, а також для світу, де їх розвиток спрямований на зменшення викидів і збереження ресурсів. Зростання частки відновлювальних джерел у загальному енергетичному балансі вимагає нових підходів до забезпечення стабільності енергосистеми, оскільки відновлювальні джерела енергії характеризуються нестабільністю генерації, що ускладнює балансування мережі.

Проблема стійкості енергетичних систем є особливо актуальною в умовах глобального переходу до більш сталого розвитку, що включає інтеграцію великої кількості сонячних, вітрових та інших джерел енергії. Виклики, пов'язані із збуреннями системи та їхнім впливом на динамічну й статичну стійкість, вимагають ретельного аналізу, особливо з огляду на необхідність забезпечення надійного енергопостачання та зменшення ризику системних аварій.

Для України, критично важливим є розробка ефективних методів оцінки запасів стійкості та забезпечення їх достатнього рівня в умовах змінного

виробітку енергії. Актуальність дослідження посилюється необхідністю адаптації енергетичних систем до нових реалій, що включають зростаючі навантаження, інтеграцію нових технологій та використання сучасних моделей і підходів у плануванні й управлінні.

Мета і задачі дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є дослідження статичної та динамічної стійкості енергосистеми під час впровадження відновлювальних джерел енергії.

Для досягнення мети поставлено й розв'язано такі задачі:

1. Розглянути технічні аспекти та роботу відновлювальних джерел енергії, перспективи їх розвитку;
2. Проаналізувати поняття збурення системи, балансування мережі;
3. Визначити поняття динамічної та статичної стійкості, методів забезпечення їх запасу;
4. Провести розрахунок запасів статичної та динамічної стійкості на прикладі конкретної моделі системи.

Об'єктом дослідження є вплив відновлювальних джерел енергії на стійкість енергетичної системи.

Предметом дослідження є розрахунок коефіцієнту запасу статичної стійкості та граничного часу у системі з відновлювальним джерелом енергії.

Методи дослідження. В роботі застосовані наступні методи: аналіз при розгляді технічних аспектів роботи відновлювальних джерел енергії, перспективами їх подальшого розвитку; математичним моделюванням при аналізі збурень в системі, розрахунком кутової характеристики під час різних режимів її роботи.

Науково-практична новизна одержаних результатів: удосконалено метод визначення коефіцієнтів запасу стійкості з урахуванням особливостей генерації відновлювальних джерел; досліджено особливості впливу змінного виробітку відновлювальних джерел енергії на балансування енергетичної мережі; проведено оцінку впливу короткочасних збурень та нестабільності генерації на параметри стійкості системи.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ТА РОБОТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

1.1. Законодавча база та політика впровадження ВДЕ

Використання екологічних відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) стає актуальним для України, зокрема через енергетичний дефіцит в існуючій енергосистемі та незадовільний стан довкілля. У сучасних розвинених країнах ВДЕ є одним із ключових напрямків розвитку енергетики, оскільки це допомагає вирішити проблеми енергетичної нестабільності та скоротити шкідливі викиди, які утворюються під час використання традиційних джерел енергії.

Разом з цим ВДЕ дозволяють зберегти запаси органічної сировини для неенергетичних цілей і забезпечити ресурси для майбутніх поколінь. У глобальному масштабі відбуваються активні зусилля щодо зниження рівня забруднення, зокрема шляхом зменшення викидів парникових газів. Основним із ключових заходів є Паризька кліматична угода, підписана 12 грудня 2015 року, ціллю якої є обмеження підвищення температури до 1,5 °C порівняно з доіндустріальним періодом [15].

Ця угода передбачає, що країни, незалежно від рівня економічного розвитку, мають взяти на себе зобов'язання щодо зниження шкідливих викидів. Досягнення цих цілей планується шляхом підтримки держав, які розвивають низьковуглецеві технології, а також скорочення використання викопного палива. Україна, як учасник угоди, має на меті скоротити викиди вуглекислого газу на 40% до 2030 року та поставила перед собою амбітну ціль зменшити їх на 70% до 2050 року.

Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 року № 373-р було затверджено нову Енергетичну стратегію України до 2050 року. На сьогоднішній день документ є закритим через воєнний стан, але з доступних новин та офіційних заяв можна отримати загальне уявлення про його основні

цілі. Головним завданням цієї стратегії є перетворення України на енергоінноваційний хаб Європи. Основним партнером виступає уряд Великобританії, який надає технічну допомогу у виконанні енергетичної стратегії [10].

Амбітний план країни передбачає значне збільшення потужностей генерації відновлюваної енергії до 2050 року. Енергетична частка споживання відповідно ілюстрована на рисунку 1.1.1. Загалом планується збільшити потужності вітрових електростанцій до 140 ГВт, для чого буде залучено приблизно \$134 млрд інвестицій. Сонячна енергетика досягне 94 ГВт з інвестиціями в \$62 млрд. Для накопичувачів енергії планується розширення до 38 ГВт (\$25 млрд), атомна енергетика виросте до 30 ГВт (\$80 млрд), а також буде збільшено потужності ТЕЦ і біоенергетики до 18 ГВт та гідроенергетики до 9 ГВт з інвестиціями в \$4,5 млрд.

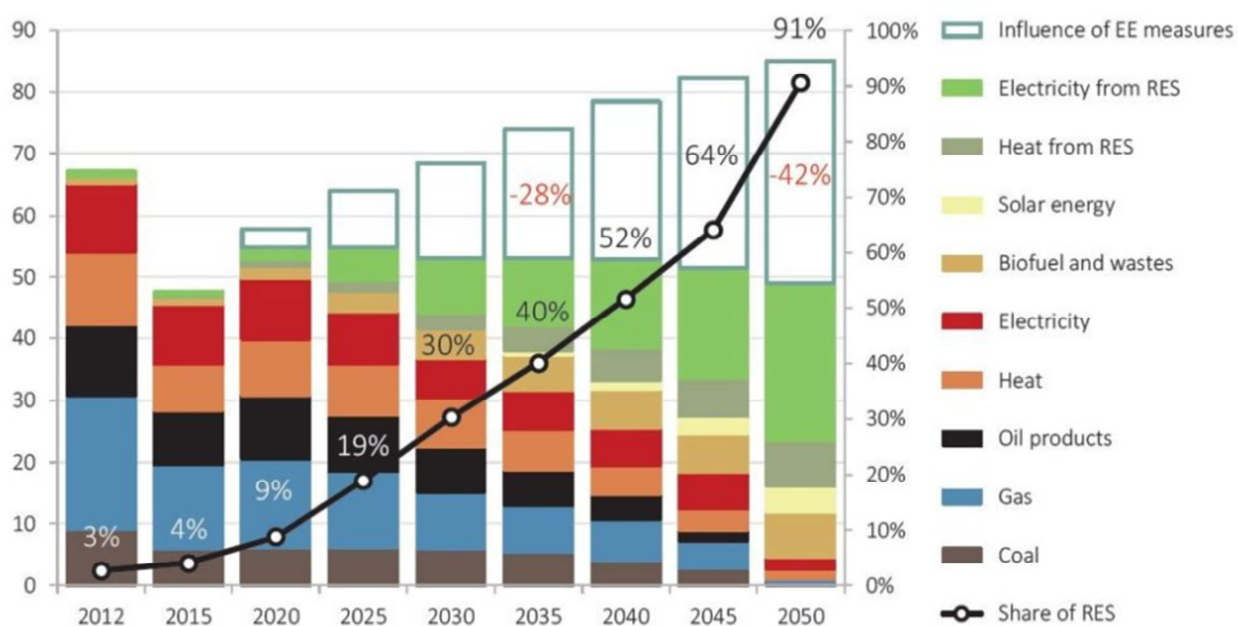


Рисунок 1.1.1 Прогнозування частки ВДЕ в загальному енергоспоживанні

Ще варто зазначити, як однією з ключових подій для енергетичної сфери України стало її приєднання до європейської мережі операторів системи передачі електроенергії ENTSO-E 16 березня 2022 року, що відбулося на рік раніше запланованого.

В цілому, за останні роки в Україні помітно зросла частка ВДЕ в загальній енергетичній системі, особливо у сегменті вітрової та сонячної електроенергетики. Мала гідроенергетика також продовжує стабільно розвиватися, а біоенергетична галузь демонструє позитивні зміни. Прогрес у відновлюваній енергетиці та енергоефективності став можливим завдяки активним науково-дослідним роботам, що спрямовані на досягнення європейських і світових стандартів.

Значне впровадження ВДЕ потребувало розвитку акумулюючих потужностей, зокрема на основі водневих технологій. Це стало важливим для створення необхідних балансуючих потужностей в рамках реалізації Закону України від 25 квітня 2019 року щодо створення сприятливих умов для генерації енергії з ВДЕ [4]. На практиці стало видно, що підхід сприяв покращенню сумісності різних видів ВДЕ з Об'єднаною енергетичною системою України.

Для ефективного науково-технологічного забезпечення та розвитку відновлюваної енергетики створюється єдина інфраструктура, яка об'єднує науку, освіту, законодавство та промисловість. Широке освоєння енергоресурсів з ВДЕ у різних напрямках, де Україна має значний потенціал, дозволить створити незалежну енергетичну систему та мінімізувати шкідливі викиди в атмосферу.

Однак енергетика України перебуває у кризовому стані. Основними причинами цього є:

- загроза енергетичної незалежності через залежність від імпорту енергоносіїв та обладнання з країн, які можуть порушувати домовленості;
- вичерпання технічних ресурсів і необхідність термінової модернізації ТЕС і АЕС за рахунок іноземних інвестицій, оскільки в бюджеті України відсутні необхідні кошти;
- значні збитки, яких завдано під час широкомасштабного вторгнення.

Ключові фактори, що підкреслюють важливість розвитку відновлюваної енергетики в Україні, включають:

- зростання дефіциту традиційних енергоресурсів та підвищення їхньої вартості на світових ринках, а також проблеми з постачанням з-за кордону;
- низька ефективність традиційних паливно-енергетичних ресурсів у структурі паливно-енергетичного комплексу;
- екологічні проблеми, разом з цим потреба дотримання міжнародних зобов'язань, таких як Кіотський протокол та Паризька угода.

1.2. Стан розвитку та перспективи ВДЕ в Україні та світі

Основна перевага використання відновлюваних енергоресурсів полягає в їх невичерпності та екологічній безпечності. Вони сприяють поліпшенню екологічного стану та не порушують енергетичний баланс планети. Використання таких джерел енергії усуває потребу в видобутку, обробці, збагаченні та транспортуванні палива, а також позбавляє від проблеми утилізації або захоронення відходів, що є типовими для традиційної енергетики.

Головним недоліком ВДЕ є їхня стохастичність, тобто непостійність і змінність енергетичних потоків. Це створювало проблеми для забезпечення стабільного енергопостачання. Однак сучасні технології, обладнання і методи раціонального використання відновлюваних джерел, засновані на комбінуванні різних джерел енергії та енергетичних акумуляторів, значно знизили ці перешкоди та стимулювали стрімкий розвиток галузі у всьому світі.

За якістю джерел відновлювану енергію можна поділити на такі групи:

1. Відновлювані джерела механічної енергії включають гідроенергію, енергію вітру, хвиль. Такі джерела зазвичай використовуються для виробництва електроенергії, і мають високі показники ефективності: вітрова енергія – до 30 %, гідроенергія – 60 %, хвильова і припливна – до 75 %.

2. Теплові ВДЕ: включають пряму сонячну енергію та біопаливо. Згідно з другим законом термодинаміки, на практиці можна перетворити лише близько половини теплової енергії цих джерел в корисну механічну дію. Наприклад, сучасні парові турбіни мають ефективність до 35 %.

3. Фотонні процеси: охоплюють джерела, що базуються на фотосинтезі та фотоелектричних ефектах. Перетворення енергії сонячного випромінювання у всьому спектрі є непростим завданням, яке досліджується, але на сьогоднішній день коефіцієнт корисної дії фотоелектричних перетворювачів не перевищує 25 %.

ВДЕ мають специфічні характеристики, що вимагають науково обґрунтованого підходу для їх ефективного перетворення в енергію, необхідну для споживачів. Постійна наявність потоків відновлюваної енергії в навколишньому середовищі вимагає врахування локальних умов, що сприяє вибору найбільш ефективних джерел енергії для конкретного регіону [1] [3].

Одним із основних чинників ефективного використання ВДЕ є комплексний підхід до планування. ВДЕ включають міждисциплінарні дослідження, що охоплюють сфери від промислової біотехнології до електроніки та управління процесами. Цей підхід сприяє прискоренню економічного розвитку регіонів, зокрема завдяки використанню місцевих ВДЕ.

Для успішного планування відновлювальної енергетики є необхідним:

1. Систематичне дослідження середовища: аналогічне до геологічних досліджень при пошуках викопних енергоносіїв.
2. Оцінка енергетичних потреб регіону: промисловість, сільське господарство, побутові потреби.
3. Оцінка енергетичного потенціалу ВДЕ: це потребує довготривалих спостережень та аналізу.

Найбільш широке застосування мають:

1. Гідроенергія: добре розвинена велика гідроенергетика та малі проєкти у важкодоступних районах.
2. Вітрова та сонячна енергія: є найбільш масштабними напрямками з великим потенціалом.
3. Біомаса: спалювання біомаси для отримання тепла стає популярним, як і використання біогазу.

4. Геотермальна енергія: використовується в окремих регіонах для опалення та гарячого водопостачання.

Вартісні показники електроенергії з ВДЕ вже досягли рівня традиційних електростанцій, а очікуване зниження вартості технологій для вітрових (13%) та сонячних (57%) електростанцій протягом наступного десятиліття сприятиме їх більшому впровадженню в Україні. Відновлювана енергетика має потенціал забезпечити енергетичну незалежність України за умови стабільного економічного та політичного середовища. Забезпечення стабільності законодавства, інвестиційних умов та фінансування проєктів відновлюваної енергетики дозволить Україні модернізувати свою енергетичну систему. Історично, ВДЕ завжди були важливими для української енергетики, починаючи з використання вітрових і водяних джерел, у тому числі і біомаси. Однак після середини XX століття ці джерела були майже повністю забуті, що змінилося після енергетичних криз та аварій на атомних електростанціях.

Світова тенденція розвитку відновлюваної енергетики актуальна для всіх країн, незалежно від рівня промислового розвитку. Для країн, що промислово мало розвинуті, важливою є енергетична безпека, а для розвинених країн – екологічна безпека та збереження органічних ресурсів для наступних поколінь. У розвинених країнах також гостро стоїть питання зменшення викидів парникових газів, оскільки парниковий ефект, викликаний викидами CO₂, є однією з найбільших екологічних проблем.

Розширення використання ВДЕ сприятиме глобальному зменшенню викидів CO₂ і дозволить збільшити виробництво енергії без впливу на тепловий баланс планети. Оскільки ці джерела використовують природні потоки енергії, теплове забруднення є мінімальним, а також незначними є інші види забруднення та відходів, що робить відновлювану енергетику значно більш екологічною порівняно з викопними паливами або атомною енергією. Основним екологічним недоліком установок на ВДЕ є порушення природного ландшафту, що особливо помітно при використанні потужних установок. Наприклад, будівництво великих гідроелектростанцій може призвести до зміни

рельєфу місцевості, ерозії ґрунту та погіршення його якості, що, своєю чергою, впливає на землеробство [19]. Ці екологічні наслідки необхідно враховувати, і в деяких випадках доцільно уникати спорудження надто потужних установок, щоб мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Проте, відновлювана енергетика має низку переваг для сільських районів, де її застосування може прискорити економічний розвиток. Наприклад, біомаса та відходи сільськогосподарських підприємств можуть використовуватись для виробництва енергії, що допомагає покращити соціально-побутові умови сільського населення. Малі гідроелектростанції, вітрові агрегати та сонячні установки можуть забезпечувати енергією селища та агропромислові підприємства, знижуючи залежність від централізованого енергопостачання.

Станом на 2024 рік в Україні більшість «зеленої» енергії (75%) виробляється сонячними електростанціями (СЕС). Їх загальну кількість наочно показано на рисунку 1.2.1.

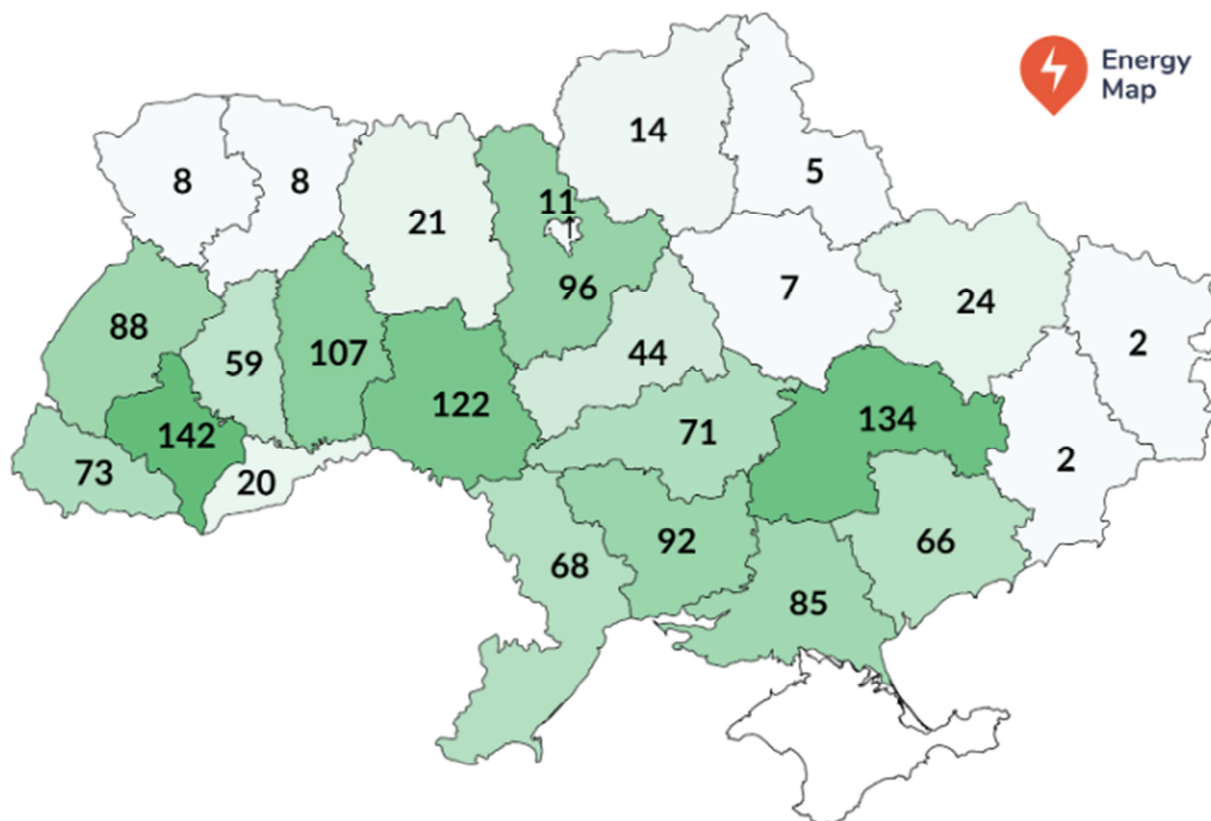


Рисунок 1.2.1 Кількість СЕС по областям України

Водночас гідроенергетика зазнала значних втрат через війну, внаслідок якої було зруйновано або пошкоджено частину гідроенергетичних об'єктів, включаючи Каховську та Канівську ГЕС. Це призвело до втрати близько 2500 МВт потужностей. Північно-східні регіони країни володіють значним потенціалом, який є важливим в зв'язку з розвитком вітрової енергетики завдяки високій середній швидкості вітру. До початку війни в Україні працювало 34 вітрові електростанції, але більшість цих об'єктів було пошкоджено або окуповано.

Попри ці втрати, вітрова енергетика продовжує розвиватись, зокрема завдяки введенню в експлуатацію нових об'єктів, таких як Тилігульська вітроелектростанція (ВЕС) потужністю 78 МВт. Це створює перспективи для інвестицій у відновлення цього сектору.

Ядерна енергетика залишається ключовою складовою енергетичного сектору України, забезпечуючи 49,2% електроенергії країни станом на 2024 рік. Україна посідає одну з провідних позицій у Європі за виробництвом електроенергії на атомних станціях, а загальна потужність 15 ядерних енергоблоків становить 13 835 МВт.

1.3. Технологічні особливості та інновації в області ВДЕ

Акумуляування енергії та розвиток інтелектуальних мереж є важливими аспектами для стабільного функціонування енергетичної системи з великою часткою ВДЕ, таких як сонячна та вітрова енергетика. Сучасні інтелектуальні мережі є ключовими для переходу на більш стійкі та ефективні системи енергопостачання, які можуть інтегрувати в себе різноманітні ВДЕ, підвищуючи таким чином загальну ефективність енергетичної інфраструктури. Також ефективним є комбінація існуючих систем. В цілому, можна зазначити основні складові кожного аспекту, для спрощеного, але точного аналізу.

Акумуляування енергії:

1. Літій-іонні батареї: технологія є найбільш популярною в сфері акумуляування енергії, широко застосовується як у домашніх умовах, так і на

промислових об'єктах. Основними перевагами літій-іонної батареї є висока енергоємність, що дозволяє зберігати значну кількість енергії в компактному вигляді, а також їхня низька вага, що робить їх зручними для використання в портативних пристроях. Крім того, технології, пов'язані з безпекою та довговічністю батареї, постійно удосконалюються, що сприяє їхньому подальшому розвитку та впровадженню нових рішень у цій галузі.

2. Гідроакумулюючі станції: здійснюють акумулювання енергії шляхом перекачування води в резервуари, розташовані на великій висоті. Коли виникає потреба в електроенергії, вода з резервуарів спускається вниз, використовуючи свій потенціал для обертання турбін і генерації електричної енергії. Цей метод дозволяє ефективно зберігати енергію та забезпечувати стабільне постачання електрики в моменти пікового споживання, а також вносити свій внесок у баланс енергетичної системи.

3. Водневі системи: використання водню як засобу для довгострокового зберігання енергії набирає популярності. Водень може бути отриманий шляхом електролізу води, де електрична енергія розкладає воду на водень і кисень. Цей водень можна зберігати та використовувати у паливних елементах для генерації електрики, що робить його важливим компонентом у розробці екологічно чистих та відновлювальних джерел енергії. Водневі системи пропонують не лише можливість зберігати енергію, але й забезпечують гнучкість у її використанні в різних секторах, включаючи транспорт та промисловість.

Інтелектуальні мережі (Smart Grids):

1. Автоматизовані системи управління: системи здійснюють моніторинг та контроль потоків електроенергії в режимі реального часу, що забезпечує стабільність енергетичних мереж, особливо в контексті використання змінних джерел, таких як енергія сонця та вітру. Завдяки сучасним технологіям, таким як Інтернет речей (IoT), вони здатні адаптуватися до коливань попиту та пропозиції енергії, що підвищує надійність електропостачання.

2. Децентралізовані ресурси: у рамках інтелектуальних мереж важливу роль відіграють локальні акумулятори, сонячні панелі та мікроелектростанції. Ці елементи допомагають балансувати навантаження в мережах, що робить їх менш вразливими до пікових навантажень. Децентралізація енергетичних систем сприяє зниженню втрат енергії та підвищенню ефективності, оскільки енергія генерується ближче до місця споживання.

3. Прогнозування виробництва та споживання енергії: інтелектуальні мережі використовують потужні аналітичні інструменти для прогнозування як виробництва ВДЕ, так і їх споживання. Це дає змогу оптимізувати функціонування енергетичних систем, покращуючи управління ресурсами та знижуючи витрати. Завдяки таким технологіям можна ефективніше використовувати енергію, що зберігається, і планувати її споживання відповідно до змін у попиті.

Комбіновані системи та енергоефективність:

1. Комбінація сонячної та вітрової енергії: застосування сонячних панелей разом з вітровими турбінами є ефективним методом згладжування коливань в енергетичному виробництві. Сонячна енергія досягає максимуму в денний час, тоді як вітрова енергія часто буває найвищою вночі або під час сильних вітрів. Цей синергетичний підхід дозволяє оптимізувати використання обох видів енергії, забезпечуючи більшу стабільність електропостачання та зменшуючи потребу в традиційних резервних джерелах енергії.

2. Гібридні станції: встановлення акумуляторів у гібридних станціях є ключовим елементом для підвищення енергоефективності. Ці акумулятори дозволяють накопичувати надлишкову енергію, отриману під час пікових виробничих періодів, і використовувати її під час пікових навантажень або при зниженні виробництва. Завдяки цьому, гібридні системи здатні забезпечити безперервність електропостачання навіть за умов нестабільного виробництва з відновлювальних джерел. Це також знижує витрати на електрику для споживачів і підвищує ефективність всієї енергетичної системи.

3. Біомасові теплоелектростанції: біомасові теплоелектростанції забезпечують стабільне джерело енергії, яке не залежить від погодних умов. Використання біомаси як пального дозволяє отримувати електричну енергію без викидів CO_2 , оскільки рослинні матеріали вважаються вуглецево нейтральними. Ці станції можуть працювати у режимі базового навантаження, постачаючи електроенергію протягом доби, а також у пікові періоди, коли інші джерела енергії можуть бути не в змозі задовольнити попит.

Інновації в матеріалах:

1. Вітрові турбіни: інновації в матеріалах, зокрема використання легких вуглецевих композитів, значно підвищують продуктивність вітрових турбін. Ці нові матеріали не лише зменшують вагу конструкції, але й підвищують її міцність, що дозволяє виробляти більш великі та ефективні турбіни. Легші компоненти зменшують витрати на транспортування та встановлення, а також знижують витрати на обслуговування. Внаслідок цього, вітрові електростанції стають економічнішими та конкурентоспроможнішими у порівнянні з традиційними джерелами енергії.

2. Сонячні панелі: використання нових матеріалів, зокрема перосквітів, значно підвищує ефективність перетворення сонячного світла в електричну енергію. Перосквіти мають вищий коефіцієнт ефективності порівняно з традиційними кремнієвими панелями, що дозволяє зменшити витрати на виробництво та збільшити продуктивність сонячних установок. Завдяки своїм унікальним властивостям, перосквіти можуть бути використані в легших і гнучких панелях, що розширює можливості їхнього застосування в різних умовах, включаючи невеликі домашні системи та великомасштабні СЕС [2].

Ці технології мають великий потенціал для збільшення ефективності роботи та надійності енергетичних систем, заснованих на ВДЕ, що робить їх більш конкурентоспроможними та стабільними.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВДЕ НА СТАБІЛЬНІСТЬ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Збурення та поняття стійкості системи

Впровадження потужних ВЕС і СЕС в енергосистеми ускладнює управління режимами функціонування енергетичних об'єднань. Зокрема, загострюється питання забезпечення стабільності роботи енергосистем при підключенні великих джерел відновлювальної енергії для генерації.

Стійкість режимів роботи енергосистеми є ключовим параметром, що визначає її здатність ефективно працювати при різноманітних збуреннях. Вона характеризується здатністю системи повертатися до усталеного стану після змін в роботі або раптових аварійних ситуацій. Це явище охоплює широкий спектр процесів, які можуть впливати як на локальні, так і на глобальні рівні стабільності [7].

Основними факторами, що визначають стабільність системи, є рівень інерції системи, баланс активної потужності, регулювання частоти та напруги, наявність резерву потужності. Для підтримання стабільності енергосистема має ефективно протидіяти внутрішнім і зовнішнім збуренням, які можуть спричиняти як малі, так і значні відхилення параметрів роботи.

Внутрішні збурення виникають всередині енергосистеми та пов'язані з її власними процесами та компонентами. До основних внутрішніх збурень належать:

- 1) зміни навантаження: коливання споживання електроенергії споживачами, які можуть бути спричинені добовими, сезонними або технологічними факторами;
- 2) відмови обладнання: несправності генераторів, трансформаторів, ліній передачі або іншого обладнання, що можуть призвести до порушення балансу потужності;

3) планові огляди: відключення для технічного обслуговування або модернізації компонентів енергосистеми;

4) коливання генерації: нестабільність виробництва електроенергії, особливо з відновлюваних джерел, таких як ВЕС та СЕС.

Зовнішні збурення у той час походять ззовні енергосистеми та можуть бути спричинені природними або антропогенними факторами. Основні зовнішні збурення включають:

1) природні явища: бурі, землетруси, повені, які можуть пошкодити інфраструктуру енергосистеми;

2) кліматичні умови: екстремальні температури, які впливають на ефективність роботи обладнання та ліній передачі;

3) техногенні фактори: аварії на промислових об'єктах, транспортні інциденти, що можуть вплинути на роботу енергосистеми;

4) соціально-економічні події: страйки, війни, терористичні акти, які можуть призвести до раптових змін у споживанні або пошкодження інфраструктури.

Розуміння та систематизація збурень дають змогу розробляти дієві стратегії для підтримки стійкості та надійності енергосистем, а також запобігати їх виникненню завчасно.

Стійкість енергосистем поділяється на *статичну* та *динамічну* [22].

Статична стійкість визначає здатність енергосистеми відновлювати стабільний режим після незначних збурень, таких як малі коливання навантаження чи генерації. Вона визначається співвідношенням між потужністю генераторів та навантаженням, а також параметрами ліній передачі. Варто зауважити, що статистична стійкість зазвичай порушується в першу чергу, бо на неї може вплинути менша кількість збурень, тобто проблему статистичної стійкості варто вирішувати першочергово. Одним із видів статичної стійкості є коливальна. Для забезпечення коливальної стійкості важливо підтримувати баланс між виробництвом і споживанням, а також контролювати коливання внаслідок динамічних процесів в системі. Це дає

змогу уникати негативних наслідків для мережі при великих навантаженнях і аваріях, а також оптимізувати ефективність її роботи.

Іншими способами забезпечення статичної стійкості є застосування автоматичних регуляторів збудження генераторів для управління напругою та впровадження компенсуючих пристроїв.

Динамічна стійкість, відповідно, є здатністю системи відновлювати стабільний режим після великих збурень, під час яких зміни параметрів режиму порівнюються з їх початковими значеннями, таких як короткі замикання, відключення генераторів або ліній передачі. Вона залежить від динамічних властивостей генераторів, систем автоматичного регулювання та структури мережі.

Методами забезпечення динамічної стійкості є встановлення систем протиаварійної автоматики, покращення характеристик генераторів та оптимізація структури мереж, тобто надійне підключення вузлів системи та системи автоматичного відключення навантаження у разі значних порушень.

2.2. Технічні проблеми пов'язані з провадженням ВЕС в енергосистему

Збалансованість споживання електроенергії та регулювання частоти є ключовими технічними викликами в енергосистемах з високим рівнем інтеграції ВДЕ. Якщо розглядати вітрову та сонячну енергетику, то варто вирахувати їх вплив, пов'язаний з випадковою генерацією сонця через хмарність та зміну швидкості вітру.

Аналіз впливу ВЕС на коливальну стійкість енергосистеми вимагає визначення періодичних збурень шляхом дослідження масивів даних про швидкість вітру та прогнозування можливих збурень. За статистичними даними, періодична складова швидкості вітру проявляється лише в добовому вимірі й має незначну амплітуду порівняно з нерегулярною складовою.

Зі збільшенням частки ВЕС зменшується інерція системи, ускладнюється балансування, а природні коливання потужності в часових

межах 1–6 годин стають критичними, але географічний розподіл станцій частково згладжує ці коливання. Перед аналізом роботи збираються початкові дані, включаючи середні значення (математичні сподівання), максимальні та середні відхилення (дисперсії), дозволені коливання за одиницю часу, а також тип розподілу ймовірностей певних значень. Для прикладу можна поглянути графік на рисунку 2.2.1, де для загального аналізу виділяється осереднені криві значень швидкості вітру за рік [13].

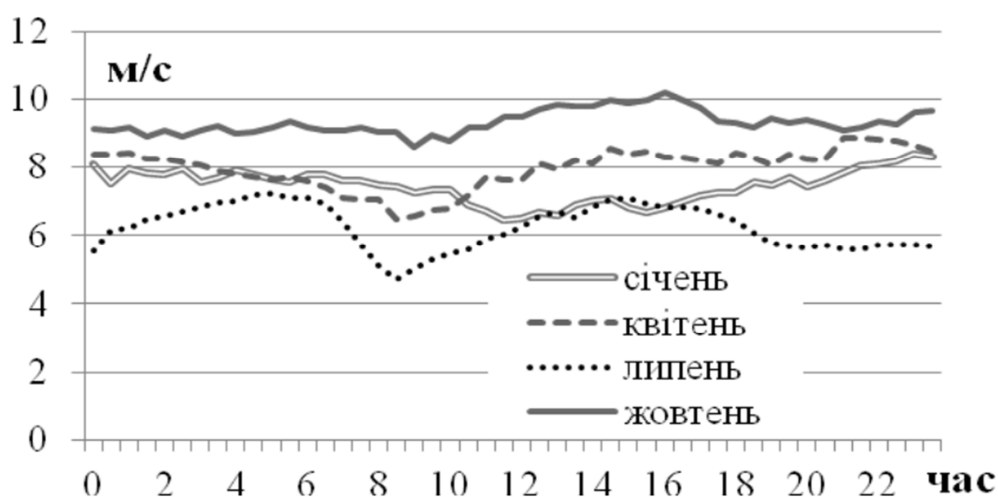


Рисунок 2.2.1 Середня добова швидкість вітру за рік

На рисунку 2.2.2 представлено приклад щодо поточної потужності енергосистеми з ВЕС, з гіпотезою постійності добового ходу та розмахом коливань відносно середніх значень. Наявність графічного зображення даних створює чіткіше уявлення про роботу системи.

Розрахунки миттєвої потужності ВЕС, які базуються на осередненому сезонному значенні (трендовій кривій), середньодобовому значенні як випадковій величині та короткотермінових змінах як випадковому процесі, дають більш точно оцінити варіативність вітрової потужності на різних часових масштабах і спрогнозувати навантаження на енергосистему, враховуючи як середні, так і випадкові зміни.

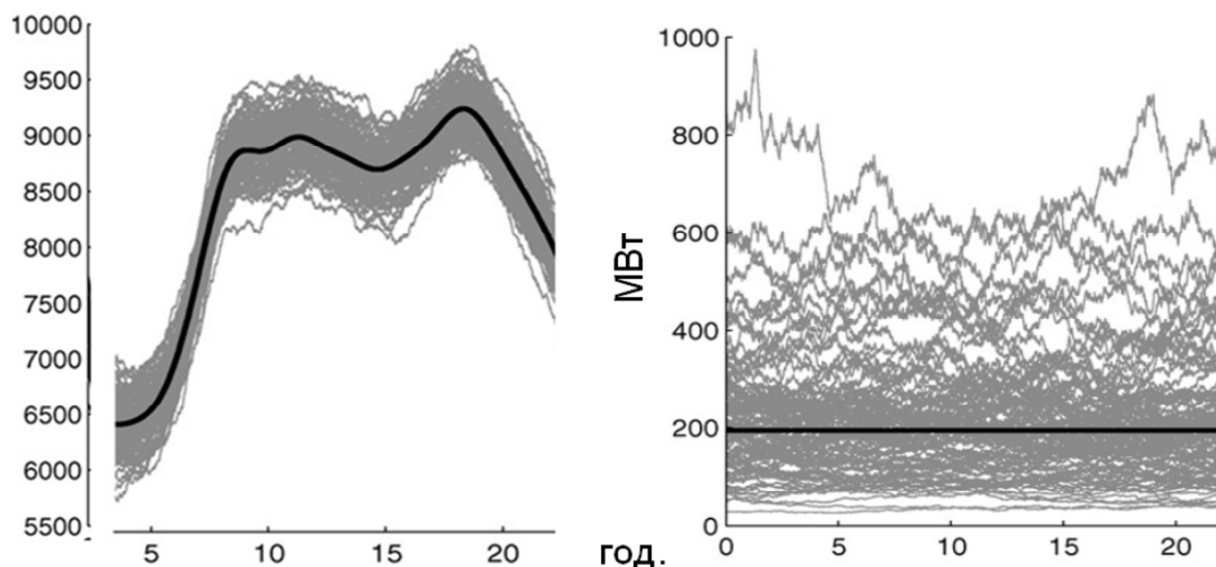


Рисунок 2.2.2 Потужність ВЕС та розмах коливань

Регулювання частоти первинним резервом (у межах секунд) зазвичай не є критичною проблемою для великих енергосистем, але може бути викликом для менших систем або тих із високою часткою ВЕС.

Традиційні методи аналізу стійкості синхронних генераторів добре вивчені, але з інтеграцією ВЕС потрібен розвиток підходів. Питання стійкості стосується як самих ВЕС, так і їх впливу на інші електростанції. Малозначні збурення постійно відбуваються в енергосистемі, і їх коливання мають бути ефективно демпфовані, щоб уникнути втрати стійкості.

Для енергосистем з традиційними джерелами енергії застосовуються методи аналізу звичайних диференціальних рівнянь, що дають змогу визначити частоту, демпфування та роль генераторів у коливаннях. Домінуючі частоти коливань об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України лежать у межах 0,2-1,2 Гц. Це характерно для генераторів, напряму підключених до мережі.

Сучасні ВЕС із мегаватними вітровими електричними установками (ВЕУ) використовують інвертори, не підключаючись безпосередньо до мережі, тому вони не беруть участі в електромеханічних коливаннях. У таких системах аналіз стійкості враховує швидкі зміни генерації як малі збурення.

Раптове зниження генерації вітроустановками може статися при різкому збільшенні швидкості вітру понад 25 м/с, що активує захист ВЕУ та знижує генерацію майже до нуля. Іншим небезпечним режимом є швидкі коливання швидкості вітру в межах 7–12 м/с, коли потужність ВЕУ може змінюватися від 30 до 100% від номінального значення. Хоча ці зміни є слабкими збуреннями для статичної стійкості, їх регулярний характер може впливати на коливальну стійкість, якщо частота змін збігається з власними частотами енергосистеми.

Для сучасних ВЕУ максимальна швидкість зміни потужності досягає 10% від встановленої потужності за секунду, але групове підключення в межах ВЕС та розподілення по території зменшують несинхронні коливання. У таких умовах зміни сукупної потужності групи ВЕС є плавними. За даними ІЕА, у екстремальних умовах стрибки потужності ВЕС становлять 10–35% номінальної потужності за годину (інколи до 40%), але середній темп змін – лише 5% на годину. За хвилину потужність змінюється не більше ніж на 0,5–0,8% від номінальної [13] [16].

Розмах коливань для окремих агрегатів більший, ніж для розподілених ВЕС. Для 1-годинного осереднення стандартне відхилення потужності збільшується на третину, якщо кількість ВЕУ зменшується з понад 250 до менш ніж 14. На довших інтервалах можливі значні коливання, аж до повної зупинки ВЕУ в екстремальних випадках.

Швидке проходження грозового фронту через великі території потребує ефективних методів прогнозування роботи ВЕС, щоб заздалегідь підготуватися до змін потужності. Вплив ВЕС на динамічні характеристики енергосистеми стає помітнішим зі збільшенням їхньої частки у структурі генерації. Основні фактори впливу включають зменшення інерції системи через заміщення синхронних генераторів, зміщення робочих точок генераторів, що погіршує демпфувальні властивості, та зміни потокорозподілу в мережі.

Щодо динамічної стійкості, сучасні ВЕС не беруть прямої участі в електромеханічних коливаннях, але їх непрямий вплив змінює властивості енергосистеми, особливо в умовах великих збурень, таких як раптовий

небаланс потужності. У разі заміщення синхронних генераторів ВЕС, погіршення частоти в системі можливе лише за умови зменшення кількості підключених синхронних машин. Найбільшу небезпеку для енергосистеми становить раптове й масове відключення ВЕС, що може спричинити аварійний небаланс, при тому додатковий резерв має становити 10–15% від установленної потужності ВЕС, залежно від точності прогнозів та географічної дисперсії станцій.

Динамічна стійкість ВЕС, які не використовують синхронні генератори, полягає у здатності працювати без відключення при короткострокових спадах напруги, викликаних, наприклад, короткими замиканнями [15]. В Україні для ВЕС потужністю понад 2 МВт передбачено витримку падіння напруги до 20% від номіналу протягом 0,5 секунди. Більшість сучасних ВЕС уже відповідають цим вимогам.

Діючі правила в Україні передбачають врахування відключення ВЕС у розрахунках динамічної стійкості вузлів за значних відхилень напруги чи частоти. Уставки спрацювання таких відключень обираються з урахуванням рекомендацій виробників. Системи захисту ВЕС одночасно захищають обладнання станцій від аварійних збурень у мережі та енергосистему – від порушень усередині ВЕС.

За значного впровадження вітроенергетика може взяти на себе відповідальність за підтримання напруги та частоти. Сучасні ВЕС технічно здатні забезпечувати це завдяки гнучкості програмованого керування активною та реактивною потужностями. Відповідно до мережевих кодексів, ВЕС повинні підтримувати частоту шляхом регулювання активної потужності відповідно до заданих зовнішніх параметрів. За потреби потужність змінюється з максимально допустимою швидкістю.

ВЕС впливають на резерви стабільності енергосистеми, хоча їхній вплив на межу стійкості є незначним, і пропускна здатність перетину змінюється не суттєво.

Додаткове навантаження або розвантаження перетину, спричинене вітровою генерацією в нормальному режимі, може впливати на запас стійкості, який визначається різницею між поточним і максимально допустимим завантаженням.

Перевищення допустимої активної потужності викликає перехідний режим між нормальним і післяаварійним станами. Післяаварійний режим може тривати до 20 хвилин, доки диспетчер не відновить необхідні резерви стійкості. При аналізі впливу ВЕС важливо визначити, чи викликають вони значні збурення та чи є можливість забезпечити достатній запас стійкості системи [15].

Варто також зазначити, що значне впровадження вітроенергетики обов'язково вимагатиме регулювання поточної потужності енергосистеми для балансування коливань енергії вітру, особливо якщо це не супроводжується технологіями акумулювання енергії.

Вплив змін потужності на стійкість досліджується через коефіцієнт запасу статичної стійкості, що враховує активну потужність у точці перетину:

$$K_p = \frac{P_{ГР} - P - \Delta P}{P_{ГР}}, \quad (2.2.1)$$

де $P_{ГР}$ – активна потужність у стані граничної статичної стійкості, МВт;

P – активна потужність у заданому режимі, $P > 0$, МВт;

ΔP – випадкові коливання активної потужності, МВт.

Унаслідок нерегулярних коливань потужність у перетині змінюється в діапазоні $P \pm \Delta P$.

Коефіцієнт запасу K_p використовується для оцінки віддаленості поточного режиму від межі стійкості. Його мінімальні значення мають бути не меншими за 0,2 у нормальному режимі та 0,08 у післяаварійному [9]. Для кожного контрольованого перетину визначається максимально допустимий рівень перетоку активної потужності:

$$P_{MD} = P_{GP}(1 - P_p) - \Delta P. \quad (2.2.2)$$

Оперативно-диспетчерський відділ має зобов'язання забезпечувати виконання рівності: $P \leq P_{MD}$. Величина ΔP у контрольованому перетині визначається на основі даних вимірювань, які відображають коливання активної потужності з періодом від 2 до 60 хвилин. Якщо дані вимірювань відсутні, то значення ΔP розраховують за спеціальною формулою:

$$\Delta P = K \sqrt{\frac{P_{H1} \cdot P_{H2}}{P_{H1} + P_{H2}}}, \quad (2.2.3)$$

де P_{H1} , P_{H2} – це загальні потужності навантаження (за умови максимального навантаження) з обох сторін перетину, МВт;

$K = 1,50$ – для випадку ручного регулювання потужності перетоку в перетині;

$K = 0,75$ – для автоматичного регулювання та обмеження перетоку.

Нехай формули (2.2.1) – (2.2.3) описують роботу "чистої" енергосистеми (без значущого впливу ВЕС). Теоретично, максимальний рівень нерегулярної (випадкової) складової ΔP згідно з формулою (2.2.3) буде досягнутий при умові: $P_{H1} = P_{H2} = P_H$. Тобто, якщо $P_H = 30$ ГВт (підрахована потужність енергосистеми України) і $K_p = 0,2$ (навантаження, яке досягає найбільших показників), то $\Delta P = 34$ МВт.

Як можна помітити, теоретично відносна амплітуда випадкових коливань потужності збільшується при зменшенні потужності в контрольованих перетинах і коливається в межах 1-4%.

Особливості випадкових коливань потужності. Крива поточної потужності енергосистеми України має значну плавність, тому добовий графік потужності можна вважати прогнозованим.

Якщо звернути увагу на рисунок 2.2.3, то на ньому зображено добовий відрізок часу (лютий місяць, період максимуму споживання), де повна потужність перебувала в певних межах, а випадкова складова не перевищувала

3% середнього значення. Крім того, з ймовірністю 0,95 ця складова була меншою за 2%.



Рисунок 2.2.3 Добова потужність ВЕС.

Нехай середнє значення потужності буде записане як функція часу: $P = P(t)$. Діяльність ВЕС також можна описати наявністю деякої середньої потужності P_w та випадкової складової ΔP_w , поточна потужність розглядається як функція часу. За нормального режиму роботи середня потужність чітко прогнозується на короткострокову перспективу та розглядається як контрольований параметр: $P = P_H + P_w$. Також потрібно розглянути обмеження, які мають бути накладені на стохастичну складову.

Раптове коливання потужності ВЕС може спричинити перевищення меж статичної стійкості системи, а допустима стохастична складова потужності ВЕС визначає аварійно допустимий перетік у перетині. Для забезпечення необхідних запасів статичної та динамічної стійкості в післяаварійних режимах мінімальні коефіцієнти запасу (0,2 і 0,08) встановлюються на основі вимог до статичної стійкості. Це дозволяє розрахувати максимально допустиму стохастичну складову потужності:

$$\Delta P_w \leq 0,12 \cdot P_{ГР} = 0,15 \cdot P_H. \quad (2.2.4)$$

Поточна стохастична складова залежить від визначення контрольованого перетину та кількості ВЕС за ним. Згідно з дослідженнями, одинична ВЕС може варіювати потужність від нуля до номінальної потужності. У цьому випадку стохастичну складову можна прирівняти до номінальної потужності ВЕС, що дозволяє визначити обсяги впровадження вітрової енергетики без порушення вимог до стійкості.

Зі збільшенням кількості та розподіленості ВЕС збільшується величина постійної складової потужності P_w , а відносна частина випадкової ΔP_w , навпаки, скорочується, підвищуючи ймовірність здійснення необхідних умов стійкості. Аналіз впливу ВЕС на контрольований перетин має враховувати ймовірність виконання вимог стійкості, оскільки як робота енергосистеми, так і потужність ВЕС є випадковими величинами. Між відхиленнями потужності традиційних джерел енергії та ВЕС не спостерігається кореляції, а їхні екстремальні значення співпадають лише випадковим чином.

Таким чином, умова повинна враховувати різницю між випадковими складовими потужності енергосистеми з інтегрованими ВЕС та традиційної енергосистеми:

$$\Delta P_{H+W} - \Delta P \leq 0,12 \cdot P_{TP} = 0,15 \cdot P_H. \quad (2.2.5)$$

Практика показує, що зміна потужності проходить не за відносно малий проміжок часу. Згідно з даними Міжнародної енергетичної агенції, в екстремальних умовах спостерігаються стрибки потужності зі швидкістю 10-35% номінального значення/60 хвилин (до 40% у деяких випадках), а середня швидкість змін складає 5%. Протягом однієї хвилини зміни зазвичай складають 0,5–0,8%. У межах енергосистеми зміни, які відбуваються неконтрольовано й тривають до 20 хвилин, класифікуються як збурення, оскільки саме цей період необхідний для відновлення нормативного рівня стійкості. За цей період потужність вітрових електростанцій може змінитися на 15%, що визначається як стохастична частина ΔP_w .

Зі збільшенням кількості та розширенням географії розміщення вітрових електростанцій випадкові зміни їх загальної потужності стають менш різкими. Для об'єднаної енергосистеми України аналіз показує, що середньомісячні зміни потужності знаходяться в діапазоні $\pm 20\%$ від середнього показника, а з ймовірністю 0,95 – у межах $\pm 16\%$. Разові неконтрольовані зміни потужності протягом години досягають 4% (0,9 ГВт) або, з ймовірністю 0,95, складають 3% (0,7 ГВт). При підключенні до системи вітрових електростанцій загальною потужністю до 2 ГВт ці зміни можуть збільшитися до 1,0 ГВт (0,8 ГВт з ймовірністю 0,95).

Приклад коливань поточної потужності для групи ВЕС потужність яких 2 ГВт з характерним темпом змін і розмахом відхилень зображено на рисунку 2.2.4.

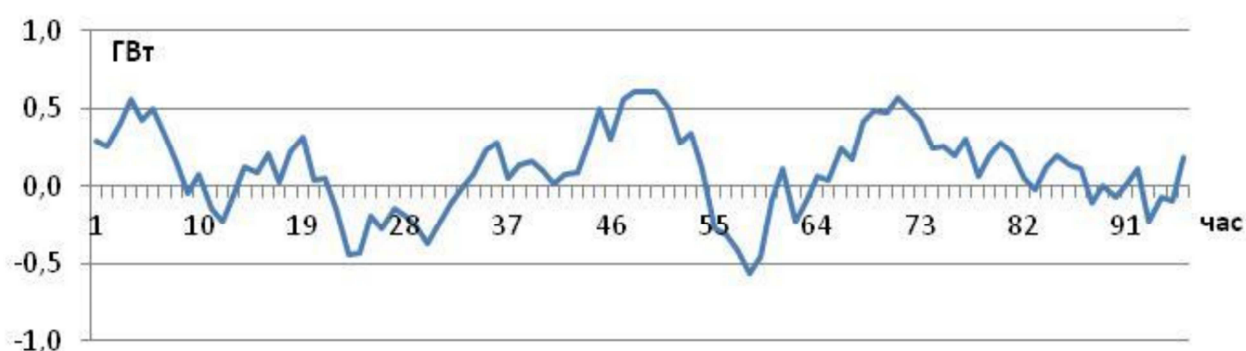


Рисунок 2.2.4 Період коливань потужності ВЕС

Для українських вітрових електростанцій, розміщених на півдні поблизу морського узбережжя, аналіз амплітуд коливань потужності як окремих станцій, так і їх груп, демонструє певні закономірності. Моделювання з інтервалом у 15 хв показує, що найбільший стрибок потужності одиначної ВЕС максимально сягає 38% від номінальної потужності, при цьому з ймовірністю у 95% стрибки не перевищують 25%. Для групи з 6-ти ВЕС дослідження показують, що найбільші стрибки потужності не сягають більше 20%, а з ймовірністю 95% – більше 10%.

Середня потужність таких ВЕС зазвичай в межах 20-40% від свого номінального значення. Для ВЕС, розташованих у Запорізькій області, за

зимовий період середній розмах стрибків становить 5% від номінальної потужності, максимум – 39%, при цьому з ймовірністю 99,9% стрибки не перевищують 19%, а з ймовірністю 95% – 19% [10].

У разі перетину з середньою потужністю 1 ГВт, де знаходиться одиночна ВЕС, максимальна номінальна потужність не повинна перевищувати 400 МВт за найнесприятливіших обставин, за умов виконання прогнозів і відсутності нових аварій. Проте за умов низьких запасів стійкості енергосистеми вимоги до додаткових джерел неконтрольованої потужності можуть бути жорсткішими.

При розрахунках динамічної стійкості енергосистеми слід також враховувати можливість відключення ВЕС у випадку значних відхилень напруги чи частоти в мережі. Це збільшує ймовірність раптового вимкнення окремих вітрових станцій, хоча ймовірність одночасного вимкнення цілої групи ВЕС залишається низькою. Для забезпечення стабільності енергосистеми важливо регулювати умови відключення ВЕС, які визначаються технічними вимогами виробника обладнання.

Таким чином, інтеграція вітрових електростанцій викликає динамічні процеси, що впливають на статичну, коливальну та динамічну стійкість енергосистеми. Хоча вплив ВЕС на статичну й коливальну стійкість є незначним, їхня генерація зменшує запас стійкості, створюючи додаткове навантаження на мережу [8]. Загроза аварійного небалансу усувається шляхом створення резерву потужностей та прогнозування швидкості вітру в зонах розташування ВЕС.

2.3. Технічні проблеми пов'язані з провадженням СЕС у енергосистему

Щодо сонячних електростанцій, основними викликами їх інтеграції є зменшення динамічної стійкості синхронної роботи традиційних електростанцій із зростанням загальної потужності СЕС, негативний вплив на якість електроенергії, а також нерівномірність графіка вироблення потужності.

Негативний вплив СЕС на якість електроенергії проявляється у кількох ключових аспектах. Одним із основних є гармонічні спотворення, які спричиняють викривлення форми напруги і струму в мережі. Це явище виникає через інвертори, що генерують гармоніки — коливання струму чи напруги на частотах, кратних основній частоті мережі (50 Гц), наприклад, 150 Гц або 250 Гц. Високий рівень гармонік призводить до додаткових втрат енергії через нагрівання обладнання, збоїв у роботі чутливих пристроїв та зниження ефективності мережі. Для оцінки рівня спотворень використовується коефіцієнт повного гармонічного викривлення [18].

Розрахунок THD (Total Harmonic Distortion) оцінюють через коефіцієнт повного гармонічного викривлення (THD):

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2} \cdot 100\% , \quad (2.3.1)$$

де V_n – напруга на гармонічній складовій n ,

V_1 – напруга основної гармоніки.

Згідно з міжнародними стандартами, THD не повинен перевищувати 5% у розподільчих мережах.

Ще одним негативним наслідком є коливання напруги, спричинені залежністю генерації СЕС від змін сонячної радіації. Такі відхилення можуть бути особливо значними в слабких мережах із низьким коефіцієнтом короткого замикання. Наприклад, різке зменшення генерації через хмарність або її зростання внаслідок інтенсивнішого сонячного випромінювання викликає відхилення напруги. У деяких регіонах України, таких як Запорізька та Херсонська області, фіксуються відхилення напруги на +/-5% від номінальної кілька разів на день, що перевищує встановлені норми.

Збільшення частки СЕС у загальному виробництві електроенергії також впливає на стабільність частоти. Зменшення інерції системи ускладнює реагування на зміни навантаження чи аварійні ситуації. Через відсутність

синхронних машин система не може швидко стабілізувати частоту при раптових змінах генерації.

Для мінімізації цих впливів використовуються різні рішення. Зокрема, пасивні й активні фільтри допомагають зменшити рівень гармонік до допустимих значень, а інвертори нового покоління генерують електроенергію з низьким рівнем гармонійних спотворень. Посилення енергомережі шляхом будівництва нових підстанцій, впровадження технологій розумних мереж (Smart Grids) та інтеграція систем зберігання енергії (BESS) дозволяють стабілізувати напругу і частоту, компенсуючи коливання генерації. У Німеччині гармонічні спотворення в мережах із високою часткою ВДЕ призвели до зниження ефективності передавання енергії та втрат у підстанціях до 10%. Впровадження активних фільтрів знизило ці втрати до 2% [20].

Погіршення динамічної стійкості через втрату інерції. Традиційні генератори, такі як теплові, гідро- та атомні електростанції, мають обертові маси, які забезпечують інерцію та допомагають підтримувати стабільну частоту системи. Водночас СЕС не мають обертових мас і використовують інвертори для перетворення постійного струму в змінний, що зменшує загальну енергію інерції енергосистеми. Це знижує час, протягом якого система може реагувати на збурення, такі як відключення генераторів або зміни навантаження.

Загальна енергія інерції системи (H_c) зменшується, що знижує критичний час, доступний для реакції системи на зміни. Формула інерції:

$$H_c = \frac{\sum H_i \cdot S_i}{\sum S_i}, \quad (2.3.2)$$

де H_i – інерція кожної станції,

S_i – її номінальна потужність.

Для оцінки впливу зниження інерції використовують такі параметри, як критичний час розгону (CCT), що залежить від збурення потужності та енергії інерції, а також частотний градієнт, який визначає швидкість зміни частоти.

Якщо інерція мала, частота змінюється швидше, що збільшує ризик аварій. CCT (Critical Clearing Time):

$$CCT \propto \frac{H}{\Delta P}, \quad (2.3.3)$$

де ΔP – збурення потужності.

Менша інерція означає зменшення CCT, тобто система має менше часу для стабілізації.

Швидкість зміни частоти визначається формулою:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta P}{2H}, \quad (2.3.4)$$

де ΔP – різниця між генерацією та споживанням.

Якщо H досягає мінімальних значень, частота змінюється швидше, що створює ризик аварії.

Низька інерція призводить до швидших змін частоти при збуреннях, що ускладнює стабілізацію мережі. Це збільшує ймовірність частотних збоїв, які можуть призвести до масштабних відключень. Наприклад, у Німеччині, де частка СЕС перевищує 20%, було зафіксовано погіршення динамічної стійкості, зокрема в південних регіонах, де під час зменшення сонячного виробництва спостерігалися стрибки частоти. В Україні, зростання потужностей СЕС у слабких регіонах, таких як Запорізька та Херсонська області, призвело до зниження стабільності локальних мереж, що потребувало додаткових засобів для корекції частоти і напруги.

Для вирішення цієї проблеми можна застосувати синтетичну інерцію, де інвертори нового покоління імітують інерцію через алгоритми керування, що регулюють потужність у відповідь на зміни частоти. Енергетичні накопичувачі, такі як батареї (BESS), можуть швидко компенсувати дефіцит чи надлишок потужності, як це було реалізовано в Південній Австралії для покращення

стабільності мережі [19] [20]. Гібридні системи, що поєднують СЕС із ТЕС чи ГЕС, здатні забезпечити інерцію і підтримувати стабільність системи. Також посилення міжрегіональних з'єднань та впровадження розумних мереж (Smart Grids) дозволяє компенсувати нестачу стабільності в мережі.

Нерівномірний графік потужності виникає через зміну умов навколишнього середовища, таких як сонячна радіація, погодні умови та добовий цикл. Зважаючи на нерівномірність генерації, це може створювати проблеми для стабільності енергомережі.

Основною причиною нерівномірності є зміни сонячної радіації, оскільки потужність СЕС залежить від інтенсивності сонячного світла, яке змінюється протягом дня та сезону, а також під впливом погодних умов, таких як хмари або дощ. Крім того, СЕС генерують енергію лише вдень, що створює значні коливання між піковими та мінімальними рівнями генерації в межах доби. Вночі генерація зупиняється, що вимагає від енергосистеми гнучкості для забезпечення стабільності. Зміни атмосферних умов, такі як пилові бурі чи зміни температури, також можуть викликати значні коливання в генерованій потужності. Наочно це продемонстровано на рисунку 2.3.1 та 2.3.2, відповідно генерація впродовж літнього дня та генерація кожного місяця окремих станцій.

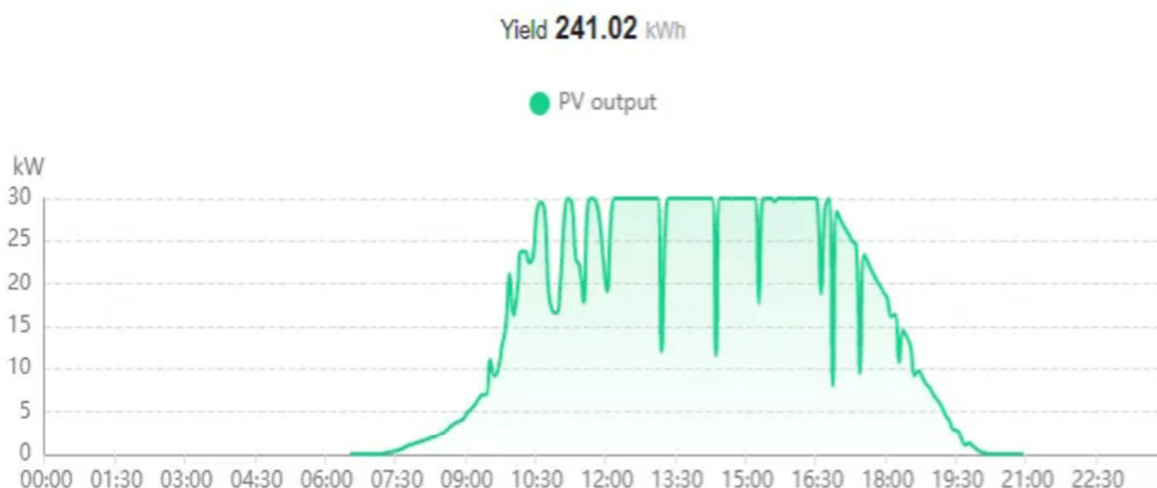


Рисунок 2.3.1 Графік літньої добової генерації активної потужності СЕС

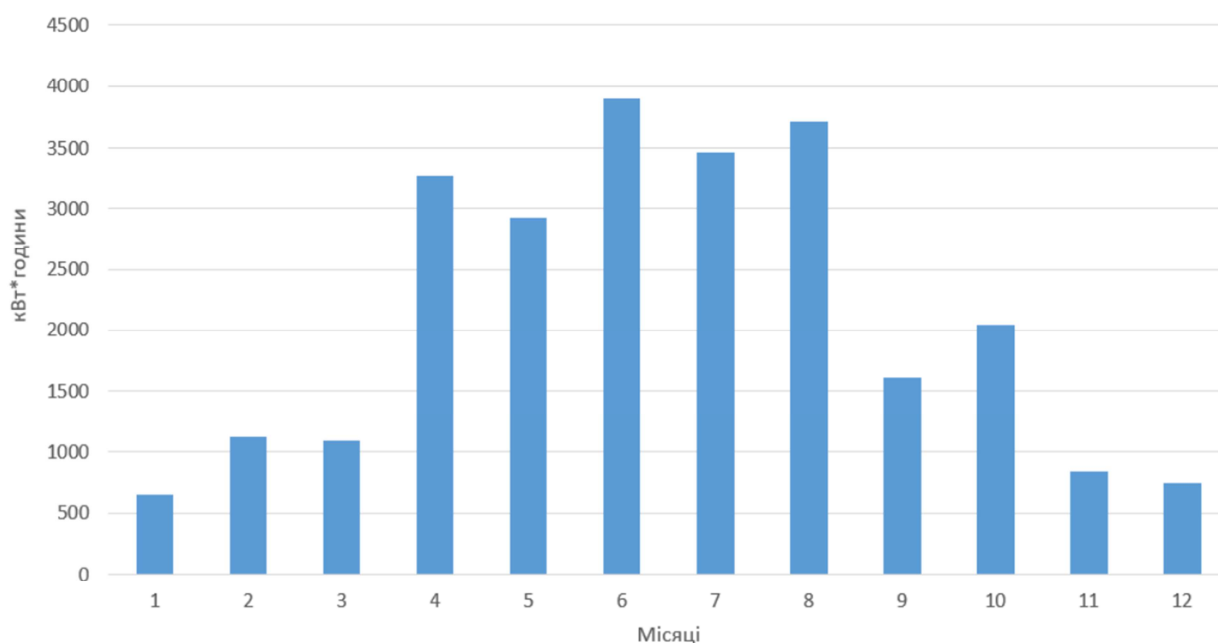


Рисунок 2.3.2 Гістограма місячного виробництва електроенергії СЕС протягом року.

Ці коливання генерації можуть призвести до частотних коливання в мережі. Коли потужність СЕС різко зменшується через, наприклад, хмарність, відсутність інерції в системі ускладнює компенсацію втрати потужності, що підвищує ймовірність аварій чи відключень. Для забезпечення стабільності енергосистеми потрібні резервні потужності, здебільшого від традиційних джерел енергії або систем зберігання енергії, таких як акумулятори чи гідроакумулюючі станції. Крім того, різкі коливання генерації можуть призводити до надлишкової енергії в моменти пікового виробництва, що зменшує ефективність використання енергії і може вимагати імпорту енергії.

Практичний досвід Іспанії та Каліфорнії показує, що нерівномірність графіків потужності СЕС може призводити до надлишку енергії під час піку виробництва, яку потрібно або зберігати в накопичувачах, або експортувати в інші країни. У Каліфорнії виникає ситуація, коли вранці та ввечері потреба в енергії збільшується, але виробництво сонячної енергії обмежене, що також вимагає використання накопичувачів або традиційних джерел енергії для стабілізації.

Рішенням цих проблем є використання енергетичних накопичувачів для зберігання надлишкової енергії та її віддачі під час пікових навантажень або при зменшенні сонячної генерації. Гібридні системи, які поєднують СЕС із вітровими, тепловими або гідроелектростанціями, можуть допомогти збалансувати нерівномірний графік потужності, оскільки ці джерела енергії генерують енергію в різні періоди доби. Технології інтелектуальних мереж (Smart Grids) дозволяють оперативно коригувати розподіл енергії в мережі, автоматично перемикаючи між джерелами або зберіганням енергії. Також важливим рішенням є вдосконалення міжрегіональних з'єднань для можливості експорту чи імпорту енергії, що зменшує вплив коливань потужності від СЕС.

Таким чином, графік потужності СЕС є значним викликом для енергосистем з великою часткою ВДЕ. Зміни в сонячній радіації та денні цикли генерації спричиняють коливання потужності, що може викликати нестабільність в напрузі та частоті мереж. Це потребує застосування резервних потужностей, накопичувачів енергії та інтелектуальних мереж для коригування розподілу енергії в реальному часі, що є необхідним для стабільної роботи.

2.4. Питання балансування системи з ВДЕ

Для мінімізації можливого негативного впливу ВДЕ на функціонування електроенергетичної системи в багатьох країнах, окрім обов'язкового прогнозування потужності ВЕС і СЕС, діють спеціальні нормативні вимоги. Ці вимоги, відомі як "Grid code", регламентують роботу таких електростанцій у певних умовах. Відповідно до цих нормативів, ВЕС і СЕС повинні забезпечувати підтримку балансу активної потужності, постачати реактивну потужність до мережі, а також здійснювати контроль за частотою і напругою у точках приєднання.

Зокрема, в Європі подібні правила закріплені у вигляді юридично обов'язкових "Network codes", які регламентують, наприклад, вимоги до підключення генераторів та управління системою в надзвичайних ситуаціях. Ці нормативи адаптовані відповідно до змін у технологіях та потреб у

європейському енергетичному просторі, сприяючи інтеграції ВДЕ в загальну енергосистему та підвищенню її стійкості.

Заходи, спрямовані на зменшення впливу ВДЕ на надійність енергосистеми, умовно поділяються на дві категорії: ті, які фактично потребують змін в існуючій структурі енергосистеми, і ті, що передбачають її модернізацію.

До першої категорії належать такі заходи:

- Оптимізація розподілу потужностей ВЕС і СЕС між різними регіонами для кращого територіального розподілу генерації ВДЕ. Можливо мінімізувати вплив погодних умов на баланс потужності, що дозволяє більш ефективно використовувати регулюючі потужності ОЕС України;
- впровадження спеціальних регламентів для ВЕС і СЕС, таких як Grid Code [20], забезпечує контроль напруги, частоти та реактивної потужності у точках приєднання генераторів ВДЕ;
- використання сучасних моделей вітрових електроустановок, які здатні підтримувати стабільну роботу енергосистеми;
- організація служб прогнозування потужності ВЕС і СЕС на добу вперед з точністю до години дає можливість зменшити дисбаланс між фактичним і прогнозованим виробітком;
- вибір оптимальних потужностей ВЕС і СЕС для приєднання до мережі з урахуванням її пропускної здатності.

До другої категорії належать такі заходи:

- модернізація існуючих електростанцій для розширення регулюючого діапазону;
- розвиток і посилення електричних мереж енергосистеми;
- накопичувачі енергії, тобто використання гідроакumuлюючих станцій або батарейних накопичувачів, що значно покращує балансування енергосистеми, дозволяючи зберігати надлишкову енергію.

Заходи другої групи потребують значних фінансових і часових ресурсів для впровадження. У той час заходи першої групи здебільшого охоплюють

проведення досліджень, створення нових або коригування чинних нормативних документів, що зазвичай не вимагає великих фінансових витрат. Це дозволяє максимально ефективно інтегрувати ВДЕ в існуючу структуру енергосистеми.

З огляду на плани України щодо розвитку ВДЕ, описані системні функції вже включено до ряду нормативних документів, які регулюють вимоги до роботи вітрових і сонячних електростанцій.

Для ефективного використання механізмів балансування в енергосистемі необхідно розробити механізми компенсації збитків власникам електростанцій, які виникають через дефіцит генерації електроенергії.

Як зазначено раніше, виробництво електроенергії на СЕС і ВЕС має нестабільний характер, оскільки залежить від погодних умов. Це призводить до похибок у прогнозах та виникнення небалансів в енергосистемі. Для забезпечення стабільної роботи ОЕС України зі збільшенням частки ВДЕ необхідно реалізувати низку заходів. Серед них: впровадження більш точних методів прогнозування, розробка механізмів відповідальності за небаланси та удосконалення балансуючих процесів.

Основними способами балансування електроенергії є:

- генерація маневрової потужності;
- застосування технологій акумулювання енергії;
- імпорт електроенергії;
- регулювання попиту.

Серед основних методів, генерація маневрової потужності та використання акумулювальних технологій відіграють ключову роль у стабілізації потоків електроенергії в режимі реального часу на балансуючому ринку.

Оператор передачі енергії відповідає за підтримання стабільності об'єднаної енергосистеми, забезпечуючи постійне узгодження між обсягами споживання та генерації електроенергії для безперебійної роботи

енергосистеми [4]. Балансуюча енергія охоплює показники виробництва, імпорту, споживання, експорту, а також регулювання обмежень системи.

На ринку електроенергії резерви генеруючих потужностей для балансування повинна забезпечувати НЕК «УКРЕНЕРГО». Для цього щороку складається звіт з оцінки відповідності генеруючих потужностей, у якому аналізуються ризики та визначаються заходи для їхнього зменшення.

Розвиток ВДЕ, хоч і є ключовим у переході до екологічно чистої енергетики, створює серйозні виклики для балансування енергосистеми через нестабільність виробництва електроенергії. Для їх вирішення пропонуються такі заходи:

- реконструкція вугільних блоків для підвищення маневровості, наприклад, застарілі вугільні ТЕС часто не здатні швидко змінювати обсяги виробництва. Їх модернізація дозволить ефективніше реагувати на зміни в генерації ВДЕ, забезпечуючи швидке підвищення або зниження потужності.

- впровадження електростанцій із швидким стартом, підхід передбачає використання резервних потужностей, які здатні швидко включатися в роботу у випадку різкого зменшення генерації ВДЕ через погодні умови, наприклад, відсутність вітру або похмурі дні.

- будівництво високоманеврової газової генерації, газові турбіни є здатними швидко змінювати свою потужність, що дозволяє забезпечити стабільність енергосистеми, особливо під час пікових навантажень або нестабільної роботи ВДЕ.

- розвиток акумулювальних технологій, акумулюючі системи, як-от ГАЕС або батарейні системи, дозволяють зберігати надлишкову енергію, вироблену ВДЕ, і використовувати її під час пікових навантажень, забезпечуючи таким чином баланс у мережі.

- використання ТЕС для заміщення АЕС, атомні станції зазвичай працюють на постійній потужності і не можуть швидко адаптуватися до змін в енергосистемі. Використання ТЕС дозволяє забезпечити більшу гнучкість,

оскільки вони здатні швидше змінювати свої потужності в залежності від попиту.

- запровадження аукціонної системи підтримки ВДЕ, це допомагає стимулювати розвиток проєктів, які забезпечують найбільшу ефективність і стабільність у енергосистемі, обмежуючи приєднання тих станцій, що мають негарантовану потужність.

- обмеження приєднання електростанцій із негарантованою потужністю, це дає змогу контролювати розвиток ВДЕ, зменшуючи ризики для стабільності енергосистеми, обираючи лише ті проєкти, які можуть дотримуватися гарантій щодо постачання електроенергії.

Попри дискусійність питання обмеження приєднання ВДЕ до енергосистеми, яке викликає різні точки зору серед експертів і політиків, інші запропоновані заходи можна поділити на дві основні групи. Перша група – це заходи, які стосуються створення нових маневрових потужностей, здатних забезпечити гнучкість і оперативну адаптацію до змін у виробництві енергії, зокрема через впровадження нових газових станцій або реконструкцію існуючих вугільних блоків для підвищення їх маневровості. Ці кроки дозволяють зберегти баланс в енергосистемі в умовах змінного виробництва від ВДЕ, забезпечуючи швидке підключення та відключення потужностей в залежності від змін попиту та доступності відновлювальних джерел енергії.

Друга група заходів передбачає розвиток систем акумулювання електроенергії. Вона включає впровадження новітніх технологій, таких як батареїні системи зберігання енергії та гідроакumuлюючі станції, які дозволяють ефективно зберігати надлишкову енергію, вироблену в періоди високої генерації ВДЕ, і використовувати її у часи низької генерації, тим самим сприяючи стабільності і надійності енергосистеми. Важливість таких систем зростає в умовах, коли частка ВДЕ в загальному енергетичному балансі постійно збільшується.

У разі будівництва нових генерувальних потужностей, законодавство передбачає:

- проведення конкурсів на будівництво нової генерації;
- впровадження заходів з управління попитом.

Будівництво включає:

- створення нових маневрових потужностей;
- реконструкцію та модернізацію існуючих вугільних електростанцій.

Системи акумулювання спрямовані на підвищення стійкості енергосистеми до змін споживання чи виробництва електроенергії через погодні коливання.

Таким чином, зважаючи на важливість балансування і адаптації енергосистеми до впливу ВДЕ, ці заходи взаємодоповнюють один одного, забезпечуючи необхідний рівень стабільності і ефективності для інтеграції ВДЕ в енергетичну структуру.

РОЗДІЛ 3

СТАТИЧНА ТА ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ

3.1. Методи забезпечення запасу статичної стійкості енергосистеми

Запровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) потребує оновлення систем електропостачання (СЕП), враховуючи розвиток промисловості, транспорту, будівництва та агропромислового сектору. Основними споживачами електроенергії в умовах складної міської та промислової інфраструктури є підприємства цих галузей, які формують високу концентрацію електричних навантажень, трансформуючи їх у інші види енергії залежно від параметрів струму та напруги.

СЕП характеризуються багаторівневою структурою розподілу електроенергії, наявністю потужних вузлів навантаження, різноманітністю способів зміни параметрів електромагнітної енергії та широким спектром електроприймачів. Джерела живлення включають електроенергетичну систему, локальні ТЕС, синхронні компенсатори, джерела реактивної потужності, а в умовах аварій – двигуни, що працюють у генераторному режимі. Такі системи мають розгалужені мережі розподілу та піддаються впливу електротехнологічних процесів і великих споживачів, що впливають на стабільність роботи під час аварій [21].

Особливе значення має економічна ефективність СЕП, яка забезпечує їх стабільну та надійну роботу за будь-яких умов, зокрема під час аварійних і післяаварійних ситуацій. У зв'язку з цим висувуються жорсткі вимоги до режимів функціонування СЕП і якості електроенергії, оцінюваної шляхом аналізу перехідних процесів.

Практика розвинутих країн свідчить, що велика увага приділяється розробці методів аналізу та розрахунків перехідних процесів для створення систем нового технічного рівня. Це дозволяє досягати стабільності режимів роботи, забезпечувати економічність, високу якість електроенергії, надійність та безпеку експлуатації.

Розв'язанню задач, пов'язаних із аналізом і розрахунком перехідних процесів, сприяє використання методів моделювання СЕП і сучасних обчислювальних технологій. Це дає змогу оптимізувати схеми та характеристики елементів систем, підвищуючи економічність і надійність не лише за нормальних умов, але й у перехідних режимах роботи.

Зміна умов функціонування СЕП супроводжується перехідними процесами, які впливають на режими її роботи. Режим системи – це сукупність процесів, які визначають умови функціонування та стан СЕП у певний момент часу.

Кількісні характеристики режиму, або його параметри, включають значення таких показників, як потужність, напруга, струм та інші величини, що взаємопов'язані між собою через параметри системи. Серед них опори, провідності елементів, коефіцієнти трансформації, постійні часу, коефіцієнти підсилення та інші показники, які визначаються фізичними властивостями, схемами з'єднання елементів і розрахунковими даними.

У роботі СЕП розрізняють усталені та перехідні режими. Усталені режими характеризуються повільними та малими змінами параметрів у часі, тоді як перехідні режими відзначаються швидкими та значними змінами цих параметрів. Важливим аспектом є класифікація та ідентифікація факторів, які можуть впливати на зміну зазначених параметрів.

За характером змін параметрів режиму роботи СЕП розрізняють чотири основні типи режимів:

- нормальні усталені режими – це стани, за яких параметри змінюються, але забезпечують стабільну роботу споживачів відповідно до їхніх техніко-економічних характеристик;
- нормальні перехідні режими – виникають під час стандартних експлуатаційних змін у системі, таких як вмикання/вимикання, перемикавання чи зміна навантаження. Для них характерні швидкі та різкі зміни параметрів окремих елементів СЕП, тоді як у вузлах системи ці зміни залишаються незначними;

- аварійні режими (усталені та перехідні) – з’являються через порушення у схемах електричних з’єднань, що призводить до значних відхилень параметрів від номінальних значень;

- післяаварійні усталені режими – настають після усунення пошкоджених елементів для ліквідації аварії. У таких режимах параметри можуть бути як близькими до нормальних, так і значно відхилятися, що визначає сприятливість або несприятливість виходу з аварійного стану.

Головне завдання забезпечення необхідного режиму роботи СЕП – підтримка таких параметрів, які гарантують стійкість обраного режиму.

Перехідні процеси СЕП виникають через різні впливи на елементи системи, зокрема:

- підключення, відключення або перемикання джерел електроенергії, трансформаторів, ліній електропередачі, електроприймачів та інших компонентів;

- порушення симетрії фазних струмів і напруг, що можуть бути спричинені відключенням окремих фаз, несиметричними змінами навантаження чи обривом фаз;

- короткі замикання в елементах СЕП;

- прискорення збудження синхронних машин або зменшення їх магнітного поля;

- раптові збільшення або зменшення навантаження;

- запуск асинхронних двигунів чи синхронних компенсаторів;

- реверсування асинхронних двигунів;

- перехід синхронних машин у асинхронний режим після втрати синхронізму;

- кліматичні впливи на елементи СЕП;

- повторне вмикання та відключення ланцюгів із коротким замиканням.

Процеси, що виникають через комутаційні перемикання, випробування або регулювання режимів, належать до нормальних умов експлуатації. Натомість короткі замикання, обриви фаз, повторні включення замкнених

ланцюгів, вихід генераторів із синхронізму та подібні явища класифікуються як аварійні ситуації.

В електричних системах зазвичай момент виробництва електроенергії збігається з моментом її споживання. У нормальному режимі підтримується баланс між кількістю виробленої та споживаної енергії. Цей режим характеризується стабільністю параметрів системи або їх незначними та поступовими змінами.

Основні параметри, такі як потужність, напруга і струм, залишаються в межах заданих значень. Відхилення від нормального режиму призводять до погіршення якості електроенергії, а також до значних економічних втрат.

Багато ключових аспектів електромеханічних перехідних процесів досліджуються за допомогою спрощених схем електроенергетичних систем, які виступають моделями енергосистем. Хоча термін "модель" часто не використовується явно, він завжди передбачається, адже будь-яка схема енергосистеми фактично є її моделлю [5] [17].

Серед таких моделей найпоширенішими є одномашинна, двохмашинна та трьохмашинна моделі. Найпростішою вважається одномашинна модель, яку ще називають моделлю "машина-шини".

Одномашинна модель представляє систему у вигляді однієї електростанції (еквівалентного генератора), що працює через трансформатори та лінії електропередачі паралельно з генераторами великої енергосистеми. Ця енергосистема настільки потужна, що її приймальні шини вважаються шинами нескінченної потужності (ШНП).

ШНП характеризується незмінними параметрами: за модулем напруга ($U = \text{const}$) і стала частота $\omega_0 = \text{const}$. У схемах заміщення ШНП виступають як умовний елемент, що представляє потужну систему. При цьому такі енергосистеми зазвичай не зображуються безпосередньо в електричних схемах. (про це можна написати перед аналізом самої роботи).

Як приклад розглянемо найпростішу схему системи електропостачання рисунок 3.3.1 (а), де генератор з'єднаний із шинами постійної напруги через

трансформатор і лінію електропередачі. Приймальні шини належать електричній системі настільки великої потужності, що напругу на них можна вважати незмінною як за амплітудою, так і за фазою, незалежно від змін у режимі роботи.

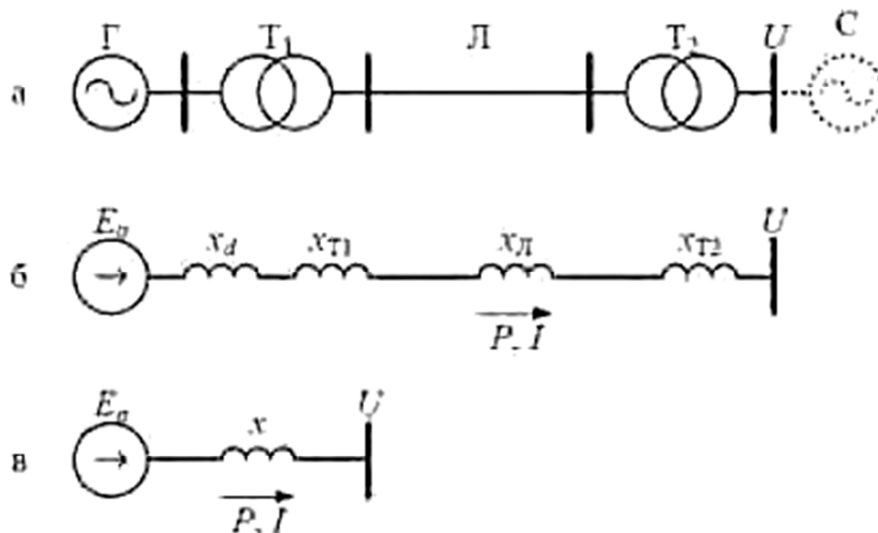


Рисунок 3.3.1 Схема електропостачання

Подібна схема значно спрощує аналіз і дозволяє застосовувати наближені методи для оцінки стійкості режимів роботи системи.

Потужність передається на приймальні шини енергосистеми, які приймаються за шини нескінченної потужності. Для аналізу процесів в одномашинній моделі енергосистеми визначимо основні залежності між параметрами режиму.

Для спрощення припустимо, що активні опори та повні провідності всіх елементів системи дорівнюють нулю ($r = 0$; $g = 0$; $b = 0$) та на основі цих припущень побудуємо схему заміщення.

У такій схемі заміщення ланцюг складається виключно з індуктивних опорів, розташованих між двома джерелами електрорушійної сили (ЕРС). Джерело E_q представляє собою синхронну ЕРС генератора, джерелом U – напругу на ШНП.

Вираз (3.1.3) є загальним принципом, згідно з яким потужність передається в енергосистему.

За сталих значеннях ЕРС E_G та напруги U_c передана потужність P змінюється виключно через зміну кута δ . Як відомо, регулювання потужності, що виробляється турбіною, здійснюється шляхом впливу на відповідні органи керування. У початковому стані потужність турбіни дорівнює потужності генератора, який обертається зі сталою частотою. Коли відкриваються регулювальні клапани (або направляючий апарат у гідротурбінах), потужність турбіни зростає, що порушує баланс між обертальними та гальмівними моментами турбіни й генератора, викликаючи прискорення обертання.

При прискоренні генератора вектор ЕРС E_G пересувається відносно напруги приймальної системи U_c , що обертається зі сталою кутовою швидкістю. Це спричиняє збільшенню кута δ і, що, відповідно до (3.1.3) викликає зміну потужності генератора P . Потужність зростає до тих пір, поки не досягне рівня потужності турбіни, яка також підвищується.

Отже, δ прямо впливає на активну потужність, яку генератор передає до споживача. Згідно з рівнянням (3.1.3), залежність потужності від кута δ є синусоїдальною, при збільшенні δ потужність спершу зростає, досягає максимуму, а потім починає знижуватися. Таким чином, при заданих значеннях ЕРС генератора E_G і напруги приймальної системи U_c існує гранично допустимий рівень потужності, яку можливо передати.

Таким чином кут можна вважати ідеальною межею потужності для даної системи. Рівновага між потужністю турбіни та генератора досягається лише при значеннях потужності, які є меншими за P_m . снують дві можливі точки рівноваги на характеристиці потужності генератора, що відповідає двом значенням кута δ_0 та δ_k (див. рис. 3.3.3). Однак у реальних умовах стабільний усталений режим роботи електропередачі можливий лише за кута δ_0 .

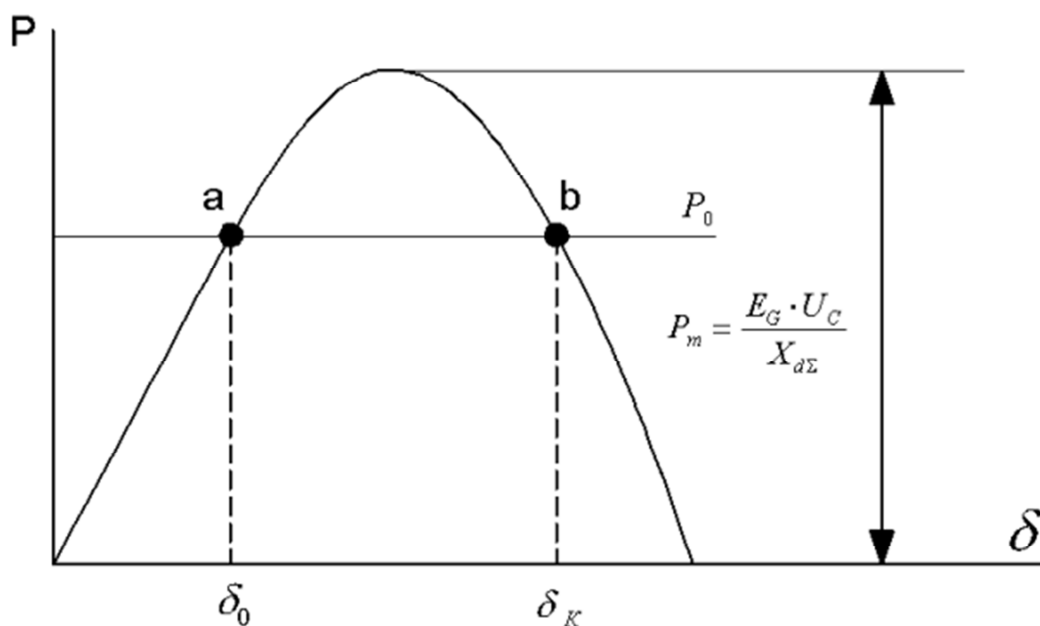


Рисунок 3.3.3 Кутова характеристика схеми

Режим, що відповідає точці b на спадній частині характеристики (рис. 3.3.3), є нестійким і не може тривати довго. У такій ситуації система втрачає здатність самостійно повертатися до рівноваги при незначних відхиленнях параметрів. Ознакою стійкості є те, що зміна потужностей і моментів у разі малих відхилень сприяє поверненню системи до початкового стану. У режимі роботи, що відповідає точці a (рис. 3.3.4), потужності генератора та турбіни знаходяться у стані рівноваги, забезпечуючи стабільну роботу системи. Якщо припустити, що кут збільшується на невелику величину $\Delta\delta$, то потужність генератора буде мати зміну у деяке значення ΔP , слідуючи синусоїдальній залежності від кута. Як показано на рисунку 3.3.4, збільшення кута $\Delta\delta$ викликає позитивну зміну потужності генератора ΔP .

Оскільки потужність турбіни не має прямої залежності від δ , вона залишається сталою і рівною P_0 незалежно від його зміни. Через це зміна потужності генератора порушує рівновагу моментів між турбіною і генератором. У результаті виникає надмірний гальмівний момент на валу машини, оскільки гальмівний момент генератора, обумовлений зростанням ΔP , перевищує обертальний момент, що створює турбіна.

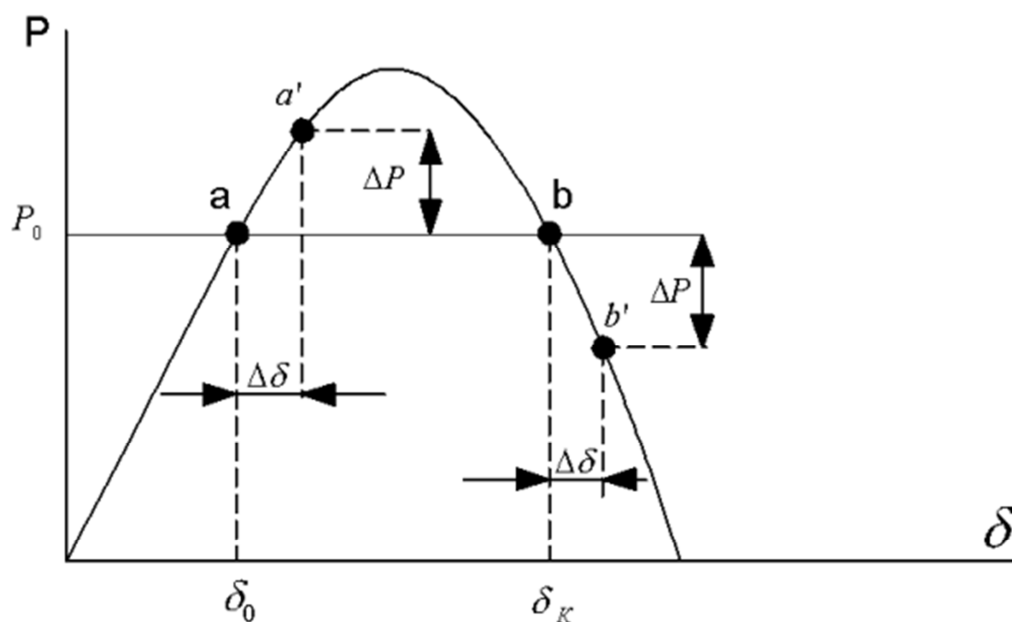


Рисунок 3.3.4 Кутова характеристика генератора

Під дією гальмівного моменту ротор генератора починає сповільнюватися, що викликає зменшення кута δ через переміщення вектора ЕРС генератора. Це зменшення кута δ відновлює рівновагу, повертаючи систему до початкового режиму роботи в точці а.

Таким чином, при позитивній зміні потужності, яка створює гальмівний момент, система автоматично стабілізується, повертаючись до стійкого стану. Це свідчить про стійкість режиму роботи в точці а, оскільки система здатна самостійно відновлювати початковий стан після незначних відхилень від рівноваги.

Для створення кутової характеристики регульованого генератора діапазон можливих значень синхронної ЕРС розбивається на кілька рівнів [7]. Для кожного з цих рівнів обчислюється відповідна внутрішня кутова характеристика. Вихідний усталений режим роботи позначається точкою на графіку, яка відповідає початковим значенням активної потужності та кута. Від цього режиму здійснюється варіювання активної потужності генератора з урахуванням зміни ЕРС. Це дає змогу визначити низку точок на внутрішніх

характеристиках, які об'єднуються у зовнішню кутову характеристику, що відображає залежність ЕРС від зміни режиму роботи.

На рисунку 3.3.5 а межі граничних точок g_h і g_b зовнішнього кута відповідають внутрішніми характеристиками, що дорівнюють мінімальному E_{qmin} та максимальному E_{qmax} значенням синхронної ЕРС. Максимум потужності P_M зміщений вправо відносно екстремальних точок внутрішніх характеристик.

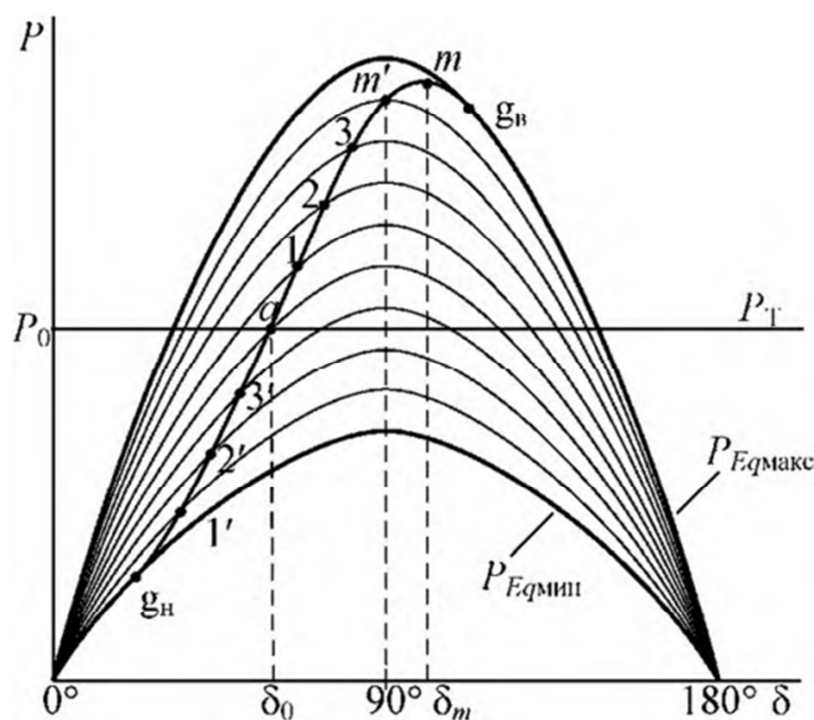


Рисунок 3.3.5 Зовнішня кутова характеристика потужності генератора

Область між точками t' і t відповідає екстремальним значенням потужності внутрішньої характеристики та зовнішньої характеристики. У межах кута від 0^0 до 90^0 для всіх внутрішніх характеристик дотримується умова $dP/d\delta > 0$, що забезпечує природну стійкість системи. У цьому діапазоні стійкість зберігається навіть за технічно недосконалих регуляторів, наприклад, із великою зоною нечутливості.

У зоні між t' і t зовнішньої характеристики похідна потужності за кутом стає від'ємною. Це вимагає використання АРЗ для забезпечення стійкості. Ефективність АРЗ безпосередньо впливає на положення реальної межі

статичної стійкості: чим досконаліша система АРЗ, тим ближче межа до точки m . На сьогодні вони дозволяють максимально наблизити межу статичної стійкості до точки m .

3.2. Методи забезпечення запасу динамічної стійкості енергосистеми

Для розуміння основних аспектів аналізу динамічної стійкості розглянемо процеси, що виникають у разі раптового відключення одного з двох паралельних ланцюгів лінії електропередачі в розглянутій енергосистемі.

Відключення одного ланцюга призводить до збільшення опору в системі, що, своєю чергою, зменшує максимальне значення кутової характеристики, що утворюється. Точка, де характеристика потужності турбіни перетинається з кутовою характеристикою генератора $P_T(\delta) = \text{const}$ і характеристики $P(\delta) = P_0 \cdot \sin(\delta)$ при звичайному режимі роботи залежить від кута δ_0 , потужності P_0 та швидкості ω .

У разі відключення ланцюга (рис. 3.3.6) активна потужність, що передається генератором у мережу, зменшується до рівня, який відповідає точці b . Це порушує баланс між потужностями на валу ротора генератора і турбіни, оскільки гальмівний момент, викликаний електричним навантаженням, зменшується. У момент відключення ланцюга кут δ_0 і відносна швидкість залишаються незмінними завдяки інерції ротора генератора.

Під дією надлишкового прискорювального моменту відносна швидкість ротора починає зростати і досягає максимального значення при куті δ_c . У момент, коли прискорювальний і гальмівний моменти врівноважуються, ротор, завдяки інерції, продовжує рух, накопичуючи додаткову кінетичну енергію на відрізок bc .

Проте цей рух поступово сповільнюється, оскільки після точки c прискорювальний момент турбіни стає меншим за гальмівний момент генератора. Зростання кута припиняється, коли накопичена кінетична енергія ротора повністю врівноважується потенційною енергією, накопиченою на відрізок cm .

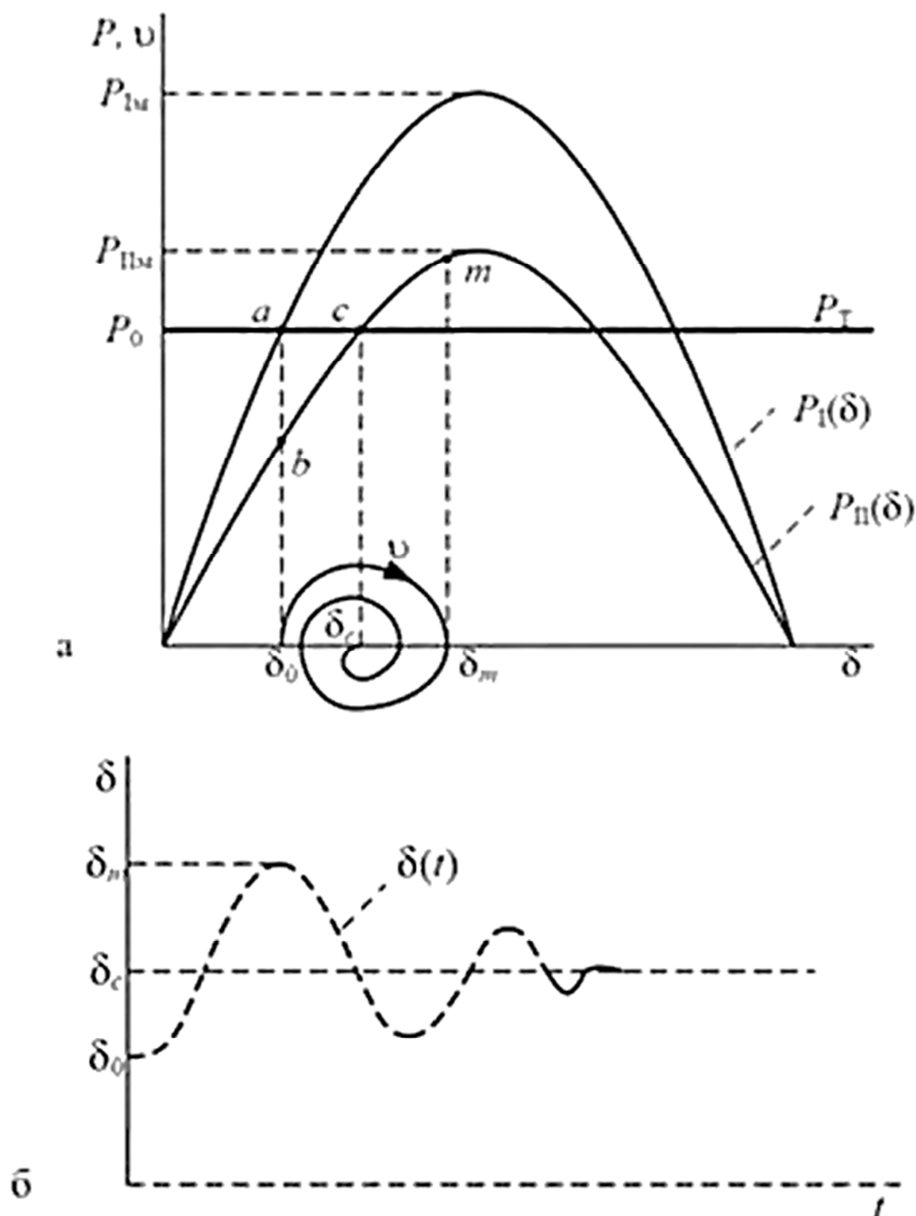


Рисунок 3.3.6 Стійкий динамічний перехід

На цьому етапі режим ще не є усталеним, оскільки гальмівний момент генератора перевищує момент прискорення турбіни. Під впливом надлишкового гальмівного моменту (рис. 3.3.7) ротор починає рухатися у зворотному напрямку до кута δ_z , але не повертається до кута δ_0 через вплив тертя та інших сил, що стримують коливання. Амплітуда коливань кута поступово зменшується, і система переходить у новий стан стійкої рівноваги – точку c .

Однак можливий і інший сценарій. Якщо кут досягне критичного значення $\delta_{кр}$, що відповідає точці f , і при цьому відносна швидкість ротора стане рівною нулю, надлишковий момент на валу знову стане прискорювальним [8] [12]. Це спричинить повторне зростання відносної швидкості, і генератор втратить синхронізм (рисунок 3.3.7). Такий процес втрати стійкості називається динамічним.

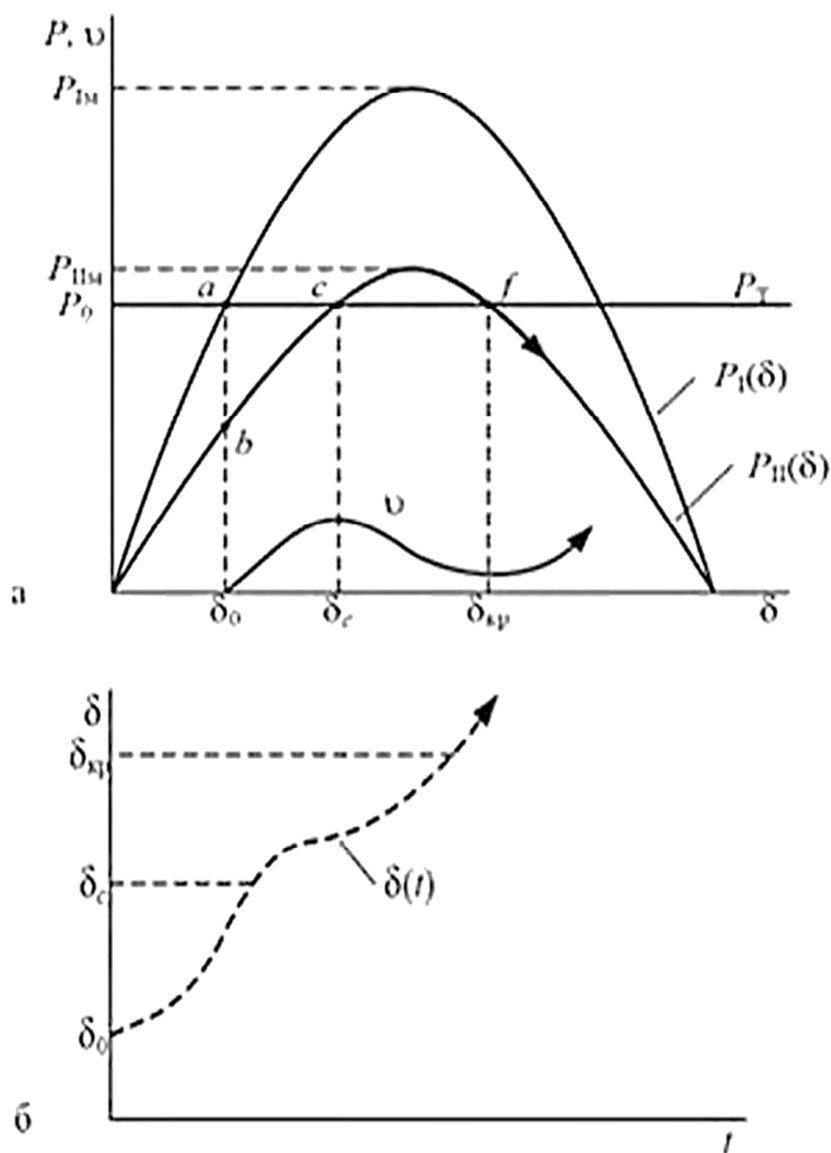


Рисунок 3.3.7 Динамічний нестійкий перехід

Головною причиною динамічної втрати стійкості енергосистем є короткі замикання, які викликають різкі зміни електромагнітних моментів у синхронних машинах.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНОЇ ТА ДИНАМІЧНОЇ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ З СЕС

4.1. Розрахунок запасів статичної стійкості системи

Як було зазначено у розділі 3, для розгляду проблеми використовується спрощена схема енергетичної системи, де в якості джерела генерації виступає СЕС, методи, застосовані для оцінки стійкості режимів роботи системи, є наближеними [6] [23].

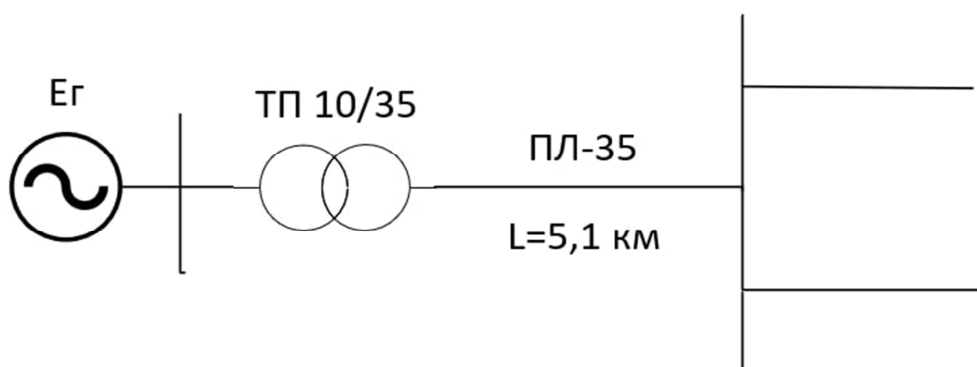


Рисунок 4.1.1 Спрощена схема системи

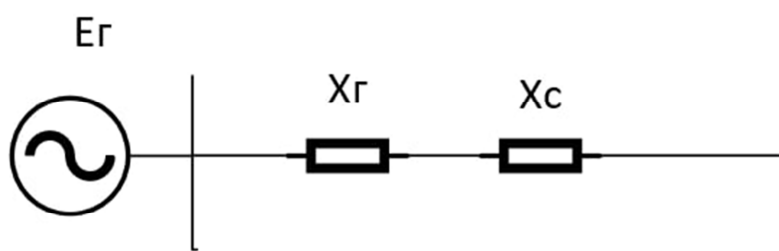


Рисунок 4.1.2 Спрощена схема заміщення системи

В розрахунках приймаємо $S_6 = 400$ МВА. Напруга на шинах системи $U=1=\text{const}$. Базисну напругу вибираємо для кожної ступені рівним її середньому номінальному значенню виходячи з наступних значень (0,23; 0,4; 0,525; 0,69; 3,15; 6,3; 10,5; 37; 115; 235):

$$U_{61} = 10,5 \text{ кВ}, U_{62} = 37 \text{ кВ}.$$

Трансформатор Т:

$$S_{\text{НОМ Т1}} = 125 \text{ МВА} ; U_{\text{ВН Т1}} = 37 \text{ кВ} ; U_{\text{НН Т1}} = 10,5 \text{ кВ} ; U_{\text{КТ1}} = 10,5\%$$

Лінія Л-1:

$$l_0 = 5,1 \text{ км} ; x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}$$

Генератор:

$$P_{\text{НОМ Г}} = 100 \text{ МВт} ; U_{\text{НОМ Г}} = 10,5 \text{ кВ} ; \cos \varphi_{\text{Г}} = 0,85 ; X''_{d*} = 0,18 ;$$

$$X_2 = 0,22 ; r_{\text{Г* (Н)}} = 0,00212 ; \frac{P_{[0]}}{P_{\text{НОМ}}} = 0,8$$

Параметри генератора Г-1:

$$X_{\text{Г}} = \frac{X''_{d*}}{X_2} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ Г}}}{U_{\text{б1}}} \right)^2 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{0,18}{0,22} \cdot \frac{400}{100} \cdot \frac{10,5^2}{10,5^2} = 3,273$$

Параметри трансформатора Т:

$$X_{\text{Т}} = U_{\text{КТ}} \cdot \left(\frac{U_{\text{ВН Т}}}{U_{\text{б2}}} \right)^2 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ Т}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{400}{125} \cdot \frac{37^2}{37^2} = 0,336$$

Параметри лінії ПЛ-35:

$$X_{\text{Л1}} = l_0 \cdot x_0 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{U_{\text{б2}}^2} = 0,4 \cdot 5,1 \cdot \frac{400}{37^2} = 0,596$$

Визначимо кутові характеристики потужності.

а) характеристика електричної передачі в системі з генератором без АРЗ:

$$X_{\text{дГ}} = X_{\text{Г}} \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ Г}}}{U_{\text{б1}}} \right)^2 \cdot \frac{S_{\text{б}}}{S_{\text{НОМ}}} = 0,22 \cdot \left(\frac{10,5}{10,5} \right)^2 \cdot \frac{400}{100} = 5,405$$

$$X_{d\Sigma} = X_{\Gamma} + X_{\mathrm{T}} + X_{\mathrm{Л1}} + X_{\mathrm{дГ}} = 5,405 + 0,596 + 0,336 + 3,273 = 9,61$$

$$P_{0*} = 1$$

$$Q_{0*} = P_{0*} \cdot \frac{\sin \varphi_0}{\cos \varphi_0} = 2 \cdot \frac{0,527}{0,85} = 1,24$$

$$\begin{aligned} E_{\mathrm{q}} &= \sqrt{\left(U_{\mathrm{c}} + \frac{Q_{0*} \cdot X_{\mathrm{d}\Sigma}}{U_{\mathrm{c}}}\right)^2 + \left(\frac{P_{0*} \cdot X_{\mathrm{d}\Sigma}}{U_{\mathrm{c}}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{1,24 \cdot 9,61}{1}\right)^2 + \left(\frac{1 \cdot 9,61}{1}\right)^2} = 13,273 \end{aligned}$$

$$P_{\mathrm{Eq}} = \frac{E_{\mathrm{G}} \cdot U_{\mathrm{c}}}{X_{\mathrm{d}\Sigma}} \cdot \sin \delta = 1,381 \sin \delta$$

$$\delta_0 = \arctg \left(\frac{P_{0*} \cdot X_{\mathrm{d}\Sigma}}{U_{\mathrm{c}}^2 + Q_{0*} \cdot X_{\mathrm{d}\Sigma}} \right) = \arctg \left(\frac{1 \cdot 9,61}{1^2 + 1,24 \cdot 9,61} \right) = 49,3^\circ$$

Будуємо кутову характеристику:

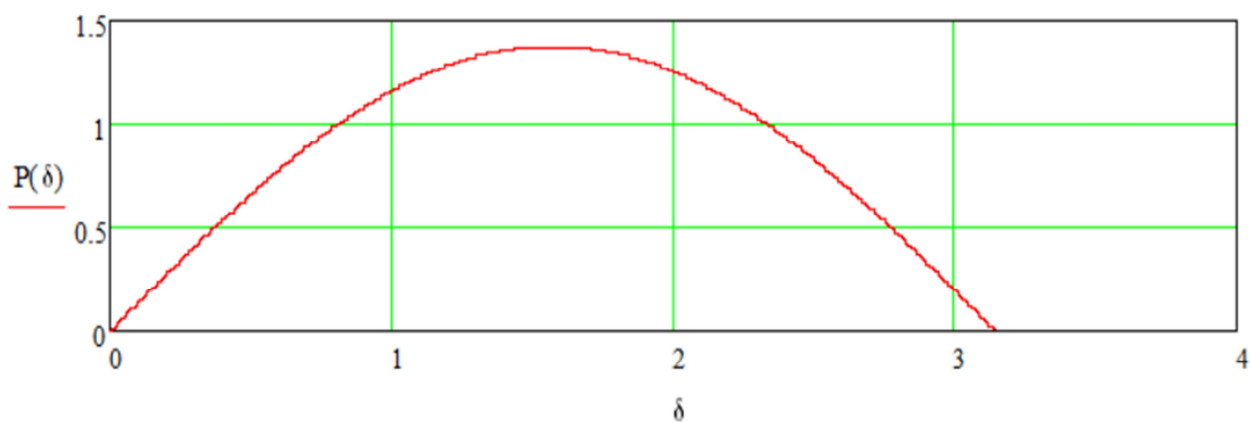


Рисунок 4.1.3 Кутова характеристика з генератором без АРЗ

Потрібно визначити максимальну та граничну потужність, а також запаси статичної стійкості.

Знаходимо запаси стійкості. На рисунку 4.1.3 максимальна потужність досягається при 90° .

$$K_3 = \frac{P_m - P_0}{P_0} \cdot 100\% = \frac{1,385 - 1,2}{1,2} \cdot 100\% = 15,41\%$$

$$K_3 = \frac{\delta_m - \delta_0}{\delta_0} \cdot 100\% = \frac{90 - 49,3}{49,3} \cdot 100\% = 82,55\%$$

б) характеристика електричної передачі в системі з генератором обладнаного АРЗ пд

$$X_{d\Gamma'} = X_d' \cdot \left(\frac{U_{\text{НОМ}\Gamma}}{U_{61}} \right)^2 \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ}}} = 0,18 \cdot \left(\frac{10,5}{10,5} \right)^2 \cdot \frac{400}{100} = 1,24$$

$$X_{d\Sigma'} = X + X_{d\Gamma'} = 1,24 + 4,205 = 5,445$$

$$E' = \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_{0*} \cdot X_{d\Sigma'}}{U_c} \right)^2 + \left(\frac{P_{0*} \cdot X_{d\Sigma'}}{U_c} \right)^2} = 13,367$$

$$\delta_0 = \arctg \left(\frac{P_{0*} \cdot X_{d\Sigma'}}{U_c^2 + Q_{0*} \cdot X_{d\Sigma'}} \right) = \arctg \left(\frac{2 \cdot 5,445}{1^2 + 1,24 \cdot 5,445} \right) = 54,5^\circ$$

$$E_q' = E' \cdot \cos(\delta_0 - \delta') = 13,367 \cdot (54,5^\circ - 49,3^\circ) = 69,5$$

$$P_{\text{Eq}'} = \frac{E_q' \cdot U_c}{X_{d\Sigma'}} \cdot \sin \delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_d'}{X_{d\Sigma} \cdot X_{d\Sigma'}} \cdot \sin 2\delta = 2,4 \sin \delta - 0,0048 \sin 2\delta$$

Будуємо кутову характеристику:

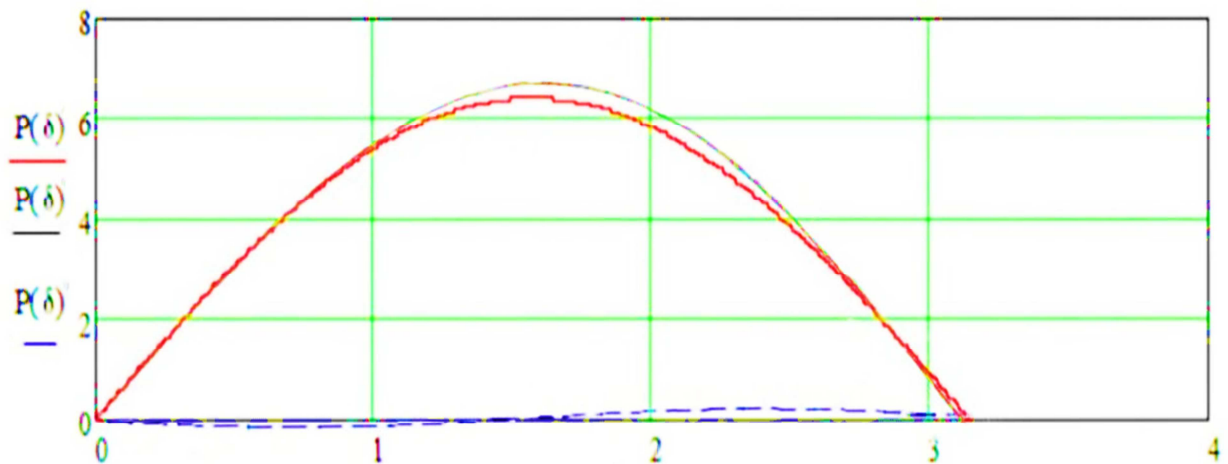


Рисунок 4.1.3 Кутова характеристика з генератором з АРЗ пд

Аналогічно проводимо розрахунок запасу статичної стійкості.

$$K_3 = \frac{P_m - P_0}{P_0} \cdot 100\% = \frac{6,3 - 1,2}{1,2} \cdot 100\% = 312\%$$

$$K_3 = \frac{\delta_m - \delta'}{\delta'} \cdot 100\% = \frac{111 - 54,5}{54,5} \cdot 100\% = 103,67\%$$

в) характеристика електричної передачі в системі з генератором з АРЗ сд

$$X_{d\Sigma}' = X = 4,205$$

Визначаємо напругу на виводах генератора:

$$\begin{aligned} U_r &= \sqrt{\left(U_c + \frac{Q_{0*} \cdot X}{U_c}\right)^2 + \left(\frac{P_{0*} \cdot X}{U_c}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(1 + \frac{1,24 \cdot 4,205}{1}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot 4,205}{1}\right)^2} = 10,358 \end{aligned}$$

$$\delta_0 = \arctg \left(\frac{P_{0*} \cdot X}{U_c^2 + Q_{0*} \cdot X} \right) = 57,5^\circ$$

$$U_{rq} = U_r \cdot \cos(\delta_0 - \delta) = U_r \cdot \cos(57,5^\circ - 50,3^\circ) = 9,56$$

$$P_{Urq} = \frac{U_{rq} \cdot U_c}{X} \cdot \sin \delta - \frac{U_c^2}{2} \cdot \frac{X_d}{X_{d\Sigma} \cdot X} \cdot \sin 2\delta = 2,9 \sin \delta - 0,0087 \sin 2\delta$$

Будуємо кутову характеристику:

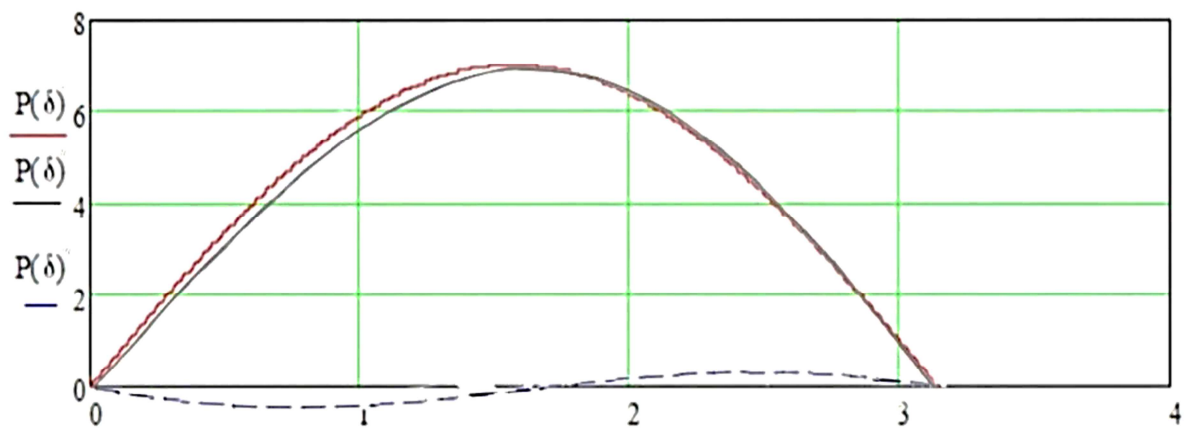


Рисунок 4.1.4 Кутова характеристика з генератором з АРЗ сд

Аналогічно проводимо розрахунок запасу статичної стійкості.

$$K_3 = \frac{P_m - P_0}{P_0} \cdot 100\% = \frac{6,5 - 1,2}{1,2} \cdot 100\% = 325\%$$

$$K_3 = \frac{\delta_m - \delta'}{\delta'} \cdot 100\% = \frac{112 - 57,5}{57,5} \cdot 100\% = 117,78\%$$

Аналізуючи отримані вирази потужності з урахуванням і без урахування автоматичного регулювання збудження при роботі електропередачі, маємо справу тільки зі зміною внутрішнього опору генератора [5].

Внутрішній опір генератора для трьох випадків (без АРЗ, з АРЗ пд і АРЗ сд) можна записати у вигляді нерівності $X_d > X'_d > 0$. Отже, величини потужностей теж можна записати в такій послідовності $P_{Eq} < P_{E'q} > P_{Urq}$. Звідси випливає, що коефіцієнт запасу статичної стійкості збільшується при використанні автоматичного регулювання.

Таким чином, було проаналізовано коефіцієнт запасу статичної стійкості, який показує, наскільки можливо збільшити передану від станції до мережі потужність без втрати стійкості електричної системи. Зважаючи на те, що у випадку використання ВДЕ потужність може значно коливатися, такі дослідження є важливими для оцінки стійкості системи.

4.2. Розрахунок динамічної стійкості системи

Розрахунок динамічної стійкості будемо проводити для одногенераторної схеми заміщення показаної на рисунку 4.2.1.

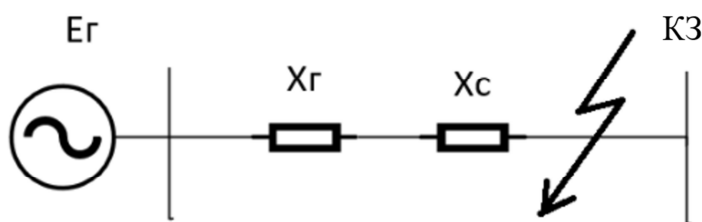


Рисунок 4.2.1 Спрощена схема заміщення системи при КЗ

В якості збурювального чинника для розрахунку динамічної стійкості приймемо трифазне коротке замкнення на шинах зв'язку з енергосистемою.

Після аналізу системи при нормальному, аварійному та післяаварійному режимі, знаходимо:

$$P_{EqHP} = 6,744 \sin \delta$$

$$P_{EqAP} = 5,683 \sin \delta$$

$$P_{\text{EqПА}} = 1,874 \sin \delta$$

Таким чином:

$$P_{\text{EqНР}} > P_{\text{EqAP}} > P_{\text{EqПА}}$$

Будуємо відповідні залежності рисунок 4.2.2.

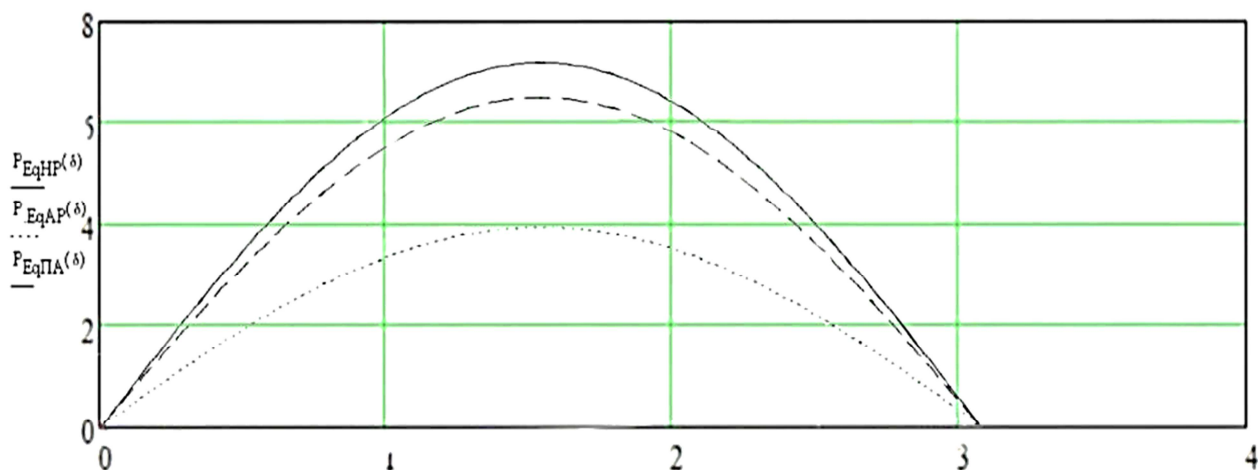


Рисунок 4.2.2 Кутова характеристики при різних режимах роботи

Знайдемо критичний кут:

$$\delta_{\text{кр}} = 180 - \arcsin\left(\frac{P_0}{P_m^{\text{ПА}}}\right) = 180 - \arcsin\left(\frac{1}{1,874}\right) = 146,43^\circ$$

Граничний кут відключення для КЗ:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{в.гр}}^{(\text{КЗ})} &= \arccos\left(\frac{P_0(\delta_{\text{кр}} - \delta') \frac{\pi}{180} + P_m^{\text{ПА}} \cos(\delta_{\text{кр}}) - P_m^{\text{AP}} \cos(\delta')}{P_m^{\text{ПА}} - P_m^{\text{AP}}}\right) = \\ &= \arccos\left(\frac{1(146,43 - 54,5) \frac{3,14}{180} + 1,874 \cos(146,43) - 1,874 \cos(54,5)}{5,683 - 1,874}\right) = \\ &= 61,28^\circ \end{aligned}$$

Визначаємо граничний час відключення короткого замикання для збереження статичної стійкості:

$$t_{в.гр} = \sqrt{\frac{T_j(\delta_{в.гр} - \delta_0)}{P_0 \cdot 180 \cdot f}}$$

де T_j – постійна інерції, яка розраховується за формулою:

$$T_j = \frac{CD^2 \cdot n^2}{91 \cdot 4 \cdot P_{ном.г}} = \frac{12,6 \cdot 3000^2}{91 \cdot 4 \cdot 0,8 \cdot 100} = 19,15.$$

Для $k^{(3)}$:

$$t_{в.гр} = \sqrt{\frac{T_j(\delta_{в.гр}^{(3)} - \delta')}{P_0 \cdot 180 \cdot f}} = \sqrt{\frac{19,15(61,28 - 54,5)}{1 \cdot 180 \cdot 50}} = 0,55.$$

Таким чином для визначення критичного кута та граничного часу відключення трифазного КЗ були розраховані потужності для нормального усталеного режиму, аварійного режиму під час короткого замикання та режиму після усунення аварії.

На основі цих даних побудовано кутові характеристики, що відображають залежність між кутом ротора генератора і переданою потужністю в різних режимах. Визначення постійної інерції дозволило розрахувати граничний час, протягом якого коротке замикання повинно бути усунене для збереження динамічної стійкості системи.

Для підвищення стійкості самої мережі можуть бути використані наступні заходи.

Опір для заземлення нейтралі трансформатора. У високовольтичних мережах нейтралі трансформаторів зазвичай глухо заземлюються, однак

використання невеликого опору для заземлення нейтралі, що не впливає істотно на напругу, дозволяє зберігати умови роботи ізоляції незмінними та значно підвищувати стійкість системи при несиметричних замиканнях.

Для підвищення стійкості системи при симетричних коротких замиканнях використовуються активні опори, які можуть підключатися послідовно або паралельно до окремих елементів передачі. Найефективнішим є підключення опорів паралельно генераторам чи трансформаторам передавальної станції. Такі опори продовжують свою дію навіть після усунення короткого замикання, а в деяких випадках активуються лише після його відключення.

Аварійне регулювання потужності турбін також є важливим засобом для збереження стійкості. Зниження потужності енергоблоків у критичних ситуаціях може запобігти їхньому відключенню від мережі. Регулювання парових турбін сприяє демпфіруванню коливань ротора в перехідних процесах, що є особливо актуальним для турбогенераторів із надпровідними обмотками збудження. Проте ефективність такого регулювання досягається лише за умови його тісного узгодження з регулюванням збудження турбогенератора.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Загальні положення з охорони праці

Законодавча база України в галузі охорони праці спрямована на забезпечення безпечних і здорових умов праці, захист прав працівників, запобігання нещасним випадкам і професійним захворюванням. Основними нормативно-правовими актами, що регулюють питання охорони праці, є:

Закон України «Про охорону праці»

Цей закон є базовим нормативним актом у сфері охорони праці. Він визначає основні принципи державної політики, права та обов'язки роботодавців і працівників, а також порядок організації та управління охороною праці на підприємствах. Основні положення закону включають право працівників на безпечні умови праці та соціальний захист у разі травм чи професійних захворювань; обов'язок роботодавця забезпечити дотримання нормативних вимог з охорони праці; проведення інструктажів, навчання та перевірки знань з охорони праці.

Кодекс законів про працю України (КЗпП)

Кодекс законів про працю України встановлює загальні правила трудових відносин, зокрема щодо охорони праці. Основні положення включають вимоги до умов праці, які мають відповідати встановленим нормативам і не створювати загрозу для життя та здоров'я працівників; обов'язок роботодавця забезпечувати належний стан обладнання, робочих місць і технологічних процесів; захист працівників від незаконного звільнення через відмову виконувати роботи, які становлять небезпеку.

Державні санітарні норми і правила

Державні санітарні норми та правила є обов'язковими для дотримання під час проєктування, будівництва, експлуатації та модернізації об'єктів. У контексті СЕС це включає норми мікроклімату на робочих місцях (температура, вологість, рівень освітлення); вимоги до захисту працівників від

впливу фізичних, хімічних і біологічних факторів; регламентацію щодо використання захисних засобів і облаштування робочих зон.

Інші нормативно-правові акти

До нормативної бази з охорони праці, окрім вищезазначених документів, належать такі важливі положення. Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» визначає основні вимоги до санітарно-епідеміологічного стану робочих місць. Нормативні акти Держпраці України регулюють експлуатацію обладнання підвищеної небезпеки, забезпечуючи безпеку працівників під час виконання робіт. Міжнародні стандарти ISO, зокрема ISO 45001, впроваджуються на підприємствах для підвищення ефективності систем управління охороною праці, що сприяє покращенню умов і безпеки на робочих місцях.

Усі ці документи формують правову основу для розробки та впровадження заходів, спрямованих на захист працівників, зайнятих у сфері будівництва та експлуатації СЕС.

5.2. Аналіз умов праці на СЕС

Забезпечення безпечних умов праці на СЕС регламентується низкою нормативно-правових актів, стандартів і правил, що визначають вимоги до роботи з електрообладнанням та об'єктами підвищеного напруження. Основна мета цих вимог – мінімізація ризиків для здоров'я та життя працівників.

Загальні нормативні вимоги

1. Роботодавець зобов'язаний забезпечити розробку інструкцій з охорони праці для кожного виду робіт, які виконуються на СЕС. На всіх етапах діяльності, включаючи проєктування, будівництво та експлуатацію електростанції, мають бути враховані вимоги щодо безпеки праці, спрямовані на запобігання ризикам і забезпечення безпечних умов роботи для персоналу.

2. Робочі місця повинні бути організовані та обладнані відповідно до вимог Державних будівельних норм та Державних санітарних норм, щоб забезпечити безпеку працівників. Поверхні робочих зон мають бути рівними,

безпечними для пересування та мати захист від ковзання, щоб уникнути травм і забезпечити комфортні умови праці.

3. Обов'язковим є проведення первинного, повторного, позапланового та цільового інструктажів із техніки безпеки для всіх працівників. Крім того, працівники повинні регулярно проходити навчання та перевірку знань, що стосуються безпечної експлуатації електрообладнання, щоб знизити ризики та забезпечити належний рівень безпеки на робочих місцях.

Правила роботи з електрообладнанням

1. Експлуатація електроустановок:

- о усі електроустановки СЕС мають відповідати вимогам Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та стандартів безпеки, таких як ДСТУ EN 50110-1;
- о проведення монтажу, обслуговування та ремонту електрообладнання дозволено лише спеціально навченому персоналу.

2. Захист від електричного струму:

- о обов'язкове використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), таких як діелектричні рукавички, килимки, інструменти з ізоляційними ручками;
- о наявність заземлення всього обладнання, а також захисних пристроїв від струмів витоку (ПЗВ).

3. Робота з об'єктами підвищеного напруження:

- о під час роботи з сонячними панелями та інверторами працівники повинні дотримуватись правил електробезпеки, затверджених відповідними нормативними актами;
- о перед початком робіт обов'язково виконувати перевірку відсутності напруги на обладнанні;
- о використовувати тільки сертифіковані інструменти та обладнання.

Забезпечення безпеки під час монтажу та експлуатації

1. Під час монтажу:

- о робота на висоті має виконуватись із використанням страхувальних систем відповідно до ДСТУ EN 363;

- о заборонено проводити монтажні роботи за несприятливих погодних умов (сильний вітер, дощ, гроза).

2. Під час експлуатації:

- о регулярний технічний огляд і обслуговування обладнання відповідно до графіка, затвердженого роботодавцем;

- о контроль за температурним режимом роботи обладнання для уникнення перегріву.

Вимоги до аварійного реагування

1. Системи аварійного вимкнення:

- о наявність автоматичних пристроїв аварійного відключення електроживлення.

2. План евакуації:

- о розробка та навчання персоналу щодо дій у разі аварійних ситуацій, таких як пожежа чи коротке замикання.

Робота на СЕС пов'язана з низкою специфічних ризиків, які можуть становити загрозу для здоров'я та безпеки працівників. Основні потенційні небезпеки включають:

Робота під впливом ультрафіолетового випромінювання

- Опис небезпеки: працівники, які працюють на відкритому повітрі під час монтажу чи обслуговування сонячних панелей, піддаються тривалому впливу сонячного випромінювання. Це може спричиняти сонячні опіки та підвищений ризик розвитку онкологічних захворювань шкіри.

- Заходи зменшення ризику:

- о використання спеціального захисного одягу з УФ-фільтром, капелюхів і захисних окулярів;

- о нанесення на шкіру сонцезахисного крему з високим рівнем захисту (SPF 50+);

- о організація зон для відпочинку працівників у тіні.

Небезпека ураження електричним струмом

- Опис небезпеки: усі етапи роботи з електрообладнанням, включаючи монтаж, підключення та обслуговування сонячних панелей, пов'язані з ризиком ураження електричним струмом. Особливо небезпечні випадки порушення ізоляції, пошкодження кабелів або короткого замикання.

- Заходи зменшення ризику:
 - о дотримання правил електробезпеки та використання ізоляційних інструментів;
 - о використання діелектричних рукавичок, взуття та інших засобів захисту;
 - о регулярна перевірка справності обладнання, заземлення та стану ізоляції кабелів.

Робота на висоті під час монтажу обладнання

- Опис небезпеки: монтажні роботи на висоті під час встановлення сонячних панелей створюють ризики падіння, травмування або навіть загибелі працівників.

- Заходи зменшення ризику:
 - о використання страхувального обладнання, включаючи страхувальні пояси та карабіни, відповідно до стандартів ДСТУ EN 363;
 - о проведення робіт на висоті лише у сприятливих погодних умовах;
 - о забезпечення доступу до надійних платформ, драбин і підйомних механізмів.

Фізичні навантаження, пов'язані з переміщенням обладнання

- Опис небезпеки: транспортування, підйом та встановлення важких сонячних панелей або інших елементів системи можуть викликати фізичне перевантаження, травми м'язів і суглобів.

- Заходи зменшення ризику:
 - о використання механізованих пристроїв, таких як крани, підйомники, візки для транспортування обладнання;

- о організація роботи з урахуванням норм фізичного навантаження, розподіл завдань між працівниками;
- о навчання персоналу правильним методам підйому та переміщення важких предметів.

Розуміння та врахування цих ризиків дозволяє забезпечити безпечні умови праці для працівників СЕС, зменшуючи кількість нещасних випадків та травм.

Умови навколишнього середовища мають значний вплив на безпеку працівників, а особливості зовнішнього середовища можуть створювати додаткові ризики для здоров'я і життя.

Високі температури

- Опис ризику:
 - о робота на відкритому повітрі в умовах високих температур може спричинити тепловий стрес, зневоднення або теплові удари;
 - о сонячне випромінювання підсилює нагрівання поверхонь сонячних панелей, що може призвести до опіків у разі контакту з обладнанням.
- Заходи зменшення ризику:
 - о організація регулярних перерв для відпочинку в затінених зонах;
 - о забезпечення доступу до питної води для уникнення зневоднення;
 - о використання спецодягу, що зменшує вплив тепла, та рукавичок для захисту від гарячих поверхонь.

Пил

- Опис ризику:
 - о пил, який утворюється під час будівельних робіт або через специфіку місцевості, може потрапляти в дихальні шляхи, викликати подразнення очей та шкіри;
 - о накопичення пилу на сонячних панелях може знижувати ефективність їхньої роботи, що вимагає регулярного очищення і підвищує ризики травмування під час таких робіт.
- Заходи зменшення ризику:

- о використання респіраторів або масок для захисту органів дихання;
- о носіння окулярів для захисту очей;
- о регулярне очищення обладнання відповідно до вимог безпеки.

Дощ і підвищена вологість

- Опис ризику:
 - о дощ може зробити робочі поверхні слизькими, підвищуючи ризик падіння;
 - о підвищена вологість і дощ створюють умови для короткого замикання або ураження електричним струмом через несправне або неправильно ізольоване обладнання.
- Заходи зменшення ризику:
 - о заборона проведення робіт на висоті та з електрообладнанням під час дощу;
 - о використання нековзного взуття і захисних накладок на поверхнях;
 - о перевірка ізоляції електричних кабелів перед кожним використанням.

Інші природні фактори

1. Сильний вітер:
 - о може зірвати незакріплене обладнання або створити небезпеку падіння працівників із висоти;
 - о захід: виконувати роботи при помірних погодних умовах і використовувати страхувальні системи.
2. Гроза:
 - о існує ризик ураження блискавкою через металеві конструкції;
 - о захід: наявність ефективних систем блискавкозахисту та негайне припинення робіт під час грози.
3. Низькі температури:
 - о можуть викликати переохолодження, обмороження або зниження ефективності через незручності в роботі;

- о захід: використання теплого спецодягу і регулярні перерви для зігрівання.

5.3. Заходи з охорони праці на СЕС

Заходи з охорони праці на СЕС можна описати наступним чином:

Організаційні заходи

1. Розробка та впровадження локальної документації:
 - о інструкції з охорони праці для кожного виду робіт;
 - о плани евакуації та дій у разі аварійних ситуацій;
 - о журнали реєстрації інструктажів і перевірок знань з охорони праці.
2. Навчання та інструктажі працівників:
 - о первинний, повторний, позаплановий і цільовий інструктаж з техніки безпеки;
 - о перевірка знань правил роботи з електрообладнанням, включаючи роботу під напругою;
 - о навчання методам безпечного монтажу, обслуговування і демонтажу сонячних панелей.
3. Контроль за дотриманням вимог:
 - о регулярний нагляд за виконанням вимог з охорони праці уповноваженими особами;
 - о проведення внутрішніх аудитів системи охорони праці.

Технічні заходи

1. Забезпечення безпеки електрообладнання:
 - о використання сертифікованого обладнання, що відповідає вимогам безпеки;
 - о регулярна перевірка справності електрообладнання, кабелів та заземлення;
 - о встановлення пристроїв захисту від перенапруги та автоматичних вимикачів.
2. Захист від падінь і механічних травм:

- о оснащення робочих місць на висоті страхувальними системами (страхувальні пояси, канати);
- о забезпечення платформами, сходами та іншими допоміжними пристроями для роботи на висоті.

3. Системи аварійного реагування:

- о установка засобів блискавкозахисту;
- о наявність засобів пожежогасіння на кожній ділянці;
- о забезпечення робочих зон аварійними вимикачами електроживлення.

Санітарно-гігієнічні заходи

1. Захист від несприятливих погодних умов:

- о облаштування затінених зон для відпочинку працівників на відкритому повітрі;
- о надання спецодягу для роботи в умовах високих або низьких температур.

2. Захист від впливу пилу та УФ-випромінювання:

- о використання респіраторів, окулярів та сонцезахисного одягу;
- о нанесення сонцезахисного крему перед початком роботи.

3. Організація умов для працівників:

- о забезпечення працівників питною водою та можливістю для регулярного відпочинку;
- о наявність приміщень для обігріву або охолодження залежно від пори року.

Профілактичні заходи

1. Регулярний технічний огляд обладнання:

- о проведення планових ремонтів і профілактичних оглядів електроустановок;
- о контроль за станом сонячних панелей, кабельних систем і перетворювачів напруги.

2. Медичні огляди працівників:

- о проведення попередніх і періодичних медичних оглядів;
- о надання першої медичної допомоги у разі нещасного випадку.

3. Попередження аварійних ситуацій:

- о проведення навчань щодо дій у разі аварій;
- о оперативне реагування на виявлення несправностей у роботі

систем.

Впровадження вказаних заходів дозволяє забезпечити високий рівень безпеки на СЕС, знижуючи ризики нещасних випадків і забезпечуючи комфортні умови праці.

5.4. Пожежна безпека та екологічна складова

Пожежна безпека

Пожежна безпека є важливим аспектом експлуатації СЕС, оскільки підвищені температури, можливість коротких замикань в електричних системах та використання легкозаймистих матеріалів можуть спричинити загоряння. Для зменшення ризику виникнення пожеж на СЕС необхідно вжити низку заходів:

1. Регулярний контроль стану проводки та електрообладнання:

- о перевірка справності всіх електричних з'єднань, кабелів, перетворювачів напруги та інших компонентів системи на регулярній основі;
- о виявлення потенційно небезпечних дефектів, таких як пошкодження ізоляції або короткі замикання, та їх негайне усунення;
- о використання сучасних пристроїв захисту від перенапруги і коротких замикань.

2. Використання вогнестійких матеріалів у конструкціях:

- о використання вогнестійких або мало займистих матеріалів для конструкцій сонячних панелей, інверторів, кабельних систем та інших елементів;
- о забезпечення належного захисту проводки, зокрема шляхом використання спеціальних термостійких трубок, кабелів та ізоляційних матеріалів.

3. Облаштування систем автоматичного пожежогасіння:

- о установлення автоматичних систем пожежогасіння на критичних ділянках СЕС, таких як електричні щити та перетворювачі напруги;
- о використання вогнегасників, засобів для швидкого виявлення пожежі та аварійних сповіщувачів, щоб оперативно реагувати на виникнення вогню;
- о проведення регулярних навчань для персоналу щодо дій у разі пожежі, включаючи евакуацію та використання вогнегасних засобів.

Екологічна складова

СЕС мають великий позитивний вплив на навколишнє середовище, завдяки своєму сприянню зниженню викидів парникових газів і зменшенню залежності від викопних енергоресурсів. Вони є частиною стратегії сталого розвитку і сприяють збереженню природних ресурсів.

1. Зниження викидів вуглекислого газу:

- о СЕС сприяють значному зменшенню викидів CO₂, оскільки генерують електричну енергію без спалювання палива. Використання сонячної енергії заміщає споживання електроенергії, що виробляється за допомогою викопних джерел, таких як вугілля та газ;
- о за підрахунками, кожна мегават-година електроенергії, отримана від сонячних панелей, дозволяє уникнути викиду до 0,5 тонн CO₂ в атмосферу.

2. Зменшення залежності від викопного палива:

- о використання СЕС сприяє зменшенню потреби в традиційних енергетичних ресурсах (вугілля, нафта, газ), що також допомагає знизити екологічний вплив процесів видобутку та спалювання палива;
- о зменшення використання викопних енергоресурсів допомагає зберегти природні ресурси і знижує ризики, пов'язані з їх вичерпанням.

3. Сприяння збереженню навколишнього середовища:

- о СЕС не виділяють токсичних відходів і не забруднюють повітря, на відміну від традиційних теплових електростанцій, що спричиняють забруднення повітря важкими металами та оксидами;

о виробництво та використання сонячних панелей має низький рівень забруднення в порівнянні з іншими джерелами енергії, і хоча певні етапи їхнього виробництва можуть потребувати ресурсів, загальний вплив на екологію є мінімальним.

Таким чином було розглянуто основні заходи з охорони праці на СЕС, а також проблеми, що виникають під час їх експлуатації, пов'язані з пожежною безпекою та екологічними аспектами. Зважаючи на специфіку робіт, що здійснюються на СЕС, важливим є дотримання суворих стандартів безпеки для працівників. Це включає регулярний контроль стану електрообладнання, використання вогнестійких матеріалів, впровадження систем автоматичного пожежогасіння та проведення навчань для персоналу.

Водночас, СЕС мають значний позитивний екологічний ефект, знижуючи викиди парникових газів і зменшуючи залежність від викопного палива. Їх експлуатація сприяє збереженню навколишнього середовища, роблячи енергетичний сектор більш сталим та екологічно безпечним.

Отже, вжиті заходи з охорони праці та екологічної безпеки на СЕС не тільки мінімізують ризики для працівників, але й допомагають забезпечити сталий розвиток енергетичного сектору, знижуючи негативний вплив на навколишнє середовище і сприяючи збереженню природних ресурсів.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі досліджено питання стійкості енергетичної системи, за умови, коли генерація може бути нестабільною через застосування ВДЕ.

В першому розділі розглянуто актуальність питання ВДЕ в Україні та світі, розглянуто перспективи для розвитку. В другому проведено аналіз впливу ВДЕ на стабільність енергетичної системи. В третьому розглянуто поняття статичної та динамічної стійкості. В четвертому розділі проведено аналітичне дослідження статичної та динамічної стійкості системи з СЕС.

Таким чином, було розглянуто, як акумулювання енергії та розвиток інтелектуальних мереж є важливими аспектами для стабільного функціонування енергетичної системи з великою часткою ВДЕ. Сучасні інтелектуальні мережі є ключовими для переходу на більш стійкі та ефективні системи енергопостачання, які можуть інтегрувати в себе різноманітні ВДЕ, підвищуючи таким чином загальну ефективність енергетичної інфраструктури.

В роботі розглянуто збалансованість споживання електроенергії та регулювання частоти, що є ключовими технічними викликами в енергосистемах з високим рівнем інтеграції ВДЕ. Стосовно СЕС проаналізовано проблеми їх інтеграції, зокрема зменшення динамічної стійкості синхронної роботи традиційних електростанцій при зростанні загальної потужності СЕС; негативний вплив на стабільність параметрів електроенергії; а також нестабільність графіка виробництва потужності.

Приділено увагу дослідженню коефіцієнту запасу статичної стійкості, який відображає, на скільки можна збільшити потужність, що передається від станції в мережу, не порушуючи стійкість електричної системи. Оскільки при роботі з ВДЕ потужність може коливатись, подібні дослідження є необхідними при визначенні стійкості системи в цілому.

В якості практичного завдання розраховано критичний кут та граничний час відключення трифазного КЗ, а також розраховані потужності

для нормального усталеного режиму, аварійного режиму під час короткого замикання та режиму після усунення аварії.

На основі цих даних побудовано кутові характеристики, що відображають залежність між кутом ротора генератора і переданою потужністю в різних режимах. Визначення постійної інерції дозволило розрахувати граничний час, протягом якого коротке замикання повинно бути усунене для збереження динамічної стійкості системи.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах : [Навчальний посібник] / О.В. Гай, В.М. Бодунов. – К. : ЦП «Компринт», 2020. – 315 с
2. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів. Вид. 2-е, доправ. та доп. / Г.Г. Півняк, В.М. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.І. Несен / За ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Видавництво НГА України, 2000. – 597 с.
3. Перехідні процеси. Розрахунок статичної і динамічної стійкості електричної мережі : навчальний посібник / М. П. Свиридов, В. В. Тептя. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 99 с.
4. Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах / О. В. Кириленко, В. В. Павловський, Л. М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. 2011. – №1. – С. 46 – 53.
5. Кириленко О. В. Аналіз стійкості енергетичних систем за напругою / О. В. Кириленко, В. В. Павловський та ін. // Технічна електродинаміка. Електроенергетичні системи та установки. – 2010. - №3. – С. 44–69.
6. Дячук О. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року / О. Дячук, М. Чепелев, Р. Подолець та ін. // К: Вид-во ТОВ «АРТ КНИГА», 2017. – 88 с.
7. Відновлювані джерела енергії / За ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.
8. Кармазін О.О. Еквівалентна потужність комплексу ВЕС України / О.О. Кармазін // Відновлювана енергетика. – 2008. – № 1. – С. 30–33.
9. Лежнюк П. Д. Оптимальне керування розосередженими джерелами енергії в локальній електричній системі / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. А. Ковальчук // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. Ч. 1. – 2011. – С. 48–55. – ISSN 1727-9895.

10. Лежнюк П. Д. Оцінювання стабільності генерування сонячних електростанцій у задачі забезпечення балансової надійності / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук // Наукові праці ВНТУ.– 2016. – № 2. – С. 1-8
11. Стогній Б. С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 32–48.
12. СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-68:2012 Стійкість енергосистем. Керівні вказівки.
13. ДСТУ ІЕС 60909-4:2008 Струм короткого замикання у трифазних системах змінного струму
14. Кузнецов М. П. Фактори впливу вітрової енергетики на стійкість енергосистеми / М. П. Кузнецов // Відновлювана енергетика. - 2015. - № 2. - С. 49-52.
15. Забезпечення стійкості енергосистем та їх об'єднань: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка / Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2018. – 320 с.
16. Кулик В. В. Оцінювання балансової надійності відновлюваних джерел електроенергії у розподільних мережах з урахуванням типових графіків генерування та споживання / В. В. Кулик, В. Ф. Кириченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – № 1. – С. 63-77.
17. Методичні вказівки до практичних занять №1 – №5 з дисципліни «Перехідні процеси в електроенергетиці» [Електронне видання] / Рудик А. В. – Рівне : НУВГП, 2024. – 52 с.
18. Capacity Value of PV and Wind Generation in the NV Energy System S. Lu R. Diao N. Samaan P. Etingov Pacific Northwest National Laboratory Richland, Washington, - September 2012.
19. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems: monograph / O. Burykin, P. Lezhniuk, V. Kulyk and others. – Vinnytsia : VNTU, 2018. – 124 p.

20. Akinyelle D., Belikof J., Levram Y. Battery Storage Technologies for Electrical Applications: Impact in Stand-Alone Photovoltaic Systems // Energies, 2017, v.14, 44 p.
21. Підвищення стійкості систем електропостачання з відновлюваними джерелами енергії // URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Засоби_підвищення_стійкості_систем_з_ВДЕ.pdf (дата звернення: 09.11.2024).
22. Дослідження впливу сонячних електростанцій на режими розподільних електромереж // URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/199457569.pdf> (дата звернення: 09.11.2024).
23. Перехідні процеси в системах електропостачання. Дослідження статичної стійкості // URL: <https://studfile.net/preview/8882971/> (дата звернення: 14.11.2024).