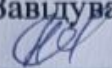


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроенерготехніки та автоматики  
Кафедра теоретичної електротехніки

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО

Завідувач кафедри

 Микола ОСТРОВЕРХОВ

«17» 06 2024 р.

Дипломна робота  
на здобуття ступеня бакалавра  
за освітньо-професійною програмою «Електротехнічні пристрої та  
електротехнологічні комплекси»  
спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка»  
на тему: «Управління електричними мережами  
на основі блокчейн технологій»

Виконав:

студент IV курсу, групи ЕВ-01

Кухарський Андрій Михайлович

Керівник:

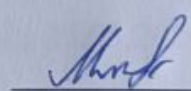
професор кафедри ТЕ, д.т.н., проф.

Щерба М.А.

Рецензент:

старший викладач кафедри ВДЕ, к.т.н., доц.

Болотний М.П.



Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів  
без відповідних посилань.

Студент 

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Факультет  
електроенерготехніки та автоматики  
Кафедра теоретичної електротехніки

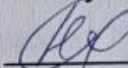
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма "Електротехнічні пристрої та  
електротехнологічні комплекси"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Микола ОСТРОВЕРХОВ

«17» 06 2024 р.

### ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

**Кухарський Андрій Михайлович**

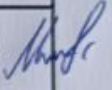
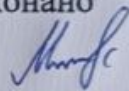
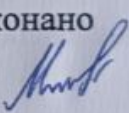
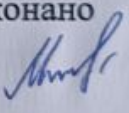
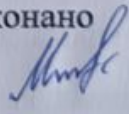
1. Тема роботи «Управління електричними мережами на основі блокчейн технологій», керівник роботи Щерба Максим Анатолійович, професор, доктор технічних наук, затверджені наказом по університету від 25.05.2024 р. N 1969-с
2. Термін подання студентом роботи 10.06.2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: Застосування смарт-контрактів для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій, оцінка переваг та недоліків використання блокчейн-технології в управлінні електричними мережами.
4. Зміст роботи: 1) вступ до блокчейн-технології та її застосування в енергетиці; 2) дослідження та аналіз існуючих моделей управління електричними мережами; 3) застосування смарт-контрактів для автоматизації процесів

відновлення електропостачання після аварій; 4) оцінка переваг та недоліків використання блокчейн-технології в управлінні електричними мережами.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: Програмний код та реалізація смарт-контракту для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій.

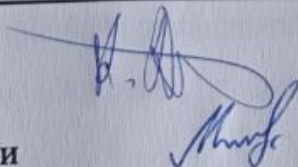
6. Дата видачі завдання: 22.05.2024 р.

Календарний план-графік

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Робота з літературними джерелами	29.05.2024 р.	Виконано 
2	Вступ до блокчейн-технології та її застосування в енергетиці	04.06.2024 р	Виконано 
3	Дослідження та аналіз існуючих моделей управління електричними мережами	06.06.2024 р	Виконано 
4	Застосування смарт-контрактів для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій	06.06.2024 р	Виконано 
5	Оцінка переваг та недоліків використання блокчейн-технології в управлінні електричними мережами	08.06.2024 р	Виконано 

Студент

Керівник роботи



Кухарський Андрій Михайлович

Щерба Максим Анатолійович

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 54 сторінках і містить 4 рисунки та 20 літературних посилань.

У роботі розглянуто особливості використання блокчейн технологій при управлінні електричними мережами для підвищення їх ефективності, надійності та безпеки. Розглянуто основні принципи роботи блокчейну, його переваги та недоліки, можливості використання у електроенергетиці. Проаналізовано існуючі моделі управління електричними мережами, досліджено можливість застосування таких блокчейн-технологій як смарт-контракти для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій. Наведено результати моделювання та оцінки ефективності запропонованих рішень.

**Об’єкт дослідження** – процеси управління електричними мережами, які включають в себе моніторинг, контроль, автоматизацію та відновлення електропостачання після аварій.

**Предмет дослідження** – використання блокчейн-технологій для підвищення ефективності, надійності та безпеки процесів управління електричними мережами, зокрема, застосування смарт-контрактів для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій.

**Мета дослідження** – вдосконалення процесів управління електричними мережами шляхом використання блокчейн-технологій для підвищення їх ефективності, надійності та безпеки процесів, зокрема, застосування смарт-контрактів для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій.

**Результати та їх новизна** - Результати дослідження показали, що використання блокчейн-технологій в управлінні електричними мережами має значні переваги. Зокрема, децентралізоване управління дозволяє знизити

операційні витрати, підвищити надійність та прозорість процесів, а також забезпечити більш ефективний обмін енергією між учасниками мережі.

Новизна роботи полягає в розробці нових моделей та алгоритмів, які враховують специфіку роботи електричних мереж та можливості блокчейн-технологій. Запропоновані рішення дозволяють підвищити ефективність управління та забезпечити стійкість системи до зовнішніх впливів.

**Ключові слова:** Електричні мережі, управління, відновлення електропостачання, блокчейн, смарт-контракти, моделювання.

## ABSTRACT

The thesis consists of 54 pages and contains 4 figures and 20 literary references.

The paper examines the peculiarities of using blockchain technologies in the management of electrical networks to increase their efficiency, reliability and safety. The main principles of blockchain operation, its advantages and disadvantages, possibilities of use in electric power are considered. The existing models of power grid management were analyzed, the possibility of using such blockchain technologies as smart contracts to automate the processes of power supply recovery after accidents was investigated. The results of modeling and evaluation of the effectiveness of the proposed solutions are given.

**The object of research** is power grid management processes, which include monitoring, control, automation and restoration of power supply after accidents.

**The subject of the research** is the use of blockchain technologies to increase the efficiency, reliability and security of power grid management processes, in particular, the use of smart contracts to automate the processes of restoring power supply after accidents.

**The purpose of the research** is to improve the processes of power grid management by using blockchain technologies to increase their efficiency, reliability and security of processes, in particular, the use of smart contracts to automate the processes of restoring power supply after accidents.

**Results and novelty.** The results of the study have shown that the use of blockchain technologies in the management of power grids has significant advantages. In particular, decentralised management can reduce operating costs, increase the reliability and transparency of processes, and ensure a more efficient exchange of energy between network participants.

The novelty of the work lies in the development of new models and algorithms that take into account the specifics of power grids and the capabilities of blockchain technologies. The proposed solutions allow to increase the efficiency of management and ensure the system's resilience to external influences.

**Keywords:** Electric networks, management, power supply restoration, blockchain, smart contracts, modeling.

## ЗМІСТ

ВСТУП	11
РОЗДІЛ 1. ВСТУП ДО БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ	14
1.1 Опис основних принципів роботи блокчейну	14
1.2 Аналіз існуючих та потенційних сфер застосування блокчейн-технологій в енергетичному секторі	17
1.3 Огляд викликів та перспектив впровадження блокчейн-технологій в електроенергетиці	19
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕРЕЖАМИ	23
2.1 Вивчення традиційних моделей централізованого та децентралізованого управління електромережами	23
2.2 Оцінка їх ефективності, надійності та гнучкості	27
2.3 Аналіз проблем та недоліків існуючих моделей	30
РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ СМАРТ-КОНТРАКТІВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІСЛЯ АВАРІЙ	36
3.1 Принципи роботи смарт-контрактів	36
3.2 Моделювання процесів автоматизації	40
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ПЕРЕВАГ ТА НЕДОЛІКІВ ВИКОРИСТАННЯ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЇ В УПРАВЛІННІ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕРЕЖАМИ	49
4.1 Основні переваги використання блокчейн-технології в управлінні електричними мережами	49
4.2 Основні недоліки використання блокчейн-технології в управлінні електричними мережами	50
4.3 Оцінка успішних та неуспішних проєктів використання блокчейн-технології в управлінні електричними мережами	51
5. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ	54
5.1 Висновок	54
5.2 Перспективи розвитку	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ**

ЕТО – Електротехнологічний об'єкт

ЕП – Електричний перетворювач

СМ – Смарт-контракт

## ВСТУП

Електричні мережі є критично важливою інфраструктурою сучасного суспільства, забезпечуючи безперервне постачання електроенергії для промисловості, бізнесу та побутових споживачів. Зі зростанням вимог до надійності, ефективності та безпеки електропостачання з'являється необхідність у впровадженні інноваційних технологій управління.

Однією з таких технологій є блокчейн, яка, завдяки своїм унікальним властивостям, має потенціал революціонізувати управління електричними мережами. Блокчейн-технологія, яка спочатку була розроблена для підтримки криптовалют, таких як Bitcoin, на сьогодні знаходить застосування в різних галузях, включаючи енергетику. Завдяки своїм характеристикам, таким як децентралізація, прозорість, безпека та незмінність записів, блокчейн може значно підвищити ефективність управління електричними мережами. У роботах Грищенко О.В., Загрійчук В.В. та Семененко О.В. (2023) [6, 7], а також інших авторів, таких як M.A. Khan, A. Mahmood, S. Ullah, M.A. Chaudhry, and M. Khalid (2023) [1-7], докладно розглянуто потенційні переваги та виклики застосування блокчейн-технологій в енергетичному секторі.

Однією з ключових переваг блокчейну є можливість децентралізованого управління, що дозволяє уникнути централізованих точок відмови та підвищити стійкість системи. Це особливо актуально для електричних мереж, які потребують високого рівня надійності та швидкого відновлення після аварійних ситуацій. В дослідженнях Семененко О.В., Грищенко В.В. та Загрійчук О.В. (2022) [6, 7] та Lei Chen et al. [8] розглядаються моделі децентралізованого управління електромережами на основі блокчейну, що дозволяють автоматизувати багато процесів і підвищити загальну ефективність системи.

Смарт-контракти, як одна з ключових компонент блокчейн-технології, можуть використовуватися для автоматизації різних процесів в електричних мережах. Наприклад, вони можуть забезпечити автоматичне відновлення

електропостачання після аварій, що зменшує час простою та підвищує задоволеність споживачів. Дослідження, проведені M.A. Khan, A. Mahmood, S. Ullah, M.A. Chaudhry, and M. Khalid (2023) [1-7], демонструють, як смарт-контракти можуть бути інтегровані в моделі розподілу електроенергії, враховуючи поновлювані джерела енергії та гнучкі навантаження.

Проте, впровадження блокчейн-технологій в управління електричними мережами також пов'язане з рядом викликів. Одним з головних є забезпечення масштабованості та продуктивності системи, оскільки великі обсяги даних можуть створювати значне навантаження на блокчейн-мережу. Крім того, важливо враховувати регуляторні аспекти та стандарти безпеки, щоб гарантувати відповідність нових рішень існуючим вимогам.

Метою даної дипломної роботи є вдосконалення процесів управління електричними мережами шляхом використання блокчейн-технологій для підвищення їх ефективності, надійності та безпеки процесів, зокрема, застосування смарт-контрактів для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій.

У роботі розглянуто особливості використання блокчейн технологій при управлінні електричними мережами для підвищення їх ефективності, надійності та безпеки. Розглянуто основні принципи роботи блокчейну, його переваги та недоліки, можливості використання у електроенергетиці. Проаналізовано існуючі моделі управління електричними мережами, досліджено можливість застосування таких блокчейн-технологій як смарт-контракти для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій. Наведено результати моделювання та оцінки ефективності запропонованих рішень.

З огляду на значний потенціал блокчейн-технологій у сфері управління електричними мережами, а також актуальність даної теми серед міжнародної наукової спільноти, результати дослідження можуть мати важливе практичне значення для розвитку енергетичного сектору. Зокрема, впровадження децентралізованих моделей управління може підвищити надійність та

ефективність електромереж, знизити ризики аварій та забезпечити більш стабільне постачання електроенергії споживачам.

# РОЗДІЛ 1. ВСТУП ДО БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ

## 1.1 Опис основних принципів роботи блокчейну

Блокчейн-технологія є однією з найважливіших інновацій останнього десятиліття, яка суттєво вплинула на багато галузей, включаючи фінанси, логістику, охорону здоров'я та енергетику. Основні принципи роботи блокчейну пояснюють його унікальність і широкі можливості застосування.

### Структура блокчейну

Блокчейн являє собою розподілений реєстр, що складається з послідовно з'єднаних блоків. Кожен блок містить запис транзакцій, хеш попереднього блоку, мітку часу і інші метадані. Хеш є криптографічним підписом, який забезпечує цілісність та незмінність даних у блокчейні. Будь-яка зміна даних у попередньому блоці змінює хеш, що автоматично виявляється всіма учасниками мережі.

### Основні компоненти блокчейну

Блокчейн можна описати як ланцюг блоків, де кожен блок містить набір записів або транзакцій. Основні компоненти блокчейну включають:

1. **Блоки:** Кожен блок містить набір транзакцій, хеш попереднього блоку та свій власний хеш. Хеш є криптографічним відбитком, який забезпечує незмінність даних.
2. **Ланцюг блоків:** Блоки зв'язані між собою за допомогою хешів, що утворює ланцюг. Ця структура забезпечує хронологічний порядок та незмінність записів.
3. **Розподілена мережа:** Блокчейн функціонує на основі розподіленої мережі вузлів (ноди), які зберігають копії блокчейну та валідують нові транзакції.

4. **Консенсусний механізм:** Для досягнення згоди щодо валідності транзакцій у розподіленій мережі використовуються різні консенсусні механізми, такі як Proof of Work (PoW) або Proof of Stake (PoS).

### **Децентралізація**

Однією з основних переваг блокчейну є його децентралізована природа. На відміну від централізованих систем, де дані зберігаються на одному сервері, блокчейн розподіляє дані між усіма вузлами (нодами) мережі. Кожен вузол зберігає повну копію всього реєстру, що робить систему стійкою до атак і відмов. Децентралізація також підвищує прозорість, оскільки кожен учасник може перевірити достовірність даних.

### **Консенсусні алгоритми**

Для узгодження змін у блокчейні використовуються консенсусні алгоритми. Вони дозволяють досягти згоди щодо поточного стану реєстру без необхідності довіряти центральному органу. Найпоширенішими алгоритмами консенсусу є Proof of Work (PoW) та Proof of Stake (PoS).

#### **Proof of Work (PoW)**

Цей алгоритм передбачає, що вузли мережі (майнери) виконують складні обчислення для вирішення криптографічної задачі. Перший, хто вирішує задачу, додає новий блок до ланцюга і отримує винагороду. PoW забезпечує безпеку мережі, але вимагає великих обчислювальних ресурсів.

#### **Proof of Stake (PoS)**

У цьому алгоритмі вузли обираються для додавання нових блоків на основі кількості криптовалюти, яку вони тримають як заставу. Це знижує потребу в обчислювальних ресурсах і стимулює учасників до чесноєї поведінки, оскільки їх винагорода залежить від їх частки в мережі.

### **Незмінність і прозорість**

Блокчейн забезпечує незмінність даних: після того, як інформація додана до блоку, її неможливо змінити або видалити без згоди більшості учасників мережі. Це досягається завдяки криптографічним хешам, які зв'язують блоки

між собою. Прозорість забезпечується тим, що кожен учасник має доступ до повної історії транзакцій, що підвищує довіру і сприяє відкритості.

### **Смарт-контракти**

Смарт-контракти є однією з найбільш інноваційних функцій блокчейну. Вони представляють собою програми, які автоматично виконуються при дотриманні певних умов, закодованих у блокчейні. Смарт-контракти дозволяють автоматизувати складні процеси і знижують ризик людських помилок. Вони широко застосовуються у фінансових транзакціях, управлінні активами, логістиці і, звісно, в електроенергетиці.

Однією з ключових переваг блокчейну є можливість створення децентралізованих систем управління, що підвищує стійкість і гнучкість електричних мереж. Використання смарт-контрактів дозволяє автоматизувати процеси розподілу електроенергії, управління навантаженням і відновлення після аварій. Це знижує ризик людських помилок і підвищує загальну ефективність системи.

Інтеграція блокчейну з поновлюваними джерелами енергії також відкриває нові можливості для розвитку електричних мереж. Завдяки прозорості і незмінності даних, блокчейн забезпечує більш точне і надійне відстеження генерації та споживання енергії, що сприяє оптимальному використанню ресурсів і зниженню витрат.

Узагальнюючи можна сказати, що блокчейн-технологія має потенціал значно покращити процеси управління електричними мережами, підвищуючи їхню надійність, ефективність і безпеку. Проте, для повного впровадження цих технологій необхідно подолати ряд викликів, включаючи забезпечення масштабованості та відповідність регулятивним вимогам.

## 1.2 Аналіз існуючих та потенційних сфер застосування блокчейн-технологій в енергетичному секторі

Блокчейн-технології, завдяки своїм унікальним властивостям, таким як децентралізація, прозорість та безпека, набувають все більшого значення у різних галузях. В енергетичному секторі блокчейн може бути використаний для вирішення ряду критичних завдань, пов'язаних з управлінням електромережами, торгівлею енергією, обліком та розподілом ресурсів. У цьому розділі ми розглянемо існуючі та потенційні сфери застосування блокчейн-технологій в енергетиці.

### **Існуючі сфери застосування:**

#### **Розподілена торгівля енергією**

Однією з основних сфер застосування блокчейну є розподілена торгівля енергією. Це передбачає використання блокчейн-платформ для здійснення прямої торгівлі енергією між виробниками та споживачами без посередників. Завдяки смарт-контрактам, транзакції можуть автоматично виконуватись при виконанні певних умов, що забезпечує ефективність та зниження витрат. Прикладом такого застосування є проекти з розподіленої торгівлі електроенергією у мікро мережах, де власники сонячних панелей можуть продавати надлишки енергії своїм сусідам.

#### *SOLshare (Бангладеш)[9]*

У компанії SOLshare [9] реалізував першу в світі ІКТ-забезпечену однорангову мережу торгівлі електроенергією для сільських домогосподарств. Проект об'єднує сонячні домашні системи та централізовані міні-мережі, дозволяючи більше сільських домогосподарств отримувати доступ до відновлюваної електроенергії за нижчою ціною.

*Переваги:* Забезпечення доступу до енергії для 2,570 людей, що живуть поза мережею, і економія 4,970 кг CO<sub>2</sub> на рік.

## **Облік та моніторинг енергоресурсів**

Блокчейн може бути використаний для точного та надійного обліку енергоресурсів. Кожна транзакція записується в блокчейн, що робить її незмінною та доступною для всіх учасників мережі. Це забезпечує прозорість та довіру між учасниками. Прикладом є система обліку споживання енергії в розумних лічильниках, де дані передаються в блокчейн, забезпечуючи точність і запобігаючи маніпуляціям.

### *Blockchain Integration and Its Impact on Renewable Energy [10]*

Ця стаття [10] досліджує інтеграцію блокчейн-технологій у відновлювану енергетику, включаючи можливості моніторингу та обліку енергоресурсів. Розглядаються переваги, такі як прозорість, зниження транзакційних витрат та підвищення ефективності.

### *Application of Blockchain Technology in Energy Trading: A Review [11]*

Огляд статті [11] про використання блокчейн-технологій у торгівлі енергією, включаючи облік та моніторинг енергоресурсів. Розглядаються існуючі платформи та технологічні рішення.

## **Управління децентралізованими енергетичними системами**

Блокчейн може бути використаний для управління децентралізованими енергетичними системами, такими як мікромережі та розподілені генераційні установки. Використовуючи смарт-контракти, можна автоматизувати процеси балансування попиту та пропозиції, а також розподілу енергії між учасниками мережі. Це сприяє підвищенню стабільності та ефективності роботи енергетичних систем.

## **Інтеграція відновлюваних джерел енергії**

Блокчейн-технології можуть сприяти інтеграції відновлюваних джерел енергії у загальну енергетичну систему. Завдяки децентралізованій структурі, блокчейн дозволяє об'єднувати невеликі генераційні установки (наприклад, сонячні панелі та вітряки) у єдину мережу, забезпечуючи їх ефективне

управління та розподіл енергії. Смарт-контракти можуть використовуватися для автоматизації процесів продажу та купівлі енергії між учасниками мережі.

### **Енергоефективність та зниження втрат**

Блокчейн може бути використаний для підвищення енергоефективності та зниження втрат у електромережах. Завдяки прозорості та незмінності даних, блокчейн дозволяє точно відслідковувати всі енергетичні потоки, виявляти та усувати проблемні ділянки. Це може сприяти зниженню втрат енергії при її передачі та розподілі, а також підвищенню загальної ефективності роботи енергетичних систем.

Блокчейн-технології мають значний потенціал для революціонізації енергетичного сектору. Існуючі приклади застосування блокчейну у торгівлі енергією, обліку та управлінні децентралізованими системами вже демонструють його ефективність та переваги. Потенційні сфери застосування, такі як інтеграція відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності та забезпечення кібербезпеки, відкривають нові можливості для розвитку та вдосконалення енергетичних систем. Подальші дослідження та впровадження блокчейн-технологій можуть суттєво покращити ефективність, безпеку та стійкість енергетичної інфраструктури.

## **1.3 Огляд викликів та перспектив впровадження блокчейн-технологій в електроенергетиці**

Впровадження блокчейн-технологій в електроенергетиці обіцяє значні переваги, такі як підвищення ефективності, прозорості та безпеки операцій. Однак, цей процес також супроводжується рядом викликів. У цьому розділі ми розглянемо основні виклики, з якими стикається впровадження блокчейн-технологій в електроенергетиці, а також перспективи їх подолання.

## **Виклики впровадження блокчейн-технологій:**

### **Масштабованість**

Одним з головних викликів є проблема масштабованості. Блокчейн-системи, особливо ті, що базуються на алгоритмах Proof of Work (PoW), можуть обробляти обмежену кількість транзакцій за одиницю часу. Це може призвести до затримок у обробці даних та збільшення витрат на операції. Для вирішення цієї проблеми розробляються нові консенсусні алгоритми, такі як Proof of Stake (PoS) та інші, які забезпечують вищу продуктивність та енергоефективність.

### **Енергоспоживання**

Технології блокчейн, особливо PoW, вимагають значних енергетичних ресурсів. Це суперечить основним цілям енергетичної галузі щодо підвищення енергоефективності та зниження викидів CO<sub>2</sub>. Перехід на менш енергозатратні алгоритми, такі як PoS, може знизити енергоспоживання, але все ще потребує додаткових досліджень та впровадження.

### **Регуляторні питання**

Впровадження блокчейн-технологій в критично важливі інфраструктури, такі як електричні мережі, потребує узгодження з існуючими регуляторними нормами та стандартами. Це може включати питання безпеки, конфіденційності даних та відповідності вимогам законодавства. Відсутність чітких регуляторних рамок може затримати впровадження технологій та створити бар'єри для інновацій.

### **Інтероперабельність**

Ще одним викликом є забезпечення інтероперабельності між різними блокчейн-системами та існуючими енергетичними інфраструктурами. Це включає інтеграцію блокчейн-рішень з розумними лічильниками, системами управління енергоспоживанням та іншими технологіями. Вирішення цієї проблеми потребує розробки стандартів та протоколів, які забезпечать сумісність та ефективну взаємодію.

## **Перспективи впровадження блокчейн-технологій:**

### **Підвищення прозорості та довіри**

Однією з ключових переваг блокчейн-технологій є підвищення прозорості операцій. Усі транзакції записуються в блокчейн і доступні для перевірки усіма учасниками мережі. Це може значно підвищити довіру між учасниками ринку, знизити ризики шахрайства та покращити загальну ефективність роботи енергетичних систем.

### **Децентралізоване управління**

Блокчейн дозволяє реалізувати децентралізовані моделі управління енергетичними ресурсами, що може підвищити гнучкість та стійкість енергетичних систем. Децентралізовані автономні організації (DAO) можуть використовуватися для управління мікромережами, що дозволяє швидше реагувати на зміни попиту та пропозиції енергії, а також зменшити залежність від центральних операторів.

### **Смарт-контракти**

Смарт-контракти є важливим елементом блокчейн-технологій, які автоматизують виконання угод та знижують витрати на їх адміністрування. В енергетичному секторі смарт-контракти можуть використовуватися для автоматизації торгівлі енергією, розподілу ресурсів та управління децентралізованими енергетичними системами.

### **Підвищення кібербезпеки**

Блокчейн-технології забезпечують високий рівень захисту даних завдяки децентралізованій структурі та криптографічним методам. Це може сприяти захисту критично важливих інфраструктур від кібератак та забезпечити безпеку операцій в енергетичному секторі.

Впровадження блокчейн-технологій в електроенергетиці обіцяє значні переваги, але також супроводжується рядом викликів, які потребують вирішення. Масштабованість, енергоспоживання, регуляторні питання та інтероперабельність є основними перешкодами на шляху до широкого впровадження блокчейн-рішень. Однак, перспективи підвищення прозорості,

децентралізованого управління, використання смарт-контрактів та підвищення кібербезпеки створюють значні можливості для покращення ефективності та надійності енергетичних систем. Подальші дослідження та інновації у цій сфері можуть суттєво змінити ландшафт енергетичної галузі та сприяти її сталому розвитку.

### **Висновок до розділу 1**

В розділі було розглянуто основи блокчейн-технології та її потенційні застосування в енергетичному секторі. Ми ознайомилися з основними принципами роботи блокчейну, включаючи його децентралізовану природу, незмінність даних та безпеку транзакцій. Представив аналіз існуючих і потенційних сфер застосування блокчейн-технологій в енергетиці, де було акцентовано на перевагах автоматизації, прозорості та зниженні витрат. Були розглянуті виклики та перспективи впровадження блокчейн-технологій в електроенергетиці, що дало змогу зрозуміти основні бар'єри та можливості для їх подолання.

## РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕРЕЖАМИ

### 2.1 Вивчення традиційних моделей централізованого та децентралізованого управління електромережами

Ефективне управління електричними мережами є критично важливим для забезпечення стабільного та безперебійного постачання електроенергії. Традиційно управління електромережами здійснювалося за централізованою моделлю, проте з розвитком технологій та підвищенням вимог до гнучкості та надійності, все більшу популярність набувають децентралізовані моделі. У цьому розділі ми розглянемо основні принципи та особливості як централізованого, так і децентралізованого управління електромережами.

#### Централізоване управління електромережами

##### Основні принципи

Централізоване управління електромережами передбачає наявність єдиного операційного центру, який відповідає за координацію та контроль всіх аспектів роботи мережі. Центральний диспетчерський пункт збирає дані з усіх частин мережі, аналізує їх і приймає рішення щодо розподілу навантаження, регулювання напруги та частоти, а також управління аварійними ситуаціями.

##### Переваги

- **Стабільність та контроль:** Централізована система дозволяє мати повний контроль над всіма аспектами роботи мережі, що сприяє підтриманню стабільності та надійності.
- **Економія масштабів:** Централізоване управління дозволяє оптимізувати витрати на адміністрування та обслуговування мережі завдяки економії масштабів.
- **Єдиний центр прийняття рішень:** Наявність єдиного центру прийняття рішень забезпечує узгодженість та оперативність в управлінні.

## **Недоліки**

- **Вразливість до збоїв:** Централізована система є вразливою до збоїв, оскільки відмова центрального пункту управління може призвести до порушення роботи всієї мережі.
- **Обмежена гнучкість:** Централізоване управління може бути менш гнучким у порівнянні з децентралізованими моделями, що ускладнює адаптацію до швидких змін у попиті та пропозиції.
- **Затримки у прийнятті рішень:** Процес збору та аналізу даних з усієї мережі може займати значний час, що може призвести до затримок у прийнятті оперативних рішень.

## **Децентралізоване управління електромережами**

### **Основні принципи**

Децентралізоване управління електромережами базується на принципі розподіленого контролю, де кожен елемент мережі (генераційні установки, підстанції, розумні лічильники) має певний ступінь автономії у прийнятті рішень. Така модель дозволяє розподіляти функції управління між кількома вузлами мережі, що підвищує її гнучкість та стійкість.

### **Переваги**

- **Підвищена стійкість:** Децентралізовані системи менш вразливі до збоїв, оскільки кожен вузол може функціонувати автономно навіть у разі відмови інших частин мережі.
- **Гнучкість та адаптивність:** Децентралізовані моделі дозволяють швидко реагувати на зміни в умовах експлуатації, такі як коливання попиту та пропозиції, а також інтеграцію відновлюваних джерел енергії.
- **Зниження навантаження на центральний вузол:** Розподіл функцій управління між різними вузлами дозволяє зменшити навантаження на центральний диспетчерський пункт і покращити загальну ефективність мережі.

### Недоліки

- **Координація та узгодженість:** Забезпечення координації та узгодженості дій між різними вузлами мережі може бути складним завданням, що потребує розробки складних алгоритмів та протоколів.
- **Безпека даних:** Децентралізовані системи можуть бути більш вразливими до кібератак, оскільки кожен вузол мережі є потенційною ціллю для зловмисників.
- **Інвестиції в інфраструктуру:** Впровадження децентралізованих моделей управління потребує значних інвестицій у модернізацію інфраструктури та розробку нових технологій.

### Порівняння централізованих та децентралізованих моделей

Централізовані та децентралізовані моделі управління електромережами мають свої унікальні переваги та недоліки. Вибір між ними залежить від конкретних вимог та умов експлуатації мережі. У деяких випадках може бути доцільним комбіноване використання обох підходів для забезпечення максимальної ефективності та надійності.

У таблиці 2.1 ми можемо побачити порівняння централізованих та децентралізованих моделей.

Таблиця 2.1 – Порівняння централізованих та децентралізованих моделей

Параметр	Централізоване управління	Децентралізоване управління
Контроль	Єдиний центр	Розподілений між вузлами
Стійкість	Вразливість до збоїв	Підвищена стійкість
Гнучкість	Обмежена	Висока

Прийняття рішень	Затримки	Швидка реакція
Інвестиції	Менші початкові витрати	Значні інвестиції у модернізацію
Безпека	Центральний контроль	Підвищена вразливість до кібератак

Вивчення традиційних моделей централізованого та децентралізованого управління електромережами показує, що обидва підходи мають свої переваги та виклики. Централізоване управління забезпечує стабільність та контроль, тоді як децентралізоване управління пропонує більшу гнучкість та стійкість. Поєднання цих підходів може забезпечити оптимальне управління електромережами, що відповідає сучасним вимогам та викликам енергетичного сектора.

## **2.2 Оцінка їх ефективності, надійності та гнучкості**

Ефективність, надійність та гнучкість є ключовими критеріями для оцінки моделей управління електричними мережами. У цьому розділі розглянемо, як традиційні централізовані та сучасні децентралізовані моделі управління відповідають цим критеріям, а також які переваги та недоліки вони мають з точки зору ефективності, надійності та гнучкості.

### **Оцінка ефективності**

#### **Централізоване управління**

Централізовані системи управління електричними мережами, як правило, забезпечують високу ефективність завдяки централізованому збору даних та прийняттю рішень. Оперативний центр отримує всю інформацію про стан мережі та може швидко реагувати на зміни в попиті чи пропозиції

електроенергії. Однак, ефективність може знижуватися через бюрократичні затримки та необхідність обробки великого обсягу даних в одному місці.

### **Децентралізоване управління**

Децентралізовані моделі управління забезпечують високу ефективність завдяки розподілу обробки даних між багатьма вузлами. Кожен вузол мережі може автономно приймати рішення, що зменшує затримки і дозволяє швидко реагувати на зміни в мережі. Крім того, децентралізовані системи краще масштабуються, оскільки додавання нових вузлів не створює значного навантаження на центральний операційний центр.

### **Оцінка надійності**

#### **Централізоване управління**

Централізовані системи можуть бути дуже надійними, оскільки всі рішення приймаються в одному центрі, що дозволяє зберігати узгодженість і контроль над мережею. Однак, централізовані системи мають одну критичну точку відмови: якщо центральний операційний центр виходить з ладу, це може призвести до серйозних збоїв у роботі всієї мережі. Тому забезпечення безперервної роботи операційного центру є важливим завданням.

#### **Децентралізоване управління**

Децентралізовані системи управління мають підвищену надійність завдяки розподіленій структурі. Відмова одного або кількох вузлів не призводить до виходу з ладу всієї системи, оскільки інші вузли можуть продовжувати роботу. Це робить децентралізовані системи більш стійкими до збоїв і атак. Крім того, децентралізовані системи можуть автоматично адаптуватися до змін у мережі, що підвищує їх надійність.

### **Оцінка гнучкості**

#### **Централізоване управління**

Централізовані системи управління електричними мережами можуть бути менш гнучкими через складність та тривалість процесу прийняття рішень.

Будь-які зміни в мережі потребують затвердження централізованого операційного центру, що може займати час і обмежувати можливості швидкої адаптації до нових умов. Однак, централізовані системи можуть бути ефективними у стабільних умовах з невеликими змінами.

### **Децентралізоване управління**

Децентралізовані системи відрізняються високою гнучкістю завдяки здатності швидко реагувати на зміни в мережі. Кожен вузол може автономно приймати рішення, що дозволяє системі адаптуватися до змін у реальному часі. Це особливо важливо в умовах нестабільного попиту на електроенергію або при інтеграції відновлюваних джерел енергії, які можуть мати змінну генерацію. У таблиці 2.2 ми можемо побачити порівняння централізованого та децентралізованого управління.

Таблиця 2.2 – Порівняння централізованого та децентралізованого управління

<b>Критерій</b>	<b>Централізоване управління</b>	<b>Децентралізоване управління</b>
Ефективність	Висока у стабільних умовах	Висока при масштабуванні та змінних умовах
Надійність	Вразливість через єдину точку відмови	Підвищена стійкість до збоїв
Гнучкість	Обмежена через централізоване прийняття рішень	Висока завдяки автономії вузлів

Оцінка ефективності, надійності та гнучкості централізованих і децентралізованих моделей управління електричними мережами показує, що

кожен підхід має свої переваги та недоліки. Централізовані моделі забезпечують високу ефективність у стабільних умовах та повний контроль над мережею, але мають вразливості до збоїв і обмежену гнучкість. Децентралізовані моделі, навпаки, пропонують високу надійність і гнучкість, що дозволяє швидко адаптуватися до змін, але можуть вимагати значних інвестицій у модернізацію інфраструктури.

### **2.3 Аналіз проблем та недоліків існуючих моделей**

Управління електричними мережами є складним і багатогранним завданням, яке вимагає високого рівня надійності, ефективності та гнучкості. Традиційні моделі управління мають свої переваги, але також стикаються з численними проблемами та недоліками, які можуть обмежувати їх ефективність у сучасних умовах. У цьому розділі ми розглянемо основні проблеми та недоліки як централізованих, так і децентралізованих моделей управління електричними мережами.

#### **Проблеми та недоліки централізованих моделей**

##### **Вразливість до збоїв**

Централізовані моделі управління мають єдину критичну точку відмови — центральний операційний центр. Якщо цей центр виходить з ладу, це може призвести до масштабних збоїв у роботі всієї мережі. Це робить систему вразливою до технічних збоїв, кібератак або природних катастроф, що може мати серйозні наслідки для забезпечення безперебійного постачання електроенергії.

##### **Обмежена гнучкість**

Централізовані системи часто є менш гнучкими, оскільки всі рішення приймаються в одному центрі. Це може ускладнювати швидке реагування на зміни в попиті та пропозиції, інтеграцію нових технологій або управління відновлюваними джерелами енергії. Обмежена гнучкість також може

створювати проблеми при виникненні аварійних ситуацій, коли швидкість реакції є критично важливою.

### **Складність масштабування**

Зростання попиту на електроенергію та необхідність інтеграції нових джерел енергії може призвести до необхідності масштабування системи управління. У централізованих моделях це може бути складно та дорого, оскільки потребує розширення можливостей центрального операційного центру, що включає модернізацію обладнання та збільшення персоналу.

### **Затримки у прийнятті рішень**

Процес збору та обробки даних у централізованих системах може займати значний час. Це призводить до затримок у прийнятті рішень, що може негативно вплинути на ефективність управління мережею, особливо в умовах швидких змін або кризових ситуацій.

## **Проблеми та недоліки децентралізованих моделей**

### **Координація та узгодженість**

Однією з головних проблем децентралізованих моделей є забезпечення координації та узгодженості дій між різними вузлами мережі. Відсутність централізованого контролю може призводити до конфліктів у прийнятті рішень та неефективного використання ресурсів. Це вимагає розробки складних алгоритмів та протоколів, які можуть забезпечити синхронізацію дій між різними частинами системи.

### **Безпека даних**

Децентралізовані системи можуть бути більш вразливими до кібератак, оскільки кожен вузол мережі є потенційною ціллю для зловмисників. Забезпечення безпеки даних у таких системах потребує значних ресурсів та застосування передових криптографічних методів. Крім того, децентралізовані системи можуть стикатися з проблемами захисту конфіденційної інформації та забезпечення приватності користувачів.

## Інвестиції в інфраструктуру

Впровадження децентралізованих моделей управління потребує значних інвестицій у модернізацію інфраструктури. Це включає встановлення розумних лічильників, розробку та впровадження нових технологій, а також навчання персоналу. Високі початкові витрати можуть бути стримуючим фактором для багатьох компаній та організацій.

### Відсутність стандартів

На сьогоднішній день існує обмежена кількість стандартів та протоколів для децентралізованих систем управління електричними мережами. Це може ускладнювати інтеграцію різних компонентів системи та забезпечення їх сумісності. Розробка та впровадження загальноприйнятих стандартів є важливим завданням для подальшого розвитку децентралізованих моделей.

У таблиці 2.3 я зробив порівняння централізованого та децентралізованого управління, де є основні критерії а саме:

Вразливість до збоїв, гнучкість, масштабування, затримки у прийнятті рішень, координація, безпека даних, інвестиції в інфраструктуру, стандартизація.

Таблиця 2.3 – Порівняння централізованого та децентралізованого управління

<b>Критерій</b>	<b>Централізоване управління</b>	<b>Децентралізоване управління</b>
Вразливість до збоїв	Висока через єдину точку відмови	Низька завдяки розподіленій структурі
Гнучкість	Обмежена через централізоване прийняття рішень	Висока завдяки автономії вузлів
Масштабування	Складне та дороге	Просте завдяки розподіленій структурі

Затримки у прийнятті рішень	Значні через централізовану обробку даних	Мінімальні завдяки локальній обробці даних
Координація	Висока завдяки централізованому контролю	Складна через необхідність синхронізації
Безпека даних	Висока завдяки централізованому контролю	Може бути вразливою без належного захисту
Інвестиції в інфраструктуру	Менші початкові витрати	Значні початкові витрати
Стандартизація	Висока завдяки централізованому контролю	Відсутність загальноприйнятих стандартів

Аналіз проблем та недоліків існуючих моделей управління електричними мережами показує, що як централізовані, так і децентралізовані моделі мають свої унікальні виклики. Централізовані моделі, хоч і забезпечують високий рівень контролю та узгодженості, мають вразливості до збоїв, обмежену гнучкість та складність масштабування. Децентралізовані моделі, навпаки, пропонують високу гнучкість та стійкість до збоїв, але стикаються з проблемами координації, безпеки даних та значними початковими інвестиціями. Оптимальним рішенням може бути комбіноване використання обох підходів для забезпечення максимальної ефективності та надійності управління електричними мережами.

## Висновок до розділу 2

У цьому розділі, було проведено комплексний аналіз існуючих моделей управління електричними мережами, що включає як традиційні централізовані, так і сучасні децентралізовані підходи. Ми розглянули основні принципи роботи централізованих та децентралізованих систем управління електричними мережами. Традиційні централізовані моделі, що засновані на централізованих диспетчерських пунктах, забезпечують контроль та управління великими енергетичними системами, проте мають значні недоліки, зокрема високу вразливість до атак та обмежену гнучкість. При оцінці ефективності, надійності та гнучкості різних моделей управління було виявлено, що децентралізовані підходи мають значні переваги перед централізованими моделями. Децентралізовані системи управління демонструють вищу гнучкість у відповідь на коливання попиту та пропозиції енергії, що є критично важливим у сучасних умовах збільшення частки відновлюваних джерел енергії. Попри значні переваги, існуючі моделі управління електричними мережами також мають певні недоліки та проблеми. Централізовані системи страждають від високої вразливості до кібератак, що може призвести до масштабних відключень та порушень у роботі енергетичної системи. Також вони мають обмежену гнучкість і не завжди здатні швидко реагувати на зміни в умовах генерації та споживання енергії.

## **РОЗДІЛ 3. ЗАСТОСУВАННЯ СМАРТ-КОНТРАКТІВ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІСЛЯ АВАРІЙ**

Відновлення електропостачання після аварій є критично важливим завданням для забезпечення надійності та безперебійної роботи електричних мереж. Традиційні методи відновлення можуть бути тривалими та ресурсоємними, що призводить до значних незручностей для споживачів та економічних втрат. Використання блокчейн-технологій, зокрема смарт-контрактів, пропонує нові можливості для автоматизації процесів відновлення електропостачання, підвищуючи їх ефективність, швидкість та надійність.

### **3.1 Принципи роботи смарт-контрактів**

#### **Що таке смарт-контракти?**

Смарт-контракти — це самовиконувані контракти з умовами угоди, записаними безпосередньо в програмному коді. Вони працюють на блокчейн-платформах, забезпечуючи автоматичне виконання умов контракту, коли виконуються визначені тригерні умови. Це зменшує необхідність в посередниках, знижує ризик людської помилки та забезпечує прозорість і незмінність виконання.

Смарт-контракти складаються з коду, який визначає логіку виконання контракту, та зберігаються в блокчейні, де їх не можна змінити після створення. Вони можуть автоматично виконувати, перевіряти та забезпечувати виконання умов контракту без необхідності втручання третіх сторін.

#### **Як працюють смарт-контракти?**

Смарт-контракти виконують певні дії автоматично, коли настають визначені умови. Наприклад, у випадку аварії в електромережі, смарт-контракт може автоматично ініціювати процес відновлення, викликаючи відповідні дії від різних учасників мережі (операторів, постачальників послуг, ремонтних бригад) на основі заздалегідь визначених сценаріїв.

1. **Створення контракту:** Програміст або користувач пише код смарт-контракту, який містить умови та логіку виконання. Цей код пишеться на спеціальній мові програмування, наприклад, Solidity для блокчейну Ethereum.
2. **Розгортання контракту:** Після написання контракту він розгортається в блокчейні. Це означає, що контракт стає частиною розподіленої мережі, і його копія зберігається на кожному вузлі (ноду) мережі.
3. **Виконання контракту:** Коли виконуються умови, визначені у контракті, він автоматично запускається. Наприклад, якщо смарт-контракт передбачає переказ грошей, то при виконанні всіх умов контракт ініціює цей переказ.
4. **Активация подій:** Смарт-контракти можуть генерувати події, які сигналізують про зміну стану або виконання певних дій. Ці події можуть бути використані іншими контрактами або зовнішніми системами для подальшої обробки інформації.
5. **Безпека та незмінність:** Смарт-контракти незмінні після розгортання. Це забезпечує високий рівень безпеки, оскільки ніхто не може змінити умови контракту або його логіку після того, як він був створений. Усі дії смарт-контракту фіксуються в блокчейні, що забезпечує прозорість і довіру між учасниками.
6. **Автономність та самовиконання:** Смарт-контракти виконуються автономно. Як тільки визначені умови виконані, контракт автоматично ініціює відповідні дії без необхідності втручання людського фактора. Це дозволяє значно знизити витрати на адміністрування та виключити можливість помилок і шахрайства.

## **Переваги використання смарт-контрактів у відновленні електропостачання**

### **Швидкість реакції**

Смарт-контракти дозволяють значно скоротити час реакції на аварії в електромережі. Завдяки автоматизації процесів, дії з відновлення електропостачання можуть бути ініційовані миттєво, без затримок, пов'язаних з необхідністю людського втручання.

### **Зниження ризику людських помилок**

Автоматизація процесів за допомогою смарт-контрактів знижує ризик людських помилок, які можуть виникати при традиційному ручному управлінні аварійними ситуаціями. Це забезпечує більш точне та своєчасне виконання необхідних дій.

### **Прозорість та відстежуваність**

Всі дії, виконані за допомогою смарт-контрактів, записуються в блокчейн, що забезпечує їх прозорість та відстежуваність. Це дозволяє всіма учасниками мережі бачити, які дії були виконані, ким і коли, що підвищує довіру та забезпечує можливість проведення аудитів.

### **Реальні проєкти та інтеграції**

Проєкт [12] Grid+ є компанією, яка використовує блокчейн-технології для управління енергетичними ресурсами. Вони розробили платформу, яка використовує смарт-контракти для автоматизації процесів управління та відновлення електропостачання. Смарт-контракти Grid+ забезпечують автоматичну реакцію на аварії, викликаючи необхідні дії для відновлення електропостачання на основі заздалегідь визначених умов.

#### *Duke Energy Florida* [13]

Проєкт [13] Duke Energy Florida впровадила систему самовідновлювальної мережі, яка використовує автоматизовані технології для швидкого виявлення та відновлення після аварій. Під час урагану Ідалія ця система допомогла уникнути понад 17 000 відключень електроенергії та

зберегла понад 5 мільйонів хвилин безвідмовної роботи для клієнтів. Використання смарт-контрактів дозволило швидко ідентифікувати проблемні ділянки та автоматично перемикати енергетичні шляхи для відновлення електропостачання

### *Brooklyn Microgrid* [14]

Проект [14] Brooklyn Microgrid (BMG) у Нью-Йорку є одним із найвідоміших прикладів використання блокчейн-технологій для управління мікро мережею. BMG використовує блокчейн для створення енергетичного ринку, де місцеві виробники сонячної енергії можуть продавати надлишки енергії своїм сусідам. Смарт-контракти автоматизують транзакції, забезпечуючи точність та прозорість обміну енергією

Проект [15,16] Quartierstrom у Швейцарії залучив 37 домогосподарств для створення локальної сонячної мікромережі з використанням блокчейн-технологій. Учасники використовували смарт-контракти для автоматизації енергетичних транзакцій, що дозволило знизити витрати на управління та підвищити ефективність обміну енергією. Кожне домогосподарство отримало комп'ютер з вбудованими електролічильниками та блокчейн-програмним забезпеченням. На рисунку 3.1 можна побачити роботу та ідею проєкта Quartierstrom [15,16]

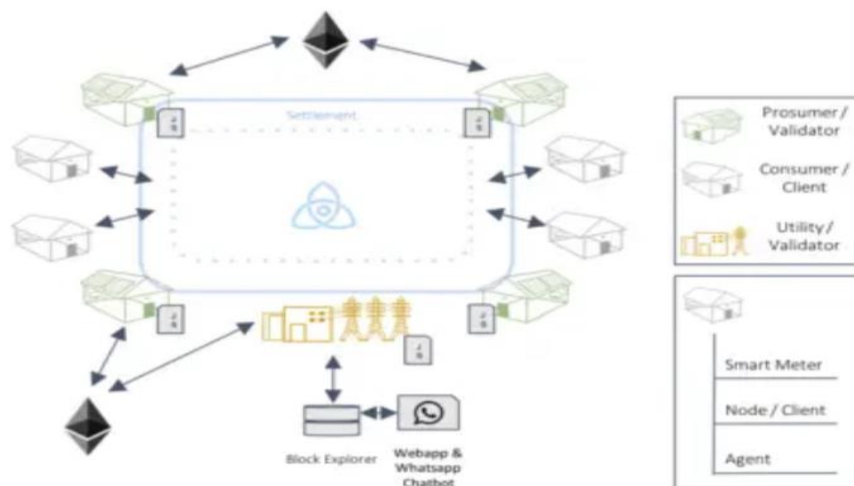


Рисунок 3.1 - Схема проєкта Quartierstrom

## 3.2 Моделювання процесів автоматизації

### Опис та створення смарт-контракту "EnergyRestoration"

У сучасному світі управління електричними мережами вимагає високого рівня автоматизації та ефективності, особливо у випадках аварійних ситуацій. Смарт-контракти, що працюють на блокчейн-технологіях, пропонують надійний спосіб автоматизації та децентралізації процесів відновлення електропостачання. В цьому розділі я опишу розроблений смарт-контракт "EnergyRestoration", який автоматизує процес виклику відповідних служб при виникненні аварій та надзвичайних ситуацій.

#### Опис смарт-контракту

Смарт-контракт "EnergyRestoration" написаний на мові програмування Solidity та працює на блокчейні Ethereum. Контракт реалізує дві основні функції: виклик ремонтної бригади у випадку аварії та виклик ремонтної бригади, пожежників та інших служб у випадку влучення ракети.

#### Структура смарт-контракту

##### 1. Події (Events)

- ``RepairTeamCalled``: подія, що викликається при виклику ремонтної бригади.
- ``EmergencyServicesCalled``: подія, що викликається при виклику аварійних служб (пожежників).

##### 2. Змінні (Variables)

- ``repairTeam``: адреса ремонтної бригади.
- ``fireDepartment``: адреса пожежної служби.
- ``otherServices``: адреса інших аварійних служб.

##### 3. Конструктор (Constructor)

Конструктор контракту ініціалізує адреси всіх служб, які будуть викликатися у випадку аварій та надзвичайних ситуацій. Адреси передаються в конструктор під час розгортання контракту.

##### 4. Функції (Functions)

- `reportOutage(string memory location)`: функція для виклику ремонтної бригади у випадку аварії. Викликає подію `RepairTeamCalled`.

- `reportRocketHit(string memory location)`: функція для виклику ремонтної бригади, пожежників та інших служб у випадку влучання ракети. Викликає події `RepairTeamCalled` та `EmergencyServicesCalled`.

### Код смарт-контракту

```

```solidity
// SPDX-License-Identifier: MIT
pragma solidity ^0.8.0;

contract EnergyRestoration {

    // Події для відстеження викликів
    event RepairTeamCalled(string location);
    event EmergencyServicesCalled(string location);

    // Адреси відповідальних служб
    address public repairTeam;
    address public fireDepartment;
    address public otherServices;

    // Встановлення адрес служб при розгортанні контракту
    constructor(address _repairTeam, address _fireDepartment, address
    _otherServices) {
        repairTeam = _repairTeam;
        fireDepartment = _fireDepartment;
        otherServices = _otherServices;
    }

    // Функція виклику ремонтної бригади при аварії

```

```

function reportOutage(string memory location) public {
    // Виклик ремонтної бригади
    emit RepairTeamCalled(location);
}
// Функція виклику служб при влучанні ракети
function reportRocketHit(string memory location) public {
    // Виклик ремонтної бригади
    emit RepairTeamCalled(location);
    // Виклик пожежників
    emit EmergencyServicesCalled(location);
}
}
...

```

## Деталізація функціоналу

### 1. Події

Події є важливими елементами смарт-контракту, оскільки дозволяють відстежувати виконання функцій та взаємодію з контрактом. Подія `RepairTeamCalled` сповіщає про виклик ремонтної бригади, тоді як `EmergencyServicesCalled` сповіщає про виклик пожежної служби та інших аварійних служб.

### 2. Адреси відповідальних служб

Контракт зберігає адреси трьох основних служб: ремонтної бригади, пожежної служби та інших аварійних служб. Ці адреси встановлюються під час розгортання контракту та можуть бути змінені за необхідності.

### 3. Функції виклику

- `reportOutage`: ця функція викликається у разі виявлення аварії в електричній мережі. Вона приймає один параметр — `location`, який вказує на місце аварії. При виклику цієї функції генерується подія `RepairTeamCalled`.

- `reportRocketHit`: ця функція викликається у разі влучання ракети в інфраструктуру. Вона також приймає параметр `location`, який вказує на місце

події. При виклику цієї функції генеруються події `RepairTeamCalled` та `EmergencyServicesCalled`.

### Запуск смарт контракта в Remix IDE

На Рисунку 3.2 а) показано код та моделювання 1 ситуації, коли сталася поломка на “Електростанція в Києві”

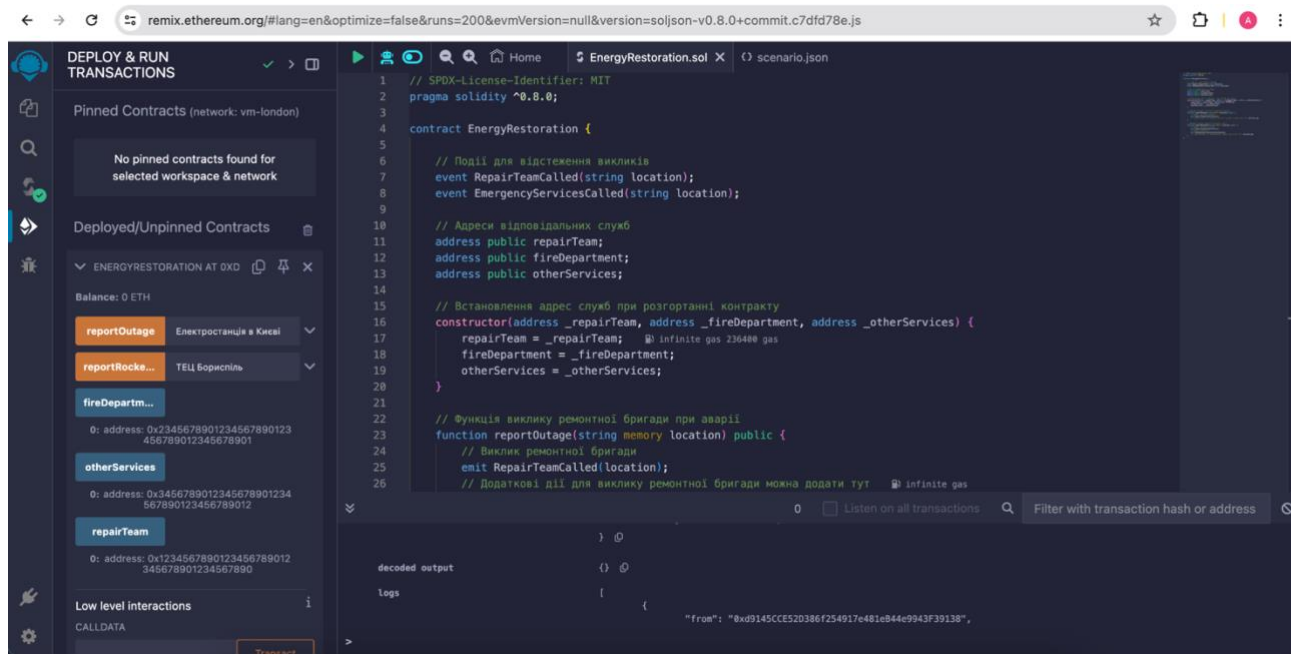


Рисунок 3.2 а)

На рисунку 3.2 б) ,ми бачимо що після поломки на станції “Електростанція в Києві”, смарт контракт відразу викликає ремонтну бригаду ("event": "RepairTeamCalled")

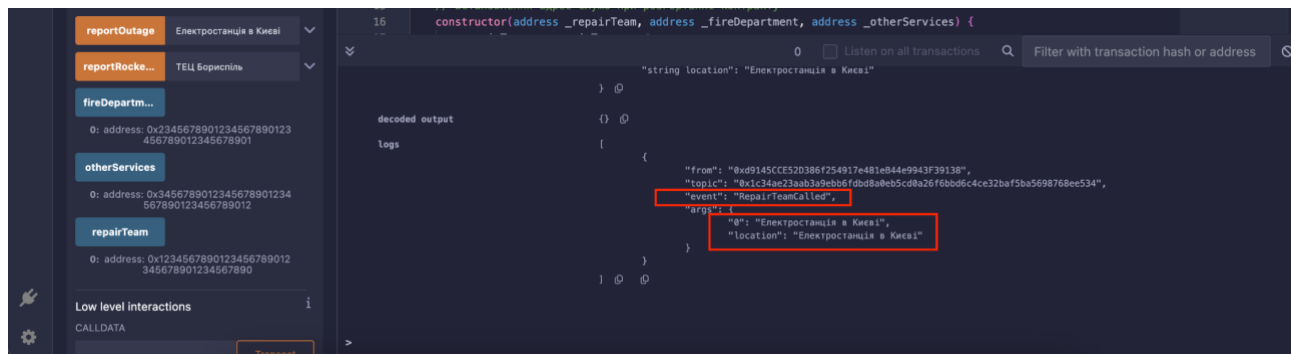


Рисунок 3.2 б)

На рисунку 3.2 в), ми бачимо що після влучання ракети, смарт контракт відразу викликає ремонтну бригаду і пожежників ("event": "RepairTeamCalled" і "event": "EmergencyServicesCalled")

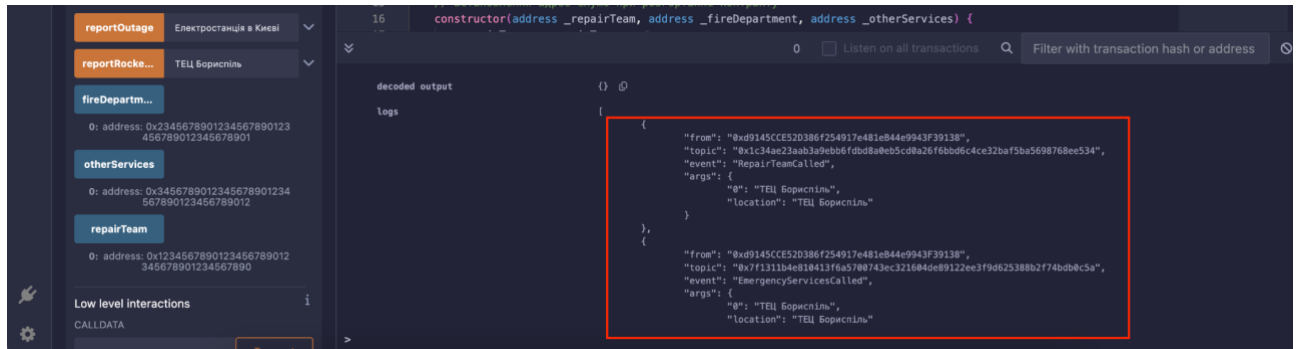


Рисунок 3.2 в)

Смарт-контракт "EnergyRestoration" демонструє можливості використання блокчейн-технологій для автоматизації процесів управління електричними мережами. Завдяки використанню смарт-контрактів можна значно підвищити ефективність і швидкість реакції на аварійні ситуації, знижуючи ризики та підвищуючи надійність системи. Цей контракт є прикладом інноваційного підходу до управління критично важливою інфраструктурою та може бути використаний як основа для подальших досліджень та розробок у цій сфері.

### **Можливе реальне застосування смарт-контракту "EnergyRestoration"**

Смарт-контракт "EnergyRestoration" демонструє використання блокчейн-технологій для автоматизації та підвищення ефективності управління електричними мережами в надзвичайних ситуаціях. Розглянемо, як цей контракт може бути застосований у реальних умовах та які переваги він може принести.

#### **Реальні сценарії застосування:**

*Автоматизація аварійних викликів*

**Сценарій:** У випадку аварії в електричній мережі, наприклад, обриву лінії або виходу з ладу трансформатора, смарт-контракт може автоматично викликати ремонтну бригаду.

**Переваги:** Знижує час реагування на аварію, зменшує кількість помилок, пов'язаних з людським фактором, та підвищує ефективність процесу відновлення.

*Реакція на надзвичайні ситуації*

**Сценарій:** У випадку влучання ракети або іншого серйозного інциденту, контракт може автоматично викликати не тільки ремонтну бригаду, але й пожежну службу та інші аварійні служби.

**Переваги:** Забезпечує швидку та координовану реакцію на критичні ситуації, що може врятувати життя та зменшити матеріальні збитки.

## **Переваги використання смарт-контракту**

### **Швидкість та ефективність**

Автоматизація процесів виклику служб дозволяє миттєво реагувати на аварії та надзвичайні ситуації, знижуючи час простою та втрати енергії.

### **Прозорість та відстежуваність**

Завдяки незмінному реєстру блокчейну всі виклики та дії можна легко відстежувати, що підвищує прозорість операцій та довіру між учасниками.

### **Зниження ризику людських помилок**

Автоматичне виконання контракту знижує ризик помилок, пов'язаних з людським фактором, що підвищує надійність системи.

### **Децентралізація управління**

Використання блокчейну дозволяє децентралізувати управління процесами, що робить систему стійкою до атак та відмов.

### **Виклики та обмеження**

### **Інтеграція з існуючими системами**

Інтеграція смарт-контрактів з існуючими системами управління електромережами може вимагати значних зусиль та ресурсів. Необхідно забезпечити сумісність з поточною інфраструктурою та технологіями.

### **Регуляторні питання**

Використання блокчейну в критичній інфраструктурі потребує узгодження з регуляторними органами та дотримання нормативних вимог. Це може вимагати додаткових зусиль для отримання необхідних дозволів та сертифікацій.

*The Potential of Blockchain Technology and Smart Contracts in the Energy Sector* [17]

Стаття [17] аналізує потенціал блокчейн-технологій та смарт-контрактів у енергетичному секторі. Вона розглядає поточний стан технологій, їх вплив на енергетичні ринки та можливість внесення вкладу в сталий розвиток.

*Blockchain Smart Contracts for Energy Markets* [18]

У цій статті [18] досліджуються можливості використання блокчейн-смарт-контрактів у транзакційних системах управління енергією. Обговорюються архітектура системи, проекти реалізації та економічні аспекти.

### **Висновок до розділу 3**

Розглянутий матеріал демонструє, що смарт-контракти є потужним інструментом для автоматизації процесів управління електричними мережами, зокрема для відновлення електропостачання після аварій. Їх використання дозволяє забезпечити швидке і точне виконання дій, необхідних для відновлення нормальної роботи мережі, що значно підвищує її надійність та ефективність. Використання смарт-контрактів також сприяє зниженню операційних витрат, оскільки вони усувають потребу в посередниках та зменшують вплив людського фактора. Висока прозорість та незмінність даних, що зберігаються в блокчейні, дозволяють створити довірчі відносини між усіма учасниками енергетичної системи. Проте, впровадження смарт-контрактів в

енергетичну галузь стикається з певними викликами, такими як необхідність стандартизації, забезпечення безпеки та інтеграції з існуючими системами. Незважаючи на це, перспективи розвитку цієї технології виглядають надзвичайно обнадійливими, особливо в умовах зростаючої потреби в децентралізованих та гнучких енергетичних системах.

## **РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ПЕРЕВАГ ТА НЕДОЛІКІВ ВИКОРИСТАННЯ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГІЇ В УПРАВЛІННІ ЕЛЕКТРИЧНИМИ МЕРЕЖАМИ**

Блокчейн-технології стають дедалі популярнішими у різних галузях, включаючи енергетичний сектор. Використання блокчейну для управління електричними мережами пропонує багатообіцяючі можливості, такі як підвищення ефективності, безпеки та прозорості. Однак, існують також виклики та недоліки, які потребують уваги. У цьому розділі ми розглянемо основні переваги та недоліки використання блокчейн-технології в управлінні електричними мережами.

### **4.1 Основні переваги використання блокчейн-технології в управлінні електричними мережами**

#### **Підвищена прозорість та відстежуваність**

Блокчейн забезпечує прозорість всіх транзакцій, оскільки всі дані записуються в незмінний реєстр, доступний для всіх учасників мережі. Це дозволяє легко відстежувати всі операції та забезпечує довіру між учасниками. Наприклад, у системах децентралізованої торгівлі енергією кожен учасник може бачити, хто виробив і спожив енергію, що підвищує прозорість процесів.

#### **Безпека даних**

Блокчейн використовує криптографічні методи для захисту даних, що робить його стійким до кібератак і маніпуляцій. Децентралізована природа блокчейну означає, що відсутня єдина точка відмови, що підвищує загальну безпеку системи. Це особливо важливо для критично важливої інфраструктури, такої як електричні мережі.

#### **Автоматизація процесів**

Смарт-контракти, які працюють на блокчейні, дозволяють автоматизувати різні процеси, знижуючи необхідність в ручному втручанні. Це може включати

автоматичну торгівлю енергією, балансування навантаження та відновлення після аварій. Наприклад, в мікромережах смарт-контракти можуть автоматично регулювати обмін енергією між домогосподарствами на основі заздалегідь визначених умов.

### **Зниження транзакційних витрат**

Блокчейн дозволяє знизити транзакційні витрати за рахунок усунення посередників. У традиційних системах управління енергією часто необхідні численні посередники для обробки транзакцій та забезпечення довіри. Блокчейн дозволяє обійтися без них, знижуючи витрати на операції.

## **4.2 Основні недоліки використання блокчейн-технології в управлінні електричними мережами**

### **Масштабованість**

Одним з головних викликів блокчейну є проблема масштабованості. Традиційні блокчейн-системи, такі як Bitcoin і Ethereum, можуть обробляти обмежену кількість транзакцій за одиницю часу, що може бути недостатньо для великих електричних мереж. Розробка нових алгоритмів консенсусу, таких як Proof of Stake (PoS) або інших рішень, може допомогти вирішити цю проблему, але це потребує додаткових досліджень та впровадження.

### **Енергоспоживання**

Деякі алгоритми консенсусу, такі як Proof of Work (PoW), використовуються у блокчейн-системах, вимагають значних енергетичних ресурсів. Це може бути контрпродуктивним у контексті енергетичного сектору, де одна з головних цілей - зниження енергоспоживання та викидів CO<sub>2</sub>. Переход на менш енерговитратні алгоритми, такі як PoS, може допомогти, але потребує технічних змін.

### **Регуляторні питання**

Використання блокчейну в управлінні електричними мережами повинно відповідати існуючим регуляторним нормам та стандартам. Відсутність чітких

регуляторних рамок може створювати перешкоди для впровадження блокчейн-рішень. Регулятори повинні розробити нові стандарти та правила для інтеграції блокчейн-технологій у критично важливі інфраструктури.

### **Інтероперабельність**

Забезпечення взаємодії блокчейн-систем з існуючими інфраструктурами та технологіями є ще одним викликом. Необхідно розробити стандарти та протоколи для інтеграції блокчейн-рішень з традиційними системами управління електричними мережами. Це включає технічні, операційні та бізнес-аспекти, що потребують значних інвестицій та координації.

## **4.3 Оцінка успішних та неуспішних проєктів використання блокчейн-технологій в управлінні електричними мережами**

### *1. Power Ledger [19]*

- **Країна:** Австралія
- **Опис:** Power Ledger [19] — це платформа, яка використовує блокчейн для децентралізованої торгівлі електроенергією та відстеження її походження. Вони впровадили рішення, що дозволяє споживачам продавати надлишки сонячної енергії своїм сусідам, використовуючи смарт-контракти для автоматизації транзакцій. Платформа також підтримує інтеграцію з електромобілями та мікро мережами, забезпечуючи гнучке управління енергетичними ресурсами.
- **Результати:** Впровадження Power Ledger дозволило підвищити ефективність та прозорість енергетичних ринків, а також знизити транзакційні витрати.

### *2. TenneT [20]*

- **Країни:** Нідерланди та Німеччина
- **Опис:** TenneT [20], оператор системи передачі електроенергії, запусив кілька пілотних проєктів із використання блокчейну для управління гнучкістю енергетичних ресурсів, таких як електромобілі та домашні

аккумулятори. Проекти були реалізовані у співпраці з IBM і постачальниками енергії Vandebron та Sonnen.

- **Результати:** Пілотні проекти були успішними, зокрема у запобіганні перевантаженню мережі та підтримці балансу між попитом і пропозицією. Успіх цих проектів дозволив TenneT розширити використання блокчейн-технологій і залучити більше учасників до енергетичного ринку.

## Неуспішні проекти

### 1. *Grid Singularity*

- **Країна:** Австрія
- **Опис:** Grid Singularity розробляв платформу для децентралізованого управління енергетичними ресурсами за допомогою блокчейн-технологій. Метою проекту було створення відкритої платформи для обміну енергією та відстеження транзакцій.
- **Проблеми:** Проект зіткнувся з проблемами масштабованості та інтеграції з існуючими енергетичними системами. Також виникли складнощі з регуляторними вимогами та забезпеченням безпеки даних.
- **Результати:** Проект не зміг досягти запланованих результатів через технічні та регуляторні обмеження.

### 2. *WePower*

- **Країна:** Литва
- **Опис:** WePower планував використовувати блокчейн для створення платформи торгівлі відновлювальною енергією, де виробники могли б продавати свою енергію безпосередньо споживачам за допомогою смарт-контрактів.
- **Проблеми:** Компанія зіткнулася з викликами щодо забезпечення стабільності платформи та дотримання регуляторних вимог. Також виникли труднощі з фінансуванням та залученням користувачів.

- **Результати:** Проект був зупинений через нездатність подолати технічні та фінансові бар'єри.

#### **Висновок розділу 4**

Блокчейн-технології пропонують багато переваг для управління електричними мережами, включаючи підвищену прозорість, безпеку, автоматизацію процесів та зниження транзакційних витрат. Однак, існують також значні виклики, такі як масштабованість, енергоспоживання, регуляторні питання та інтероперабельність. Для повного використання потенціалу блокчейн-технологій необхідно вирішити ці питання, що вимагатиме спільних зусиль дослідників, розробників, регуляторів та інших зацікавлених сторін

Використання блокчейн-технологій в управлінні електричними мережами має значний потенціал, але також стикається з численними викликами. Успішні проекти, такі як Power Ledger і TenneT, демонструють можливості покращення ефективності, прозорості та гнучкості енергетичних систем. Однак, неуспішні спроби, такі як Grid Singularity та WePower, підкреслюють важливість вирішення питань масштабованості, інтеграції та регуляторного відповідності для досягнення успіху.

## 5. ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

### 5.1 Висновок

Продемонстровано варіант вдосконалення процесів управління електричними мережами шляхом використання блокчейн-технологій для підвищення їх ефективності, надійності та безпеки процесів, зокрема, шляхом застосування смарт-контрактів для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій.

Досліджено та змодельовано процеси управління електричними мережами на основі блокчейн технологій. Основна увага була приділена аналізу існуючих та потенційних сфер застосування блокчейн у енергетичному секторі, а також моделюванню смарт-контрактів для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій. В результаті проведеного дослідження було встановлено, що блокчейн технології мають значний потенціал для підвищення ефективності, надійності та прозорості управління електричними мережами.

Основні переваги блокчейн технологій в енергетиці включають децентралізований підхід до управління, зниження витрат на обслуговування мережі, підвищення безпеки даних та автоматизацію транзакцій за допомогою смарт-контрактів. Аналіз існуючих моделей управління електричними мережами показав, що традиційні централізовані системи мають низку недоліків, таких як високі витрати на управління, вразливість до атак та обмежена гнучкість. Децентралізовані моделі на основі блокчейн можуть вирішити ці проблеми, забезпечуючи більш стійку та ефективну роботу електромереж.

Застосування смарт-контрактів для автоматизації процесів відновлення електропостачання після аварій дозволяє значно скоротити час реагування та мінімізувати втрати. Смарт-контракти можуть автоматично виконувати необхідні дії для ізоляції проблемних ділянок та перерозподілу енергії, що підвищує надійність системи.

## 5.2 Перспективи розвитку

Перспективи розвитку блокчейн технологій в управлінні електричними мережами є надзвичайно широкими. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на наступні напрямки:

**1. Розширення застосування смарт-контрактів:** Подальший розвиток та вдосконалення смарт-контрактів для різних аспектів управління електромережами, таких як прогнозування попиту, управління енергетичними потоками, та інтеграція відновлюваних джерел енергії.

**2. Інтероперабельність з іншими технологіями:** Дослідження можливостей інтеграції блокчейн з іншими передовими технологіями, такими як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI) та великі дані (Big Data) для створення більш комплексних та ефективних систем управління електромережами.

**3. Системи розумного управління енергією:** Розробка нових децентралізованих систем управління, які б включали функції оптимізації споживання енергії в реальному часі, адаптації до змін умов та автоматичного реагування на аварійні ситуації.

**4. Пілотні проєкти та реальні впровадження:** Проведення пілотних проєктів для тестування та вдосконалення блокчейн технологій у реальних умовах, з метою виявлення потенційних проблем та їх усунення до широкомасштабного впровадження.

**5. Стандартизація та нормативне регулювання:** Важливим аспектом є розробка стандартів та нормативних актів, які б регулювали використання блокчейн технологій у енергетиці, забезпечуючи безпеку, прозорість та відповідність вимогам законодавства.

**6. Навчання та підготовка кадрів:** Розвиток освітніх програм та тренінгів для підготовки фахівців з управління електромережами з використанням блокчейн технологій. Це сприятиме швидкому впровадженню нових технологій та підвищенню рівня знань у цій галузі.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що блокчейн технології мають потенціал стати ключовим елементом в управлінні сучасними електричними мережами, забезпечуючи більш ефективне, надійне та безпечне управління. Подальші дослідження та розвиток у цій галузі сприятимуть створенню інноваційних рішень, які відповідають потребам сучасного суспільства та вимогам сталого розвитку.

**Висновок:** Загалом, використання блокчейн-технології в управлінні електричними мережами має великий потенціал для підвищення ефективності, прозорості та надійності. Децентралізований характер блокчейну дозволяє усунути посередників, зменшуючи операційні витрати, а також забезпечує високу безпеку та незмінність даних. Проте, високі витрати на енергію, проблеми масштабування та складність інтеграції з існуючими системами залишаються важливими викликами. Подальші дослідження та розробки повинні бути спрямовані на подолання цих викликів та оптимізацію використання блокчейн-технологій в енергетичному секторі. Незважаючи на наявні труднощі, успішні проєкти показують, що блокчейн може стати ключовим компонентом майбутніх енергетичних систем, забезпечуючи більшу гнучкість, стійкість та ефективність управління електричними мережами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M.A. Khan, A. Mahmood, S. Ullah, M.A. Chaudhry, and M. Khalid, "Blockchain-Based Decentralized Power Dispatching Model for Power Grids Integrated with Renewable Energy and Flexible Load", 2023.
2. H.M. Farooqi, M.A. Khan, S. Ullah, M.A. Chaudhry, and M. Khalid, "A Survey on Blockchain for Smart Grid Management, Control, and Operation", 2023.
3. M.A. Khan, M.A. Chaudhry, M. Khalid, A. Mahmood, and S. Ullah, "Blockchain-Based Energy Trading System for Microgrids: A Comprehensive Review", 2022.
4. M.A. Khan, M.A. Chaudhry, S. Ullah, A. Mahmood, and M. Khalid, "Blockchain Technology for Smart Grid: Applications, Challenges, and Future Directions", 2021.
5. M.A. Khan, M.A. Chaudhry, S. Ullah, A. Mahmood, and M. Khalid, "Blockchain-Based Peer-to-Peer Electricity Trading in Smart Grids: A Survey", 2020.
6. О. В. Грищенко, В. В. Загрійчук, О. В. Семененко, "Блокчейн-технології в електроенергетиці", 2023.
7. О. В. Семененко, В. В. Грищенко, О. В. Загрійчук, "Децентралізоване управління електромережами на основі блокчейну", 2022.
8. Lei Chen et al., "Дослідження та моделювання процесів управління електромережами на основі технологій блокчейн", CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021.
9. <https://www.powerforall.org/insights/technologies/revolutionizing-decentralized-renewable-energy-dre-through-blockchain>
10. <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/18/6741>
11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2021.671133/full>
12. <https://gridplus.io/>
13. [https://www.csrwire.com/press\\_releases/783316-duke-energy-floridas-smart-thinking-grid-enables-rapid-power-restoration](https://www.csrwire.com/press_releases/783316-duke-energy-floridas-smart-thinking-grid-enables-rapid-power-restoration) <https://investors.duke-energy.com/news/news-details/2023/Duke-Energy-Floridas-smart-thinking-grid-enables-rapid-power-restoration-during-Hurricane-Idalia/default.aspx>

14. [https://energycentral.com/c/iu/brooklyn-microgrid-gets-approval-blockchain-based-energy-trading?utm\\_medium=PANTHEON\\_STRIPPED](https://energycentral.com/c/iu/brooklyn-microgrid-gets-approval-blockchain-based-energy-trading?utm_medium=PANTHEON_STRIPPED)  
<https://solarbuildermag.com/news/theres-a-push-in-brooklyn-to-turn-its-microgrid-into-a-local-energy-marketplace-via-blockchain/>
15. <https://quartier-strom.ch/index.php/en/homepage/>
16. <https://solarmagazine.com/swiss-neighborhood-solar-energy-blockchain-trading-network-a-good-start/>
17. <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/1/253>
18. <https://blockchain.ieee.org/verticals/transactive-energy/topics/smart-contracts-and-energy-how-blockchain-smart-contracts-can-improve-the-energy-sector>
19. <https://www.powerledger.io/media/blockchain-in-energy-a-look-at-future-grid>
20. <https://www.tennet.eu/>