НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСТИТЕТ БІОРЕСУРСІВ

І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет інформаційних технологій

ПОГОДЖЕНО	**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**
Декан факультету	**Завідувач кафедри**
Інформаційних технологій	комп'ютерних наук
(назва факультету)	(назва кафедри)
_____ Ігор БОЛБОТ	_____ Белла ГОЛУБ
(підпис) (ПІБ)	(підпис) (ПІБ)
"___" _____ 2025 р.	"___" _____ 2025 р.

.

МАГІСТЕРСТКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему «Система підтримки прийняття рішень з управління енергосистемами на основі машинного навчання»

Спеціальність 122 – «Комп'ютерні науки»

Освітня программа - «Інформаційні управляючі системи»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

Гарант освітньої програми

кандидат технічних наук, доцент _____ Белла ГОЛУБ Б.Л.

(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Доктор технічних наук, професор _____ Олександр БУШМА

(науковий ступінь та вчене звання) (підпис) (ПІБ)

Виконав _____ _____ Василь ХИЛЕНКО

(підпис) (ПІБ студента)

КИЇВ–2025

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Факультет (НДІ) _____інформаційних технологій_____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
комп'ютерних наук
(назва кафедри)
доц., к.т.н. _____Голуб Б.Л.
(вчене звання і ступінь) (підпис) (ініціали і прізвище)

«___»_____ 2025р.

З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ
Хиленку Василю Володимировичу
прізвище, ім'я, по батькові

Спеціальність 122 – «Комп'ютерні науки»

Тема магістерської кваліфікаційної роботи "Система підтримки прийняття рішень з управління енергосистемами на основі машинного навчання" затверджена наказом ректора НУБіП України від "01" листопада 2024 р. № 1964 "С".
Термін подання завершеної роботи на кафедру: 2025. 11. 29.
рік, місяць, число
Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:
модельні дані та дані з відкритих джерел щодо моделювання енергомереж, включаючи їх технічні показники та параметри.
Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Огляд предметної області та стану існуючих рішень.
2. Аналіз функціонування системи управління трансакційними енергомережами. Проблеми та задачі розробки інформаційного і прикладного ПЗ.
3. Вибір архітектурного рішення БД системи підтримки прийняття рішень в автоматизованих системах управління (АСУ) трансакційними енергомережами.
4. Розробка методики впровадження нейромережевих моделей та використовування машинного навчання в блоках (системах) підтримки прийняття рішень АСУ трансакційними енергомережами.
5. Висновки. Аналіз отриманих результатів та рекомендації щодо їх впровадження і подальшого розвитку досліджень.

Перелік графічних матеріалів (за потреби)_____
_____

Дата видачі завдання "01" листопада 2024 р.

Керівник дипломного проекту _____Бушма О.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)
Завдання прийняв до виконання _____Хиленко В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали студента)

ЗМІСТ

ВСТУП.....5

1. Аналіз існуючих рішень щодо побудови і функціонування інтелектуальних автоматизованих систем управління (АСУ) трансакційними (ТЕ) енергомережами.....8

1.1. Опис і аналіз блок-схеми інтелектуальної АСУ ТЕ енергомережами.....8

1.2. Аналіз інформаційних потоків в інтелектуальній АСУ ТЕ енергомережами.....15

1.3. Функціональні задачі системи підтримки прийняття рішень в АСУ ТЕ енергомережами. Визначення вимог до ЦБОДП 20

1.4. Висновки до розділу 1.....22

2. Моделювання інтелектуальної АСУ ТЕ енергомережами з блоком підтримки прийняття рішень 23

2.1. Огляд існуючих рішень.....23

2.2. Визначення вимог до інформаційного і програмного забезпечення (ПЗ) центрального блоку обробки даних та прогнозування (ЦБОДП) системи прийняття рішень інтелектуальної СУ ТЕ енергомережами. Логічна модель даних..... 28

2.2. Алгоритми обробки даних в ЦБОДП 36

2.3. Висновки до розділу 2.....40

3. Розробка рішень щодо впровадження нейромережевих моделей в АСУ ТЕ енергомережами.....41

3.1. Формування нейромережевих моделей для управління ТЕ

енергомережами…….....41

3.2.Висновки до розділу 3.....48

4. Розробка фрагментів ПЗ ЦБОДП і порівняльний аналіз застосування отриманих управлінських рішень при використанні системи прийняття рішень в АСУ ТЕ енергосистем 49

4.1. Порівняльний аналіз архітектурних рішень БД блоку підтримки прийняття рішень в АСУ ТЕ енегомережами.....49

4.2. Лістінг програми обробки даних 58

4.3. Висновки по розділу 4.....66

ВИСНОВКИ.....67

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....70

ВСТУП

Спрямування і актуальність досліджень

Впровадження новітніх решень які отримані в галузі комп'ютерних наук в різні галузі господарства є важливою державною задачею для економіки в цілому. Енергетика, як одна з рушійних галузей економіки, стан якою суттєво впливає на загальні економічні показники, на розвиток економіки держави в цілому, є вкрай чутливою до цінових показників пов'язаних з автоматизацією. Якісне рішення проблем автоматизації енергетики можливо на основі останніх досягнень в інформаційних технологіях та має забезпечити оптимізацію управління. Шляхи розв'язання задач, що стоять перед енергетикою, оновлюються відповідно до загальних технологічних змін які відбуваються в світі, зокрема бурхливому розвитку алтернативних джерел енергопостачання, інтеграції окремих енергомереж в єдину потужну енергосистему, змін в економічних процесах розрахунків за електроенергію (криптовалюьні розрахунки) та інше. При цьому актуальною стає задача оптимальної взаємодії різних енергомереж і оптимізації роботи інтегрованої енергосистеми як єдиного цілого. Відповідно, вкрай важливим є постійне оновлення програмно-алгоритмічного забезпечення автоматизованих систем управління (АСУ) енергетики, підняття інтелектуального рівня управлінських рішень, щоб запобігти енергетичним дисбалансам які ствоюють проблеми як для окремих споживачів локальних енергомереж, так і на рівні інтегрованої енергосистеми загального енергоринку. Загалом, поточна ринкова ситуація в енергетиці потребує чіткої і якісної взаємодії учасників енергоринку, що, в свою чергу, потребує використання систем підтримки прийняття рішень на основі останніх досягнень в інформаційних технологіях (нейромережеві моделі, машинного навчання, смарт-контрактів та ін.). Відповідно, тема чинного дипломного проекту, спрямована на вирішення задач підвищення ефективності і якості інтелектуальних АСУ ТЕ енергомережами, є актуальною.

Метою дослідження і дипломного проекту є аналіз стану автоматизації і існуючих рішень щодо побудови АСУ трансакційних енергосистем (ТЕ) та розробка ПЗ центрального блока обробки даних і прогнозування (ЦБОДП) інформаційно-аналітичної платформи для підтримки прийняття рішень в АСУ ТЕ енергосистемами.

Для досягнення мети було заплановано виконання наступних завдань:

1) провести огляд відкритих джерел відчизняної і світової літератури за тематикою дослідження;

2) провести аналіз загальних вимог, які були закладені при розробці існуючих програмних рішень в АСУ ТЕ енергомережами і математичних алгоритмів, які були використані при їх реалізації;

3) визначити технологічні зміни, що відбулися за останній час в інформаційних технологіях (зокрема, широке впровадження алгоритмів дата-майнінгу, нейромереж, смарт-контрактів, блокчейн, впровадження криптовалютних розрахункових операцій та ін.) і проаналізувати вплив цих змін на функціональну схему ЦБОДП;

4) сформувати перелік додаткових вимог до ЦБОДП, які потрібно врахувати при виконанні проекту і досягненні поставленої мети досліджень;

5) запропонувати і проаналізувати варіанті архітектури БД ЦБОДП і провести їх порівняльний аналіз.

В процесі розв'язання задачі були використані знання та методичні підходи, що викладались в курсах: "Системи управління базами даних " та "Програмування систем реального часу".

Об'єктом дослідження є інформаційні процеси в системах автоматизації і управління ТЕ енергосистем.

Предметом дослідження є рішення щодо архітектури БД і алгоритмів роботи ЦБОДП інформаційно-аналітичної системи (платформи) підтримки прийняття рішень в АСУ ТЕ енергосистемами.

При розв’язанні поставлених завдань використовувались такі методи дослідження: мова програмування Java в програмному середовищі IntelliJ IDEA Professional та використання фреймворк Spring Boot, використання вбудованих програмних функцій в мові Java для оцінки часу роботи процесора.

Новизна отриманих результатів і інженерних рішень.

Сформовані вимоги до математичного і програмно-алгоритмічного забезпечення що використовується в АСУ ТЕ енергосистемами, зокрема в ЦБОДП.

Проаналізовані схеми використанні нейромереж і машинного навчання для прийняття оптимальних управлінських рішень.

Написані лістинги програм для різних архітектур БД ЦБОДП і проведено порівняльний аналіз їх використання. Проведені числові експерименти по розрахуванню показників роботи енергомереж з оптимальним (з викристанням системи підтримки прийняття рішень) і не оптимізованим (оперативним) управлінням. На підставі проведеного аналізу обгрунтован вибір архітектури і вимог до математичного і програмного забезпечення ЦБОДП з расподіленою базою даних.

Апробація результатів та публікації. Результати даної роботи частково представлені на двох міжнародних конференціях (International Conference on Artificial Intelligence Computer Data Sciences and Applications Acdsa 2025 (публікації включені до науково-метричної бази даних SCOPUS), і The 5th International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), 2025.

1.АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ЩОДО ПОБУДОВИ І ФУНКЦІОНУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АСУ ТЕ ЕНЕРГОМЕРЕЖАМИ

1.1 Опис і аналіз блок-схеми інтелектуальної системи управління ТЕ енергомережами

Енергетика є важливою галуззю економіки України, успішний розвиток якої потребує впровадження сучасних інформаційних технологій. Важливою особливістю сучасної енергетики є розбудова трансакційних (ТЕ - transactive energy) енергосистем. В цілому, трансакційну енергетику, яку ще називають «Містом Сонця», сьогодні розглядають як базове рішення для побудови сучасних енергосистем. Саме такий підхід, коли поєднуються в одній розподіленій системі генератори різних типів (працюючих на основі відновлювальних і не відновлювальних джерел) відповідає сучасному принциповому баченню майбутнього енергоринку. Важливою проблемою при цьому є забезпечення сбалансованої роботи енергомереж із оптимізацією економічних показників як для генераторів, так і споживачів електроенергії. Відповідно збільшується роль системи управління, яка виконує переключення і враховує прогнозні показники з метою уникнення енергетичних дисбалансів. Розвиток енергетичної галузі, підняття ефективності енергетичної галузі сьогодні неможливе без впровадження автоматизованих систем управління, які спираються на прогнозні дані і системи підтримки прийняття рішень. Таким чином забепечується захист від негативних наслідків «людського фактору», від неоптимальних управлінських рішень. Якісне управління енергомережами в системах тарнакційної енергетики потребує створення систем підтримки прийняття рішень, що використовують останні досягнення в галузі інформаційних технологій, зокрема нейромереж та штучного інтелекту. В поточній ринковій ситуації якісне і надійне управління енергоринком без

використання систем підтримки прийняття рішень, які, в свою чергу використовують смарт-конртакти, блокчейн технології та інше, є неможливою. Завданням дипломного проекту є розробка елементів інтелектуальної інформаційно-аналітичної платформи для управління ТЕ енергосистемами відповідно до вказаної вище мети досліджень.

Перехід сучасної енергетики до трансактивних енергетичних систем суттуво підвищує значення вирішення задачі прогнозування динаміки процесів генерації енергії і енегоспоживання. Відповідно, одним із найбільш важливих елементов інтелектуальної автоматизованої системи управління ТЕ енергетичних систем є система підтримки прийняття рішень і управління, як включає в себе два блоки (див. Рис.1):

центральний блок обробки даних і прогнозування (ЦБОДП)

та

блок аналізу і управління,

які детально розглянуті нижче.

Орієнтуючись на результати роботи ЦБОДП система управління через програмні платформи зможе забезпечити проведення операцій купівлі-продажу енергії для всіх учасників енергосистеми незалежно від виробляємих або споживаємих обсягів електроенергії.

Блок-схема ТЕ енергосистеми з інтелектуальною системою управління, включає досить велику кількість блоків. Фрагмент загальної блок-схеми ТЕ енергосистеми що відображає взаємодію окремих енергомереж з системою підтримки прийняття рішень і управління та включає систему підтримки прийняття рішень (яку ще називають блоком аналітичного прогнозування) представлена на рис. 1.

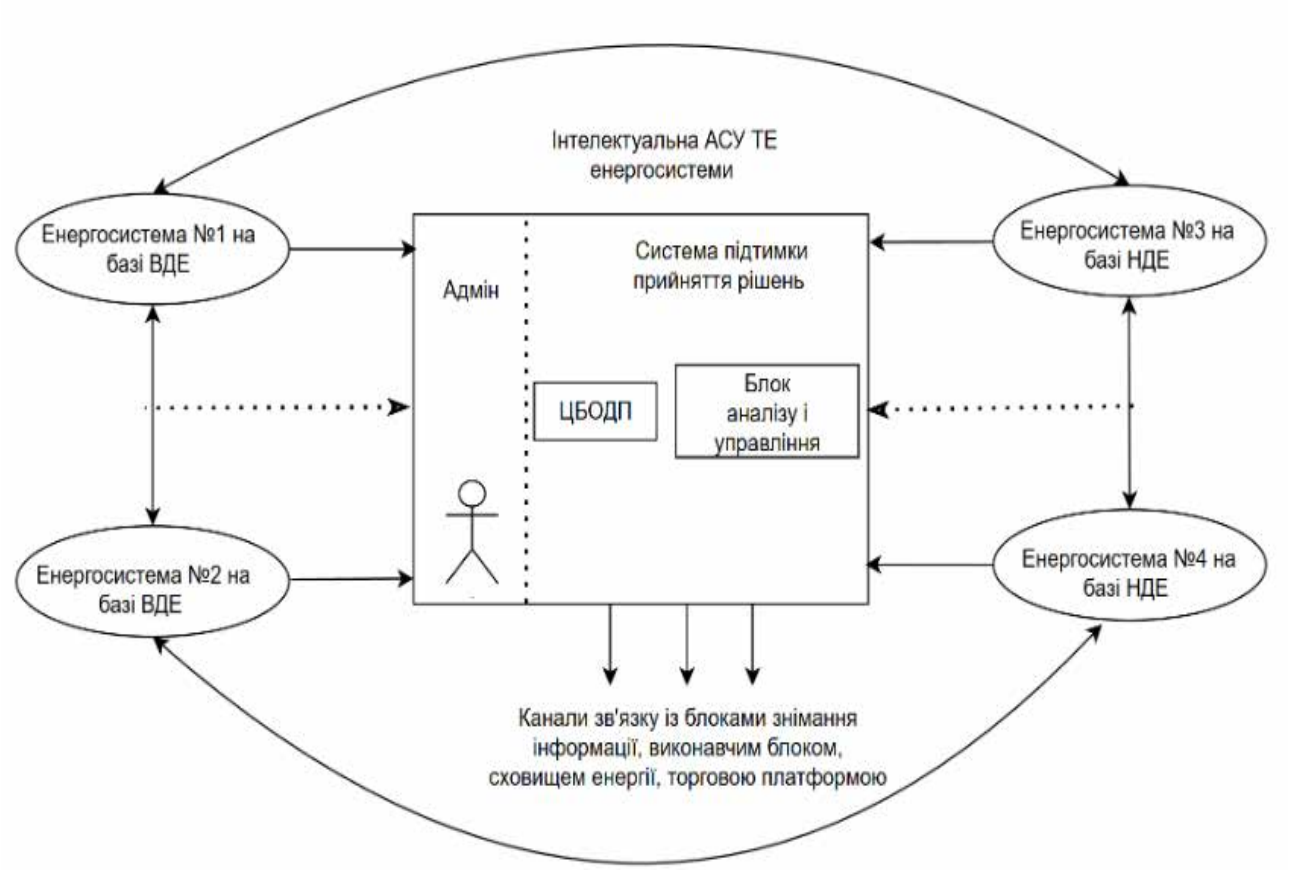


Рис. 1. Фрагмент блок-схеми ТЕ енергосистеми з інтелектуальною АСУ

Представлена схема включає сукупність окремих енергосистем і відображає точки міжмережевої взаємодії. Зокрема, фрагмент наведений фрагмент блок-схеми відображає сукупність енергомереж що використовують генератори відновлювальної та невідновлювальної електроенергії, рахуючи, що кластери споживачів, виконавчий блок, блок кібербезпеки, сховище енергії має окремі під’єднання, які не відображені з метою непернавантаження блок схеми. Структурно інтелектуальна система управління мережею включає до свого складу ЦБОДП, який, разом з блоком аналізу і управління, виконує функції системи підтримки прийняття рішень. Також до блок-схеми включені точуи взаємодії з блоками збирання даних щодо стану мережі, сховищем енергії, та ін.

Для збереження даних і неможливості їх спотворення передбачається використанням блокчейн технології.

На рис. 2 наведена діаграма прецедентів, яка відображає основні взаємодії між акторами (учасниками ТЕ енергосистеми) з використанням результатів роботи ЦБОДП.

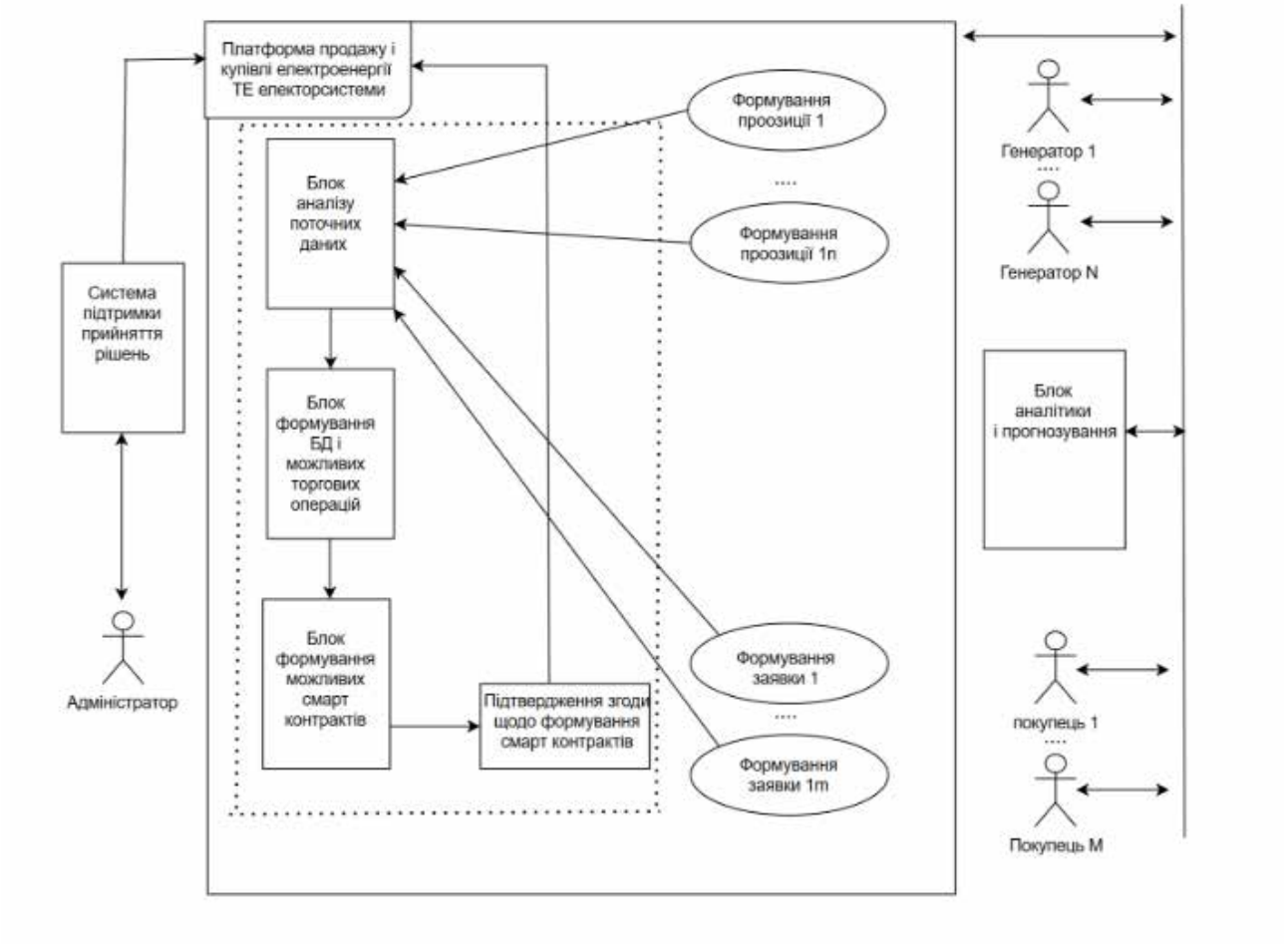


Рис. 2. Діаграма прецедентів ТЕ енергосистеми.

Схема інформаційних потоків як між учасниками мережі, так міжмережевої взаємодії представлена рис. 3.

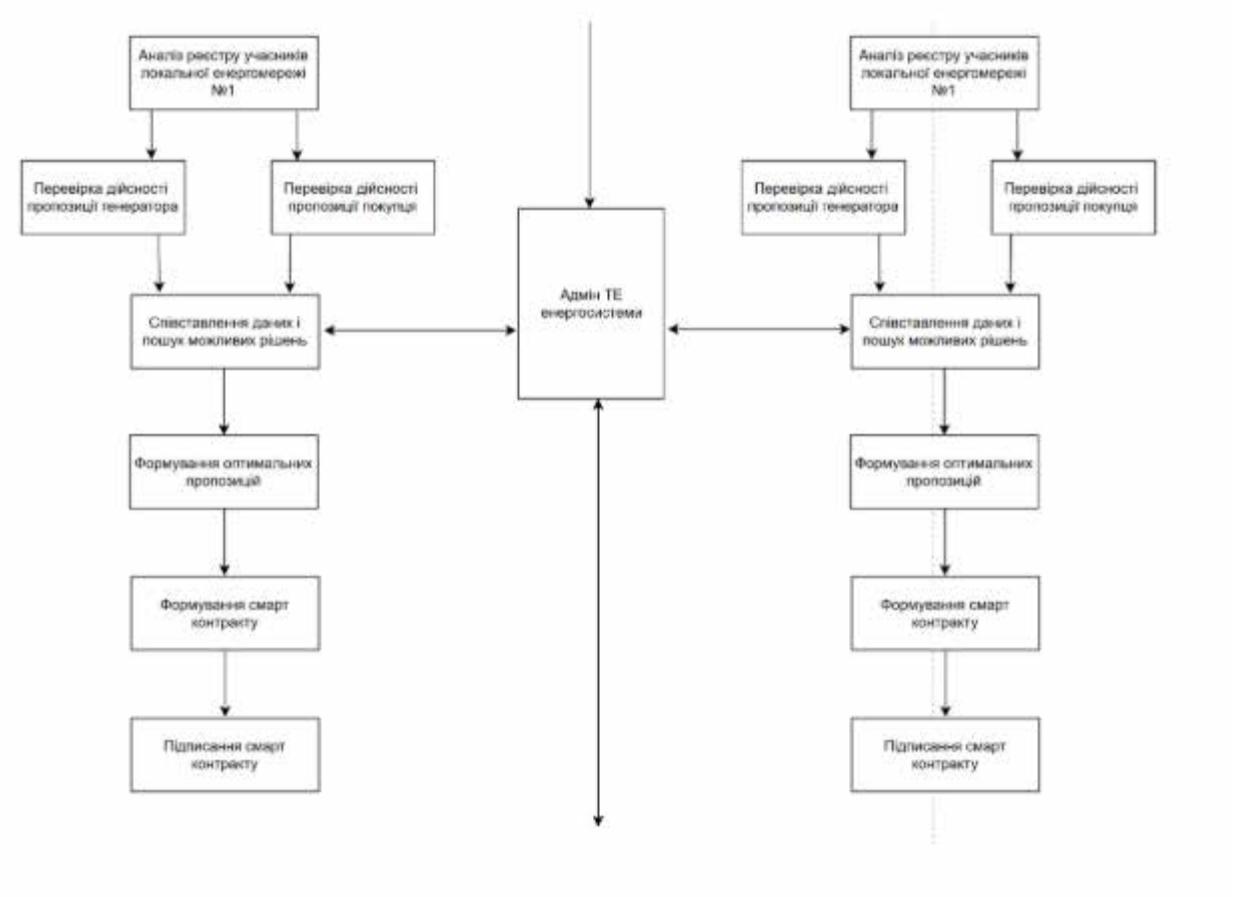


Рис. 3. Функціональна схема інформаційних потоків в ТЕ енергосистемі

Приведемо опис основних функціональних задач учасників ТЕ енергосистеми.

В ієрархічній керовані ТЕ енергосистемі можна виділити чотири групи учасників:

1. Адміністратор енергосистеми (Агрегатор) і Адміністратори локальних енергомереж;
2. Енергомережі на базі генераторів відновлювальної електроенергії;
3. Енергомережі на базі генераторів невідновлювальної електроенергії;
4. Споживачі електроенергії.

Відповідно до вказаної структури функціональні вимоги між учасниками поділені наступним чином:

1. Адміністратор системи (Агрегатор) має право на виконання наступних функцій:

- втручання в ручному режимі в управління енергосистемою, в тому числі можливість відключення окремих енергомереж, перекомутація енергетичних потоків на всіх рівнях та інше;

- моніторінг стану і показників окремих енергомереж - учасників енергосистеми;

- доступ до результатів роботи блоку підтримки прийняття рішень;

- повний доступ до даних торгової платформи купівлі – продажу електроенергії;

- моніторінг і перегляд управлінських рішень прийнятих інтелектуальною АСУ ТЕ енергосистеми.

В цілому, Адміністратор енергосистеми (Агрегатор) є супервайзером з повним доступом до всіх її показників, з правом контролю і втручання в роботу по взаємодії генераторів і споживачів із різних локальних мереж.

2. Адміністратори локальних енергомереж на базі як генераторів відновлювальної, так і невідновлювальної електроенергії мають дозвіл на виконання наступних функцій:

- формування і перегляд загальної бази даних щодо виставлених ними заявок по роботі з енергосистемою;

- підписання смарт-контрактів як з окремими споживачами, так і с іншими енергосистемами;

- отримання інформацації щодо загального стану мережі, показників окремих складових, зокрема сховища та ін.

3. Споживачі електроенергії мають дозвіл на виконання наступних функцій:

- формування і перегляд загальної бази даних та її редагування в частині даних, щодо виставлених ними заявок.
- підписання смарт-контрактів;
- отримання інформацації щодо загального стану мережі, показників окремих складових, зокрема сховища та ін.

Виконання дозволених операцій учасниками Мікрогрід реалізуется окремими блоками енергомережі. Структурно в мережі будемо виділяти наступні блоки (субсистеми):

- виконавчий блок/Блок реалізації управляючих впливів;
- центральний блок обробки даних і прогнозування (ЦБОДП);
- блок моніторингу та кібербезпеки;
- сховище енергії.

1.2 Аналіз інформаційних потоків ТЕ енергомережі

Принципово блоки інтегрованої енергосистеми можуть взаємодіяти як між собою, так і з усіма учасниками кластерів енергомережі, зокрема локальними енергомережами, забезпечуючи виконання вказаних функцій і вирішення нижче вказаних задач.

Виконавчий блок/Блок реалізації управляючих впливів (суб-система реалізації управляючих впливів) забезпечує функції виконання прийнятих рішень щодо управління енергомережою і для цього має отримувати необхідні дані (значення керуючих параметрів) від інтелектуальної системи управління. В свою чергу, значення керуючих параметрів базуються на прийнятих рішеннях отриманих системою підтримки прийняття рішень.

Центральний блок обробки даних і прогнозування (ЦБОДП) вирішує задачі:

- формування інформаційних баз даних щодо пропозицій учасників мережі;
- роботу з базами даних учасників - обробки даних по пропозиціям генераторів та покупців енергії,
- формування пропозицій для заключення смарт-контрактів між учасниками мережі;
- динамічне оновлення баз даних учасників мережі відповідно до результатів підписання та виконання смарт-контрактів;
- інформування Адміністратора енергомережі щодо її стану та у разі виникнення нештатних ситуацій;
- внесення корегувань у бази даних відповідно до рішень Адміністратора мережі;

- обчислення прогнозних даних щодо динаміки генерації електроенергії по локальним енергомережам, а при наявності технічних можливостей і по окремим виробникам;

- обчислення значеннь очікуваних даних щодо попиту як по міжмережевій взаємодії в цілому, так і, при можливості, по окремих споживачах.

Відповідно, даний блок має отримувати дані від енергомереж як єдиних кластерів, або навіть від окремих елементів цих кластерів, зокрема:

- генераторів,
- споживачів,
- Адміністраторів локальних енергомереж.

Блок моніторінгу та кібербезпеки вирішує задачі

- організації роботи засобів сбирання даних щодо стану як мережі в цілому, так і проведення всіх комерційних операцій між учасниками мережі,
- контролю та забезпечення роботи системи кібербезпеки енергомережі.

Даний блок має отмувати дані від зовнішніх пристроїв/датчиків та аналізуючи інформаційні потоки в енергомережі.

Передачу даних цей блок виконує до системи управління.

Блок аналізу і управління проводить аналіз стану мережі, розраховує значення керуючих параметрів, співставляє їх з даними ЦБОДП і приймає управлінські рішення з метою оптимального функціонування мережі в цілому та ефективної роботи учасників мережі.

Даний блок має співпрацювати і отмувати дані практично від всіх інших блоків мережі і Адміністратора системи.

Передачу даних цей блок виконує до виконавчого блоку/Блоку реалізації управляючих впливів.

В цілому, інтелектуальна система управління енергетичними ресурсами ТЕ енергосистеми має забезпечити виконання інформаційно-аналітичних завдань та безпосередньо управлінських функцій. Для цього мають бути вирішені наступні задачі:

- моніторінг стану локальних енергомереж в режимі реального часу, включаючи формування та підтримування БД учасників мережі;

- розрахунок прогнозних показників щодо можливостей генерації і потреб споживання як на рівні окремих енергомереж, так і на рівні окремих генераторів і споживачів енергії;
- формування бази даних для підписання смарт-контрактів, контроль підписання та виконання смарт-контрактів;
- супроводження блокчейну мережі;
- розрахунок управлінських рішень пов’язаних з функціонуванням мережі.

Вирішення вказаних задач дозволить всій сукупності блоків, що входять до складу енергосистеми, оперативно виконувати функції управління, забезпечуючи її функціонування.

Фрагмент циклу обробки даних та руху інформаційних потоків в ТЕ енергосистеми представлено на рис. 4 [9].

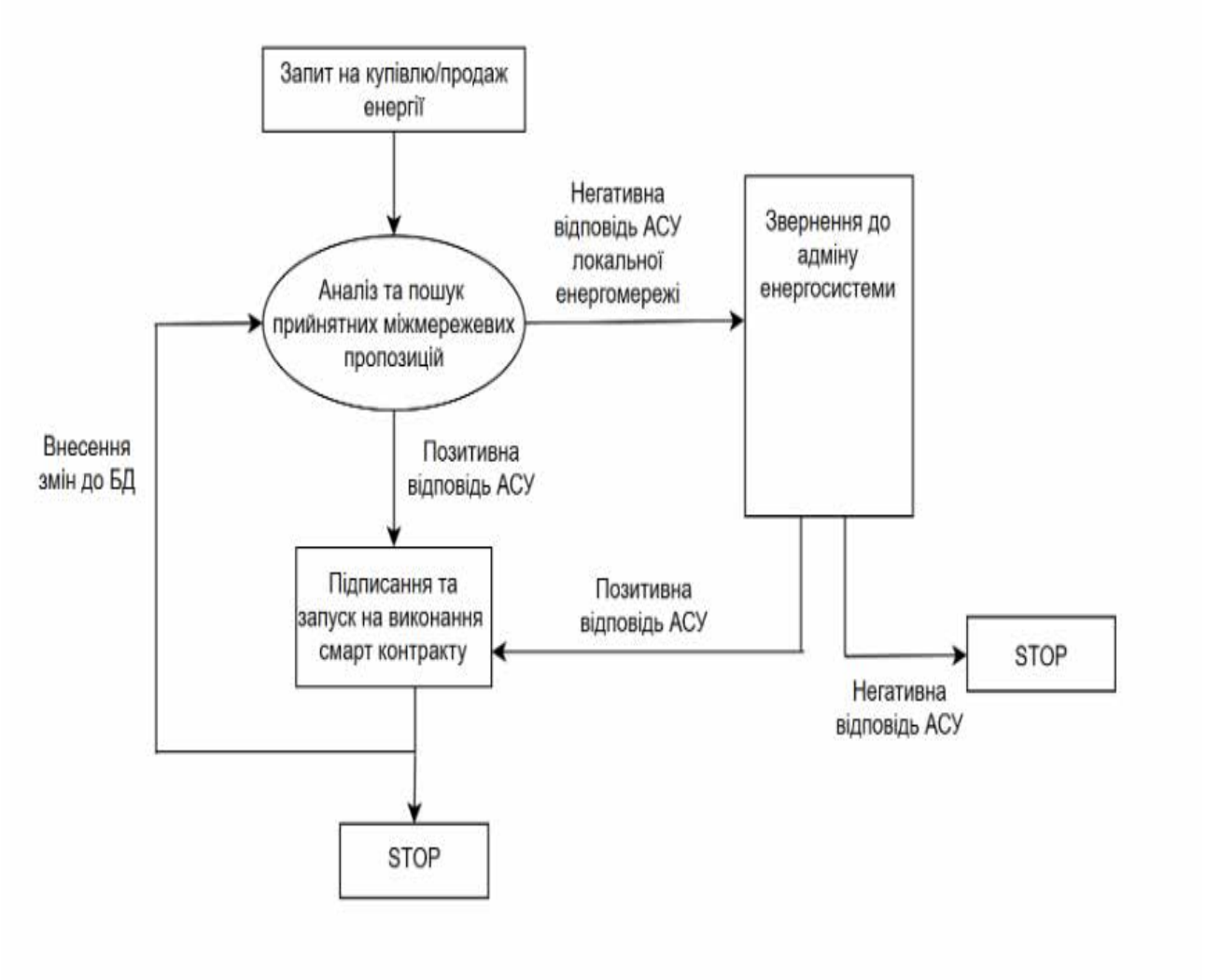


Рис. 4. Фрагмент циклу обробки даних в ТЕ енергосистемі

Даний фрагмент прив’язано до визначеного моменту часу t. Оновлення інформації відбувається відповідно до заданого інтервалу $t = \Delta t$ системою управління або Адміністратором системи. Додаткове оновлення може бути пов’язано з подіями підписання і виконання сматр контрактів. У цьому випадку початок оновлення інформації в кожній локальній мережі визначається як

$$T_{start}(N_i) = t_N + \Delta t \qquad (2)$$

де T_{start} це час початку процедури оновлення інформації щодо стану локальної енергомережі з номером N_i і даних генераторів і покупців; t_{Kj} – час підтвердження виконання смарт контракта з номером K_j обома підписантами –

генератором (продавцем електроенергії) і покупцем (споживачем); Δt - встановлений час періоду оновлення інформації.

Оновлення інтегрованої БД енегосистеми в цілому відбувається відповідно до змін БД локальних енергомереж.

Наведений фрагмент процесів обробки даних відображає інтегровані зв’язки пошуку оптимальних варіантів проведення операцій купівлі-продажу електроенергії в тому числі і між локальними енергосистемами, які входять до складу ТЕ енергосистеми.

Як правило, алгоритм роботи АСУ ТЕ енергосистеми включає два етапи. На першому етапі відбувається формування множини можливих варіантів торгових операцій на основі пропозицій генераторів і покупців окремої локальної енергомережі і, при можливості, виконуються торгові операції з використанням смарт – контрактів. У випадку відсутності взаємоприйнятних варіантів і отримання негативного результату на рівні локальної мережі, пошук переходить на більш високий рівень – пошуку пропозицій на рівні енергосистеми вцілому. На цьому етапі відбувається звернення до Адміністратора енергосистеми (Інтегратора) і застосовується система підтримки прийняття рішень АСУ ТЕ енергосистеми, яка використовує інтегровану БД, сформовану по інформації від усіх локальних енергомереж.

1.3 Функціональні задачі системи підтримки прийняття рішень в АСУ ТЕ енергомережами. Визначення вимог до ЦБОДП

Розробляєма програмна платформа є основною частиною ЦБОДП і результати її роботи будуть використовуватись практично всіма іншими блоками смарт системи управління енергомережі.

Особливістю розробляємої платформи є врахування наступних факторів:

а) спрямування на енергосистеми з розподіленими генераторами різних типів (вітрогенератори, сонячні панелі, дизельгенератори та ін. та, зокрема, врахування особливостей динаміки кожного типу генераторів);

б) врахування прогнозів динаміки учасників енергосистеми;

с) готовність функціонування енергосистеми в умовах військового часу або в періоди повищеної небезпеки (попередження про можливі природні катаклізми та т.п.).

Вищевказані фактори можуть впливати на схеми інформаційних потоків між учасниками енергсистеми і між її окреми блоками, та мають бути враховані при виборі структури БД енергосистеми в цілому.

При виконанні чинного дипломного проекта будемо вважати, що:

1. Дані по пунктам а) та б) не мають бути розраховані ЦБОДП і надаються в ЦБОДП від інших енергомереж, окремих блоків чи засобів з'єму інформації;
2. Для зберігання даних використовуються публічний блокчейн. Використання публічного блокчейну обгрунтовується його такими характеристиками як легке приєднання до мережі і зручна робота з інформацією для кожного з учасників мережі. У якості блокчейн-протоколів передбачається використання найбільш поширених рішень, зокрема Ethereum Enterprise та ін. (наприклад Corda).

3. Зміни архітектури енергосистеми, пов’язані з пунктом c) не будуть вимагати зміни організації баз даних в ЦБОДП. При цьому зазначимо, що реалізація пункту c) має передбачати створення механізмів швидкого відновлення електромережі і взаємодії учасників після раптового відключення окремих генераторів або можливих збоїв;

4. Виконання вимог означених в пункті c) також передбачає впровадження механізмів автоматизації контролю за споживанням енергії з функцією примусового відключення та розробку системи резервного живлення.

Впровадження зазначених функцій в інтелектуальну систему управління і використання блокчейну має забезпечити надійне постачання електроенергії в умовах воєнного конфлікту, оптимізувати розподіл електропостачання та забезпечити ефективне використання обмежених енергоресурсів.

Висновки до розділу 1

Впровадження сучасних інформаційних технологій в енергетичну галузь є необхідним для підвищення ефективності роботи енергосистем.

Ускладнення архітектури сучасних енергосистем, повязане як із загальним розвитком енергосистем, так і с з розвитком технологій. Зокрема, все більш широке використання знаходять рішення на базі відновлювальних джерел енергії і їх інтеграція в існуючі енегомережі.

Поєднання в єдині енергосистеми визначенної кількості локальних енергомереж суттево підвищують вимоги до систем управління інтегрованими енергосистемами.

В чинному проекті проведено комплексний огляд та аналіз існуючих рішень, що відповідають сучасним вимогам до інтелектуальних систем управління в енергетиці і тенденціям розвитку інформаційних технологій.

Результати дослідження в світових публікаціях демонструють, що використання сучасних інформаційних технологій, зокрема нейромережевих моделей, алгоритмів аналітичного прогнозування та ін., може значно підвищити ефективність та надійність систем управління енергомережами.

2. МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ АСУ ТЕ ЕНЕРГОМЕРЕЖАМИ З БЛОКОМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

2.1. Огляд існуючих рішень

Напрямку, який є темою дипломного проекту, присвячена значна кількість робіт як вітчизняних, так і закордонних фахівців. В цих роботах розглядаються як можливі рішення що до побудови АСУ ТЕ енергосистем, побудови програмних платформ для купівлі – продажу електроенергії, так і використання сучасних інформаційних технологій, зокрема нейромережевих моделей. При цьому в багатьох роботах проводився аналіз ефективності впровадження інтелектуальних систем управління. Таблиця, що представлена в роботі [1] дозволяє співставити принципову різницю цих генерацій.

Таблиця 1

Існуюча мережа	**Smart Grid**
Електромеханічна	Цифрова
Односторонній зв’язок	Двосторонній зв'язок
Централізована генерація	Розподілена генерація(DG)
Ієрархічна	Мережева
Невелика кількість датчиків	Датчики всюди
Відсутність моніторингу	Самоспостереження
Ручна реставрація	Самоусунення недоліків
Збої і відключення	Адаптація і острівний режим
Ручна перевірка	Дистанційна перевірка
Обмежений контроль	Розширений контроль
Невелика кількість клієнтів	Значна кількість клієнтів

Ряд робіт пропонує використання стандартного програмного забезпечення для систем управління енергомережами. Нижче наведено їх порівняльних аналіз. Одним з найбільш поширених рішень є DMS (Distribution Management System).

Опис: DMS - це програмне забезпечення для управління розподільчими мережами електроенергії. Воно забезпечує моніторинг і контроль розподільчих підстанцій та ліній.

Основні функції: Управління активами, прогнозування навантаження, виявлення та локалізація несправностей, оптимізація розподілу енергії.

Застосування: Використовується електророзподільними компаніями для покращення надійності та ефективності мереж.

Переваги:

1. Покращена надійність та стабільність мережі:

використання DMS дозволяють операторам швидко виявляти та усувати несправності, зменшуючи час простою та підвищуючи надійність електропостачання.

2. Оптимізація розподілу енергії:

системи DMS допомагають оптимізувати потоки електроенергії, забезпечуючи ефективний розподіл ресурсів та зменшуючи втрати енергії в мережі.

3. Підвищення ефективності операцій:

автоматизація процесів управління розподільчою мережею знижує потребу в ручному втручанні, зменшуючи операційні витрати та підвищуючи продуктивність.

Іншим рішенням є EMS -**Energy Management System.**

Опис: EMS використовується для управління виробництвом та розподілом енергії в реальному часі. Це допомагає забезпечити баланс між виробництвом та споживанням електроенергії.

Основні функції: Моніторинг і управління енергосистемою, оптимізація виробництва та споживання, управління зберіганням енергії, інтеграція відновлюваних джерел енергії.

Застосування: Використовується в великих електричних системах, включаючи державні енергетичні системи та великі промислові підприємства.

Переваги EMS:

1.Оптимізація споживання енергії:

EMS дозволяє зменшити енергоспоживання за рахунок оптимізації використання енергоресурсів, що призводить до зниження витрат на енергію.

2.Покращення енергоефективності:

Системи EMS аналізують дані про споживання енергії та ідентифікують області для підвищення енергоефективності, що допомагає скоротити втрати енергії.

3.Зниження експлуатаційних витрат:

Оптимізація використання обладнання та своєчасне виявлення проблем дозволяє зменшити витрати на обслуговування та ремонт.

Ще одним рішенням є **ADMS (Advanced Distribution Management System).**

Опис: ADMS - це вдосконалена версія DMS, яка включає в себе розширення функціональних можливостей та інструменти для комплексного управління розподільчими мережами.

Основні функції: Розширене управління активами, автоматизація мереж, прогнозування та управління попитом, інтеграція розподілених енергоресурсів.

Застосування: Використовується для покращення гнучкості, ефективності та надійності розподільчих мереж.

Переваги ADMS:

1. Покращена надійність мережі:

ADMS забезпечує високу надійність електропостачання завдяки автоматизації процесів виявлення та усунення несправностей, що знижує тривалість відключень та мінімізує їх вплив на споживачів.

2. Оптимізація роботи мережі:

Система дозволяє оптимізувати потоки енергії в мережі, що допомагає зменшити втрати електроенергії та покращити ефективність її розподілу.

3. Автоматизація процесів:

ADMS автоматизує багато процесів управління мережею, включаючи переключення живлення та балансування навантаження, що знижує потребу в ручному втручанні і зменшує людські помилки.

Відмитимо, що для всіх варіантів програмного забезпечення використання блокчейну є необхідною складовою.

Терміном створення і розвитку блокчейну можна вважати останне десятеріччя. І такі характеристики блокчейну як децентралізація і гарантування незмінності історії проведених операцій зробили використання блокчейну майже обов’язковим для сучасних складних інформаційних систем.

Як відомо [3], блокчейн являє собою взаємозв’язану мережу вузлів де кожний вузол зберігає весь реєстр інформації пов’язаної з проведенням операцій учасниками блокчейн-мережі.

На сьогодні існує багато блокчейн-протоколів які дозволяють побудувати блокчейн-мережу стосовно конкретної задачі. Відомими є Hyperledger Fabric, Ethereum, Corda, Quorum та ін. Оцінимо доцільність використання деяких із згаданих блокчейн-протоколів.

Hyperledger Fabric відноситься до протоколів з відкритим кодом і є ефективним для створення локальних блокчейн-додатків.

Ethereum являє собою децентралізовану платформу з відкритим кодом. Для комерційного використання є розроблена версія під іменем Ethereum Enterprise.

Corda є також блокчейн-протоколом з відкритим кодом. Орієнтований на використання в установах фінансового сектору.

Особливістю блокчейн-протокола Quorum є його спрямування на використання в приватних блокчейнах, де декілька учасників володіють окремими частинами мережі.

Для вирішення задач впровадження блокчейну в інтелектуальні АСУ ТЕ мережами доцільно використовувати найбільш поширені блокчейн протоколи, зокрема Ethereum Enterprise.

Місце використання блокчейн-протоколу при русі інформаційних потоків в Мікрогрід в циклі обробки даних вказано на рис. 4.

2.2. Визначення вимог до інформаційного і програмного забезпечення (ПЗ) центрального блоку обробки даних та прогнозування (ЦБОДП) системи прийняття рішень інтелектуальної СУ ТЕ енергомережами. Логічна модель даних

Відповідно до загальної функціональної схеми енергосистеми представленої на рис. 1 вхідними даними для ЦБОДП є інформаційні дані щодо кожної локальної енергомережі, або, при наявності технічних можливостей, кожного учасника локальних енергомереж, які необхідні для виконання торгових операцій та контролю безпеки операцій.

Ці дані наведені в таблицях 1 та 2, які відповідають базам даних: БД N_i 1(А) – генератори електроенергії локальної енергомережі N_i, БД N_i 1(Б) – споживачі (покупці) електроенергії локальної енергомережі.

Початкові дані учасників локальних енергомереж формуються покупцями та продавцями. Узагальнені дані передаються Адміністратору ТЕ енергомережі.
Вказані бази даних є основою для формування баз даних наступного рівня: БД N_i - N_j 2. Це бази даних зберігають інформацію щодо можливих (потенційних) смарт контрактів.
Наступним кроком роботи системи управління мережі є формування БД N_i - N_j 3 бази даних оптимальних пропозицій щодо заключення смарт контрактів
Структури всіх вказаних баз даних наведені нижче:

Рис. 5. Структура БД1.

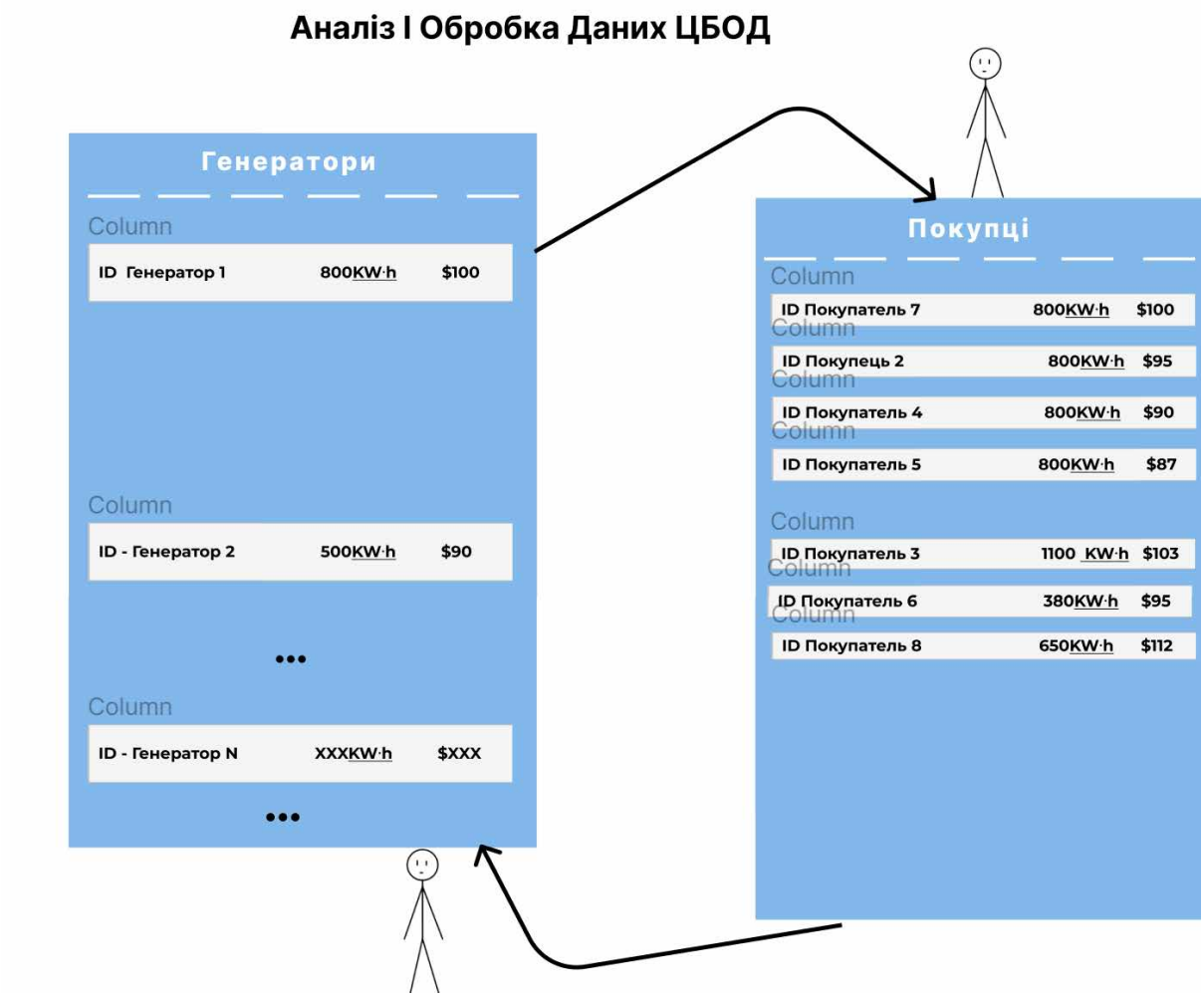


Рис. 6. Структура БД2.

Рис. 7. Структура БД3.

Наведена база даних смарт контрактів учасників Мікрогрід однозначно прив’язана до конкретного моменту часу і зміни у правому рядку є тригером для запуску процессу оновлення інформації щодо наповнення початкових баз даних - пропозицій як генераторів, так і покупців. При цьому, за рішенням смарт системи управління, або Адміністратора системи, може проводитись оновлення інформації щодо стану мережі в цілому, включаючи заповнення блоку зберігання енергії.

Більш детально структура даних щодо учасників Мікрогрід та смарт контрактів приведені на рис. 8.

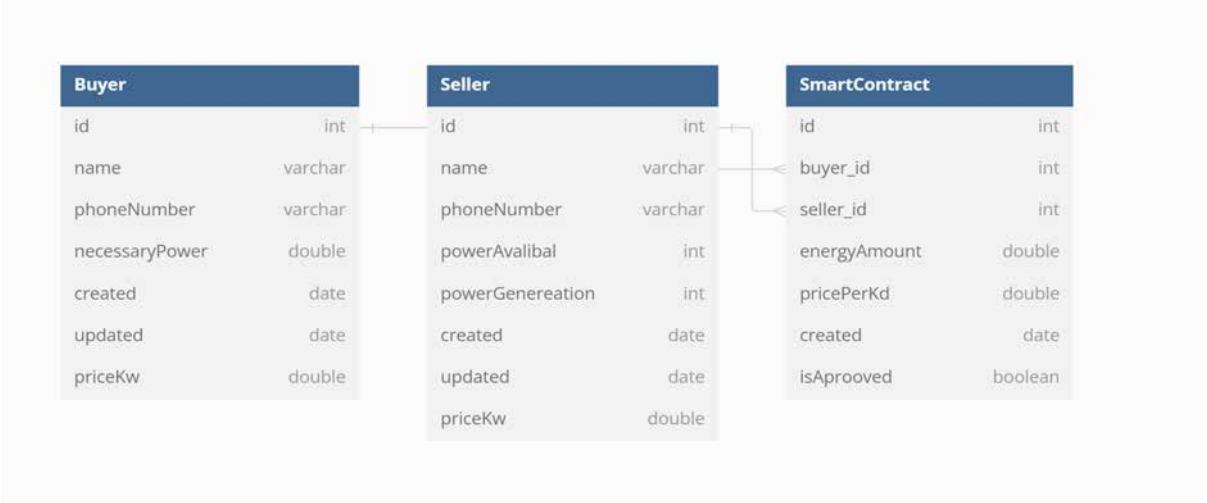


Рис. 8. Структура даних учасників ТЕ енергосистеми необхідних для формування смарт контрактів

Критерії вибору СУБД для інтелектуальної СУ ТЕ енергомережі

Перед вибором системи управління базами даних (СУБД) необхідно визначити основні критерії, за якими буде оцінюватися кожна з можливих систем. До таких критеріїв належать:

Продуктивність: Швидкість обробки запитів до бази даних є критично важливою для забезпечення швидкої взаємодії користувачів з платформою.

Надійність: Система повинна забезпечувати високий рівень надійності та безпеки даних, включаючи можливість резервного копіювання та відновлення.

Масштабованість: СУБД повинна бути здатною масштабуватися відповідно до зростання обсягів даних і навантаження на систему.

Інтеграція: Легкість інтеграції з іншими компонентами системи, такими як фронтенд, бекенд та зовнішні сервіси.

Підтримка: Наявність якісної технічної підтримки та документованих ресурсів для розробників.

Обґрунтування вибору MS SQL Server для системи Мікрогрід

Після аналізу різних варіантів СУБД, таких як MySQL, PostgreSQL, Oracle та MS SQL Server, було обрано MS SQL Server для реалізації інформаційної бази платформи для торгівлі електроенергією в системі Мікрогрід. Основними причинами вибору саме MS SQL Server є наступні:

Висока продуктивність: MS SQL Server забезпечує високу продуктивність при обробці великих обсягів даних та складних запитів. Це особливо важливо для системи Мікрогрід, де швидкість доступу до даних є ключовою для забезпечення ефективної взаємодії між генераторами і споживачами електроенергії.

Надійність і безпека: MS SQL Server надає потужні інструменти для забезпечення надійності та безпеки даних. Це включає можливості для

резервного копіювання та відновлення, а також підтримку шифрування даних і контроль доступу на основі ролей.

Масштабованість: MS SQL Server легко масштабується як вертикально, так і горизонтально, що дозволяє адаптувати систему до зростаючих потреб. Це забезпечує можливість обробки великих обсягів даних і підвищення продуктивності при збільшенні навантаження на систему.

Інтеграція з іншими технологіями Microsoft: MS SQL Server легко інтегрується з іншими продуктами Microsoft, такими як Visual Studio, .NET Framework та Azure. Це забезпечує зручність розробки та розгортання системи, а також спрощує її підтримку.

Підтримка аналітики та BI: MS SQL Server має вбудовані інструменти для аналітики та бізнес-інтелекту (BI), що дозволяють проводити глибокий аналіз даних та генерувати звіти. Це є важливим для прийняття обґрунтованих рішень на основі даних.

Розширюваність: MS SQL Server підтримує розширення функціональності за допомогою збережених процедур, тригерів та індексів. Це дозволяє оптимізувати роботу бази даних та додавати нові функції без значних змін у коді додатка.

Огляд основних можливостей MS SQL Server

MS SQL Server надає широкий спектр можливостей для розробки та адміністрування баз даних. Нижче наведено деякі з ключових функцій, що роблять MS SQL Server оптимальним вибором для системи Мікрогрід:

T-SQL (Transact-SQL): MS SQL Server використовує мову запитів T-SQL, яка розширює стандартний SQL набором додаткових функцій для обробки даних та управління базою даних. T-SQL дозволяє створювати складні запити, збережені процедури та тригери.

SQL Server Management Studio (SSMS): SSMS є інтегрованим середовищем для управління SQL Server, яке надає зручний інтерфейс для адміністрування бази даних, написання запитів, моніторингу продуктивності та виконання резервного копіювання.

Інструменти для забезпечення безпеки: MS SQL Server включає функції для шифрування даних, аудитування дій користувачів, управління ролями та правами доступу, що забезпечує високий рівень безпеки даних.

Резервне копіювання та відновлення: MS SQL Server надає можливості для автоматичного резервного копіювання та відновлення бази даних, що дозволяє мінімізувати ризики втрати даних та забезпечити безперервність роботи системи.

Підтримка кластеризації та реплікації: MS SQL Server підтримує кластеризацію для забезпечення високої доступності та реплікацію даних для підвищення продуктивності та забезпечення резервного копіювання.

Інтеграція з хмарними сервісами: MS SQL Server легко інтегрується з хмарними сервісами Microsoft Azure, що дозволяє використовувати хмарні ресурси для зберігання та обробки даних, а також для забезпечення високої доступності та масштабованості системи.

Інструменти для аналізу даних: MS SQL Server має вбудовані інструменти для аналізу даних, такі як SQL Server Analysis Services (SSAS) та SQL Server Reporting Services (SSRS), що дозволяють проводити детальний аналіз даних та створювати звіти.

В подальшому вибір СУБД для Мікрогрід буде корегуватись у зв’язку з маштабованістю системи.

2.2. Алгоритми обробки даних в ЦБОДП

Після того, як сформована БД N_i 1(А) програмне забезпечення платформи має виконувати обробку вхідної інформації відповідно до наступного алгоритму:

Алгоритм роботи ЦБОДП з базами даних включає наступні кроки:

Перевірка: чи діє заявка.

Якщо ТАК, переходимо далі. Якщо НІ, пропускаємо цього покупця.

Порівнюємо ціну. Якщо ТАК, переходимо до пункту 4, якщо НІ, пропускаємо цього покупця і переходимо до розгляду запита наступного покупця.

**Додатково, в розвиток і продовження досліджень, в наступній версії ПЗ буде виконуватись порівняння діапазону неспівпадання цін генераторів і покупців. Припустиме відхилення має задаватись учасниками мережі, а ранжування припустимих (потенційних) смарт контрактів буде виконуватись сматр системою управління.*

Порівнюємо обсяг. Якщо ТАК, переходимо до пункту 4, якщо НІ, пропускаємо цього покупця і переходимо до розгляду запита наступного покупця.

**При подальшому розвитку програмної платформи планується застосування алгоритмів ШІ з метою вибору оптимальної бізнес-стратегії генераторів, зокрема на вирішення питання: якщо генератор має великій обсяг енергії, то максимізація прибутку буде при продажи її одному чи багатьом покупцям? Як має бути організована взаємодія із сховищем енергії? – та ін.*

В результаті виконання вказаних кроків буде сформовано БД N_i 1(Б), яка зберігає допустимі варіанти торговельних операцій - допустимі комбінації пар покупець-продавець.

Аналізуючи наповнення БД2 вибираємо оптимальні по співпаданню замовлень пари генератор – покупець для укладення смарт-контрактів. Вибрані дані дозволяють сформувати БД3.

Покроковий алгоритм роботи з початковими базами даних (БД N_i 1(А) Генераторів і БД N_i 2(Б) Покупців) має наступний вигляд:

1.1. Обираємо перший запис з БД N_i 1(А) генераторів.

1.2. Порівнюємо його по ціновому показнику з записом першого покупця з БД N_i 2(Б) покупців.

1.3. Якщо є співпадіння або ціна першого покупця вище ціни продавця, то продовжуємо порівняння вибраної пари по наступним параметрам – переходимо до пункту 1.4. Якщо НІ, то переходимо на п. 1.5.

1.4. Виконуємо порівняння першого запису генератора з наступною чаринкою в даних покупця. Якщо є співпадання по цифрам цінових показників, то беремо цю пару і вносимо її в БД2, тобто починаємо формувати БД2.

1.5. Виконуємо порівняння цінового показника першого генератора з показником другого (наступного) покупця.

Повторюємо виконання операцій відносно першого генератора до кінця списку покупців і починаємо аналогічний цикл – продовження формування БД2 - відносно другого генератора.

1.6. Після закінчення формування БД2 виконується вибір пар генератор-покупець з найкращіми для обох сторін показниками. Сукупність цих пар утворює БД3.

Фрагментарно, алгоритм роботи ЦБОДП можна поділити на три етапи. Розглянемо зміст кожного етапу і кожної операції більш детально.

На першому етапі має відбуватись порівняльний аналіз пропозицій виробників та покупців електроенергії. Розроблене програмне забезпечення на першому

кроці перевіряє акутальність пропозицій. На наступному кроці відбувається покрокове порівняння відповідності актуальних (діючих) на поточний час пропозицій учасників по наступним крітеріям (параметрам):

- співпадіння обсягів виставляємої генератором на продаж електроенергії і обсягів, що є потрібними покупцеві;
- співпадіння цін учасників торгів.

В даній роботі встановлено наступне правило (обмеження): ціни обох учасників Мікрогрід (генератора локальної мережі N_i - $Q1(N_i)$ і покупця локальної мережі N_j- $Q2(N_j)$) вважаються співпадаючими, якщо різниця **ε** складає меньше L відсотків, тобто

$$\left| Q1\,(N_i) \right| - \left| Q2\,(N_j) \right| < \varepsilon = \max\{Q1, Q2\} * L \qquad (1)$$

Величина **ε** задається Адміністратором мережі після обговорення з учасниками. Принципово значення **ε** може бути індивідуальним для кожного учасника енергомережі. В даній роботі будемо вважати, що значення **ε** є однаковим для всіх генераторів і покупців. Наступним кроком є перевірка пар генератор-покупець із співпаючими цінами по першому крітерію на співпадіння (відповідність) по другому критерію.

Знаходження пар генератор-покупець із співпадінням по обох критеріях дозволяє сформувати базу даних 2 – тобто БД можливих (потенційних) учасників смарт-контрактів.

Метою виконання першого етапу є формування бази даних можливих торговельних операцій.

Метою третього етапу є формування оптимальних заявок для заключення смартконтрактів між учасниками мережі.

Приведений вище алгоритм роботи ЦБОДП з базами даних може бути програмно реалізован двома варіантами:

а) шляхом формування структурованого простору даних: сукупності баз даних – зокрема трьох окремих баз даних, перша з яких складається з двох незалежних частин (по генераторам і по покупцям) і формується на основі даних що надходять від учасників мережі, а друга і третя бази даних послідовно формуються в процесі роботи програми у відповідності з алгоритмом;

б) шляхом побудови єдиної бази даних .

Порівняльний аналіз обох варіантів привів до висновку про переваги використання структурованого простору даних. В першу чергу це пов’язано з проблемою масштабування і, відповідно, швидкодії системи управління. Більш детальний розгляд питання вибору архітектури ПЗ розглянуто в розділі 4.

Висновки до розділу 2

Вибір MS SQL Server як системи управління базами даних для системи управління ТЕ енергомережею є обґрунтованим та оптимальним рішенням з огляду на високу продуктивність, надійність, масштабованість та підтримку аналітичних інструментів. MS SQL Server забезпечує всі необхідні можливості для ефективного управління даними, їх безпеки та швидкого доступу до них. Інтеграція з іншими продуктами Microsoft, підтримка хмарних сервісів та по

В чинному розділі було розглянуто процедуру аналізу вхідних даних. Проведено детальний аналіз вхідних даних від генераторів та споживачів електроенергії, що необхідні для виконання торгових операцій.

Дані були структуровані у бази даних: БД1 N_i (А) для генераторів та БД2 N_j (Б) для споживачів як на рівні локальних енергомереж, так і на рівні інтегрованої БД енергосистеми.

Було розглянуто алгоритми обробки даних. З урахування проведеного аналізу розроблено алгоритм обробки вхідної інформації, що включає

- перевірку актуальності заявок від учасників нергомереж,

- порівняння представлених цін і заявлених обсягів електроенергії,

- формування бази даних потенційних учасників смарт-контрактів (БД2),

- вибір оптимальних пар для укладення смарт-контрактів (БД3) і взіємодії

Адміністратора з ними,

- внесення оновлень (змін) до БД по наявним обсягам енергії і заявок на її придбання відповідно до результатів викликаних підписанням і виконанням смарт-контрактів.

3. Формування нейромережевих моделей для управління ТЕ енергомережами

3.1. Формування нейромережевих моделей для управління ТЕ енергомережами

Серед нових напрямів у сегменті інформаційних технологій що можуть бути використані при створенні систем управління енергосистемами, відзначимо наступні два, які останнім часом отримали інтенсивний розвиток: нейромережі та блокчейн техології. У відомих нам роботах дані напрями розвивалися незалежно, зосереджуючись на кожному колі завдань і розробці рішень проблем реалізації. Особливості функціонування енергомереж потребують одночасне використання обох напрямків для вирішення задач управління. Використання комбінації вищезазначених технологій спрямоване на отримання нової якості рішень задач управління та рівня роботи систем підтримки прийняття рішень в управлінні енергосистемами. Відмітимо, що кінцевим завданням використання нейромережевих моделей в АСУ енегетикі є формування управляючих впливів які дозволять досягати необхідного оптимуму і визначальних напрямок динаміки процесів енергопостачання.

В даний час блокчейн технології знаходять все більш широке застосування в різних сферах індустрії та бізнесу [1-4], що призводить до потреби розвитку різних модифікацій блокчена, які повніше враховують специфіку розв'язуваних завдань. Одним із таких актуальних напрямів модифікацій є технологія реверсного блокчейну [5,6]. Дана технологія в першу чергу орієнтована на пошук оптимальних рішень задач управління для складних технічних та економічних систем, що оперують великими даними, а також в аналітичних системах підтримки прийняття рішень, коли час на прийняття рішень обмежений. Деякі питання практичного застосування даної

технології, так само як і сам термін, були, наскільки нам відомо, у перші представлені та розглянуті в роботах [5,6] без викладу загального алгоритму та методики його застосування для вирішення завдань управління при використанні нейромереж. Метою застосування вказаних технологій вирішення завдань управління складними динамічними системами та технологічними процесами при використанні нейромережевих моделей.

Ідеєю технології зворотного блокчейну та завданням відповідного алгоритму є підвищення швидкодії системи управління за рахунок кластеризації вихідної бази даних блокчейну та скорочення звернень при виборі оптимальних керуючих впливів [29]. Представлений у [29] загальний опис технології зворотнього блокчейну на базі нейромережевих моделей у чинному диплому проекті адаптується до вирішення конкретної задачі створення торгової платформи трансакційними енергомережами. У розглянутому рішенні задачі оптимального управління технологія зворотного блокчейна використовується як елемент пошуку рішення, що звужує зону пошуку. Тим самим підвищується швидкодія нейромережної моделі та скорочується час її навчання.

Перед поданням алгоритму використання технології реверсного блокчейну для управління ТЕ енергомережею відзначимо базовий етап даної технології: протягом усього часу роботи інтелектуальна система управління в моменти часу ti – тобто моменти, коли обчислюються та вводяться в дію керуючі параметри – формує файли обмеженого об'єму, що містять інформацію, що описує відповідність множині вхідних сигналів, керуючих впливів і вихідних сигналів нейромережевої моделі. Безліч зазначених файлів, що містять три зазначені блоки (B1 B2, B3) формує деяке сховище даних П(t) = U (B1, B2, B3, t) яке є базою знань для системи управління та нейромережі. Таким чином відмінною особливістю структури бази даних реверсного блокчейна є наявність двох сегментів: кластер множини маркерів і безпосередньо база даних блокчейна.

Далі будемо вважати, що для опису процесу (об'єкта) використовується нейромережа, що має l прихованих шарів, містить безліч вхідних сигналів

Y(y1,y2,...yN), безліч вихідних сигналів Z(z1,z2, …, zM) останнього шару, підключених до останнього (завершального) нейрона мережі.

З урахуванням виконання базового етапу алгоритм роботи нейромережевої інтелектуальної системи управління з використанням технології зворотного блокчейна полягає в наступному:

1. У відповідності з нейромережевою моделлю досліджуваного об'єкта формуємо матрицю коваріацій, яка позначається далі cov(A1) і описує кореляцію вхідних параметрів y(y1,…yk) та вихідних сигналів z(z1,…,zn) нейронів останнього (підключеного до вихідного нейрона) шару:

$$cov(A1) = \begin{matrix} cov(y1,y1) & cov(y1,y2) \ldots\ldots cov(y1,z1) \ldots\ldots cov(y1,zM) \\ cov(y2,y1) & cov(y2,y2) \ldots\ldots cov(y2,z1) \ldots\ldots cov(y2,zM) \\ \ldots\ldots & \\ cov(zM,y1) & cov(zM,y2) \ldots\ldots \ldots\ldots\ldots\ldots cov(zM,zM) \end{matrix}$$

Структурна схема нейромережі наведена на рис. 9.

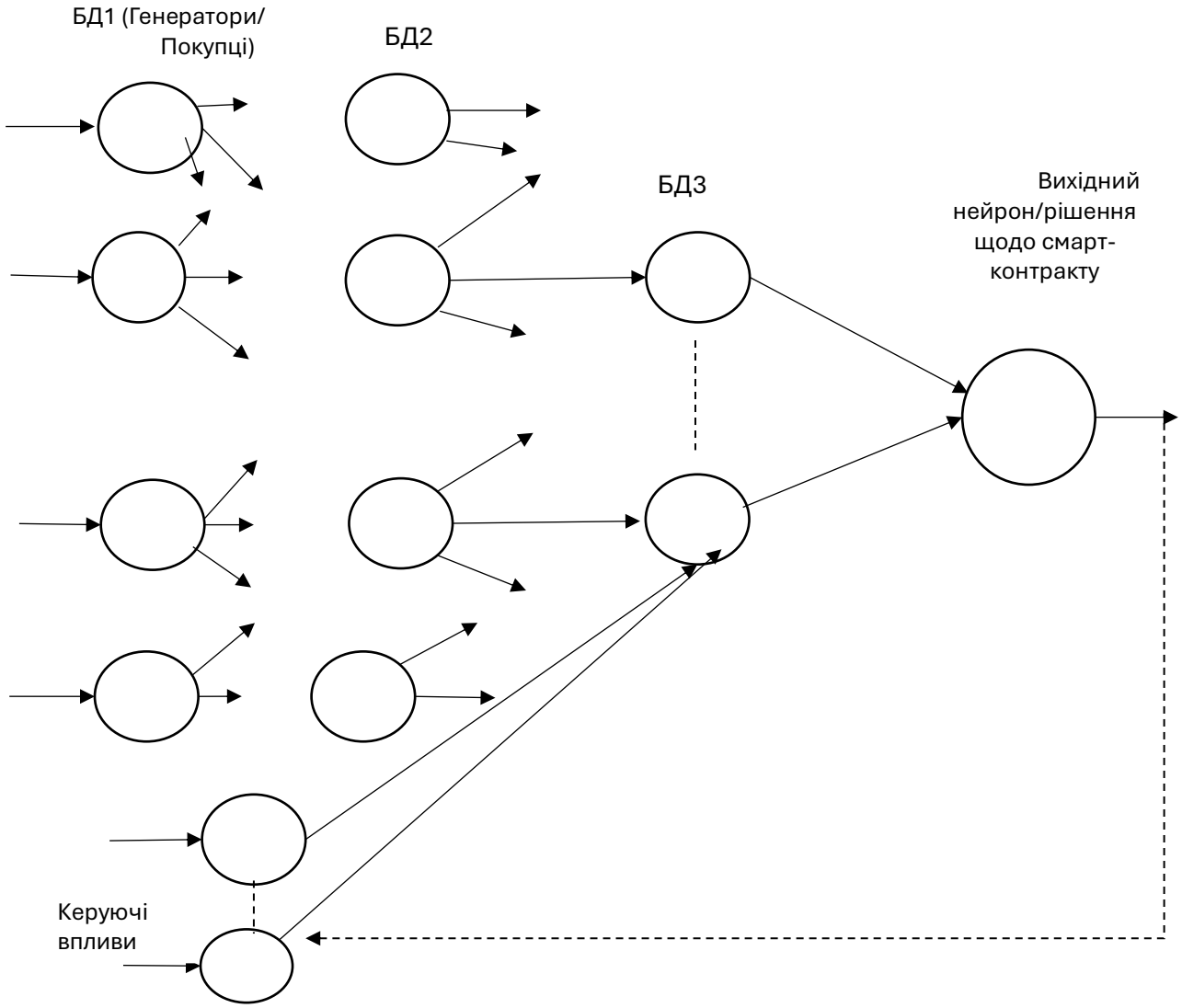


Рис. 9. Структурна схема навигаційно-керуючої нейромережі

2. Виділяючи в матриці (1) субматрицю, що відноситься до змінних z і формуючи систему диференціальних рівнянь у просторі станів, запишемо

$$dZ/dt = cov(A)*z + B*\upsilon + D$$

$$X = C * z$$

де z - n-вимірний вектор станів, υ - m-вимірний вектор управлінь, x - l-вимірний вектор спостережень, а B, C - матриці відповідних розмірностей, елементи яких в загальному випадку можуть залежати від часу. Складова D визначається користувачем виходячи зі статистичних даних або попереднього досвіду.

Особливістю формування рівняння (2) є таке: вектор змінних включає лише сигнали z нейронів вихідного шару, а параметри у розглядаються як вільні члени рівнянь. Таким чином, коварійна матриця системи (2) матиме вигляд:

$$\text{cov}(A) = \begin{matrix} \text{cov}(z1,z1)\ \text{cov}(z1,z2)\ \ldots\ldots\ldots\ \text{cov}(z1,zM) \\ \text{cov}(z2,z1)\ \text{cov}(z2,z2)\ \ldots\ldots\ldots\ \text{cov}(z2,zM) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \text{cov}\ (zM, z1)\ \text{cov}\ (zM, z2)\ \ldots\ldots\ \text{cov}\ (zM, zM) \end{matrix}$$

3. Виконується розрахунок системи (2) і формується прогноз та проводиться аналіз зміни змінних при різних значеннях керуючих впливів. Формується інформаційний блок Acост.t1 містить набір даних необхідних для наступних (реверсних) звернень: стан випадкових зовнішніх впливів, значення параметрів, що управляють, отриманий результат і міра його близькості до оптимального очікуваного результату.

4. користувач визначає формулу деякого інтегрованого показника враховує основні дані стану об'єкта і параметрів зовнішнього середовища, що істотно впливають на наступну динаміку об'єкта. Вибір компонентів і параметрів, що вибираються для включення в χ визначається користувачем.

3. обчислюється значення $\chi 1$ для Acост.t1 використовуючи інформацію щодо стану об'єкта управління, сукупності зовнішніх впливів та параметрів на даний час t1.

4. використовуючи сховище даних П(t,Bi) проводиться пошук ситуацій, коли стан об'єкта та зовнішніх параметрів дають значення інтегрованих показників χj близькі до $\chi 1$ Acост.t1. Тим самим формується деяка множина П(Acост.ti) для елементів якого виконуються співвідношення

$$\| \chi j - \chi 1 \| \leq \varepsilon \ (J = k,n)$$

де ‖ · ‖ - норма, що задається користувачем, а ε - деякий параметр, k…n – індекси елементів множини П(Асост.ti). Прийнятний ступінь збігу елементів множини П(Асост.ti) з елементами інформаційного блоку поточного стану Асост.t1 визначається користувачем.

5. вибираються управління υi, які були використані для елементів з множини П(Асост.ti) і дали позитивний результат і таким чином формується відповідна множина раніше обчислених та застосованих управлінських рішень Ф(υi);

6. Використовуючи рівняння (2) і задаючи в якості керуючих впливів значення безлічі управлінь Ф(υi), сформованого в п.6, визначаємо динаміку змін змінних вектора x.

7. формується безліч результатів розрахунків нейромережевої моделі при використанні елементів множини Ф(υi).

8. Використовуючи нейромережевий аналіз [7-9] проводиться вибірка кореляції змін керуючих впливів (комбінацій керуючих параметрів) на конкретні змінні вихідного шару та реакцію завершального нейрона. Завданням нейромережевого аналізу в цьому випадку є визначення які керуючі впливу і якою мірою можуть бути змінені для отримання оптимальних прогнозів динаміки об'єму, що досліджується.

9. використовуючи нейромережну модель оцінюємо отриманий результат стосовно оптимального цільового значення.

10. послідовно оцінюється збіг результатів використаного раніше набору керуючих рішень порівняно з результатом, що задається цільовою функцією для Асост.t1;

11. алгоритм зупиняється, якщо отримані при використанні деякого, вибраного з множини П(υi), управління υg забезпечує результати прогнозу динаміки об'єкта які збігаються з значенням цільової функції для Асост.t1. У

цьому випадку керування υ вважається обраним і підлягає реалізації смарт-системою керування.

12. якщо елементи множини П(υі) не забезпечують досягнення необхідної мети, то вибираються елементи множини П(υі) які дають найближчі результати до оптимального значення цільової функції і виконується цикл прогнозних розрахунків.

Даний алгоритм спрямований на вирішення завдань аналізу та управління систем змушених працювати з великими даними, динаміка яких залежить від великої кількості різних параметрів. Прогнозування динаміки таких систем пов'язане з необхідністю великого перебору різних комбінацій параметрів об'єкта, випадкових впливів та управлінських рішень, що може вимагати надто багато часу навіть для обчислювальних систем високої продуктивності. Переваги даного алгоритму, заснованого на використанні технології реверсного блокчейну, полягає в скороченні часу на формування комплексу управлінських рішень, що має важливе значення для енергетичних систем, коли час прийняття управлінських рішень обмежений. Як видно з аналізу вищенаведеного алгоритму, технологія зворотного блокчейна використовує бази даних блокчейн як основу для формування кластерів аналогічних і квазіаналогічних ситуацій. Тим самим використання технології реверсного блокчейну «всередині» нейромережевої моделі дозволяє підвищити робастність та швидкодію нейромережевих систем управління, знижуючи вплив помилок людського фактора.

Формування розширених результатів нейромережевого аналізу дозволить зрозуміти які керуючі впливи і якою мірою впливають вихідні параметри z. Дана інформація дозволить при пошуку варіантів вибору керуючих впливів для коригування динаміки виключити розгляд ряд зв'язків між нейронами, що задають керуючі вихідні сигнали і нейронами прихованих шарів, що залежать від зовнішніх незалежних факторів. Виключення зв'язків з практично нульовими ваговими коефіцінтами дозволить знизити вхідне навантаження на

ряд нейронів прихованих шарів і зменшити обсяг обчислень нейромережевого аналізу, пов'язаного з подальшим вибором впливів, що управляють.

Таким чином, змінюючи керуючі впливу система управління використовуючи нейромережеву модель має можливість оцінювати зміну змінних для досягнення оптимуму, що шукається.

Вибір конкретних рішень щодо впровадження отримання результатів, відповідно до наведеного вище алгоритму технології реверсного блокчейну в АСУ ТЕ енергомережі, визначається користувачем при його програмній реалізації і порівнянні пропонованих рішень на поточний момент з рішеннями, що зберігаються в базі даних блокчейн.

Висновки до розділу 3.

Комбінація використання двох технологій – блокчейну і нейромереж – в системах управління трансакційними енергомережами виправдана оскільки дозволить підвищити якість управління. Зокрема, це пов’язано з такими особливостями роботи ТЕ енергосистем як періодичність графіків навантажень споживачів, циклічність роботи генераторів відновлювальної енергії, критичність точності і коректності фінансових розрахунків між учасниками енергосистеми, критичну важливість для споживачів забезпечення стійкої роботи енергосистеми. При цьому використання нейромереж дозволяє більш точно прораховувати наслідки управлінських рішень і, віповідно, уникати

енергетичного дисбалансу, а блокчейн підвищує надійність операцій купівлі-продажу енергії.

Для реалізації запропонованого підходу розроблено алгоритм вирішення завдань управління при використанні навігаційно-керуючих нейромережевих моделей та бази блокчейн. Викладено алгоритм реалізації технології реверсного блокчейну. Запропоновано підхід щодо ідентифікації матриці коваріацій нейромережевої моделі як системи диференціальних рівнянь з керуючими впливами та використання рішення даної системи для прогнозування. Показано, що представлений алгоритм забезпечує скорочення обсягу обчислювальних операцій під час роботи з багатопараметричними об'єктами та системами.

4. Розробка ПЗ ЦБОДП і порівняльний аналіз можливих рішень.

4.1. Порівняльний аналіз архітектурних рішень БД блоку підтримки прийняття рішень в АСУ ТЕ енегомережам

При розробці ПЗ ЦБОДП розглядались два сценарії (дві архітектури) організації БД.

Перший сценарій передбачає створення єдиної БД в якій будуть розміщені всі дані по генераторам енергії і споживачам, а також будуть

вноситись і зберігатись дані щодо проведення операцій купівлі-продажу електроенергії.

Другий сценарій передбачає структуризація простору даних шляхом формування декількох окремих БД. Ці бази даних будуть формуватися послідовно в процесі аналізу і опрацювання вихідної БД і зберігати дані окремо одна від одної.

Дане рішення є більш захищеним у разі кібератак і дозволяє працювати окремо з базами даних меншого розміру. Відповідно час реакції і швидкодія системи управління можуть бути підвищена у порівнянні з першим сценарієм.

Недоліком першого рішення є більший час роботи з БД та більш високий рівень вразливості системи управління в цілому.

Таким чином другий сценарій є переважними по параметрам більшої стійкості до кібератак і швидкодії.

Розглянемо переваги та недоліки обох сценарієв білшь детально.

Перший сценарій: Єдина база даних

Перший сценарій передбачає створення єдиної бази даних, яка містить всі дані про генератори енергії, споживачів та операції купівлі-продажу електроенергії.

Переваги:

Цілісність даних: Всі дані зберігаються в одному місці, що спрощує їх узгодження та забезпечує цілісність.

Простота управління: Адміністрування однієї бази даних є менш складним завданням порівняно з управлінням кількома базами даних.

Недоліки:

Продуктивність: Збільшення обсягу даних призводить до зниження швидкодії системи через більший час обробки запитів.

Вразливість: Єдина база даних є більш вразливою до кібератак, оскільки компрометація цієї бази може призвести до витоку всіх даних системи.

Другий сценарій: Розділені бази даних

Другий сценарій передбачає структуризацію даних шляхом створення кількох окремих баз даних. Ці бази даних формуються послідовно в процесі аналізу і обробки вихідної бази даних, зберігаючи дані окремо одна від одної.

Переваги:

Підвищена безпека: Окремі бази даних зменшують ризик втрати всіх даних у разі кібератаки, оскільки компрометація однієї бази не впливає на інші.

Покращена продуктивність: Працюючи з меншими обсягами даних, система може швидше обробляти запити, що підвищує загальну швидкодію.

Недоліки:

Складність управління: Керування кількома базами даних є більш складним завданням, що може вимагати додаткових ресурсів і зусиль.

Можливі проблеми узгодженості: Дані, що зберігаються в різних базах, можуть потребувати додаткових механізмів для забезпечення їх узгодженості.

Вибір оптимальної архітектури ПЗ.

Розглянемо можливі сценарії побудови архітектури програмного забезпечення.

Перший сценарій: єдина база даних. В цій базі даних буде зберігатися інформація по всіх учасниках енергомережі, по параметрам мережі і т.д.

Переваги:

Цілісність даних: Всі дані зберігаються в одному місці, що спрощує їх узгодження та забезпечує цілісність.

Простота управління: Адміністрування однієї бази даних є менш складним завданням.

Недоліки по наступним характеристикам:

Продуктивність: Збільшення обсягу даних призводить до зниження швидкодії системи через більший час обробки запитів.

Вразливість: Єдина база даних є більш вразливою до кібератак.

Другий сценарій: структурований простір даних.

Переваги:

Підвищена безпека: Окремі бази даних зменшують ризик втрати всіх даних у разі кібератаки.

Покращена продуктивність: Працюючи з меншими обсягами даних, система може швидше обробляти запити.

Недоліки:

Складність управління: Керування кількома базами даних є більш складним завданням.

Можливі проблеми узгодженості: Дані, що зберігаються в різних базах, можуть потребувати додаткових механізмів для забезпечення їх узгодженості.

Враховуючи вищеописані переваги та недоліки, для розробки програмної платформи ТЕ мережі було обрано другий сценарій з розділеними базами даних. Це рішення базується на таких аргументах:

Більша стійкість до кібератак: Розділені бази даних знижують ризик повної компрометації системи в разі атаки на одну з баз.

Покращена швидкодія: Окремі бази даних меншого розміру дозволяють швидше обробляти запити, що покращує загальну продуктивність системи.

Особливості розроблюваної програмної платформи:

Щодо використання блокчейн-технології: Блокчейн застосовується лише для даних, пов’язаних з функціонуванням Мікрогрід, і не розповсюджується на дані зовнішніх мереж.

Данні щодо прогнозів виробництва і придбання електроенергії: Прогнозні дані не розраховуються ЦБОДП, але в майбутніх версіях вони будуть зберігатися як допоміжна інформація для прийняття рішень.

Період оновлення стану мережі: Визначається смарт-системою управління та запускається після кожного підписання нових смарт контрактів.

Відмітимо обмеження які відносяться до особливостей розробляємої програмної платформи і були враховані при її створенні:

1. блокчейн-технологія застосовується лише для даних пов’язаних з функціонуванням енергомереж і не розповсюджується на данні зовнішніх мереж, що співпрацюють з чинною мережею;
2. данні щодо прогнозів виробництва і придбання електроенергії не розраховуються ЦБОДП і не заносяться до вихідної (початкової) БД. В наступній версії програмної платформи прогнозні дані, також вважаються отриманими зовні (від інших блоків системи управління), але вже будуть заноситись до вихідної БД як допоміжна інформація для прийняття рішень учасниками мережі;
3. період оновлення стану мережі визначається смарт-системою управління, але запускається після кожного підписання нових смарт контрактів.

З урахуванням вищеозначеного, програмне забезпечення для ЦБОДП було розроблено для другого сценарію (другої архітектури) на основі виконання вищеописаних алгоритмів і виконано на мові програмування Java.

Для зберігання та керування даними використовується база даних SQL Server.

При розробці програмного забезпечення ЦБОДП ТЕ енергомережі було дотримане наступне положення [12]:

локальна енергомережа, яка входить до складу трансактивної енергосистеми, має бути в енергетичному балансі, що означає що сума споживаної потужності навантаження $P_{loadi}(t)$ повинна дорівнювати сумі потужності всіх розосереджених джерел $P_{PVi}(t)$, систем зберігання енергії $P_{ESSi}(t)$ та потужності гарантованих джерел живлення $P_{Gi}(t)$.

Тобто, будемо вважати, що енергетичний баланс створений і запишемо умову енергетичного балансу у вигляді наступного рівняння:

$$\sum_{i=1}^{n} P_{Gi}(t) + \sum_{i=1}^{k} P_{PVi}(t) + \sum_{i=1}^{o} P_{ESSi}(t) = \sum_{i=1}^{m} P_{loadi}(t) \qquad (3)$$

При цьому для стабільної роботи на кожен елемент накладаються обмеження, які включають верхню та нижню межі:

$$\begin{aligned} P_{G\min} \le P_G \le P_{G\max} \\ P_{\mathrm{ESS}\min} \le P_{ESS} \le P_{\mathrm{ESS}\max} \end{aligned} \qquad (4)$$

Обмеження (4) враховуються програмним забезпеченням і дозволяють уникнути помилок при формуванні баз даних як генераторів, так і споживачів.

Перевірку роботи програми було проведено на прикладі мережі Мікрогрід [12], функціонування якої розглядалось у випадках оптимізованого і неоптимізованого управління.

Розрахунки проводились для Мікрогрід що включала два джерела гарантованого живлення DG1, DG2, сонячний генератор PV, системи зберігання енергії B і навантаження. Структура даної енергомережі приведена на рис. 9 [12].

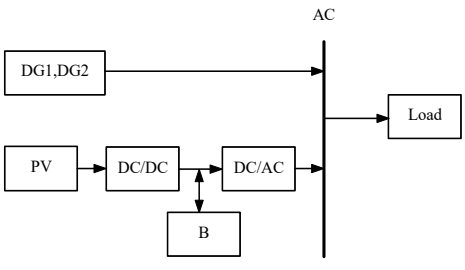


Рис. 9. Структурна схема Мікрогрід.

Результаті наведені в [12] показали переваги оптимізованого управління, що, в свою чергу потребує використання ПЗ ЦБОД, яке є метою дипломної роботи.

Зокрема, на рис. 10 [12] наведено графік розподілу потужностей по елементам Мікрогрід.

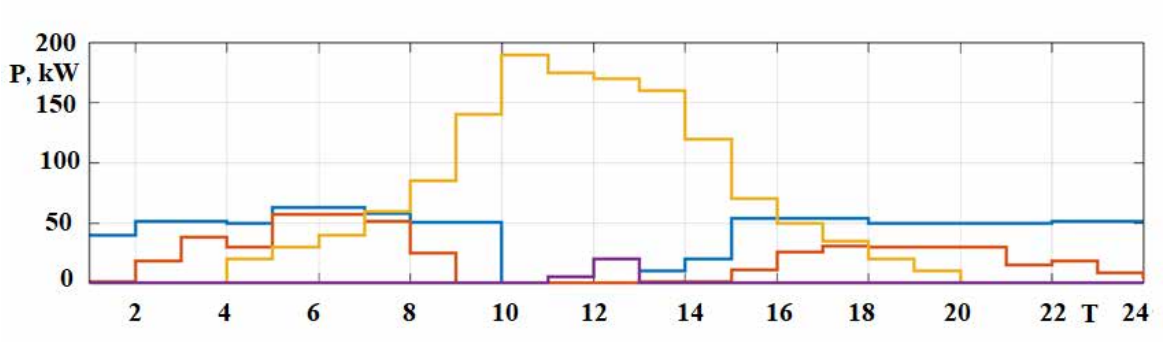


Рис. 10. Розподіл потужностей по елементам системи
Червона лінія потужність DG1, Синя лінія потужність DG2, Жовта – сонячний генератор
Фіолетова – потужність системи зберігання

Зміни в розподілу навантаження, приведені на рис. 10 у більшості випадків можна вважати пов’язаними з підписанням смарт контрактів і призводять до змін у базах даних учасників Мікрогрід. При цьому смарт система управління мережею має внести відповідні зміни до значень управляючих параметрів

Розроблене в дипломній роботі ПЗ, працюючи як додатковий блок системи управління Мікрогрід, надає можливість її гарантованої стійкої роботи в частині своєчасного оновлення інформації після підписання і виконання смарт контрактів.

Проведені модельні есперименти по взаємодії інтелектуальної АСУ ТЕ енергосистеми з розробленим ПЗ ЦБОДП показали відповідність отриманих у дипломній роботі результатів вимогам реально діючої інтелектуальної системи управління ТЕ енергосистеми.

Окремим питанням в забезпеченні стійкої роботи енегосистеми є управління сховищем енергії. Стратегії змінення навантаження допомагають

Адміністраторам системи комплексно координувати локальні електроенергетичні системи. Крім того, процеси моніторингу, вимірювання та верифікації необхідні для реалізації програм реагування на ринках електроенергії.

Запропонована модель взаємодії Адміністратора системи та окремих груп споживачів фокусується на мінімізації вартості електроенргії для окремих груп споживачів.

Загальна мета агрегатора максимізація своєї вигоди на ринку енергії на добу наперед. Агрегатор отримує прибуток, пропонучі та продаючі стратегію реагування на попит на локальному енергетичному ринку і оплачуючи учасникам програм реагування за погодинне/добове змінення навантаження. Стимулом для агрегування є різниця між цінами програм реагування у контрактах зі споживачами та погодинними ринковими цінами електроенергії.

Цільова функція агрегатора в локальних електроенергетичних системах максимізується наступним чином з урахуванням стратегії змінення навантаження [5]:

$$\sum_{t \in N_T} \left[\rho_t LR_t - CLR_t \right] \to \max \qquad (1)$$

де t – діапазон часу наступного дня, що дорівнює 24, ρ – ринкова ціна, LR – зміна навантаження за програмою реагування на попит , CLR – вартість цієї зміни.

У нашому випадку метою для окремого споживача є мінімізація загальних щоденних витрат на купівлю електроенергії з мережі. Тобто цільова функція окремого споживача є мінімізація вартості електричної енергії:

$$T_n = f(P_n, \mathrm{t}) \to \min \qquad (2)$$

де T_n – вартість електричної енергії окремого споживача, P_n – потужність окремого споживача, t інтервал часу доби.

Запропонована економічна модель моделює програму реагування на попит на основі динамічної тарифікації [6]. Ціна електроенергії змінюється залежно від часу споживання енергії.

Оцінка економічної ефективності впровадження програм реагування на попит проводиться за наступними показниками:

$$k_T = \frac{T - T^{/}}{T} 100\%, \quad k_C = \frac{C - C^{/}}{C} 100\%, \tag{3}$$

де k_T коефіцієнт змінення загальної вартості, k_C – коефіцієнт змінення вартості на 1 КВт, $C^{/}$ – вартість за 1 кВт електричної енергії після впровадження програми реагування на попит, $T^{/}$ – вартість загальної споживаної електричної енергії після впровадження реагування на попит.

Окремі групи споживачів можуть використати дві різні реакції на програми:

- зменшення споживання електроенергії в години пік без будь-якого переходу до іншого часу

- перенесення споживання електроенергії з пікових годин на інші години.

За розробленою програмою прогнозованого розподілу потужностей по джерелам та розрахунку вартості електроенергії отримані результати які є основою при впроваджені програм реагування на попит.

У запропонованій трансактивній енергетичній системи Адміністратор пропонує споживачам змістити свої навантаження у часі без зниження середнього навантаження, для використання більш дешевої енергії для окремих типів споживачів, тобто споживач перенесе частину свого споживання з годин з високими цінами на години з нижчими цінами.

Рисунок, що наведено нижче демонструє порівняння потужностей кластерів споживачів до впровадження Адміністратором програми керування попитом та після. Перенесення навантаження відбувалась з урахування інтересів кластерів та типів навантажень в них які переносились.

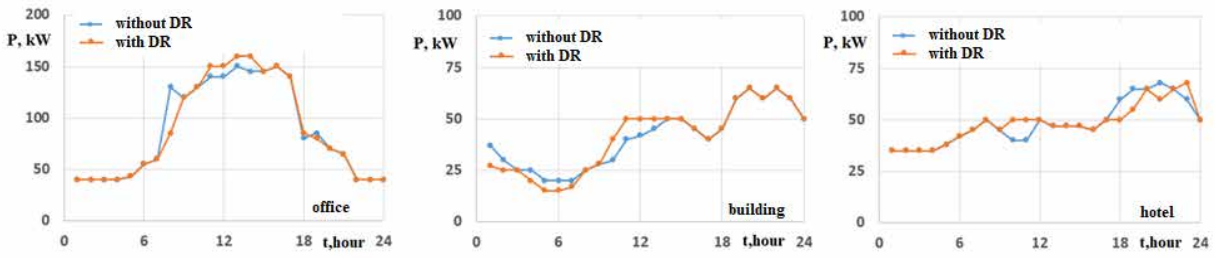


Рисунок 2. Порівняння добової потужності навантаження

Дослідження та результати моделювання показують, що запропоновані принципи побудови транзактивної системи при об'єднані споживачів у кластери ефективно реалізують інтереси споживачів щодо планування навантажень та використанню відновлювальних джерел з мінімізацією вартості електроенергії.

Розрахунки проведені в Інституті енергетики НАН України показали, що для локальної електроенергетичної системи використання програм керування попитом дають змогу знизити вартість електроенергії за 1 кВт год до 3% та зниження загальних витрат на електроенергії окремого споживача до 7%.

4.2Лістінг програми обробки даних

Клас Buyer:

```
package com.khylenko.diplom.model;

import jakarta.persistence.*;
import org.hibernate.annotations.CreationTimestamp;
import org.hibernate.annotations.UpdateTimestamp;

import java.time.LocalDate;
@Entity

public class Buyer {
    @Id
    @GeneratedValue(strategy = GenerationType.IDENTITY)
```

```
    private int id;
    @Column(unique = true)
    private String  name;
    @Column(unique = true)
    private String phoneNumber;
    private Double necessaryPower;
    @CreationTimestamp
    private LocalDate created;
    @UpdateTimestamp
    private LocalDate updated;
    private double priceKw;

    public int getId() {
        return id;
    }

    public void setId(int id) {
        this.id = id;
    }

    public double getPriceKw() {
        return priceKw;
    }

    public void setPriceKw(double priceKw) {
        this.priceKw = priceKw;
    }

    public String getName() {
        return name;
    }

    public void setName(String name) {
        this.name = name;
    }

    public String getPhoneNumber() {
        return phoneNumber;
    }

    public void setPhoneNumber(String phoneNumber) {
        this.phoneNumber = phoneNumber;
    }

    public Double getNecessaryPower() {
        return necessaryPower;
    }

    public void setNecessaryPower(Double necessaryPower) {
        this.necessaryPower = necessaryPower;
    }

    public LocalDate getCreated() {
        return created;
    }

    public void setCreated(LocalDate created) {
        this.created = created;
    }

    public LocalDate getUpdated() {
        return updated;
    }
```

```
    public void setUpdated(LocalDate updated) {
        this.updated = updated;
    }


```

Клас Seller:

```
package com.khylenko.diplom.model;

import jakarta.persistence.*;
import org.hibernate.annotations.CreationTimestamp;
import org.hibernate.annotations.UpdateTimestamp;

import java.time.LocalDate;
@Entity

public class Seller {
    @Id
    @GeneratedValue(strategy = GenerationType.IDENTITY)
    private int id;
    @Column(unique = true)
```

```
    private String  name;
    @Column(unique = true)
    private String phoneNumber;
    private double powerAvalibal;
    private int powerGenereation;
    @CreationTimestamp
    private LocalDate created;
    @UpdateTimestamp
    private LocalDate updated;
    private double priceKw;

    public int getId() {
        return id;
    }

    public double getPriceKw() {
        return priceKw;
    }

    public void setPriceKw(double priceKw) {
        this.priceKw = priceKw;
    }

    public void setId(int id) {
        this.id = id;
    }

    public String getName() {
        return name;
    }

    public void setName(String name) {
        this.name = name;
    }

    public String getPhoneNumber() {
        return phoneNumber;
    }

    public void setPhoneNumber(String phoneNumber) {
        this.phoneNumber = phoneNumber;
    }

    public double getPowerAvalibal() {
        return powerAvalibal;
    }

    public void setPowerAvalibal(double powerAvalibal) {
        this.powerAvalibal = powerAvalibal;
    }

    public int getPowerGenereation() {
        return powerGenereation;
    }

    public void setPowerGenereation(int powerGenereation) {
        this.powerGenereation = powerGenereation;
    }

    public LocalDate getCreated() {
        return created;
    }
```

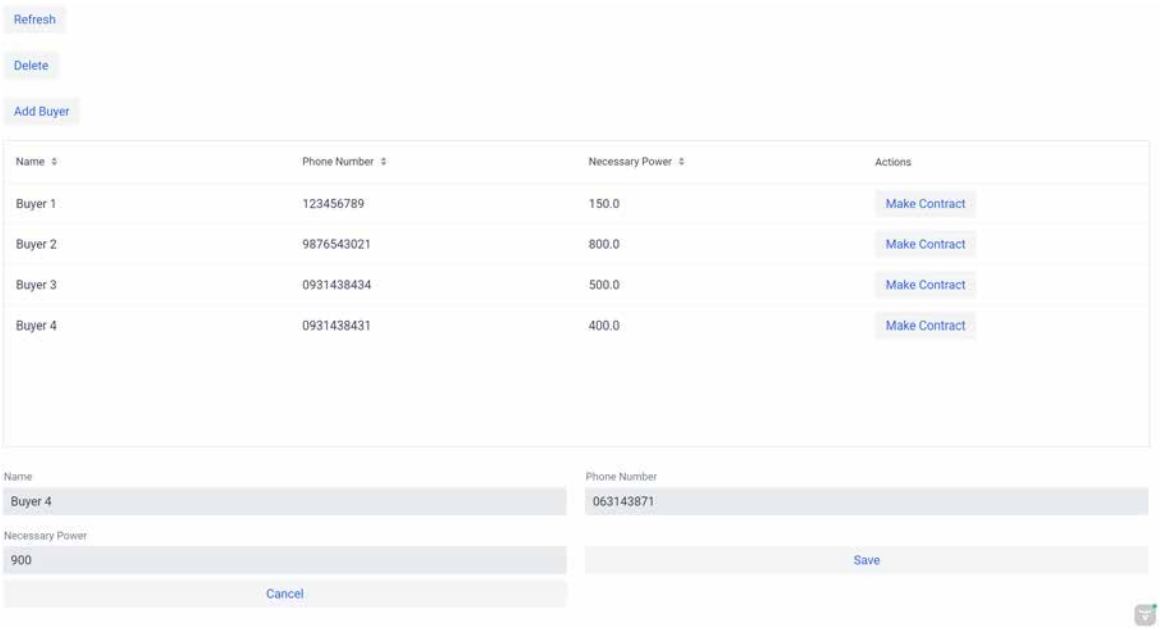
```
    public void setCreated(LocalDate created) {
        this.created = created;
    }

    public LocalDate getUpdated() {
        return updated;
    }

    public void setUpdated(LocalDate updated) {
        this.updated = updated;
    }
    public void reduceEnergy(Double amount){
        this.powerAvalibal-=amount;
    }
```

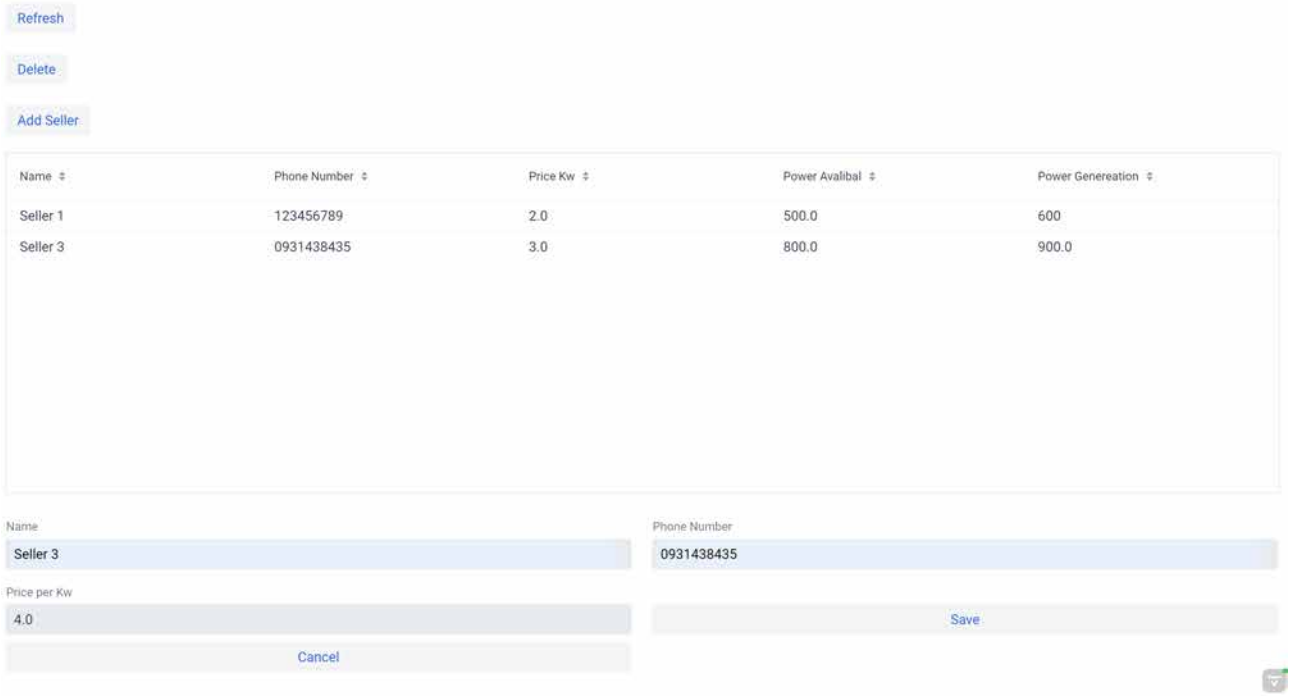
Клас SmartContract:

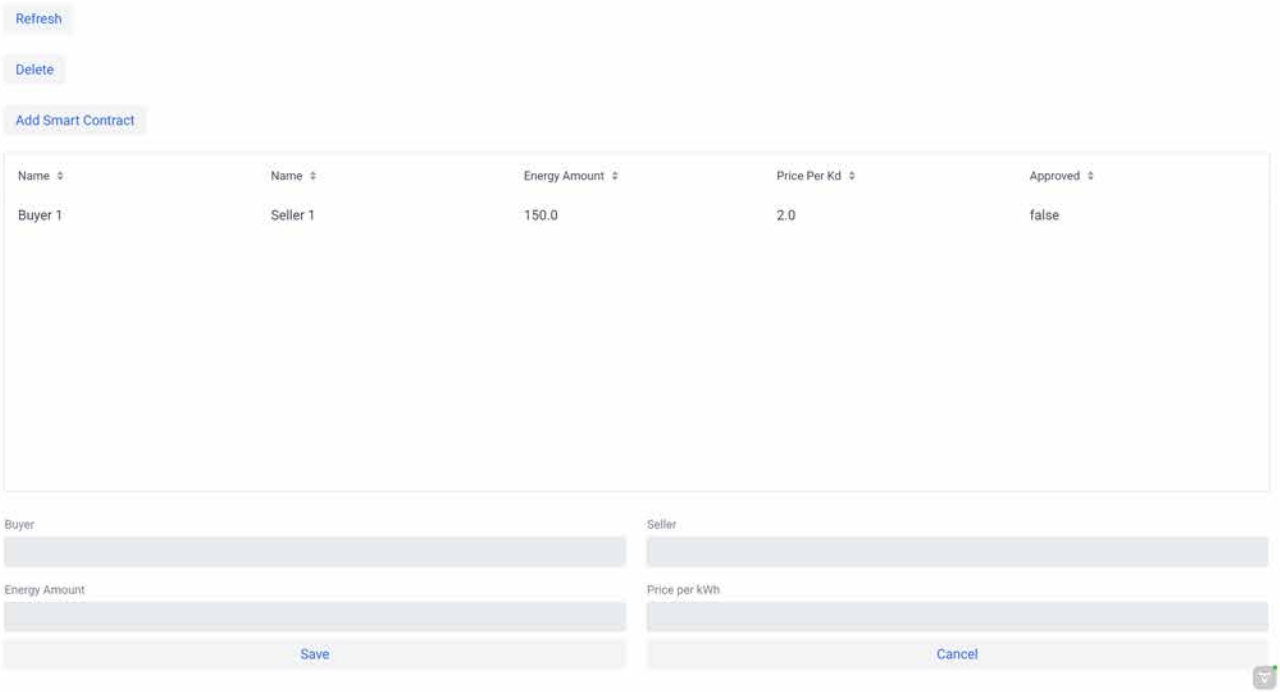
```
package com.khylenko.diplom.model;

import jakarta.persistence.*;
import org.hibernate.annotations.CreationTimestamp;

import java.time.LocalDate;
@Entity

public class SmartContract {

    @Id
    @GeneratedValue(strategy = GenerationType.IDENTITY)
    private int id;
    @ManyToOne
    private  Buyer buyer;
    @ManyToOne
    private Seller seller;

    @Column(nullable = false)
    private double energyAmount;
    @Column(nullable = false)
    private double pricePerKd;
    @CreationTimestamp
    private LocalDate created;

    private boolean approved;

    public SmartContract( Buyer buyer, Seller seller, Double energyAmount,
double pricePerKd, boolean approved, LocalDate created) {
        this.buyer = buyer;
        this.seller = seller;
        this.energyAmount = energyAmount;
        this.pricePerKd = pricePerKd;
        this.approved = approved;
        this.created = created;
    }

    public SmartContract() {

    }

    public int getId() {
        return id;
```

```
    }

    public void setId(int id) {
        this.id = id;
    }

    public Buyer getBuyer() {
        return buyer;
    }

    public void setBuyer(Buyer buyer) {
        this.buyer = buyer;
    }

    public Seller getSeller() {
        return seller;
    }

    public void setSeller(Seller seller) {
        this.seller = seller;
    }

    public double getEnergyAmount() {
        return energyAmount;
    }

    public void setEnergyAmount(double energyAmount) {
        this.energyAmount = energyAmount;
    }

    public double getPricePerKd() {
        return pricePerKd;
    }

    public void setPricePerKd(double pricePerKd) {
        this.pricePerKd = pricePerKd;
    }

    public LocalDate getCreated() {
        return created;
    }

    public void setCreated(LocalDate created) {
        this.created = created;
    }

    public boolean isApproved() {
        return approved;
    }

    public void setApproved(boolean approved) {
        this.approved = approved;
    }
}
```

Інтерфейс для управління покупцями та генераторами електроенергії:


Refresh
Delete
Add Buyer
Name
Phone Number
Necessary Power
Actions
Buyer 1
123456789
150.0
Make Contract
Buyer 2
9876543021
800.0
Make Contract
Buyer 3
0931438434
500.0
Make Contract
Buyer 4
0931438431
400.0
Make Contract
Name
Buyer 4
Phone Number
063143871
Necessary Power
900
Save
Cancel


Refresh
Delete
Add Seller
Name
Phone Number
Price Kw
Power Avalibal
Power Genereation
Seller 1
123456789
2.0
500.0
600
Seller 3
0931438435
3.0
800.0
900.0
Name
Seller 3
Phone Number
0931438435
Price per Kw
4.0
Save
Cancel


Refresh
Delete
Add Smart Contract
Name
Name
Energy Amount
Price Per Kd
Approved
Buyer 1
Seller 1
150.0
2.0
false
Buyer
Seller
Energy Amount
Price per kWh
Save
Cancel

Висновки по розділу 4.

При розробці програмного забезпечення для ЦБОДП ТЕ енергомереж ретельно розглядалося два основні сценарії побудови архітектури ПЗ:

1. побудова і використання єдиної бази даних;
2. формування структурованого простору даних, що включає декілька окремих баз даних.

Кожен з цих сценаріїв мав свої переваги та недоліки, що впливали на продуктивність, надійність, масштабованість та безпеку системи.

В процессі виконання роботи було зроблено висновок про недоцільність першого шляху у зв’язку з гіршими показниками по сукупності ряду параметрів, в тому числі: час обробки даних, можливість технологічних змін та ін. Після аналізу було обрано другий сценарій, оскільки він найбільше відповідав вимогам до масштабованості, стійкості та швидкодії прийняття рішень системою управління енергосистемою.

Запропонована архітектура ЦБОДП з розподіленою базою даних забезпечує гнучкість, масштабованість та безпеку при організації процесів купівлі-продажу електроенергії в ТЕ енергосистемах.

ВИСНОВКИ

Проведений в роботі аналіз стану автоматизації і існуючих рішень щодо побудови АСУ трансакційними енергосистемами (АСУ ТЕ) показав важливість і актуальність впровадження нових рішень, що з’явились і з’являються в галузі інформаційних технологій, в даний напрямок енергетичної галузі.

При цьому важливим елементом АСУ ТЕ є система підтримки прийняття рішень, окремим задачам розробки якої і присвячена чинна дипломна робота. Зокрема, це задачі вибора архітектури БД і розробки ПЗ центрального блока обробки даних і прогнозування (ЦБОДП) інформаційно-аналітичної платформи для підтримки прийняття рішень в АСУ ТЕ енергосистемами.

В чинному диплому проекті були проаналізовані різні варіанти і запропонована оптимальна архітектура БД та був розроблений алгоритм обробки даних ЦБОДП автоматизованої системи управління ТЕ енергомережами. Розрахунки, проведені на модельних експериментах мереж Microgrid, дозволили показати ефективність знайдених рішень і працездатність розробленого ПЗ. Тим самим, проведені дослідження і розрахунки підтвердили правильність тезі, що підвищення якості систем управління суттево впливає на економічні показники енергосистеми, забезпечуючи більшу комфортність роботи споживачів.

Розроблена архітектура програмного забезпечення і на мові Java написана програма реалізації представленого алгоритма.

Розглянуто і проаналізовано різні структури баз даних і обгрунтовано вибір розподіленої архітектури БД, яка включає три окремі БД.

Данне рішення, коли із вихідної БД генераторів і покупців електроенергії, послідовно формуються наступні БД комерційних операцій з кінцевою метою створення смарт-контрактів, забезпечує більшу стікість системи управління і, відповідно, енергомережі в цілому.

При цьому важливим результатом є перенесення рішень (з проведенням аналізу, обгрунтуванням алгоритмів) запропонованих на рівні локальних ТЕ мереж, на рівень інтегрованої енергосистеми.

Запропоновано рішення щодо використання нейромережевих моделей в системах підтримки прийняття рішень для АСУ ТЕ енергосистемами.

В процесі роботи над чинним дипломним проектом, обговоренням проблематики проекту з фахівцями енергетичної галузі була з'ясована необхідність подальшої розробки інтегрованих інтелектуальних автоматизованих систем управління ТЕ мережами і визначено коло задач для подальших досліджень.

Напрямок подальших досліджень і питання для подальшої роботи

Розвиток інтелектуальних систем управління в енергетичній галузі є актуальним напрямком як наукових, так і інженерних досліджень і продовжує привертати увагу фахівців.

Конкретними питаннями щодо продовження чинних досліджень і спрямовані на подальший розвиток інтелектуальних систем управління, на підвищення їх характеристик і якості є наступні:

4. Розробка алгоритмів і ПЗ для оцінки розходження цін учасників енергомереж при формуванні БД2 – базі даних допустимих пропозицій купівлі-продажу електроенергії. Визначення вагових коеффіцієнтів допустимої варіативності цін з обох сторін надасть більший простір для аналітики ринку, а включення такого ПЗ до ЦБОДП дозволить розширити список прийнятних пропозицій купівлі-продажу електроенергії і збільшими вирогідність підписання смарт-контрактів.
5. Доповнити смарт-систему управління ТЕ мережі алгоритмічним і програмним забезпеченням для аналізу розходження цін по окремим групам генераторів різних локальних енергомереж з метою розробки рекомендацій по зміні або корегуванню архітектури мережі.

6. Використовуючи алгоритми ШІ розробити рішення щодо оптимізації подальшої взаємодії генераторів і споживачів електроенергії для випадків неспівпадання обсягів виставленої на продаж та потребуємої енергії.

В цілому, подальше підвищення ефективності смарт систем управління енергомережами може бути досягнуто шляхом розвитку алгоритмічного і програмного забезпечення ЦБОДП в наступних напрямках:

- добавлення блоків прогнозів динаміки генераторів і покупців едектроенергії локальних мереж з використанням нейромережевих моделей;

- використання алгоритмів ШІ з розрахунками і застосуванням даних прогнозів динаміки щодо генерації і придбання електроенергії.

Подальший розвиток досліджень в напрямку задач чинного проекту буде корисним для створення наступного покоління інтелектуальних систем управління енергомережами не тільки в режимі сталого функціонування локальних енергомереж, інтегрованих мереж Мікрогрід, але в умовах кризових ситуацій та природних катаклізмів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Huang, Qi & Amin, Waqas & Umer, Khalid & Afzal, Muhammad. (2021). A review of transactive energy systems: Concept and implementation. Energy Reports. 7. 10.1016/j.egyr.2021.05.037.

2. Yashchuk, D.Y., Golub, B.L. Research on the use of OLAP technologies in management tasks. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019, 754, pp. 683–691.

3. Honarmand, Mohammad & Hosseinnezhad, Vahid & Hayes, Barry & Siano, Pierluigi. (2021). Local Energy Trading in Future Distribution Systems. Energies. https://doi.org/14.3110.10.3390/en14113110.

4. Huang, Qi & Amin, Waqas & Umer, Khalid & Afzal, Muhammad. (2021). A review of transactive energy systems: Concept and implementation. Energy Reports. 7. 10.1016/j.egyr.2021.05.037.

5. Khilenko V., Strzelecki, R., Kotuliak, I. Solving the Problem of Dynamic Adaptability of Artificial Intelligence Systems that Control Dynamic Technical Objects. Cybernetics and Systems Analysis, 2018, 54(6), pp. 867–873.

6. Bielokha H., Denysiuk S., Khilenko V. Analyzing Metabolic Processes to Optimize the Technical and Economic Indicators of Microgrid Systems. Cybernetics and Systems Analysis, 2022, 58(5), pp. 818–824.

7. Zahraoui, Y.; Alhamrouni, I.; Mekhilef, S.; Basir Khan, M.R.; Seyedmahmoudian, M.; Stojcevski, A.; Horan, B. (2021) Energy Management System in Microgrids: A Comprehensive Review. Sustainability, 13, 10492. https://doi.org/10.3390/su131910492.

8. Holmberg, D.G.; Hardin, D.; Melton, R.; Cunningham, R.; Widergren, S. Transactive Energy Application Landscape Scenarios; Technical Report; NIST: Gaithersburg, MD, USA, 2016.

9. Siano, P.; De Marco, G.; Rolán, A.; Loia, V. A survey and evaluation of the potentials of distributed ledger technology for peer-to-peer transactive energy exchanges in local energy markets. IEEE Syst. J. 2019, 13, 3454–3466. [CrossRef].

10. K. S. Rao, P. J. Chauhan, S. K. Panda, G. Wilson, X. Liu and A. K. Gupta, "Optimal scheduling of diesel generators in offshore support vessels to minimize fuel consumption," IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan, 2015, pp. 004726-004731, doi: 10.1109/IECON.2015.7392838.

11. Yadav, Parikshit & Kumar, Rajesh & Panda, Sanjib & Chang, C.. (2011). An Improved Harmony Search Algorithm for Optimal Scheduling of the Diesel Generators in Oil Rig Platforms. Energy Conversion and Management. 52. 893-902. 10.1016/j.enconman.2010.08.016.

12. Farkhondeh Jabari, Hamidreza Arasteh, Alireza Sheikhi-Fini, Behnam Mohammadi-Ivatloo. (2021). Optimization of a tidal-battery-diesel driven energy-efficient standalone microgrid considering the load-curve flattening program International Transactions on Electrical Energy Systems, pp. 1-15, doi:10.1002/2050-7038.12993.

13. Khilenko V. An Algorithm for Decomposition Control and Prediction of Trajectories of Nonlinear Stochastic Systems Under Different-Speed Processes in Their Dynamics. Cybernetics and Systems Analysis, 2022, 58(2), pp. 220–224.

14. U. Moslem, M. Huadong, D. Daoyi, E. Sondoss, Z. Jianguo, J. M. Guerrero. Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. (2023) Energy Strategy Reviews, 49, art. no. 101127. doi: 10.1016/j.esr.2023.101127

15. R.G. Allwyn, A. Al-Hinai, V. Margaret. A comprehensive review on energy management strategy of microgrids. (2023) Energy Reports, 9, pp. 5565-5591. doi: 10.1016/j.egyr.2023.04.360

16. Z. Mojaradi, R. Tavakkoli-Moghaddam, A. Bozorgi-Amiri, J. Heydari. A two-stage risk-based framework for dynamic configuration of a renewable-based

distribution system considering demand response programs and hydrogen storage systems. (2024) International Journal of Hydrogen Energy, 62, pp. 256 – 271. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.03.073.

17. M. Honarmand, V. Hosseinnezhad, B. Hayes, P. Siano. Local energy trading in future distribution systems (2021) Energies, 14 (11), art. no. 3110. doi: 10.3390/en14113110
18. Q. Huang, W. Amin, K. Umer, H.B. Gooi, F.Y.S. Eddy, M. Afzal, M. Shahzadi, S.A. Ahmad. A review of transactive energy systems: Concept and implementation. (2021) Energy Reports, 7, pp. 7804-7824. doi: 10.1016/j.egyr.2021.05.037
19. H.Bielokha, S. Denysiuk, V. Khilenko. Analyzing Metabolic Processes to Optimize the Technical and Economic Indicators of Microgrid Systems. Cybernetics and Systems Analysis, 2022, 58(5), pp. 818–824. doi: 10.1007/s10559-022-00514-6
20. P. Siano, G. De Marco, A. Rolan, V. Loia. A Survey and Evaluation of the Potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer Transactive Energy Exchanges in Local Energy Markets. (2019) IEEE Systems Journal, 13 (3), art. no. 8671697, pp. 3454-3466. doi: 10.1109/JSYST.2019.2903172
21. K. S. Rao, P. J. Chauhan, S. K. Panda, G. Wilson, X. Liu and A. K. Gupta. Optimal scheduling of diesel generators in offshore support vessels to minimize fuel consumption. IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Yokohama, Japan, 2015, pp. 004726-004731, doi: 10.1109/IECON.2015.7392838
22. D. Holmberg, D. Hardin, R. Melton, R. Cunningham, S. Widergren. (2016), Transactive Energy Application Landscape Scenarios, SGIP Technical Paper, [online], https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=921591
23. N.A.M. Kajaan, N.H.N. Amidi, Z. Salam, R.Z.R.M. Radzi. Blockchain-Based Smart Contract for P2P Energy Trading in a Microgrid Environment. (2022) Journal of Physics: Conference Series, 2312 (1), art. no. 012020. doi: 10.1088/1742-6596/2312/1/012020
24. Energy Trading with Smart Contracts. URL: https://medium.com/@solidity101/energy-trading-with-smart-contracts-e67a32f42ebb (14.03.2024).
25. Y.-T. Lei, C.-Q. Ma, N. Mirza, Y.-S. Ren, S.W. Narayan, X.-Q. Chen. A renewable energy microgrids trading management platform based on permissioned blockchain. (2022) Energy Economics, 115, art. no. 106375. doi: 10.1016/j.eneco.2022.106375

26. N. Patrizi, S.K. Latouf, E.E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou. Prosumer-Centric Self-Sustained Smart Grid Systems. (2022) IEEE Systems Journal, 16 (4), pp. 6042-6053. doi: 10.1109/JSYST.2022.3156877

27. D. Kirli, B. Couraud, V. Robu, M. Salgado-Bravo, S. Norbu, M. Andoni, I. Antonopoulos, A. Kiprakis. Smart contracts in energy systems: A systematic review of fundamental approaches and implementations. (2022) Renewable and Sustainable Energy Reviews, 158, art. no. 112013. doi: 10.1016/j.rser.2021.112013

28. F. Jabari, H. Arasteh, A. Sheikhi-Fini, B. Mohammadi-Ivatloo. Optimization of a tidal-battery-diesel driven energy-efficient standalone microgrid considering the load-curve flattening program. (2021) International Transactions on Electrical Energy Systems, 31 (9), art. no. e12993. doi: 10.1002/2050-7038.12993

29. V.Khilenko. Reverse blockchain: synergy of blockchain and neural networks. New technology for improving the quality of smart control for complex dynamic systems working with Big Data. Article submitted to IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. August 24, 2025.