

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАДИМА ГЕТЬМАНА**

**Навчально-науковий інститут
«Інститут інформаційних технологій в економіці»**

Кафедра системного аналізу та кібербезпеки

**ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНА ПРОГРАМА
СПЕЦІАЛЬНІСТЬ**

**«Системний аналіз»
124 «Системний аналіз»**

Форма навчання: очна

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

**на тему «Стохастичне моделювання та аналіз стійкості енергосистем з
відновлюваними джерелами енергії»**

Здобувача: Сливчака Гліба Олеговича

(підпис)

Науковий керівник: д. ф.-м. н., проф. Пічкур В.В.

(підпис)

**Робота допущена до захисту перед екзаменаційною комісією з атестації
здобувачів вищої освіти (ЕК)**

Завідувач кафедри: д. ф.-м. н., проф. Джалладова
І.А.

(підпис)

Київ 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ВАДИМА ГЕТЬМАНА

Навчально-науковий інститут «Інститут інформаційних технологій в економіці»

Кафедра системного аналізу та кібербезпеки

ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНА ПРОГРАМА

«Системний аналіз»

СПЕЦІАЛЬНІСТЬ

124 «Системний аналіз»

ПОГОДЖЕНО

Керівник проєктної групи (гарант)
освітньо-професійної програми

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри системного аналізу та
кібербезпеки

Колєчкіна Л. М.

(підпис)

2026 р.

Джалладова І.А.

(підпис)

2026 р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

здобувачу вищої освіти Сливчаку Глібу Олеговичу

денної форми навчання

на підготовку кваліфікаційної магістерської роботи

На тему: «Стохастичне моделювання та аналіз стійкості енергосистем з відновлюваними джерелами енергії»

Тему затверджено наказом ректора Університету від «27» квітня 2026р. № 540-ст

Кваліфікаційна магістерська робота виконується на матеріалах

План кваліфікаційної магістерської роботи

Розділ 1	Теоретичні основи системного аналізу бізнес-процесів у поліграфічній сфері.
Розділ 2	Математичне забезпечення та інструментальні засоби стохастичного моделювання стійкості енергосистем.
Розділ 3	Експериментальне дослідження та програмна реалізація стохастичного моделювання стійкості енергосистем.

Об'єкт дослідження:	Динамічні процеси частотної стабільності в електроенергетичних системах з високою часткою відновлюваних джерел.
Предмет дослідження:	Стохастичні характеристики реакції енергосистеми на випадкові втрати генерації та їхній вплив на еквівалентну інерцію і швидкість зміни частоти.
Мета кваліфікаційної магістерської роботи:	Кількісна оцінка впливу зростання частки відновлюваних джерел на частотну стійкість енергосистеми шляхом розробки та застосування стохастичної моделі Монте-Карло з акцентом на показник швидкості зміни частоти та еквівалентну інерцію.

Конкретні завдання, які здобувач повинен виконати для досягнення поставленої мети:

У розділі 1	1. Проаналізувати сучасні тенденції розвитку відновлюваної енергетики та їхній вплив на структуру енергосистем. 2. Дослідити проблематику частотної стійкості за умов зниження синхронної інерції та варіабельності генерації. 3. Розглянути системні виклики інтеграції ВДЕ та узагальнити теоретичні підходи до оцінки стійкості енергосистем.
У розділі 2	1. Вивчити теоретико-ймовірнісні основи та методологію імітаційного моделювання методом Монте-Карло. 2. Розробити математичну модель частотної стійкості енергосистеми з урахуванням еквівалентної інерції та показника RoCoF. 3. Виконати обґрунтування та порівняльний аналіз програмно-технічних засобів стохастичного моделювання.
У розділі 3	1. Реалізувати алгоритмічне забезпечення та архітектуру стохастичної моделі Монте-Карло.

2. Провести експериментальне моделювання на основі реальних даних енергосистем та здійснити графічний аналіз ризиків втрати стійкості.

3. Сформулювати практичні рекомендації для операторів енергосистем щодо вдосконалення процедур балансування та мережевих кодексів.

**Завдання підготував
науковий керівник**

(підпис)

Пічкур В. В.

(ініціали, прізвище)

«__»_____2026 р.

**Завдання одержав
здобувач**

(підпис)

Сливчак Г.О.

(ініціали, прізвище)

«__»_____2026 р.

Реферат

Кваліфікаційна магістерська робота містить 68 сторінок, 4 таблиці, 19 рисунків, перелік джерел посилань з 53 найменувань, додатки.

«Стохастичне моделювання та аналіз стійкості енергосистем з відновлюваними джерелами енергії»

Об'єктом дослідження є динамічні процеси частотної стабільності в електроенергетичних системах з високою часткою відновлюваних джерел.

Предметом дослідження є стохастичні характеристики реакції енергосистеми на випадкові втрати генерації та їхній вплив на еквівалентну інерцію та швидкість зміни частоти.

Мета кваліфікаційної магістерської роботи – кількісна оцінка впливу зростання частки відновлюваних джерел на частотну стійкість енергосистеми шляхом розробки та застосування стохастичної моделі Монте-Карло з акцентом на показник RoCoF та еквівалентну інерцію.

Відповідно до поставленої мети були визначені такі завдання:

1. проаналізувати сучасні тенденції розвитку відновлюваної енергетики та проблематику частотної стійкості;
2. розробити математичну модель частотної стійкості енергосистеми з урахуванням еквівалентної інерції та показника RoCoF;
3. реалізувати алгоритмічне забезпечення та архітектуру стохастичної моделі Монте-Карло;
4. провести експериментальне моделювання на основі реальних даних енергосистем та здійснити графічний аналіз ризиків втрати стійкості;
5. сформулювати практичні рекомендації для операторів енергосистем щодо вдосконалення процедур балансування та мережевих кодексів.

Практичне значення отриманих результатів. Робота забезпечує кількісну оцінку ризиків втрати частотної стійкості при інтеграції відновлюваних джерел енергії. Розроблена стохастична модель Монте-Карло може бути використана операторами енергосистем для планування резервів, налаштування захисних механізмів та вдосконалення мережевих кодексів.

Рік виконання кваліфікаційної магістерської роботи – 2026.

Рік захисту роботи – 2026.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, стохастичне моделювання, частотна стійкість, еквівалентна інерція, RoCoF, метод Монте-Карло, енергосистема.

В і д г у к
про кваліфікаційну магістерську роботу
здобувача навчально-наукового інституту
«Інститут інформаційних технологій в економіці»
освітньо-професійної програми «Системний аналіз»
Сливчака Гліба Олеговича
на тему: «Стохастичне моделювання та аналіз стійкості енергосистем з
відновлюваними джерелами енергії»

Актуальність теми кваліфікаційної магістерської роботи обґрунтовується потребою масового впровадження відновлюваних джерел енергії, що знижує синхронну інерцію та ускладнює частотну стабільність енергосистеми. Традиційні методи аналізу не враховують стохастичний характер виробітку, тому виникає потреба у нових підходах до моделювання стійкості. У контексті європейських кліматичних цілей та програм декарбонізації є актуальним застосування системного аналізу й стохастичного моделювання для підвищення надійності національної енергосистеми.

У магістерській роботі автор висвітлює створення комплексу імітаційного моделювання на основі методу Монте-Карло для аналізу частотної стійкості сучасних енергосистем в умовах інтенсивного впровадження відновлюваних джерел енергії. Розроблено методику моделювання аварійних ситуацій та сценаріїв функціонування генераційного портфеля. Сформовано три прикладні сценарії розвитку генерації для комплексного порівняльного аналізу. Реалізовано імітаційну модель Монте-Карло для оцінки розподілу швидкості зміни частоти RoCoF та ймовірності перевищення критичних порогів стійкості. Розроблений комплекс демонструє здатність ефективно прогнозувати ризики дефіциту системної інерції та оцінювати динаміку метрики швидкості зміни частоти RoCoF за різних сценаріїв генерації. Значну увагу приділено комп'ютерному моделюванню з використанням мови програмування Python, виконано детальний графічний аналіз вразливості на основі реальних часових рядів. Результати

дослідження мають практичне значення, і можуть застосовуватися для проектування стійких, безпечних енергетичних систем.

Здобувач є сформованим фахівцем з системного аналізу, вміє застосовувати сучасні інформаційні технології до розв'язування практичних задач, інтегрувати результати аналізу даних в прикладні рішення. Недоліки роботи не впливають на високу позитивну оцінку роботи в цілому.

Вважаю, що кваліфікаційна магістерська робота Сливчака Гліба Олеговича на тему «Стохастичне моделювання та аналіз стійкості енергосистем з відновлюваними джерелами енергії» є самостійним, завершеним дослідженням, відповідає всім вимогам, що висуваються до кваліфікаційних магістерських робіт, може бути допущена до захисту, а автор цієї роботи, Сливчак Гліб Олегович, заслуговує на оцінку “відмінно” та на присвоєння освітньо-кваліфікаційного рівня “магістр”.

Науковий керівник:
доктор фізико-математичних наук,
професор

Володимир ПІЧКУР

“ ____ ” _____ 2026 р.

Рецензія

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти

Сливчака Гліба Олеговича

на тему: «Стохастичне моделювання та аналіз стійкості енергосистем з
відновлюваними джерелами енергії»

Тема кваліфікаційної магістерської роботи Сливчака Гліба Олеговича є актуальною, оскільки вона пов'язана з глибинними трансформаціями сучасної енергетики, що супроводжуються зростанням частки відновлюваних джерел та відповідним зниженням інерційних властивостей енергосистем. З'являються нові виклики для забезпечення частотної стабільності, необхідно формувати практичні рішення, які б дозволяли підвищити надійність електроенергетичних систем. Як наслідок, постає задача конструювання математичної моделі, яка б з використанням методів системного аналізу дозволяла аналізувати та оцінювати ризики, параметри і умови надійного функціонування електроенергетичних систем.

У магістерській роботі автор поєднує теоретичні положення з практичною реалізацією стохастичного і комп'ютерного моделювання. В роботі розроблено методику моделювання аварійних ситуацій та сценаріїв генерації. Реалізовано імітаційну модель Монте-Карло для оцінки розподілу швидкості зміни частоти та ймовірності перевищення критичних порогів стійкості функціонування. Розроблено програмний комплекс на мові Python. Проведено комп'ютерне моделювання та детальний графічний аналіз вразливості на основі реальних часових рядів для енергосистем Нідерландів та Португалії, виявлено часові інтервали найвищого ризику. Запропоновано алгоритми впровадження динамічного моніторингу, оптимізацію графіків обслуговування станцій та використання засобів підтримки частоти.

Робота написана грамотною українською мовою, має чітку структуру та належне оформлення відповідно до встановлених вимог. Наявні окремі стилістичні недоліки не впливають на загальну якість дослідження.

Результати магістерської роботи можуть бути використані для вдосконалення механізмів балансування та оптимізації резервів енергетичних систем, що сприяє підвищенню надійності роботи мережі. Рекомендації автора мають прикладний характер і можуть слугувати базою для розробки налаштувань захисних систем.

Виходячи з проведеного аналізу роботи, можна зробити висновок, що кваліфікаційна магістерська робота Сливчака Гліба Олеговича на тему «Стохастичне моделювання та аналіз стійкості енергосистем з відновлюваними джерелами енергії» відповідає всім вимогам до кваліфікаційних магістерських робіт, а її автор заслуговує на оцінку «відмінно».

Рецензент:

завідувач кафедри моделювання складних систем
факультету комп'ютерних наук та кібернетики
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка,
доктор технічних наук, доцент

Дмитро ЧЕРНІЙ

“ — ” _____ 2026 р.

Підпис засвідчую:

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ.....	3
ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1	
СУЧАСНИЙ СТАН ТА СИСТЕМНІ ВИКЛИКИ ІНТЕГРАЦІЇ	
ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМИ.....	7
1.1. Тенденції розвитку відновлюваної енергетики та специфіка її функціонування.....	7
1.2. Проблематика стійкості енергосистем за умов зниження синхронної інерції.	12
РОЗДІЛ 2	
МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ	
СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМ.....	19
2.1. Теоретико-ймовірнісні основи та методологія імітаційного моделювання Монте-Карло.....	19
2.2. Математична модель частотної стійкості енергосистеми: еквівалентна інерція та метрика RoCoF.....	26
2.3. Обґрунтування та порівняльний аналіз програмно-технічних засобів імітаційного моделювання.....	30
РОЗДІЛ 3	
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ	
СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМ.....	35
3.1. Алгоритмічне забезпечення та архітектура моделі Монте-Карло.....	35
3.2. Підготовка даних та експлораторний аналіз поточного стану енергосистем Нідерландів та Португалії.....	39
3.3. Моделювання методом Монте-Карло та графічний аналіз ризиків втрати стійкості.....	45
3.4 Практичні рекомендації та напрями вдосконалення розробленої стохастичної моделі.....	56
3.5 Роль переддипломної практики у формуванні магістерського дослідження	58
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	62

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії.

RoCoF – rate of change of frequency, швидкість зміни частоти.

ENTSO-E – European Network of Transmission System Operators for Electricity.

Wind Offshore – вітрова морська генерація, морська вітроенергетика.

Wind Onshore – вітрова наземна генерація, наземна вітроенергетика.

Гц/с – герци за секунду, одиниці розмірності швидкості зміни частоти змінного струму в енергосистемі.

ΔP – зміна потужності, різниця між споживанням та генерацією, МВт.

МВт – мегават, одиниці розмірності потужності.

Число π – математична константа, округлена величина якої дорівнює 3.14.

ВСТУП

Швидка трансформація енергетичних систем під впливом масового впровадження відновлюваних джерел енергії створює нові виклики для забезпечення їхньої стійкості та надійності. Зростання частки інверторно-орієнтованих ресурсів супроводжується зниженням синхронної інерції та підвищеною варіабельністю генерації, що безпосередньо впливає на частотну стабільність енергосистеми. Постає проблема адекватної оцінки та моделювання впливу відновлюваних джерел на стійкість системи, оскільки традиційні методи аналізу не враховують стохастичний характер виробітку та невизначеність у поведінці складних енергетичних процесів. У контексті європейських кліматичних цілей і національних програм декарбонізації для України це питання набуває особливого значення, адже активна інтеграція ВДЕ та модернізація мережевої інфраструктури потребують нових підходів до забезпечення надійності. Саме тому застосування стохастичного моделювання та системного аналізу є актуальним і необхідним для підвищення стійкості національної енергосистеми.

Останні дослідження зосереджені на проблемах емулявання інерції, розробці адаптивних алгоритмів первинного регулювання, застосуванні акумуляторних систем та оцінці показника RoCoF як ключового індикатора вразливості системи. Вагомий внесок у розвиток цих напрямів зробили міжнародні організації та дослідники, зокрема ENTSO-E та IEEE, які пропонують методи моделювання та рекомендації щодо інтеграції ВДЕ. Водночас залишається недостатньо опрацьованим питання кількісної оцінки ризиків втрати частотної стійкості при реалістичних стохастичних сценаріях, особливо для національних систем із різною структурою генерації. Саме ця прогалина визначає наукову нішу даної роботи.

Метою дослідження є кількісна оцінка впливу зростання частки відновлюваних джерел на частотну стійкість енергосистеми шляхом розробки та

застосування стохастичної моделі Монте-Карло з акцентом на показник RoCoF та еквівалентну інерцію. Для досягнення цієї мети необхідно виконати такі завдання:

1. проаналізувати сучасні підходи до моделювання інерційних властивостей системи та вибрати адекватні математичні моделі для агрегування інерції;
2. розробити стохастичну методологію моделювання аварійних ударів (ΔP) та сценаріїв генераційного портфеля;
3. реалізувати алгоритм Монте-Карло для оцінки розподілу RoCoF і вірогідності перевищення критичних порогів;
4. провести експериментальне моделювання для прикладних кейсів і виконати графічний аналіз вразливості;
5. сформулювати практичні рекомендації для операторів системи та пропозиції щодо вдосконалення мережкових кодексів і процедур балансування.

Об'єктом дослідження є динамічні процеси частотної стабільності в електроенергетичних системах з високою часткою відновлюваних джерел. Предметом дослідження виступають стохастичні характеристики реакції енергосистеми на випадкові втрати генерації та їхній вплив на еквівалентну інерцію і швидкість зміни частоти.

Методологія дослідження базується на поєднанні теоретико-ймовірнісних підходів, методів імітаційного моделювання Монте-Карло, агрегованих динамічних моделей інерції та розрахунку RoCoF. Для обробки часових рядів і реалізації масових ітерацій застосовано векторизацію та паралелізацію обчислень, а також проведено чутливісний аналіз ключових параметрів.

Теоретична значущість роботи полягає у формалізації підходу до агрегування інерції та кількісній оцінці залежності RoCoF від структури генераційного портфеля, що розширює методологічну базу досліджень стійкості енергосистем. Практична значущість полягає у можливості використання результатів моделювання для планування резервів, адаптації захисних налаштувань та розробки політик інтеграції ВДЕ в Україні. Інформаційна база

дослідження включає сучасні наукові публікації, технічні рекомендації ENTSO-E та ІЕС, а також часові ряди генерації і навантаження з відкритих платформ, що забезпечує репрезентативність вхідних даних для стохастичного моделювання.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТА СИСТЕМНІ ВИКЛИКИ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЕНЕРГОСИСТЕМИ

1.1. Тенденції розвитку відновлюваної енергетики та специфіка її функціонування

Тенденції розвитку відновлюваної енергетики формуються на перетині політики, ринку та технологій, що зумовлює потребу в комплексному аналізі. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що швидке нарощування потужностей сонячної та вітрової генерації змінює характер виробництва електроенергії від централізованого до більш розподіленого та інверторно-орієнтованого. Це, у свою чергу, породжує нові вимоги до систем управління, захисту та забезпечення частотної стійкості, адже інверторні джерела не мають природної механічної інерції, властивій синхронним машинам [1]. Таким чином, вступ до проблематики інтеграції відновлюваних джерел енергії логічно підводить до розгляду актуальності та глобального контексту цього процесу.

Актуальність інтеграції відновлюваних джерел визначається глобальними кліматичними цілями та політичними ініціативами. Стратегії досягнення нульових чистих викидів вуглецю та Європейський зелений курс окреслюють амбітні цільові показники на найближчі десятиліття, що стимулює масове впровадження вітрової та сонячної енергетики. У Європейському Союзі частка відновлюваних джерел у кінцевому енергоспоживанні постійно зростає і у 2023 році досягла близько двадцяти чотирьох з половиною відсотків. Особливо високі темпи спостерігаються в електроенергетиці, де сонячна та вітрова генерація демонструють найбільш динамічний розвиток. Ці тенденції створюють підґрунтя для подальшого аналізу на прикладі окремих країн, зокрема Нідерландів та

Португалії, які мають специфічні особливості у структурі виробництва та балансі попиту і пропозиції [2].

Причини трансформації енергетичного сектору мають багатовимірний характер. Екологічні чинники відіграють провідну роль, адже декарбонізація є ключовим інструментом у боротьбі зі зміною клімату. Економічні фактори також мають суттєве значення: зниження вартості сонячних панелей та вітротурбін зробило відновлювані джерела конкурентоспроможними навіть без постійних субсидій. Геополітичні мотиви, своєю чергою, підштовхують держави до диверсифікації енергопостачання та зменшення залежності від імпортованих викопних ресурсів, що стимулює інвестиції у місцеві відновлювані потужності. Усі ці чинники взаємодіють між собою, формуючи стійку динаміку переходу до нової моделі енергетики [1, 2].

Наслідки швидкого зростання частки відновлюваних джерел стосуються не лише виробничої складової, але й експлуатаційної надійності енергосистем. Постає необхідність адаптації системного управління для компенсації зменшення синхронної інерції, впровадження технологій накопичення енергії та розвитку інтелектуальних інверторних стратегій, здатних імітувати інерційні властивості. Без таких заходів підвищення частки відновлюваних джерел може призвести до зростання ризиків частотних відхилень і порушень у роботі системи при раптових збуреннях [1].

Відновлювані джерела енергії визначаються як природні ресурси, здатні відновлюватися в масштабах часу, що робить їх стійкими для тривалого використання в енергетичних системах. У науковій літературі прийнята класифікація ВДЕ за фізичною природою первинного ресурсу та способом перетворення енергії на електричну або теплову. До основних категорій належать сонячна енергія у вигляді фотоелектричних систем і концентрованих сонячних установок, вітрова енергія у вигляді наземних і морських вітрових електростанцій, гідроенергетика різного масштабу, геотермальна енергія, біоенергетика включно з твердою біомасою і біогазом, а також океанічні технології. Сучасні аналітичні огляди підкреслюють, що зростання встановлених потужностей у світі

відбувається нерівномірно між технологіями при одночасному посиленні вимог до інтеграції в мережі та регуляторних рамок [3]. Класифікацію відновлюваних джерел енергії можемо побачити на рисунку 1.1.

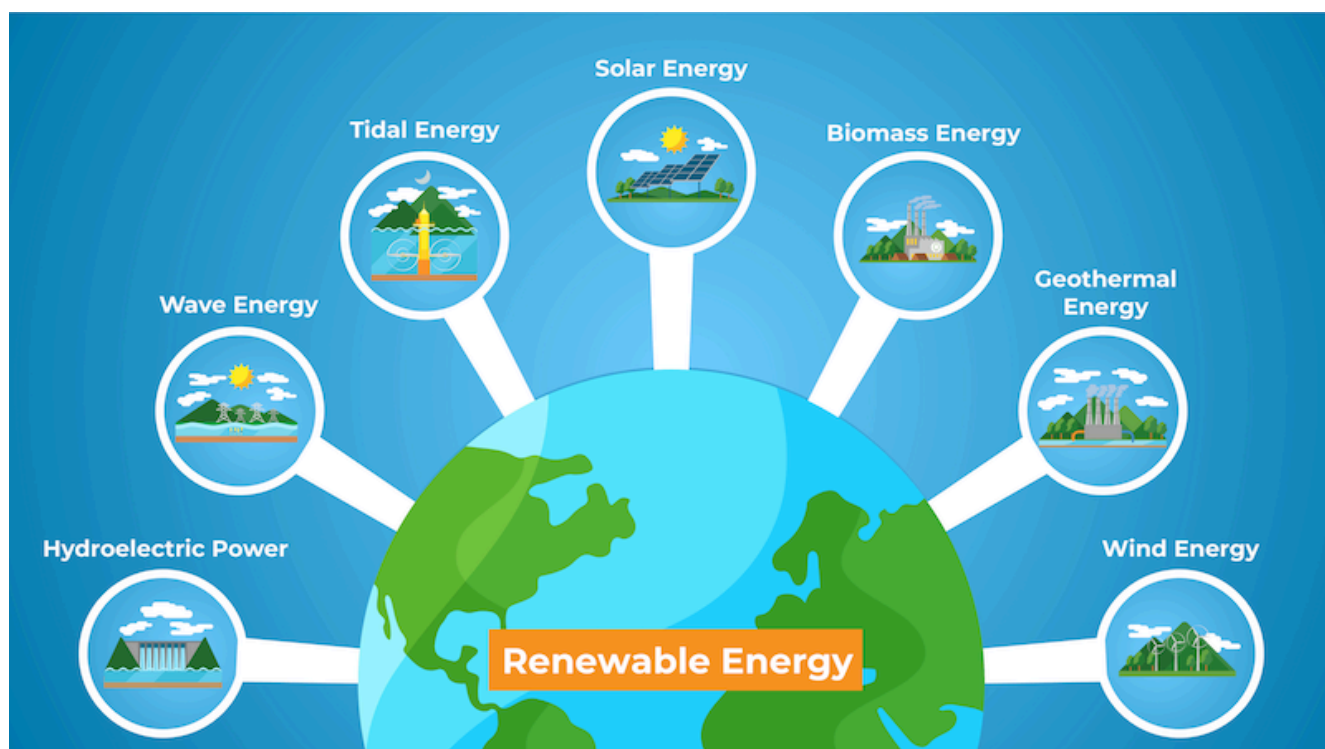


Рисунок 1.1 – Типи джерел відновлюваної енергії

Джерело:[4]

Фотоелектричні станції функціонують на основі перетворення сонячного випромінювання в електричний струм через фотоелектричний ефект у напівпровідникових матеріалах. У наукових джерелах наголошується, що генерація ФЕС має виражену добову і сезонну циклічність, а також залежить від миттєвих метеорологічних умов що створює високу змінність і корелювання по простору. Технічно сучасні великі ФЕС є інверторно-інтерфейсованими ресурсами що означає відсутність механічної інерції в системі і потребу в спеціалізованих алгоритмах управління для забезпечення підтримки частоти та якості напруги. Для практичних досліджень важливими є характеристики кривої потужності панелей, коефіцієнти деградації, ефективність інверторів і можливості керування потужністю шляхом обмеження генерації [1, 3].

Вітрові електростанції поділяються на наземні і морські установки що відрізняються як технічно так і з точки зору стабільності виробництва. Морські

ВЕС зазвичай демонструють вищі середні коефіцієнти використання потужності і більш рівномірну генерацію завдяки більш стабільним вітровим ресурсам на морі тоді як наземні ВЕС мають більшу просторову доступність і нижчі капітальні витрати на одиницю потужності. Водночас обидва типи характеризуються стохастичною природою вітру що вимагає застосування методів прогнозування, просторового розподілу парків і резервування для зменшення ризику дефіциту або надлишку потужності. У наукових оглядах також відзначається, що розвиток морських ВЕС супроводжується зростанням масштабів турбін і необхідністю адаптації мережевих рішень для передачі великої потужності на берег [2, 3].

Генерація на біомасі має специфіку, яка відрізняє її від більшості інших відновлюваних джерел через можливість забезпечувати керовану і диспетчеризовану подачу енергії. Біомаса може використовуватися для виробництва електроенергії в когенераційних установках для одночасного виробництва тепла і електрики а також для виробництва біогазу і біотоплив. У наукових джерелах підкреслюється, що сучасна біоенергетика є значним компонентом глобального споживання відновлюваної енергії і може виконувати роль базової або пікової генерації залежно від технології і доступності палива. Водночас у літературі наголошуються питання сталості постачання сировини, життєвого циклу викидів і конкуренції з іншими видами землекористування що потребує ретельної оцінки екологічних і соціально-економічних наслідків [3].

Специфіка функціонування різних типів ВДЕ створює низку системних викликів для енергосистем. Інверторно-інтерфейсовані ресурси вимагають нових підходів до регулювання частоти і напруги оскільки традиційна синхронна інерція зменшується що підвищує чутливість системи до швидких змін і збільшує ризик високих значень швидкості зміни частоти RoCoF при втраті генерації. На сьогодні розглядаються методи емулювання інерції, адаптивні алгоритми первинного регулювання, роль акумуляторних систем і координація з традиційними джерелами для забезпечення надійності. Крім того, відзначається необхідність удосконалення прогнозування генерації і попиту, розвитку механізмів гнучкості

включно з ринковими сигналами і модернізації мережевих кодексів для інтеграції великого обсягу ВДЕ без погіршення стійкості [1].

Інтеграція відновлюваних джерел енергії змінює традиційну операційну модель енергосистем. Якщо теплові та атомні електростанції залишаються регульованими джерелами, здатними оперативно змінювати потужність за командою диспетчера, то сонячна та вітрова генерація залежать від природних умов і не підпорядковуються прямому керуванню. Це створює нові виклики для балансування системи та потребує впровадження альтернативних механізмів управління [2].

Важливою характеристикою відновлюваної генерації є її стохастичність. Потужність, що виробляється сонячними чи вітровими установками, визначається випадковими процесами, які неможливо описати точними детермінованими формулами. Для їхнього аналізу застосовуються ймовірнісні моделі та закони розподілу, що дозволяють оцінювати невизначеність та прогнозувати можливі сценарії. Саме ця властивість обґрунтовує використання методів Монте-Карло для моделювання ризиків і дослідження стійкості енергосистеми [5, 6].

Інтермітентність є ще однією системною рисою відновлюваних джерел. Генерація може різко змінюватися протягом коротких проміжків часу: сонячні панелі миттєво втрачають потужність при появі хмарності, а вітрові турбіни зупиняються при падінні швидкості вітру нижче робочого рівня або при перевищенні штормового порогу, що призводить до аварійного відключення. Такі події створюють раптові дефіцити потужності, які необхідно компенсувати за рахунок резервів чи систем накопичення енергії [7].

Сезонна та добова нерівномірність також суттєво впливають на профіль генерації. Сонячна енергетика формує характерну криву з максимумом опівдні, що призводить до явища качинового графіка: вдень потреба у традиційній генерації зменшується, а ввечері, коли сонце сідає і попит зростає, виникає критичний дефіцит. Це вимагає ретельного планування резервів та гнучкого управління попитом, щоб уникнути системних ризиків. Географічна розпорошеність відновлюваних джерел створює додаткові труднощі для моніторингу та

диспетчеризації. Якщо традиційна електростанція є одним потужним вузлом, то відновлювані джерела представлені тисячами дрібних точок генерації на дахах будинків чи у відкритих полях. Така децентралізація ускладнює збір даних, синхронізацію телеметрії та потребує розподілених систем управління, здатних агрегувати ресурси і координувати їхню участь у балансуванні енергосистеми [2, 7].

Узагальнюючи викладене, розвиток відновлюваної енергетики визначається комплексом взаємопов'язаних політичних, економічних та технологічних чинників, що зумовлюють перехід від централізованої моделі генерації до розподіленої та інверторно-орієнтованої. Швидке нарощування потужностей сонячних і вітрових установок, доповнене зростанням ролі біоенергетики та інших ВДЕ, формує нові виклики для забезпечення частотної стійкості, балансування попиту й пропозиції та інтеграції стохастичних і інтермітентних джерел у мережу. Водночас екологічні та геополітичні мотиви стимулюють диверсифікацію енергопостачання й інвестиції у місцеві ресурси, а економічні фактори роблять відновлювані технології конкурентоспроможними. Таким чином, сучасна енергетика потребує впровадження інноваційних методів управління, прогнозування та накопичення енергії, що забезпечить надійність і стійкість системи в умовах зростання частки відновлюваних джерел.

1.2. Проблематика стійкості енергосистем за умов зниження синхронної інерції

Сучасний етап розвитку енергетичних систем характеризується зростанням складності режимів функціонування, підвищенням рівня невизначеності та посиленням вимог до забезпечення надійності енергопостачання. Значна варіативність навантаження, нерівномірність режимів генерації та збільшення кількості динамічних збурень створюють додаткові виклики для підтримання

стабільної роботи енергосистем у перехідних процесах. За таких умов особливого значення набуває дослідження здатності енергосистем зберігати працездатний стан після випадкових порушень режиму, оскільки навіть короточасні відхилення параметрів можуть спричиняти каскадні процеси та погіршення загальної надійності функціонування системи. Це зумовлює необхідність детального аналізу стійкості енергосистем, її основних типів та чинників, що визначають поведінку системи під час виникнення збурень.

Стійкість енергосистеми розглядається як здатність підтримувати прийнятний режим роботи та відновлюватися після зовнішніх або внутрішніх збурень. Це поняття охоплює широкий спектр динамічних явищ від миттєвих реакцій елементів до повільних перехідних процесів, тому для його аналізу застосовується систематизована класифікація, що розділяє прояви стійкості на фундаментальні та нефундаментальні компоненти. Фундаментальні компоненти відображають класичні електромеханічні процеси, які визначають поведінку системи в діапазоні синхронної частоти, тоді як нефундаментальні компоненти пов'язані з явищами на інших частотах і з особливостями перетворювальної техніки. Така поділка дозволяє узгодити традиційні підходи до аналізу стійкості з новими викликами сучасних мереж і створює основу для вибору адекватних методів дослідження та заходів захисту [8, 9].

Кутова або ротора стійкість стосується здатності синхронних машин зберігати взаємну синхронність після збурень і традиційно поділяється на дві підкатегорії. Транзієнтна стійкість описує поведінку системи при великих збуреннях таких як короткі замикання або відключення великих блоків і аналізується в часових інтервалах від часток секунди до десятків секунд з урахуванням нелінійної динаміки ротора. Малозбурювальна або мала кутова стійкість вивчає реакцію на невеликі зміни режиму, наприклад коливання потоків потужності або зміни навантаження, і пов'язана з аналізом власних частот та демпфування міжмашинних коливань. У міжзонних мережах особливу увагу приділяють низькочастотним коливанням, які можуть розвиватися між групами генераторів і вимагати спеціальних заходів керування та демпфування [9].

Напругова стійкість визначає здатність системи підтримувати прийнятні рівні напруги після збурень і включає як короткострокові, так і довгострокові процеси. Короткострокова напругова стійкість охоплює динаміку швидкодіючих елементів та реакцію перетворювачів і автоматичних регуляторів у межах кількох секунд, тоді як довгострокова стійкість пов'язана з повільними процесами такими як робота автоматичних регуляторів напруги, перетік реактивної потужності та поведінка навантаження в інтервалі хвилин і годин. Аналіз напругової стійкості вимагає урахування нелінійних характеристик навантажень, обмежень джерел реактивної потужності та взаємодії між локальними і системними засобами регулювання, що робить цю складову критичною для забезпечення надійності при змінних режимах роботи [8].

Частотна стійкість відображає здатність системи утримувати частоту в межах допустимих відхилень при виникненні дисбалансів між виробництвом і споживанням і традиційно розглядається в короткостроковому та довгостроковому масштабах часу. У короткостроковому інтервалі ключовими є механізми інерційної відповіді та первинного регулювання, що визначають швидкість зміни частоти і демпфування коливань. Показник швидкості зміни частоти RoCoF є важливим індикатором вразливості системи до швидких ударів. Довгострокова частотна стійкість включає процеси відновлення балансу за рахунок вторинних і третинних регулювань і планування резервів. У межах малосигнальної стійкості об'єднані категорії малої кутової стійкості, короткострокової частотної стійкості та короткострокової малосигнальної напругової стійкості відповідно до міжнародних рекомендацій IEEE та CIGRE, що підкреслює необхідність комплексного підходу до аналізу і моделювання динаміки енергосистеми [8, 9]. Класифікація типів стабільності також наведена на рисунку 1.2.

Нефундаментальні типи стійкості енергосистеми охоплюють явища, що виходять за межі класичних електромеханічних процесів і виникають унаслідок широкого використання перетворювальної техніки. Одним із ключових проявів є субсинхронні та надсинхронні коливання, які виникають у діапазонах частот нижче та вище від основної системної частоти. У випадку систем із високим

проникненням відновлюваних джерел енергії такі коливання часто спричиняються взаємодією інверторів і мережі або між різними генераторами. Вони відрізняються від класичних міжмашинних електромеханічних коливань і можуть призводити до серйозних наслідків, включно з відключенням вітрових електростанцій чи торсійними вібраціями валів теплових турбін. Саме тому дослідження механізмів виникнення та методів пригнічення субсинхронних і надсинхронних коливань є одним із пріоритетних напрямів сучасної енергетики [10].

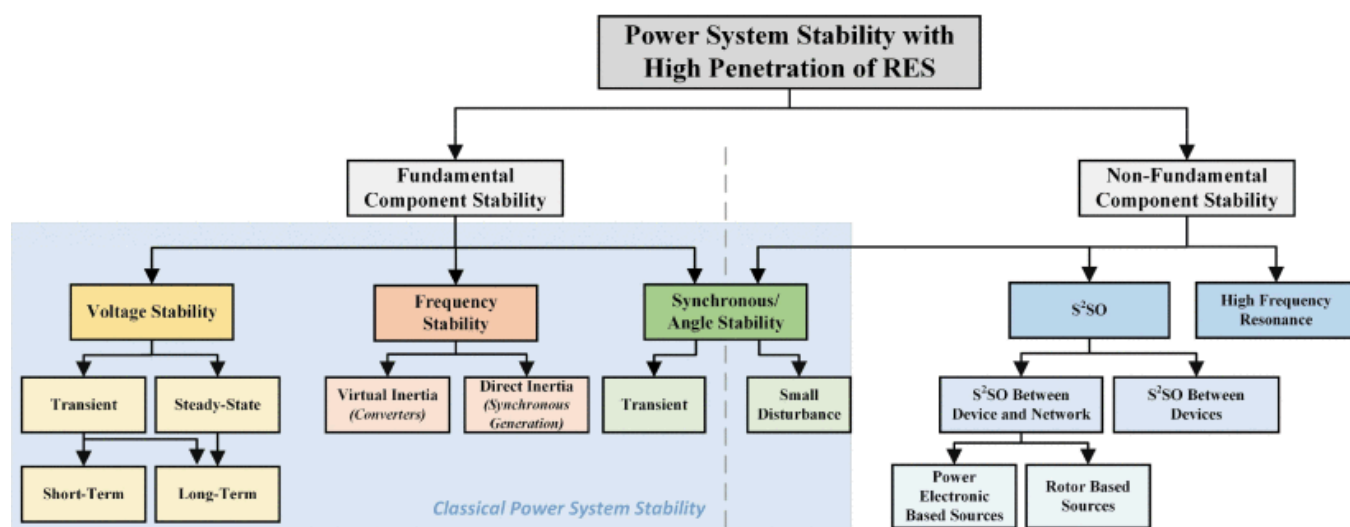


Рисунок 1.2 – Класифікація типів стабільності енергосистеми

Джерело: [8]

Іншим важливим аспектом нефундаментальної стійкості є резонансні явища у високочастотному діапазоні. Вони виникають через особливості роботи інверторів та їхніх систем керування, які можуть створювати умови для формування коливань у межах сотень і навіть тисяч герц. Такі процеси особливо небезпечні в мережах зі слабкою системною міцністю та підвищеним імпедансом, де навіть невеликі зміни параметрів можуть призвести до розвитку високочастотних резонансів. Вони здатні викликати нестабільність роботи перетворювачів, перевантаження обладнання та порушення нормальної роботи системи. Вивчення цих явищ потребує застосування спеціалізованих методів моделювання, що враховують електромагнітні та електронні динамічні процеси [8].

До нефундаментальних компонентів також належить стійкість перетворювачів, яка визначається їхньою здатністю зберігати стабільність внутрішніх контурів керування при змінних режимах роботи системи. Вона охоплює як швидкі процеси, що відбуваються в межах мілісекунд, так і повільні реакції, пов'язані з адаптацією алгоритмів регулювання. У системах із високою частотою ВДЕ саме ця складова часто стає критичною, адже від неї залежить узгодженість роботи великої кількості інверторів, їхня взаємодія з мережею та здатність підтримувати стабільність у разі збурень. Таким чином, нефундаментальні типи стійкості формують новий рівень викликів для системного аналізу, що потребує інтеграції класичних методів дослідження з сучасними підходами до моделювання перетворювальних процесів [1].

Розглянемо в даній роботі виклики, що пов'язані із частотною стабільністю. Зі зростанням частки генерації на основі відновлюваних джерел енергії частотна стійкість системи набуває особливої ваги, оскільки вона безпосередньо визначає здатність енергосистеми протистояти дисбалансам між виробництвом і споживанням. Ключовим індикатором у цьому контексті є швидкість зміни частоти RoCoF, яка відображає початкову реакцію системи на удар. Зменшення інерційного запасу системи призводить до того, що при виникненні дисбалансу початкове значення RoCoF зростає, а час, доступний для спрацьовування первинних засобів регулювання, скорочується. Це означає, що навіть відносно невеликі за величиною події можуть викликати швидкі та значні відхилення частоти, що підвищує ризик переходу системи в критичні режими і ускладнює завдання операторів щодо утримання частоти в допустимих межах [11].

Наслідки підвищеного RoCoF мають як технічний, так і організаційний характер, і їхня комплексність робить проблему особливо гострою для сучасних енергосистем. Технічно це проявляється у підвищеній ймовірності небажаного спрацьовування захистів від втрати генерації або навантаження, зокрема захистів, що реагують на швидку зміну частоти. Такі пристрої часто налаштовані на роботу в умовах більш плавних процесів, характерних для систем із високим рівнем синхронної інерції, тому при різкому стрибку RoCoF вони можуть відключати

обладнання навіть без реальної загрози для системи. Додатково зростає ризик неадекватної роботи традиційних схем автоматичного відключення навантаження, які були розраховані на повільніші зміни частоти й не здатні реагувати достатньо швидко. Це створює небезпеку каскадних аварій, коли одночасне спрацювання кількох захистів призводить до лавиноподібного відключення генераторів або навантажень [8].

Організаційні наслідки не менш значущі. Підвищення RoCoF змушує операторів системи переглядати правила експлуатації та вимоги до витримки частоти в мережевих кодах. Це включає оновлення нормативів щодо допустимих значень RoCoF, адаптацію процедур планування резервів та аварійного реагування, а також розробку нових алгоритмів керування для швидкодіючих засобів підтримки частоти. У багатьох країнах уже ведеться робота над переглядом стандартів, що визначають здатність обладнання витримувати високі темпи зміни частоти, адже без цього інтеграція відновлюваних джерел енергії може поставити під загрозу надійність всієї системи [11].

Для пом'якшення ризиків, пов'язаних із високими значеннями RoCoF, у літературі та практиці пропонуються кілька напрямів дій. По-перше, впровадження швидкодіючих засобів підтримки частоти таких як синхронізуючі інерційні відповіді або віртуальна інерція, що імітує інерційні властивості синхронних машин за допомогою керованих перетворювачів. По-друге, розвиток швидких резервів частоти і алгоритмів форсованого резервування для забезпечення миттєвої реакції на удар. По-третє, модернізація захисних схем і адаптація логіки спрацювання так, щоб уникати необґрунтованих відключень при короткочасних, але швидких коливаннях частоти. Ці технічні заходи повинні супроводжуватися оновленням експлуатаційних процедур і переглядом мережевих кодів з урахуванням нових динамічних характеристик системи [11].

Підсумовуючи, сучасні енергосистеми перебувають у стані трансформації, де класичні уявлення про стійкість доповнюються викликами, пов'язаними зі зниженням синхронної інерції та зростанням частки перетворювальної генерації. Найбільш критичним аспектом постає частотна стійкість, адже саме вона визначає

здатність системи протидіяти дисбалансам та уникати каскадних аварій. Показник RoCoF стає ключовим індикатором, що відображає початкову реакцію системи на збурення та її вразливість до швидких коливань. Подальше дослідження буде сфокусоване на моделюванні сценаріїв генерації й збурень із акцентом на оцінку частотної стабільності та величини RoCoF, що створює основу для розробки методів підтримки надійності в умовах високого проникнення ВДЕ.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМ

2.1. Теоретико-ймовірнісні основи та методологія імітаційного моделювання Монте-Карло

Моделювання за методом Монте-Карло є статистичним підходом, що ґрунтується на багаторазовому випадковій вибірці даних та їх подальшому аналізі. Його сутність полягає у використанні генерації випадкових чисел для імітації можливих сценаріїв функціонування складних систем, коли аналітичне розв'язання задачі є надто складним або неможливим.

У процесі моделювання кожен параметр або вхідний фактор розглядається як випадкова величина з певним розподілом ймовірностей. Для кожної симуляції здійснюється вибір значень цих параметрів відповідно до їхніх розподілів, після чого обчислюються результати моделі. Повторення великої кількості таких симуляцій дозволяє отримати статистичні оцінки шуканих характеристик системи, як-от середні значення, дисперсії, ймовірності настання подій тощо [12, 13].

Історичні витоки моделювання за методом Монте-Карло сягають XVIII століття, коли Жорж-Луї Леклерк, відомий як граф де Бюффон, запропонував експеримент, що надалі буде відомий як «задача Бюффона», для оцінки значення числа π . Суть експерименту полягала у випадковому киданні голки на площину з паралельними лініями та визначенні ймовірності її перетину з лініями. Цей підхід став одним із перших прикладів використання випадкових подій для отримання кількісних результатів. У XIX столітті ідея випадкової вибірки поширювалася у працях таких вчених як лорд Кельвін, який застосовував випадкові вибірки для аналізу кінетичної теорії газів, та Вільям Госсет, котрий використовував карткові

вибірки для розробки критерію Стюдента, що широко використовується наразі для перевірки статистичних гіпотез. Подібні експерименти демонстрували поступове усвідомлення того, що випадковість може служити інструментом для підтвердження теорії та наближення до аналітичних рішень. Водночас у цей період розвивалася теорія ймовірностей та випадкових блукань, що заклала математичні основи для подальшого формування методу Монте-Карло [12].

Систематичне застосування методу розпочалося у XX столітті, коли Енріко Фермі проводив числові експерименти для дослідження взаємодії нейтронів із речовиною, що фактично стало раннім прикладом сучасних розрахунків за методом Монте-Карло. Ключовим етапом розвитку методу стала Друга світова війна та Манхеттенський проєкт, в рамках якого Джон фон Нейман, Станіслав Улям та інші дослідники використали випадкове моделювання для аналізу поведінки нейтронів у процесах ядерного розщеплення. Саме тоді метод отримав свою назву на честь казино Монте-Карло, яке символізувало гру випадку. У післявоєнний період, завдяки розвитку цифрових обчислювальних машин, метод Монте-Карло швидко поширився у фізиці, статистичній механіці, економічному моделюванні та інших галузях. Його застосування дозволило досліджувати системи, що були аналітично непридатними або надто складними для експериментальної перевірки, і водночас сформувало нову парадигму використання випадковості як інструменту для отримання наукового знання [14].

Алгоритм моделювання за методом Монте-Карло передбачає виконання таких кроків:

1. Побудова моделі:

- Формулюється математична або статистична модель системи;
 - а. Визначається залежна змінна як результат моделювання;
 - б. Окреслюються незалежна змінні, як-от вхідні фактори, ризики, параметри.

2. Задання розподілів ймовірностей:

- Для кожної незалежної змінної визначається ймовірнісний розподіл;
 - a. Використовуються історичні дані або експертні оцінки;
 - b. Встановлюються діапазони можливих значень та їхні ваги.

3. Багаторазова вибірка параметрів моделі:

- Здійснюється серія симуляцій із випадковою генерацією значень;
 - a. Для кожної симуляції випадково вибираються значення параметрів;
 - b. Результати накопичуються для формування репрезентативної вибірки;
 - c. Обчислюються статистичні характеристики (середні, дисперсії, ймовірності) [12, 15].

Визначення моделі є ключовим етапом у застосуванні методу Монте-Карло. На цьому етапі дослідник формує абстрактне уявлення про систему, яку необхідно проаналізувати, та окреслює її основні параметри. Модель має відображати суттєві характеристики процесу, що досліджується, і водночас бути достатньо простою для практичної реалізації. Важливим завданням є чітко визначення вихідних змінних, які підлягають оцінюванню, та вхідних факторів, що впливають на їхні значення. Саме від того, наскільки коректно сформульовано модель, залежить можливість отримати валідні результати та зробити обґрунтовані висновки. При цьому необхідно враховувати рівень точності, якого прагне дослідник, адже надмірна деталізація може призвести до значних обчислювальних витрат, тоді як надмірне спрощення здатне знизити достовірність прогнозів [12].

Після визначення структури моделі постає питання про спосіб опису вхідних параметрів. У класичному підході спершу створюється детермінований варіант моделі, що відображає базові значення змінних, а вже потім вводиться стохастичний компонент, який враховує невизначеність та варіативність. Це означає, що кожен параметр розглядається як випадкова величина з певним

розподілом ймовірностей, який може бути встановлений на основі історичних даних або статистичних процедур. Важливо також визначити спосіб перетворення вхідних даних у вихідні результати, адже саме ця трансформація формує основу для подальших симуляцій. Таким чином, етап визначення моделі поєднує концептуальне осмислення системи з формалізацією її параметрів, створюючи підґрунтя для проведення численних випадкових експериментів, що становлять сутність методу Монте-Карло [16].

Незалежні змінні, що піддаються вибірці, можуть бути як неперервними, так і дискретними випадковими величинами, та описуватись різноманітними законами розподілу. Наприклад, зміна може описуватись рівномірним законом розподілу. У випадку неперервних величин, функція розподілу такого закону описується формулою (2.1) [17]:

$$f(x) = \frac{1}{b-a}, \quad (2.1)$$

де $a < x < b$ – незалежна змінна, що лежить в межах (a, b) .

Графік функції розподілу ймовірностей неперервного рівномірного розподілу зображений на рисунку 2.1.

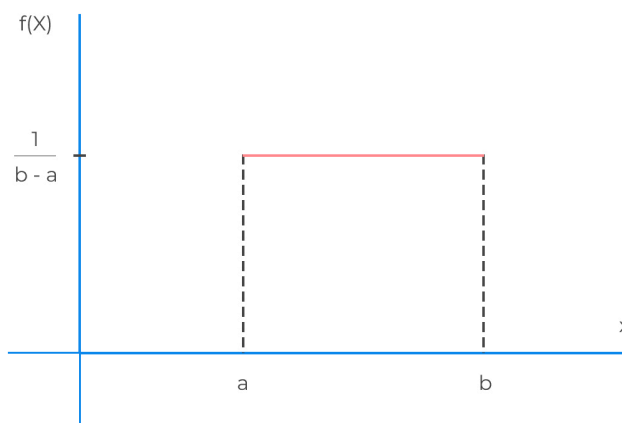


Рисунок 2.1 – Функція розподілу ймовірностей рівномірного розподілу

Джерело: [17]

Неперервні випадкові величини також можуть бути часто описані за допомогою нормального закону розподілу, який ще називають законом розподілу

Гауса. Функція розподілу ймовірностей нормального закону наведена в формулі (2.2) [18]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}x^2}, \quad (2.2)$$

де π – математична константа, округлена величина якої дорівнює 3.14;

e – математична константа, округлена величина якої дорівнює 2.71;

x – незалежна змінна.

Графік функції розподілу нормального закону розподілу за стандартних умов, коли медіана дорівнює 0 та середньоквадратичне відхилення дорівнює 1, зображений на рисунку (2.2).

Standard Normal Distribution ($\mu = 0, \sigma = 1$)

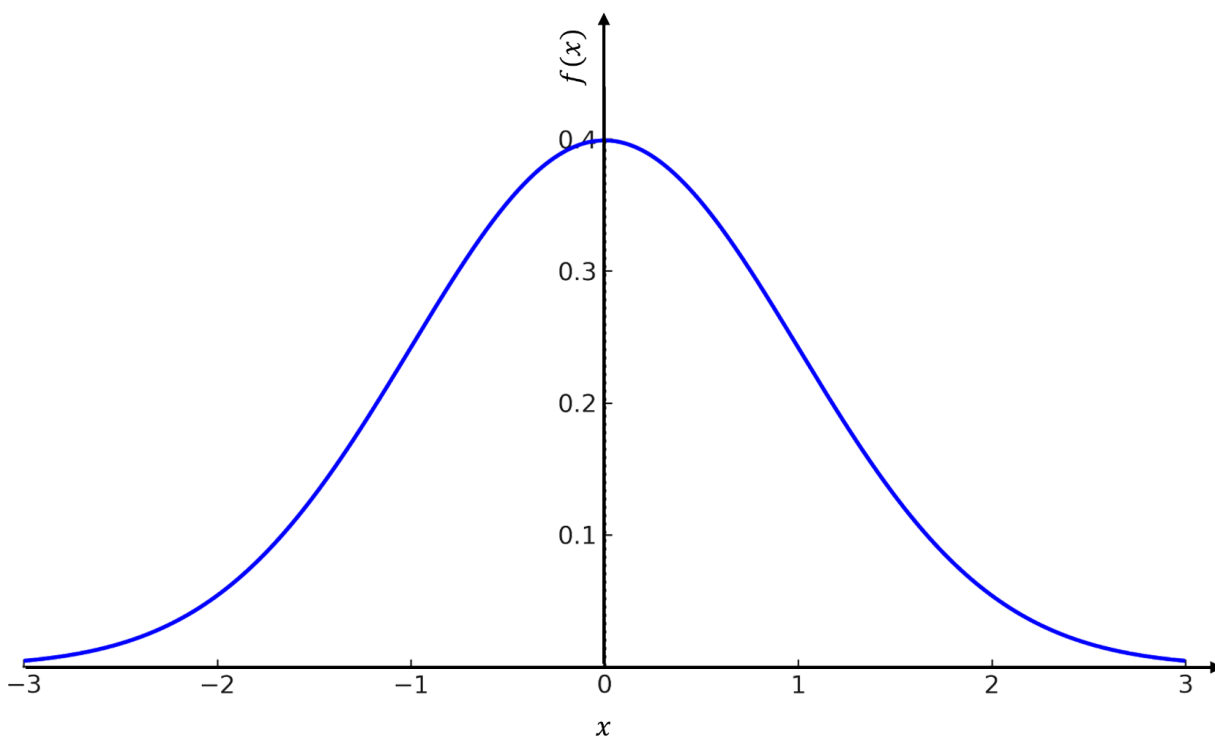


Рисунок 2.2 – Функція розподілу ймовірностей нормального розподілу

Джерело: [18]

Серед дискретних розподілів можна звернути увагу на закон Пуассона. Функція маси ймовірності такого закону наведена в формулі (2.3) [19]:

$$P(X = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}, \quad (2.3)$$

де λ – параметр форми розподілу, що представляю середню кількість досліджуваних подій;

k – значення випадкової дискретної величини X , для якого функція маси розподілу обчислює ймовірність рівності $X = k$.

Графіки функцій маси ймовірності Пуассона за різних значень параметра λ знаведений на рисунку 2.3.

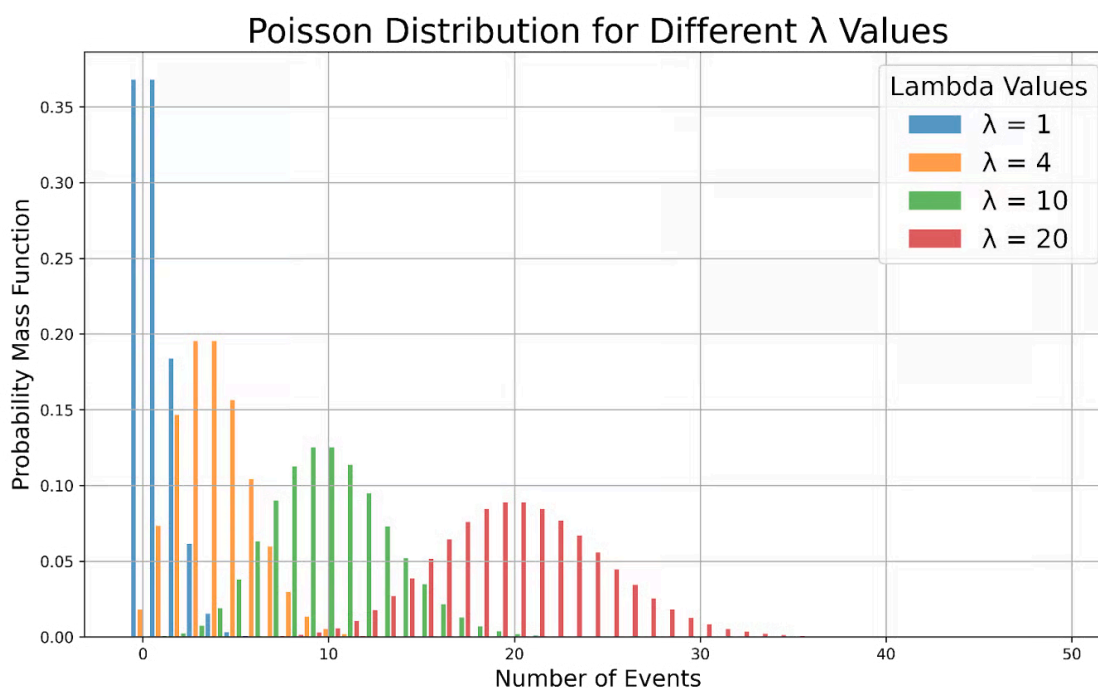


Рисунок 2.2 – Функція маси розподілу Пуассона

Джерело: [19]

Описані вище та інші розподіли використовуються для симуляцій за методом Монте-Карло. Крім того, для симуляцій можуть використовуватись як функції щільності ймовірності та функції маси ймовірності, так і кумулятивні функції. Більш того, для отримання випадкових значень за обраним законом розподілу можна використовувати як графічні інструменти, так і сучасні

програмні засоби [12, 20]. В даному дослідженні буде використаний рівномірний закон для імітації випадкового удару по енергосистемі, що дозволить оцінити, як система зберігає стабільність після ударів випадкової величини за різних конфігурацій генерації.

Закон великих чисел є фундаментальним положенням теорії ймовірностей, яке забезпечує збіжність середніх значень випадкових величин до їх математичного сподівання при зростанні кількості спостережень. У застосуванні методу Монте-Карло це означає, що багаторазове повторення симуляцій із випадковою генерацією параметрів поступово формує статистичні оцінки, які відображають реальні характеристики системи. Зі збільшенням кількості симуляцій випадкові відхилення окремих реалізацій компенсуються, і результати набувають стійкості. Таким чином, закон великих чисел пояснює, чому метод Монте-Карло здатний забезпечувати наближені оцінки навіть у випадках, коли аналітичне розв'язання задачі є надто складним або недосяжним [14].

Центральна гранична теорема доповнює цей підхід, показуючи, що розподіл середніх значень незалежних випадкових величин із довільними законами розподілу за умови достатньо великої кількості спостережень наближається до нормального розподілу. Це положення має ключове значення для методу Монте-Карло, адже воно дозволяє застосовувати апарат нормальної статистики для оцінки похибок та побудови довірчих інтервалів результатів симуляцій. Завдяки центральній граничній теоремі дослідник отримує можливість не лише наближено визначати шукані характеристики системи, але й кількісно оцінювати надійність отриманих результатів. У поєднанні із законом великих чисел вона формує класичну теоретико-ймовірнісну основу, яка забезпечує методологічну обґрунтованість використання методу Монте-Карло у дослідженнях складних процесів [14].

Підсумовуючи, можемо стверджувати, що метод Монте-Карло постає як фундаментальний інструмент стохастичного моделювання, що поєднує теоретико-ймовірнісні засади із практичною методологією численних випадкових експериментів. Його історичний розвиток засвідчив поступове прийняття

науковою спільнотою ролі випадковості як засобу наближення до істини у складних системах. Сучасна методологія передбачає формалізацію моделі, визначення розподілів ймовірностей для вхідних параметрів, багаторазову генерацію випадкових значень та статистичну обробку результатів, що забезпечує отримання валідних оцінок навіть за умов високої невизначеності. Ключову роль у цьому відіграють закон великих чисел і центральна гранична теорема, які гарантують збіжність та нормалізацію результатів симуляцій, дозволяючи досліднику не лише наближено оцінювати характеристики системи, а й кількісно визначати надійність прогнозів. Таким чином, метод Монте-Карло формує універсальну методологічну основу для аналізу стійкості енергосистем з відновлюваними джерелами енергії, забезпечуючи можливість моделювання їхньої поведінки під дією випадкових факторів та створюючи підґрунтя для обґрунтованих висновків щодо їхньої надійності та ефективності.

2.2. Математична модель частотної стійкості енергосистеми: еквівалентна інерція та метрика RoCoF

Частотна стійкість енергосистеми постає як одна з ключових характеристик її динамічної надійності, адже саме вона визначає здатність мережі зберігати узгодженість роботи при раптових збуреннях. У сучасних умовах трансформації енергетики, коли традиційні джерела поступово витісняються відновлюваними, питання адекватного опису механізмів зміни частоти набуває особливої актуальності. Математичне моделювання у цьому контексті виконує роль універсального інструменту, що дозволяє формалізувати взаємозв'язок між структурою генерації та динамікою системи, а також визначати критичні межі її стійкості. Такий підхід створює основу для подальшого аналізу кількісних показників, які характеризують реакцію енергосистеми на дисбаланси та забезпечують обґрунтування вимог до сучасних механізмів регулювання.

Розпочнемо дослідження математичного апарату обраної теми із дослідження інерції, а саме інерційних констант генераторів. Обертові маси генераторів накопичують кінетичну енергію, що може бути описана формулою (2.4) [21]:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} J \omega_r^2, \quad (2.4)$$

де J – момент інерції;

ω_r – номінальна частота обертання.

Проте в енергетиці використовують найчастіше не момент інерції J , а інерційну константу H . Інерційна константа H показує часовий інтервал, протягом якого електричний генератор може видавати свою номінальну потужність, використовуючи лише кінетичну енергію, накопичену в обертових масах. Цю величину можна розрахувати за формулою (2.5) [21]:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_r^2}{S_r}, \quad (2.5)$$

де J – момент інерції;

ω_r – номінальна частота обертання;

S_r – номінальна потужність генератора.

Інерційні константи є важливою складовою складово розрахунку ключової величини для цього дослідження – швидкості зміни частоти струму у випадку аварії. В даному дослідженні інерційні константи будуть розглядатись переважно як табличні величини. Обрані табличні константи відображені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Прийняті інерційні константи

Тип генерації	Інерційна константа Н
Сонячна генерація	0
Вітрова наземна генерація	0
Вітрова морська генерація	0
Генерація з біомаси	3
Газова генерація	5.5

Джерело: [22, 23]

Для використання інерційних констант в розрахунку швидкості зміни частоти коливань струму необхідно перейти до еквівалентної інерційної константи. Це дозволяє згрупувати всі синхронні генератори в одну еквівалентну обертову масу. Формула (2.6) дозволяє розрахувати еквівалентну інерційну константу [21]:

$$H_{eq} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i S_{B,i}}{P_{LOAD}}, \quad (2.6)$$

де H_i – інерційна константа синхронного генератора i ;

$S_{B,i}$ – номінальна потужність синхронного генератора i ;

P_{LOAD} – потужність споживання;

n – сумарна кількість синхронних генераторів в мережі.

Для розрахунку RoCoF також знадобиться формула дисбалансу потужностей, описана в формулі (2.7) [23]:

$$\Delta P_{imbalance} = P_{meh} - P_{elect}, \quad (2.7)$$

де P_{meh} – механічна потужність, що подається від первинного двигуна, потужність споживання;

P_{elect} – номінальна потужність генератора, потужність генерації.

Тоді величину миттєвого значення RoCoF як початкове значення швидкості зміни частоти струму при виникненні дисбалансу в системі до втручання будь-яких заходів управління можемо розрахувати за формулою (2.8) [24]:

$$ROCOF|_{t=0^+} = \frac{\Delta P_{\text{imbalance}}}{P_{\text{LOAD}}} * \frac{f_0}{2H_{eq}}, \quad (2.8)$$

де $\Delta P_{\text{imbalance}}$ – дисбаланс потужностей;

P_{LOAD} – потужність споживання;

f_0 – номінальна частота струму в енергосистемі

H_{eq} – еквівалентна константа інерційності.

Формула (2.8) є основною формулою для розрахунку RoCoF в даній роботі. Номінальну частоту струму приймемо рівною 50 Гц, що є стандартним значенням для Європи, а граничне значення RoCoF, перевищення якого буде сигналізувати про втрату системою стабільності, рівним 2 Гц/с, що є прийнятним рішенням для систем із високою часткою генерації на основі ВЕД [11, 25].

Отже, математична модель частотної стійкості енергосистеми, побудована на поняттях еквівалентної інерції та метрики RoCoF, дозволяє формалізувати критичні аспекти динамічної стійкості мережі та кількісно оцінювати її здатність протидіяти аварійним збуренням. Використання інерційних констант як табличних параметрів і їх агрегування в еквівалентну величину створює основу для узагальненого опису системи, що враховує різноманітність джерел генерації. Формула (2.8) забезпечує практичний інструмент для визначення початкової швидкості зміни частоти при дисбалансі потужностей, а встановлення граничного значення RoCoF у 2 Гц/с для систем із високою часткою ВДЕ окреслює межі безпечної роботи. У сукупності ці положення формують методологічний каркас подальшого аналізу стійкості та визначають вимоги до сучасних механізмів регулювання, що мають компенсувати зниження природної інерції в умовах зростання частки відновлюваних джерел.

2.3. Обґрунтування та порівняльний аналіз програмно-технічних засобів імітаційного моделювання

У сучасних дослідженнях стійкості енергосистем із високим рівнем проникнення відновлюваних джерел енергії програмно-технічні засоби імітаційного моделювання розглядаються як важливий елемент методологічного забезпечення. Їхня роль полягає не лише у відтворенні складних процесів генерації та споживання, але й у створенні умов для системного аналізу стохастичних факторів, що визначають поведінку енергосистеми. Висока варіативність виробітку сонячної та вітрової генерації, а також необхідність балансування навантаження в умовах невизначеності потребують інструментарію, здатного обробляти великі масиви даних, підтримувати паралельні обчислення та забезпечувати можливість алгоритмізації специфічних сценаріїв. Як зазначається в сучасних роботах, ефективність моделювання стійкості енергосистем значною мірою залежить від здатності програмного забезпечення інтегрувати статистичні та стохастичні методи у процес аналізу, що дозволяє враховувати багаторівневі невизначеності та підвищувати точність прогнозів [26].

З позиції системного аналізу вимоги до інструментів імітаційного моделювання можна сформулювати як багатовимірні. По-перше, необхідна підтримка роботи з великими історичними датасетами, що включають дані споживання та генерації відновлюваних джерел енергії. По-друге, важливою є можливість реалізації стохастичних методів, зокрема паралелізації обчислень для великої кількості ітерацій Монте-Карло, що забезпечує статистичну достовірність результатів. По-третє, інструментарій має бути гнучким у частині алгоритмізації, дозволяючи досліднику самостійно програмувати специфічні правила балансування ринку чи мережі та розраховувати метрики стійкості, такі як Rate of Change of Frequency (RoCoF). Порівняльний аналіз програмних платформ показує, що найбільш придатними для таких завдань є середовища, які поєднують

високопродуктивні обчислювальні можливості з відкритістю до модифікацій та інтеграції користувацьких алгоритмів [27].

Визначення критеріїв є вагомим завданням для порівняльного аналізу. Коректно задані критерії дозволяють об'єктивно оцінити придатність інструментів для роботи з великими масивами даних та стохастичними процедурами. Можемо обрати такі критерії:

- Ефективність роботи з часовими рядами, що визначається здатністю програмного середовища здійснювати швидке завантаження, попередню обробку та агрегування даних, що є критично важливим для моделювання енергетичних процесів у реальному часі.
- Швидкість виконання ітераційних обчислень, зокрема методів Монте-Карло, яка безпосередньо впливає на можливість проведення багатосценарного аналізу та отримання статистично значущих результатів.
- Гнучкість налаштування алгоритмів збурень та розрахунку динамічних параметрів, таких як RoCoF, забезпечує адаптацію моделі до різних умов функціонування енергосистеми.
- Відкритість коду та наявність API створюють передумови для інтеграції з іншими аналітичними платформами та розширення функціоналу, що особливо підкреслюється у сучасних оглядах інструментів моделювання енергетичних систем.
- Поріг входження, який визначається доступністю документації, навчальних матеріалів та підтримкою наукової спільноти, адже саме активна екосистема користувачів сприяє швидкому вирішенню прикладних завдань та розвитку методології.

Сукупність зазначених критеріїв дозволить здійснити системний вибір оптимального програмного забезпечення для стохастичного моделювання стійкості енергосистем.

У сучасних дослідженнях виділяють три основні класи програмних засобів для моделювання енергосистем, кожен з яких має своє призначення та набір

характеристик, що визначають їхню придатність для стохастичного аналізу. Це спеціалізоване комерційне програмне забезпечення, універсальні математичні середовища та відкриті екосистеми програмування. Такий поділ дозволяє здійснити порівняльний аналіз і визначити оптимальну комбінацію інструментів для задач моделювання стійкості енергосистем із застосуванням методів Монте-Карло.

Спеціалізовані комерційні пакети, такі як DIgSILENT PowerFactory, PSS E та ETAP, орієнтовані на професійне моделювання перехідних процесів і розрахунків потокорозподілу. Їхньою перевагою є наявність великої бібліотеки валідаваних моделей обладнання та інструментів для аналізу складних мереж. Проте для задач, що передбачають масові стохастичні експерименти, вони мають суттєві обмеження. Закрита архітектура ускладнює інтеграцію нетипових сценаріїв, ліцензії є дорогими, а можливості попередньої обробки сирих часових рядів залишаються обмеженими. Тому такі пакети доцільно застосовувати переважно для верифікації окремих сценаріїв та отримання точних динамічних відповідей [28, 29, 30].

Універсальні математичні середовища, зокрема MATLAB з Simulink та Simscape Power Systems, забезпечують широкий спектр інструментів для моделювання динамічних систем. Вони зручні для побудови складних моделей, мають засоби для оптимізації та валідації результатів. Водночас їх використання для масових ітерацій Монте-Карло супроводжується значними обчислювальними витратами. Робота з великими матрицями у циклах потребує значних ресурсів оперативної пам'яті та процесора, а також ліцензій для масштабування на кластери. Тому MATLAB є ефективним інструментом для детальної симуляції окремих випадків, але не завжди оптимальним для великомасштабної стохастичної обробки даних [31, 32].

Екосистеми програмування з відкритим кодом, такі як Python, Julia та R, орієнтовані на обробку даних, статистичний аналіз і стохастичне моделювання. Їхні переваги полягають у гнучкості, наявності потужних бібліотек для роботи з часовими рядами та паралельних обчислень, а також у відсутності ліцензійних

витрат. Саме ці інструменти найбільш придатні для підготовки датасетів, балансування генерації та споживання, а також для виконання великої кількості ітерацій Монте-Карло. Результати критичних сценаріїв, отримані у відкритих середовищах, можуть додатково перевірятися у комерційних пакетах або MATLAB для підтвердження динамічної коректності [33, 34]. Результат порівняльного аналізу відобразимо в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз програмно-технічних засобів імітаційного моделювання

Критерій порівняння	Спеціалізоване ПЗ (напр. DIgSILENT)	Математичні пакети (MATLAB)	Мови програмування (Python)
Обробка Big Data: - Ефективність роботи з часовими рядами	Обмежена, потрібні сторонні конвертери	Висока, вбудовані матричні операції	Еталонна, екосистема Pandas/NumPy
Реалізація Монте-Карло: - Гнучкість налаштування алгоритмів збурень та розрахунку динамічних параметрів - Швидкість виконання стохастичних обчислень	Складна, потребує написання скриптів на DPL/Python API	Середня, високі затрати пам'яті на ітераціях	Висока, проста паралелізація, оптимізовані цикли
Кастомізація розрахунку RoCoF: - Відкритість коду та можливості інтеграції	Жорстко задані фізичні моделі генераторів	Потребує побудови складних структурних схем	Пряме математичне кодування формули за сценаріями
Поріг входження та доступність	Високий поріг. Вимагає глибоких знань специфічного інтерфейсу ПЗ та комерційної ліцензії. Спільнота розробників замкнена, документація обмежена вендором.	Середній поріг. Потребує вивчення синтаксису MATLAB та логіки Simulink. Ліцензія є платною, що обмежує гнучкість розгортання моделі поза академічним середовищем.	Низький/Середній поріг. Має максимально читаємий синтаксис. Величезна open-source спільнота, мільйони готових рішень та документації. Повністю безкоштовний (Open-source).

Джерело: [28-34]

Таким чином, у практичній частині роботи оптимальним рішенням є використання Python у поєднанні з бібліотеками pandas та numpy, оскільки воно забезпечує гнучкість у підготовці та обробці великих масивів даних, дозволяє ефективно балансувати генерацію і споживання, а також реалізовувати масові ітерації методу Монте-Карло. Такий підхід є економічно доцільним завдяки відсутності ліцензійних витрат і водночас відповідає вимогам системного аналізу та дослідження стійкості енергосистем, адже поєднує точність обчислень, масштабованість та практичну зручність реалізації всіх завдань дослідження в одному середовищі.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМ

3.1. Алгоритмічне забезпечення та архітектура моделі Монте-Карло

Розглянемо структуру програмної реалізації моделі Монте-Карло, що формує основу практичної частини дослідження, спрямованої на оцінку стійкості енергосистеми з високою часткою відновлюваних джерел. Модель реалізує експериментальний цикл, що дозволяє відтворювати випадкові збурення та аналізувати їхній вплив на динаміку частоти. Як зазначається в актуальних дослідженнях, методи Монте-Карло є ефективним інструментом для моделювання стохастичних процесів у складних енергетичних системах [35].

План експерименту побудований на послідовному виконанні кількох етапів. Розглянемо більш детально ці етапи:

1. Формування вибірки часових зрізів споживання та генерації, що забезпечує репрезентативність даних.
2. Випадкова вибірка з фіксованою ініціалізацією генератора за допомогою методу `numpy.seed()`, що гарантує відтворюваність результатів [36].
3. Балансування генерації до рівня споживання
4. Генерація для кожного елемента вибірки випадкового збурення ΔP у межах від 5 до 30 % від навантаження за рівномірним законом розподілу за допомогою методу `numpy.random.uniform()` [20].
5. Розрахунок еквівалентної інерції та показника RoCoF, який використовується як ключовий критерій оцінки стійкості системи.

Розглянемо алгоритмічну реалізацію математичного ядра, його архітектури та способів організації обчислень. В програмній реалізації вдалось застосувати векторизацію та функціональний підхід, що дозволило ефективно працювати з великими часовими рядами даних [37].

Усі ключові розрахунки виконуються через серії та датафрейми, що забезпечує паралельну обробку значних обсягів даних без необхідності ручного циклу. Це особливо важливо для моделювання Монте-Карло, де кількість ітерацій сягає десятків тисяч. Векторизація дозволяє зменшити обчислювальні витрати та підвищити точність статистичних оцінок, оскільки операції виконуються одночасно над усіма елементами вибірки [37].

Функціональний підхід реалізовано через окремі функції, що відповідають за різні аспекти моделі. Наприклад, функція `equivalent_inertia` виконує розрахунок еквівалентної інерції системи на основі інерційних констант та номінальних потужностей генераторів. Це дозволяє відокремити математичну логіку від основного коду експерименту та забезпечити повторне використання алгоритму в різних сценаріях. Функція `calc_diff` відповідає за обробку крайніх випадків, коли генерація не покриває навантаження, і визначає величину дефіциту, що має бути компенсована газовими установками. Додатково функція `additional_balance` виконує балансування системи у випадках перевиробництва, масштабуючи генерацію до рівня споживання. Така модульність підвищує прозорість моделі та дозволяє легко змінювати параметри без втручання в основний код.

Для аналізу було сформовано три сценарії, які відображають різні конфігурації генерації, що відображені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Сценарії генерації

Сценарій	Характеристика	Особливості
Сценарій 1 (базовий)	Використовуються лише сонячна та морська вітрова генерації	Біомаса та наземна вітрова генерація відсутні; дефіцит покривається газовими установками
Сценарій 2 (інтеграція всіх ВДЕ)	Залучаються всі досліджувані типи відновлювальних джерел	Балансування здійснюється без масштабування; відображає змодельований стан системи на основі повної вибірки даних
Сценарій 3 (масштабування потужностей)	Частки ВДЕ штучно збільшуються	Застосовується додаткове балансування; оцінюється вплив суттєвого зростання частки ВДЕ на RoCoF

Джерело: розроблено автором

Застосування цих сценаріїв дозволяє дослідити як базові умови функціонування системи, так і перспективні конфігурації з підвищеною часткою відновлюваних джерел. Порівняльний аналіз в актуальних дослідженнях показує, що збільшення частки ВДЕ призводить до зниження еквівалентної інерції та зростання частоти критичних випадків RoCoF, що підтверджує висновки сучасних досліджень про необхідність додаткових механізмів підтримки частотної стійкості [38]. Загальний опис структури програми зазначимо в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Структура розробленої програми

Етап	Мета	Задіяні програмні компоненти	Отримані програмні компоненти
1. Зчитування даних	Інтеграція даних в код програми	generation_data_processing(), get_country_dfs()	monthly_hourly_load_df, monthly_hourly_load_cntrs, power_generation_cntrs
2. Підготовка даних	Обробка даних для подальшого аналізу	generation_data_processing(), get_country_dfs(), categorize_time(), to_seconds()	monthly_hourly_load_df, monthly_hourly_load_cntrs, power_generation_cntrs
3. Об'єднання даних генерації та споживання	Формування основного набору даних для моделювання	pd.merge_asof()	generation_load_cntrs, generation_load_df
4. Розрахунок RoCoF			rocof_df, rocof_cntrs

Продовження таблиці 3.1

4.1 Вибірка із повторенням з основного набору даних	Формування вибірки випадкових станів енергосистеми із повторенням	pd.DataFrame.sample(replace=True)	sample_df
4.2 Додавання випадкового параметру ΔP	Моделювання випадкового удару в енергосистемі	np.random.uniform()	sample_df['Delta P']
4.3 Розрахунок серії constant_numerator	Обчислення сталої частину формули RoCoF	sample_df['Delta P'], sample_df['P Load'], electrical_grid_frequency	constant_numerator
4.4 Генерація додаткових серій, датафреймів, їх обробка	Підготовка компонентів для обчислення RoCoF	cols_to_sum, additional_balance(), calc_diff()	Серії fossil_gas_scenario, new_generation,
4.5 Генерація серій equivalent_inertia_system	Обчислення еквівалентної сталої інерції	equivalent_inertia()	Серії equivalent_inertia_system
4.6 Розрахунок атрибутів ROCOF	Обчислення величини RoCoF за різних сценаріїв	constant_numerator, equivalent_inertia_system	Колонки ROCOF
5. Розрахунок атрибутів critical_rocof та Critical ROCOF Percent	Обчислення базових метрик на основі RoCoF	critical_rocof_count_percent	Колонки Critical ROCOF Percent та Critical ROCOF Increase
6. Графічний аналіз результатів моделювання		format_func(), plot_rocof_distribution(), plot_vulnerability_heatmap(), plot_correlation_rocof_res(), plot_risk_profile_from_agg()	Графіки
7. Графічний розвідковий аналіз досліджуваної генерації		generation_types_analysis(), plot_smoothed_solar(),	Графіки, solar_gen_df, solar_gen_daily_df

Джерело: розроблено автором

Підіб'ємо підсумок, що архітектура моделі Монте-Карло забезпечує комплексне відтворення стохастичних процесів у енергосистемі та дозволяє кількісно оцінити ризики втрати стійкості при різних сценаріях розвитку генераційного портфеля. Додатково варто відзначити, що модульна структура алгоритму та застосування векторизації підвищують ефективність обчислень і точність статистичних оцінок, а використання кількох сценаріїв створює основу для аналізу впливу зростання частки ВДЕ на показники стійкості системи.

3.2. Підготовка даних та експлораторний аналіз поточного стану енергосистем Нідерландів та Португалії

Базою для дослідження стали дані з платформи ENTSO-E Transparency Platform, а саме агрегований датасет Monthly Hourly Load Values для навантаження та спеціалізовані на країнах набори даних, що містять значення по різних типах генерації з інтервалом 15-60 хвилин. Організація ENTSO-E є об'єднанням операторів системи передачі електроенергії з усіх країн Європейського Союзу та низки сусідніх держав. Організація виконує ключову роль у забезпеченні прозорості та координації роботи енергетичних ринків, формуючи стандартизовані підходи до збору та публікації даних. Сервіс Transparency Platform, створений ENTSO-E, функціонує як централізований портал для відкритого доступу до інформації про генерацію, споживання, балансування та міждержавні перетоки електроенергії. Він забезпечує дослідників, регуляторів та учасників ринку актуальними даними з високою часовою роздільністю, що дозволяє аналізувати стійкість системи та прогнозувати ризики [39]. Важливість платформи полягає у тому, що вона створює єдине джерело достовірної та уніфікованої інформації для всієї Європи, сприяючи розвитку інтегрованого енергетичного ринку та підтримці переходу до відновлюваних джерел енергії.

Процес підготовки даних для дослідження був спрямований на забезпечення їхньої узгодженості та придатності для подальшого моделювання. Основні операції включали коректування типів даних, фільтрацію рядків відповідно до кодів країн, а також перейменування та перестановку колонок для досягнення більшої прозорості й стандартизації структури. Важливим етапом стало створення нових колонок для подальшого графічного аналізу. Для реалізації цих завдань були застосовані розроблені функції `get_country_dfs()`, яка формує та обробляє зрізи даних по окремих країнах, та `generation_data_processing()`, що виконує зчитування, трансформацію та підготовку даних генерації обраних для аналізу країн. Додатково використовувалися допоміжні функції `categorize_time()`

для класифікації добових інтервалів та `to_seconds()` для перетворення часових міток у числовий формат, що спрощує побудову теплових карт та інших інструментів аналізу.

Особливе значення в процесі обробки мало застосування методу `merge_asof()` бібліотеки `Pandas`, яка забезпечує коректне вирівнювання записів генерації та навантаження за часовими мітками `End Date`. Використання цього методу дозволяє зіставляти дані з різною часовою роздільністю та уникати втрати інформації при інтеграції джерел [40]. Такий підхід є критично важливим для досліджень стійкості енергосистем, оскільки він гарантує узгодженість часових інтервалів і створює основу для подальшого стохастичного моделювання. В результаті сформовано єдиний узгоджений масив даних, який відображає як профілі навантаження, так і структуру генерації з відновлюваних джерел енергії, що дозволяє здійснювати комплексний аналіз та оцінювати потенційні ризики втрати стійкості енергосистеми.

Для аналізу були обрані такі країни Європи як Нідерланди і Португалія. Ці країни були обрані для дослідження стійкості енергосистем не випадково, адже обидві країни мають схожий профіль генерації на основі відновлюваних джерел енергії, що включає біомасу, сонячну енергію, наземну та морську вітрову генерацію. Водночас їхні географічні та кліматичні умови формують різні акценти у структурі виробництва. Нідерланди, завдяки доступу до Північного моря та стабільним вітровим потокам, активно розвивають наземну вітрову енергетику, яка вже становить значну частку у виробництві електроенергії. Сонячна генерація також зростає, хоча клімат країни з відносно невеликою кількістю сонячних днів накладає певні обмеження. Висока щільність населення та розвинена інфраструктура створюють додаткові виклики для інтеграції ВДЕ, зокрема у сфері балансування та модернізації мережі. Португалія, навпаки, має середземноморський клімат із високою інсоляцією, що робить сонячну генерацію особливо перспективною, а гірський рельєф і річкова мережа забезпечують значний потенціал для гідроенергетики, яка традиційно відіграє ключову роль у структурі виробництва. Вітрова енергетика також активно розвивається, особливо

у прибережних регіонах, де умови сприятливі для стабільної генерації. Соціально-економічні фактори в обох країнах підсилюють цей розвиток: у Нідерландах – через прагнення зменшити залежність від газу та відповідати європейським кліматичним цілям, у Португалії – через державну підтримку програм декарбонізації та інвестиції у ВДЕ. Таким чином, вибір саме цих країн дозволяє дослідити різні моделі переходу до чистої енергетики в умовах схожої структури джерел, але різних кліматичних і соціально-економічних контекстів, що робить аналіз більш репрезентативним і корисним для порівняння [41, 42].

В рамках графічного аналізу співставимо загальні метрики Нідерландів та Португалії досліджуваних типів генерацій, а саме медіанні значення та пікові генерації, а також більш детально розглянемо динаміку сонячної генерації в кожній країні. Порівняння медіанних значень розглянемо на рисунку 3.1.

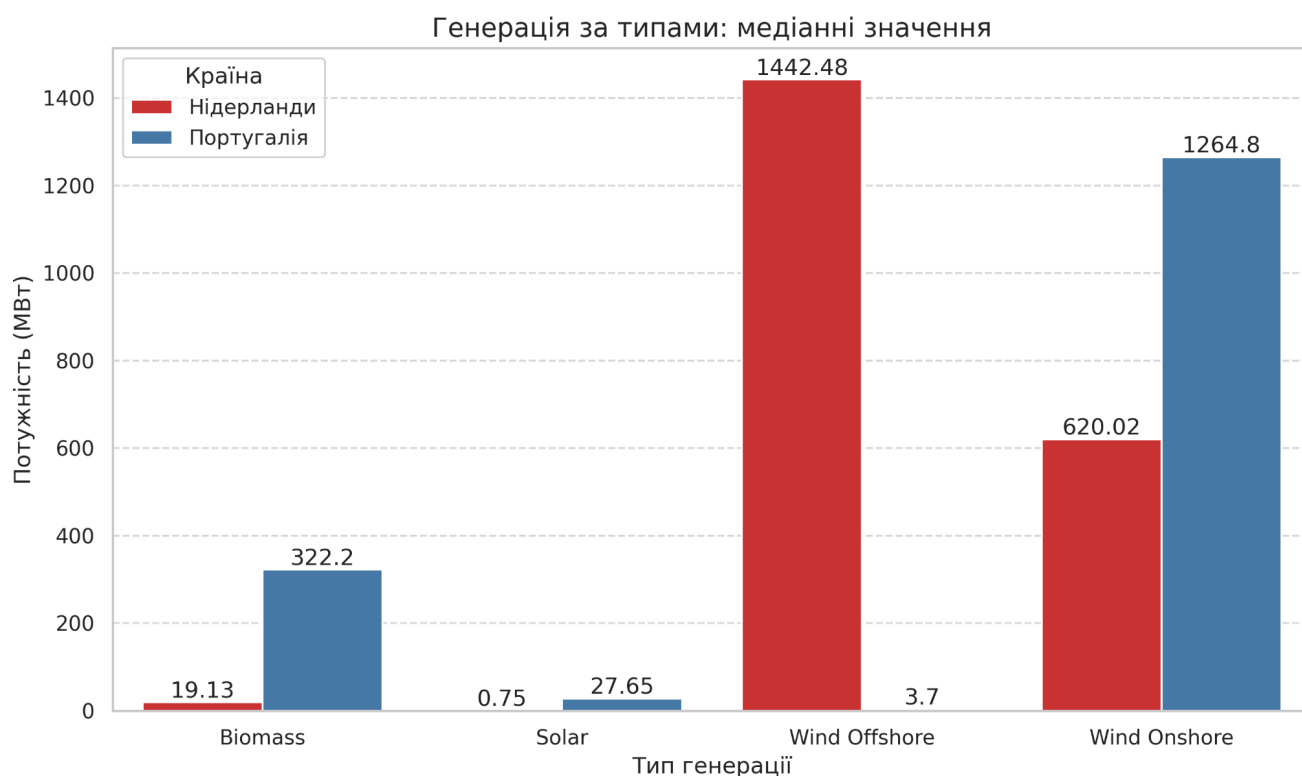


Рисунок 3.1 – Медіанні значення генерацій на основі ВДЕ

Джерело: розроблено автором на основі [43, 44]

Зробімо висновок, що за медіанними значеннями у досліджуваному наборі даних Португалія лідирує за сонячно генерацією, наземною вітровою, а також генерацією на основі біомаси. Нідерланди відповідно лідирують за морською

вітровою генерацією. Врахуємо, що в сонячній генерації досить багато нульових значень або відносно низьких, що впливає на величину медіани. Розглянемо максимальні значення для кращої характеристики генерацій досліджуваних країн. Відповідний порівняльний графічний аналіз виконаємо за допомогою рисунку 3.2.

Аналізуючи пікові генерації бачимо, що Португалія втрачає лідерську позицію в генерації на основі біомаси, проте зберігає позиції в сонячній та наземній вітровій генерації. Нідерланди лишаються лідерами в морській вітровій генерації. Крім того, звернемо увагу, наскільки змінились величини сонячної генерації, що підтверджує вплив нульових та низьких значень на медіанні значення кожної країни.

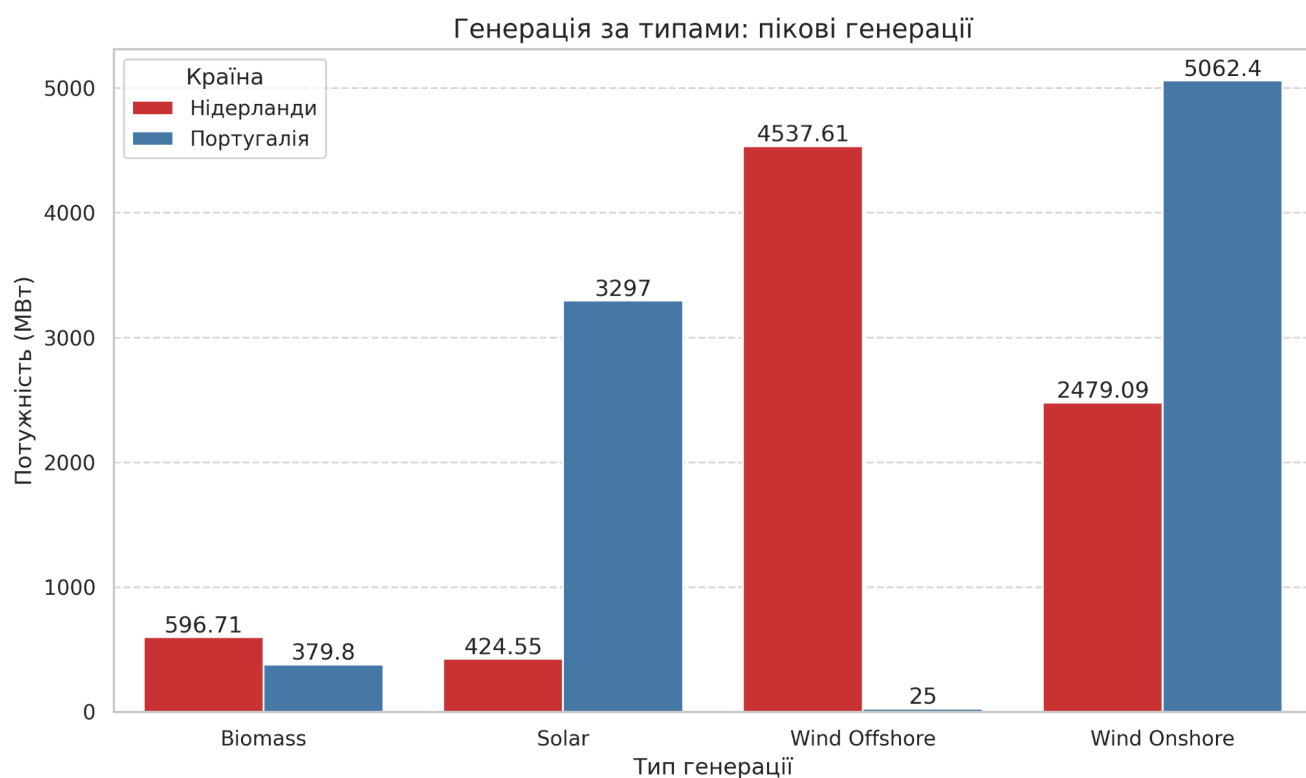


Рисунок 3.2 – Пікові значення генерацій на основі ВДЕ

Джерело: розроблено автором на основі [43, 44]

Для аналізу сонячної генерації розділимо дані на категорії, а саме виділимо ранок, день та вечір. Також додамо семиденне ковзне середнє для кращого аналізу динаміки досліджуваної генерації. Графічний аналіз Нідерландів розглянемо на рисунку 3.3.

Досліджуючи сонячну генерацію Нідерландів, бачимо, що основна частина генерації припадає ранок та день. Також можна відстежити пряму пропорційність між сонячною генерацією та тривалістю світлового дня, коли генерація росте із зими до літа, а далі спадає при наближенні до осені та зими. Також можемо звернути увагу, що динаміка ранкової генерації є досить часто подібною до динаміки денної генерації. Аналіз сонячної генерації Португалії розглянемо на рисунку 3.4.

Динаміка сонячної генерації Португалії має аналогічні властивості, що й відповідна залежність Нідерландів. Явно зберігається пряма пропорційність генерації та тривалості світлового дня, а також зберігається домінування денної та ранкової генерацій.



Рисунок 3.3 – Динаміка сонячної генерації Нідерландів

Джерело: розроблено автором на основі [43, 44]

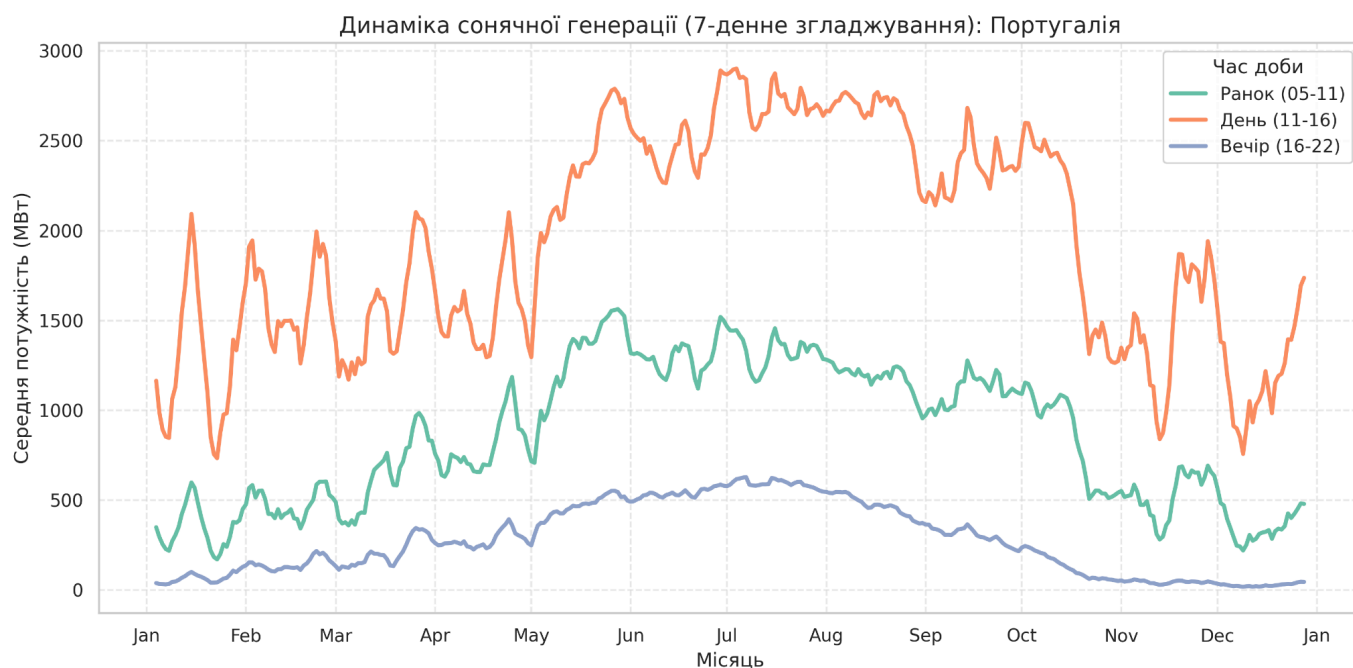


Рисунок 3.4 – Динаміка сонячної генерації Португалії

Джерело: розроблено автором на основі [43, 44]

Крім того, присутня аналогічна подібність ранкової та денної генерацій. Проте динаміка Португалії має свої особливості. По-перше, бачимо слабші просідання в зимні та осінні періоди, що дає більш стабільну генерацію, що в свою чергу визначає більші величини розглянутих вище метрик. По-друге, присутні досить цікаві локальні пікові значення в листопаді та січні. Також, крім слабших просідань, динаміка Португалії загалом має більш плавний характер із меншою частотою та амплітудою коливань, порівнюючи із Нідерландами. Виявлені особливості динаміки можуть частково пояснювати лідерство Португалії у галузі сонячної генерації.

Узагальнюючи результати підготовки та розвідкового аналізу даних, можна стверджувати, що сформований узгоджений масив інформації з ENTSO-E Transparency Platform забезпечує надійну основу для подальшого стохастичного моделювання стійкості енергосистем Нідерландів та Португалії. Виконані процедури очищення, трансформації та інтеграції даних дозволили досягти високої узгодженості часових інтервалів та структурної стандартизації, що є критично важливим для коректного порівняння профілів генерації та навантаження. Проведений графічний аналіз виявив відмінності у динаміці

сонячної та вітрової генерації, які зумовлені кліматичними та соціально-економічними чинниками, а також підтвердив репрезентативність вибору країн для дослідження різних моделей переходу до відновлюваної енергетики. Таким чином, отримані результати створюють методологічно обґрунтовану базу для подальшої оцінки ризиків втрати стійкості та розробки сценаріїв розвитку енергосистем у контексті зростання частки ВДЕ.

3.3. Моделювання методом Монте-Карло та графічний аналіз ризиків втрати стійкості

Моделювання методом Монте-Карло у даному дослідженні починається з формування вибірки на основі об'єднаного датасету споживання та генерації. Оскільки використовується параметр `replace=True` методу `sample()` бібліотеки Pandas [45], розмір вибірки перевищує обсяг вихідного масиву даних. У моделі вводиться випадковий удар ΔP , який інтерпретується як аварійна ситуація в діапазоні 5-30% від навантаження. Для цього використовується рівномірний закон розподілу, що забезпечує рівноймовірність виникнення збурення будь-якої величини в заданому інтервалі [20]. Такий підхід дає змогу дослідити чутливість системи до різних масштабів аварійних подій у випадкові моменти часу та оцінити ризики втрати стійкості.

Логіка розрахунку RoCoF базується на послідовному врахуванні інерційних властивостей генераторів та балансуванні системи. Спершу задаються ненульові сталі інерції для окремих типів генерації, що дозволяє врахувати фізичні характеристики обладнання та їхню здатність протистояти коливанням частоти. Далі розраховується частина формули швидкості зміни частоти, яка не залежить від сценарію, та зберігається у вигляді допоміжної серії `constant_numerator`. Для третього сценарію формується допоміжний датафрейм зі збільшеною генерацією відновлюваних джерел, після чого проводиться додаткове балансування, щоб

сумарна генерація не перевищувала споживання. У випадках дефіциту додається балансуєча газова генерація, яка вводиться у вигляді допоміжних серій, що дозволяє відновити рівновагу між виробництвом та навантаженням. На основі цих даних обчислюється еквівалентна стала інерції для кожного сценарію, що дає змогу оцінити здатність системи протистояти швидким змінам частоти. Така методика дозволяє порівняти різні конфігурації генерації та визначити, наскільки збільшення частки ВДЕ знижує інерційний запас системи. В результаті RoCoF виступає інтегральним показником, який відображає не лише миттєву реакцію системи на аварійні події, але й її довгострокову стійкість у контексті переходу до відновлюваної енергетики.

Виконаємо графічний аналіз результатів моделювання, що дозволить наочно оцінити розподіл RoCoF, визначити критичні зони та побудувати карти вразливості системи. Графічні інструменти дають досліднику змогу виявити часові інтервали та діапазони збурень, у яких ймовірність втрати стійкості є найбільшою, а також простежити кореляцію між часткою ВДЕ та рівнем ризику. Це створює основу для інтерпретації результатів, формування висновків щодо впливу різних сценаріїв генерації та розробки рекомендацій для підвищення надійності енергосистеми в умовах зростаючої ролі відновлюваних джерел. Спершу проаналізуємо відсоток перевищення критичного значення RoCoF, а саме 2 Гц/с, за досліджуваних сценаріїв. Такий графічний аналіз наведений на рисунку 3.5.

Бачимо, що в кожній країні третій сценарій масштабування генерацій на основі ВДЕ характеризується суттєвим зростанням ризиків втрати стійкості до 19.2% та 52.6% в Нідерландах та Португалії відповідно. Для Португалії ризики втрати стабільності за сценарію інтеграції всіх досліджуваних генерацій на основі ВДЕ зростають більше, ніж за відповідного сценарію для Нідерландів. Найбільш ймовірно, що така ситуація обумовлена вищою генерацією на основі ВДЕ. У випадку Нідерландів перший сценарій введення обмеженої кількості генерацій на основі ВДЕ показує нульовий відсоток порушення критичного значення RoCoF, що говорить про високу стабільність такої конфігурації. Розглянемо розподіл

обчислених значень RoCoF для різних сценаріїв. Розподіл значень для даних Нідерландів наведений на рисунку 3.6.

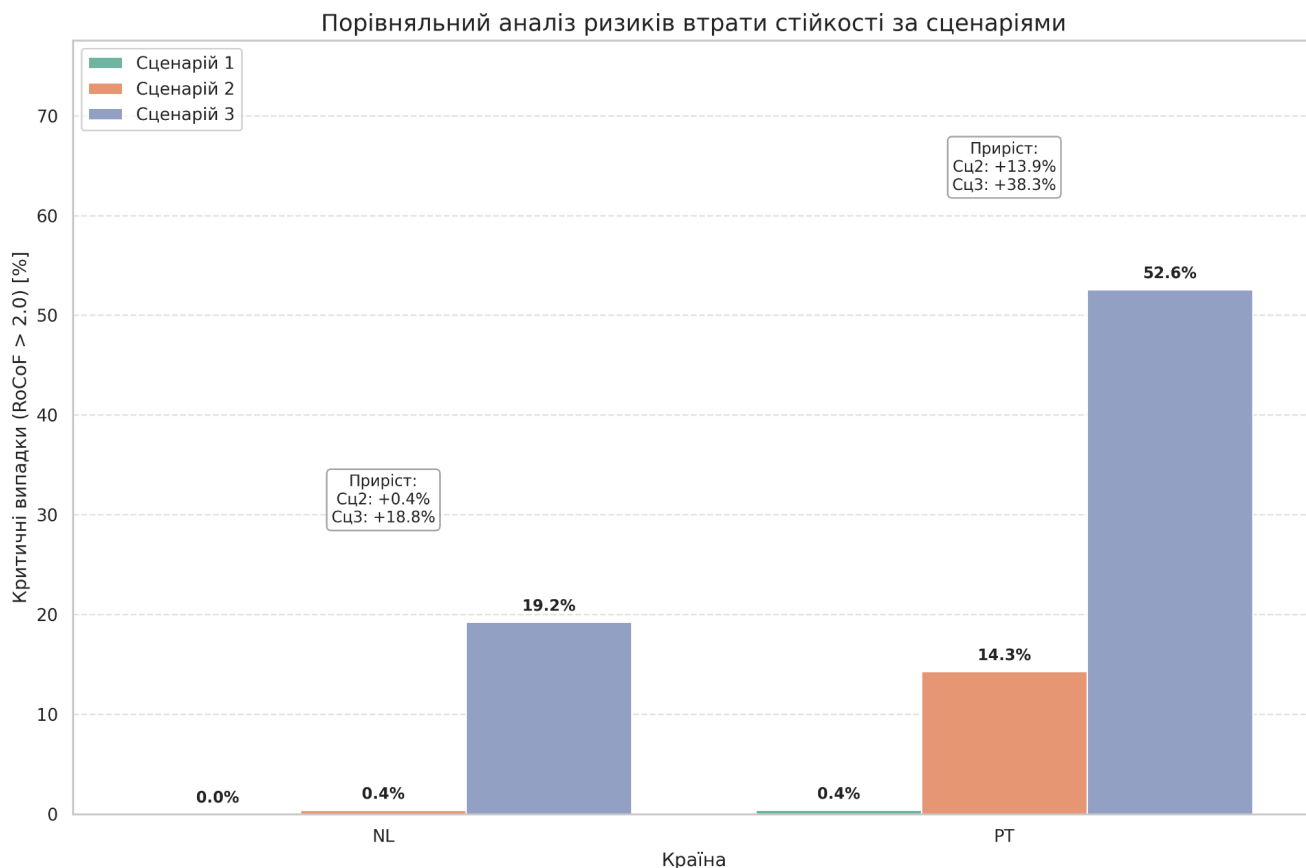


Рисунок 3.5 – Порівняльний аналіз ризиків втрати стійкості за досліджуваних сценарії

Джерело: розроблено автором на основі [43, 44, 46]

Розподіл значень RoCoF для Нідерландів узгоджується із результатами порівняльного аналізу ризиків втрати стійкості, що наведений вище. Бачимо, як зі зростанням частки генерації на основі ВДЕ розподіл значень RoCoF наближається до критичного значення. Також підтверджується нульова кількість випадків перевищення критичного значення в першому сценарії. Розподіл значень RoCoF в третьому сценарії є досить асиметричним через невисоку кількість значень RoCoF, що перевищують 10 Гц/с. Розподіли першого та другого сценаріїв обох країн візуально подібні на розподіл Гауса [47]. Графічний аналіз розподілу значень RoCoF Португалії наведений на рисунку 3.7.

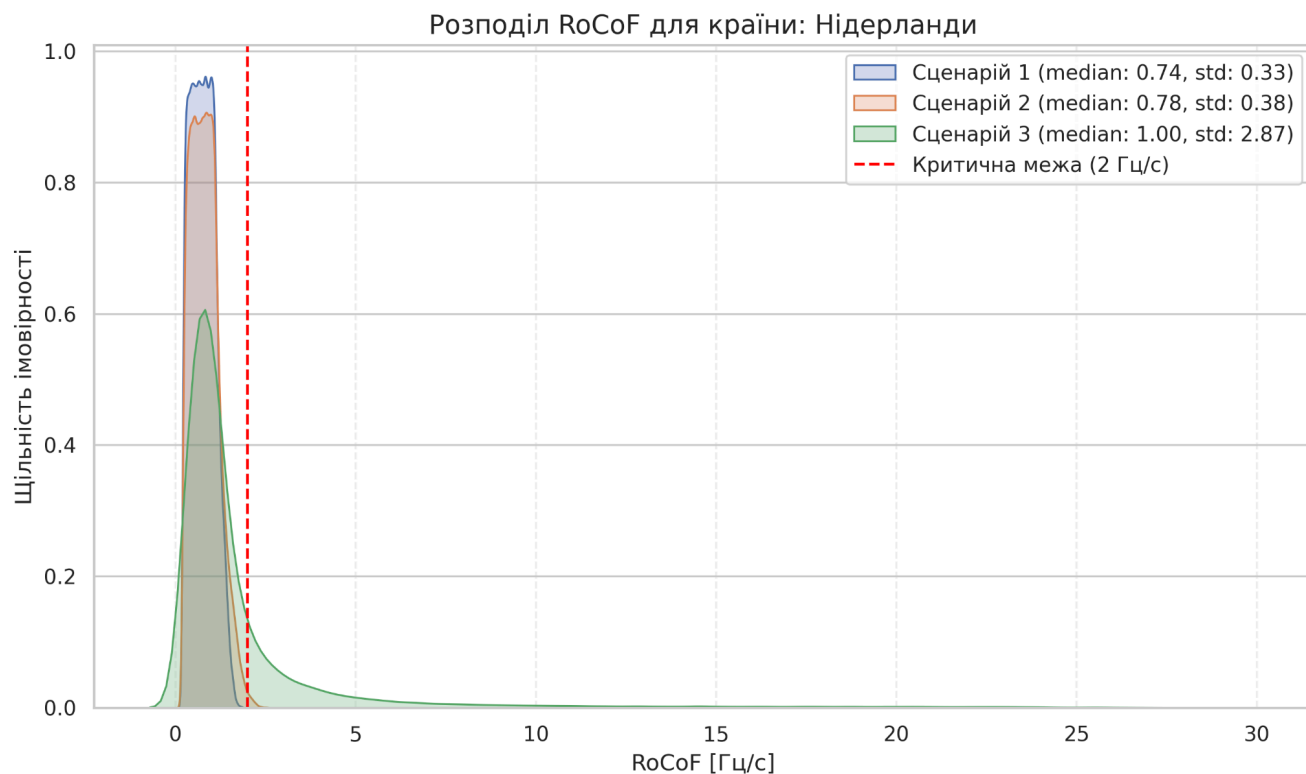


Рисунок 3.6 – Розподіл значень RoCoF для Нідерландів

Джерело: розроблено автором на основі [43, 46]

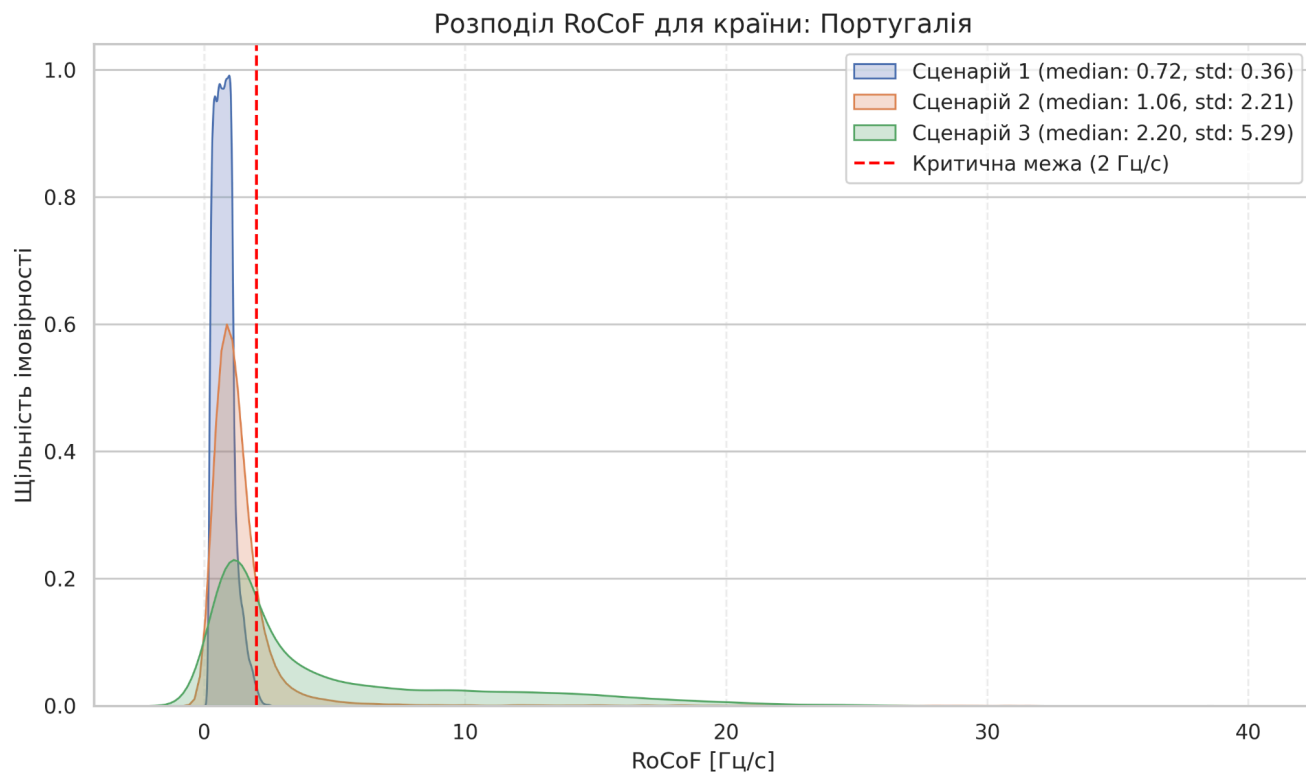


Рисунок 3.7 – Розподіл значень RoCoF для Португалії

Джерело: розроблено автором на основі [44, 46]

Розглянемо залежність ризику втрати стійкості від величини втрати генерації та від часу доби за допомоги hexbin-графіків. Hexbin-графік – це спосіб відображення двовимірних даних, де площа поділяється на шестикутні комірки, а колір кожної комірки показує кількість або частку точок всередині неї. Такі графіки слід трактувати як карту щільності: темніші чи більш насичені кольори означають більшу концентрацію значень у відповідній області. Основна перевага hexbin-графіків полягає у тому, що вони краще відображають структуру великих масивів даних, ніж звичайний точковий графік, оскільки зменшують «шум» від накладання точок. Шестикутна форма комірок забезпечує більш рівномірне покриття площини порівняно з квадратною сіткою, що робить картину розподілу даних більш природною та інформативною [48]. Графічний аналіз у форматі hexbin-графіків для Нідерландів для другого сценарію наведений на рисунку 3.8.

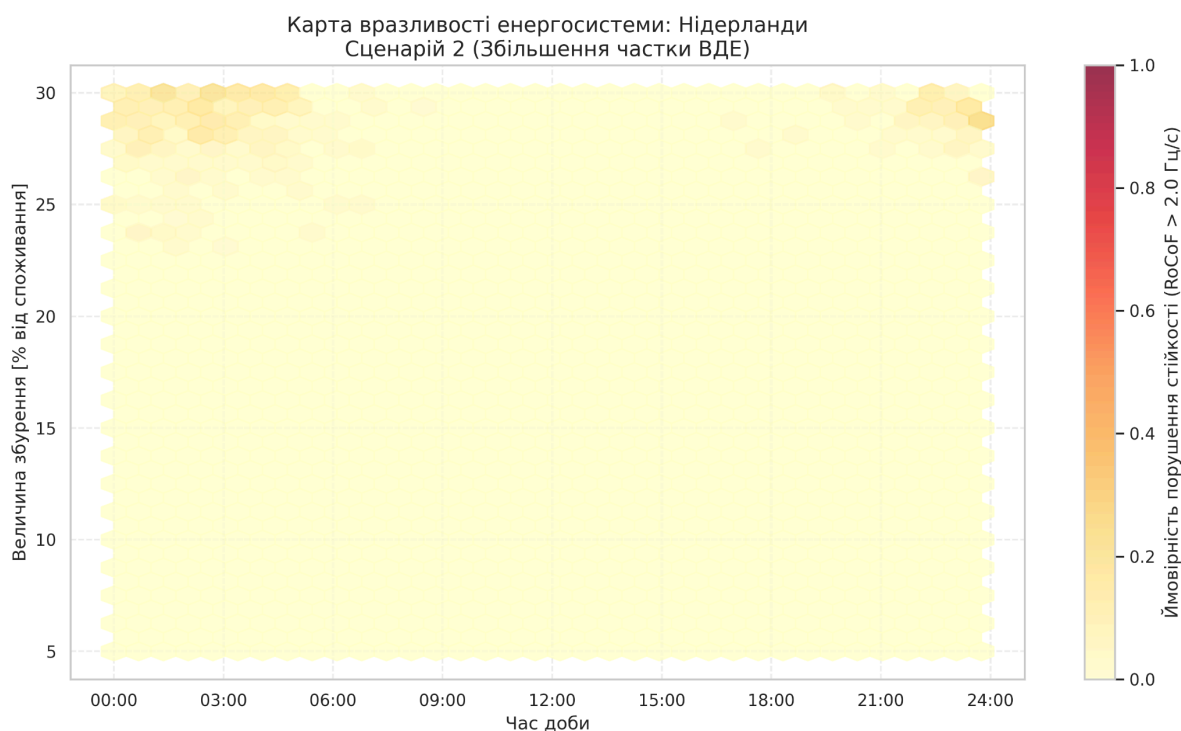


Рисунок 3.8 – Карта вразливості змодельованої системи Нідерландів за другого сценарію збільшення частки ВДЕ

Джерело: розроблено автором на основі [43, 46]

Бачимо, що графік підтверджує стабільність конфігурації. Дещо ризикованими є зони, коли удар приблизно рівний 30% в діапазонах часу 00:00-06:00 та 21:00-24:00, проте ці ризики є незначними. Розглянемо

змодельовану систему на основі даних Нідерландів за третього сценарію масштабування потужностей, що дозволить побачити динаміку при збільшенні частки генерації на основі ВДЕ в системі. Відповідний графічний аналіз наведено на рисунку 3.9.

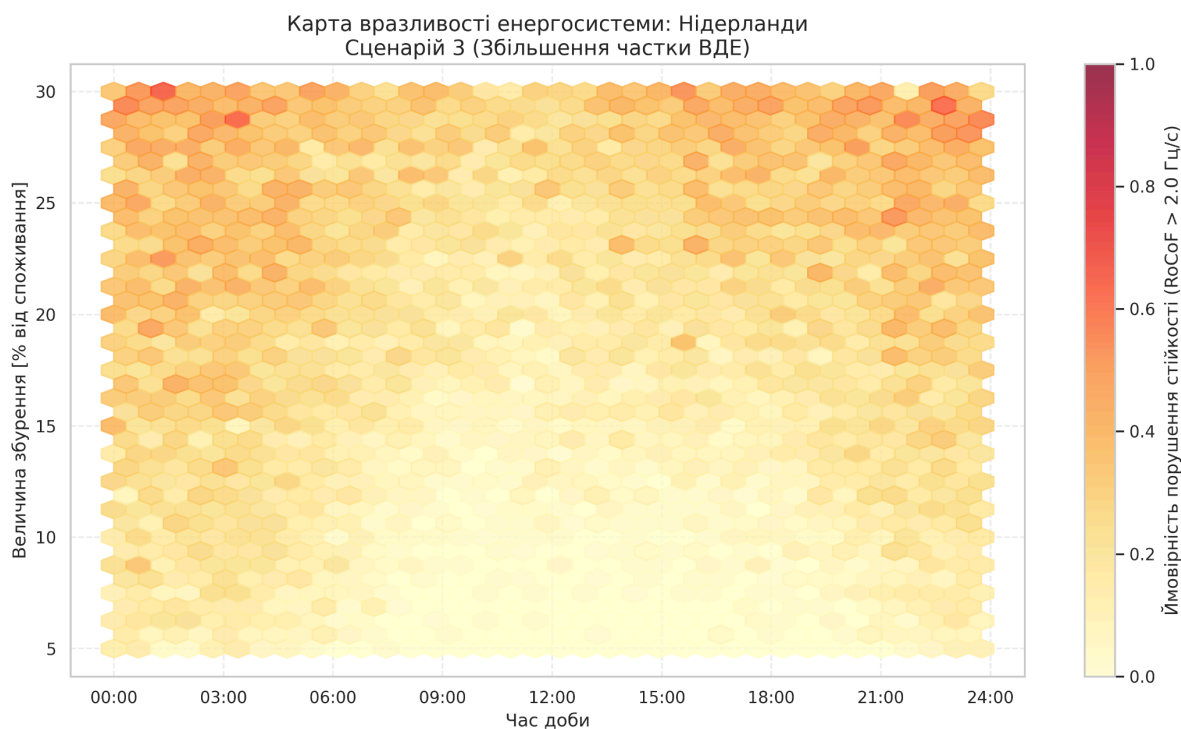


Рисунок 3.9 – Карта вразливості змодельованої системи Нідерландів за третього сценарію масштабування потужностей

Джерело: розроблено автором на основі [43, 46]

Спостерігаємо, що ризики найчастіше зростають зі зростанням величини удару, що особливо видно у часових інтервалах 00:00-06:00 та 21:00-24:00. У часовому проміжку 06:00-21:00 за умови удару до 10-15% система виглядає найбільш стабільною. Виконаємо аналогічний аналіз для Португалії. Відповідний графічний аналіз для Португалії для другого сценарію наведений на рисунку 3.10.

Зміну щільності елементів на hexbin-графіку Португалії можемо пояснити тим, що дані по генерації для цієї країни записувались щогодини, а не кожні 15 хвилин, як у випадку Нідерландів. Бачимо, що з'явилися зони із високою вірогідністю втрати стабільності, зокрема це зони на часовому інтервалі 09:00-15:00 при ударі більшому за 25%. Зона на інтервалі 00:00-18:00 має невисокі або середні шанси втрати стабільності при ударі до 15%, а на інтервалі 18:00-24:00

– при ударі до 25%. Розглянемо систему за третього сценарію масштабування потужностей генерації на основі ВДЕ. Відповідний аналіз наведено на рисунку 3.11.

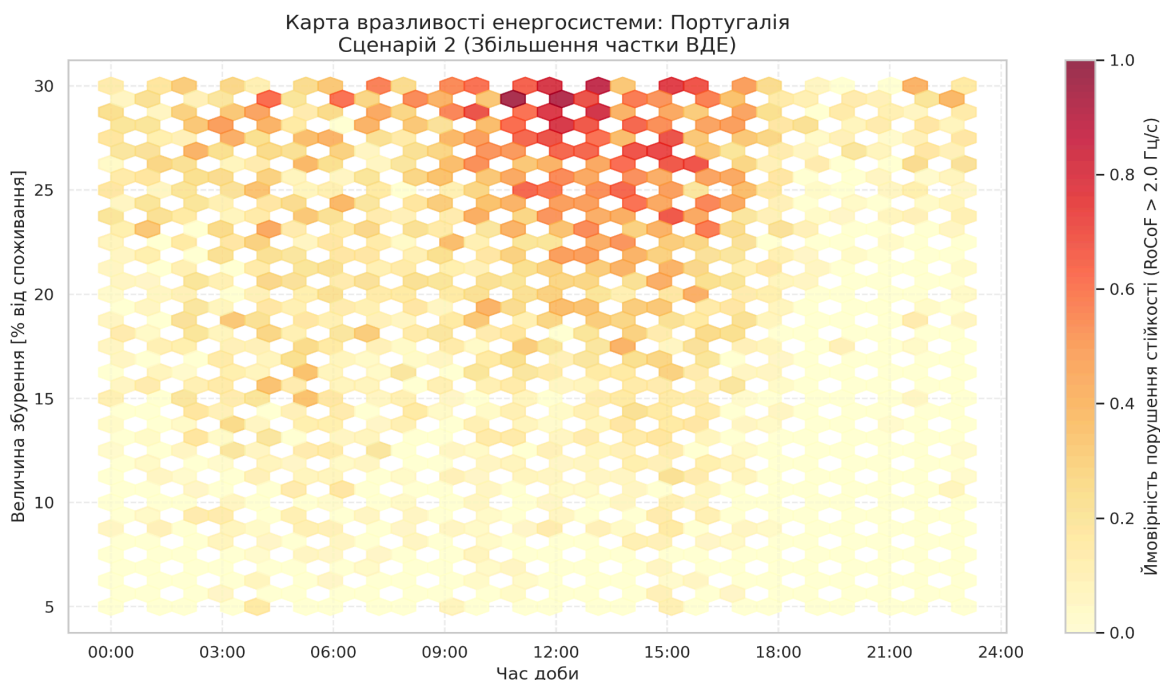


Рисунок 3.10 – Карта вразливості змодельованої системи Португалії за другого сценарію збільшення частки ВДЕ

Джерело: розроблено автором на основі [44, 46]

Спостерігаємо погіршення ситуації на графіку 3.11 порівняно з графіком 3.10. У критичному часовому проміжку 09:00-15:00 система може втратити стабільність навіть при ударі менше 10%. У проміжку 00:00-09:00 ризики втрати стабільності зростають при ударі понад 15%. Інтервал 18:00-24:00 загалом залишається відносно стабільним, проте виникають помітні ризики при ударі понад 25%. Розглянемо кореляцію між часткою генерації на основі ВДЕ від величини споживання та величиною RoCoF. Спершу розглянемо енергосистему Португалії за другого сценарію збільшення частки ВДЕ. Відповідний графічний аналіз наведений на рисунку 3.12.

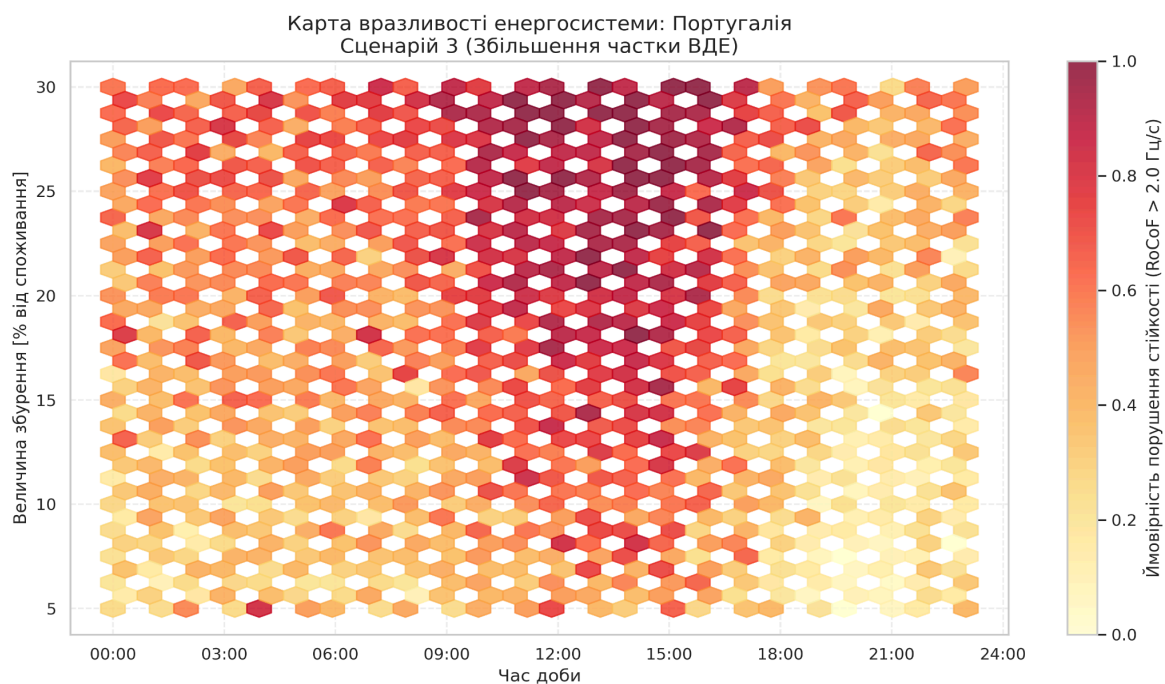


Рисунок 3.11 – Карта вразливості змодельованої системи Португалії за другого сценарію збільшення частки ВДЕ

Джерело: розроблено автором на основі [44, 46]

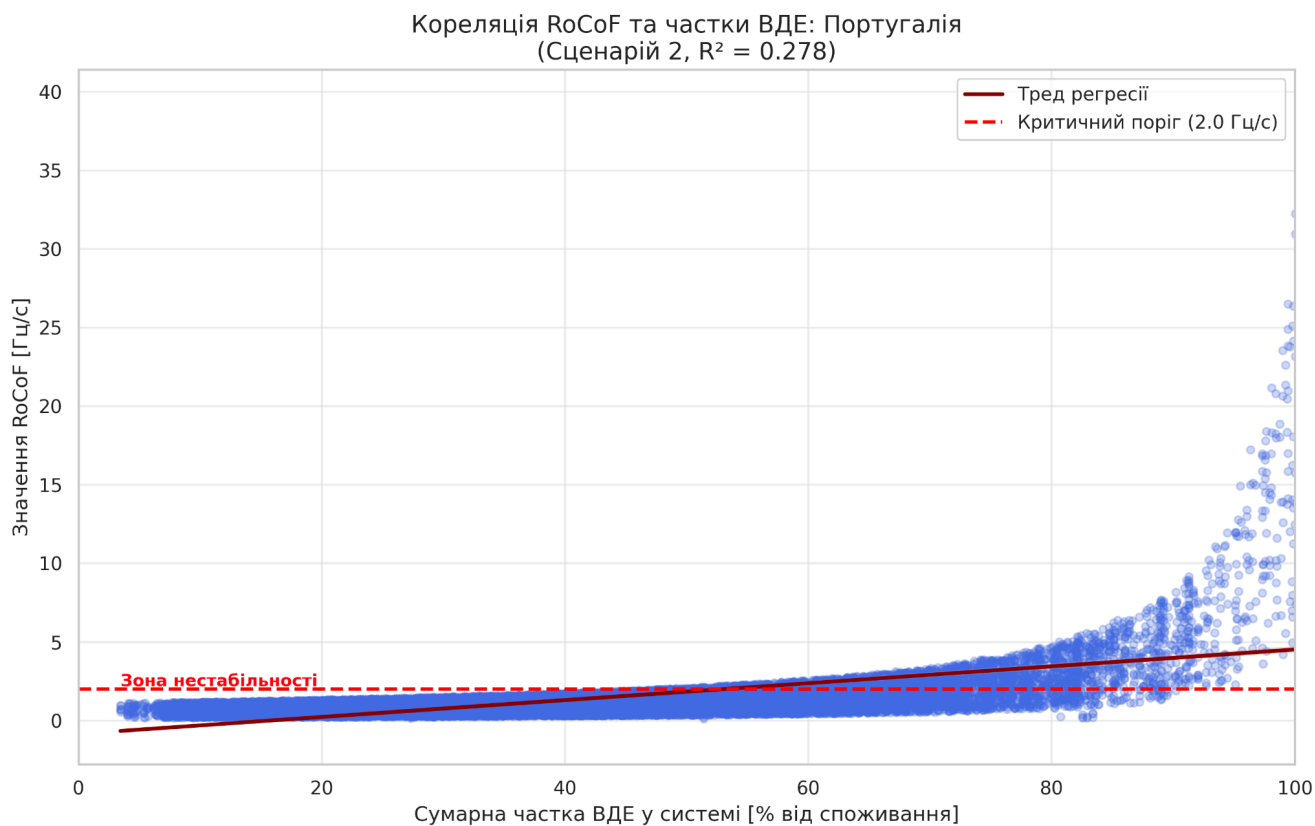


Рисунок 3.12 – Кореляція величини RoCoF та частки генерації на основі ВДЕ в енергосистемі, модель Португалії

Джерело: розроблено автором на основі [44, 46]

В назві графіка наведений коефіцієнт детермінації, величина якого в досліджуваному випадку дорівнює 27.8%. Коефіцієнт детермінації – це статистичний показник, що відображає частку варіації залежної змінної, яка пояснюється побудованою регресійною моделлю. Він характеризує ступінь відповідності моделі емпіричним даним та використовується як міра якості апроксимації вибірки [49, 50]. Розглянемо регресію в конфігурації збільшення потужностей генерації на основі ВДЕ. Відповідний графічний аналіз наведений на рисунку 3.13.

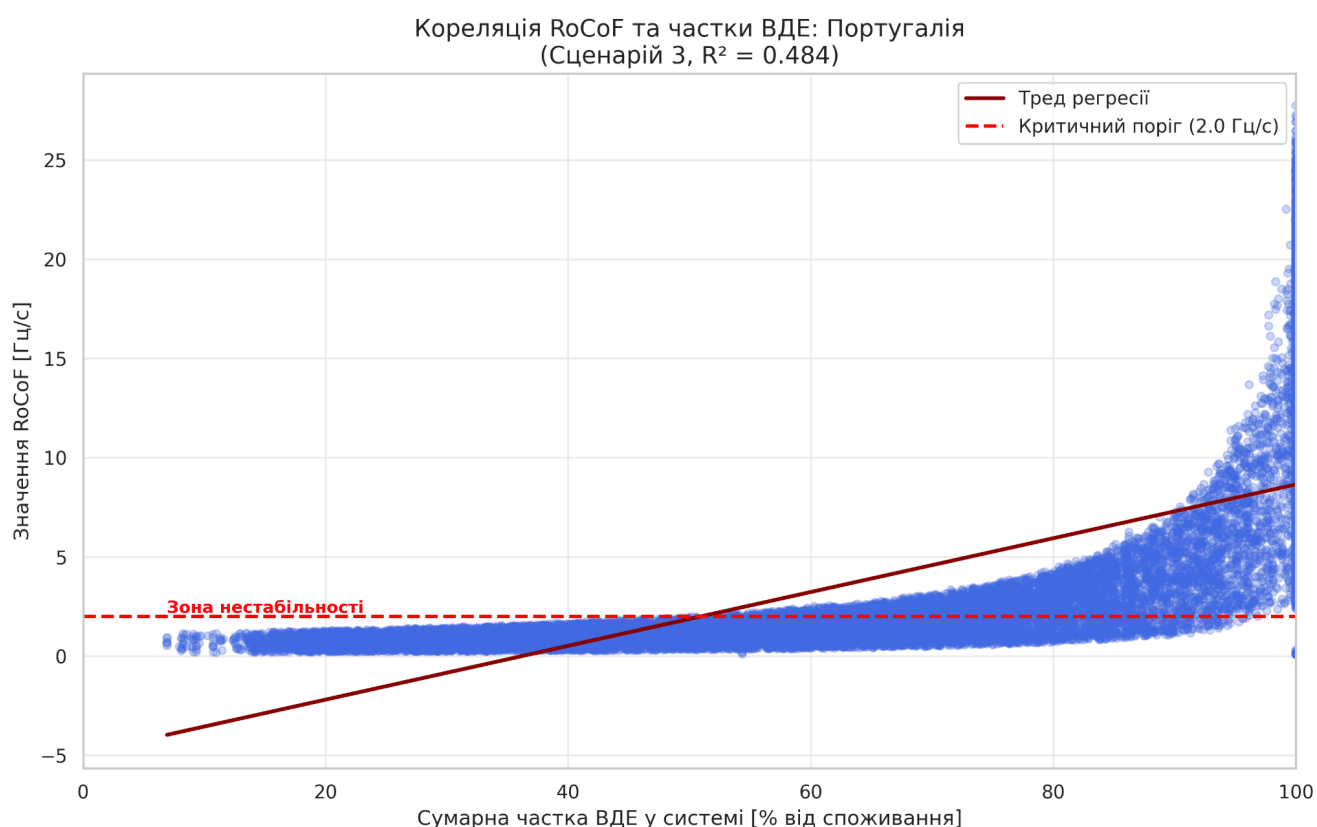


Рисунок 3.13 – Кореляція величини RoCoF та частки генерації на основі ВДЕ в енергосистемі, сценарій збільшення потужностей генерацій на основі ВДЕ, модель Португалії

Джерело: розроблено автором на основі [44, 46]

Спостерігаємо суттєво вищий коефіцієнт детермінації величиною 48.4%. Можемо зробити висновок, що аналіз коефіцієнта детермінації в динаміці збільшення частки ВДЕ в системі дає нам підстави говорити про

прямопропорційну залежність між величиною RoCoF та часткою генерації на основі ВДЕ. Виконаємо аналогічний аналіз для моделі Нідерландів. Відповідний графік наведений на рисунку 3.14.

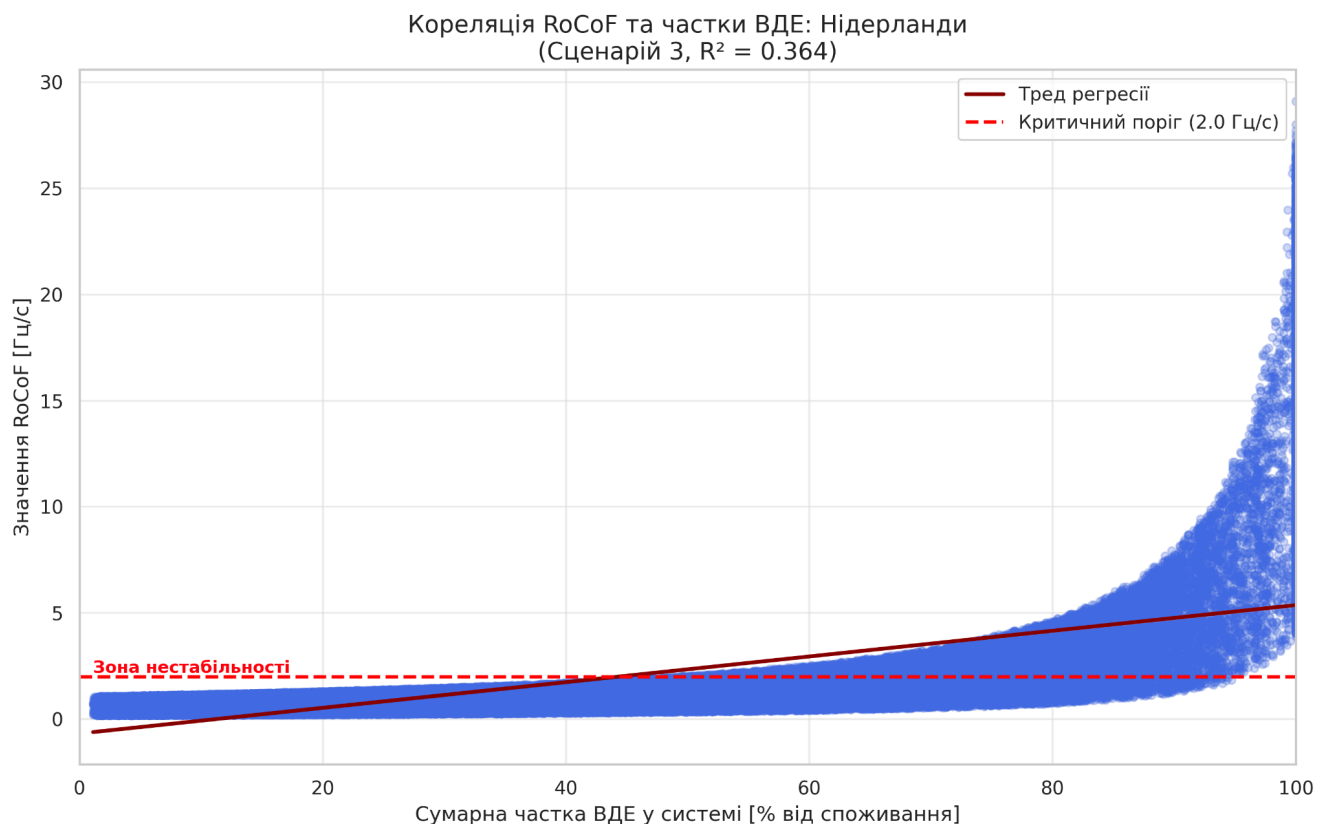


Рисунок 3.14 – Кореляція величини RoCoF та частки генерації на основі ВДЕ в енергосистемі, сценарій збільшення потужностей генерації на основі ВДЕ, модель Нідерландів

Джерело: розроблено автором на основі [43, 46]

У випадку моделі Нідерландів в третьому сценарії масштабування генерації на основі ВДЕ бачимо менший, проте також вартий уваги коефіцієнт детермінації величиною 36.4%. Варто взяти до уваги, що була застосован модель лінійної регресії і коефіцієнт детермінації був обчислений на основі коефіцієнта лінійної регресії Пірсона [49]. Звернемо увагу на розташування сукупності точок на всіх трьох графіках. Спостерігається виразна нелінійна залежність між часткою ВДЕ у системі та величиною RoCoF. Цілком ймовірно, що нелінійна функція, наприклад експоненційна, могла б значно адекватніше описати цю залежність, ніж лінійна апроксимація. Додатково доцільним було б розглянути коефіцієнт

кореляції Спірмена, який дозволив би підкреслити монотонність зростання залежної змінної на досліджуваних графіках [51, 52].

Проведене моделювання методом Монте-Карло дозволило кількісно оцінити ймовірнісні характеристики реакції енергосистеми на випадкові збурення та втрати генерації. Масові ітерації сценаріїв із варіативними параметрами генераційного портфеля показали, що зростання частки генерації на основі ВДЕ супроводжується підвищенням ризику перевищення критичних порогів швидкості зміни частоти. Графічний аналіз кореляцій дав можливість припустити наявність нелінійних взаємозв'язків між структурою генераційного портфеля та показниками стійкості системи, що може проявлятися у зростанні ймовірності виникнення аварійних режимів при високій частці ВДЕ.

Більш того, візуалізація результатів дала змогу виокремити діапазони найбільшої вразливості та визначити критичні сценарії, у яких навіть незначні втрати потужності призводять до швидкого зниження частотної стійкості. Це підкреслює необхідність застосування методів адаптивного регулювання для зменшення ризиків. Отримані результати також підтверджують доцільність використання стохастичного підходу, адже традиційні детерміновані моделі не відображають повною мірою варіативність та невизначеність у поведінці системи.

Отже, експериментальне моделювання продемонструвало, що метод Монте-Карло є ефективним інструментом для оцінки ймовірності втрати стійкості та формування практичних рекомендацій щодо підвищення надійності енергосистеми. Отримані висновки створюють основу для подальшого вдосконалення моделі та її застосування у плануванні резервів, розробці політик інтеграції ВДЕ та адаптації мережесистем.

3.4 Практичні рекомендації та напрями вдосконалення розробленої стохастичної моделі

Підіб'ємо підсумок, що архітектура моделі Монте-Карло забезпечує комплексне відтворення стохастичних процесів у енергосистемі та дозволяє кількісно оцінити ризики втрати стійкості при різних сценаріях розвитку генераційного портфеля. Отримані результати вказують на кілька взаємопов'язаних напрямів вдосконалення моделі, які підвищують її аналітичну цінність та практичну придатність для системного аналізу. По-перше, доцільно розширити простір стохастичних параметрів: замість одного рівномірного розподілу для ΔP можна розглядати сімейство розподілів, що відображають різні типи аварій, наприклад, важкі, середні, дрібні події, та їхні властивості. Це дозволить краще відтворювати реальні сценарії і зменшить ризик систематичної похибки в оцінках ймовірності критичних RoCoF. Також виправданим є введення стохастичної компоненти волатильності для окремих типів ВДЕ, як-от хмарність для сонячної генерації, просторово-корельовані вітрові флуктуації, що зробить модель більш фізично обґрунтованою.

По-друге, заміна простого рівномірного генератора ΔP на прогностичний модуль, побудований на машинному навчанні, може суттєво підвищити адекватність сценаріїв. Нейронні мережі або ансамблеві моделі, навчені на історичних даних про відмови, погодні умови та операційні записи, дозволять генерувати умовно-реалістичні розподіли ΔP з урахуванням сезонності, часу доби та погодних індикаторів. Такий підхід до прогнозування ударів слід поєднати з процедурою перехресною перевірки та оцінкою калібрування, щоб уникнути перенавчання і забезпечити коректну інтерпретацію ризиків.

По-третє, просторовий аналіз і врахування географічного розподілу об'єктів ВДЕ є критично важливими для адекватної оцінки еквівалентної інерції та локальних ефектів. Інтеграція геопросторових даних дозволить моделювати корельовані втрати генерації, як-от регіональні хмарні фронти або одночасні

відмови при екстремальних погодних явищах, і оцінювати зональні карти вразливості з більшою точністю. Це також відкриває можливість для сценарного аналізу взаємодії між локальними мережами та загальнонаціональною системою, що важливо для рекомендацій щодо розміщення компенсуючих ресурсів.

Щодо практичних рекомендацій для операторів та планувальників, модель слід використовувати як систему підтримки рішень з інтегрованими інструментами візуалізації ризиків. На основі карт вразливості доцільно рекомендувати зміщення графіків технічного обслуговування традиційних генераторів у періоди з найменшою ймовірністю критичного RoCoF та впровадження адаптивних порогів сповіщення, які автоматично реагують на зростання частки ВДЕ у реальному часі. Також рекомендовано впровадити динамічний моніторинг інерції, що дозволить операторам системи передачі отримувати агреговані індикатори еквівалентної інерції та прогностні оцінки ризику на інтервалах 5-15 хвилин, оскільки для RoCoF висока тимчасова роздільність даних є критичною.

Для підвищення надійності висновків необхідно посилити процедури валідації та кількісної оцінки невизначеності. Рекомендується виконати чутливісний аналіз по ключових параметрах, наприклад, розподіли ΔP , інерційні константи, частка ВДЕ, та застосувати методи кількісної оцінки невизначеності. Це дозволить отримати довірчі інтервали для часток критичних RoCoF і уникнути надмірної впевненості в точкових оцінках.

Технічно-організаційні рекомендації стосуються як даних, так і програмної інфраструктури. По-перше, слід збільшити часову дискретність збору даних до інтервалів 5-15 хвилин і розширити набір метрик, що підвищить якість вхідних сценаріїв. По-друге, програмний комплекс має залишатися модульним, документованим і відтворюваним: версійний контроль коду, автоматизовані тести для математичного ядра, та відкриті інтерфейси для підключення нових модулів значно полегшать подальший розвиток. Також доцільно оптимізувати обчислення через паралелізацію та використання векторизованих операцій, що вже показало свою ефективність у поточній реалізації.

Нарешті, для підвищення практичної цінності моделі рекомендується тісна взаємодія з операторами системи передачі та регуляторами. Взаємодія з ними дозволить організувати проведення пілотних тестів, інтеграцію моделі в процеси планування підключення нових черг ВДЕ та розробка процедур реагування на виявлені «червоні зони». Такий підхід забезпечить, з одного боку, перевірку моделі на реальних операційних сценаріях, а з іншого боку, дозволить адаптувати рекомендації до конкретних технічних і регуляторних умов. У сукупності запропоновані шляхи вдосконалення та рекомендації створюють практично орієнтований план подальших досліджень і впроваджень, що підвищить точність оцінок ризиків і сприятиме безпечній інтеграції ВДЕ в енергосистеми.

3.5 Роль переддипломної практики у формуванні магістерського дослідження

Переддипломна практика, пройдена на базі Управління протидії кіберзлочинам у місті Києві, стала важливим етапом у формуванні методологічних засад магістерського дослідження. Її значення полягає не лише у набутті професійних навичок, а й у безпосередньому впливі на вибір теми дипломної роботи та визначення напрямку наукових пошуків.

У процесі практики було засвоєно принципи роботи з великими масивами даних, а саме із методами збору даних, їх фільтрацією, класифікацією та аналізом в умовах невизначеності. Саме ці аспекти стали методологічною основою для подальшого дослідження у сфері системного аналізу стійкості енергосистем. Робота з інформаційними потоками, що мають стохастичний характер, виявилася релевантною до проблематики енергетичних систем, де варіативність виробітку відновлюваних джерел енергії, як-от сонячної та вітрової генерації, створює аналогічні виклики. У сучасних дослідженнях підкреслюється, що саме стохастичні моделі дозволяють системно враховувати багаторівневі

невизначеності і тим самим формують основу для підвищення стійкості енергетичних систем [53].

Практика також продемонструвала важливість коректної організації процесів збору та обробки інформації. У сфері протидії кіберзлочинам це проявлялося у необхідності швидкого реагування на нові загрози, що виникають у непередбачуваних формах. Аналогічно, в енергетичних системах з високою часткою ВДЕ ключовим є здатність системи адаптуватися до випадкових коливань генерації та споживання. Досвід роботи з даними в умовах невизначеності став підґрунтям для застосування методів Монте-Карло у дипломному дослідженні, що дозволяють моделювати випадкові удари по системі та оцінювати її стійкість через показник швидкості зміни коливань RoCoF.

Таким чином, переддипломна практика на базі Управління протидії кіберзлочинам у місті Києві відіграла визначальну роль у формуванні концептуально-методологічного базису магістерського дослідження, забезпечивши трансфер практичних навичок аналізу складних інформаційних потоків у площину системного аналізу енергетичних систем. Досвід роботи зі стохастичними масивами даних, їх фільтрацією та класифікацією в умовах високої невизначеності дозволив адаптувати підходи кібербезпеки до моделювання динамічних процесів в енергетиці, зокрема для врахування нестабільності генерації відновлюваних джерел енергії. Опановані методики швидкого реагування на непередбачувані загрози та опрацювання випадкових чинників заклали підґрунтя для застосування методу Монте-Карло у дипломній роботі, що у підсумку уможливило обґрунтування математичного апарату для оцінювання стійкості енергосистем за критерієм швидкості зміни частоти.

ВИСНОВКИ

Кваліфікаційна магістерська робота висвітлює створення комплексу імітаційного моделювання на основі методу Монте-Карло для аналізу частотної стійкості сучасних енергосистем в умовах інтенсивного впровадження відновлюваних джерел енергії. Розроблений комплекс демонструє здатність ефективно прогнозувати ризики дефіциту системної інерції та оцінювати динаміку метрики швидкості зміни частоти RoCoF за різних сценаріїв генерації. Основні результати роботи такі:

1. Проаналізовано сучасні підходи до моделювання інерційних властивостей енергосистем та обґрунтовано вибір математичних моделей для агрегування синхронної інерції. У рамках цього завдання визначено нормативні параметри й табличні значення інерційних констант для різних типів генерації, що дозволило сформулювати теоретичну базу для оцінки частотної стійкості в умовах декарбонізації.
2. Розроблено стохастичну методологію моделювання аварійних ситуацій та сценаріїв функціонування генераційного портфеля. Реалізовано математичний алгоритм імітації випадкових збурень ΔP у діапазоні від 5% до 30% від поточного навантаження системи із застосуванням рівномірного закону розподілу ймовірностей. Сформовано три прикладні сценарії розвитку генерації для комплексного порівняльного аналізу.
3. Реалізовано імітаційну модель Монте-Карло для оцінки розподілу швидкості зміни частоти RoCoF та ймовірності перевищення критичних порогів стійкості. Програмний комплекс побудовано на мові Python із використанням бібліотек Pandas та NumPy. Завдяки застосуванню методів векторизації та паралелізації обчислень

забезпечено високу точність і статистичну надійність масових ітераційних симуляцій.

4. Проведено експериментальне моделювання прикладних кейсів та виконано детальний графічний аналіз вразливості на основі реальних часових рядів платформи ENTSO-E Transparency Platform для енергосистем Нідерландів та Португалії. За допомогою побудови двовимірних карт щільності у формі hexbin-графіків виявлено часові інтервали найвищого ризику, а за допомогою лінійної регресії оцінено залежність показника RoCoF від частки інтеграції інверторних ВДЕ в мережі.
5. Сформовано комплекс технічно-організаційних практичних рекомендацій для операторів систем передачі та регуляторних органів. Запропоновано алгоритми впровадження динамічного моніторингу еквівалентної інерції з високою часовою роздільністю, оптимізацію графіків обслуговування традиційних станцій та використання швидкодіючих засобів підтримки частоти. Намічено пріоритетні напрями подальшого вдосконалення стохастичної моделі із залученням методів машинного навчання.

Запропоновані математичні підходи та створений програмний інструментарій можуть бути інтегровані в аналітичні комплекси системних операторів передачі та дослідницьких інститутів для превентивного виявлення дефіциту інерції й оптимізації розміщення резервів швидкої частотної відповіді. Результати дослідження мають безпосереднє практичне значення для обґрунтування стратегій розвитку гнучких, стійких та безпечних енергосистем майбутнього, а також слугують надійною базою для подальших наукових розробок у галузі системного аналізу енергетичних ринків.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Hasheminasab S., Alzayed M., Chaoui H. A review of control techniques for inverter-based distributed energy resources applications. *Energies*. 2024. Т. 17, № 12. С. 2940. URL: <https://doi.org/10.3390/en17122940> (дата звернення: 01.05.2026).
2. Green Forum. EU hits 24.5% renewables, targets 42.5% by 2030 - green forum. *Green Forum*. URL: <https://www.green-forum.eu/energy/20250103/eu-hits-245-renewables-targets-425-by-2030-1622> (дата звернення: 01.05.2026).
3. Renewables. *IEA*. URL: <https://www.iea.org/energy-system/renewables> (дата звернення: 01.05.2026).
4. Types and sources of renewable energy. *Renewable Energy Platform | Green Energy Network | Renewable Energy Solutions - Greenesa*. URL: <https://www.greensa.com/news/renewable-energy-sources-types> (дата звернення: 02.05.2026).
5. Ensuring grid stability when integrating renewable energy. *IEC*. URL: <https://www.iec.ch/blog/ensuring-grid-stability-when-integrating-renewable-energy> (дата звернення: 02.05.2026).
6. Sivasankar K., Dr. Muthukrishnan S. Renewable Energy Variability and Grid Stability: A Global Perspective. *International journal of engineering inventions*. 2025. Т. 14, № 7. С. 45–60. URL: <https://ijeijournal.com/papers/Vol14-Issue7/14074560.pdf> (дата звернення: 03.05.2026).
7. Overcoming renewable energy variability for a stable grid. *EI Knowledge*. URL: <https://knowledge.energyinst.org/new-energy-world/article?id=139393> (дата звернення: 03.05.2026).

8. Power system stability with high penetration of renewable energy sources: challenges, assessment, and mitigation strategies / J. S. Ali та ін. *IEEE access*. 2025. С. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2025.3546491> (дата звернення: 04.05.2026).
9. Methods of classification and modeling of power system small-signal stability under high renewable energy penetration / К. Popenko та ін. *Bulletin of the national technical university "KhPI". series: energy: reliability and energy efficiency*. 2025. № 2(11). С. 78–84. URL: [https://doi.org/10.20998/erec.2025.2\(11\).344510](https://doi.org/10.20998/erec.2025.2(11).344510) (дата звернення: 04.05.2026).
10. Wind-farm-level sub-/super-synchronous oscillation suppression strategy based on generalized reactance sensitivity / R. Shen та ін. *Energy reports*. 2023. Т. 9. С. 558–569. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.108> (дата звернення: 05.05.2026).
11. RoCoF importance in electric power systems with high renewables share: a simulation case for Croatia / T. Bašakarad та ін. *The 12th mediterranean conference on power generation, transmission, distribution and energy conversion (MEDPOWER 2020)*, м. Online Conference,. 2021. URL: <https://doi.org/10.1049/icp.2021.1239> (дата звернення: 05.05.2026).
12. Harrison R. L., Granja C., Leroy C. Introduction to Monte Carlo Simulation. *NUCLEAR PHYSICS METHODS AND ACCELERATORS IN BIOLOGY AND MEDICINE: fifth international summer school on nuclear physics methods and accelerators in biology and medicine*, м. Bratislava (Slovakia). 2010. URL: <https://doi.org/10.1063/1.3295638> (дата звернення: 07.05.2026).
13. Monte Carlo simulation. *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and-finance/monte-carlo-simulation> (дата звернення: 07.05.2026).
14. Kalos M. H., Whitlock P. A. Monte Carlo methods. 2-ге вид. Wiley-VCH, 2008. 203 с.

- 15.IBM. What is Monte Carlo simulation?. *IBM*. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/monte-carlo-simulation> (дата звернення: 07.05.2026).
- 16.Raychaudhuri S. Introduction to Monte Carlo simulation. *Proceedings of the 2008 winter simulation conference*, 7–10 груд. 2008 р. 2008. URL: <https://www.informs-sim.org/wsc08papers/012.pdf> (дата звернення: 08.05.2026).
- 17.Tuitoek K. Continuous uniform distribution explained | CFA level 1. *AnalystPrep* | *CFA® Exam Study Notes*. URL: <https://analystprep.com/cfa-level-1-exam/quantitative-methods/properties-of-continuous-uniform-distribution/> (дата звернення: 09.05.2026).
- 18.Normal distribution. *Monash university*. URL: <https://www.monash.edu/student-academic-success/mathematics/probability-and-distributions/normal-distribution> (дата звернення: 09.05.2026).
- 19.Chugani V. Poisson distribution: a comprehensive guide. *DataCamp*. URL: <https://www.datacamp.com/fr/tutorial/poisson-distribution> (дата звернення: 10.05.2026).
- 20.Numpy.random.uniform – numpy v2.2 manual. *NumPy*. URL: <https://numpy.org/doc/2.2/reference/random/generated/numpy.random.uniform.html> (дата звернення: 10.05.2026).
- 21.A review of virtual inertia techniques for renewable energy-based generators / A. Fernández-Guillamón та ін. *Renewable energy*. 2020. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.92651> (дата звернення: 11.05.2026).
- 22.Jathunga T. G., Wijethunga A. H., Ekanayake J. B. Impact of inertia constant on frequency dynamics of a power system. *Ceylon journal of science*. 2021. Т. 50, № 1. С. 3. URL: <https://doi.org/10.4038/cjs.v50i1.7841> (дата звернення: 11.05.2026).
- 23.Power system stability with high integration of RESs and EVs: benefits, challenges, tools, and solutions / A. M. Saleh та ін. *Energy reports*. 2025.

- T. 13. С. 2637–2663. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2025.02.001> (дата звернення: 11.05.2026).
24. Inertia and rate of change of frequency (rocof). *entso.eu*. URL: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/SOC%20documents/Inertia%20and%20RoCoF_v17_clean.pdf (дата звернення: 11.05.2026).
25. Continental Europe successful synchronisation with Ukraine and Moldova power systems. *entso.eu*. URL: <https://www.entsoe.eu/news/2022/03/16/continental-europe-successful-synchronisation-with-ukraine-and-moldova-power-systems/> (дата звернення: 11.05.2026).
26. Stochastic stability analysis of the power system with losses / H. Li та ін. *Energies*. 2018. Т. 11, № 3. С. 678. URL: <https://doi.org/10.3390/en11030678> (дата звернення: 17.05.2026).
27. Brown T., Hörsch J., Schlachtberger D. PyPSA: python for power system analysis. *Journal of open research software*. 2018. Т. 6. URL: <https://doi.org/10.5334/jors.188> (дата звернення: 12.05.2026).
28. DIgSILENT. PowerFactory - DIgSILENT. *Power System Solutions - DIgSILENT*. URL: <http://digsilent.de/en/powerfactory.html> (дата звернення: 12.05.2026).
29. Siemens. PSS software: PSS E. *Siemens*. URL: <https://www.siemens.com/en-us/products/pss-software/psse/> (дата звернення: 12.05.2026).
30. About us: cloud first , open by design , seamless, sustainable. *etap*. URL: <https://etap.com/company/about-us> (дата звернення: 13.05.2026).
31. Simulink - simulation and model-based design. *MathWorks - Maker of MATLAB and Simulink*. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> (дата звернення: 13.05.2026).

- 32.Simscape electrical. *MathWorks*. URL: <https://www.mathworks.com/products/simscape-electrical.html> (дата звернення: 13.05.2026).
- 33.Welcome to python.org. *Python.org*. URL: <https://www.python.org> (дата звернення: 13.05.2026).
- 34.R: the R project for statistical computing. *r-project.org*. URL: <https://www.r-project.org/> (дата звернення: 13.05.2026).
- 35.State of the art Monte Carlo method applied to power system analysis with distributed generation / Т. Р. Abud та ін. *Energies*. 2022. Т. 16, № 1. С. 394. URL: <https://doi.org/10.3390/en16010394> (дата звернення: 14.05.2026).
- 36.Numpy.random.seed – numpy v2.2 manual. *NumPy*. URL: <https://numpy.org/doc/2.2/reference/random/generated/numpy.random.seed.html> (дата звернення: 14.05.2026).
- 37.Array programming with NumPy / С. R. Harris та ін. *Nature*. 2020. Т. 585, № 7825. С. 357–362. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2> (дата звернення: 14.05.2026).
- 38.Risk assessment and mitigation on area-level RoCoF for operational planning / J. Wen та ін. *Energy*. 2021. Т. 228. С. 120632. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120632> (дата звернення: 14.05.2026).
- 39.Governance. *entso.eu*. URL: <https://www.entsoe.eu/about/inside-entsoe/governance/> (дата звернення: 15.05.2026).
- 40.Pandas.merge_asof – pandas 3.0.3 documentation. *pandas - Python Data Analysis Library*. URL: https://pandas.pydata.org/docs/reference/api/pandas.merge_asof.html (дата звернення: 15.05.2026).

41. Ritchie H., Rosado P. Portugal - energy country profile. *Our World in Data*. URL: <https://ourworldindata.org/profile/energy/portugal> (дата звернення: 15.05.2026).
42. Ritchie H., Rosado P. Netherlands - energy country profile. *Our World in Data*. URL: <https://ourworldindata.org/profile/energy/netherlands> (date of access: 15.05.2026).
43. ENTSO-E. Actual generation per production type: Netherlands, yearly. *ENTSO-E: transparency platform*. URL: <https://transparency.entsoe.eu/> (дата звернення: 15.05.2026).
44. ENTSO-E. Actual generation per production type: Portugal, yearly. *ENTSO-E: transparency platform*. URL: <https://transparency.entsoe.eu/> (дата звернення: 15.05.2026).
45. Pandas.DataFrame.sample – pandas 3.0.3 documentation. *pandas - Python Data Analysis Library*. URL: <https://pandas.pydata.org/docs/reference/api/pandas.DataFrame.sample.html> (дата звернення: 15.05.2026).
46. ENTSO-E. Monthly hourly load values. *ENTSO-E: transparency platform*. URL: <https://www.entsoe.eu/data/power-stats/> (дата звернення: 15.05.2026).
47. Тичинська Л., Черепашук А. Нормальний розподіл (закон Гаусса). *Навчальні посібники Вінницького національного технічного університету*. URL: https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fitki/4tichinska_teoriya_jmovirnostej/35.htm (дата звернення: 16.05.2026).
48. Cartograms. *The European Data Portal*. URL: <https://data.europa.eu/apps/data-visualisation-guide/hexbin-maps> (дата звернення: 16.05.2026).
49. Linregress – scipy v1.17.0 manual. *Numpy and Scipy Documentation – Numpy and Scipy documentation*. URL:

<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.stats.linregress.html> (дата звернення: 16.05.2026).

50. Siddiqui L. Coefficient of determination: what r-squared tells us. *DataCamp*. URL:

<https://www.datacamp.com/tutorial/coefficient-of-determination> (дата звернення: 16.05.2026).

51. Libretexts. 6.9: exponential and logarithmic regressions. *Mathematics LibreTexts*. URL:

https://math.libretexts.org/Workbench/1250_Draft_3/06:_Exponential_and_Logarithmic_Functions/6.09:_Exponential_and_Logarithmic_Regressions (дата звернення: 17.05.2026).

52. Volk-Jesussek H. Spearman's rank correlation coefficient. *Statistics Calculator*. URL: <https://numiqo.com/tutorial/spearman-correlation> (дата звернення: 17.05.2026).

53. Shafiei K., Zadeh S. G., Hagh M. T. Robustness and resilience of energy systems to extreme events: a review of assessment methods and strategies. *Energy strategy reviews*. 2025. T. 58. C. 101660. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101660> (дата звернення: 17.05.2026).

ДОДАТКИ

Додаток А

Код розробленого програмного забезпечення

```
# -*- coding: utf-8 -*-
```

```
"""
```

```
Created on Mon Apr 13 13:50:08 2026
```

```
@author: einei
```

```
"""
```

```
import pandas as pd
```

```
import numpy as np
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
import seaborn as sns
```

```
import matplotlib.ticker as ticker
```

```
import matplotlib.dates as mdates
```

```
from scipy import stats
```

```
#%% завантаження датасету зі споживанням
```

```
monthly_hourly_load_df = pd.read_csv('monthly_hourly_load_values_2025.csv',  
                                     sep='\t')
```

```
#%% опрацювання датасету зі споживання, отримання зрізів по країнам
```

```
def get_country_dfs(df_load, c):
```

```
    load = df_load.loc[df_load.CountryCode == c].copy()
```

```
    load['DateUTC'] = pd.to_datetime(load['DateUTC'], dayfirst=True)
```

```
    load.sort_values(by='DateUTC', ascending=True, inplace=True)
```

```
    load['End Date'] = load['DateUTC'] + pd.Timedelta(hours=1)
```

```
    cols = ['CountryCode', 'DateUTC', 'End Date', 'Value_ScaleTo100']
```

```
load = load.loc[:, cols]
load.columns = ['Country Code', 'Start Date', 'End Date', 'P Load']
```

```
return load
```

```
monthly_hourly_load_cntrs = {}
for c in ["NL", "PT"]:
    monthly_hourly_load_cntrs[c] = \
        get_country_dfs(monthly_hourly_load_df, c)
```

```
### завантаження та підготовка датасету зі споживання
```

```
def generation_data_processing(file_name_: str):
    df = pd.read_csv(file_name_)
    df_pv = df.pivot(index=['MTU (UTC)', 'Area'],
                     columns='Production Type',
                     values='Generation (MW)')

    df_pv.reset_index(drop=False, inplace=True)

    columns_ = ['MTU (UTC)', 'Area', 'Biomass', 'Solar',
               'Wind Offshore', 'Wind Onshore']
    df_pv = df_pv.loc[:, columns_].copy()

    cols_to_convert = ['Biomass', 'Solar', 'Wind Offshore', 'Wind Onshore']
    df_pv[cols_to_convert] = df_pv[cols_to_convert].astype(float)

    df_pv[['Start Date', 'End Date']] = \
        df_pv['MTU (UTC)'].str.split('-', expand=True)

    df_pv[['Start Date', 'End Date']] = df_pv[['Start Date', 'End Date']].apply(
        pd.to_datetime, dayfirst=True
    )

    df_pv.sort_values(by='Start Date', ascending=True, inplace=True)

    return df_pv

power_generation_cntrs = {}
```

```

power_generation_cntrs['NL']
generation_data_processing('netherlands_utc.csv')
power_generation_cntrs['PT'] = generation_data_processing('portugal_utc.csv')

#%% отримання датасету із співставленням споживання та генерації
# + допоміжні атрибути для графіків

def categorize_time(hour):
    if 5 <= hour < 11: return 'Ранок (05-11)'
    elif 11 <= hour < 16: return 'День (11-16)'
    elif 16 <= hour <= 22: return 'Вечір (16-22)'
    else: return 'Ніч/Інше'

def to_seconds(dt):
    return dt.hour * 3600 + dt.minute * 60 + dt.second

generation_load_cntrs = {}
for country_ in ["NL", "PT"]:
    generation_load_cntrs[country_] = pd.merge_asof(
        left=power_generation_cntrs[country_],
        right=monthly_hourly_load_cntrs[country_],
        on='End Date', suffixes=('_gen', '_load'),
        direction='forward', allow_exact_matches=True
    )

    generation_load_cntrs[country_]['End Time'] = \
        generation_load_cntrs[country_]['End Date'].apply(to_seconds)

    generation_load_cntrs[country_]['Час доби'] = \
        generation_load_cntrs[country_]['Start
Date_gen'].dt.hour.apply(categorize_time)

    list_of_period_cat = ['Ніч/Інше', 'Ранок (05-11)', 'День (11-16)',
        'Вечір (16-22)']

    time_of_day_categories =
pd.CategoricalDtype(categories=list_of_period_cat,
        ordered=True)

    generation_load_cntrs[country_]['Час доби'] = \

```

```
generation_load_cntrs[country_]['Час  
добі'].astype(time_of_day_categories)
```

```
generation_load_df = pd.concat(generation_load_cntrs.values(),  
                                ignore_index=True)
```

```
### опис сценаріїв, що будуть розглядатись при розрахунку RoCoF
```

```
'''
```

```
scenarios = {  
    "scenario_1": {  
        "Solar": 1.0,  
        "Wind Offshore": 1.0,  
        "Biomass": 0.0,  
        "Wind Onshore": 0.0  
    },
```

```
    "scenario_2": {  
        "Solar": 1.0,  
        "Wind Offshore": 1.0,  
        "Biomass": 1.0,  
        "Wind Onshore": 1.0  
    },
```

```
    "scenario_3": {  
        "Solar": 2.0,  
        "Wind Offshore": 1.5,  
        "Biomass": 1.5,  
        "Wind Onshore": 1.5  
    }  
}
```

```
'''
```

```
### розрахунок RoCoF
```

```
def equivalent_inertia(biomass_inertia, gas_inertia,  
                       biomass_max, fossil_gas_series, p_load):  
    return (biomass_inertia * biomass_max + (fossil_gas_series / 0.8) *  
            gas_inertia) / \
```

(p_load)

```
def calc_diff(df, load_col, cols_to_sum):  
    diff = df[load_col] - df[cols_to_sum].sum(axis=1)  
    return np.maximum(diff, 0)
```

```
def additional_balance(df, load_col, cols_to_sum):  
    total_generation = df[cols_to_sum].sum(axis=1)
```

```
    balancing_factor = np.minimum(  
        df[load_col] / total_generation,  
        1  
    )
```

```
    df[cols_to_sum] = df[cols_to_sum].mul(  
        balancing_factor,  
        axis=0  
    )
```

```
    df['Total Generation'] = total_generation
```

```
    return df
```

```
rocof_cntrs = {}
```

```
np.random.seed(18)
```

```
sample_size = {"NL": 80_000, "PT": 20_000}
```

```
for c in ["NL", "PT"]:
```

```
    sample_df = generation_load_cntrs[c].sample(  
        n=sample_size[c], replace=True  
    ).copy()
```

```
    sample_df['Delta P'] = np.random.uniform(  
        0.05 * sample_df['P Load'],  
        0.3 * sample_df['P Load'],  
        size=len(sample_df)  
    )
```

```
biomass_inertia, gas_inertia = 3, 5.5
```

```
electrical_grid_frequency = 50
```

```
constant_numerator = sample_df['Delta P'] / sample_df['P Load'] \
    / 2 * electrical_grid_frequency
```

```
cols_to_sum_1 = ['Solar', 'Wind Offshore']
```

```
cols_to_sum_2 = ['Biomass', 'Solar', 'Wind Offshore', 'Wind Onshore']
```

```
new_generation = pd.DataFrame({
    'Solar Scaled': 1.5 * sample_df['Solar'],
    'Wind Offshore Scaled': 2 * sample_df['Wind Offshore'],
    'Wind Onshore Scaled': 2 * sample_df['Wind Onshore'],
    'Biomass Scaled': 2 * sample_df['Biomass'],
    'P Load': sample_df['P Load']
})
```

```
cols_to_sum_3 = [col + " Scaled" for col in cols_to_sum_2]
```

```
new_generation = additional_balance(
    df=new_generation,
    load_col= 'P Load',
    cols_to_sum=cols_to_sum_3)
```

```
fossil_gas_scenario_1 = calc_diff(sample_df, 'P Load', cols_to_sum_1)
```

```
fossil_gas_scenario_2 = calc_diff(sample_df, 'P Load', cols_to_sum_2)
```

```
fossil_gas_scenario_3 = calc_diff(new_generation, 'P Load', cols_to_sum_3)
```

```
equivalent_inertia_system_1 = equivalent_inertia(
    biomass_inertia=biomass_inertia, gas_inertia=gas_inertia,
    biomass_max=0,
    fossil_gas_series=fossil_gas_scenario_1,
    p_load=sample_df['P Load'])
```

```
equivalent_inertia_system_2 = equivalent_inertia(
    biomass_inertia=biomass_inertia, gas_inertia=gas_inertia,
    biomass_max=sample_df['Biomass'].max(),
    fossil_gas_series=fossil_gas_scenario_2,
    p_load=sample_df['P Load'])
```

```
equivalent_inertia_system_3 = equivalent_inertia(
```

```

biomass_inertia=biomass_inertia, gas_inertia=gas_inertia,
biomass_max=new_generation['Biomass Scaled'].max(),
fossil_gas_series=fossil_gas_scenario_3,
p_load=new_generation['P Load'])

```

```

sample_df['ROCOF 1'] = constant_numerator / equivalent_inertia_system_1
sample_df['ROCOF 2'] = constant_numerator / equivalent_inertia_system_2
sample_df['ROCOF 3'] = constant_numerator / equivalent_inertia_system_3

```

```

# допоміжні атрибути для графіків

```

```

sample_df['Total Generation Scaled'] = new_generation[cols_to_sum_3].sum(
    axis=1)

```

```

rocof_cntrs[c] = sample_df

```

```

rocof_df = pd.concat(rocof_cntrs.values(),
                    ignore_index=True)

```

```

# %% розрахунок базових метрик для аналізу RoCoF

```

```

def critical_rocof_count_percent(rocof_series, critical_value):
    return (rocof_series > critical_value).sum() * 100 / rocof_series.size

```

```

critical_rocof = 2
aggregated_rocof_df = rocof_df.groupby('Country Code').agg(
    critical_rocof_1=("ROCOF 1", lambda s: critical_rocof_count_percent(s,
critical_rocof)),
    critical_rocof_2=("ROCOF 2", lambda s: critical_rocof_count_percent(s,
critical_rocof)),
    critical_rocof_3=("ROCOF 3", lambda s: critical_rocof_count_percent(s,
critical_rocof))
)

```

```

aggregated_rocof_df['ROCOF 2 Increase'] = \
    aggregated_rocof_df.critical_rocof_2 - aggregated_rocof_df.critical_rocof_1

```

```

aggregated_rocof_df['ROCOF 3 Increase'] = \
    aggregated_rocof_df.critical_rocof_3 - aggregated_rocof_df.critical_rocof_2

```

```

aggregated_rocof_df.columns = ['Critical ROCOF 1 Percent',

```

```
'Critical ROCOF 2 Percent',  
'Critical ROCOF 3 Percent',  
'Critical ROCOF 2 Increase',  
'Critical ROCOF 3 Increase']
```

```
cols_to_rearrange = ['Critical ROCOF 1 Percent', 'Critical ROCOF 2 Percent',  
                    'Critical ROCOF 2 Increase',  
                    'Critical ROCOF 3 Percent', 'Critical ROCOF 3 Increase']
```

```
aggregated_rocof_df = aggregated_rocof_df.loc[:, cols_to_rearrange].copy()
```

```
#%% допоміжні атрибути для графіків
```

```
for i in [1,2,3]:  
    rocof_df[f'Critical RoCoF {i} Mark'] = rocof_df[f'ROCOF {i}'] > critical_rocof
```

```
rocof_df['Delta P Percent'] = rocof_df['Delta P'] / rocof_df['P Load'] * 100
```

```
#%% графічний аналіз результатів дослідження
```

```
def format_func(x, pos):  
    h = int(x // 3600)  
    m = int((x % 3600) // 60)  
    return f"{h:02d}:{m:02d}"
```

```
# налаштування глобальних стилів  
sns.set_theme(style="whitegrid")  
plt.rcParams['font.family'] = 'DejaVu Sans'  
plt.rcParams['figure.dpi'] = 300
```

```
def plot_rocof_distribution(df, country_code, country_name, critical_val=2.0):  
    country_data = df[df['Country Code'] == country_code]
```

```
    plt.figure(figsize=(10, 6))  
    for i in [1, 2, 3]:  
        # Витягуємо дані для сценарію (ігноруючи NaN, якщо вони є)  
        rocof_series = country_data[f'ROCOF {i}'].dropna()
```

```
        # рахуємо статистичні метрики
```

```

median_val = rocof_series.median()
std_val = rocof_series.std()

# формуємо інформативний підпис для легенди
label_text = f'Сценарій {i} (median: {median_val:.2f}, std: {std_val:.2f})'

sns.kdeplot(rocof_series, label=label_text, fill=True)

plt.axvline(critical_val, color='red', linestyle='--', label=f'Критична межа
({critical_val} Гц/с)')
plt.title(f'Розподіл RoCoF для країни: {country_name}', fontsize=14)
plt.xlabel('RoCoF [Гц/с]')
plt.ylabel('Щільність імовірності')

plt.legend(loc='upper right')
plt.grid(axis='x', linestyle='--', alpha=0.3) # легка сітка для зручності оцінки медіан
plt.tight_layout()
plt.show()

def plot_vulnerability_heatmap(df, country_code, country_name, scenario_idx,
                              critical_val=2.0):

    # фільтрація даних
    country_data = df[df['Country Code'] == country_code].copy()

    # динамічні назви колонок
    mark_col = f'Critical RoCoF {scenario_idx} Mark'

    plt.figure(figsize=(12, 7))

    # побудова hexbin.
    # C=country_data[mark_col] - передаємо булеві значення (0 або 1)
    # reduce_C_function=np.mean - обчислює частку одиниць у кожному "стілнику"
    (тобто ймовірність)
    hb = plt.hexbin(country_data['End Time'],
                    country_data['Delta P Percent'],
                    C=country_data[mark_col],
                    reduce_C_function=np.mean,
                    gridsize=35,
                    alpha=0.8,

```

```

cmap='YlOrRd',
vmin=0, vmax=1) # фіксує шкалу для порівняння сценаріїв

# додавання кольорової шкали
cb = plt.colorbar(hb)
cb.set_label(f'Ймовірність порушення стійкості (RoCoF > {critical_val} Гц/с)',
fontsize=12)

plt.title(f'Карта вразливості енергосистеми: {country_name} \nСценарій
{scenario_idx} (Збільшення частки ВДЕ)',
fontsize=14)
plt.xlabel('Час доби', fontsize=12)
plt.ylabel('Величина збурення [% від споживання]', fontsize=12)

# налаштування осі часу (кожні 3 години)
ax = plt.gca()
ax.xaxis.set_major_locator(ticker.MultipleLocator(3600*3))
ax.xaxis.set_major_formatter(ticker.FuncFormatter(format_func))

plt.grid(True, linestyle='--', alpha=0.3)
plt.tight_layout()
plt.show()

def plot_correlation_rocof_res(df, country_code, country_name, scenario_idx,
generation_cols_to_sum=cols_to_sum_2,
total_gen_col='Total Generation Scaled',
critical_val=2.0):
"""
Аналіз залежності RoCoF від частки відновлюваних джерел енергії.
"""

# фільтрація даних
data = df[df['Country Code'] == country_code].copy()

# визначення колонок ВДЕ для розрахунку частки в залежності від сценарію
res_cols = generation_cols_to_sum

# розрахунок частки ВДЕ у % від загального споживання (P Load)
if scenario_idx in [1, 2]:
    data['RES_Share_Percent'] = (df[res_cols].sum(axis=1) / data['P Load']) * 100
elif scenario_idx == 3:

```

```

data['RES_Share_Percent'] = df[total_gen_col] / data['P Load'] * 100

# показник RoCoF для обраного сценарію
rocof_col = f'ROCOF {scenario_idx}'

plt.figure(figsize=(11, 7))

# побудова regplot, що генерує scatter plot та лінійну регресію одночасно
sns.regplot(data=data, x='RES_Share_Percent', y=rocof_col,
            scatter_kws={'alpha': 0.25, 'color': 'royalblue', 's': 20},
            line_kws={'color': 'darkred', 'label': 'Тред перспєкції'})

# додавання критичного порогу
plt.axhline(critical_val, color='red', linestyle='--', linewidth=2,
            label=f'Критичний поріг ({critical_val} Гц/с)')

# статистичні показники
slope, intercept, r_value, p_value, std_err =
stats.linregress(data['RES_Share_Percent'], data[rocof_col])

plt.title(f'Кореляція RoCoF та частки ВДЕ: {country_name}\n(Сценарій
{scenario_idx}, R² = {r_value**2:.3f})', fontsize=14)
plt.xlabel('Сумарна частка ВДЕ у системі [% від споживання]', fontsize=12)
plt.ylabel('Значення RoCoF [Гц/с]', fontsize=12)

# анотація про "Хмару нестабільності"
plt.text(data['RES_Share_Percent'].min(), critical_val + 0.2, 'Зона нестабільності',
        color='xkcd:bright red', fontweight='bold', fontsize=10)

plt.xlim(0, 100)

plt.legend()
plt.grid(True, alpha=0.3)
plt.tight_layout()
plt.show()

def plot_risk_profile_from_agg(agg_df):

    percent_cols = ['Critical ROCOF 1 Percent', 'Critical ROCOF 2 Percent',
                    'Critical ROCOF 3 Percent']

```

```

plot_data = agg_df[percent_cols].reset_index().melt(
    id_vars='Country Code',
    var_name='Сценарій',
    value_name='Відсоток'
)

# спрощення назв сценаріїв для легенди
plot_data['Сценарій'] = plot_data['Сценарій'].str.replace('Critical ROCOF ',
                                                         'Сценарій ') \
    .str.replace(' Percent', '')

plt.figure(figsize=(12, 8))
palette = ["#66c2a5", "#fc8d62", "#8da0cb"]

ax = sns.barplot(data=plot_data, x='Country Code', y='Відсоток',
                 hue='Сценарій', palette=palette)

bar_patches = [p for container in ax.containers for p in container]

for p in bar_patches:
    val = p.get_height()

    if val >= 0:
        ax.annotate(f'{val:.1f}%',
                    (p.get_x() + p.get_width() / 2., val),
                    ha='center', va='bottom',
                    xytext=(0, 5), textcoords='offset points',
                    fontsize=10, fontweight='bold')

# використання агрегованого DF для анотацій приросту (мапимо по індексу)
countries = agg_df.index.tolist()
for i, country in enumerate(countries):
    inc2 = agg_df.loc[country, 'Critical ROCOF 2 Increase']
    inc3 = agg_df.loc[country, 'Critical ROCOF 3 Increase']

    max_h = agg_df.loc[country, percent_cols].max()

    info_text = f"Приріст: \nCц2: +{inc2:.1f}% \nCц3: +{inc3:.1f}%"

```

```
plt.text(i, max_h + 10, info_text, ha='center', fontsize=10,
        bbox=dict(facecolor='white', alpha=0.7, edgecolor='gray',
boxstyle='round'))
```

```
plt.title('Порівняльний аналіз ризиків втрати стійкості за сценаріями', fontsize=15)
plt.ylabel('Критичні випадки (RoCoF > 2.0) [%]', fontsize=12)
plt.xlabel('Країна', fontsize=12)
plt.ylim(0, agg_df[percent_cols].max().max() + 25) # запас під текст
plt.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.5)
plt.legend(loc='upper left')
```

```
plt.tight_layout()
plt.show()
```

```
# аналіз стійкості за сценаріями
plot_risk_profile_from_agg(agggregated_rocof_df)
```

```
# аналіз розподілу RoCoF та карти вразливості
plot_rocof_distribution(rocof_df, 'NL', 'Нідерланди', critical_rocof)
for s in [2, 3]:
    plot_vulnerability_heatmap(rocof_df, 'NL', 'Нідерланди', scenario_idx=s)
```

```
plot_rocof_distribution(rocof_df, 'PT', 'Португалія', critical_rocof)
for s in [2, 3]:
    plot_vulnerability_heatmap(rocof_df, 'PT', 'Португалія', scenario_idx=s)
```

```
# аналіз кореляції відсотку генерації ВДЕ в споживанні від RoCoF
plot_correlation_rocof_res(rocof_df, 'PT', 'Португалія',
                           scenario_idx=2)
plot_correlation_rocof_res(rocof_df, 'PT', 'Португалія',
                           scenario_idx=3)
```

```
plot_correlation_rocof_res(rocof_df, 'NL', 'Нідерланди',
                           scenario_idx=3)
```

```
'''
```

```
# перевірка мапи
condition_1 = rocof_df['Country Code'] == 'NL'
condition_2 = rocof_df['End Time'] < 10800
condition_3 = rocof_df['Delta P Percent'] > 25
```

```
map_check = rocof_df.loc[condition_1 & condition_2 & condition_3, :]  
'''
```

графічний аналіз зафіксованого стану генерації на основі ВДЕ

```
def generation_types_analysis(df, estimator_func, title_):  
    df_melted_gen = df.melt(  
        id_vars=['Country Code'],  
        value_vars=cols_to_sum_2,  
        var_name='Тип генерації',  
        value_name='Потужність (МВт)'  
    )  
  
    df_melted_gen['Country Code'] = df_melted_gen['Country Code'].map({  
        'NL': 'Нідерланди', 'PT': 'Португалія'  
    })  
  
    plt.figure(figsize=(10, 6))  
    ax = sns.barplot(  
        data=df_melted_gen,  
        x='Тип генерації', y='Потужність (МВт)', hue='Country Code',  
        estimator=estimator_func, errorbar=None, palette='Set1'  
    )  
  
    ax.set_title(f'Генерація за типами: {title_}', fontsize=14)  
    ax.set_ylabel('Потужність (МВт)')  
    ax.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.7)  
  
    for container in ax.containers:  
        ax.bar_label(container)  
  
    ax.legend(title='Країна')  
    plt.tight_layout()  
    plt.show()  
  
def plot_smoothed_solar(df, country_code, country_name):  
    subset = df[df['Country Code'] == country_code].copy()  
    subset = subset.sort_values('Дата')
```

```

# ковзне середнє (7 днів)
subset['Solar_Smoothed'] = subset.groupby('Час доби',
observed=True)['Solar'].transform(
    lambda x: x.rolling(window=7, center=True).mean()
)

fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 6))

sns.lineplot(
    data=subset, x='Дата', y='Solar_Smoothed', hue='Час доби',
    ax=ax, palette='Set2', linewidth=2.5, errorbar=None
)

ax.xaxis.set_major_locator(mdates.MonthLocator())
ax.xaxis.set_major_formatter(mdates.DateFormatter('%b'))

ax.set_title(f'Динаміка сонячної генерації (7-денне згладжування):
{country_name}',
    fontsize=14)
ax.set_ylabel('Середня потужність (МВт)')
ax.set_xlabel('Місяць')
ax.grid(True, linestyle='--', alpha=0.4)

plt.tight_layout()
plt.show()

# аналіз величини генерацій за типами

generation_types_analysis(generation_load_df, np.median, 'медіанні значення')
generation_types_analysis(generation_load_df, np.max, 'пікові генерації')

# аналіз сонячної генерації

solar_gen_df = generation_load_df[generation_load_df['Час доби'] !=
'Ніч/Інше'].copy()
solar_gen_df['Час доби'] = solar_gen_df['Час
доби'].cat.remove_unused_categories()
solar_gen_df['Дата'] = solar_gen_df['Start Date_gen'].dt.date
solar_gen_daily_df = solar_gen_df.groupby(['Country Code', 'Дата',
'Час доби'])['Solar'].mean().reset_index()

```

```
plot_smoothed_solar(solar_gen_daily_df, "NL", "Нідерланди")  
plot_smoothed_solar(solar_gen_daily_df, "PT", "Португалія")
```

Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

KMP_Сливчак

Автор

Сливчак Гліб Олегович

Науковий керівник / Експерт

Пічкур Володимир Володимирович

ІД документа

333921080

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

**Kyiv National Economic University named after Vadym Hetman
KNEU**

підрозділ

кафедра системного аналізу та кібербезпеки

ЗВІТ

Дата звіту

5/19/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1

25

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2



КП 2

10988

Кількість слів



КЦ

89242

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		10
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		0

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Колір тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://ua.enemv.vn-content/uploads/2018/11/7vit-z-otsinkv-vidnovidnosti-dostatnosti-	10 (0.09%)

[generuyuchyh-potuzhnostej.pdf](https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/11/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyh-potuzhnostej.pdf)

База даних RefBooks



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-----------	--

Домашня база даних



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-----------	--

Програма обміну базами даних



#	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-----------	--

Інтернет (0.09 %)



#	ДЖЕРЕЛО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/11/Zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyh-potuzhnostej.pdf	10 (1) (0.09 %)



Список прийнятих фрагментів

#	ЗМІСТ	КІЛЬКІСТЬ ОДНАКОВИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-------	---------------------------------------