

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

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації енергосистем

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Анатолій, МАРЧЕНКО

«12» червня 2024 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Управління, захист та автоматизація
енергосистем»**

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**на тему: «Впровадження елементів технології блокчейн в управління
енергосистемою»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ЕК-01

Татусь Роман Миколайович _____

Керівник:

Асистент,

Гулий Володимир Сергійович _____

Рецензент:

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові _____

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

Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації енергосистем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність - 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма «Управління, захист та автоматизація енергосистем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій МАРЧЕНКО

«12» червня 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту
Татусю Роману Миколайовичу

1. Тема проєкту «Впровадження елементів технології блокчейн в управління електроенергетичною системою», керівник проєкту Гулий Володимир Сергійович, асистент, затверджені наказом по університету від

«28» травня 2024р. № 2127-с

2. Термін подання студентом проєкту 11.06.2024р.

3. Вихідні дані до проєкту Впровадження елементів технології блокчейн в управління електроенергетичною системою

4. Зміст пояснювальної записки:

Характеристика об'єкту – підстанція 110/10 кВ; Вибір обладнання підстанції; Розрахунок струмів короткого замикання.

Технологія блокчейн та смарт контракти в енергетиці.

Моделювання автоматизованого алгоритму на основі технології блокчейн для розподілу потужностей в досліджуваному фрагменті енергосистеми

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

Головна схема електричних з'єднань ПС 110/10 кВ

Основні принципи та особливості технології блокчейн при впровадженні в управління енергосистемою

Смарт контракти на основі технології блокчейн та їх використання в структурі

управління енергосистемою

Моделювання смарт контракту на основі технології блокчейн для управління розподілом

потужності в досліджуваному фрагменту електроенергетичної системи

2. Консультанти розділів проєкту

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

3. Дата видачі завдання

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Пошук літературних джерел, аналіз завдання.	10.04.2024 – 15.04.2021	
2	Вибір обладнання, розрахунок струмів короткого замкнення.	16.04.2024 – 20.04.2024	
3	Можливості та основні принципи роботи технології блокчейн	21.04.2024 – 25.04.2024	
4	Можливості та основні принципи роботи смарт контрактів на основі технології блокчейн	26.04.2024 – 04.05.2024	
5	Розробка моделі досліджуваного фрагменту електроенергетичної системи	05.05.2024 – 14.05.2024	
6	Розробка алгоритму смарт контракту для управління розподілом потужності у фрагменті електроенергетичної системи	15.05.2024 – 24.05.2024	
7	Моделюванні різних режимів роботи фрагменту електроенергетичної системи. Аналіз роботи смарт контракту	25.05.2024 – 30.05.2024	
8	Оформлення пояснювальної записки та підготовка графічного матеріалу.	30.05.2024 – 10.06.2024	

Студент _____

Роман ТАТУСЬ

Керівник _____

Володимир ГУЛИЙ

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/П	Формат	Позначення	Найменування	Кількість Листів	Примітка
1	A4	141.EK0121.011ДБ	Завдання на дипломний проєкт	1	
2	A4	141.EK0121.011ДБ	Пояснювальна записка	89	
3	A1	141.EK0121.011ТК1	ПС 110/10 кВ	1	
4	A1	141.EK0121.011ТК2	Технологія блокчейн	1	
5	A1	141.EK0121.011ТК3	Смарт контракти на основі технології блокчейн	1	
6	A1	141.EK0121.011ТК4	Модель фрагменту енергосистеми та алгоритму смарт контракту	1	

					141.EK0121.011ДБ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Відомість дипломного проєкту		
Розроб.		Татусь Р. М.		12.06.24			
Перевір.		Гулий В. С.		12.06.24			
Н. Контр.		Шполянський О. Г.					
Затверд.		Марченко А.А.					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						3	1
					КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-01		

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Впровадження елементів технології блокчейн
в управління електроенергетичною системою»

Київ – 2024

РЕФЕРАТ

Даний дипломний проєкт виконаний на 89 аркушах, містить 37 рисунків, 12 таблиць, 4 листи графічної частини, 40 джерел посилання і 5 додатків.

Об’єкти дослідження: модель фрагмента електроенергетичної мережі. Алгоритм смарт контракту на основі технології блокчейн.

Предмет дослідження: можливість підвищення енергетичної безпеки та ефективності розподілу електричної енергії розглянутого фрагменту енергосистеми.

Публікації за тематикою досліджень: Гулий В.С., Татусь Р.М. Використання «Blockchain» технології при оптимізації роботи електроенергетичних систем // В кн.: Міжнародн. наук.-техн. журнал «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики». – Київ: ФЕА НТУУ «КПІ», 2023

Мета дослідження: розробка моделі досліджуваного фрагменту енергосистеми з впровадженням технологій блокчейн та використання смарт контрактів для розподілу електричної енергії в енергосистемі з ВДЕ.

Результат роботи: підвищення безпеки та надійності транзакцій в мережі, а саме використання запропонованого підходу дозволило сформуванню прозору, децентралізовану та ефективну систему розподілу електричної енергії в енергосистемі з ВДЕ.

Перелік ключових слів: ПІДСТАНЦІЯ, БЛОКЧЕЙН, СМАРТ КОНТРАКТ, РОЗУМНІ МЕРЕЖІ, МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ.

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ABSTRACT

This diploma project is made on 89 sheets, contains 37 figures, 12 tables, 4 sheets of the graphic part, 40 reference sources and 5 appendices.

Objects of study: a model of a fragment of the power grid. Smart contract algorithm based on blockchain technology.

Subject of research: the possibility of improving energy security and the efficiency of electricity distribution in the considered fragment of the power system.

Publications on the subject of research: Gulyi V.S., Tatus R.M. The use of "Blockchain" technology in optimising the operation of electric power systems // In the book: International Scientific and Technical Journal "Modern Problems of Electric Power Engineering and Automation." - Kyiv: FEA NTUU "KPI", 2023.

The aim: development of a model of the studied fragment of the power system with the introduction of blockchain technologies and the use of smart contracts for the distribution of electricity in the power system with RES.

Result achieved: increased security and reliability of transactions in the grid, namely, the use of the proposed approach allowed for the formation of a transparent, decentralised and efficient system of electricity distribution in the power system with RES.

List of keywords: SUBSTATION, BLOCKCHAIN, SMART CONTRACT, SMART GRIDS, MODELING OF OPERATING MODES.

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП	11
1 ХАРАКТЕРИСТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТУ – ЕЛЕКТРИЧНА ПІДСТАНЦІЯ 110/10 КВ.....	12
1.1 Опис електричної підстанції.....	12
1.2 Схема з'єднань та склад головного обладнання підстанції. Загальна характеристика елементів	13
1.3.1 Силові трансформатори.....	15
1.3.2 Збірні шини.....	16
1.3.4 Комутаційне обладнання.....	17
1.3.5 Захисне обладнання	20
1.3.6 Вимірювальні трансформатори напруги та струму	21
1.3.7 Власні потреби підстанції	24
1.3.9 Засоби релейного захисту та автоматики на підстанції.....	25
1.4 Розрахунок струмів короткого замикання на шинах підстанції	26
1.5 Перевірочний вибір відповідного обладнання підстанції	36
2 ТЕХНОЛОГІЯ БЛОКЧЕЙН ТА СМАРТ КОНТРАКТИ В ЕНЕРГЕТИЦІ	39
2.1 Інноваційні тенденції в розвитку енергетики	39
2.2 Визначення та історія розвитку технології блокчейн	40
2.3 Основні принципи технології блокчейн	41
2.4 Використання технології блокчейн в енергосистемах.....	46
2.5 Переваги та особливості впровадження блокчейну в енергосистемах	48
2.6 Передумови для нового етапу розвитку технології.....	50
2.7 Смарт контракти, їх основні принципи та розвиток	53
2.8 Технічні аспекти смарт контрактів	54
2.9 Досвід впровадження смарт контрактів в енергетиці	56
2.10 Особливості впровадження смарт контрактів в управління енергосистемами	60
2.10.1 Переваги впровадження смарт контрактів.....	61
2.10.2 Проблеми впровадження смарт контрактів	61

3 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО АЛГОРИТМУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН ДЛЯ РОЗПОДІЛУ ПОТУЖНОСТЕЙ У ДОСЛІДЖУВАНОМУ ФРАГМЕНТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ	63
3.1 Постановка задачі.....	63
3.2 Опис моделі	64
3.3 Створення моделі смарт контракту.....	66
3.3.1 Розробка алгоритму роботи контракту.....	66
3.3.2 Верифікація розробленого алгоритму	70
3.3.3 Розробка та запуск смарт контракту.	75
ВИСНОВКИ.....	83
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	86
ДОДАТОК А.....	90
ДОДАТОК Б	96
ДОДАТОК В	99
ДОДАТОК Г	114
ДОДАТОК Ґ	116

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АВР — Автоматичне Включення Резерву
АПВ — Автоматичне Повторне Включення
АЧР — Автоматичне Частотне Розвантаження
СЕС — Сонячна Електростанція
ВЕС — Вітрова Електростанція
ГТУ — Газотурбінна Установка
ЕЕС — Електроенергетична Система
КЗ — Коротке замикання
ЛЕП — Лінія електропередачі
ОЕС — Об'єднана Енергетична Система
ПС — Підстанція

IoT — Internet of Things
NIST — National Institute of Standards and Technology
PoA — Proof-of-Authority
PoS — Proof-of-Stake
PoW — Proof-of-Work
R&D — Research and Development
SHA — Secure Hash Algorithm

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

ВСТУП

Об'єднана енергосистема України проходить шлях значних змін, спрямованих на інтеграцію з Європейською мережею ENTSO-E. Це об'єднання є важливим внеском у стабільність і надійність ОЕС України, а також – поштовхом до розвитку ринку електроенергії в Україні. На цьому тлі особливого значення набуває розвиток розумних мереж, які дозволяють ефективніше управляти енергетичними ресурсами, оптимізувати втрати та підвищувати надійність постачання електроенергії.

Одним із ключових інструментів, що сприяють розвитку розумних мереж, є технологія блокчейн. Блокчейн забезпечує децентралізоване, прозоре та захищене управління даними в різних сферах, ці аспекти є надзвичайно важливим для сучасних енергосистем. А використання смарт контрактів на основі технології блокчейн відкриває нові можливості для автоматизації та оптимізації процесів управління енергосистемою.

Даний підхід дозволить підняти на новий рівень автоматизацію розподілу потужності в енергосистемі, підвищити безпеку та надійність транзакцій в мережі. А також збільшити рівень довіри до прозорого та децентралізованого енергетичного ринку.

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

1 ХАРАКТЕРИСТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТУ – ЕЛЕКТРИЧНА ПІДСТАНЦІЯ 110/10 КВ

1.1 Опис електричної підстанції

Електричні підстанції – це електроустановки, що дозволяють перетворювати параметри електроенергії та розподіляти її відповідно до потреб споживачів та можливостей генерації. Призначення підстанції диктується умовами, що виникли в тій чи іншій ділянці ЕЕС і забезпечується обладнанням, конфігурацією шин, схемою приєднання, тощо. За розміщенням в електроенергетичній системі електростанції розділяють на чотири типи: відокремлювані, вузлові, транзитні, тупикові.

- Відокремлювана підстанція яка приєднується до однієї або кількох транзитних ліній електропередач, наприклад, за допомогою відпайок. Це дозволяє ізолювати певні сегменти мережі для обслуговування або ремонту без впливу на решту системи.
- Вузлова підстанція об'єднує декілька ліній електропередач різної напруги. Цей тип підстанції забезпечує координацію та розподіл електричної енергії з різних джерел для забезпечення стабільності та ефективності електропостачання. Вузлові підстанції відіграють значну роль у забезпеченні надійності та безперебійності електропостачання.
- Транзитна підстанція виконує функцію перерозподілу електроенергії через включення до ліній електропередач. Цей тип підстанції забезпечує підключення у розріз однієї або двох ліній, дозволяючи таким чином ефективно розподіляти електричну енергію за потребами споживачів. Транзитні підстанції важливі для оптимізації потоків електроенергії у великих електромережах та забезпечення їх стабільності.
- Тупикова підстанція отримує електроенергію виключно від однієї електроустановки, і зазвичай це відбувається через одну або декілька

					141.ЕК0121.011ДБ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ХАРАКТЕРИСТИЧНИЙ ОПИС ОБ'ЄКТУ – ЕЛЕКТРИЧНА ПІДСТАНЦІЯ 110/10 КВ			Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Татусь Р. М.		12.06.24						1	27
Перевір.		Гулий В. С.		12.06.24							
Н. Контр.		Шполянський О. Г.									
Затверд.		Марченко А.А.						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-01			

- паралельних ліній. Цей тип підстанції є кінцевою точкою розподілу енергії у певній області, забезпечуючи електроенергією локальних споживачів. [1]

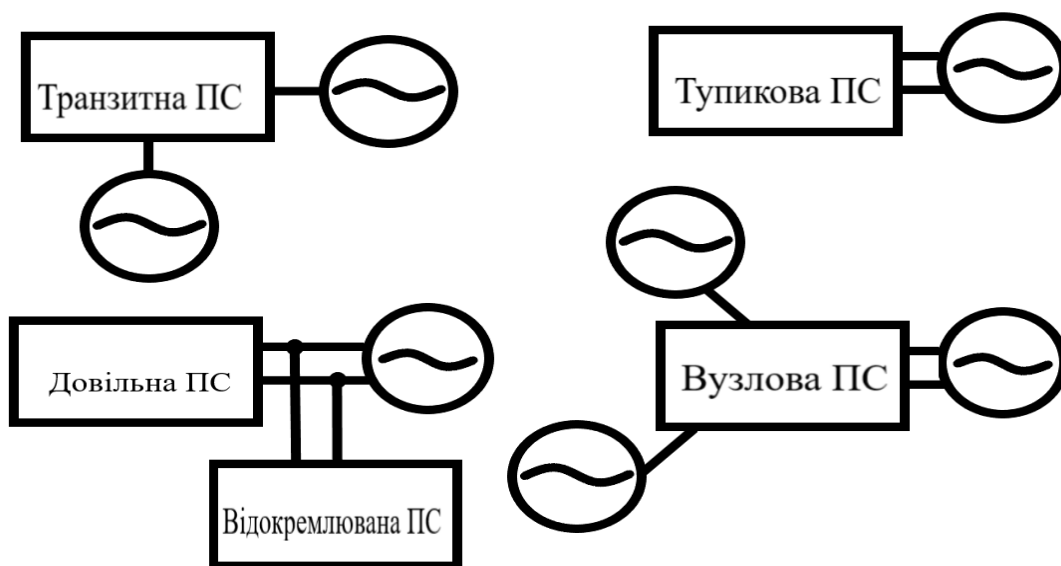


Рисунок 1.1 – Типи підстанцій відповідно до розміщення в мережі

1.2 Схема з'єднань та склад головного обладнання підстанції.

Загальна характеристика елементів

Дана підстанція класу 110/10 кВ живиться двома ЛЕП з напругою 110 кВ. Від ПС відходить 27 ліній з напругою 10 кВ. На ПС встановлено 2 силових трансформатори ТРДН-40000/110-76У1, які увімкнені на паралельну роботу. Дана ПС виконана за схемою подвійної секціонованої системи шин. Дана схема дозволяє забезпечувати надійне живлення споживачів при планових ремонтах чи позаштатних ситуаціях (КЗ) на певних ділянках мережі. Проте дана схема потребує порівняно більшої кількості комутаційних апаратів для забезпечення надійності живлення.

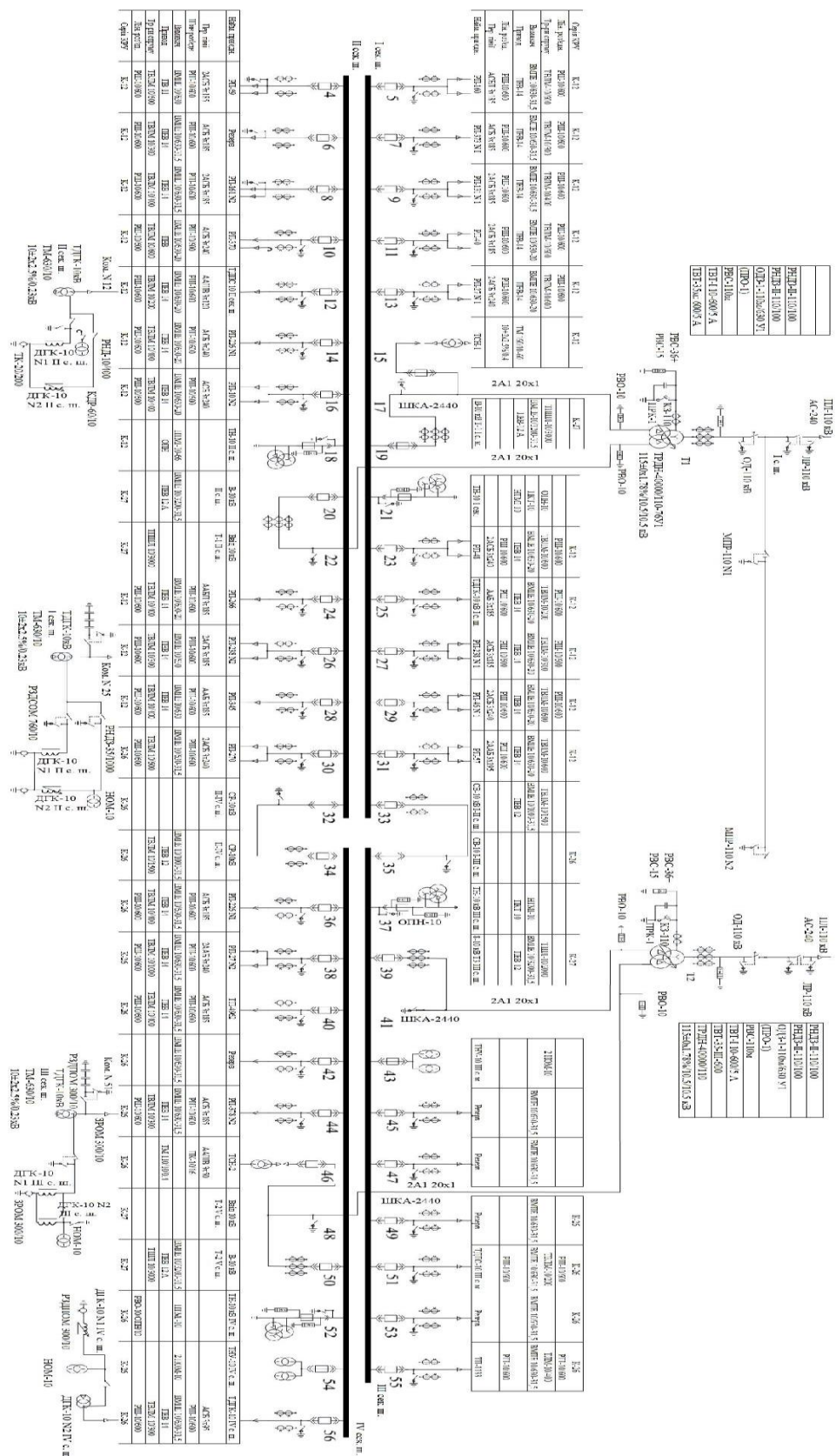


Рисунок 1.2 – Електрична схема підстанції 110/10 кВ

1.3 Склад основного обладнання підстанції.

1.3.1 Силові трансформатори

На даній підстанції силові трансформатори встановлені для пониження напруги 110 кВ зовнішньої мережі та подальшої її передачі споживачу.

Трансформатори Т1 і Т2 мають параметри, що наведені в таблиці 1.1, трансформатор даного типу зображено на рисунку 1.1. [2, 3]

Таблиця 1.1 – Паспортні дані силових трансформаторів

Тип трансформатора	$S_{\text{ном}}$	Напруга обмоток, кВ			Втрати, кВт		$U_k, \%$			I_x
	МВА	ВН	СН	НН	P_k	P_x	ВН-СН	ВН-НН	СН-НН	%
ТРДН-40000/110-76У1	40	115		10,5-10,5	172	36		10,5		0,7



Рисунок 1.3 – Трансформатор ТРДН-40000/110

1.3.2 Збірні шини

Збірні шини встановлюють на підстанції для з'єднання ліній електропередач, введів та приєднань трансформаторів одного класу напруги. Збірні шини є вузлом зв'язку, через який проходить вся потужність, яку розподіляє підстанція. Загалом, збірні шини забезпечують організований спосіб з'єднання обладнання, що полегшує монтаж і подальше обслуговування підстанції та її елементів, а також забезпечує гнучкість у конфігурації системи. Ця гнучкість досягається за рахунок використання шиноз'єднувальних вимикачів, які дозволяють швидко змінювати конфігурацію підстанції без значних зусиль. Для зручності ідентифікації та підвищення безпеки обслуговування кожна шина пофарбована у колір, який позначає відповідну фазу. Відмовостійкість та селективність приєднань підстанції на даному етапі забезпечується шиноз'єднувальними вимикачами, якими з'єднані між собою перша та друга системи шин. Загальний вигляд шин зображено на рисунку 1.2. На схемі підстанції (рис. 1.2) зображено дві секціоновані системи шин, відповідно чотири секції збірних шин 10кВ 2А-100×10.. Вид шин – алюмінієві, перерізом 100х10 міліметрів номінальною напругою 10 кВ. [4]



Рисунок 1.4 – Збірні гнучкі струмопровідні шини підстанції (10кВ)

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

1.3.4 Комутаційне обладнання

Загалом, комутаційне обладнання, що встановлюють на підстанціях призначене для підключення та відключення навантаження чи іншого обладнання. [5]

На даній підстанції встановлено:

- Вимикачі: ВМПЕ-10/630, ВМПЕ-10/1000, ВМПЕ-10/3200; [6]
- Відділювачі: ОДЗ-1-110м/630, ОДЗ-1-110у/1000; [7]
- Роз'єднувачі: РНДЗ-ІІ-110/1000, РШ-10/600; [8]
- Короткозамикачі: КЗ-110м. [9]

Паспортні дані вказаного комутаційного обладнання наведені в таблицях 1.2-1.4. [2]

Таблиця 1.2 – Паспортні дані високовольтних вимикачів

Тип	Напруга, кВ	Найбільша робоча напруга, кВ	Номинальний струм, А	Номинальний струм вимикання, кА	Максимальний наскрізний струм, кА		Номинальний струм включення, кА		Струм термічної стійкості, кА	Повний час відключення, с	Власний час відключення, с	Мінімальна безструмова пауза при АПВ, с
					Найбільший пік	Початкове значення періодичної складової	Найбільший пік	Початкове значення періодичної складової				
ВМПЕ-10/630	10	12	630	31,5	80	31,5	80	31,5	31,5/4	0,1	0,05	5
ВМПЕ-10/1000	10	12	1000	31,5	80	31,5	80	31,5	31,5/4	0,1	0,05	5
ВМПЕ-10/3200	10	12	3200	31,5	80	31,5	80	31,5	31,5/4	0,12	0,09	5

Таблиця 1.3 – Паспортні дані роз'єднувачів

Тип	Ном. Напруга, кВ	Найбільша робоча напруга, кВ	Ном. струм, А	Стійкість при наскрізних струмах КЗ			
				Головних ножів		Заземлюючих ножів	
				Граничний наскрізний струм, кА	Струм трем. стійкості / допустимий час, кА/с	Граничний наскрізний струм, кА	Струм трем. стійкості / допустимий час, кА/с
РНДЗ-П-110/1000	110	-	1000	80	31,5/4	80	31,5/1
РШ-10/600	10	-	600	35,5	12,5/4	35,5	12,5/1

Таблиця 1.4 – Паспортні дані відділювачів та короткозамикачів

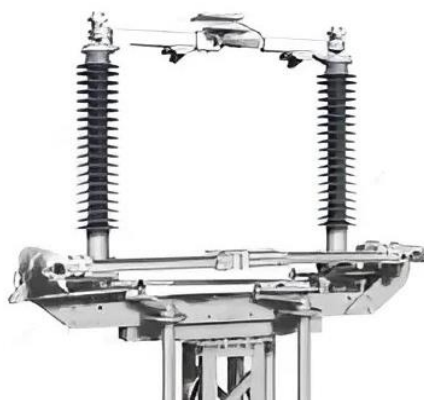
Тип	Напруга, кВ	Найбільша робоча напруга, кВ	Номинальний струм, А	Амплітуда граничного струму КЗ головних	Ном. струм термічної стійкості / Допустимий час його протікання	Повний час, с		Тип привода головних ножів
						Включення	Відключення	
ОДЗ-1-110м	110	-	630	80	22/10	-	0,45	ПРО-1У1
КЗ-110м	110	126	-	82	12,5/3	0,18	-	ПРК-1Т1



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.4 – Комутаційне обладнання підстанції: а) вимикач ВМПЕ-10/1000; б) РНДЗ-110/1000; в) відділювач ОДЗ-1-110м; г) короткозамикач КЗ-110м

1.3.5 Захисне обладнання

Для запобігання тяжким наслідкам аварійних ситуацій, що спричинені перенапругою, зокрема пошкодженням ізоляції вигоранням обладнання, тощо застосовуються наступні пристрої:

- Обмежувачі перенапруги: вони призначені для захисту ізоляції обладнання від атмосферної та комутаційної перенапруги. Основою пристроїв, що встановлені на підстанції є варистори з оксиду цинку, використання яких розмежовує робочу напругу та перенапругу з мінімальними втратами в робочому режимі і значним розсіюванням енергії у вигляді тепла в аварійному режимі. [10, 11]
- Розрядники: призначені для захисту обладнання від короточасних імпульсних підвищень напруги та атмосферних розрядів. Розрядники вентильного типу використовують іскрові проміжки для обмеження перенапруги (ізолятор в проміжках пробивається при перенапрузі, енергія розсіюється, ізолятор відновлює свої властивості). [12]

На даній підстанції використовуються на стороні 110 кВ – РВС-110м, обмежувач перенапруги ОПНп-110; на стороні 10 кВ – розрядники РВО-10 та обмежувач перенапруги ОПНп-10. [10] Паспортні дані вказаного захисного обладнання наведені в таблицях 1.5 та 1.6 [2].

Таблиця 1.5 – Паспортні дані обмежувачів перенапруги

Тип	Клас напруги, кВ	Довготривала робоча напруга, кВ	Ном. розрядний струм, кА	Номинальна напруга ОПН, кВ	Пропускна здатність, А	Напруга спрацювання, кВ		
						При гроз. імпульсі 10 кА	При комут. імпульсі 500	При комут. імпульсі 1000
ОПНп-110	110	73	10	92	550	234	179	185
ОПНп-10	10	12	10	9	450	26	20	38

					141.ЕК0121.011ДБ				Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					20

Таблиця 1.6 – Паспортні дані розрядників

Тип	Номінальна напруга, кВ	Пробивна напруга при частоті 50 Гц, кВ		Імпульсна пробивна напруга не більше, кВ	Залишкова напруга, не більше, при імпульсі струму з довжиною фронту 8 мкс, кВ		
		Не менше	Не більше		3000А	5000А	10000А
РВО-10	12,7	26	30,5	48	43	45	-
РВС-110м	102	200	250	285	315	335	367



Рисунок 1.6 – Захисне обладнання підстанції: а) обмежувач перенапруги ОПНп-110; б) розрядники РВС-110м

1.3.6 Вимірювальні трансформатори напруги та струму

Вимірювальні трансформатори використовуються для перетворення значень первинних напруг і струмів до рівнів, що відповідають нормам підключення вимірювальних приладів, автоматичних систем та реле. На стороні 110 кВ підстанції встановлено такі трансформатори струму: ТВТ-110М-600/5, паспортні дані яких наведено в таблиці 1.7. [13] Крім того, на підстанції є

трансформатори напруги типів ТВЛМ, ТШЛ та ТЛМ, технічні характеристики яких наведено в таблиці 1.8, а також трансформатори струму типу НТМІ та НОМ на стороні 10 кВ, параметри яких представлені в таблиці 1.9. [10, 14]

Таблиця 1.7 – Паспортні дані трансформаторів струму 110кВ

Тип	Ном. напруга вводу	Первинний струм, А		Ном. коеф. Тр, А		Ном. вторинне навантаження, у класі точності, Ом				Терм. стійкість		Кількість т.т., на одному вводі	Номінальна гранична кратність
		Номинальний	Найбільший	1	5	0,5	1	3	10	Кратність струму	Час, с		
ТВТ-110-600/5	110	600	630	600/1	600/5	-	-	50/2,0	-	25	3	2	24

Таблиця 1.8 – Паспортні дані трансформаторів струму 10кВ

Тип	Ном. Напруга вводу	Ном. струм, А		Виконання вторинних обмоток	Клас точності	Ном. навантаження, у класі точності, Ом				Терм. стійкість		Номінальна гранична кратність
		первинний	вторинний			0,5	1	3	10	Кратність струму	Час, с	
ТВЛМ-10	10	50	5	10р; 0.5/10	0,5	0,4	-	-	-	45	3	13
ТЛМ-10	10	50	3	10р; 0.5/10	0,5	0,4	-	-	-	28	3	15

Продовження таблиці 1.8

ТПШЛ-10	10	3000	5	10р; 0.5/10	0,5	0,8	-	-	1,2	35	3	25
ТШЛ-10	10	200	5	10р; 0.5/10	0,5	0,8	1,2	2	-	35	3	25

Таблиця 1.9 – Паспортні дані трансформаторів напруги

Тип	Клас напруги, кВ	Ном. напруга обмоток			Ном. потужність при класі точності, ВА				Гранична потужність,
		Первинної, кВ	Основної вторинної, В	Додаткової вторинної, В	0,2	0,5	1	3	
НТМІ	10	10	100	100/√3	-	120	200	500	1000
НОМ	10	6,3	100	-	-	75	150	300	640



а)



б)

Рисунок 1.7 – Вимірювальні трансформатори: а) струму ТВЛМ-10; б) напруги НТМІ-10

1.3.7 Власні потреби підстанції

Для підтримки нормального та безпечного функціонування обладнання частина споживання електричної енергії витрачається на власні потреби. Перебій у постачанні власних потреб може призвести до повного виходу з ладу, або відключення обладнання. На підстанції до споживачів власних потреб відносять: системи охолодження силових трансформаторів, РПН, пристрої зв'язку, оперативні ланцюги постійного та змінного струму, освітлення, системи пожежогасіння та автоматики. Для живлення власних потреб на підстанції встановлені трансформатори власних потреб ТМ-630/10, параметри якого в таблиці 1.10, побачити його можна на рисунку 1.6 [10, 15].

Таблиця 1.10 – Паспортні дані трансформаторів власних потреб

Тип трансформатора	S(к)	Напруга обмоток, кВ		Втрати, кВт		U(к)	I(к)
	МВА	ВН	НН	Р	Р	%	%
ТМ-630/10	630	10	0,4	3,3	16,5	5,5	ТМ-630/10



Рисунок 1.8 – Трансформатор власних потреб ТМ-630/10

1.3.9 Засоби релейного захисту та автоматики на підстанції

Релейний захист – це набір спеціалізованих пристроїв та засобів для захисту обладнання чи елементів електромережі, що базуються на реле, модулях та інших апаратах, призначених для вимкнення силових вимикачів при напрузі понад 1000 В. До автоматичних засобів відносяться пристрої:

- АПВ – забезпечує повторне увімкнення вимикача та дозволяє уникнути відключення споживача при нестійкому короткому замиканні;
- АВР – включає резервне обладнання або лінію при відключенні основного, таким чином підвищуючи безперебійність енергопостачання споживача;
- АЧР – застосовується для запобігання зниженню частоти в енергосистемі шляхом тимчасового відключення менш критичних споживачів;

На даній підстанції встановлені пристрої АПВ, АВР та АЧР. На приєднаннях встановлено: максимальний струмовий захист, захист від перевантажень, а також захист від короткого замикання на землю. На трансформаторах встановлено диференційний захист, схема підключення якого зображена на рисунку 1.7, газовий захист трансформатора, реле рівня масла, обмежувачі перенапруги (ОПН) і допоміжні захисти: контролю температури, мінімальної напруги та захист від перевантаження. [15]

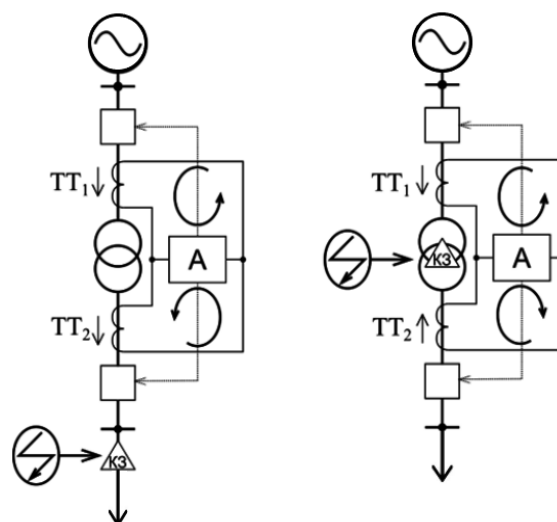


Рисунок 1.9 – Диференційний струмовий захист трансформатора

1.4 Розрахунок струмів короткого замикання на шинах підстанції

Для перевірки встановленого обладнання на відповідність умовам роботи на даній підстанції було виконано розрахунок КЗ.

Опис спрощеної схеми підстанції

Схема представляє сторону 110 кВ підстанції, зосереджену на трансформаторах та основних елементах системи.

- Зв'язки із зовнішньою мережею Ес1 і Ес2 підключені до трансформаторів Т1 і Т2 відповідно.
- Навантаження Ес3 і Ес4 розташовані в нижній частині схеми та підключені через лінійні роз'єднувачі до шин ПС, які в свою чергу підключені до Т1 і Т2.
- Трансформатори Т1 і Т2 з'єднані з генераторами Ес1 та Ес2.
- Точка КЗ К1 з'єднаний з трансформатором Т1 та лінією W1-21.
- Лінії W1-21 і W22-27 з'єднують трансформатори з іншими частинами підстанції і з іншими об'єктами енергосистеми.
- Шиноз'єднувальний вимикач розташований між лініями W1-21 і W22-27.

Ця спрощена схема демонструє основні компоненти підстанції, які відповідають за підведення живлення, трансформацію та розподіл електроенергії. На схемі вказане місце КЗ, що спрощує розрахунок параметрів КЗ, схема зображена на рисунку 1.8:

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

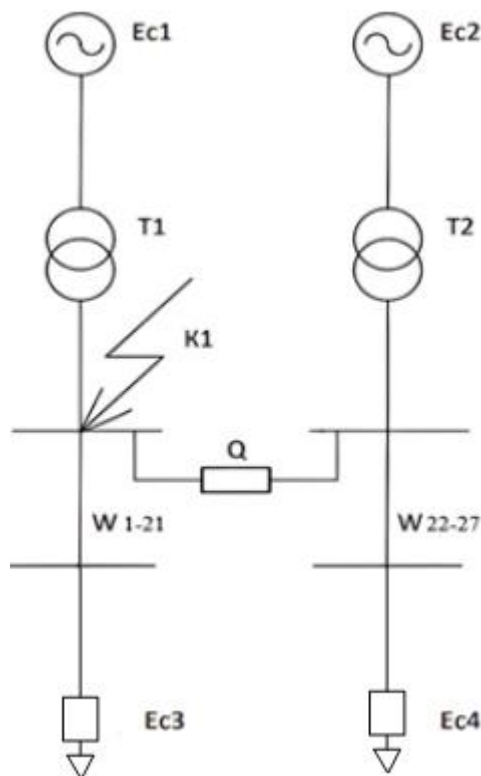


Рисунок 1.10 – Спрощена схема частини підстанції для розрахунку КЗ в точці К1

Для розрахунку параметрів КЗ на підстанціях базисним значенням потужності можна обрати сумарну потужність силових трансформаторів, що для даної підстанції складає $S_{\phi} = 80$ МВА. Напруга для розрахунку КЗ на шинах приймається $U_{\phi} = 10$ кВ.

Розрахунок базисного струму:

$$S_{\phi} = 80 \text{ МВА}$$

$$U_{\phi} = 10 \text{ МВА}$$

$$I_{\phi} = \frac{S_{\phi}}{U_{\phi}} = \frac{80}{\sqrt{3} \times 10} = 4,619 \text{ кА}$$

Розрахунок струму КЗ зазвичай проводять у відносних одиницях, для цього опір в схемі заміщення також подається у відносних одиницях.

Опір трансформаторів:

$$X_{T1} = \frac{U_{K\%}}{100} \times \frac{S_{\phi}}{S_{H.T.}} = \frac{10,5}{100} \times \frac{80}{40} = 0,21 \text{ в.о.}$$

Для оптимізації розрахунків всі ЛЕП приймаються однаковими (АС-240) з довжиною 10 км, тоді опір лінії розраховується:

$$X_{Л1} = \frac{X_{лен} \times l \times S_{б}}{U_{б}} = \frac{0,119 \times 10 \times 80}{10} = 9,52 \text{ В.О.}$$

Оскільки з першої СШ живиться 21 ПЛ, то сумарний опір 21 ліній становить:

$$X_{Л1-21} = \frac{X_{Л1}}{21} = \frac{9,52}{21} = 0,453 \text{ В.О.}$$

Відповідно з другої СШ живиться 6 ПЛ, то їх сумарний опір:

$$X_{Л22-27} = \frac{X_{Л1}}{6} = \frac{9,52}{6} = 1,587 \text{ В.О.}$$

Опір вимикача виходячи з даних про початковий діючий періодичний струм КЗ та максимальний діючий струм КЗ відповідно до [10] становить:

$$Xq = 0,13 \text{ В.О.}$$

Схема заміщення для розрахунку КЗ в першій точці:

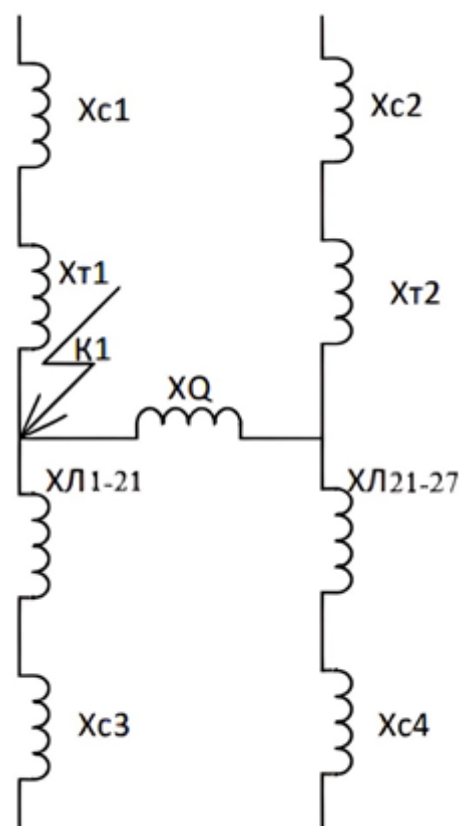


Рисунок 1.11 – Схема заміщення частини підстанції для розрахунку КЗ в точці К1

використовуючи правила послідовного та паралельного з'єднання елементів виконаємо спрощення схеми::

$$X_1 = X_{c1} + X_{T1} = 1 + 0,21 = 1,21 \text{ В.О.}$$

$$X_2 = X_{c2} + X_{T2} = 1 + 0,21 = 1,21 \text{ В.О.}$$

$$X_3 = X_q = 0,13 \text{ В.О.}$$

$$X_4 = X_{Л1-21} + X_{c3} = 0,453 + 1 = 1,453 \text{ В.О.}$$

$$X_5 = X_{Л22-27} + X_{c4} = 1,587 + 1 = 2,587 \text{ В.О.}$$

$$X_6 = X_3 + \frac{X_2 \times X_5}{X_2 + X_5} = 0,13 + \frac{1,21 \times 2,587}{1,21 + 2,587} = 0,954 \text{ В.О.}$$

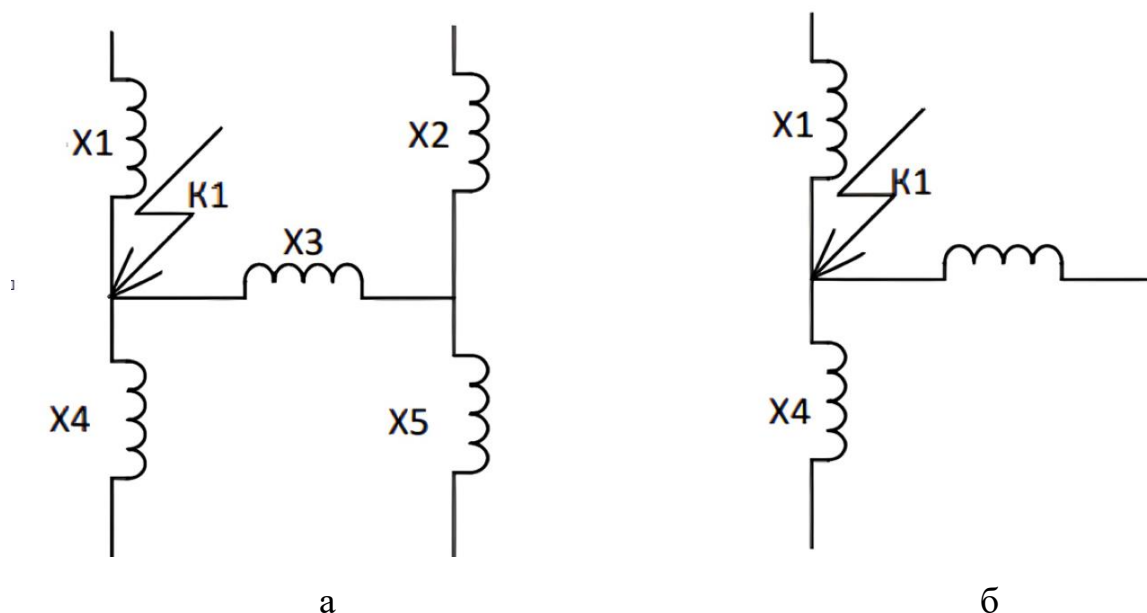


Рисунок 1.12 – Схема заміщення для розрахунку КЗ в точці К1: а) після першого; та б) другого перетворень

Для максимального спрощення схеми слід виконати ще одне перетворення:

$$X_7 = \frac{X_4 \times X_6}{X_4 + X_6} = \frac{1,453 \times 0,954}{1,453 + 0,954} = 0,576 \text{ В.О.}$$

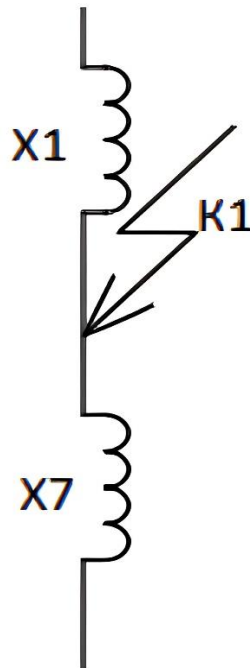


Рисунок 1.13 – Схема заміщення для розрахунку КЗ в точці К1 після третього перетворення

Результуючий еквівалентний опір схеми становить:

$$X_{екв} = \frac{X_1 \times X_7}{X_1 + X_7} = \frac{1,21 \times 0,576}{1,21 + 0,576} = 0,39 \text{ В.О.}$$

Початкове значення періодичної складової струму КЗ в першій точці, подане у відносних та іменованих одиницях відповідно:

$$I_{по} = \frac{1}{X_{екв}} = \frac{1}{0,39} = 2,56 \text{ В.О.}$$

$$I_K = I_{по} \times I_{б} = 2,56 \times 4,619 = 11,835 \text{ кА}$$

Розрахунок значення ударного струму КЗ, що діє в схемі через 0,1 с після початку КЗ:

$$I_{уд} = \sqrt{2} \times I_K \times K_{ус} = \sqrt{2} \times 11,835 \times 1,956 = 32,739 \text{ кА}$$

Де $K_{ус}$ – прийнятий ударний коефіцієнт схеми для розрахунку струм КЗ
Для точки К2 використаємо вихідні дані з попереднього розрахунку. [2]

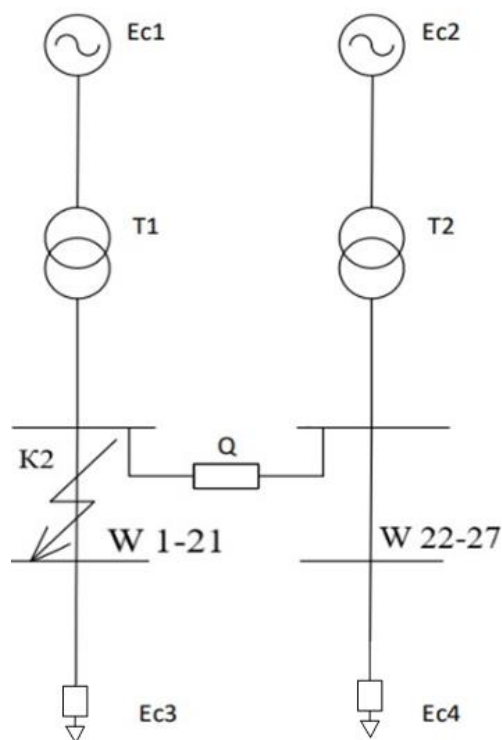


Рисунок 1.14 – Спрощена схема частини підстанції для розрахунку КЗ в точці К2

Схема заміщення для розрахунку КЗ в точці К2:

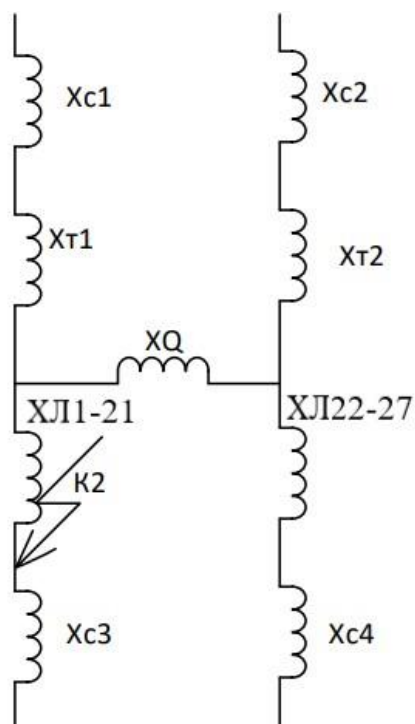


Рисунок 1.15 – Схема заміщення частини підстанції для розрахунку КЗ в точці К2

Для перетворення слід згрупувати та об'єднати опори:

$$X_1 = X_{c1} + X_{T1} = 1 + 0,21 = 1,21 \text{ В.О.}$$

$$X_2 = X_{c2} + X_{T2} = 1 + 0,21 = 1,21 \text{ В.О.}$$

$$X_3 = X_q = 0,13 \text{ В.О.}$$

$$X_4 = X_{Л1-21} + X_{c3} = 0,453 + 1 = 1,453 \text{ В.О.}$$

$$X_5 = X_3 + \frac{X_2 \times X_4}{X_2 + X_4} = 0,13 + \frac{1,21 \times 1,453}{1,21 + 1,453} = 0,954 \text{ В.О.}$$

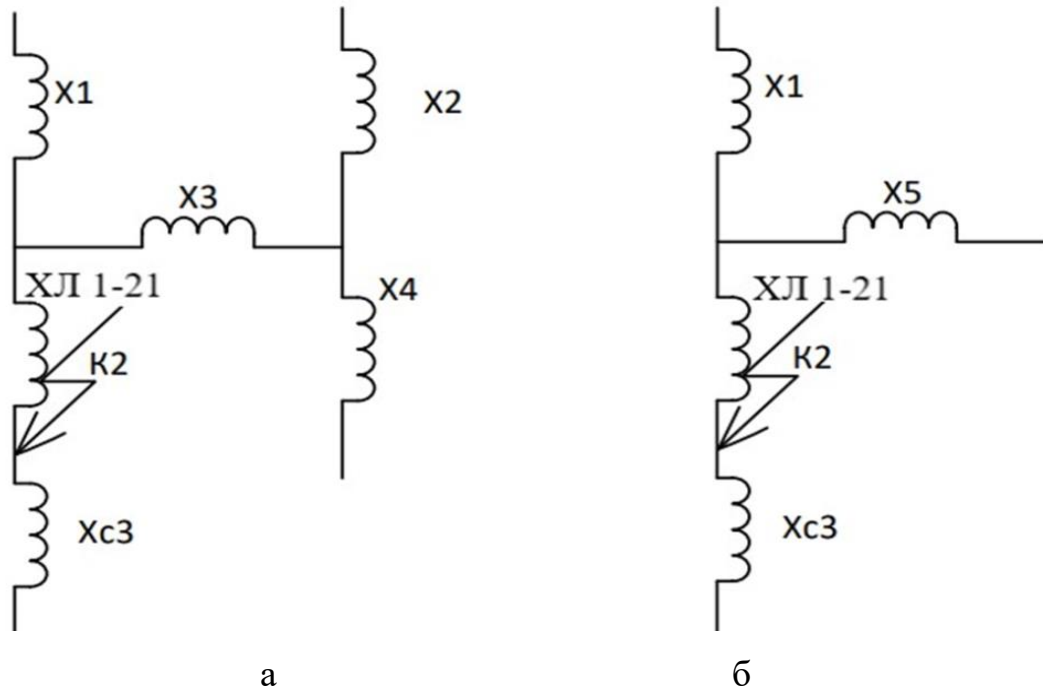


Рисунок 1.16 – Схема заміщення для розрахунку КЗ в точці К2 після першого та другого перетворень

Розрахунок еквівалентних опорів схеми заміщення після третього та четвертого перетворення:

$$X_6 = \frac{X_1 \times X_5}{X_1 + X_5} = \frac{1,21 \times 0,954}{1,21 + 0,954} = 0,824 \text{ В.О.}$$

$$X_7 = X_6 + X_{Л1-21} = 0,824 + 0,453 = 1,277 \text{ В.О.}$$

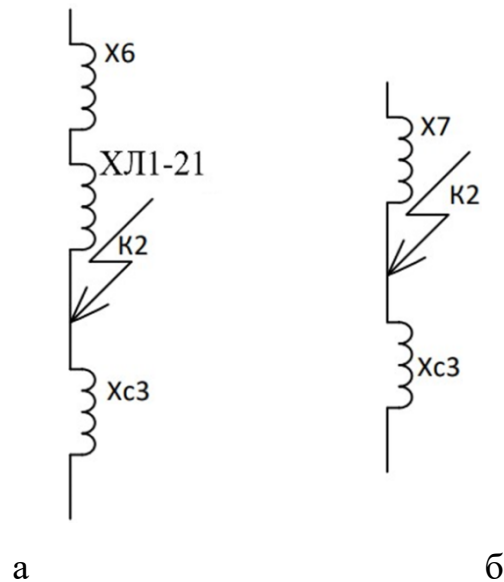


Рисунок 1.15 – Схема заміщення для розрахунку КЗ в точці К2 після третього та четвертого перетворень

Отже, еквівалентний опір схеми:

$$X_{екв} = \frac{X_{C3} \times X_7}{X_{C3} + X_7} = \frac{1 \times 1,277}{1 + 1,277} = 0,561 \text{ В.О.}$$

Початкове значення періодичної складової струму КЗ в другій точці, подане у відносних та іменованих одиницях відповідно:

$$I_{по} = \frac{1}{X_{екв}} = \frac{1}{0,561} = 1,783 \text{ В.О.}$$

$$I_K = I_{по} \times I_{\delta} = 1,783 \times 4,619 = 8,235 \text{ кА}$$

Ударний струму КЗ в схемі через 0,1 с після початку КЗ:

$$I_{уд} = \sqrt{2} \times I_K \times K_{yc} = \sqrt{2} \times 8,235 \times 1,956 = 22,778 \text{ кА}$$

Щоб розрахувати струм у точці КЗ, рисунок 1.12, було використано деякі вихідні дані з попереднього розрахунку

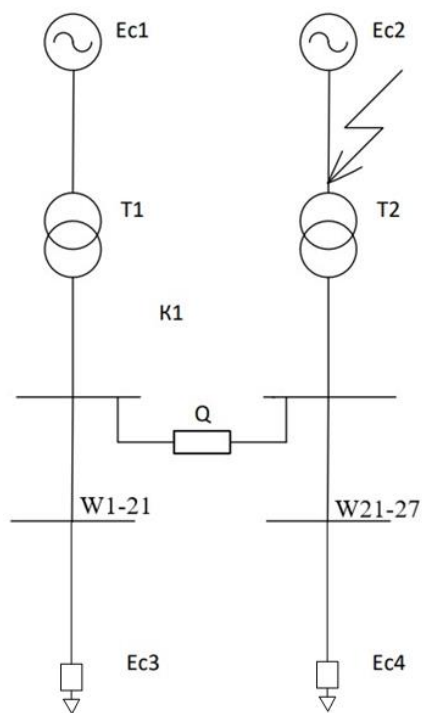


Рисунок 1.17 – Спрощена схема частини підстанції для розрахунку КЗ у точці КЗ

Схема заміщення для розрахунку КЗ у точці КЗ:

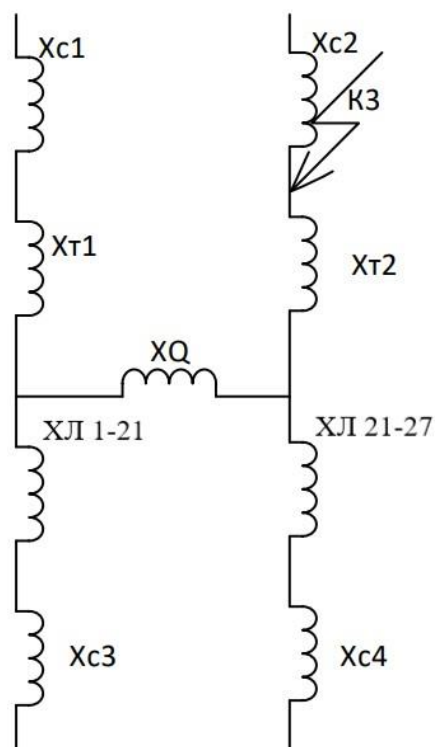


Рисунок 1.18 – Схема заміщення частини підстанції для розрахунку КЗ в точці КЗ

$$X_1 = X_{c1} + X_{T1} = 1 + 0,21 = 1,21 \text{ В.О.}$$

$$X_2 = X_{c3} + X_{Л1-21} = 1 + 0,453 = 1,453 \text{ В.О.}$$

$$X_3 = X_q = 0,13 \text{ В.О.}$$

$$X_4 = X_{Л21-27} + X_{c4} = 1,587 + 1 = 2,587 \text{ В.О.}$$

$$X_5 = X_3 + \frac{X_1 \times X_2}{X_1 + X_2} = 0,13 + \frac{1,21 \times 1,453}{1,21 + 1,453} = 0,79 \text{ В.О.}$$

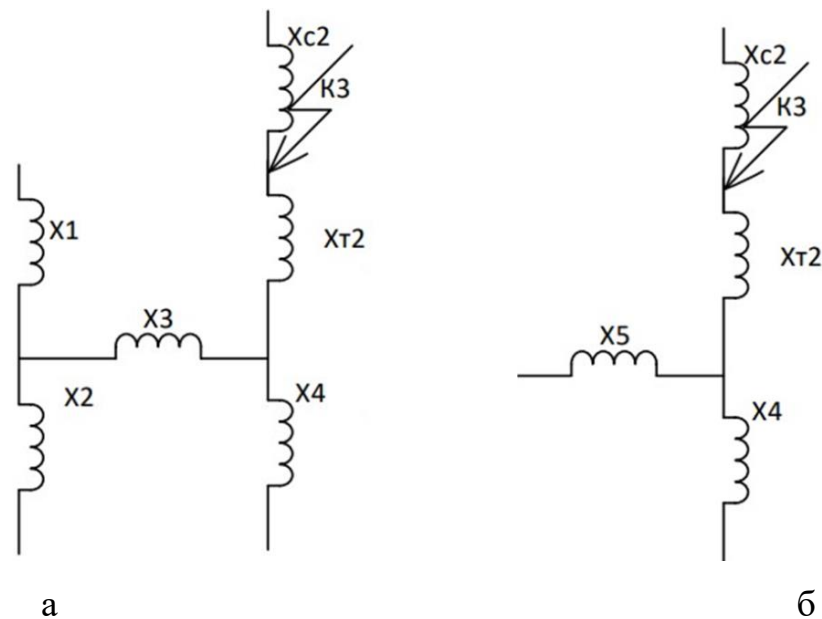


Рисунок 1.19 – Схема заміщення для розрахунку КЗ в точці КЗ після першого та другого перетворень

Розрахунок еквівалентних опорів схеми заміщення після третього та четвертого перетворення:

$$X_6 = \frac{X_5 \times X_4}{X_5 + X_4} = \frac{0,79 \times 2,587}{0,79 + 2,587} = 0,605 \text{ В.О.}$$

$$X_7 = X_{T2} + X_6 = 0,21 + 0,605 = 1,277 \text{ В.О.}$$

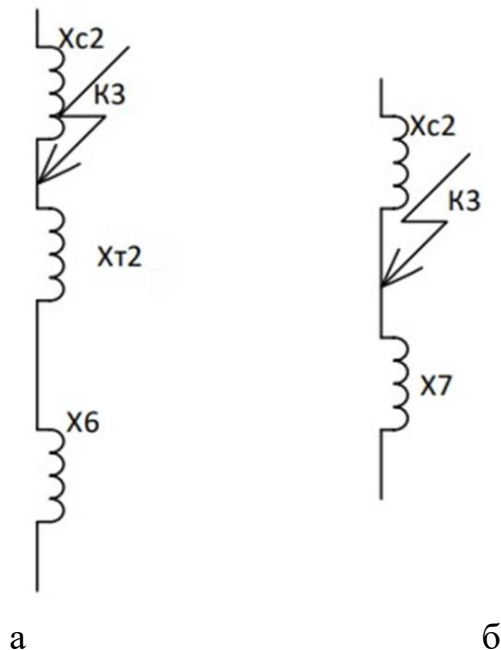


Рисунок 1.20 – Схема заміщення для розрахунку КЗ в точці КЗ після третього та четвертого перетворень

Еквівалентний опір схеми заміщення становить:

$$X_{екв} = \frac{X_{C2} \times X_7}{X_{C2} + X_7} = \frac{1 \times 0,815}{1 + 0,815} = 0,449 \text{ В.О.}$$

Початкове значення періодичної складової струму КЗ в точці КЗ, подане у відносних та іменованих одиницях відповідно:

$$I_{по} = \frac{1}{X_{екв}} = \frac{1}{0,449} = 2,227 \text{ В.О.}$$

$$I_K = I_{по} \times I_6 = 2,227 \times 4,619 = 10,284 \text{ кА}$$

Ударний струму КЗ в схемі через 0,1 с після початку КЗ:

$$I_{уд} = \sqrt{2} \times I_K \times K_{yc} = \sqrt{2} \times 10,284 \times 1,956 = 28,447 \text{ кА}$$

1.5 Перевірочний вибір відповідного обладнання підстанції

Згідно з розрахунком параметрів короткого замикання у трьох типових точках підстанції максимальне значення періодичної складової струму КЗ дорівнює 11,835 кА, в той час як максимальне значення ударного струму становить 32,739 кА.

На даній підстанції встановлені вимикачі, які здатні витримувати максимальний наскрізний струм вимикання періодичної складової до 31,5 кА і

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

максимальний піковий (ударний) струм до 80 кА. Ці значення перевищують максимальні розраховані струми КЗ. Отже, можна зробити висновок, що встановлені на підстанції вимикачі здатні ефективно виконувати свої функції та захищати систему від коротких замикань у всіх відповідних точках потенційного виникнення КЗ.

У даному розділі роботи було проведено детальний аналіз підстанції класу 110/10 кВ, включаючи характеристику її основного обладнання та розрахунок струмів короткого замикання (КЗ). Підстанція живиться двома лініями електропередач (ЛЕП) напругою 110 кВ, з якої відходить 38 ліній напругою 10 кВ. На підстанції встановлено два силових трансформатори ТРДН-40000/110-76У1, що працюють паралельно, забезпечуючи надійність енергопостачання споживачів навіть у разі планових ремонтів або аварійних ситуацій.

Для забезпечення організованого з'єднання ліній електропередач і трансформаторів на підстанції використовуються збірні шини, що підвищують гнучкість конфігурації системи завдяки шино з'єднувальним вимикачам. На підстанції встановлено комутаційне обладнання, зокрема вимикачі ВМПЕ-10/630, ВМПЕ-10/1000, ВМПЕ-10/3200, роз'єднувачі РНДЗ-II-110/1000, РШ-10/600, РШ-10/800, відділювачі ОДЗ-1-110м/630 та короткозамикачі КЗ-110м. Також використовуються засоби захисту, такі як обмежувачі перенапруги ОПНп-110, ОПНп-10 та розрядники РВО-10, РВС-110м, для запобігання пошкодженням обладнання.

Розрахунок струмів короткого замикання на шинах підстанції показав, що максимальне значення періодичної складової струму КЗ дорівнює 11.835 кА, а максимальне значення ударного струму – 32.739 кА. Це значення було отримано шляхом поетапного перетворення схеми заміщення для трьох типових точок підстанції (Рис. 1.9, 1.13, 1.17).

Встановлене обладнання підстанції було перевірене на відповідність цим параметрам. Зокрема, вимикачі мають показники термічної стійкості та струму вимикання, що перевищують розраховані значення струмів КЗ, зокрема вимикачі

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВМПЕ-10/630 мають максимальний наскрізний струм вимикання до 31.5 кА та максимальний піковий струм до 80 кА. Це свідчить про те, що обладнання підстанції здатне ефективно виконувати свої функції та забезпечувати захист від коротких замикань.

Таким чином, проведені розрахунки підтверджують, що підстанція та здатна забезпечити стабільне енергопостачання споживачів за різних умов експлуатації

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ТЕХНОЛОГІЯ БЛОКЧЕЙН ТА СМАРТ КОНТРАКТИ В ЕНЕРГЕТИЦІ

2.1 Інноваційні тенденції в розвитку енергетики

Енергосистема України перебуває у стані активного розвитку, який зумовлений потребою підвищити енергетичну безпеку, а також процесами інтеграції до європейських ринків та впровадження інноваційних технологій. Зміни в структурі ринку електроенергії, зростаючі вимоги до стабільності постачання та необхідність підвищення ефективності управління електромережами обумовлюють модернізацію енергетичної інфраструктури та методів управління енергосистемою. В цьому контексті, інтеграція в європейську енергосистему, створення конкурентного ринку постачальників та впровадження розумних мереж є ключовими напрямками розвитку. [16]

Інтеграція Об'єднаної енергетичної системи України в енергосистему Європейського Союзу є стратегічним кроком для забезпечення енергетичної безпеки країни та зміцнення її енергетичної незалежності. Цей процес передбачає гармонізацію технічних стандартів, підключення до європейської енергомережі ENTSO-E та впровадження єдиних ринкових механізмів. Завдяки цьому українська енергосистема зможе ефективніше взаємодіяти з європейськими енергоринками, забезпечуючи стабільність постачання та конкурентні ціни на електроенергію. [17]

Зміна структури ринку електроенергії України передбачає перехід від ринково-регуляторної моделі до ринкової, де порівняно велика кількість компаній-постачальників конкуруватимуть за споживачів. Це дозволить створити конкурентне середовище, яке стимулюватиме зниження цін та покращення якості послуг. Крім того, лібералізація ринку електроенергії

					141.EK0121.011ДБ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ТЕХНОЛОГІЯ БЛОКЧЕЙН ТА СМАРТ КОНТРАКТИ В ЕНЕРГЕТИЦІ	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Татусь Р. М.		12.06.24				
Перевір.		Гулий В. С.		12.06.24			1	26
						КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-01		
Н. Контр.		Шполянський О. Г.						
Затверд.		Марченко А.А.						

сприятиме залученню інвестицій у галузь, модернізації інфраструктури та впровадженню інноваційних технологій. [18] Розумні мережі є найновішим етапом у розвитку енергетичної інфраструктури. Вони забезпечують оптимізацію управління електромережами. Розумні мережі інтегрують цифрові технології з традиційними енергомережами. Це підвищує ефективність роботи системи, зменшує витрати та сприяє стабільному постачанню електроенергії навіть у пікові періоди споживання. [19]

2.2 Визначення та історія розвитку технології блокчейн

Блокчейн — це децентралізована технологія розподіленого реєстру, яка зберігає інформацію у вигляді послідовних блоків. Кожен блок містить криптографічний хеш попереднього блоку, що забезпечує цілісність і незмінність даних. Це дозволяє зберігати всі транзакції у відкритому і захищеному форматі, зменшуючи ризик шахрайства і підвищуючи прозорість процесів. Однією з основних переваг блокчейну є усунення посередників, що знижує витрати на транзакції і підвищує їх швидкість. Блокчейн знаходить застосування в багатьох галузях, включаючи фінанси, логістику та енергетику, забезпечуючи високу ступінь надійності і прозорості даних. [20]

Історія блокчейну починається з 2008 року, коли Сатоші Накамото опублікував білу книгу, в якій представив концепцію біткоїна, першої криптовалюти на основі блокчейну. У 2009 році біткоїн був запущений як перша децентралізована цифрова валюта. Згодом блокчейн почав використовуватися не лише для криптовалют, але й для інших сфер, таких як фінанси, охорона здоров'я, логістика та енергетика. [21]

У 2015 році була запущена платформа Ethereum, яка дозволила створювати децентралізовані додатки на основі смарт контрактів. Це значно розширило можливості блокчейну і призвело до його широкого впровадження у різні галузі. Наприклад, у фінансовому секторі блокчейн використовується для створення децентралізованих бірж і платіжних систем, що дозволяє знизити витрати і підвищити швидкість транзакцій. У логістиці блокчейн допомагає відстежувати

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

переміщення товарів у реальному часі, забезпечуючи прозорість і зменшуючи можливості для шахрайства. [20]

Сьогодні блокчейн продовжує розвиватися і знаходить нові області застосування, включаючи управління енергосистемами, де він може забезпечити ефективність, прозорість і безпеку енергетичних транзакцій. Це дозволяє створювати децентралізовані енергетичні мережі, які можуть самостійно регулювати виробництво і споживання енергії, знижуючи залежність від централізованих постачальників. [21]

2.3 Основні принципи технології блокчейн

Блокчейн функціонує як розподілений реєстр, де всі транзакції зберігаються у вигляді ланцюга блоків. Кожен блок містить набір транзакцій та унікальний криптографічний хеш попереднього блоку, що забезпечує цілісність і незмінність даних. Розподілений реєстр дозволяє зберігати копії даних на численних вузлах мережі, що підвищує стійкість до атак та відмов. Така архітектура робить блокчейн прозорим, оскільки кожен учасник мережі може перевіряти транзакції, що зберігаються в ланцюгу, і гарантує, що дані не можуть бути змінені без відома всієї мережі. [20, 22]

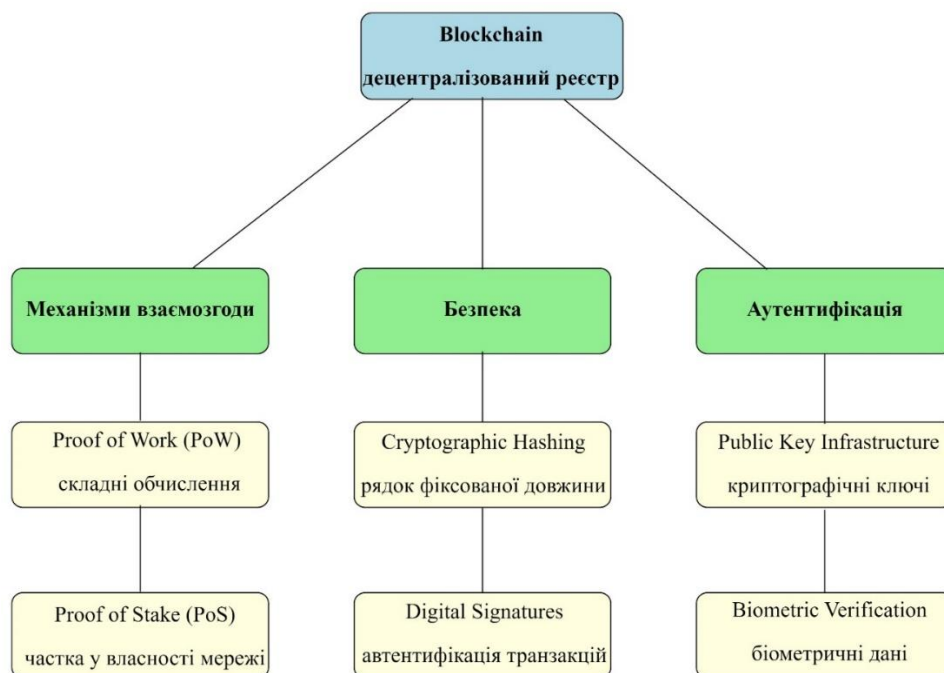


Рисунок 2.1 — основні принципи технології блокчейн та їх реалізація

Механізми консенсусу

Proof of Work (PoW) — це механізм консенсусу, що вимагає від учасників мережі, що працюють за винагороду розв'язувати складні криптографічні задачі для підтвердження транзакцій і додавання нових блоків до блокчейну.

Криптографічні методи, такі як хешування та цифрові підписи, гарантують, що дані залишаються незмінними і захищеними від несанкціонованого доступу. Хешування - це процес перетворення вхідних даних будь-якої довжини у вихідний рядок фіксованої довжини за допомогою математичного алгоритму хешування. [20]

Математичний опис представлено формулами 2.1-2.4:

Хеш-функція:

$$H(x) = \text{SHA} - 256(x) \quad (2.1)$$

Де H — це тип хеш-функції (наприклад, SHA-256), а x — це вхідні дані (наприклад, транзакції, попередній хеш, nonce). Умова PoW передбачає, що учасники мережі повинні виконати певну роботу, щоб мати право додати новий блок у блокчейн.

Умова PoW:

$$H(\text{block_header}) < \text{target} \quad (2.2)$$

де:

block_header — заголовок блоку, який включає попередній хеш блоку, дані транзакцій і nonce.

target — цільове значення, яке встановлює складність.

Nonce — це випадкове або псевдовипадкове число, яке використовується в криптографічних протоколах лише один раз.

Учасник мережі змінює значення nonce, доки не буде виконано умову:

$$\text{block_header} = \text{previous_hash} + \text{merkle_root} + \text{timestamp} + \text{nonce} \quad (2.3)$$

Тобто, учасник мережі змінює значення nonce в заголовку блоку і обчислює хеш цього заголовку. Якщо хеш менший за цільове значення (target),

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

блок вважається дійсним і може бути доданий до блокчейну. Цільове значення встановлює складність майнінгу: чим менше target, тим складніше знайти дійсний блок.

Proof of Stake (PoS) — це механізм консенсусу, що обирає валідаторів для створення нових блоків на основі їхньої частки у власності мережі (кількості верифікацій транзакцій, які вони успішно здійснили на даний момент).

Ймовірність вибору валідатора:

$$P_i = \frac{S_i}{S_{total}} \quad (2.3)$$

де:

S_i — кількість активів, які тримає вузол i .

S_{total} — загальна активів монет у мережі.

Валідатор — це учасник блокчейн-мережі, який бере участь у процесі перевірки та підтвердження транзакцій і блоків. Валідатори відіграють ключову роль у підтримці цілісності та безпеки блокчейну, особливо в мережах, які використовують алгоритми консенсусу типу Proof of Stake або його варіанти.

Вибір валідатора: вузол i обирається як валідатор з ймовірністю $P(i)$.

Формула для визначення валідатора:

$$validator = \min_i \left(\frac{H(stake_i + nonce)}{S_i} \right) \quad (2.3)$$

Де:

H — хеш-функція (наприклад, SHA-256).

$stake_i$ — кількість активів, які тримає вузол i .

$nonce$ — випадкове число.

S_i — кількість активів, які тримає вузол i .

Тобто, вузли з більшою кількістю оброблених транзакцій за весь час мають вищу ймовірність бути обраними валідаторами. Формула вибору валідатора враховує як частку оброблених за весь час транзакцій певним вузлом, так і

випадкове число (nonce), що забезпечує певну випадковість і справедливість у процесі вибору. Ці формули описують основні механізми роботи алгоритмів PoW та PoS, що використовуються для досягнення консенсусу в блокчейн-мережах. [25]

Безпека

Безпека та незмінність даних є ключовими перевагами блокчейну. Після додавання блоку в ланцюг змінити інформацію в ньому практично неможливо без зміни всіх наступних блоків, що потребує колосальних обчислювальних ресурсів. Це забезпечує високий рівень безпеки і зменшує ризик фальсифікації даних. Блокчейн також забезпечує захист від подвійного списання коштів, оскільки кожна транзакція перевіряється мережею перед її включенням у блок.

Хеш-функція SHA-256 (Secure Hash Algorithm 256-bit) — це криптографічна хеш-функція, яка приймає вхідні дані будь-якої довжини і генерує вихідний хеш-значення фіксованої довжини в 256 біт (32 байти). SHA-256 є частиною криптографічного стандарту SHA-2, розробленого Національним інститутом стандартів і технологій (NIST) США. [20, 24]

Властивості SHA-256:

- Фіксована довжина виводу: незалежно від розміру вхідних даних, SHA-256 завжди генерує хеш-значення довжиною 256 біт (32 байти).
- Односторонність: обчислення хеш-значення з вхідних даних є легким, але зворотне обчислення вхідних даних з хеш-значення є практично неможливим.
- Колізійна стійкість: важко знайти дві різні вхідні послідовності, які генерують однакове хеш-значення.
- Стійкість до другого прообразу: важко знайти іншу вхідну послідовність, яка генерує те саме хеш-значення, що й дана вхідна послідовність.

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

- Лавинний ефект: навіть невелика зміна у вхідних даних призводить до значної зміни у вихідному хеш-значенні.

Математичний опис SHA-256

SHA-256 використовує ряд побітових операцій та арифметичних функцій для обробки вхідних даних у блоках розміром 512 біт. Процес обчислення хеш-значення включає наступні етапи:

- Попередня обробка: вхідні дані доповнюються так, щоб їх довжина стала кратною 512 бітам. До даних додається біт "1", потім достатня кількість нульових бітів і 64-бітове представлення початкової довжини вхідних даних.
- Ініціалізація: використовуються вісім фіксованих 32-бітових початкових хеш-значень ($H_0, H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6, H_7$).
- Обробка блоків: вхідні дані обробляються у блоках по 512 біт. Для кожного блоку виконується серія операцій з використанням логічних функцій (наприклад, $\Sigma_0 \Sigma_0, \Sigma_1 \Sigma_1, \sigma_0 \sigma_0, \sigma_1 \sigma_1$), побітових зсувів і додавання по модулю 2^{32} .
- Остаточне хеш-значення: після обробки всіх блоків початкові хеш-значення оновлюються і об'єднуються для формування остаточного 256-бітового хеш-значення.

Формули для логічних функцій у SHA-256:

- Логічні функції:

$$\begin{aligned}
 \Sigma_0(x) &= (x \gg 2) \oplus (x \gg 13) \oplus (x \gg 22) \\
 \Sigma_1(x) &= (x \gg 6) \oplus (x \gg 11) \oplus (x \gg 25) \\
 \sigma_0(x) &= (x \gg 7) \oplus (x \gg 18) \oplus (x \gg 3) \\
 \sigma_1(x) &= (x \gg 17) \oplus (x \gg 19) \oplus (x \gg 10)
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Операції в компресійній функції:

$$\begin{aligned}
 T_1 &= H + \Sigma_1(E) + Ch(E, F, G) + Ki + Wi \\
 T_2 &= \Sigma_0(A) + Maj(A, B, C)
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

Де:

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

$$\begin{aligned} Ch(E, F, G) &= (E \wedge F) \oplus (\neg E \wedge G) \\ Maj(A, B, C) &= (A \wedge B) \oplus (A \wedge C) \oplus (B \wedge C) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Хеш використовується для перевірки цілісності даних, навіть незначна зміна вхідних даних призводить до абсолютно іншого хешу, що дозволяє виявити будь-які зміни в даних. Це робить хешування ключовим елементом безпеки блокчейну. [21, 22]

Аутентифікація

Цифрові підписи забезпечують аутентифікацію транзакцій, дозволяючи учасникам мережі переконатися, що транзакція дійсно була ініційована заявленим відправником. Кожна транзакція підписується приватним ключем відправника, і будь-який учасник мережі може перевірити підпис за допомогою відповідного публічного ключа. Це забезпечує додатковий рівень безпеки та запобігає несанкціонованим змінам даних. [20, 21]

Таким чином, основні принципи блокчейну забезпечують його надійність, безпеку і незмінність, роблячи цю технологію особливо цінною для широкого спектра застосувань, включаючи управління енергосистемами.

2.4 Використання технології блокчейн в енергосистемах

Традиційні енергосистеми базуються на централізованій моделі, де великі електростанції виробляють енергію і передають її споживачам через складні та розгалужені мережі. Цей підхід має кілька недоліків, таких як вразливість до атак і збоїв, високі витрати на обслуговування та втрати енергії під час передачі. Традиційні системи також обмежують можливості для інтеграції відновлюваних джерел енергії через їхню непередбачуваність і необхідність постійного балансування попиту та пропозиції. [20]

Сучасні енергосистеми, в тому числі "розумні мережі" (smart grids), включають інтеграцію децентралізованих енергетичних джерел, таких як сонячні батареї та вітрові турбіни, а також технологій для моніторингу та управління енергією в реальному часі. Вони використовують інноваційні методи для зменшення втрат енергії, підвищення ефективності та покращення

стабільності системи. Однією з основних переваг сучасних енергосистем є їх здатність адаптуватися до змінних умов і швидко реагувати на зміни попиту та пропозиції енергії. [23]

Блокчейн може суттєво вплинути на модернізацію енергомереж, забезпечуючи новий рівень прозорості, безпеки та ефективності. Однією з ключових переваг блокчейну є його здатність забезпечувати надійний та незмінний запис транзакцій, що є особливо важливим для управління децентралізованими енергетичними системами.

Завдяки блокчейну, всі транзакції можуть бути відкрито перевірені усіма учасниками мережі. Це дозволяє відстежувати походження енергії, що важливо для сертифікації відновлюваних джерел енергії та забезпечення чесних умов для всіх учасників ринку. Блокчейн забезпечує високий рівень безпеки завдяки своїй незмінності та криптографічному захисту. Це допомагає запобігти шахрайству та несанкціонованому доступу до даних, що є критичним для стабільної роботи енергомережі. [20]

Використання блокчейну дозволяє створювати децентралізовані енергетичні ринки, де виробники та споживачі енергії можуть взаємодіяти безпосередньо без посередників. Це знижує витрати на транзакції та підвищує ефективність ринку. Смарт контракти на основі блокчейну автоматизують виконання угод, забезпечуючи миттєву оплату та обробку транзакцій. Це зменшує адміністративні витрати та усуває необхідність у довірених посередниках. [21]

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

- Децентралізована генерація потужностей
- Оптимізація використання енергії з відновлюваних джерел
- Можливість відстежувати походження енергії
- Високий рівень безпеки завдяки незмінності даних
- Автоматизація розподілу відповідно до прозорих смарт контрактів
- Зниження витрат на розподіл електроенергії

Рисунок 2.2 — Потенційні покращення, які здійснить впровадження технології блокчейн в енергосистему

Таким чином, блокчейн має потенціал значно покращити ефективність і безпеку сучасних енергосистем, сприяючи більшій інтеграції відновлюваних джерел енергії та створенню децентралізованих енергетичних ринків. [22]

2.5 Переваги та особливості впровадження блокчейну в енергосистемах

Використання блокчейн технологій в енергетиці має наступні переваги:

- **Прозорість.** Блокчейн забезпечує високу прозорість завдяки розподіленому реєстру, де всі транзакції зберігаються в незмінному вигляді. Це дозволяє всім учасникам енергосистеми мати доступ до однакової інформації і легко перевіряти будь-яку транзакцію. Наприклад, використання блокчейну в енергосистемах дозволяє відстежувати походження енергії, підтверджуючи, що вона була вироблена з відновлюваних джерел. Це сприяє довірі між споживачами і постачальниками енергії, оскільки всі дані відкриті для перевірки. [21]

- **Безпека.** Завдяки використанню криптографічних методів, дані, що зберігаються у блокчейні, є незмінними і захищеними від несанкціонованого доступу. Кожна транзакція верифікується мережею учасників блокчейну до її включення у блок, що запобігає зайвим витратам і шахрайству. У енергосистемах це дозволяє забезпечити захист критичних даних від кібератак, що є особливо важливим для підтримки стабільної роботи мережі. [25]

- **Ефективність.** Блокчейн може підвищити ефективність енергосистем шляхом автоматизації багатьох процесів за допомогою смарт контрактів. Смарт контракти дозволяють автоматично виконувати угоди між учасниками мережі без необхідності в посередниках, що зменшує транзакційні витрати і підвищує швидкість обробки операцій. Наприклад, смарт контракти можуть автоматично регулювати платежі за спожиту енергію, забезпечуючи миттєві розрахунки між виробниками і споживачами. [20]

Серед проблем впровадження блокчейну можна виділити наступні:

- **Масштабування.** Одним з основних труднощів впровадження блокчейну в енергосистемах є проблема масштабування. Традиційні блокчейни, такі як біткоїн і Ethereum, мають обмежену пропускну здатність, що обмежує кількість транзакцій, які можуть бути оброблені за одиницю часу. Для великих енергетичних мереж це може стати значною перешкодою. Рішенням може бути використання нових алгоритмів консенсусу, які можуть забезпечити вищу пропускну здатність і знизити затримки. [22, 24]

- **Впровадження нормативно-правової бази.** Це — ще один значний виклик для впровадження блокчейну в енергосистемах. У багатьох країнах законодавча база для блокчейну все ще розвивається, і існує багато невизначеностей щодо його правового статусу. Наприклад, питання конфіденційності даних і відповідності регулятивним вимогам можуть ускладнити використання блокчейну. Крім того, впровадження блокчейну може вимагати змін у існуючих регуляторах енергетичного ринку і створення нових нормативних актів для підтримки децентралізованих енергетичних ринків.[21]

- **Енергоємність систем управління,** що працюють на основі на технологію блокчейн. Блокчейн-системи, особливо ті, що використовують алгоритм Proof of Work (PoW), споживають значну кількість електроенергії. Це обумовлено необхідністю виконання великих обсягів обчислювальної роботи для валідації та додавання нових блоків у ланцюжок. Наприклад, мережа Bitcoin

відома своїм високим рівнем споживання енергії, який порівнюють з енергоспоживанням невеликих країн. Високі енерговитрати призводять до значних викидів парникових газів, якщо електроенергія виробляється традиційними ел станціями. Це викликає занепокоєння щодо екологічного впливу використання блокчейн-технологій. [20, 25]

Переваги	Проблеми
Прозорість діяльності завдяки відкритому розподіленому реєстру	Обмежена пропускна здатність традиційних блокчейнів
Незмінність даних та захист від несанкціонованого доступу	Невизначеність нормативного статусу протоколів технології
Автоматизація процесів розподілу за допомогою смарт контрактів на основі блокчейну	Енергоємність систем управління, що повністю опираються на технологію блокчейн

Рисунок 2.3 — Переваги та проблеми впровадження блокчейну в управління енергосистемою

Таким чином, блокчейн має значний потенціал для покращення прозорості, безпеки та ефективності енергосистем, але існують деякі проблеми, пов'язані з масштабуванням і нормативною базою. Успішне впровадження цієї технології вимагатиме не лише технічних інновацій та значних інвестицій, але й відповідної законодавчої підтримки. [20, 22].

2.6 Передумови для нового етапу розвитку технології

На початку 2010-х років блокчейн вже був відомий як основа для біткоїна, першої в світі криптовалюти, проте стало очевидним, що ця технологія має потенціал для вирішення значно ширшого кола завдань. Зокрема, виникла потреба в автоматизації фінансових процесів, що вимагала більш складних і надійних рішень, ніж просто запис транзакцій у розподіленому реєстрі. Заснування Ethereum одним з найважливіших моментів цього періоду стало заснування платформи Ethereum.

Для успішного впровадження блокчейн-технологій у сфері енергетики виникла потреба вирішення ряду специфічних задач. Серед них — автоматизація

та оптимізація розподілу енергетичних ресурсів. Підвищення прозорості енергетичних транзакцій. Блокчейн дозволяє створювати більш прозорі та децентралізовані ринки енергії, де всі учасники могли б мати доступ до єдиного джерела правдивої інформації про транзакції та обсяги спожитої енергії. [26]

Однією з ключових можливостей блокчейну в енергетиці стала інтеграція з відновлюваними джерелами енергії. Відновлювані джерела, такі як сонячні та вітрові електростанції, часто характеризуються непередбачуваністю виробництва енергії. Блокчейн-технологія дозволила автоматизувати процеси балансування попиту і пропозиції енергії, знижуючи потребу в централізованих органах управління. Це сприяло більш ефективному використанню відновлюваних ресурсів та зменшенню залежності від викопного палива. [27]

Запуск платформи Ethereum у 2015 році став ключовим моментом у розвитку блокчейн-технологій. Ethereum відрізнявся від біткоїна тим, що надавав розробникам можливість створювати децентралізовані додатки (dApps) на базі свого блокчейну. Це дало змогу реалізовувати більш складні бізнес-процеси та інтегрувати різні системи у єдину децентралізовану мережу. Платформа Ethereum використовувала мову програмування Solidity, що дозволяло розробникам писати власні логічні конструкції та алгоритми на блокчейні. Це відкрило нові можливості для автоматизації процесів у фінансовій сфері, включаючи автоматизовані розрахункові системи, що значно знижувало витрати та мінімізувало ризик помилок. Ethereum забезпечує не лише можливість створення децентралізованих веб-додатків, для взаємодії з контрактом. А й надає нові інструменти для розробників. Включно з Ethereum Virtual Machine (EVM), яка виконує код лише так, як було написано і виконано перший раз, без будь-яких можливостей для шахрайства чи втручання третіх сторін. Це дозволяє створювати складні логічні структури, які можуть автоматизувати взаємодію між учасниками різних процесів, включаючи фінансові та енергетичні системи. [26]

У сфері енергетики, завдяки можливостям Ethereum, було можливим створення нових моделей децентралізованого управління. Це включало моделі,

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

в яких споживачі могли стати активними учасниками ринку, продаючи надлишкову енергію, вироблену відновлюваними джерелами, безпосередньо іншим споживачам. Ethereum також почав використовуватися для створення децентралізованих ринків енергії, що дозволило виробникам та споживачам енергії взаємодіяти безпосередньо без посередників. Це підвищило прозорість транзакцій та ефективність розподілу енергетичних ресурсів. Автоматизація обміну енергією за допомогою блокчейну забезпечила точний облік і розподіл енергетичних ресурсів, що сприяло інтеграції відновлюваних джерел енергії та зменшенню витрат на енергетичні транзакції. [27]

Завдяки Ethereum стало можливим створювати складніші моделі управління енергетичними системами, що дозволило автоматизувати процеси розподілу електроенергії та забезпечити більшу гнучкість та надійність енергетичних мереж. Це стало основою для подальшого розвитку технологій у цій галузі, закладаючи фундамент для впровадження смарт контрактів та інших інноваційних рішень у майбутньому. Проєкти, що використовують такий принцип активно впроваджуються в низці країн, зокрема: США, Німеччина, Великобританія, Австралія, Японія, Австрія та деякі інші в тестовому режимі. [26]

У сфері автоматизації блокчейн відкрив нові можливості для підвищення ефективності процесів. Наприклад, автоматизація розрахунків за спожиту енергію, яка раніше вимагала участі кількох посередників і значних витрат часу, могла бути виконана миттєво і безпечно за допомогою блокчейну. Це дозволило знизити адміністративні витрати і зменшити ризик помилок. Однією з головних переваг використання блокчейну в енергетиці була можливість створення більш прозорої та інтегрованої системи управління енергетичними ресурсами. Це потенційно дозволило б операторам енергосистем і споживачам мати доступ до актуальних і достовірних даних, що значно підвищило ефективність прийняття рішень. [28]

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.7 Смарт контракти, їх основні принципи та розвиток

Смарт контракти — це самовиконувані програми, де умови угоди між сторонами записані в коді, який автоматично виконується на блокчейн-платформі. Вони забезпечують автоматизацію та безпеку виконання угод без необхідності в посередниках. Це знижує витрати і підвищує швидкість транзакцій. Основні принципи смарт контрактів включають наступні аспекти:

- Автоматизація виконання угод: усі дії, передбачені контрактом, виконуються автоматично при настанні визначених умов. Це усуває потребу у ручному втручанні і знижує ризик помилок.
- Незмінність: після того, як смарт контракт створений і записаний в блокчейн, його умови не можуть бути змінені. Це забезпечує високий рівень довіри між учасниками угоди.
- Прозорість: всі транзакції і дії, що виконуються смарт контрактом, записуються в блокчейні. Це дозволяє будь-якому учаснику мережі перевіряти умови і виконання контракту. [24]

За окремими базовими принципами прийнято розподіляти смартконтракти на розподілені, автономні, децентралізовані, гібридні.

Розподілені смартконтракти найбільше виділяють принцип прозорості. У розподілених смарт контрактах всі учасники мають доступ до однієї і тієї ж інформації, що дозволяє легко перевіряти транзакції і забезпечує довіру між учасниками.

Автономні смартконтракти автоматично виконують задані умови без необхідності втручання людини, що забезпечує ефективність і знижує ризик помилок. Найяскравіше виділяється принцип автоматизації.

Децентралізовані смартконтракти розміщені на багатьох вузлах мережі, що робить їх більш стійкими до атак і забезпечує захист даних. особливо виділяється принцип безпеки.

Гібридні смартконтракти можуть використовувати різні блокчейни і зберігати дані, які після додавання не можуть бути змінені. Відмінною рисою залишається незмінність попри велику кількість використаних елементів. [20]



Рисунок 2.4 — Смарт контракти види та принципи

Таким чином, кожен тип смарт контрактів характеризує певний принцип, що робить їх унікальними та корисними у відповідних сценаріях використання.

Концепція смарт контрактів була запропонована Н. Сабо в 1990-х роках, але практична реалізація стала можливою лише з появою блокчейн-технології. Платформа Ethereum, заснована В. Бутерінім і запущена в 2015 році, стала першою платформою, яка дозволила розробникам створювати і виконувати смарт контракти, що дало поштовх до широкого впровадження цієї технології в різних галузях. [25]

2.8 Технічні аспекти смарт контрактів

Смарт контракти в енергетиці мають специфічну архітектуру, яка враховує вимоги до безпеки, ефективності та інтеграції з існуючими системами. Основні компоненти архітектури смарт контрактів у енергетиці включають:

- Модуль збору даних: збирає дані з різних джерел, таких як лічильники енергії, сенсори та інші пристрої IoT. Ці дані можуть включати інформацію про виробництво, споживання та зберігання енергії.

- Модуль обробки даних: виконує попередню обробку зібраних даних для подальшого використання смарт контрактами. Це може включати нормалізацію, фільтрацію та перевірку даних.
- Власне смарт контракти: виконують логіку управління енергетичними ресурсами, включаючи автоматизацію транзакцій, балансування попиту та пропозиції, а також розподіл енергії між учасниками ринку.
- Модуль зберігання даних: зберігає результати виконання смарт контрактів у блокчейні, забезпечуючи незмінність та прозорість записів.
- Інтерфейси API: дозволяють взаємодіяти з іншими системами та сервісами, такими як платіжні шлюзи, системи управління мережею та інші блокчейн-платформи. [20, 22]

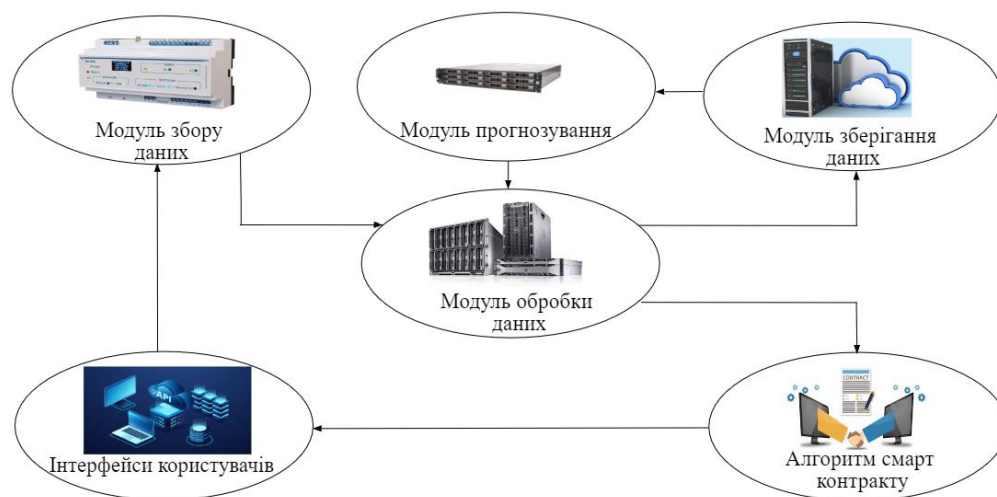


Рисунок 2.5 — Структура зв'язку елементів прикладного смарт контракту
Основні платформи для реалізації смарт контрактів у енергетиці :

EOS — потужна блокчейн-платформа, яка забезпечує високу продуктивність і масштабованість для децентралізованих додатків. Завдяки механізму консенсусу Delegated Proof of Stake (DPoS), EOS може обробляти тисячі транзакцій на секунду, що робить її придатною для енергетичних систем, де важлива висока швидкість обробки даних. [21, 28]

IOTA — не є класичною блокчейн-платформою, вона використовує технологію Directed Acyclic Graph (DAG), відому як Tangle, для забезпечення

безкоштовних транзакцій та високої масштабованості. ІОТА розроблена спеціально для «Інтернету речей» (IoT), що робить її ідеальною для інтеграції в енергетичні системи, де потрібні численні дрібні транзакції між різними пристроями та сенсорами. [20, 29]

2.9 Досвід впровадження смарт контрактів в енергетиці

Деякі компанії та країни в світі вже використовують на практиці алгоритми смарт контрактів та реалізують проєкти розумних мереж. Найвідоміші з них наведені нижче.

«Brooklyn Microgrid» у Нью-Йорку є одним з найвідоміших прикладів використання блокчейн-технологій в енергетиці. Використовуючи платформу Ethereum, цей проєкт дозволяє місцевим виробникам та споживачам енергії здійснювати транзакції безпосередньо між собою. Смарт контракти автоматизують процес купівлі-продажу енергії, забезпечуючи прозорість та ефективність. [30]

«Power Ledger» є австралійською компанією, що використовує блокчейн для створення децентралізованих енергетичних ринків. Платформа Power Ledger дозволяє користувачам здійснювати транзакції з енергією за допомогою смарт контрактів, автоматизуючи процеси розподілу та обліку енергії. Це сприяє підвищенню ефективності використання відновлюваних джерел енергії та зниженню витрат на енергетичні операції. [31]

«WePower» — це литовська блокчейн-платформа, що забезпечує фінансування та торгівлю енергією відновлювальних джерел. Використовуючи смарт контракти на базі Ethereum, WePower дозволяє виробникам продавати свою майбутню енергію у вигляді токенів – електронних гарантій, що представляють певний обсяг енергії. Споживачі можуть інвестувати в цифрові активи платформи, забезпечуючи фінансування проєктів з відновлюваної енергетики та отримуючи право на отримання енергії в майбутньому. [32]

«Electron» — британський стартап, що використовує блокчейн для оптимізації управління енергетичними мережами. Платформа Electron

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

використовує смарт контракти для автоматизації процесів розподілу енергії та управління попитом. Це дозволяє знизити витрати на обслуговування мережі та підвищити ефективність управління енергетичними ресурсами. [33]

«Grid+» є американським проєктом, що використовує блокчейн для створення децентралізованої платформи з управління енергетичними транзакціями. За допомогою смарт контрактів Grid+ автоматизує процеси купівлі-продажу енергії між виробниками та споживачами, забезпечуючи прозорість і зниження витрат на енергетичні операції. [34, 35]

«SolarCoin» — глобальна світова блокчейн-платформа, яка розраховується з виробниками сонячної енергії цифровими активами за кожен вироблений мегават-годину енергії. Смарт контракти на SolarCoin автоматизують процес верифікації та оплати, забезпечуючи прозорість, стимулюють виробництво сонячної енергії. [36]

«LO3 Energy» — компанія, що розробляє і реалізує проєкти локальних розумних електричних мереж, де місцеві виробники і споживачі енергії можуть здійснювати транзакції безпосередньо між собою за допомогою смарт контрактів. Це дозволяє створювати локальні ринки енергії, де відновлювані джерела відіграють ключову роль. [37]

P2P Energy Trading Platform – міжнародна платформи для торгівлі енергією між користувачами (Peer-to-Peer, P2P) також використовують смарт контракти для автоматизації процесів купівлі-продажу енергії, зокрема відновлюваної. Ці платформи дозволяють користувачам продавати надлишкову енергію, вироблену сонячними електростанціями або іншими ВДЕ, безпосередньо іншим споживачам. [38]

“Wildpoldsried microgrid” – енергетичний проєкт однієї з громад на території Баварії, що в Німеччині, став випробувальною платформою для досліджень та практичного застосування технології локальних та розумних енергетичних мереж. Розумна мережа включає в себе інтеграцію відновлюваних джерел енергії, таких як вітрові та сонячні станції, що забезпечує енергетичну

незалежність. Завдяки громадським проєктам, такими як встановлення сонячних панелей на комунальних будівлях і використання біогазових установок, Вільдпольдсрід виробляє в кілька разів більше енергії, ніж споживає. Інноваційні проєкти, включаючи системи управління попитом і накопичення енергії, підвищують стабільність і ефективність місцевої енергетичної системи. [39, 40]

"Smart grid"	Відновлювані джерела	Автоматизація транзакцій
Brooklyn Microgrid	SolarCoin	Electron
Power Ledger	LO3 Energy	Grid+
WePower	Wildpoldsried smart grid	P2P Energy Trading

Рисунок 2.6 — Світові проєкти, що базуються на використанні смарт контрактів та напрямки їх роботи

Принциповий алгоритм роботи типового смарт контракту

Зазвичай смарт контракт складається з таких основних компонентів: ініціалізація контракту, функції для внесення змін та виконання дій, і механізми для перевірки умов. Смарт контракти виконуються в децентралізованій мережі блокчейну, що забезпечує прозорість та безпеку операцій. На рисунку подана блок-схема алгоритму смарт контракту, яка ілюструє основні етапи його роботи, включаючи процеси ініціалізації, обробки транзакцій та перевірки умов.



Рисунок 2.7 — Блок-схема алгоритму типового смарт контракту

Опис блок-схеми

Початковий етап, який символізує початок роботи над смарт контрактом. Написання коду смарт контракту на мові програмування Solidity. Компіляція

написаного коду у байтовий код, який зрозумілий віртуальній машині Ethereum. Відправка скомпільованого байтового коду у мережу Ethereum для розгортання смарт контракту. Користувач відправляє транзакцію з даними, які необхідно записати у смарт контракт. Валідатори перевіряють транзакцію та включають її у блок для подальшої обробки. Виклик функції смарт контракту для запису отриманих даних у його стан. Дані, що надійшли, зберігаються у стані смарт контракту у блокчейні. Валідатор формує новий блок, який включає підтверджену транзакцію. Новий блок поширюється по всій мережі Ethereum для забезпечення консенсусу. Користувач відправляє запит на читання даних зі смарт контракту. Смарт контракт повертає запитувані дані користувачу. Завершення роботи смарт контракту, коли всі необхідні дії виконані.

2.10 Особливості впровадження смарт контрактів в управління енергосистемами

Використання смарт контрактів дозволяє вирішити наступні задачі управління та розподілу електроенергії:

- Автоматизація процесів обміну та обліку енергії між виробниками і споживачами. Що дозволить зменшити кількість посередників і знижує адміністративні витрати. Наприклад, у децентралізованих енергетичних ринках смарт контракти можуть автоматично виконувати розрахунки за енергію, що виробляється і споживається, забезпечуючи точний облік і своєчасні платежі.

- Автоматично балансувати попит і пропозицію енергії в реальному часі. Аналог систем контролю за балансом потужності. Це дозволяє оптимізувати використання енергетичних ресурсів і знизити втрати енергії. Наприклад, смарт контракти можуть регулювати споживання енергії у пікові години, знижуючи навантаження на мережу і запобігаючи перевантаженням.[21, 26]

Прозорість транзакцій, що забезпечує смарт контракт дозволяє легко верифікувати дані про виробництво і споживання енергії, що підвищує довіру між учасниками ринку. Наприклад, смарт контракти можуть використовуватися

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

для визначення джерела походження енергії, що особливо важливо для відновлюваних джерел. [24]

2.10.1 Переваги впровадження смарт контрактів

Смарт контракти підвищують ефективність управління енергосистемами, усуваючи необхідність у ручній обробці транзакцій і знижуючи витрати на адміністрування. Вони забезпечують автоматичне виконання угод при настанні певних умов, що дозволяє швидше і точніше виконувати транзакції.

Автоматизація за допомогою смарт контрактів дозволяє зменшити втручання людини і непередбачуваних помилок, за рахунок чого – підвищити надійність процесів. Смарт контракти можуть виконувати складні логічні операції без необхідності у ручному втручанні. Це особливо важливо в енергетиці, де точність і швидкість виконання транзакцій мають критичне значення. [25]

Смарт контракти забезпечують високу прозорість, оскільки всі транзакції записуються в блокчейні і можуть бути перевірені будь-яким учасником мережі. Це підвищує довіру між учасниками ринку і знижує ризик шахрайства. Прозорість даних також сприяє більш точному моніторингу та управлінню енергетичними ресурсами. [24]

2.10.2 Проблеми впровадження смарт контрактів

Одним важливих елементів впровадження смарт контрактів є їх безпека. Вразливості в коді смарт контрактів можуть призвести до серйозних наслідків, включаючи втрату коштів або даних. Для протидії цим загрозам використовуються різні методи, такі як аудит коду, верифікація формальних моделей та дотримання стандартів безпеки.

Технічні обмеження блокчейн-платформ, такі як масштабованість і пропускна здатність, можуть обмежувати ефективність смарт контрактів. Наприклад, блокчейн Ethereum може обробляти обмежену кількість транзакцій на секунду, що може бути недостатнім для великих енергетичних систем. Для

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

подолання цих обмежень розробляються нові алгоритми консенсусу та технології, такі як шардінг і сайдчейни. [20]

Правові аспекти використання смарт контрактів також є важливим викликом. У багатьох країнах відсутні чіткі нормативні акти, що регулюють використання смарт контрактів. В Україні виникає необхідність доопрацювати та доповнити наявну правову базу, яка враховуватиме специфіку смарт контрактів і забезпечить їх юридичну силу. Це може включати розробку стандартів для створення та виконання смарт контрактів, а також механізмів вирішення проблем, що виникають внаслідок їх використання. [23]

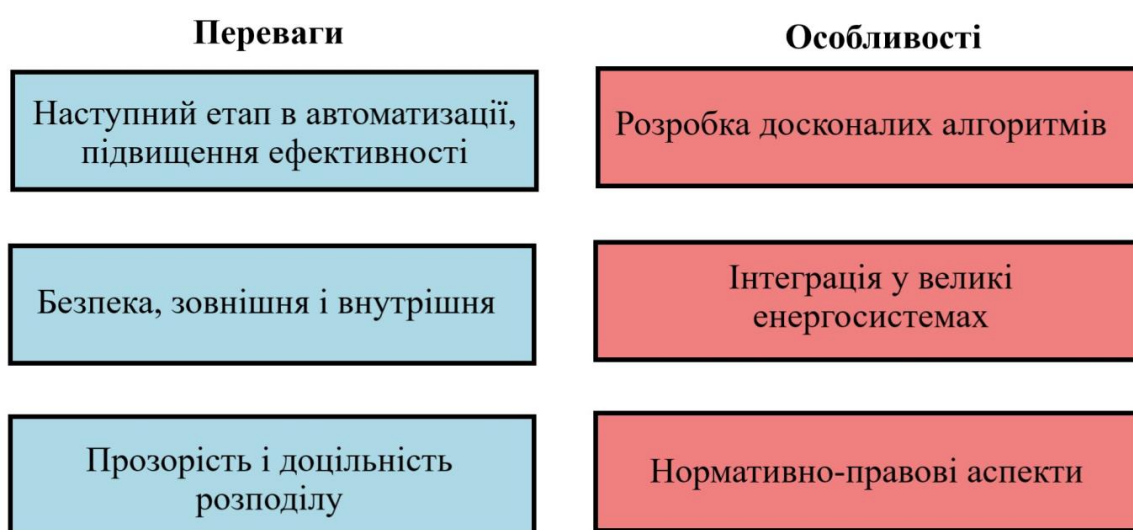


Рисунок 2.7 — Переваги та проблеми при використанні смарт контрактів для автоматизації енергосистем

Автоматизація енергосистем за допомогою смарт контрактів значно підвищує ефективність управління, знижуючи необхідність у ручному втручанні та ризик помилок. Водночас, для успішного впровадження цих технологій необхідно враховувати технічні, правові та безпекові аспекти, включаючи масштабованість, захист від вразливостей та відповідність нормативно-правовим вимогам.

3 МОДЕЛЮВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО АЛГОРИТМУ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН ДЛЯ РОЗПОДІЛУ ПОТУЖНОСТЕЙ У ДОСЛІДЖУВАНОМУ ФРАГМЕНТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

3.1 Постановка задачі

Екологічні та економічні зміни в структурі світового виробництва та споживання вимагають розвитку та адаптації до нових вимог великої кількості систем та алгоритмів забезпечення життєдіяльності планети. Зокрема, в енергетиці набувають поширення проекти, що базуються на розробці розумних фрагментів мережі. Такий підхід дозволяє оптимізувати виробництво та споживання електроенергії, забезпечуючи стабільність і ефективність електропостачання. Основною метою цього етапу роботи є створення моделі смарт контракту на базі технології блокчейн, в якій буде реалізовано керування добовим розподілом потужності в фрагменті мережі, забезпечуючи баланс між генерацією та споживанням електроенергії за допомогою різних засобів.

Задача полягає в розробці моделі смарт контракту в якому реалізовано керування розподілом потужності фрагмента мережі. Дана спрощена модель фрагмента мережі базується на даних про фрагмент енергосистеми німецького регіону Баварія. Громада Вільдпольдсріда (Wildpoldsried – нім.) стала прикладом ефективного використання відновлюваних джерел енергії та сучасних технологій керування електричними мережами. У 1997 році місцеві органи влади вирішили зробити акцент на відновлюваній енергетиці, результатом чого стало виробництво електроенергії в обсязі, що в кілька разів перевищує потреби селища. Цей надлишок енергії продається до зовнішньої мережі, що приносить значний дохід.

				12.06.24	141.ЕК0121.011ДБ									
				12.06.24										
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МОДЕЛЮВАННЯ АЛГОРИТМУ СМАРТ КОНТРАКТУ ТА ФРАГМЕНТУ ЕЕС					Лім.	Арк.	Акрушіє		
Розроб.		Татусь Р. М.											1	20
Перевір.		Гулий В. С.												
Н. Контр.		Шполянський О. Г.												
Затверд.		Марченко А.А.								КПІ ім. Ігоря Сікорського ФЕА, гр. ЕК-01				

Даний фрагмент мережі включає такі елементи:

Розподільча підстанція 110/10 кВ; сонячні електростанції; вітрові електростанції; промислові споживачі, що мають гнучкий характер споживання; побутові споживачі (населення); Газотурбінні установки – це електростанція, що використовує газові турбіни для виробництва електроенергії. Ці елементи утворюють основу фрагмента мережі, забезпечуючи його гнучкість, стійкість, дозволяючи ефективно управляти енергетичними ресурсами та задовольняти потреби відповідно до вимог споживачів.

Очікувані результати:

- Тестова спрощена модель елемента електроенергетичної системи (фрагмент мережі) для оптимізації виробництва та споживання електроенергії.
- Створення реального смарт контракту в мережі блокчейн для повністю автоматизованого прийняття рішень щодо розподілу потужності в фрагменті мережі із прогнозованих даних за моделлю «на наступну добу».
- Перевірка та демонстрація результатів роботи алгоритмів управління розподілом для ефективного використання надлишків генерації для забезпечення стабільного енергопостачання в пікові години.
- Аналіз отриманих результатів.

3.2 Опис моделі

Для полегшення візуальної інтерпретації досліджуваного об'єкта створено структурну схему фрагмента мережі та його зв'язку із зовнішньою ЕЕС:

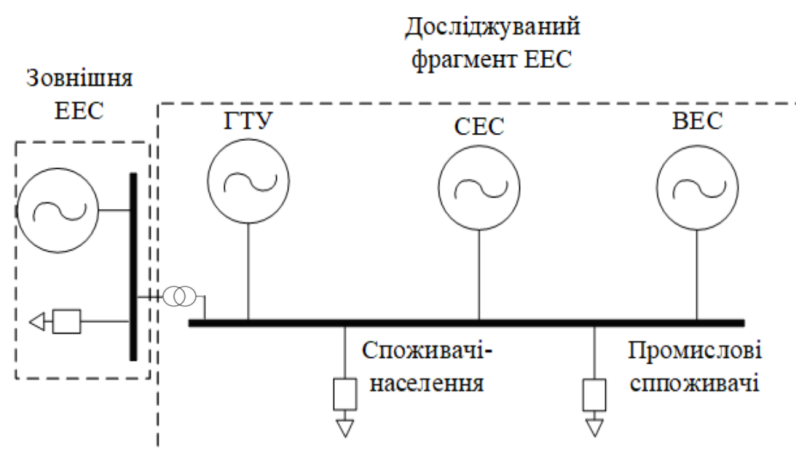


Рисунок 3.1 – структурна схема фрагменту електроенергетичної мережі

Модель фрагмента мережі є спрощеною для оптимізації роботи смарт контрактів в межах тестових мереж і містить почерговий опис основних параметрів генерації, з якими працює смарт контракт і опис споживання потужності населенням та промисловістю.

Розподільча підстанція, її функції забезпечує рівномірний розподіл генерації між всіма споживачами. Передачу надлишкової генерації в зовнішню мережу. Передача електроенергії із зовнішньої мережі при недостатній внутрішній генерації. Максимальна потужність передачі до/з зовнішньої мережі обмежена 20 МВА в непікові години і 10 МВА в пікові години (18:00 – 21:00). Обмеження застосовані для моделювання паралельної роботи з іншими енергосистемами.

Сонячна електростанція виступає джерелом відновлюваної енергії найбільшої пікової потужності. Її генерація залежить від сонячного випромінювання, що зумовлює графік генерації з піковими значеннями вдень. Максимальна потужність генерації – 50 МВА. Пікова генерація вдень, відсутня – вночі. Вплив погодних умов, зокрема хмарність може суттєво зменшувати генерацію.

Вітрова електростанція забезпечує стабільну генерацію, залежну від вітрових умов. Потужність генерації від 25 МВА. Генерація залежить від мінливості вітру. Промисловий споживач є великим споживачем електроенергії, з графіком споживання, який залежить від виробничих процесів. Особливості: Високе споживання протягом робочих годин, з піками до 25 МВА. Можливість оптимізації споживання в години пікових навантажень для підтримки стабільності фрагмент мережі.

Споживачі населення мають типові графіки споживання з ранковими та вечірніми піками. Пікові значення потужності споживання до 90 МВА вранці та ввечері. Велика кількість споживачів може створювати значне навантаження в години піків.

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Газотурбінна установка використовується для покриття дефіциту потужності в фрагмент мережі. Максимальна потужність генерації – 20 МВА. Використовується при перевищенні споживання над генерацією і неможливості покрити дефіцит за рахунок зовнішньої мережі. Можливий швидкий запуск для негайного покриття дефіциту.

3.3 Створення моделі смарт контракту

3.3.1 Розробка алгоритму роботи контракту

На основі даних про роботу реальних вітрових сонячних та газотурбінних електростанцій, а також типових даних про споживання на приміських територіях було створено тестові, узагальнені до погодинних, масиви даних, які достатньо точно відображають закономірності генерації відповідних установок. Масиви даних з інформацією про споживання обрані такі що за абсолютними значеннями наближені до приміських мереж, дані споживання оброблені та узагальнені аналогічно до даних генерації. Дані, що були створені на основі реальних переданих масивів були інтерпретовані в три умовні режими: коли фрагмент мережі переважно генерує потужність в зовнішню мережу (режим генерації), коли фрагмент мережі працює без взаємодії із зовнішньою мережею (режим ізольованої роботи) і коли фрагмент мережі переважно споживає електроенергію із зовнішньої мережі (режим споживання). Вхідні дані потужностей споживання та генерації для режиму генерація подані в таблиці 3.1.

Структурна схема алгоритму роботи смарт контракту

Перед початком створення безпосередньо елементів моделі був розроблений алгоритм роботи смарт контракту, який описує послідовність виконання розрахунків над вхідним даними, а також роботу деяких допоміжних функцій, що забезпечують введення та виведення даних в алгоритм смарт контракту. Структурна блок-схема алгоритму наведена на рисунках 3.2(а) та 3.2(а).

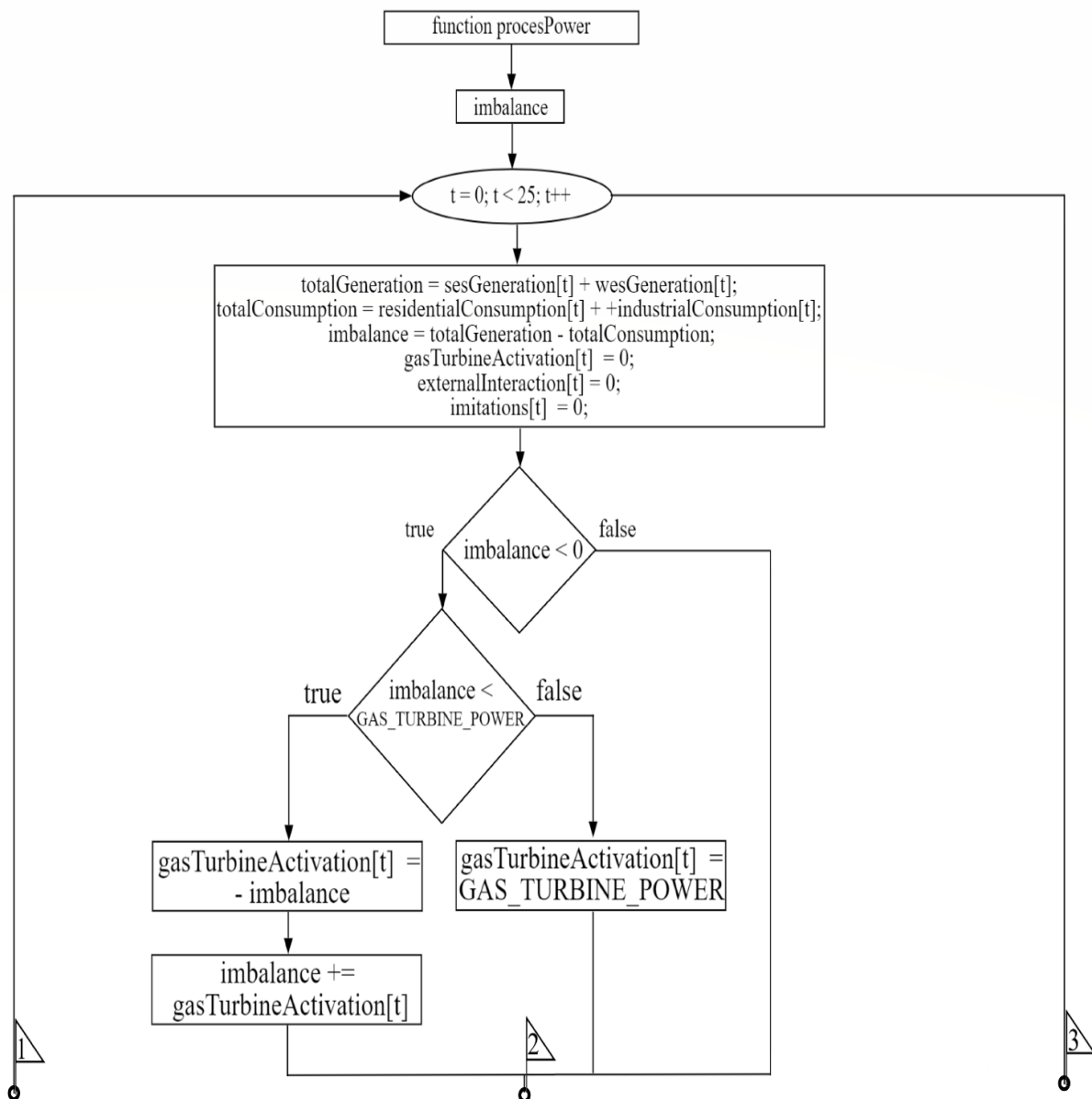


Рисунок 3.2(а) – Блок-схема алгоритму функції, що розраховує розподіл потужностей (частина 1)

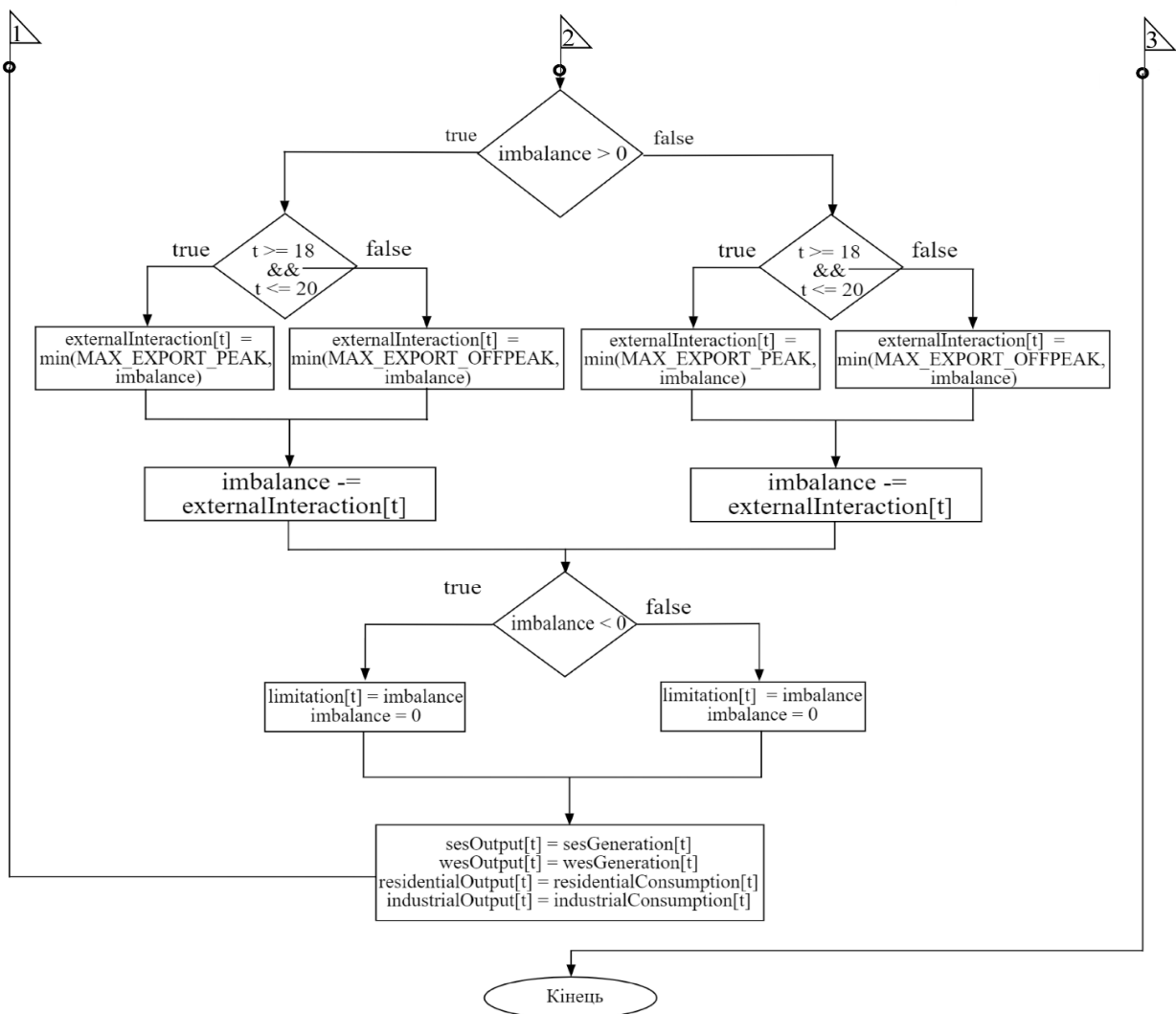


Рисунок 3.2(б) – Блок-схема алгоритму функції, що розраховує розподіл потужностей (частина 2)

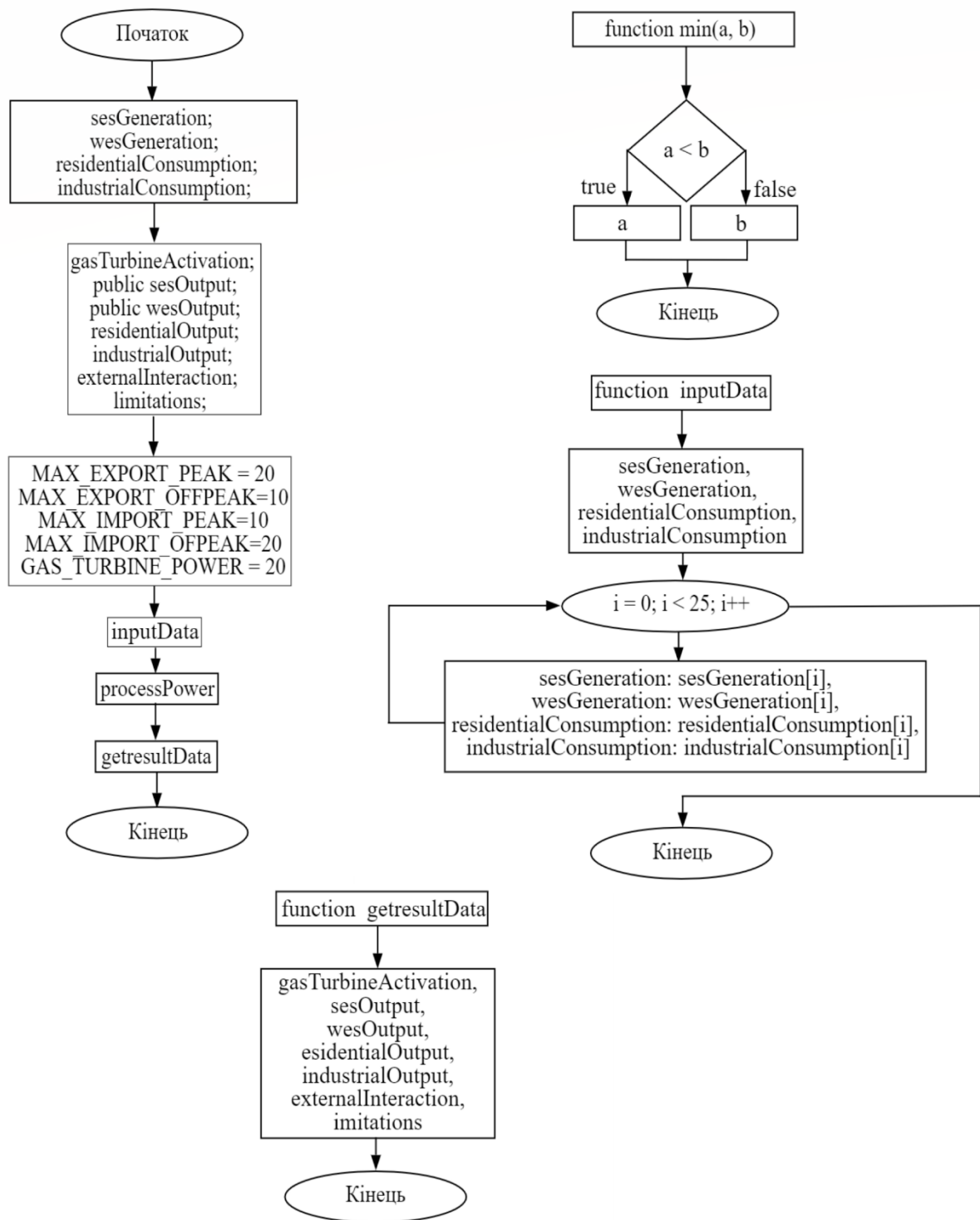


Рисунок 3.2(в) – Блок-схема алгоритму смарт контракту та деяких функцій

3.3.2 Верифікація розробленого алгоритму

Відповідно до алгоритму, наведеного на рисунках 3.2(а) та 3.2(б) та вхідних даних режиму генерації, що наведені в таблиці 3.1 було виконано розрахунок параметрів, що обраховуються за алгоритмом.

Таблиця 3.1 – Вхідні дані потужностей генерації та споживання в режимі генерації потужності в зовнішню енергосистему.

Час, год	Генерація СЕС, МВт	Генерація ВЕС, МВт	Споживання населення, МВт	Споживання промисловості, МВт
0	0	10	8	8
1	0	13	7	8
2	0	15	7	8
3	0	20	6	8
4	0	17	6	8
5	0	15	7	10
6	0	13	9	12
7	5	17	14	15
8	10	23	18	17
9	15	23	17	20
10	20	26	16	22
11	25	21	10	22
12	30	18	9	20
13	30	23	8	19
14	30	28	8	20
15	25	26	9	22
16	22	23	9	21
17	20	21	18	20
18	20	20	25	15
19	15	17	29	10
20	0	15	26	9
21	0	13	19	8
22	0	10	12	8
23	0	10	9	8
24	0	10	8	8

Для зменшення обсягу записів – наведено детальний розрахунок параметрів тільки для однієї години (12:00).

Обчислення потужності сумарної генерації:

$$P_{\text{сум.}}^{\text{ген.}} = P_{\text{СЕС}}^{\text{ген.}} + P_{\text{ГЕС}}^{\text{ген.}} = 30 + 18 = 48 \text{ (МВт)}, \text{ де:}$$

$P_{\text{СЕС}}^{\text{ген.}}$ – потужність, буде генерована СЕС, станом на вказаний час;

$P_{\text{ГЕС}}^{\text{ген.}}$ – потужність, буде генерована ВЕС, станом на вказаний час.

Обчислення потужності сумарного споживання:

$$P_{\text{сум.}}^{\text{спож.}} = P_{\text{пром.}}^{\text{спож.}} + P_{\text{нас.}}^{\text{спож.}} = 20 + 9 = 29 \text{ (МВт)}, \text{ де:}$$

$P_{\text{нас.}}^{\text{спож.}}$ – потужність, буде спожита населенням, станом на вказаний час;

$P_{\text{пром.}}^{\text{спож.}}$ – потужність, буде спожита промисловістю, станом на вказаний час.

Обчислення небалансу потужності:

$$P_{\text{неб.}} = P_{\text{сум.}}^{\text{ген.}} - P_{\text{сум.}}^{\text{спож.}} = 48 - 29 = 19 \text{ (МВт)}.$$

Перевірка необхідності введення в роботу газотурбінної установки: відповідно до алгоритму, газотурбінну установку необхідно залучати, у випадку появи від'ємного небалансу, тобто споживання перевищує генерацію. В даному випадку генерація перевищує споживання, небаланс більший від нуля, тому необхідності вводити в роботу установку немає.

Розрахунок сальдо перетоку потужності фрагменту ЕЕС

Оскільки в середині фрагменту мережі в цю годину виникатиме небаланс потужності, що більший від нуля, буде виконано розрахунок потужності, яку фрагмент мережі передасть у зовнішню мережу в цю годину. Але для цього необхідно перевірити; чи не належить даний час до пікового часу. Оскільки 12:00 не є піковим часом то ліміт видачі в зовнішню мережу потужності становитиме:

$$P_{\text{непик}}^{\text{ген.ліміт}} = 10 \text{ (МВт)}.$$

З урахуванням умови взаємодії із зовнішньою мережею розраховано новий небаланс потужності у внутрішній мережі:

$$P_{\text{неб.}} = P_{\text{неб.}} - P_{\text{непик}}^{\text{ген.ліміт}} = 19 - 10 = 9 \text{ (МВт)}.$$

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оскільки на даному етапі небаланс потужності все ще залишається і він більший від нуля, то для забезпечення балансу у внутрішній енергосистемі необхідно обмежити генерацію, на потужність залишкового небалансу:

$$P_{\text{обмеж.}}^{\text{ген}} = P_{\text{неб.}} = 9 \text{ (МВт)}.$$

Розрахунки для кожної години наведені в таблиці:

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку добового розподілу потужності у фрагменті мережі в режимі генерації потужності в зовнішню енергосистему

Час, год	Сумарна генерація, МВт	Сумарне споживання, МВт	Початковий небаланс, МВт	Генерація газотурбінної	Взаємодія із зовнішньою	Обмеження генерації /
0	10	16	-6	6	0	0
1	13	15	-2	2	0	0
2	15	15	0	0	0	0
3	20	14	6	0	-6	0
4	17	14	3	0	-3	0
5	15	17	-2	2	0	0
6	13	21	-8	8	0	0
7	22	29	-7	7	0	0
8	33	35	-2	2	0	0
9	38	37	1	0	-1	0
10	46	38	8	0	-8	0
11	46	32	14	0	-10	4
12	48	29	19	0	-10	9
13	53	27	26	0	-10	16
14	58	28	30	0	-10	20
15	51	31	20	0	-10	10
16	45	30	15	0	-10	5
17	41	38	3	0	-3	0
18	40	40	0	0	0	0
19	32	39	-7	7	0	0
20	15	35	-20	20	0	0
21	13	27	-14	14	0	0
22	10	20	-10	10	0	0
23	10	17	-7	7	0	0
24	10	16	-6	6	0	0

Також, відповідно до алгоритму та вхідних даних режиму генерації, розроблено текст програми тестової моделі алгоритму в середовищі MATLAB, для контролю вхідних даних та правильності роботи створеного алгоритму. Функції програми – розрахунок описаних в алгоритмі параметрів та виведення графіків для наочного аналізу результатів. Текст програми містить коментарі та деякі пояснення і відповідає наведеному на рисунках 3.2(а) та 3.2(б) алгоритму з урахуванням особливостей вбудованої мови програмування MATLAB, який наведено в Додатку А. В результаті моделювання в MATLAB отримали графіки:

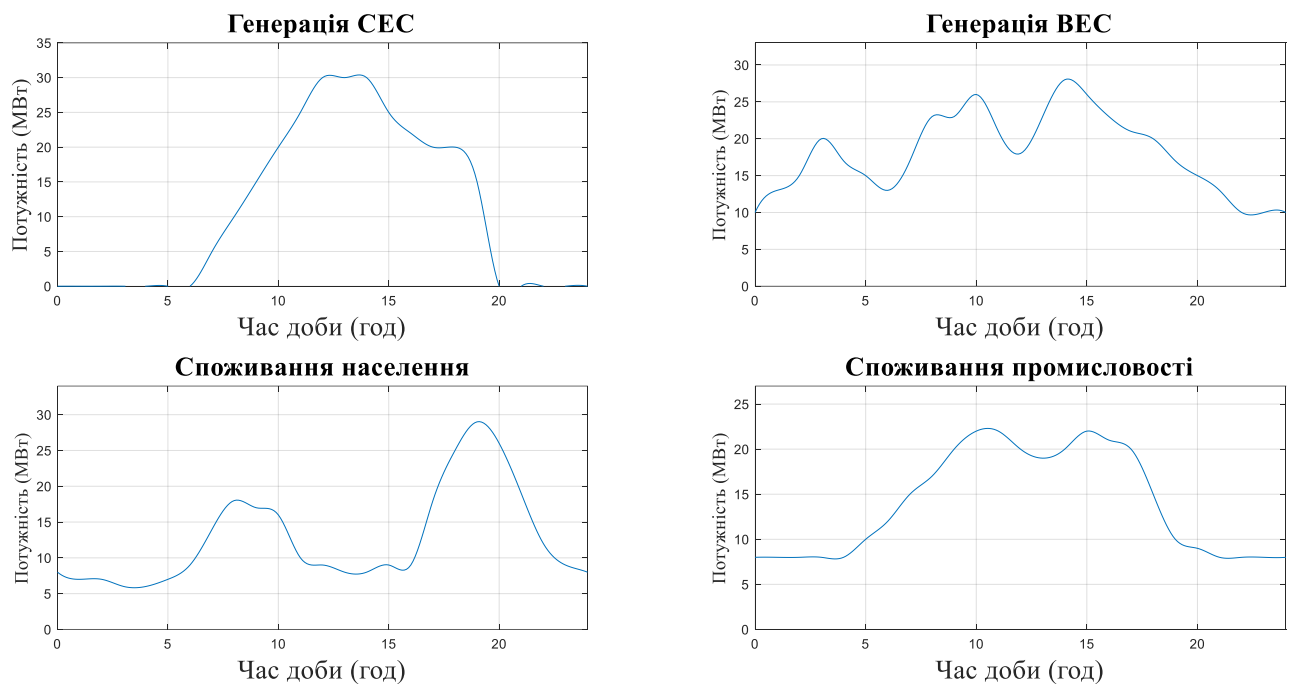


Рисунок 3.3 – Графіки вхідних даних добового розподілу потужності генерації та споживання

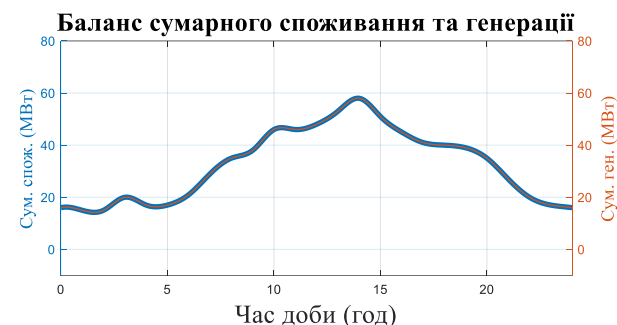
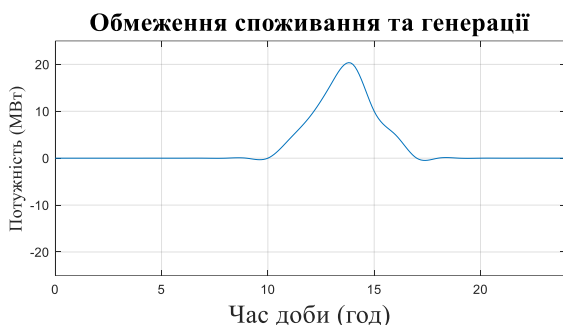
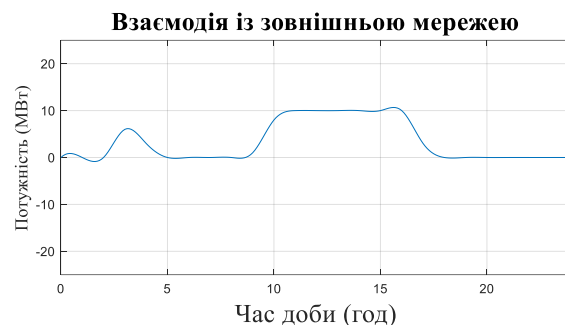


Рисунок 3.4 – Графіки результатів розрахунку розподілу потужності генерації ГТУ, взаємодії із зовнішньою мережею, обмеження генерації і споживання та їх балансу

Розрахунки, виконані вручну та за допомогою MATLAB, показали відмінну кореляцію. Графіки з інтерполяцією демонструють плавні зміни параметрів у часі, що відповідає очікуванням та показує адекватність моделі.

На графіках генерації присутні типові закономірності генерації відновлюваних джерел енергії. Графік СЕС показує максимальну генерацію в обідні години, тоді як генерація ВЕС коливається в певних межах протягом доби.

Графіки споживання відображають пікові години, коли споживання значно підвищується. Це характерно для ранкового та вечірнього часу для населення та для робочих годин для промисловості.

Графік генерації потужності газотурбінної установки показують, коли виникає потреба в додатковій генерації потужності від газотурбінної установки або взаємодії із зовнішньою мережею для покриття дефіциту або збуту надлишку енергії.

Графіки обмежень демонструють, як фрагмент мережі реагує на небаланси енергії, обмежуючи генерацію або споживання для забезпечення стабільності системи.

3.3.3 Розробка та запуск смарт контракту.

Для розробки та розгортання смарт контракту було розглянуто три найбільш поширені блокчейн-платформи: Ethereum, Binance Smart Chain (BSC) та Polygon (Matic).

Ethereum є найпоширенішою платформою для смарт контрактів, що володіє величезною екосистемою та підтримкою розробників. Це дозволяє легко інтегруватися з різними інструментами та сервісами. Недоліками Ethereum є високі ціни транзакцій та мережеві затримки через високе навантаження. Binance Smart Chain (BSC) відзначається низькими цінами транзакцій та високою швидкістю їх обробки, а також сумісністю з Ethereum через EVM (Ethereum Virtual Machine). Проте, BSC є менш децентралізованою у порівнянні з Ethereum і має меншу екосистему розробників та проєктів. Polygon (Matic) також пропонує низькі комісії за транзакції та високу швидкість їх обробки, зберігаючи сумісність з Ethereum через EVM. Водночас, це відносно нова платформа з меншою екосистемою та меншою кількістю доступних ресурсів та підтримки.

З огляду на наведені характеристики було обрано блокчейн Ethereum, оскільки це найпоширеніша та найбільш підтримувана платформа для смарт контрактів. Велика екосистема та кількість розробників забезпечують надійність та постійну підтримку.

Для розробки смарт контракту було розглянуто три основні мови програмування: Solidity, Vyper та LLL (Low-Level Lisp-like Language). Solidity є основною мовою для розробки смарт контрактів на Ethereum, має велику спільноту розробників, розширену документацію та багато навчальних матеріалів. Проте, вона характеризується високим рівнем складності, що потребує залучення великої кількості висококваліфікованих фахівців. Vyper, з іншого боку, має простіший синтаксис та кращі механізми безпеки, але є менш поширеною мовою з обмеженою підтримкою інструментів та бібліотек. LLL (Low-Level Lisp-like Language) є низькорівневою мовою, яка дозволяє більш

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

точне управління ресурсами, проте дуже складна у використанні і майже не використовується для нових проєктів.

Було обрано Solidity через її популярність та підтримку. Це основна мова для розробки смарт контрактів на Ethereum, що забезпечує доступ до величезної кількості ресурсів та спільноти.

Для розробки та тестування смарт контракту було розглянуто три основні середовища: Remix IDE, Truffle та Embark. Remix IDE є віртуально розміщеною платформою, доступною з будь-якого браузера. Вона має інтуїтивний інтерфейс для написання, компіляції та розгортання смарт контрактів, а також можливість інтеграції з тестовими мережами. Недоліками Remix IDE є обмежені можливості для управління великими проєктами та відсутність інтеграції з системами контролю версій. Truffle, навпаки, є платформою для управління розробкою та розгортанням смарт контрактів, підтримує автоматизоване тестування та інтеграцію з системами контролю версій. Проте, Truffle потребує великих затрат при використанні, зокрема вимагає локального встановлення. Embark є платформою для розробки децентралізованих додатків, підтримує різні блокчейни та інтеграцію з IPFS і Swarm для децентралізованого зберігання. Водночас, Embark має високу складність налаштування та використання і є менш поширеною, ніж Truffle та Remix.

Аналізуючи особливості розглянутих мов програмування було обрано Remix IDE через його зручність та легкість використання. Це платформа з віртуальним базуванням, яка дозволяє швидко почати розробку, тестування та розгортання смарт контрактів.

Для тестування та розгортання смарт контракту було розглянуто три основні тестові мережі: Ropsten, Rinkeby та Sepolia. Ropsten є найстарішою тестовою мережею Ethereum, що використовує справжній Proof-of-Work (PoW) механізм консенсусу. Однак, вона часто зазнає атак та мережевих збоїв, що призводить до високих комісій. Rinkeby є стабільною та швидкою тестовою мережею, яка використовує Proof-of-Authority (PoA) механізм консенсусу, але не

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

забезпечує реалістичне середовище для тестування PoW контрактів. Sepolia, з іншого боку, забезпечує стабільне середовище для тестування смарт контрактів з низькими комісіями за транзакції та простоту роботи із запуску контрактів у тестовому режимі.

Було обрано Sepolia через її стабільність та низькі комісії за транзакції. Це забезпечує безпечне та ефективне навчальне середовище для тестування смарт контрактів без фінансових ризиків.

За допомогою обраних інструментів розробки згідно запропонованого алгоритму була розроблена програма, яка виконує розрахунок потужностей з якими взаємодіють учасники фрагменту мережі між собою та із зовнішньою мережею. Зокрема, необхідність введення ГТУ, баланс потужності, сальдо перетоків та обмеження потужностей генерації або споживання

Текст програми, який реалізовано, відлагоджено та виконано за допомогою обраних інструментів повністю відображає заданий алгоритм. Його додаткові елементи, такі як логіка виконання в мережі, реалізація розрахунків та пов'язані хеш-формули у вигляді тексту програми наведені в Додатку Б.

Для зв'язку зі смарт контрактом було створено веб додаток у вигляді HTML-файлу, який виконується у браузері, що підтримує WEB-3. Текст та діалогове вікно програми, а також допоміжні директорія із допоміжними файлами наведені в Додатку В. Принцип реалізації зв'язку з контрактом полягає у формуванні файлу формату .json, який містить вхідні дані у вигляді масивів. Цей файл передається в обробку смарт контракту за допомогою звертання до контракту за його унікальною адресою в мережі, контракт отримує дані, обробляє їх, та подає на вихід відповідно до алгоритму, що наведено на рисунку 3.1(а). HTML-додаток приймає дані та формує з них новий файл .json формату. Цей файл обробляється новим алгоритмом MATLAB, який виводить графіки з масивів, які містяться у вихідному файлі HTML-додатка.

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Нижче наведені графіки роботи смарт контракту в режимі генерації в зовнішню мережу:

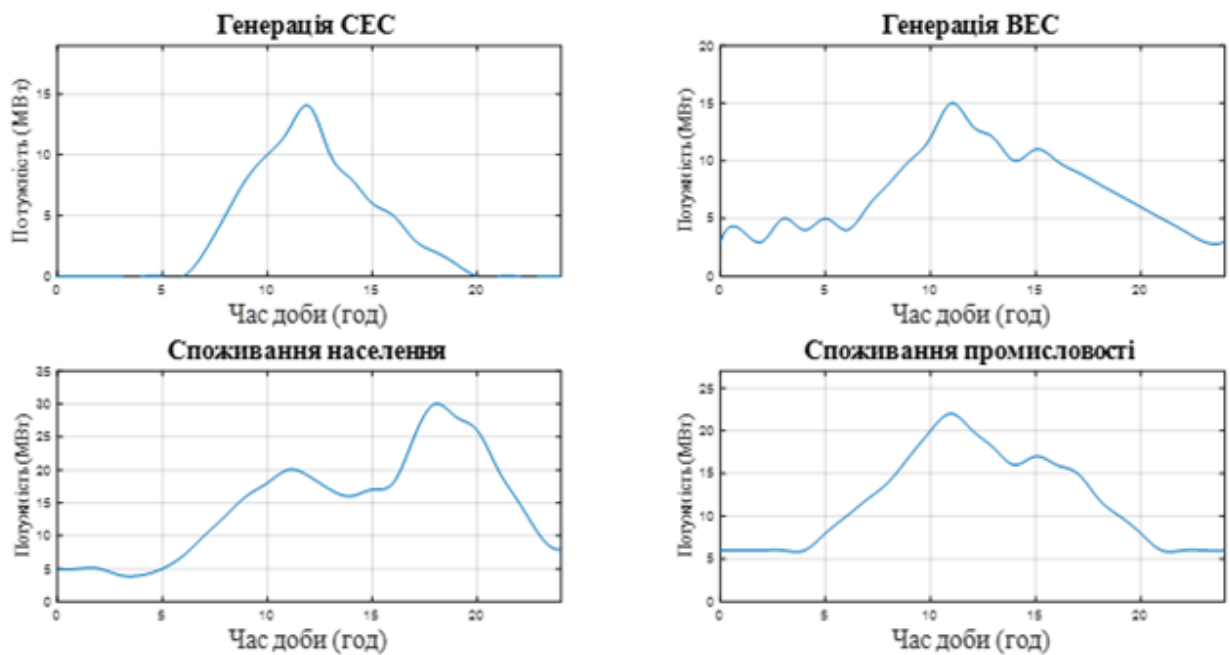


Рисунок 3.5 – Графіки вхідних даних добового розподілу потужності генерації та споживання

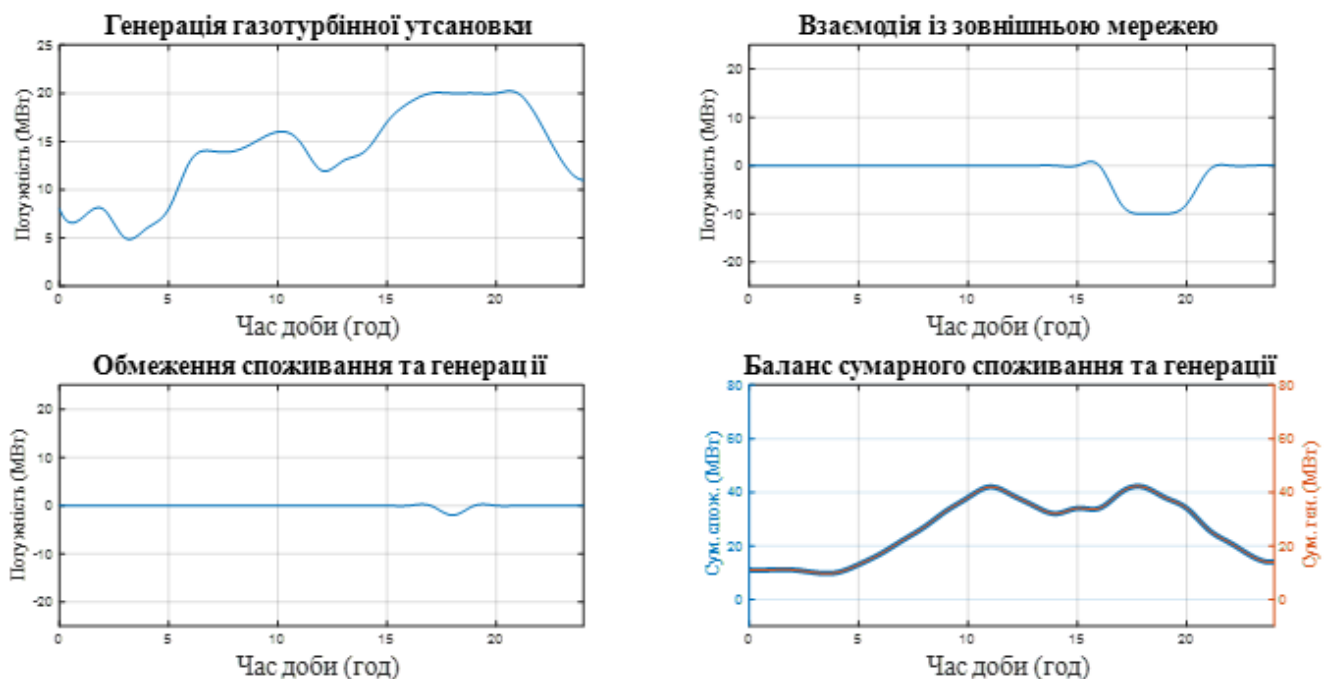


Рисунок 3.6 – Графіки результатів розрахунку даних добового розподілу потужності покриття піків, взаємодії із зовнішньою мережею, обмеження генерації і споживання та їх балансу

Аналіз графіків показав, що в 12-ту годину СЕС генерує 30 МВт, а ВЕС — 18 МВт. Ці дані підтверджуються як ручними розрахунками, так і візуалізацією в MATLAB. Вони показують пікову генерацію від СЕС в обідній час та стабільну генерацію від ВЕС. Станом на цю ж годину споживання населення становить 9 МВт, а промисловості — 20 МВт. Ці дані також відповідають розрахункам, де загальне споживання дорівнює 29 МВт. На графіках видно, що газотурбінна установка в 12-ту годину не активується, оскільки потужність генерації перевищує споживання. Взаємодія із зовнішньою мережею показує експорт 10 МВт, що також підтверджено розрахунками. Графіки показують, що в на вказану годину жодних обмежень генерації та споживання не застосовується, оскільки баланс енергосистеми забезпечується без необхідності додаткових обмежень. Графіки демонструють, що у вказаний період сумарна генерація складає 48 МВт, а сумарне споживання — 29 МВт, з яких 10 МВт експортується до зовнішньої мережі. Це повністю відповідає попереднім розрахункам та підтверджує правильну роботу моделі.

Проведений аналіз та отримані графіки підтверджують адекватність моделі та правильність розрахунків. Зокрема, результати для вказаного періоду підтверджують баланс енергосистеми, де генерація перевищує споживання, що призводить до експорту надлишкової енергії до зовнішньої мережі.

Для тестування всіх можливостей смарт контракту та детальної перевірки правильності роботи алгоритмів було виконано додатково виконано моделювання двох режимів роботи досліджуваного фрагменту енергосистеми: режим автономної роботи та режим споживання потужності із зовнішньої енергосистеми.

Моделювання режиму ізолюваної роботи

Моделювання режиму ізолюваної роботи відображає ситуацію, коли фрагмент мережі функціонує без взаємодії із зовнішньою мережею. Вхідні дані для режиму ізолюваної роботи наведено в таблиці Додатку Г. Графіки, що відображають добові потужності генерації та споживання, а також графіки

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

результатів розрахунку розподілу потужностей та сальдо перетоку смарт контрактом представлені на рисунках 3.7 та 3.8.

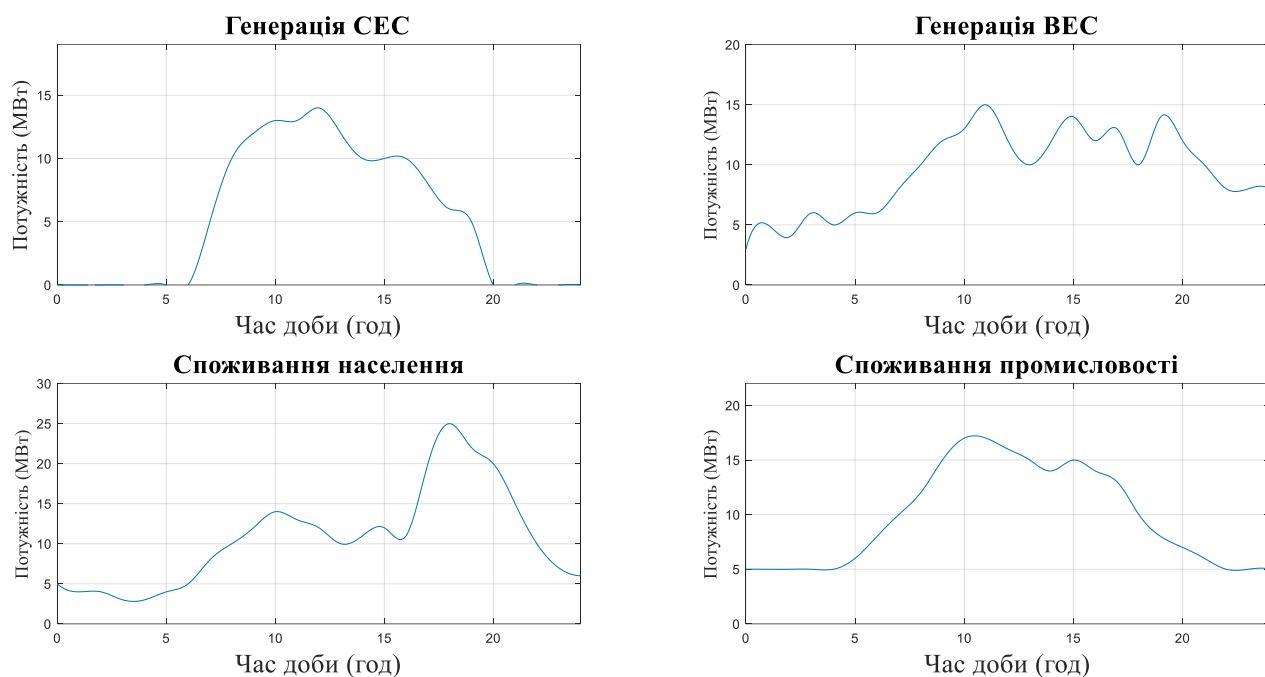


Рисунок 3.7 – Графіки вхідних даних добового розподілу потужності генерації та споживання

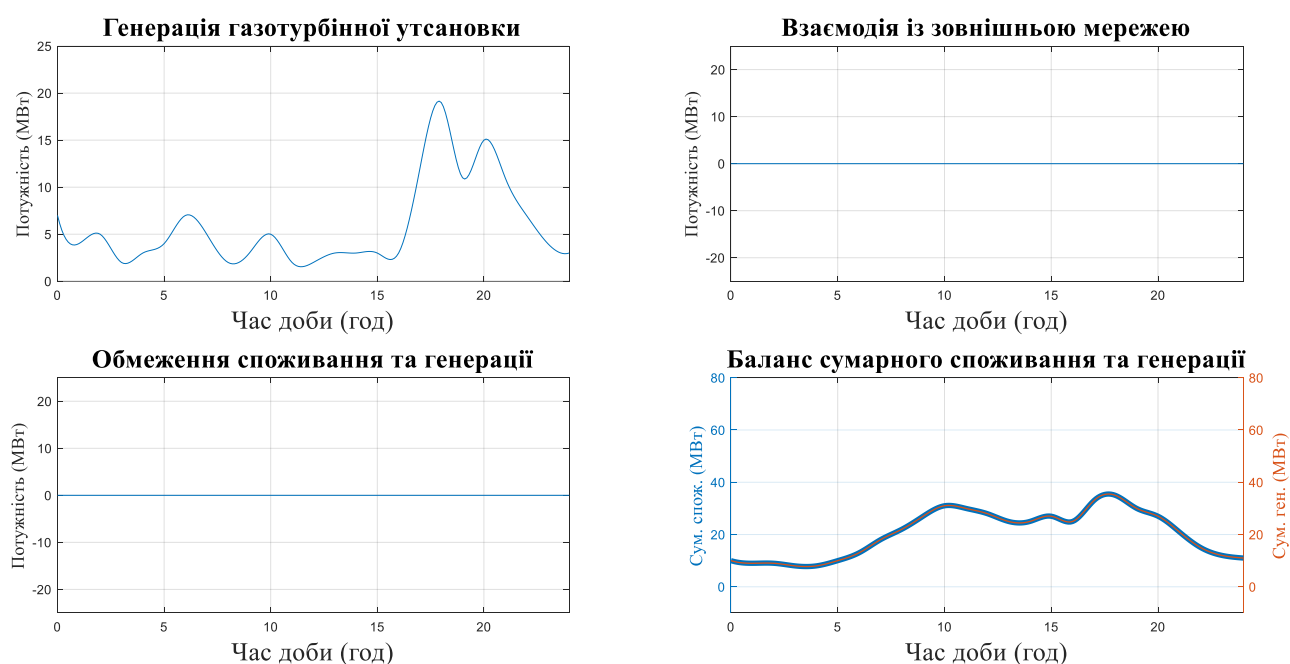


Рисунок 3.8 – Графіки результатів розрахунку даних добового розподілу потужності покриття піків, взаємодії із зовнішньою мережею, обмеження генерації і споживання та їх балансу

Результати розрахунку добового розподілу потужності у фрагменті мережі в режимі автономної роботи наведені в Додатку Г. Аналіз графіків показує, що на 12-ту годину сумарна генерація становить 26 МВт, а сумарне споживання - 28 МВт, що призводить до дефіциту потужності 2 МВт. У цьому випадку активується газотурбінна установка, яка генерує додаткові 2 МВт для покриття цього дефіциту. Немає необхідності у взаємодії із зовнішньою мережею, а також не застосовуються жодні обмеження на виробництво чи споживання.

Графіки результатів показують, що протягом дня генерація СЕС та ВЕС коливається, відображаючи зміну погодних умов та добового циклу. Споживання населенням та промисловістю має типові пікові значення вранці та ввечері. У моменти дефіциту генерації активується газотурбінна установка для забезпечення стабільності системи. Це підтверджує адекватність моделі та коректність реалізованого алгоритму смарт контракту.

Моделювання режиму споживання потужності із зовнішньої мережі.

Моделювання режиму споживання потужності із зовнішньої мережі відображає ситуацію, коли сегмент мережі залежить від зовнішньої мережі для покриття дефіциту потужності. Вхідні дані для режиму споживання потужності із зовнішньої мережі наведено в Додатку Г. Графіки роботи смарт контракту в даному режимі представлені на рисунках 3.9 та 3.10.

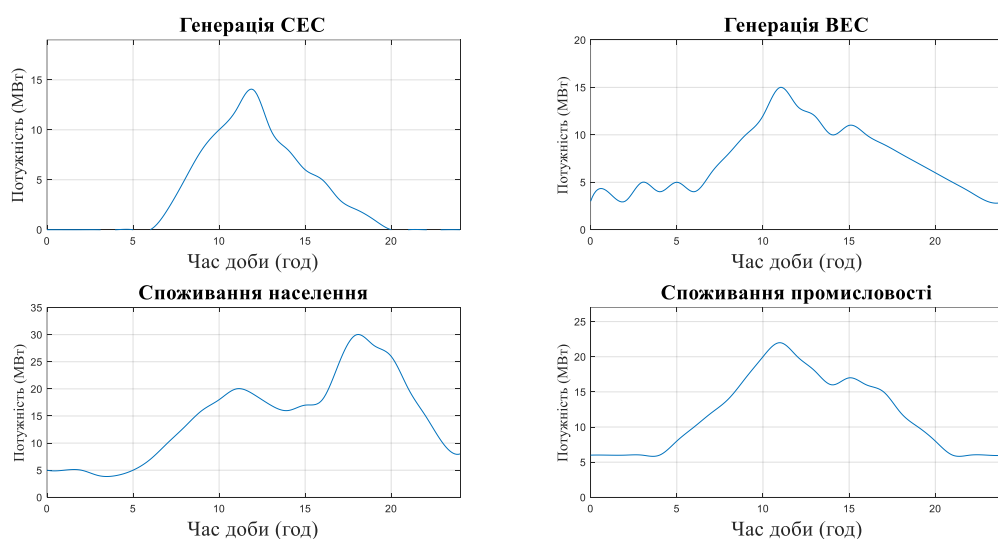


Рисунок 3.9 – Графіки вхідних даних добового розподілу потужності генерації та споживання

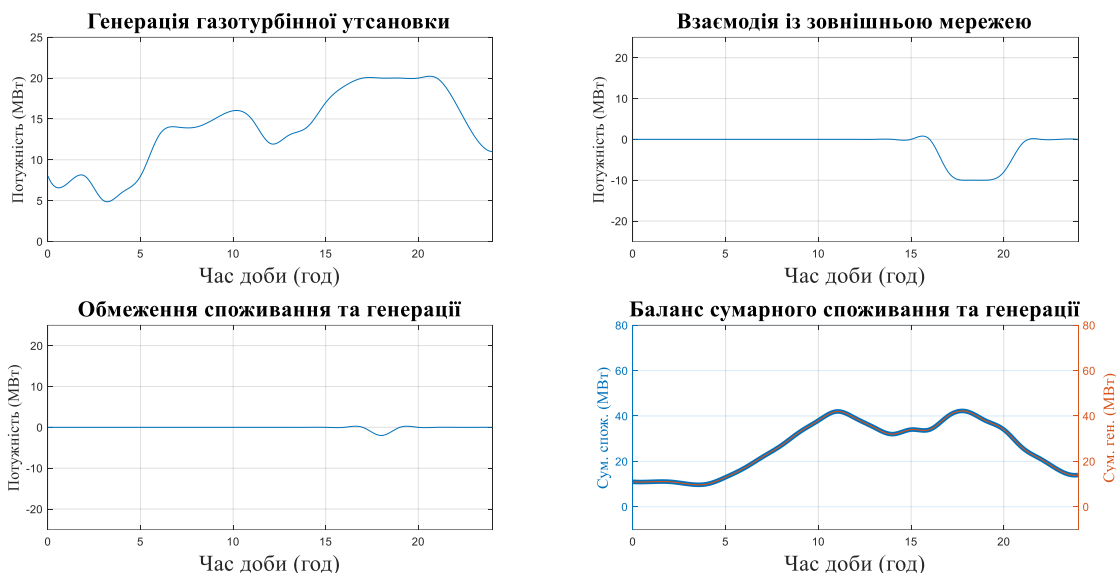


Рисунок 3.10 – Графіки результатів розрахунку даних добового розподілу потужності покриття піків, взаємодії із зовнішньою мережею, обмеження генерації і споживання та їх балансу

Результати розрахунку розподілу потужності у фрагменті мережі в режимі споживання потужності із зовнішньої енергосистеми наведені в Додатку Г.

Аналіз графіків показує, що о 12-й годині сумарна генерація становить 27 МВт, а сумарне споживання - 39 МВт, що призводить до дефіциту потужності 12 МВт. Газотурбінна установка генерує 12 МВт для покриття цього дефіциту, а додаткові 8 МВт беруться із зовнішньої мережі.

Графіки результатів показують, що протягом доби генерація СЕС та ВЕС залишається стабільною, в той час як споживання населення та промисловості має характерні пікові значення. Взаємодія із зовнішньою мережею забезпечує необхідний баланс у моменти, коли власної генерації не вистачає. Це підтверджує ефективність моделі та коректність алгоритму смарт контракту.

З огляду на відповідність графіків очікуваним значенням розподілу потужності в досліджуваному фрагменті енергосистеми можна зробити висновок, що модель працює так, як і очікувалося. Алгоритм безпомилково виконується при різних режимах роботи фрагменту енергосистеми і правильно розподіляє потужність та забезпечує дотримання встановлених лімітів потужності споживання та генерації.

ВИСНОВКИ

В першому розділі роботи було розглянуто електричну підстанцію 110/10 кВ. Розглянута схема виконання характерна для транзитних або відокремлюваних підстанцій. Такий варіант виконання дозволяє ефективно конфігурувати робочу електричну схему підстанції для забезпечення надійного живлення споживачів при аварійних ситуаціях чи планових ремонтах. Аналіз встановленого основного обладнання підстанції показав, що всі номінальні параметри відповідають потребам підстанції зазначених класів напруг.

З метою перевірки обладнання на відповідність параметрам потенційного аварійного режиму роботи було проведено розрахунки параметрів короткого замикання для трьох типових точок. Результати розрахунків показали, що максимальне значення періодичної складової струму КЗ становить 11,835 кА, а максимальне значення ударного струму КЗ – 32,739 кА. Встановлені вимикачі на підстанції здатні витримувати максимальний наскрізний струм вимикання до 31,5 кА та максимальний піковий (ударний) струм до 80 кА, ці параметри перевищують розраховані значення струмів КЗ. Отже, розрахунки підтвердили відповідність обладнання підстанції вимогам надійності та безпеки.

В другій частині роботи було розглянуто перспективи та напрямки розвитку ОЕС України. Серед них виділено повну синхронізацію з Європейською енергосистемою ENTSO-E, перехід до мультипровайдерної моделі електроенергетичного ринку та збільшення залучення енергії відновлювальних джерел. В контексті стимулювання залучення ВДЕ та децентралізації ринку розглянуто концепцію розумних мереж, в яких досить часто використовується технологія блокчейн. Проаналізувавши основні принципи та можливості, які надає впровадження технології блокчейн в управління енергосистемою, можна виділити наступні: безпека передачі інформації, децентралізація обчислювальних та накопичувальних ресурсів, прозорість транзакцій. Проте розгортання повноцінних систем управління енергосистемою на основі технології блокчейн має певні проблеми, зокрема,

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

висока енергоємність, обмеження кількості обчислень та нормативно-правова невизначеність.

В наступному етапі роботи було розглянуто смарт контракти, як ключовий аспект розвитку технології блокчейн. Аналіз спрощеного алгоритму типового смарт контракту демонструє, що безпека та прозорість інформації, що обробляється гарантована технологією блокчейн. Впровадження смарт контрактів на основі технології блокчейн дозволить суттєво знизити вплив недоліків і водночас максимально ефективно використати переваги технологій блокчейн. Для Було розглянуто спрощений алгоритм смарт контракту Аналізуючи наведену інформацію, в тому числі досвід існуючих проєктів, можна дійти висновку, що смарт контракти забезпечують наступний рівень автоматизації виконання угод, це дозволить суттєво знизити ризик людської помилки та шахрайства. Смарт контракти здатні автоматизувати розподіл виробленої електроенергії з ВДЕ локально, що дозволить суттєво оптимізувати процес розподілу електроенергії. Смарт контракти дозволяють забезпечувати пряму взаємодію між постачальниками та споживачами електроенергії, що дозволить мінімізувати участь посередників та оптимізувати адміністративні витрати. Проте смарт контракти мають деякі особливості впровадження в структуру управління електроенергетичною системою. Зокрема, відсутність чіткої регуляторної бази може ускладнити правове врегулювання суперечок, пов'язаних зі смарт контрактами. Помилки в алгоритмі смарт контракту чи його програмній реалізації можуть призвести до небажаних наслідків, що обумовлює проведення додаткових досліджень.

У третій частині роботи за допомогою обраних в результаті аналізу інструментів було поетапно створено та перевірено модель смарт контракту. Для тестування роботи алгоритму було розроблено модель фрагменту енергосистеми із обраними внутрішніми параметрами генерації та споживання. Після чого був розроблений та протестований в середовищі MATLAB алгоритм смарт контракту. Графіки, отримані в результаті моделювання, демонструють точність

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

та коректність роботи моделі, за допомогою інструментів, обраних в результаті детального аналізу доступних ресурсів було створено модель смарт контракту. Графіки, що відображають результати роботи алгоритму смарт контракту відповідають ручним розрахункам та результатам тестування алгоритму в середовищі MATLAB.

Для детальної демонстрації можливостей смарт контракту робота алгоритму була змодельована у різних режимах експлуатації енергосистеми. В режимі генерації потужності в зовнішню мережу алгоритм показав стабільну роботу, забезпечуючи ефективний розподіл потужності, в тому числі передачу надлишкової потужності в зовнішню енергосистему та обмеження генерації в деякі години відповідно до розглянутих обмежень. В режимі ізольованої роботи при збільшенні навантаження небаланс потужності був покритий шляхом залучення ГТУ. В режимі споживання потужності небаланс потужності в досліджуваному фрагменті енергосистеми був ліквідований за допомогою залучення додаткової потужності із зовнішньої мережі. А також, у зв'язку з обмеженнями перетоку потужності із зовнішньої енергосистеми, було застосовано обмеження споживання потужності у відповідні години. Кожен з режимів роботи досліджуваного фрагменту ЕЕС продемонстрував ефективність розробленого підходу в різних умовах, підтверджуючи його здатність забезпечувати його надійну роботу, що в цілому демонструє успішність використання смарт контрактів на основі технології блокчейн для управління енергосистемами. Даний підхід дозволить підняти на новий рівень автоматизацію розподілу потужності в енергосистемі, підвищити безпеку та надійність транзакцій в мережі. А також досягти переваг прозорого та децентралізованого енергетичного ринку.

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Електрична частина станцій та підстанцій: курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/уклад.: О.В. Остапчук, П.Л. Денисюк, Ю.П. Матеєнко/КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові дані (1 файл: 4,62 Мбайт). – Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2022. – 183 с.
2. Електрична частина станцій і підстанцій: Навч. посібник /А.О.Омельчук. - К.: ЦП «КОМПРИНТ», 2017. - 479 с Каталог високовольтного обладнання. URL: <https://www.uainfo.com/photos/small/725946-0.jpg>
3. Каталог високовольтних струмопровідних шин. URL: <https://www.electricalvolt.com/types-of-overhead-conductors/> (дата звернення: 14.06.2024)
4. Чухінін А.А. Електричні апарати високої напруги. Вимикачі. Довідник – М.: Інформелектро, 1994.
5. Каталог масляних вимикачів. URL: <https://atumenergy.com.ua/ua/p1311432737-vyklyuchatel-maslyanyj-vmpe.html> (дата звернення: 14.06.2024)
6. Каталог відділювачів та короткозамикачів. URL: <https://struminvest.uaprom.net/ua/g7093826-otdeliteli-odz-korotkozamykateli> (дата звернення: 14.06.2024)
7. Каталог роз'єднувачів (РДЗ-110). URL: <https://ukrelektro.com.ua/ua/p4792800-razedinitel-rdz-1101000.html> (дата звернення: 14.06.2024)
8. Каталог короткозамикачів. URL: <https://volten.com.ua/ua/p15100992-korotkozamykatel-110.html> (дата звернення: 14.06.2024)
9. Неклепаєв Б.Н., Крючков И.П. Електрична частина станцій і підстанцій: справочні матеріали, навч. посіб. Енергоатоміздат, 1989.

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		86

10. Каталог Обмежувачів перенапруги. URL: <https://volten.com.ua/ua/p15094102-ogranichiteli-perenapryazheniya-opn.html> (дата звернення: 14.06.2024)

11. Каталог вентильних розрядників. URL: <https://ukrelektro.com.ua/ua/p557866-razryadniki-ventilnye-rvs.html> (дата звернення: 14.06.2024)

12. Каталог трансформаторів. URL: <https://ekg5a.com.ua/product/transformator-tv1m-10-0-5-10r100-5/> (дата звернення: 14.06.2024)

13. Каталог вимірювальних трансформаторів. Каталог. НТМІ-10. URL: <https://veltop.com.ua/product/ntmi-10/> (дата звернення: 14.06.2024)

14. Трансформатори власних потреб. ТМ-630. URL: <https://elektra.com.ua/katalog-materialov/elektrotekhnicheskaya-produktsiya/1057/103/transformatory-transformatornye-podstantsii/transformatory-maslyanye-tm/tm-630-transformator-tm-630-10-0-4-tm-630-6-0-4-1048-1049-1050-1051-1052-1053-1054-1055-1056-buy> (дата звернення: 14.06.2024)

15. Бажанов С.А., Батхон І.С. довідник електричних установок високої напруги. Енергоатоміздат, 1981.

16. Вісник НЕК «Укренерго». URL: <https://ua.energy/yevrointegratsiya/> (дата звернення: 14.06.2024)

17. Законодавство України. «Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605-р «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/605-2017-%D1%80> (дата звернення: 14.06.2024).

18. «Звіт про стан реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» за 2018 рік». Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2020.

19. Hewa, T. M., Hu, Y., Liyanage, M., Kanhare, S. S., & Ylianttila, M. Survey on Blockchain-Based Smart Contracts: Technical Aspects and Future Research. IEEE Access, 2021.
20. Wang, S., Ouyang, L., Yuan, Y., Ni, X., Han, X., & Wang, F.-Y. Blockchain-Enabled Smart Contracts: Architecture, Applications, and Future Trends. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems.
21. Kirli, D., Couraud, B., Robu, V., Salgado-Bravo, M., Norbu, S., Andoni, M., Antonopoulos, I., Negrete-Pincetic, M., Flynn, D., & Kiprakis, A. Smart contracts in energy systems: A systematic review of fundamental approaches and implementations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022.
22. Shrier, D., Wu, W., Pentland, A. Blockchain & Infrastructure (Identity, Data Security). Massachusetts Institute of Technology, 2016.
23. Ramachandran, A., Kantarcioglu, M. Using Blockchain and Smart Contracts for Secure Data Provenance Management. The University of Texas At Dallas, 2017.
24. Di Silvestre, M. L., Gallo, P., Guerrero, J. M., Musca, R., Sanseverino, E. R., Sciumé, G., Vásquez, J. C., & Zizzo, G. Blockchain for power systems: Current trends and future applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019.
25. Alkaeed, M., Soliman, M. M., Elfouly, T. M., & Khan, K. M. Distributed Framework via Blockchain Smart Contracts for Smart Grid Systems against Cyber-Attacks. 2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), Shah Alam, Malaysia, 2020.
26. Arjomand, N., Ullah, H. S., & Aslam, S. A Review of Blockchain-based Smart Grid: Applications, Opportunities, and Future Directions.
27. Hertz-Shargel, B., & Livingston, D. Assessing Blockchain's Future in Transactive Energy. Atlantic Council, 2019. ISBN 978-1-61977-599-2.
28. Dütsch, G., Steinecke, N. Use Cases for Blockchain Technology in Energy & Commodity Trading. PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, 2017. (місце_для_сторінок).

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						88
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

29. IOTA, URL: <https://www.iota.org/> (дата звернення: 14.06.2024).
30. Brooklyn Microgrid, URL: <https://www.brooklyn.energy/> (дата звернення: 14.06.2024).
31. Power Ledger, URL: <https://www.powerledger.io/> (дата звернення: 14.06.2024).
32. WePower, URL: <https://wepower.network> (дата звернення: 14.06.2024).
33. Electron, URL: <https://www.electron.net> (дата звернення: 14.06.2024).
34. GridPlus, URL: <https://gridplus.io> (дата звернення: 14.06.2024).
35. GridPlus blockchain energy project details, URL: <https://www.blockchainalmanac.com/energy/gridplus/> (дата звернення: 14.06.2024).
36. SolarCoin, URL: <https://www.pv-tech.org/solarcoin-incentivising-solar-pv-energy-production-through-blockchain-innovation> (дата звернення: 14.06.2024).
37. LO3 Energy, URL: <https://www.brooklyn.energy/> (дата звернення: 14.06.2024).
38. Anisie, A., Boshell, F. Innovation landscape brief: Peer-to-peer electricity trading. International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2020. (місце_для_сторінок).
39. Wildpoldsried Testing Ground for Smart Grid. Energy Transition, 2014. URL: <https://energytransition.org/2014/11/wildpoldsried-testing-ground-for-smart-grid/> (дата звернення: 14.06.2024).
40. Testbed for Smart Grid Technologies in the Community of Wildpoldsried. GreenBiz, 2014. URL: <https://www.greenbiz.com/article/small-town-germany-becomes-testing-ground-smart-grid> (дата звернення: 14.06.2024).

ДОДАТОК А

Текст програми тестової моделі алгоритму в середовищі MATLAB, для контролю вхідних даних та правильності роботи створеного алгоритму.

```
clc, clear,
```

```
% Генерація СЕС (МВт)
```

```
ses_generation = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 30, 30, 25, 22, 20, 20,  
15, 0, 0, 0, 0, 0];
```

```
% Генерація ВЕС (МВт)
```

```
wes_generation = [10, 13, 15, 20, 17, 15, 13, 17, 23, 23, 26, 21, 18, 23, 28, 26,  
23, 21, 20, 17, 15, 13, 10, 10, 10];
```

```
% Споживання населення (МВт)
```

```
residential_consumption = [8, 7, 7, 6, 6, 7, 9, 14, 18, 17, 16, 10, 9, 8, 8, 9, 9,  
18, 25, 29, 26, 19, 12, 9, 8];
```

```
% Споживання промисловості (МВт)
```

```
industrial_consumption = [8, 8, 8, 8, 8, 10, 12, 15, 17, 20, 22, 22, 20, 19, 20,  
22, 21, 20, 15, 10, 9, 8, 8, 8, 8];
```

```
% Ініціалізація змінних
```

```
hours = 0:24;
```

```
total_generation_gr = ses_generation + wes_generation;
```

```
total_consumption_gr = residential_consumption + industrial_consumption;
```

```
gtu_generation = zeros(1, 25);
```

```
external_interaction = zeros(1, 25);
```

```
limitations = zeros(1, 25);
```

```
total_load = total_consumption_gr;
```

```
total_net_generation = total_generation_gr;
```

```
% Ліміти на видачу і споживання з мережі
```

```
max_export_peak = 20;
```

```
max_export_offpeak = 10;
```

```
max_import_peak = 10;
```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		90

```

max_import_offpeak = 20;
% Пікові години
peak_hours = 18:20;
% Розрахунок параметрів для кожної години
for t = 1:25
    % Небаланс потужності
    imbalance = total_generation_gr(t) - total_consumption_gr(t);

    % Включення ГТУ для покриття небалансу (не більше 20 МВА)
    if imbalance < 0
        gtu_generation(t) = min(20, abs(imbalance));
        imbalance = imbalance + gtu_generation(t);
    end
    % Взаємодія із зовнішньою мережею
    if imbalance > 0
        % Віддаємо надлишок в мережу
        if ismember(t-1, peak_hours)
            external_interaction(t) = min(max_export_peak, imbalance);
        else
            external_interaction(t) = min(max_export_offpeak, imbalance);
        end
        imbalance = imbalance - external_interaction(t);
    else
        % Беремо дефіцит з мережі
        if ismember(t-1, peak_hours)
            external_interaction(t) = -min(max_import_peak, abs(imbalance));
        else
            external_interaction(t) = -min(max_import_offpeak, abs(imbalance));
        end
    end
end

```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						91
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        imbalance = imbalance + abs(external_interaction(t));
    end
    % Обмеження генерації СЕС та споживання
    if imbalance < 0
        limitations(t) = imbalance;
        total_load(t) = total_consumption_gr(t) + external_interaction(t) +
        limitations(t); % з урахуванням обмежень
        imbalance = 0;
    end
    if imbalance > 0
        limitations(t) = imbalance;
        total_net_generation(t) = total_generation_gr(t) + gtu_generation(t) +
        abs(external_interaction(t)) - limitations(t); % з урахуванням обмежень
    end
end
end
% Створення графіків
figure;
subplot(4, 2, 1);
plot(hours, ses_generation, '-o');
title('SES Generation');
xlabel('Hour');
ylabel('Power (MVA)');
axis([0 24 0 max(ses_generation)+5]);
grid on;
subplot(4, 2, 2);
plot(hours, wes_generation, '-o');
title('WES Generation');
xlabel('Hour');
ylabel('Power (MVA)');

```

```

axis([0 24 0 max(wes_generation)+5]);
grid on;
subplot(4, 2, 3);
plot(hours, residential_consumption, '-o');
title('Residential Consumption');
xlabel('Hour');
ylabel('Power (MVA)');
axis([0 24 0 max(residential_consumption)+5]);
grid on;
subplot(4, 2, 4);
plot(hours, industrial_consumption, '-o');
title('Industrial Consumption');
xlabel('Hour');
ylabel('Power (MVA)');
axis([0 24 0 max(industrial_consumption)+5]);
grid on;
subplot(4, 2, 5);
plot(hours, gtu_generation, '-o');
title('GTU Activation');
xlabel('Hour');
ylabel('Power (MVA)');
axis([0 24 0 25]);
grid on;
subplot(4, 2, 6);
plot(hours, external_interaction, '-o');
title('Interaction with External Network');
xlabel('Hour');
ylabel('Power (MVA)');
axis([0 24 -25 25]);

```

```

grid on;
subplot(4, 2, 7);
plot(hours, limitations, '-o');
title('Limitations');
xlabel('Hour');
ylabel('Power (MVA)');
axis([0 24 -25 25]);
grid on;
%КОРЕКТУВАННЯ
% Розділення external_interaction на додатні і від'ємні частини
positive_external_interaction = zeros(size(external_interaction));
negative_external_interaction = zeros(size(external_interaction));
positive_indices_ext = external_interaction > 0;
negative_indices_ext = external_interaction < 0;
positive_external_interaction(positive_indices_ext) =
external_interaction(positive_indices_ext);
negative_external_interaction(negative_indices_ext) =
external_interaction(negative_indices_ext);
% Розділення limitations на додатні і від'ємні частини
positive_limitations = zeros(size(limitations));
negative_limitations = zeros(size(limitations));
positive_indices_lim = limitations > 0;
negative_indices_lim = limitations < 0;
positive_limitations(positive_indices_lim) = limitations(positive_indices_lim);
negative_limitations(negative_indices_lim) =
limitations(negative_indices_lim);
total_net_generation_1=ses_generation+wes_generation+gtu_generation-
negative_external_interaction-negative_limitations;

```

```
total_load_1=industrial_consumption+residential_consumption+positive_external_interaction+positive_limitations;
```

```
subplot(4, 2, 8);
```

```
% Створення графіка з двома осями Y
```

```
yyaxis left;
```

```
h1 = plot(hours, total_load_1, '-o', 'LineWidth', 4); % Збільшуємо товщину першої лінії
```

```
ylabel('Total Load (MVA)');
```

```
axis([0 24 -10 80]);
```

```
yyaxis right;
```

```
h2 = plot(hours, total_net_generation_1, '-o', 'LineWidth', 1); % Задаємо товщину другої лінії
```

```
ylabel('Total Generation (MVA)');
```

```
ylim([0, 75]); % Встановлюємо однаковий початок з точки 0
```

```
axis([0 24 -10 80]);
```

```
xlabel('Hour');
```

```
title('Total Load vs. Total Generation');
```

```
grid on;
```

```
sgtitle('Microgrid Operation MATLAB');
```

ДОДАТОК Б

Програмна реалізація алгоритму смарт контракту на мові Solidity.

```
// SPDX-License-Identifier: MIT
pragma solidity ^0.8.18;
```

```
contract MicrogridPowerManagement {
```

```
    struct HourlyData {
        uint256 sesGeneration;
        uint256 wesGeneration;
        uint256 residentialConsumption;
        uint256 industrialConsumption;
    }
```

```
    HourlyData[25] public hourlyData;
    uint256[25] public gasTurbineActivation;
    uint256[25] public sesOutput;
    uint256[25] public wesOutput;
    uint256[25] public residentialOutput;
    uint256[25] public industrialOutput;
    int256[25] public externalInteraction;
    int256[25] public limitations;
```

```
    uint256 constant MAX_EXPORT_PEAK = 20;
    uint256 constant MAX_EXPORT_OFFPEAK = 10;
    uint256 constant MAX_IMPORT_PEAK = 10;
    uint256 constant MAX_IMPORT_OFFPEAK = 20;
    uint256 constant GAS_TURBINE_POWER = 20;
```

```
    function inputData(
        uint256[25] memory sesGeneration,
        uint256[25] memory wesGeneration,
        uint256[25] memory residentialConsumption,
        uint256[25] memory industrialConsumption
    ) public {
        for (uint256 i = 0; i < 25; i++) {
            hourlyData[i] = HourlyData({
                sesGeneration: sesGeneration[i],
                wesGeneration: wesGeneration[i],
                residentialConsumption: residentialConsumption[i],
                industrialConsumption: industrialConsumption[i]
            });
        }
    }
```

```
    function processPower() public {
        int256 imbalance;

        for (uint256 t = 0; t < 25; t++) {
```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						96
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

uint256 totalGeneration = hourlyData[t].sesGeneration + hourlyData[t].wesGeneration;
uint256 totalConsumption = hourlyData[t].residentialConsumption +
hourlyData[t].industrialConsumption;
imbalance = int256(totalGeneration) - int256(totalConsumption);

gasTurbineActivation[t] = 0;
externalInteraction[t] = 0;
limitations[t] = 0;

// Включення ГТУ для покриття небалансу
if (imbalance < 0) {
    gasTurbineActivation[t] = uint256(-imbalance) < GAS_TURBINE_POWER ? uint256(-
imbalance) : GAS_TURBINE_POWER;
    imbalance += int256(gasTurbineActivation[t]);
}

// Взаємодія із зовнішньою мережею
if (imbalance > 0) {
    // Віддаємо надлишок в мережу
    if (t >= 18 && t <= 20) {
        externalInteraction[t] = int256(min(MAX_EXPORT_PEAK, uint256(imbalance)));
    } else {
        externalInteraction[t] = int256(min(MAX_EXPORT_OFFPEAK,
uint256(imbalance)));
    }
    imbalance -= externalInteraction[t];
} else {
    // Беремо дефіцит з мережі
    if (t >= 18 && t <= 20) {
        externalInteraction[t] = -int256(min(MAX_IMPORT_PEAK, uint256(-imbalance)));
    } else {
        externalInteraction[t] = -int256(min(MAX_IMPORT_OFFPEAK, uint256(-
imbalance)));
    }
    imbalance += absExternalInteraction(externalInteraction[t]);
}

// Обмеження генерації СЕС та споживання
if (imbalance < 0) {
    limitations[t] = imbalance;
    imbalance = 0;
} else if (imbalance > 0) {
    limitations[t] = imbalance;
    imbalance = 0;
}

// Збереження результатів для вихідних масивів
sesOutput[t] = hourlyData[t].sesGeneration;
wesOutput[t] = hourlyData[t].wesGeneration;
residentialOutput[t] = hourlyData[t].residentialConsumption;
industrialOutput[t] = hourlyData[t].industrialConsumption;

```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						97
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

    }
}

function getResultData() public view returns (
    uint256[25] memory,
    uint256[25] memory,
    uint256[25] memory,
    uint256[25] memory,
    uint256[25] memory,
    int256[25] memory,
    int256[25] memory
) {
    return (
        gasTurbineActivation,
        sesOutput,
        wesOutput,
        residentialOutput,
        industrialOutput,
        externalInteraction,
        limitations
    );
}

function min(uint256 a, uint256 b) private pure returns (uint256) {
    return a < b ? a : b;
}

function absExternalInteraction(int256 x) private pure returns (int256) {
    return x >= 0 ? x : -x;
}
}

```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						98
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК В

Текст та діалогове вікно програми (HTML-додатку).

```
<!DOCTYPE html>

<html>

<head>

  <title>Microgrid Power Management</title>

  <script
src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/web3@latest/dist/web3.min.js"></script>

</head>

<body>

  <h1>Microgrid Power Management</h1>

  <div>

    <h2>Input Data</h2>

    <input type="file" id="dataFile" />

    <button onclick="storeData()">Store Data</button>

    <button onclick="processPower()">Process Power</button>

    <button onclick="downloadResults()">Download Results</button>

  </div>

  <div>

    <h2>Test Function</h2>

    <input type="text" id="testInput" />

    <button onclick="testFunction()">Test Function</button>

    <p id="testResult"></p>

  </div>

  <script>

    const contractAddress =

"0x7A5e4C1f544E3E4a381832d17bBbc2b6Fff30B35"; // replace with your contract
address
```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						99
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

const abi = [
  {
    "inputs": [
      {
        "internalType": "uint256[25]",
        "name": "sesGeneration",
        "type": "uint256[25]"
      },
      {
        "internalType": "uint256[25]",
        "name": "wesGeneration",
        "type": "uint256[25]"
      },
      {
        "internalType": "uint256[25]",
        "name": "residentialConsumption",
        "type": "uint256[25]"
      },
      {
        "internalType": "uint256[25]",
        "name": "industrialConsumption",
        "type": "uint256[25]"
      }
    ],
    "name": "inputData",
    "outputs": [],
    "stateMutability": "nonpayable",
    "type": "function"
  },

```

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
						100
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

{
    "inputs": [],
    "name": "processPower",
    "outputs": [],
    "stateMutability": "nonpayable",
    "type": "function"
},
{
    "inputs": [
        {
            "internalType": "uint256",
            "name": "",
            "type": "uint256"
        }
    ],
    "name": "externalInteraction",
    "outputs": [
        {
            "internalType": "int256",
            "name": "",
            "type": "int256"
        }
    ],
    "stateMutability": "view",
    "type": "function"
},
{
    "inputs": [
        {

```

```

        "internalType": "uint256",
        "name": "",
        "type": "uint256"
    }
],
"name": "gasTurbineActivation",
"outputs": [
    {
        "internalType": "uint256",
        "name": "",
        "type": "uint256"
    }
],
"stateMutability": "view",
"type": "function"
},
{
    "inputs": [],
    "name": "getResultData",
    "outputs": [
        {
            "internalType": "uint256[25]",
            "name": "",
            "type": "uint256[25]"
        },
        {
            "internalType": "uint256[25]",
            "name": "",
            "type": "uint256[25]"
        }
    ]
}

```

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
						102
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

    },
    {
        "internalType": "uint256[25]",
        "name": "",
        "type": "uint256[25]"
    },
    {
        "internalType": "uint256[25]",
        "name": "",
        "type": "uint256[25]"
    },
    {
        "internalType": "uint256[25]",
        "name": "",
        "type": "uint256[25]"
    },
    {
        "internalType": "int256[25]",
        "name": "",
        "type": "int256[25]"
    },
    {
        "internalType": "int256[25]",
        "name": "",
        "type": "int256[25]"
    }
],
"stateMutability": "view",
"type": "function"

```

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
						103
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

    },
    {
        "inputs": [
            {
                "internalType": "uint256",
                "name": "",
                "type": "uint256"
            }
        ],
        "name": "hourlyData",
        "outputs": [
            {
                "internalType": "uint256",
                "name": "sesGeneration",
                "type": "uint256"
            },
            {
                "internalType": "uint256",
                "name": "wesGeneration",
                "type": "uint256"
            },
            {
                "internalType": "uint256",
                "name": "residentialConsumption",
                "type": "uint256"
            },
            {
                "internalType": "uint256",
                "name": "industrialConsumption",

```

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
						104
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        "type": "uint256"
    }
],
"stateMutability": "view",
"type": "function"
},
{
    "inputs": [
        {
            "internalType": "uint256",
            "name": "",
            "type": "uint256"
        }
    ],
    "name": "industrialOutput",
    "outputs": [
        {
            "internalType": "uint256",
            "name": "",
            "type": "uint256"
        }
    ],
    "stateMutability": "view",
    "type": "function"
},
{
    "inputs": [
        {
            "internalType": "uint256",

```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						105
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        "name": "",
        "type": "uint256"
    }
],
"name": "limitations",
"outputs": [
    {
        "internalType": "int256",
        "name": "",
        "type": "int256"
    }
],
"stateMutability": "view",
"type": "function"
},
{
    "inputs": [
        {
            "internalType": "uint256",
            "name": "",
            "type": "uint256"
        }
    ],
    "name": "residentialOutput",
    "outputs": [
        {
            "internalType": "uint256",
            "name": "",
            "type": "uint256"
        }
    ]
}

```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						106
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        }
    ],
    "stateMutability": "view",
    "type": "function"
},
{
    "inputs": [
        {
            "internalType": "uint256",
            "name": "",
            "type": "uint256"
        }
    ],
    "name": "sesOutput",
    "outputs": [
        {
            "internalType": "uint256",
            "name": "",
            "type": "uint256"
        }
    ],
    "stateMutability": "view",
    "type": "function"
},
{
    "inputs": [
        {
            "internalType": "uint256",
            "name": "",

```

					141.EK0121.011ДБ	Арк.
						107
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

        "type": "uint256"
      }
    ],
    "name": "wesOutput",
    "outputs": [
      {
        "internalType": "uint256",
        "name": "",
        "type": "uint256"
      }
    ],
    "stateMutability": "view",
    "type": "function"
  }
];

```

```

async function storeData() {
  const fileInput = document.getElementById('dataFile');
  const file = fileInput.files[0];

  if (!file) {
    alert("Please select a data file.");
    return;
  }

  const reader = new FileReader();
  reader.onload = async function(event) {
    const dataText = event.target.result;
    const data = JSON.parse(dataText);

```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		108

```

const sesGeneration = data.sesGeneration;
const wesGeneration = data.wesGeneration;
const residentialConsumption = data.residentialConsumption;
const industrialConsumption = data.industrialConsumption;

if (window.ethereum) {
  try {
    const web3 = new Web3(window.ethereum);
    await window.ethereum.enable();
    const contract = new web3.eth.Contract(abi, contractAddress);
    const accounts = await web3.eth.getAccounts();
    await contract.methods.inputData(sesGeneration,
wesGeneration, residentialConsumption, industrialConsumption).send({ from:
accounts[0] });

    alert("Data stored successfully!");
  } catch (error) {
    console.error(error);
    alert("An error occurred: " + error.message);
  }
} else {
  alert("Please install MetaMask!");
}
};
reader.readAsText(file);
}

async function processPower() {
  if (window.ethereum) {

```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		109

```

    try {
        const web3 = new Web3(window.ethereum);
        const contract = new web3.eth.Contract(abi, contractAddress);
        const accounts = await web3.eth.getAccounts();
        await contract.methods.processPower().send({ from: accounts[0]
    });

    alert("Power processed successfully!");
    getResults();
    } catch (error) {
        console.error(error);
        alert("An error occurred: " + error.message);
    }
    } else {
        alert("Please install MetaMask!");
    }
}

async function getResults() {
    if (window.ethereum) {
        try {
            const web3 = new Web3(window.ethereum);
            const contract = new web3.eth.Contract(abi, contractAddress);
            const result = await contract.methods.getResultData().call();

            netLoad = result[0].map(value => Number(value));
            gasTurbineActivation = result[1].map(value => Number(value));
            sesOutput = result[2].map(value => Number(value));

            generateOutputFile();

```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
						110
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

    } catch (error) {
        console.error(error);
        alert("An error occurred: " + error.message);
    }
} else {
    alert("Please install MetaMask!");
}
}

```

```

async function testFunction() {
    const input = document.getElementById('testInput').value;
    if (window.ethereum) {
        try {
            const web3 = new Web3(window.ethereum);
            const contract = new web3.eth.Contract(abi, contractAddress);
            const result = await contract.methods.testFunction(input).call();
            document.getElementById('testResult').innerText = result;
        } catch (error) {
            console.error(error);
            alert("An error occurred: " + error.message);
        }
    } else {
        alert("Please install MetaMask!");
    }
}

```

```

function generateOutputFile() {
    const data = {
        netLoad: netLoad,
    }
}

```

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		111

```

        gasTurbineActivation: gasTurbineActivation,
        sesOutput: sesOutput
    };

    const json = JSON.stringify(data);
    const blob = new Blob([json], { type: "application/json" });
    const url = URL.createObjectURL(blob);
    const a = document.createElement('a');
    a.href = url;
    a.download = 'output.json';
    a.click();
    URL.revokeObjectURL(url);
}
</script>
</body>
</html>

```

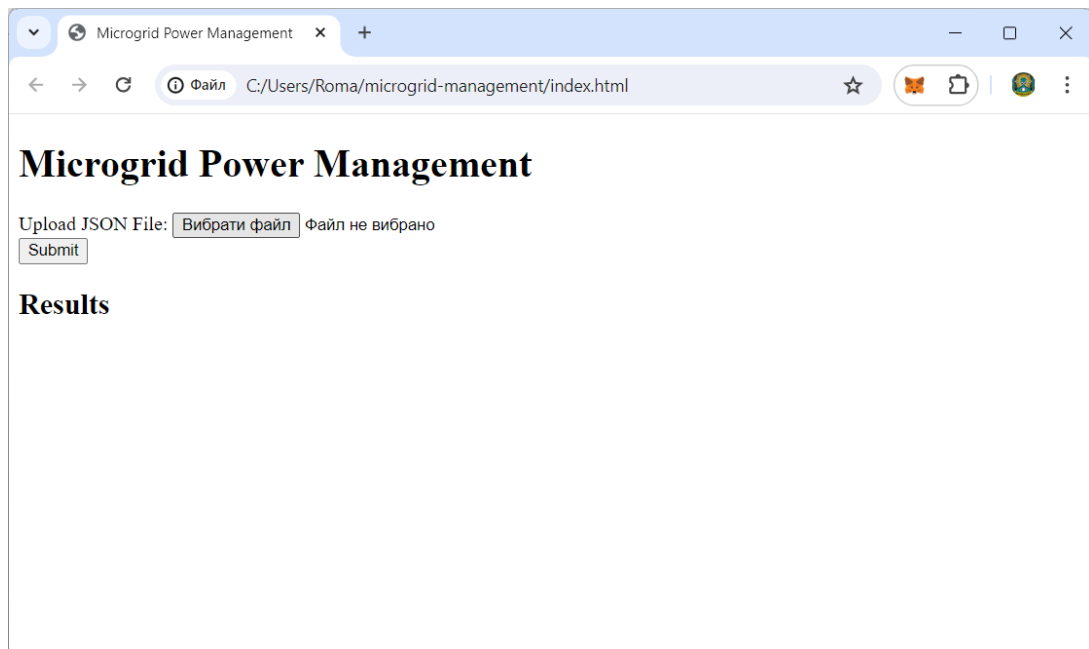


Рисунок В.1 – Діалогове вікно HTML-додатка

					141.ЕК0121.011ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		112

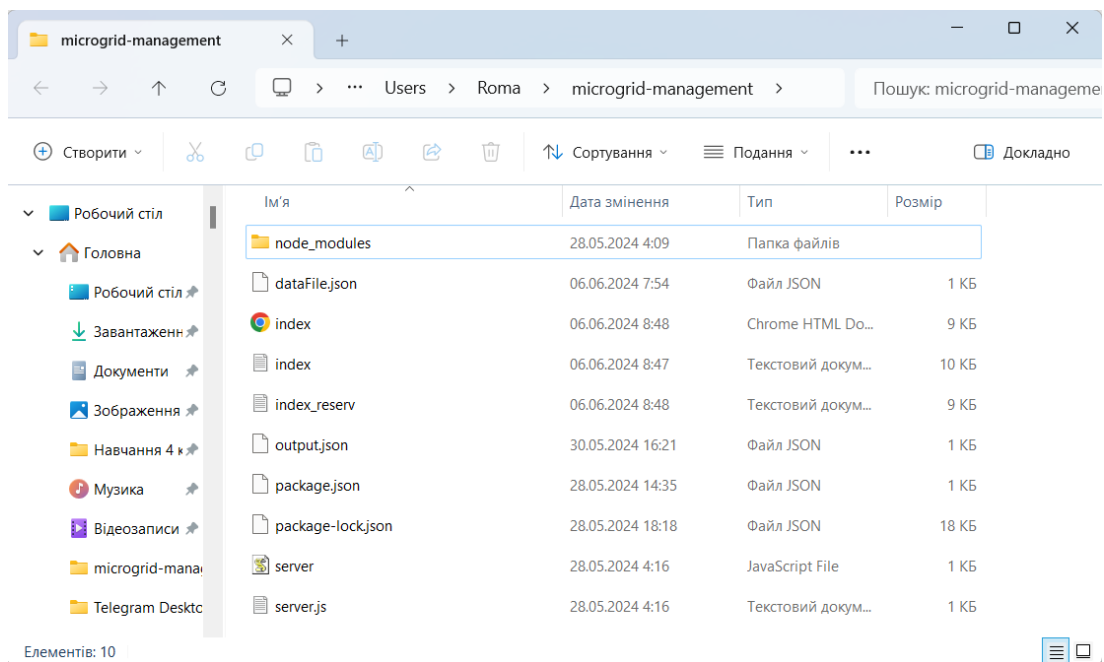


Рисунок В.2 – Допоміжні файли HTML-додатка

ДОДАТОК Г

Вхідні дані моделювання режиму ізолюваної роботи.

Таблиця Г.1 – Вхідні дані моделювання режиму ізолюваної роботи.

Час, год	Генерація СЕС, МВт	Генерація ВЕС, МВт	Споживання населення, МВт	Споживання промисловості, МВт
1	1	0	3	5
2	2	0	5	4
3	3	0	4	4
4	4	0	6	3
5	5	0	5	3
6	6	0	6	4
7	7	0	6	5
8	8	5	8	8
9	9	10	10	10
10	10	12	12	12
11	11	13	13	14
12	12	13	15	13
13	13	14	12	12
14	14	12	10	10
15	15	10	12	11
16	16	10	14	12
17	17	10	12	11
18	18	8	13	20
19	19	6	10	25
20	20	5	14	22
21	21	0	12	20
22	22	0	10	15
23	23	0	8	10
24	24	0	8	7

Таблиця Г.2 – Результат моделювання режиму ізольованої роботи.

Час , год	Сумарна генерація, МВт	Сумарне споживання, МВт	Початковий небаланс, МВт	Генерація газотурбінної установки, МВт	Взаємодія із зовнішньою мережею, МВт	Обмеження генерації / споживання, МВт
	3	10	-7	7	0	0
2	5	9	-4	4	0	0
3	4	9	-5	5	0	0
4	6	8	-2	2	0	0
5	5	8	-3	3	0	0
6	6	10	-4	4	0	0
7	6	13	-7	7	0	0
8	13	18	-5	5	0	0
9	20	22	-2	2	0	0
10	24	27	-3	3	0	0
11	26	31	-5	5	0	0
12	28	30	-2	2	0	0
13	26	28	-2	2	0	0
14	22	25	-3	3	0	0
15	22	25	-3	3	0	0
16	24	27	-3	3	0	0
17	22	25	-3	3	0	0
18	21	33	-12	10	2	0
19	16	35	-19	10	9	0
20	19	30	-11	10	1	0
21	12	27	-15	10	5	0
22	10	21	-11	10	1	0
23	8	15	-7	7	0	0
24	8	12	-4	4	0	0

ДОДАТОК Г

Вхідні дані моделювання режиму ізолюваної роботи.

Таблиця Г.1 – Вхідні дані моделювання режиму споживання із зовнішньої енергосистеми

Час, год	Генерація СЕС, МВт	Генерація ВЕС, МВт	Споживання населення, МВт	Споживання промисловості, МВт
1	1	0	3	5
2	2	0	4	5
3	3	0	3	5
4	4	0	5	4
5	5	0	4	4
6	6	0	5	5
7	7	0	4	7
8	8	2	6	10
9	9	5	8	13
10	10	8	10	16
11	11	10	12	18
12	12	12	15	20
13	13	14	13	19
14	14	10	12	17
15	15	8	10	16
16	16	6	11	17
17	17	5	10	18
18	18	3	9	25
19	19	2	8	30
20	20	1	7	28
21	21	0	6	26
22	22	0	5	20
23	23	0	4	15
24	24	0	3	10

Таблиця Г.2 – Результат моделювання режиму споживання із зовнішньої енергосистеми

Час , год	Сумарна генерація, МВт	Сумарне споживання, МВт	Початковий небаланс, МВт	Генерація газотурбінної установки, МВт	Взаємодія із зовнішньою мережею, МВт	Обмеження генерації / споживання, МВт
	3	11	-8	8	0	0
2	4	11	-7	7	0	0
3	3	11	-8	8	0	0
4	5	10	-5	5	0	0
5	4	10	-6	6	0	0
6	5	13	-8	8	0	0
7	4	17	-13	13	0	0
8	8	22	-14	14	0	0
9	13	27	-14	14	0	0
10	18	33	-15	15	0	0
11	22	38	-16	15	1	0
12	27	42	-15	15	0	0
13	27	39	-12	12	0	0
14	22	35	-13	13	0	0
15	18	32	-14	14	0	0
16	17	34	-17	15	2	0
17	15	34	-19	15	4	0
18	12	40	-28	15	10	-3
19	10	42	-32	15	10	-7
20	8	38	-30	15	10	-5
21	6	34	-28	15	10	-3
22	5	26	-21	15	6	0
23	4	21	-17	15	2	0
24	3	16	-13	13	0	0