

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра електронних обчислювальних машин
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Технологія збору даних в інтелектуальних
енергетичних мережах

(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи СПМ-23-2
Демченко Є. В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Системне програмування
(повна назва освітньої програми)

Керівник: доц. Бовчалуок С. Я.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ЕОМ

(підпис)

Коваленко А.А.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ комп'ютерної інженерії та управління _____

Кафедра _____ електронних обчислювальних машин _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

Спеціальність _____ 123 «Комп'ютерна інженерія» _____
(код і повна назва)

Тип програми _____ освітньо-професійна _____
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма _____ Системне програмування _____
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

“ _____ ” _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту _____ Демченку Євгенію Віталійовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Технологія збору даних в інтелектуальних енергетичних мережах _____

затверджена наказом по університету від “ 22 ” листопада 2024 р. № 1236 Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 20 січня 2025 р. _____

3. Вхідні дані до роботи _____ 1) документація і аналітика SMART GRID мереж;; _____

_____ 2) технічна документація інтелектуальних приладів обліку енергії; _____

_____ 3) архітектура керуючих автоматів паралельної дії; _____

_____ 4) математичний апарат нечіткого логічного висновку. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

_____ 1) аналіз існуючих і перспективних технологій побудови SMART GRID систем; _____

_____ 2) принципи і технології реалізації інтелектуальних приладів обліку енергії; _____

_____ 3) принципи роботи з даними в інтелектуальних лічильниках; _____

_____ 4) розробка загальної структури збору і обробки даних мережі SMART GRID; _____

_____ 5) реалізація елементів інтелектуальної мережі на базі ЛКА ПД; _____

_____ 6) розробка елементів збору і обробки даних в мережі на базі ЛКА ПД з функціями
_____ нечіткого логічного висновку; _____

_____ 7) висновки. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Слайд-презентація – 10 слайдів.

6. Консультанти розділів роботи (заповнюється за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд існуючих рішень і технологій SMART GRID мереж та напрямків їх розвитку	26.11.24-28.11.24	
2	Архітектура розумних електричних мереж та розгляд питань їх стійкості та надійності	29.11.24-01.12.24	
3	Інтеграція систем зберігання та керування енергією та електромобілів до мережі	02.12.24-04.12.24	
4	Загальні принципи і технології реалізації інтелектуальних приладів обліку енергії	05.12.24-10.12.24	
5	Робота з даними в розумних лічильниках	11.12.24-15.12.24	
6	Розгляд питань безпеки та захисту даних	16.12.24-17.12.24	
7	Розробка загальної структури збору і обробки даних мережі SMART GRID	18.12.24-24.12.24	
8	Реалізація елементів інтелектуальної мережі на базі ЛКА ПД	25.12.24-05.01.25	
9	Розробка системи на базі ЛКА ПД з функціями нечіткого логічного висновку	06.01.25-12.01.25	
10	Подання кваліфікаційної роботи на рецензування	13.01.25-17.01.25	

Дата видачі завдання 25 листопада 2024 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____
(підпис)

доц. Бовчалуок С. Я.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 78 с., 13 рис. 2 дод., 48 джерел.

SMART GRID, РОЗУМНА ЕНЕРГЕТИКА, ТЕХНОЛОГІЯ ПАРАЛЕЛЬНОГО ЛОГІЧНОГО КЕРУВАННЯ, ЛОГІЧНІ КЕРУЮЧІ АВТОМАТИ, НЕЧІТКА ЛОГІКА, СТРУКТУРА ПЛК ПД.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження технологій збору і обробки даних в інтелектуальних енергетичних мережах та реалізація рішень для інтеграції до таких мереж елементів на базі автоматів паралельної дії.

У ході виконання кваліфікаційної роботи виконано огляд існуючих рішень і технологій SMART GRID мереж та напрямків їх розвитку, досліджено загальні принципи і технології реалізації інтелектуальних приладів обліку енергії, проаналізовано роботу з даними в інтелектуальних лічильниках, висвітлено безпеку та захист при роботі з даними. Виконано розробку загальної структури збору і обробки даних мережі SMART GRID, запропоновано реалізацію елементів інтелектуальної мережі на базі ЛКА ПД, розроблено елементи збору і обробки даних в інтелектуальній мережі на базі ЛКА ПД з функціями нечіткого логічного висновку.

ABSTRACT

Master's thesis: 78 pages, 13 figures, 2 appendices, 48 sources.

SMART GRID, SMART ENERGY, PARALLEL LOGIC CONTROL TECHNOLOGY, FUZZY LOGIC, LOGIC CONTROL AUTOMATA, PLC STRUCTURE PA.

The major goal of this thesis is to study the technologies of data collection and processing in intelligent energy networks and the implementation of solutions for the integration of elements based on parallel automata into such networks.

During the qualification work, a review of existing solutions and technologies of SMART GRID networks and their development directions was carried out, the general principles and technologies for implementing intelligent energy metering devices were studied, data work in intelligent meters was analyzed, security and protection when working with data were highlighted. The general structure of data collection and processing of the SMART GRID network was developed, the implementation of elements of an intelligent network based on LCA PA was proposed, and elements of data collection and processing in an intelligent network based on LCA PA with fuzzy logic inference functions were developed.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	10
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	13
1.1 Огляд існуючих рішень і технологій SMART GRID мереж та напрянків їх розвитку	13
1.1.1 Архітектура розумних електричних мереж	15
1.1.2 Питання стійкості та надійності інтелектуальних енергетичних мереж	21
1.1.3 Інтеграція систем зберігання та керування енергією	26
1.1.4 Інтеграція електромобілів в розумну мережу	28
1.2 Постановка завдань дослідження	30
2 ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ SMART GRID МЕРЕЖ	32
2.1 Загальні принципи і технології реалізації інтелектуальних приладів обліку енергії	32
2.2 Робота з даними в інтелектуальних лічильниках	38
2.3 Безпека та захист даних	42
3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗБОРУ І ОБРОБКИ ДАНИХ МЕРЕЖ SMART GRID НА БАЗІ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЛКА ПД.....	46
3.1 Розробка загальної структури збору і обробки даних мережі SMART GRID	46
3.2 Реалізація елементів інтелектуальної мережі на базі ЛКА ПД	51
3.3 Розробка елементів збору і обробки даних в мережі на базі ЛКА ПД з функціями нечіткого логічного висновку	55
ВИСНОВКИ.....	63

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	64
ДОДАТОК А Графічний матеріал кваліфікаційної роботи.....	70
ДОДАТОК Б Наукові публікації за темою кваліфікаційної роботи.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ
І ТЕРМІНІВ

АПДН – автомат паралельної дії з нечіткою логікою

АСКОЕ – автоматизована система обліку комерційної електроенергії

АЦП – аналого-цифровий перетворювач

БА – блок адресації

БІ – блок індикації

БВО – блок вибору операцій

БЛК – блок логічного керування

БЛО – блок логічної обробки

БПК – блок пам'яті команд

БПЗК – блок пам'яті заборонених комбінацій

БПС – блок пам'яті станів

БПП – блок пам'яті переходів

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії

ЛА – лічильник адреси

ЛКА – логічний керуючий автомат

ЛКА ПД – логічний керуючий автомат паралельної дії

МКП – мікропроцесорний керуючий пристрій

ПЛІС – програмована логічна інтегральна схема

ПЛК – програмований логічний контролер

ПЛМ – програмована логічна матриця

ППЛК – паралельний програмований логічний контролер

СКЗ – системи критичного застосування

СП – схема порівняння

ТА – технологічний агрегат

ШІ – штучний інтелект

АМІ – розширена інфраструктура вимірювання (англ., Advanced

Metering Infrastructure)

DG – розподілені генератори (англ., Distributed Generators)

DRMS – система управління реагуванням на попит (англ., Demand Response Management System)

DSO – оператори системи розподілу (англ., Distribution System Operators)

EV – електромобіль (англ., Electric Vehicles)

FLISR – локалізація несправності, усунення та відновлення роботи (англ., Fault Location, Isolation, and Service Restoration)

GIS – геоінформаційна система (англ., Geographic Information System)

HDL – мова опису апаратури (англ., Hardware Description Language)

HESS – гібридна система зберігання енергії (англ., Hybrid Energy Storage System)

IC – інформаційна система клієнта (англ., Customer Information System)

IDS – система виявлення вторгнень (англ., Intrusion-Detection Systems)

IoT – Інтернет речей (англ., Internet of Things)

OMS – система управління відключеннями (англ., Outage Management System)

PV – фотоелектрична сонячна енергія (англ., Photovoltaic Solar Energy)

SCADA – наглядовий контроль та збір даних (англ., Supervisory Control And Data Acquisition)

SCPU – самозарядний блок живлення (англ., Self-Charging Power Unit)

SM – розумний лічильник або інтелектуальний лічильник (англ., Smart Meter)

SMART GRID – розумні мережі, розумна енергетика

TSO – оператори систем передачі (англ., Transmission System Operators)

V2G – система електромобіль-електромережа (англ., Vehicle-to-Grid)

VPP – віртуальні електростанції (англ., Virtual Power Plants)

ВСТУП

Поява інтелектуальних мереж знаменує значну трансформацію в різних секторах економіки країн світу, пропонуючи значно більш ефективний, надійний і стійкий підхід до управління та використання різних видів енергії. Розумні електромережі, або SMART GRID, що характеризуються розвиненою технологічною інфраструктурою, відіграють ключову роль у зміні промислового енергетичного ландшафту. В основу таких технологій покладено здатність забезпечити розширені можливості контролю та точного прогнозування для забезпечення безперебійного постачання електричної енергії.

Для прикладу моделі побудовані на реальних наборах даних з різних штатів США продемонстрували здатність інтелектуальної мережі обробляти різноманітні та мінливі параметри, такі як демографічні, соціально-економічні та кліматичні умови, які впливають на споживання енергії в різних регіонах. Адаптивність розумної мережі до зміни цих параметрів показала їх придатність для різноманітних потреб промислового сектору. Інтеграція промислового Інтернету речей (IoT) з інтелектуальними мережами також значно збільшує їхні можливості. IoT сприяє більш ефективному енергоспоживанню, що має вирішальне значення для галузей, що прагнуть ефективно збалансувати попит і пропозицію енергії. Така інтеграція особливо корисна в секторі відновлюваної енергетики, де системи на основі IoT можуть ефективно керувати виробництвом та інтеграцією енергії з різних джерел, таким чином зменшення залежності від викопного палива та сприяючи збільшенню частки чистих енергетичних ресурсів.

Іншим важливим аспектом еволюції інтелектуальних мереж є впровадження блокчейну технології. Розподілена структура інтелектуальних мереж представляє унікальні виклики з точки зору безпеки, особливо в контексті атак хакерів на енергетичні мережі. Технологія блокчейн пропонує

децентралізовану платформу транзакцій спеціально для енергетичного сектору, підвищуючи безпеку та надійність розумних мереж. Це технологія в поєднанні з передовою інфраструктурою вимірювання та розподіленою генерацією, являє собою значний крок вперед в еволюції розумних мереж.

Крім того, ще одним аспектом є стійкість розумних мереж до змін навколишнього середовища та клімату що робить їх незамінними в промисловому секторі. Наукові дослідження показують, що провадження SMART GRID як стратегії, пом'якшує наслідки та адаптацію сектору електроенергетики до наслідків зміни клімату [10]. Їх висновки свідчать про те, що розумні електромережі не тільки економлять енергію, але й підвищують стійкості мережі до природних небезпек. Ця стійкість життєво важлива для промисловості в регіонах.

У промисловому контексті розумні електромережі пропонують численні переваги, включно з покращеною енергетичною ефективністю, підвищеною надійністю й покращеною інтеграцією відновлюваних джерел енергії. Ці електромережі дозволяють галузям ефективніше контролювати використання енергії, що призводить до значної економії коштів на обслуговування енергетичного господарства і зниження впливу на навколишнє середовище. Можливість прогностичного обслуговування дозволяють інтелектуальним мережам своєчасно ідентифікувати та вирішувати потенційні проблеми, мінімізуючи час простою (і, як наслідок, час відсутності електричної енергії у споживача) та підвищуючи загальну продуктивність. Крім того, гнучкість інтелектуальних мереж у розміщенні різноманітних джерел енергії, у тому числі відновлюваних джерел різного походження, узгоджується зі зростаючою екологічною свідомістю та прагненням до сталого розвитку промисловості країн. Ця гнучкість не тільки допомагає зменшити викиди парникових газів, але й забезпечує більш стабільне та диверсифіковане енергопостачання.

Еволюція від традиційних до розумних мереж – це не просто технологічне оновлення, а й зміна парадигми у тому, як генерується,

розподіляється та споживається енергія. Розумні мережі пропонують більш динамічний та інтерактивний підхід до управління енергією, що дозволяє здійснювати моніторинг і контроль у реальному часі, підвищуючи ефективність і кращу інтеграцію різноманітних відновлюваних (або зелених) джерел енергії.

Оскільки галузі усіх країн світу, і Україна не є виключенням, мають на меті сталий розвиток та стикаються з новими викликами, роль розумних мереж SMART GRID для сприяння цим процесам стає все більш важливою, позначаючи її як наріжний камінь сучасного промислового енергоменеджменту.

Враховуючи вищевказане, головною метою роботи є дослідження технологій збору і обробки даних в інтелектуальних енергетичних мережах та реалізація рішень для інтеграції до таких мереж елементів на базі автоматів паралельної дії.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд існуючих рішень і технологій SMART GRID мереж та напрямків їх розвитку

Сучасний світ стає все більше взаємопов'язаним завдяки новим революційним технологіям і досягненням, що змінюють парадигми в різних секторах економіки як розвинених країн, так і таких, що прагнуть стати розвиненими. Прикладами таких секторів можуть бути транспорт, телекомунікації, електротехнічна промисловість, тощо. Метою такого розвитку є підвищення ефективності кожного сектора. Інтеграція інтелектуальних лічильників у згаданих секторах веде до більш ефективних і стійких промислових процесів, покращеного управління енергією, та економії коштів. Відправною точкою можна уважати звичайні електричні мережі будь якої технічно розвиненою країни (України у тому числі), які зазвичай складаються з трьох основних компонентів:

- генерація енергії (generation);
- передача енергії (transmission);
- розподіл енергії (distribution).

Компонент генерації передбачає виробництво електричної енергії з різних джерел, включаючи викопне паливо, ядерну енергію та відновлювані джерела [34]. Зростання глобального попиту на електроенергію в поєднанні з енергетичною кризою викликало виснаженням викопних ресурсів, провокує зміни у кліматі планети та впливає на навколишнє середовище. Як наслідок це призводить до еволюції розподілу електроенергії. Ця еволюція суттєво вплинула на такі аспекти, як проектування, аналіз і будівництво електричних мереж, а також їх експлуатацію та обслуговування [41]. Електроенергія виділяється як а первинний продукт, отриманий від використання викопного

палива, що призводить до значних наслідків наприклад, забруднення повітря внаслідок його спалення. Додатково відбуваються втрати та відхилення напруги при передачі та розподілі електроенергії звичайними електричними мережами, через постійне зростання потреби в енергії [12]. Тому оптимізація і контроль навантажень з використанням інтелектуальних методів розподілу стають обов'язковими процедурами, це дає такі результати, як скорочення витрат, покращення енергоефективності, екологічного менеджменту та безпеки [14]. Прогрес у технологіях виробництва електроенергії вводить нові інженерні методи та експерименти з подолання дефіциту енергії з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ), які стають дійсно життєздатною альтернативою класичним джерелам [19]. Ці тенденції спонукали Організацію Об'єднаних Націй оголосити ціллю на 2030 рік – забезпечення чистої та стійкої енергії [46].

Розглянемо структуру генерації станом на 2020 рік. Базовою була гідроенергетична генерація з 1190 ГВт, потім вітрова енергетика – 623 ГВт, сонячна енергія, що забезпечила 586 ГВт, енергія з біомаси – 14 ГВт, і геотермальна енергія – 500 МВт [14]. Однак для ВДЕ залишається проблема виробництва енергії за непередбачуваних кліматичних умов, тому однією з найголовніших тенденцій є оптимізація розподільчих мереж. Цей підхід може допомогти електрокомпаніям і підприємствам в оптимізації їх діяльності та підвищенні загальної ефективності мереж розподілу енергії. Перша тенденція передбачає застосування розподіленої енергії ресурсів (ПЕД), що нагадує синхронні генератори. Проте з піднесенням о розробляються передові технології, системи накопичення енергії та інтелектуальні мережі вирішення нових викликів і забезпечення ефективної інтеграції ВДЕ [48]. Інтеграція ВДЕ, таких як розподілені генератори (distributed generators – DG), є ще одним важливим трендом у розподільчих мережах. Їх запровадження спрямоване на зменшення втрат при передачі енергії лініями та збільшення частки ВДЕ для підвищення ефективності системи у цілому.

Ще однією новою тенденцією є фотоелектрична сонячна енергія (photovoltaic solar energy – PV), яка має потенціал для розвитку сталого майбутнього як базове відновлюване та чисте джерело енергії. Фотоелектрична сонячна енергія була визнана як ключовий компонент сталого розвитку у багатьох країнах. Також підкреслюється важливість досліджень у галузі сонячної енергетики для сталого енергетичного розвитку [44], оскільки вона має величезний потенціал для досягнення амбітних енергетичних цілей. Також PV сприяє розвитку будівництва будівель з нульовим енергоспоживанням, які дозволяють уникнути утворення парникових газів та інші значні впливи на навколишнє середовище [11, 33].

Як проміжний підсумок можна вказати наступне – прогнозовані дослідження передбачають, що частка світового споживання енергії від ВДЕ до 2050 року сягне близько 80%.

1.1.1 Архітектура розумних електричних мереж

Інтелектуальні мережі SMART GRID – це передові електричні системи, які об'єднують інформаційну та комунікаційну технології для підвищення ефективності, надійності та стійкості розподілу електричної енергії. Ці мережі зазвичай організовані у кілька рівнів для керування важливих аспектів інфраструктури. Кожен шар відіграє важливу роль у роботі та вдосконаленні інтелектуальної мережі. На рисунку 1.1 показано кожен із цих рівнів, надавши загальний вигляд того, як вони організовані в розумній електричній мережі. Показана структура розділена на наступні шість рівнів:

- рівень управління даними (data management);
- рівень електричної інфраструктури (electrical infrastructure);
- рівень автоматизації та контролю (automation and control);
- рівень взаємодії зі споживачем (consumer interaction);
- комунікаційний рівень (communication);
- безпековий рівень (security).

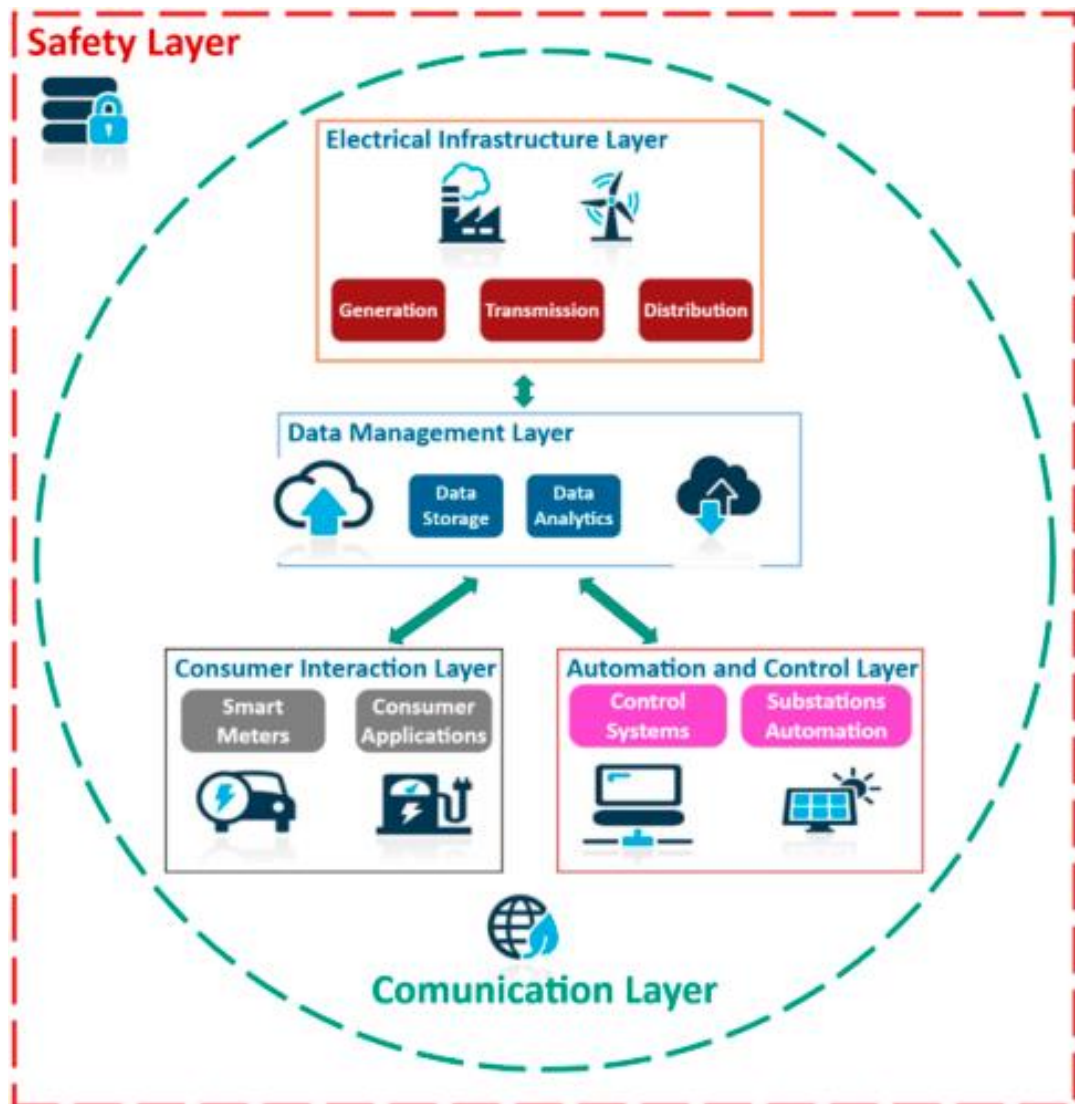


Рисунок 1.1 – Загальна багаторівнева структура інтелектуальної електричної мережі

Послідовно розглянемо вказані рівні, їх складові й тенденції вдосконалення і розвитку.

Рівень керування даними. Цей рівень відповідає за обробку та керування великими даними в різних доменах, включаючи розумні будинки, розумні мережі, розумні міста та охорону здоров'я. У контексті розумних будинків розглядається багаторівнева архітектура для обробки та керування великими даними. Ця архітектура складається з кількох рівнів, включаючи управління даними та рівень візуалізації, на який покладено завдання зі

збору, зберігання та візуалізації даних. Крім того, інтегрована структура для управління та аналізу великих даних необхідна для ефективного контролю та керування даними в реальному часі. На рисунку 1.2 показано, що комунікаційний рівень обмінюється інформацією на всіх рівнях через двонаправлений потік енергії та даних. Цей потік використовує такі інструменти, як великі дані для управління даними, блокчейн для продажу енергії споживачам та звичайне використання комплексних даних. Аналітична обробка даних в інтелектуальній мережі має вирішальне значення, оскільки вона може запобігти економічним, соціальним і технічним збиткам за несприятливих умов.



Рисунок 1.2 – Напрямок потоків даних у мережах SMART GRID

Рівень електричної інфраструктури. Цей рівень охоплює електрогенеруючі потужності, такі як електростанції, вітрові електростанції, та PV установки. При використанні ВДЕ обов'язково необхідно враховувати їх непередбачувану природу, наприклад швидкість вітру, або середню кількість сонячних днів на території генерації.

На рисунку 1.3 зображено узагальнену схему передачі та розподілу електроенергії. На ньому можна виділити два окремих блоки. Перший блок – це блок передачі енергії. Він відповідає за транспортування електроенергії на великі відстані за допомогою високовольтних ліній. Другий блок реалізує безпосередній розподіл, тобто доставку електроенергії кінцевим споживачам через підстанції та розподільні лінії [32].

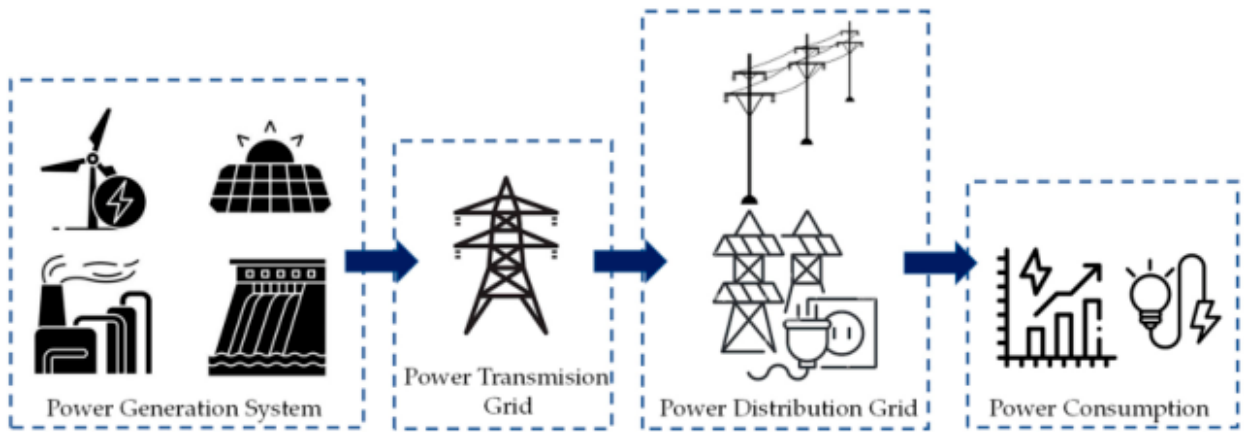


Рисунок 1.3 – Схема передачі та розподілу електроенергії

Цей шар має зв'язки на різних рівнях, таких як комунікаційний рівень, рівень взаємодії споживачів, рівень автоматизації та керування та рівень керування даними. Такі зв'язки призначені для запобігання втратам енергії, підтримки самовідновлюваності мережі та аналізу даних. Також це важливо для виявлення загроз кібербезпеці електричних систем, що можуть мати фізичний вплив безпосередньо на фізичний рівень електричної мережі [20].

Рівень автоматизації та контролю. Цей рівень можна розділити на декілька наступних складових:

- оптимізація енергосистеми та аналіз попиту та пропозиції;
- автоматизація енергосистем в електричних мережах;
- рівень взаємодії споживачів;
- комунікаційний рівень;
- рівень безпеки.

Оптимізація енергосистеми та аналіз попиту та пропозиції. Для оптимізації інтелектуальних енергосистем потрібні прогнозні моделі для прогнозування та аналізу попиту і пропозиції. Також методи оптимізації широко використовується для вирішення проблем інтеграції відновлюваних джерел енергії у ситуаціях невизначених параметрів їх генерації. Управління попитом і оптимізація економічної ефективності вимагають застосування алгоритмів машинного навчання для ідентифікації споживачів зі схожим

стилем життя на основі їхнього добового споживання енергії. Прогнозування, діагностика несправностей, обслуговування, планування експлуатації, визначення розмірів і управління ризиками вимагають розгортання байєсівських мереж для імовірнісного моделювання невизначених компонентів енергосистеми [38]. Для налаштування параметрів інтелектуальних лічильників та оптимізації підходів до попиту також необхідно мати відповідні моделі, засновані на стимулах стратегії попиту та реагування. Для цього використовуються як надійні методи прогнозування навантаження на основі класичної статистики, так і елементи ШІ та машинного навчання. Ці стратегії мають вирішальне значення для підвищення технічної та економічної ефективності інтелектуальної мережі, що робить їх важливою частиною оптимізації енергосистеми.

Автоматизація енергосистем в електричних мережах. Автоматизація в SMART GRID є ключовим аспектом інфраструктури сучасних електричних мереж. Вона передбачає інтеграцію передових технологій, таких як системи автоматизації, протоколи зв'язку та функції керування для підвищення ефективності, надійності та безпеки мережі [17]. Одним із ключових компонентів автоматизації інтелектуальної мережі є здійснення контрольних функцій. Інженерія систем управління відіграє фундаментальну роль у розробці та оптимізації стратегій керування для додатків інтелектуальної мережі. Ці функції керування дозволяють мережі динамічно реагувати на зміни попиту та пропозиції електроенергії, щоб забезпечити ефективну та надійну роботу. Для максимального використання місцевих ресурсів і підвищення енергоефективності використовуються системи управління, що отримали назву «microgrid» (мікромережі) [23]. Microgrid не єдиний приклад автоматизації та контролю. У контексті енергії акумулятора-системи зберігання, для оптимізації запропоновані підходи згладжування на основі керування станом заряду та запобігання перезаряду або розряду [18]. Автоматизація в розумній мережі стала дуже актуальною темою. До прикладу Іспанська асоціація Domotics визначає інтелектуальну

автоматизацію як застосування технологій для ефективного управління використанням енергії, забезпечення безпеки та комфорту, а також забезпечення зв'язку між користувачем і системою [39].

Сфера досліджень і розробок, яка швидко розвивається, – це інтеграція пристроїв Інтернету речей в електричну мережу, для підвищення якості електроенергії, оптимізації виробництва відновлюваної енергії та забезпечення ефективності роботи мережі в цілому. Збільшення частки пристроїв IoT в електричній мережі є винятковою актуальним трендом SMART GRID. Трансформуючий вплив пристроїв IoT, можливість збору та передачі даних у реальному часі зробила революцію в моніторингу, контролі та управлінні електричною мережею. Розгортання пристроїв IoT всередині електричної мережі полегшує більш складний моніторинг таких аспектів, як попит на енергію, розподілена генерація, якість послуг та ефективність роботи системи в цілому.

Рівень взаємодії споживача характеризується інтеграцією апаратного та комунікаційного обладнання. для інтелектуального моніторингу, контролю та управління виробництвом, розподілом, зберіганням та споживанням енергії за допомогою розумних лічильників [28]. Підкреслимо важливість цієї технології в енергоменеджменті. Наприклад за допомогою наборів даних, таких як набір UK-DALE, що надає дані про попит на електроенергію на пристрої та в цілому рівнів будинків із п'яти британських домогосподарств було значно поглиблено розуміння про побутове споживання енергії [29]. Цей тип даних став дуже важливим для розуміння поведінки енергоспоживання та оптимізації управління ним за допомогою розумних лічильників.

Комунікаційний рівень сприяє двонаправленому зв'язку між генеруючою компанією та споживачем енергії шляхом передачі даних між пристроями, датчиками, і системами по всій мережі [27]. Це забезпечує безпеку і надійність комунікації в середовищі розумної мережі. Різноманітними дослідженнями встановлено, що обмін динамічними даними

між генераторами енергосистем має вирішальне значення для глобального моніторингу, децентралізованого управління та захисту інтелектуальної мережі.

Рівень безпеки – один із найважливіших елементів систем розумних електромереж через їх збільшену вразливість до кіберзагроз [42]. Функціональність інтелектуальної мережі значною мірою залежить від системи прийому-передачі даних. Щоб вирішити проблеми кібербезпеки систем розумних електромереж, проводиться значна кількість досліджень з упором на різні аспекти, такі як системи виявлення вторгнень (intrusion-detection systems – IDS), які відіграють важливу роль у захисті систем розумних мереж. Звичайна кібератака в інтелектуальних мережах – це введення неправдивих даних, які спотворюють зібрані оператором системи данні. Проактивна ідентифікація загроз досягається за допомогою розробки формальних методів перевірки безпеки, які розкривають кібербезпеку та загрози фізичній безпеці в різних компонентах систем розумних мереж.

Таким чином розумна мережа може бути визначена як динамічна та інтерактивна інфраструктура, яка інтегрує мільйони енергетичних пристроїв і датчиків, що забезпечують швидку передачу, моніторинг і двонаправлене управління енергією за допомогою передових систем зв'язку та інтелектуальних вимірювальних пристроїв. Загалом, архітектура інтелектуальної мережі є багатогранною та ієрархічною системою що вимагає ретельного розгляду контролю, зв'язку, безпеки та гнучкості щоб забезпечити її ефективну та надійну роботу.

1.1.2 Питання стійкості та надійності інтелектуальних енергетичних мереж

Розвиток електричних розподільчих мереж відбувається через постійне впровадження інноваційних технологій, які дозволяють розумним мережам автоматизувати постачання і розподіл енергії, що забезпечує найкращий

рівень функціонування мережі. Інтелектуальна мережа об'єднує різні технології для оптимізації ефективності, надійності та сталості розподілу енергії, серед яких слід згадати наступні:

- блоки живлення з самозарядкою (самозарядний блок живлення);
- ШІ;
- ІоТ;
- блокчейн;
- машинне навчання.

Самозарядний блок живлення (існують й інші терміни – автономне джерело із можливістю заряду-розряду, самозарядний енергетичний блок, тощо). Він служить альтернативним накопичувачем енергії, що отримується з будь-яких джерел навколишнього середовища. Однак слід розуміти, що незалежно від того, наскільки висока щільність енергії батареї з часом вона має розрядитися. Тому сучасний підхід передбачає інтеграцію системи збору енергії, контуру керування струмом та пристрою накопичення енергії в єдину систему –, по суті створюючи а самозарядний блок живлення (SCPU), який отримує значні переваги від безперервного збору енергії. Система енергоменеджменту забезпечує зберігання зібраної або виробленої енергії з максимальною ефективністю, а блок накопичення енергії повинен діяти як «резерв», який «адмініструє» зібрану енергію для контрольованої віддачі споживачу (рисунок 1.4).

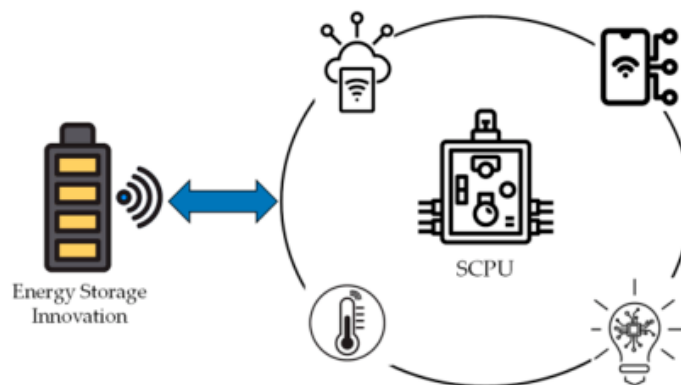


Рисунок 1.4 – Візуалізація адміністрування енергією SCPU

Інтернет речей. Двонаправлений канал зв'язку і сучасні комунікаційні технології сприяють більш успішній та ефективній торгівлі електроенергії, перетворенню кінцевих споживачів (фізичних осіб) на інтелектуальні одиниці, які збирають і передають контрольні параметри, а також інтерпретують інформацію в режимі реального часу (рисунок 1.5). Це відкриває нові перспективи для ринку розподіленої енергії, включаючи більш якісний мережевий моніторинг і контроль, управління активами, захист даних і конфіденційність, зрештою це має підвищувати надійність і ефективність енергетичної системи. Більш того, перехід до SMART GRID передбачає використання регульованого розподіленого ринку електроенергії, підкреслюючи важливість регуляторних стандартів і політик для забезпечення прибутковості інтелектуальних розподільчих мереж.



Рисунок 1.5 – Складові розумного будинку на базі IoT

Технологія блокчейн привернула значну увагу в енергетичному секторі, зокрема переважно саме у контексті SMART GRID. Це перспективна технологія, що здатна підвищити безпеку та стійкість інтелектуальних мереж, забезпечуючи безпечну та ефективну передачу електроенергії,

вирішуючи питання довіри та безпеки [16,30]. Крім того, згідно останніх досліджень, майже 20% управлінських осіб, які приймають рішення, вважають, що технологія блокчейн буде основною технологією в SMART GRID, підкреслюючи її потенціал [35]. Застосування блокчейну в інтелектуальних мережах передбачає велике різноманіття прикладів використання, включно з розумним обліком і торгівлею енергією та агрегацією даних. Блокчейн може забезпечувати надійність і стійкість структури для безпеки інтелектуальної мережі, захисту від кібератак і забезпечення цілісності і конфіденційності системи. Потенціал технології блокчейн в інтелектуальних мережах поширюється на її значну роль у вдосконаленні енергоефективності, забезпечуючи децентралізовану та безпечну платформу для управління енергією, сприяння розумній та прозорій роботі енергетичної системи. Крім того, застосування блокчейну в розумних мережах узгоджується з ширшою тенденцією використання інформаційних і комунікаційних технологій для революційних змін в енергетиці, пропонуючи довгострокові можливості зробити енергетичну систему більш ефективною та безпечною.

Локалізація несправності, усунення та відновлення роботи (FLISR). Це один з найбільш критичних аспектів сучасних інтелектуальних мережевих систем, спрямованих на досягнення здатності до самовідновлення та підвищення надійності мережі розподілу енергії [31]. Успішне впровадження FLISR додатків на передових платформах, таких як GridAPPS-D вказує на потенціал для впровадження у нових і вдосконалених концепціях (наприклад ADMS) для підтримки майбутніх систем розподілу енергії [40]. Основна функція, що тісно пов'язана з успішним впровадженням FLISR – проактивне самовідновлення розумних мереж – виявлення несправностей, визначення місця розташування, ізоляція та відновлення.

Важливими технологіями є також штучний інтелект і віртуальні електростанції. Включення штучного інтелекту у віртуальні електростанції (VPP) у розумних мережах має важливе значення для оптимізації інтеграції

розподілених енергетичних ресурсів і електромобілів, та керування навантаженням електричної мережі. Концепція VPP розвивається для вирішення проблем зміни клімату та забезпечення ефективного використання відновлюваної енергії в електричній мережі [15]. Структури VPP в рамках інтелектуальної мережі мають вирішальне значення. Інтеграція ВДЕ у мережу завдяки VPP забезпечує підвищену операційну гнучкість, хоча це і вимагає додаткових капітальних витрат на системи та програмне забезпечення. VPP представляють інноваційну концепцію, яка об'єднує невеликі, розподілені енергетичні ресурси, представляючи їх як звичайну уніфіковану електростанцію в класичній електроенергетиці. Розумна мережа, як електрична мережа нового покоління, використовує двонаправлену мережу потоків електроенергії та інформації для створення автоматизованого, широко розподіленого енергоживлення. ШІ відіграє важливу технологічну роль у розумних мережах та їх застосуваннях може збільшити та підвищити надійність і стійкість розумних мереж [14].

Надійність електричних розподільчих мереж має вирішальне значення для визначення безперебійності і якості електропостачання, враховуючи ключові параметри, такі як резерви навантаження лінії, резервування системи, нестабільність і переривчастість відновлюваних джерел, а також здатність до відновлення після збоїв та аварій. Це особливо важливо для мереж, що складаються переважно з відновлюваних джерел, які за відсутності накопиченої енергії або резервів, можуть викликати нестабільність в електричній мережі. Значною проблемою є ефективне управління мінливістю та переривчастістю, пов'язаною з такими джерелами, як сонце та вітер, для яких потрібно застосовувати методи згладжування потужності. Точний прогноз виробництва та впровадження передових технологій зберігання мають вирішальне значення для зменшення коливань в енергопостачанні та забезпечення стабільного постачання. Крім того, інтеграція системи розподіленої генерації та адаптація до зростаючої складності мережі буде мати вирішальне значення для підтримки динамічної

стабільності електричної системи. Система контролю має гарантувати, що виробництво та попит завжди максимально узгоджені.

Ще однією серйозною проблемою є виявлення та класифікація екстремальних подій та збоїв у мережі. Розробка ефективних стратегій відновлення та впровадження технології що дозволяє швидко відновити роботу, є критично важливими аспектами для забезпечення безперервності електропостачання в несприятливих ситуаціях. Крім того питання кібербезпеки постають як зростаючий виклик. Враховуючи збільшення кількості підключень користувачів і пристроїв до інтелектуальних мереж, це вимагає надійних заходів захисту від потенційних загроз й атак. Необхідність реконфігурації та модернізації існуючої інфраструктури також є серйозною проблемою. Інтеграція нових технологій, наприклад ШІ та IoT, в управління та експлуатацію електричні мережі вимагатимуть значних капіталовкладень та планового переходу, щоб уникати значних перебоїв у енергопостачанні. Крім того, координація та міжнародна стандартизація стають все більш важливими аспектами, особливо в контексті зростаючого взаємозв'язку електричних мереж в усьому світі. Регламентація спільних стандартів сприятиме сумісності та ефективному керування енергетичними потоками у міжнародному масштабі.

1.1.3 Інтеграція систем зберігання та керування енергією

Питання використання класичних хімічних акумуляторних батарей різних типів у цьому розділі не розглядатимуться, оскільки доцільність їх використання вже давно доказано і на даний час не підлягає сумнівам. Розглянемо лише нові напрямки і перспективні розробки, серед яких згадаємо наступні:

- суперконденсатори;
- системи зберігання водню;
- акумуляторно-суперконденсаторні гібридні системи зберігання;

- надпровідне зберігання;
- управління мікромережею.

Індивідуальні енергетичні пристрої та системи на основі суперконденсаторів або маховиків можна використовувати для зменшення перепадів напруги та покращення якості енергії розподільні мережі [21]. Крім того, використання інверторів у гібридних енергетичних системах, такі як ті, що поєднують фотоелектричну та електромережеву потужність, можуть значно підвищити якість живлення.

Аналіз, представлений у [25], досліджує зв'язок між генераторами відновлюваних джерел енергії, літій-іонними батареями та водневою енергією у якості рішень для живлення в розумних мережах. Підкреслюючи вирішальну роль водню в досягненні найкращих показників ефективності та його здатності до сезонного зберігання, дослідження показує, що зберігання водню стає базовим і має близько 40% проникнення до систем ВДЕ, підтримуючи стабільність системи SMART GRID.

Особливо перспективним підходом можна уважати технологію зберігання HESS, яка поєднує батареї та суперконденсатори. Ці системи, як показано в [13, 22], пропонують значні переваги з точки зору стабільності напруги, якості живлення та подовження терміну служби батареї, сприяючи кращій ефективності роботи системи у цілому. Робота [13] представляє піонерський підхід, пропонуючи HESS у структуру наносітки, використовуючи батареї у співпраці з суперконденсаторами для формування хмарної енергетичної система зберігання. Цей інноваційний підхід покращує стабільність напруги та балансує потужність за допомогою загальної шини наносіток, що демонструє більш плавні можливості керуванням потужності та, як наслідок, подовження терміну служби акумулятора. Представлений у [22] дворівневий контролер для керування HESS у складі фотоелектричної установки покращує ефективність сумісної експлуатації батарей і суперконденсаторів. Цей оптимізований підхід відповідає усім специфічним технічним вимогам до зменшення пікових потужностей та обмеження

наростання потужності фотоелектричної системи, що приносить користь як оператору установки, так і оператору системи розподілу. Дослідження також надає цінну інформацію про витрати, пов'язані з додавання суперконденсаторів з точки зору стохастичної продуктивності системи.

1.1.4 Інтеграція електромобілів в розумну мережу

Включення електромобілів (EV) в розумні мережі не тільки зменшує залежність транспортного сектора від викопного палива, але це також призводить до зменшення кількості викидних парникових газів. Мобільність електромобіля створює виклики для інтелектуальних мереж, включно з якістю електроенергії, довгостроковим регулюванням і надійністю. EV оснащені достатньою кількістю функцій для процесу передачі енергії від автомобіля до мережі, що отримала назву V2G (vehicle-to-grid). С за допомогою цієї функції додаткову енергію можна зберігати, а потім повертати в основну мережу під час високого попиту на електроенергію. Електромобілі допомагають підтримувати стабільний рівень періодичних відновлюваних джерел енергії на рівні системи передачі. Це тому, що електромобілі здатні як накопичувати енергію під час пікової генерації ВДЕ, так і передавати енергію назад до мережі під час високого попиту на енергію [45]. Електромобілі також можуть надавати допоміжні послуги операторам систем розподілу, і їх продуктивність може бути розділена на три різні категорії: неузгоджена зарядка, розумна зарядка та розумне зарядження та розрядження (також відоме як Two-Way V2G) [26, 24].

Неузгоджене зарядження відбувається, коли EV підключено безпосередньо до розподільної мережі та продовжує заряджати акумулятор поки він не досягне своєї повної потужності. Для цього типу зарядки не потрібна координація між EV і розподільчою мережею. На противагу неузгодженому зарядженню, пропонують оптимальні алгоритми зарядки для мінімізації впливу електромобілів на розподіл мережі, щоб зменшити втрати

потужності та покращити коефіцієнт навантаження. Останні дослідження показали, що існує суттєва прогалина у допоміжних послугах, які можуть надавати електромобілі у мережі. Заповнення цієї прогалини, особливо у контексті технології Two-Way V2G, має бути пріоритетом для забезпечення ефективної роботи розумних мереж.

Переваги EV, які беруть участь у протоколі V2G, можуть функціонувати як накопичувачі енергії в розумній мережі, оскільки електроенергія може бути передається між транспортним засобом і мережею. Розумна мережа може перерозподіляти електроенергію до електромобіля, поки він працює в стаціонарному режимі. Цей метод дає змогу електромобілям виконувати функцію накопичувачів, що сприяє зменшенню впливу нестабільності, що генерується ВДЕ. Крім того, електромобілі благотворно впливають на економіку в результаті технічного розвитку та нових розробок в галузі акумуляторних технологій. Крім того, встановлення розумної зарядної інфраструктури для електромобілів підвищує економічність розподільчої мережі, запобігаючи втраті значної кількості енергії в розумній мережі [47]. До прикладу широке використання електромобілів у Сінгапурі сприяло зменшенню як споживання викопного палива, так і кількість викидів CO₂. У парадигмі розумної мережі та V2G робота оптимальної зарядної інфраструктури для електричних транспортних засобів зображені на рисунку 1.6. Взаємна автентифікація та збереження даних про EV (ідентифікаційні дані, стан акумулятора, місцезнаходження, а також вибір і тривалість заряджання/розряджання) надається на умовах конфіденційності, за схемою, що ґрунтується на двонаправленому сполученні з акумулятором EV [43]. Ця схема захищена від множинної атаки, атаки «людина посередині», атаки повтору, атаки уособлення, атаки перенаправлення та атаки відмови. Введення ВДЕ в мережу призводить до коливань напруги та втрат потужності; однак ці ефекти можна звести до мінімуму зарядкою акумуляторів EV через V2G.

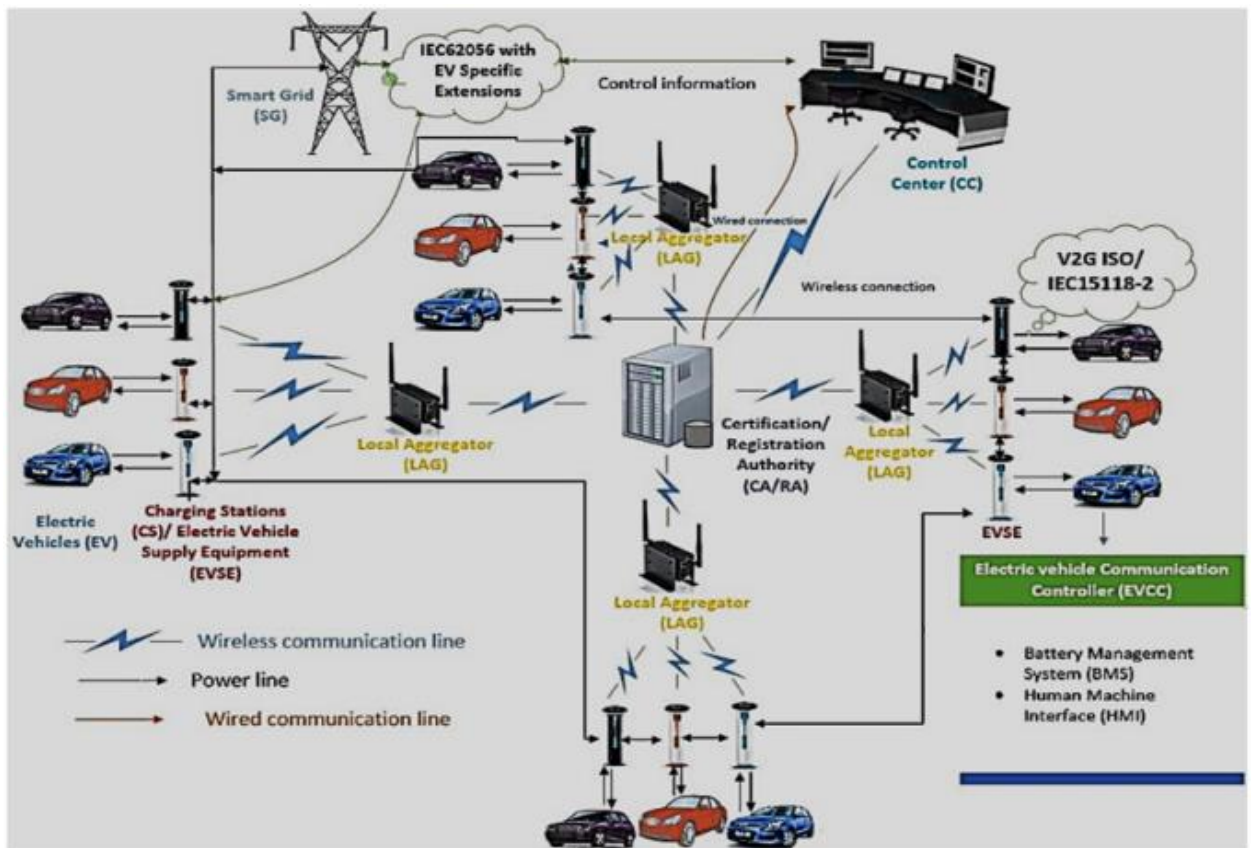


Рисунок 1.6 – Оптимальна схема роботи електромобілів V2G

1.2 Постановка завдань дослідження

Генерація та керування потоками енергії є актуальною задачею, як для енергогенеруючих компаній та комунальних підприємств, так і для кінцевих споживачів електроенергії, і ці процеси можна значно покращити, включивши складну технологію в розумну мережу. Це відкриває можливості трансформації вже існуючих галузей у нову еру розширених розумних мереж, які надають інтелектуальні можливості, швидко реагуючи на виклики при передачі та розподілі енергоресурсів. Таким чином традиційна мережа може трансформуватись від централізованої структури на більш розосереджену структуру розумної мережі. Для того, щоб побудувати таку нову децентралізовану конструкцію, нові джерела генерації повинні бути добре інтегровані до мережі належним чином, споживачі енергії мати

можливості оперативно реагувати на виклики ринку з метою зменшення своїх витрат, а постачальники і комунальні підприємства, що розподіляють енергію, мати можливості оперативного інтелектуального керування мережею.

У найповнішому розумінні термін «розумна мережа» стосується оновленої електромережі, яка використовує зв'язок, набір датчиків, комп'ютерів та автоматизацію з метою підвищення ефективності, надійності та безпеки енергосистеми.

У зв'язку із зазначеним актуальною є розв'язання науково-прикладної задачі дослідження та розробки технології збору даних в інтелектуальних енергетичних мережах. Відповідно до зазначеної мети необхідно розв'язати наступні часткові завдання дослідження:

- виконати огляд існуючих рішень і технологій SMART GRID мереж та напрямків їх розвитку;
- розглянути загальні принципи і технології реалізації інтелектуальних приладів обліку енергії;
- дослідити роботу з даними в інтелектуальних лічильниках та безпеку і захист даних;
- виконати розробку загальної структури збору і обробки даних мережі SMART GRID;
- розробити елементи інтелектуальної мережі на базі ЛКА ПД;
- розробити елементи збору даних в мережі на базі ЛКА ПД з функціями нечіткого логічного висновку.

2 ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ЕЛЕМЕНТІВ SMART GRID МЕРЕЖ

2.1 Загальні принципи і технології реалізації інтелектуальних приладів обліку енергії

Розумний (або інтелектуальний) лічильник (Smart Meter) – це узагальнююче поняття, що можна бути застосовано до будь-якого електронного пристрою, призначеного для реєстрації електричної енергії, тепла або води споживачем. При цьому у нього можуть бути також функції додатково враховувати дані часу доби або температури чи обсягу спожитої енергії. Пристрої подібного типу можуть надсилати інформацію провайдеру кожної години або протягом іншого періоду часу, і саме на базі переданої інформації відбувається відстеження активності споживача та виставлення йому рахунків за спожиту енергію.

У контексті поняття SMART GRID інтелектуальні лічильники допомагають модернізувати електромережу, надаючи можливість дистанційного моніторингу та передачі енергоспоживання та інформацію про якість електроенергії частіше та надійніше ніж у ручному режимі. Це дозволяє відповідним енергетичним службам працювати більше ефективно та керувати мережею розподілу електричної енергії відповідно до сучасних викликів. Збираючи інформацію про споживання енергії в реальному часі, інфраструктури з SM розширюють можливості постачальників за наступним переліком:

- зменшуються експлуатаційні витрати за допомогою видалення операцій на ручне керування (зняття показань лічильників, відключення послуг);
- покращується прогнозування та плавність енергоспоживання;
- покращується обслуговування клієнтів за допомогою профілювання

- та сегментації;
- зменшуються втрати та розкрадання енергії (а це серйозна проблема на ринку України);
- спрощується моніторинг мікрогенерації та відстеження потужності що генерується і споживається.

Інтелектуальні лічильники в обов'язковому порядку мають забезпечувати можливість двостороннього зв'язку між системою центрального оператора та лічильником. У залежності від технологій, що використовуються доступ до такої бази даних для абонента може бути забезпечено через мережу Інтернет або інші види зв'язку. На відміну від звичайних побутових лічильників електроенергії SM призначені для збирання даних для віддаленої звітності. Тому сучасна інфраструктура обліку SMART GRID відрізняється від класичної автоматизованої системи обліку комерційної електроенергії (АСКОЕ) тим, що забезпечується двосторонній зв'язок між системою обліку та лічильником.

Слід зазначити, що розумні лічильники мають забезпечувати зворотній зв'язок щодо інформації про спожиту енергію, близький до реального часу. Цей факт має дозволити усім зацікавленим сторонам краще керувати наданням і використання енергії, зменшувати свої рахунки і збільшувати прибуток.

Для споживачів, які приймають активну участь у ринку електроенергії (для України це самовиробництво електричної енергії або програма «Зелений тариф»), самостійно або за допомогою розподільчої компанії, інтелектуальні лічильники можуть запропонувати ще більше додаткових функцій. ST можуть допомогти у реалізації алгоритмів адаптації споживання енергії у відповідності до різниці у ціні на енергію протягом дня. Це сприятиме раціональному споживанню в періоди нижчих цін або вищих цін і, як наслідок, заощаджувати на своїх рахунках за електроенергію.

Враховуючи вищевказане, можна стверджувати, що на базі інтелектуального лічильника оператори мережі отримують повну

інформацію про те, які процеси відбуваються у контрольованій частині мережі. Таким чином, енергопостачаючі компанії можуть краще планувати інвестиції та керувати своєю інфраструктурою. Це дозволяє краще відповідати вимогам як своїх клієнтів, так і умовам ринку, а отже зменшувати експлуатаційні витрати та витрати на обслуговування мережі та обладнання, що у кінцевому підсумку зменшує витрати споживача енергії, що закладені у тарифи. Щоб забезпечити виконання на всіх цих вимог, у розумних приладах обліку енергії повинні бути реалізовані належні функціональні можливості. Саме це зазначено у Директиві щодо електроенергії (ЄС) 2019/944. Окрім того національним органам влади вказується про необхідність уважного нагляду за тим, щоб було отримано максимальну віддачу від таких значних інвестицій, і щоб встановлювані ними системи інтелектуального обліку надавали максимальні можливості системі та приносили переваги та задоволення як споживачам, так і компаніям учасникам енергоринку.

SM можуть надавати підтримку для вирішення питань дистанційної діагностики роботи обладнання і динамічного ціноутворення. Також існує функціонал сповіщення про несанкціоноване втручання у роботи мережі, аналізу споживання тощо у будь-який час доби. Такі функції SM додають сучасні можливості яких не існувало з моменту створення класичної електричної мережі: базу споживачів, що володіють інформацією про енергоспоживання. Користувач SM має можливість проаналізувати власне споживання енергії настільки детально, наскільки у цьому є його потреба. Результати такого аналізу дозволяють регулювати кількість, спосіб і час, протягом яких використовуються споживачі зі значним споживанням енергії. Слід враховувати, що на даний час більшість споживачів не знають, що для постачальників електричної енергії її вартість вища під час пікового попиту, у той час як електроенергія зазвичай продається за фіксованою ціною. Пропонуючи динамічне ціноутворення на основі попиту і пропозиції на електроенергію на ринку в режимі реального часу, енергокомпанії надають

можливості клієнту певним чином знизити свої рахунки за електроенергію. Це стає можливим за рахунок встановлення багатотарифних приладів обліку і простих змін, наприклад, використання потужних споживачів енергії в години непікового попиту. Крім того, подібні зміни у споживанні призводять «згладжування» або навіть до значного зменшення пікового попиту протягом доби, що може у значній мірі знижувати витрати на виробництво і передачу електроенергії.

Розглянемо основні технології і принципи функціонування інтелектуальних приладів енергії.

Активна потужність, що споживається навантаженням, як правило визначається за допомогою трансформатора струму (у варіанті котушки Роговського). Саме трансформатор забезпечує аналогове вимірювання потужності, яка протікає через прилад. Аналого-цифрове перетворення інформації датчиків формує цифровий еквівалент, що подається до мікросхеми лічильника енергії. Спеціалізований чіп АЦП займається не тільки відстеженням споживання електроенергії, передаючи дані до процесору системи, а і може виконувати додаткові функції, такі як підсилення і нормування сигналу або виявлення несанкціонованого доступу, тощо. Базові метрологічні функції SM зазвичай реалізовані як окремий функціональний блок, тобто мікросхема лічильника енергії є окремим функціональним пристроєм. Існує багато причин для вибору двокристальної архітектури, це і метрологічне мікропрограмне забезпечення, яке може вимагати ізоляційного рішення, і питання несанкціонованого втручання та внесення змін у налаштування прецизійного приладу і просто загальні вимоги кібербезпеки.

Процесорний блок (або функціональна частина) забезпечує необхідну кількість енергонезалежної пам'яті та обчислювальні потужності для обробки та фіксації параметрів підключення. Він також забезпечує функціонування більшості необхідних «інтелектуальних» функцій розумного лічильника, таких як аналіз і запам'ятовування споживання, динамічне зміна

тарифів, інші функції реагування на зміни ринку електроенергії. Усі розумні лічильники мають забезпечувати можливості двостороннього зв'язку з енергопостачаючим підприємством. Окрім вже згаданої мережі Інтернет є декілька доступних варіантів, наприклад Power Line Communications (PLC), малопотужні радіочастотні (RF) сітчасті рішення і технології стільникової бездротової глобальної мережі (WAN), бездротові мережі Zigbee, канали RS-485 або певні комбінації згаданих комунікаційних технологій. Вибір того або іншого каналу зв'язку та метода передачі інформації SM переважно продиктовано вартістю приладу, а також може залежати від можливостей існуючої інфраструктури та правил регіону.

Комунікаційні можливості є складною для вирішення проблемою для всіх технологій інтелектуального вимірювання. Інтелектуальний облік на базі SM приносить переваги кінцевим споживачам у вигляді економії енергії, зменшення викидів вуглецю, покращеної надійності обслуговування, покращення обслуговування клієнтів і швидкість реагування. Однак, щоб усі ці переваги стали реальністю, енергорозподіляючим службам і компаніям потрібен безпечний і гнучкий двосторонній зв'язок або комунікаційна інфраструктура для підключення та зв'язку з SM.

Кожен інтелектуальний прилад повинен безпечно, надійно та стійко передавати отриману інформацію до відповідного центру збору інформації. Через місце та умови ймовірного встановлення лічильників, а також інші особливості проблема може бути складною. В якості вже відомих рішень можна згадати: мережі стільникового зв'язку, супутниковий зв'язок, радіоканали в діапазоні частот, що підлягає ліцензуванню у даному регіоні, комбінації каналів у діапазонах частот, що підлягають ліцензуванню, та певних частот, що не підлягають ліцензуванню. Також достатньо поширеним є зв'язок лінією електропередач. При цьому визначальним є не тільки фізичне середовище, а й тип мережі. Можливим варіантами можуть бути фіксовані бездротові мережі, включаючи Wi-Fi WLAN та інші мережі, що так або інакше пов'язані з мережею Інтернет. На даний час можна стверджувати, що

оптимального варіанту для всіх випадків не існує, кожен має свої переваги і недоліки. Умови сільської місцевості радикально відрізняються від міських умов, а важкодоступні місця в гірських районах, як правило, дуже погано охоплені бездротовими мережами стільникового або радіозв'язку і тим більше провайдерами мережі Інтернет.

Як вже було показано у першому розділі, окрім комунікації із зовнішньою мережею SM можуть бути частиною домашньої мережі IoT, що може включати до себе обладнання комунікації та пристрої для забезпечення зв'язку інших розумних лічильників та елементів розумного будинку із зовнішньою мережею. Технології домашньої мережі можуть значно відрізнитись у різних країнах, але переважно вони будуються на технології зв'язку ZigBee.

Розглянемо протоколи, що мають забезпечувати надійну передачу даних SM.

ANSI C12.18 – це стандарт, Американського національного інституту стандартів. Стандарт визначає низькорівневі деталі протоколу та описує протокол двонаправленого зв'язку з трансоптичним портовим вимірником ANSI типу 2. Цей стандарт переважно використовується на ринках Північної Америки. ANSI C12.19 є розширенням C12.18 і визначає таблиці даних. ANSI C12.21 визначає використання оптичного зв'язку замість модемів.

У Європі поширеним протоколом для передачі даних SM є протоколи під назвою Meter-Bus.

IEC 61107 визначає протокол зв'язку з розумними лічильниками, опублікований Міжнародною Електротехнічною Комісією. та є досить поширеним в ЄС. IEC 61107 був формально замінений на протокол IEC 62056, але IEC 61107 все ще дуже поширений через його простоту і ефективність. Протокол є напівдуплексним. Він включає надсилання даних у ASCII коді через послідовний порт. Фізичним середовищем для передачі сигналу може бути як оптичний канал з парою світлодіод-фотодіод, так і пара електричних провідників, в яких електричний сигнал модулюється за

принципами IEC-485. IEC 61107 тісно пов'язаний із протоколом FLAG, через що його часто з ним плутають. виробники SM Ferranti та Landis + Gyr були одними з перших прихильників стандарту інтерфейсу, який зрештою став підмножиною IEC1107.

Open Smart Grid Protocol (OSGP) – сімейство специфікацій, які були опубліковані Європейським Інститутом Телекомунікаційних Стандартів (ETSI). Вони використовуються у поєднанні з ISO/90, інтелектуальними приладами обліку енергії та додатками в розумних енергосистемах. Це один з найбільш поширених протоколів: мільйони інтелектуальних лічильників, що використовують OSGP, змонтовано в усьому світі. Протокол OSGP також виявив значну кількість недоліків у безпеці.

В даний час можна спостерігати тенденцію до використання технології TCP/IP у якості загальноприйнятої платформи комунікації для додатків інтелектуальних лічильників. Це призвело до того, що компанії розгортають мультикомунікаційні системи, які використовують IP-технологію у якості загальної платформи керування. Це знижує ризики інвестування в невдалий стандарт і дозволяє використовувати єдиний типовий продукт в усьому світі навіть у випадку національних відмінностей стандартів зв'язку.

2.2 Робота з даними в інтелектуальних лічильниках

Розглянемо наступну важливу технологію для систем розумних лічильників. Цією технологією є інтеграція інтелектуальних лічильників до інформаційних мереж постачальників. Також це включає процедури виставлення рахунків за спожиті ресурси, та систему управління даними.

Для впровадження концепції SMSRT GRID також достатньо важливо, щоб технології мережевого зв'язку, що будуть застосовуватись у внутрішній мережі, були сумісними і відповідати стандартам. Мережа контрактного зв'язку надає системам HVAC та іншим сумісним приладам можливості для зв'язку з інтелектуальним приладом обліку, а також постачальником. На

даний час розроблено певну кількість вузькосмугових й широкосмугових стандартів, що не мають сумісності один з одним. Щоб виправити цю ситуацію, NIST було створено групу PAP15, яка вивчила та рекомендувала механізми співіснування що надають механізми синхронізації стандартів зв'язку внутрішньої мережі. Метою групи стало забезпечення того, щоб технології мережевих комунікацій, на базі яких за звичай будуються домашні мережі, могли щонайменше співіснувати і не конфліктувати один з одним. Було обрано дві мережеві технології – HomePlug AV/IEEE 1901 і технологію ITU-T G.hn. Робочі групи цих організацій розробили достатньо ефективні механізми співіснування вказаних технологій. Альянсом HomePlug Powerline Alliance було розроблено і впроваджено стандарт домашнього зв'язку фізичними лініями електропередачі, що отримала назву HomePlug Green PHY. Цей стандарт сумісний і нормально функціонує з широко використовуваним стандартом HomePlug AV і стандартом IEEE 1901. Він базується на широкосмуговій технології OFDM. Також вже випробуваною є технологія, що має назву G.hnem для керування живленням в домашніх мережах. G.hnem базується на основі відомих вузькосмугових і низькочастотних технологіях OFDM.

Мережі SMART GRID мають особливі, що мають не тільки переваги, а й ведуть до змін, що змінюють весь сектор інформаційно-комунікаційних технологій. Розглянемо, які саме зміни вносять розумні мережі:

- нові значення і форми інформаційного потоку, що поступають з енергетичної мережі;
- нові гравці ринку енергії – децентралізовані виробники ВДЕ, звичайні споживачі та залучені споживачі;
- нові види і способи використання енергії, пов'язані з ВДЕ, а також EV, що підключені у якості буферних елементів накопичення енергії;
- нове комунікаційне обладнання – інтелектуальні прилади обліку енергії, датчики різних типів і параметрів, керуючі пристрої для

реалізації можливостей дистанційного керування обладнанням.

Такі зміни додають значну кількість додаткової інформації операторам та адміністраторам енергетичних мереж. У зв'язку з цим додатково з'являється велика кількість змінних, пов'язаних із виробництвом енергії, її розподілом та споживанням. SMART GRID розглядається як комплексне рішення для внесення змін, що зачіпають усі без виключення аспекти електроенергетики, і вони мають допомагати збільшенню ефективності усієї мережі у цілому. З цього можна зробити дуже простий висновок: оскільки інтелектуальні мережі забезпечують значну інтелектуалізацію енергетичного господарства від виробництва до споживання, можна очікувати, що мережа буде генерувати значний двонаправлений потік додаткових даних. Мало того, ці дані не є простими і примітивними, як у звичайних електромережах (наприклад, споживання одного споживача за місяць). Завдяки розширеному функціоналу інтелектуальний лічильник можна налаштувати на надсилання і споживчих показань, наприклад, кожні 5 хвилин. У результаті мережі SMART GRID отримують значні обсяги додаткових даних за певний проміжок часу, що означає більше інформації для обробки, сортування, аналізу, архівації, тощо. Саме тому необхідно передбачати наявність відповідного обладнання для роботи з даними, відповідною ємністю для зберігання даних та відповідними аналітичними методами для роботи з даними.

Інформаційні системи у роботі з даними SMART GRID. Це компоненти розумної мережі, що мають на меті забезпечення взаємодії для масштабованості та гнучкості мережі. Вони призначені для реалізації елементів контролю, завантаження даних про стан обладнання, у результаті чого може бути сформовано значення і розуміння стану ліній електропередач, енергетичного обладнання, поточного споживання енергії, тощо. До складу інформаційної системи можна включити багато компонентів, але розглянемо тільки базові.

Наглядний контроль та збір даних (SCADA) – це надійна та безпечна

система програмних та апаратних елементів і рішень, які мають бути використані для моніторингу і керування в електромережі. Система призначена для контролю за процесами розподілу енергії, відстеження та збору даних в режимі реального часу, забезпечення фіксації подій у системі і взаємодії з елементами і пристроями через людино-машинний інтерфейс. SCADA-системи знайшли широке поширення у багатьох промислових сферах, серед яких, у контексті поточної роботи, слід згадати енергетика, нафтову і газову інфраструктуру. Ці системи є дуже важливими, оскільки вони призначені для забезпечення ефективності функціонування, інтелектуальної обробки даних, зменшення часу простою через системні проблеми у мережах .

Розширена інфраструктура вимірювання (AMI) має на меті зменшити витрати часу на збір даних про споживання та виробництво електроенергії. AMI призначений для створення двонаправленого зв'язку між споживачами та операторами енергопостачання. Це дозволяє збирати з малими інтервалами часу дані про споживання енергії в мережах SMART GRID. Це також надає змогу операторам енергомереж змінювати різноманітні параметри рівня обслуговування і формувати дані про коливання споживаної потужності користувача та інші технічні параметри.

Система управління відключеннями (OMS) має життєво важливе значення для мінімізації негативних наслідків та подальшої діагностичної інформації про причини таких відключень в електропостачанні, це, у свою чергу, а має підвищувати доступність та надійності системи у цілому. Ця система також здатна відновлювати модель функціонування мережі після усунення причини відключення і відновлення робочого її стану. OMS також здатна відображати, відстежувати, класифікувати та групувати збої, що виникають у процесі функціонування мережі.

Інформаційна система клієнта (IC) – забезпечує розвиток та формування процесів взаємовідносин між споживачами електроенергії та її постачальниками. Це повноцінна система управління відносинами з

клієнтами, яка призначена для ефективного і швидкого отримання інформацію про кожного клієнта компанії. Вона допомагає надавати якісні послуги споживачам на базі попередньо зібраних даних про структуру їхнього енергоспоживання.

Геоінформаційна система (GIS). Цю систему можна уважати головним інструментом для збору і візуалізації інформації про мережу, споживачів і застосованих технологій. GIS має на меті фіксувати, зберігати, верифікувати та відображати, на перший погляд абсолютно не пов'язані інформаційні дані у їх прив'язці до поверхні Землі. Це допомагає розв'язувати реальні технічні проблеми і питання через розуміння просторових закономірностей.

Система управління реагуванням на попит (DRMS) – надає енергопостачаючим підприємствам можливість створювати персоналізовані та гнучкі та інтегровані автоматизовані платформи для ефективного та швидкого реагування на попит енергії на ринку. Це специфічна і дуже критична ланка між стороною реагування на попит в мережі (тобто кінцевим споживачем енергії) та її постачальником. Система DRMS допомагає з безпосередньою інтеграцією критично необхідного двостороннього зв'язку між споживачами та операторами мережі.

2.3 Безпека та захист даних

Необхідно розуміти, що через достатньо неоднорідну структуру зв'язку мереж SMART GRID досить важко створити прості та надійні механізми безпеки, що можна достатньо легко розгорнути для захисту процедур зв'язку між різними рівнями інфраструктури інтелектуальної мережі. Електрична мережа із традиційною архітектурою поступово перетворюється на інтелектуальну мережу, що має на меті поєднати традиційні технології електропостачання з інформаційними та комунікаційними технологіями. Як вже неодноразово підкреслювалось, саме така інтеграція дає постачальникам та споживачам електроенергії можливості для підвищення ефективності та

доступності енергосистеми, за рахунок постійного моніторингу, контролю та керування у відповідності до вимог споживачів.

Таким чином щодо системи інтелектуальної електромережі необхідно вказати наступні основні цілі безпеки:

- – наявність надійного і безперебійного постачання енергії відповідно до вимог споживача;
- – забезпечення цілісності інформації, що передається в обох напрямках;
- – конфіденційність даних споживача послуг. При цьому необхідно виділити основні вразливості мережі, різноманітні типи атак та зловмисників, а також необхідні рішення щодо забезпечення безпекових характеристик;
- – профілактичний аналіз, реактивна безпека з безпосереднім реагуванням на вторгнення та запобіганням вторгненням є недостатніми для критично важливих інтелектуальних мереж. На відміну від звичайних ІТ-систем, результати атаки на критично важливу інфраструктуру, якою якраз і є система енергопостачання, може бути руйнівним з точки зору збитків та наслідків. Таким чином, потрібно проактивно ідентифікувати потенційні впливи, щоб зменшити наслідки атаки для інтелектуальної мережі та уникнути критичних відмов або пошкоджень системи;
- – автоматичний аналіз безпекових даних для великих та гібридних систем, якими інтелектуальні мережі SMART GRID;
- – динамічні заходи безпеки, що передбачає здатність забезпечувати безпеку та відмовостійкість інтелектуальних мереж за рахунок гнучкості, що притаманні таким системам.

Розглянемо основні рішення і підходи для безпеки мереж SMART GRID.

Шифрування – процес перетворення певної інформації у такий вигляд, щоб її не можна було прочитати або ідентифікувати. Наприклад при

підключенні до мережі Інтернет за допомогою технології VPN з'єднання шифрується, а це означає, що у випадку перехоплення зловмисниками потоку даних, вони отримають умовний набір нулів і одиниць, що не дозволяє отримати зв'язну інформацію. Умовно можна уважати шифрування певним різновидом секретного коду.

Аутентифікація. Підтримка аутентифікації та контроль доступу є основними завданнями систем типу SMART GRID. Сама процедура розпізнання має бути підтверджена надійними механізмами аутентифікації. Для реалізації аутентифікації «політика неявної відмови» цінна під час отримання доступу до мережі, а також використання політики для надання дозволів на доступ тільки явним користувачам. Процедура аутентифікації може бути реалізована за допомогою протоколів SSL. Проте ці протоколи також можуть піддаватися кібератакам, наприклад, атакам типу «відмова в обслуговуванні». Мережа SMART GRID вимагає дуже високої пропускнуєї спроможності для зв'язку, а з цього можна зробити висновок про те, що методи криптографії також можуть бути використані для аутентифікації. Зрозуміло, що використання методів криптографії у значній мірі збільшує вартість системи, але саме вони можуть забезпечити відмінні механізми аутентифікації.

Захист від зловмисного програмного забезпечення. SMART GRID мережа в обов'язковому порядку вимагає захисту від зловмисного програмного забезпечення, оскільки внутрішня система та системи загального користування, підключені до SMART GRID, повинні бути захищені від кібератак. Для внутрішньої системи можна використовувати ключ виробника, що прекрасно виконує функції захисту продукту для перевірки програмного забезпечення. Основна причина, чому внутрішня система безпечна, полягає у тому, що саме такі системи підтримують лише програмне забезпечення, яке постачається тільки виробником програмного продукту. Отже для перевірки програмного забезпечення необхідно застосувати відповідний ключ виробництва, у той час як системи загального

призначення можуть підтримувати і стороннє програмне забезпечення, наприклад антивірусні програми.

Безпека мережі. віртуальна приватна мережа або VPN має на меті забезпечувати додатковий захист під час користування загальнодоступною мережею Інтернет. VPN використовує великий набір методів безпеки. Це можуть бути методи шифрування та захист певних даних, оскільки саме вони можуть бути під загрозою у процесі користування інфраструктурою загальнодоступної мережі. Віртуальні приватні мережі VPN також бажано використовувати для формування каналу зв'язку, оскільки вони можуть забезпечити достатньо безпечний шлях проходження даних.

3 РЕАЛІЗАЦІЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЗБОРУ І ОБРОБКИ ДАНИХ МЕРЕЖ SMART GRID НА БАЗІ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЛКА ПД

3.1 Розробка загальної структури збору і обробки даних мережі SMART GRID

На даний час електричні мережі Україні можна представити у вигляді класичної радіальної структури, як власне власно кажучи і мережі більшості інших енергетично розвинених країн Європи і світу. Насправді більш ефективною є закільцьована, але такі приклади зустрічаються вкрай рідко. Подібна структура є «жорсткою» по факту для кінцевого споживача вона виконує лише функції доставки електричної енергії. З точки зору постачальника енергії на показану структуру покладаються додатково специфічні регуляторно-захисні функції, але це внутрішні технічні функції компанії постачальника. Як такої інтелектуальної складової про які йшлося у перших двох розділах роботи у сучасних мережах України практично немає. Якщо говорити про функції регулювання і захисту, то це лише функціонал підтримання допустимого діапазону напруг і захисту елементів електромережі у випадку виникнення нештатних ситуацій або аварій на лінії. Також слід згадати, що функції захисту, фактично, передбачають лише ізоляцію або відключення аварійної ділянки від загальної мережі. Подальше з'ясування причин, що викликали аварійну ситуацію, зазвичай відбуваються у ручному режимі, або при наявності спеціальних технічних засобів – в автоматичному (напівавтоматичному) режимі. Також неприємним недоліком мережі є відсутність гнучкості, оскільки через це страждає також її доступність. Ця проблема призводить до того, що зміни у кількості або структурі споживачів енергії (особливо споживачів з великим споживанням або великим виробництвом) може вимагати значних змін у структурі мережі, включно зі зміною у її топології. Якщо говорити про надійність

функціонування такої мережі, то вона визначається великою кількістю факторів але, якщо говорити про суто утилітарні моменти з точки зору кінцевого споживача енергії, то безперебійність і якість отримання ним електроенергії є недостатньою.

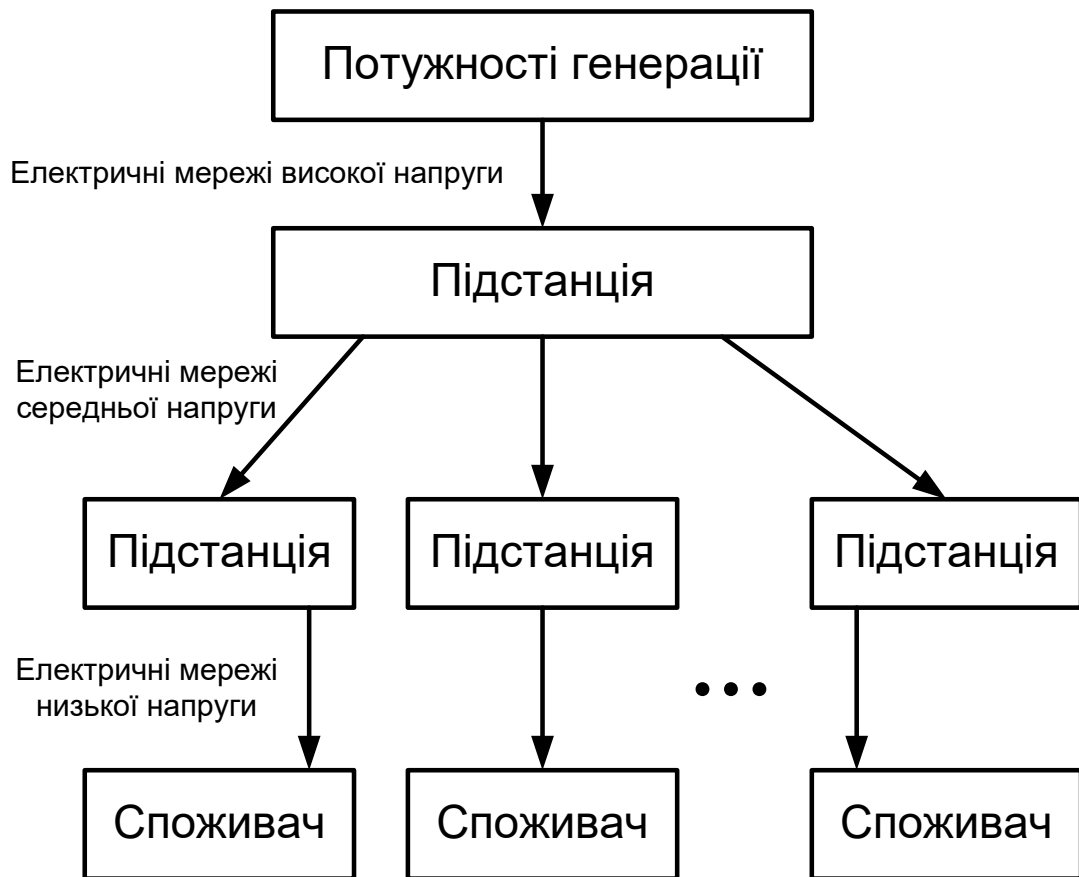


Рисунок 3.1 – Спрощена топологія електричної мережі України

Питаннями уведення до енергосистеми України інтелектуальних функцій у контексті SMART GRID займається значна кількість науковців і спеціалізованих підприємств і організацій, але прикладів практичних проектів вкрай мало і вони носять несистемний характер. Особливо загострилась проблема практичного втілення розробок під час пандемії COVID-19 у світі. Якщо ж говорити про часи від початку повномасштабного вторгнення Росії в Україну від 24 лютого 2022 року, то загострилась не тільки проблема втілення нових проектів, а і постала нова актуальна задача:

повне відновлення енергосистеми після її масованих бомбардувань і фактичного знищення. Але, все ж таки наведемо відомий приклад реалізації проекту елементів SMART GRID. У роботі [8] запропонована концепція відомчої системи збору метеоданих для енергетичних компаній. Пропонована система дозволяє автоматизувати процеси збору, обробки і передачі верифікованих метеорологічних даних, що характеризують зовнішнє середовище. Розробка пропонується для застосування у складі глобальної системи для реалізації функцій зі збору технічних параметрів роботи електромережі, а також автоматичного перемикання або відключення елементів мережі. Також одним із перспективних напрямків можна уважати реалізацію функції прогнозування, а також при подальшому розвитку і запобігання аварійним режимам роботи елементів і складових електромережі.

Якщо безпосередньо переходити до питань технічної реалізації інтелектуалізації мереж України у контексті SMART GRID, то технічні засоби або складові елементи подібних систем можна умовно розділити на щонайменше чотири групи:

- елементи призначені для первинного збору інформації (датчики або трансформатори струму, датчики напруг, датчики температури й інших метеопараметрів, тощо);
- елементи, формування каналів зв'язку і передачі даних (дротовий, оптоволоконний, радіо-, стільниковий, або їхні комбінації);
- елементи що безпосередньо виконують обробку інформації (контролери різних типів і потужностей, індустріальні комп'ютери або комп'ютери загального призначення, сервери, спеціалізовані системи обробки інформації, тощо);
- елементи, що виконують безпосередню комутацію або зміну режимів роботи електромереж (перемикачі, роз'єднувачі, комутатори, елементи трансформаторних підстанцій, безпосередньо лінії електропередач та ін.).

Для визначення місця елементів, що пропонуватимуться у даній роботі, згадаємо відомі рішення від провідних компаній світу. Так відомими елементами першої групи можна уважати технології і рішення компанії LineVision [7]. Вже відомими і апробованими технологіями передачі даних із другої групи є, наприклад, рішення для передачі даних безпосередньо лініями електропередач від Prime і G3-PLC. Якщо говорити про більш глобальні і реалізовані проекти концепції SMART GRID, то у якості прикладів можна навести розробки управління енергетики Нью-Йорка NYPA у партнерстві з Electric Power Group та Bonneville Power Administration. А саме це блок фазових вимірювань та відповідна аналітична платформа, яка надала енергопостачальній компанії розширені можливості оперативного контролю за роботою мережі у режимі реального часу. Ще одним прикладом є розробка компанії Energy у партнерстві з GE Renewable Energy, Schneider Electric, RTE та Alliander. Їх перший проект у рамках DSAS призначений для імплементації елементів ВДЕ генерації і відповідної оптимізації електричних підстанцій. Ще одним проектом є PACIS – що виконує функції цифрового моніторингу, захисту та керування підстанції [6, 37, 36].

У контексті даної кваліфікаційної роботи і умовній класифікації елементів, щойно розглянутих, можна визначити які саме технічні засоби та елементи SMART GRID можуть бути ефективно реалізовані на базі класичної структури ЛКА ПД або її вдосконалених прототипів. Так можна стверджувати що на базі ЛКА ПД можна будувати елементи першої і третьої груп (елементи призначені для первинного збору інформації та елементи що безпосередньо виконують обробку інформації). При цьому якщо говорити про групу датчиків, то мова йде про достатньо складні системи (наприклад про роботу з метеопараметрами або комплексний первинний збір даних). Якщо ж говорити про третю групу, то ніяких обмежень у реалізації систем на базі ЛКА ПД практично немає: так може бути реалізований функціонал прийому і попередньої обробки від пристроїв першої групи з подальшим відправленням до пунктів SCADA або АСКОВЕ; логічно також на ЛКА ПД

реалізовувати безпосереднє керування виконавчими елементами системи з четвертої групи. Слід також вказати, що до керуючих пристроїв третьої групи пред'являються найбільш жорсткі вимоги щодо безвідмовності роботи, швидкодії та надійності роботи, а саме структури ЛКА ПД відповідають цим підвищеним вимогам.

Якщо спробувати трансформувати структуру, що показана на рисунку 3.1 у рамках концепції SMART GRID із умовним розташуванням згаданих елементів першої і третьої груп, то отримаємо пропоновану структуру фрагменту інтелектуальної мережі (рисунок 3.2)

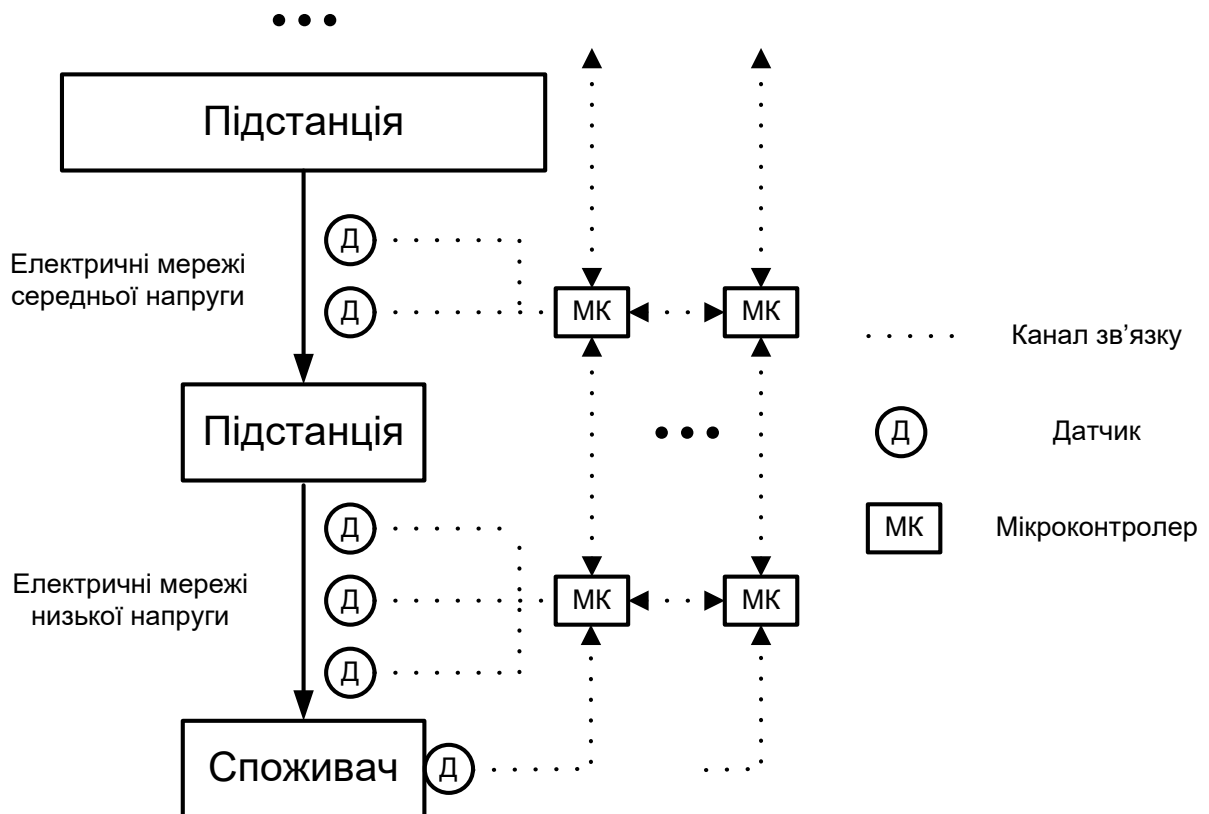


Рисунок 3.2 – Структура енергомережі з елементами її інтелектуалізації

Таким чином визначившись з функціональним призначенням і місцем розташування у складі інтелектуальної мережі елементів на базі логічних керуючих автоматів паралельної дії, можна безпосередньо переходити до їх розробки і реалізації.

3.2 Реалізація елементів інтелектуальної мережі на базі ЛКА ПД

В основу елементів керування і первинної обробки даних інтелектуальної мережі пропонується покласти логічний керуючий автомат паралельної дії (або у випадку розгляду його фізичної реалізації – ПЛІС-контролер паралельної дії), класичну структуру якого показано на рисунку 3.3 [9, 3].

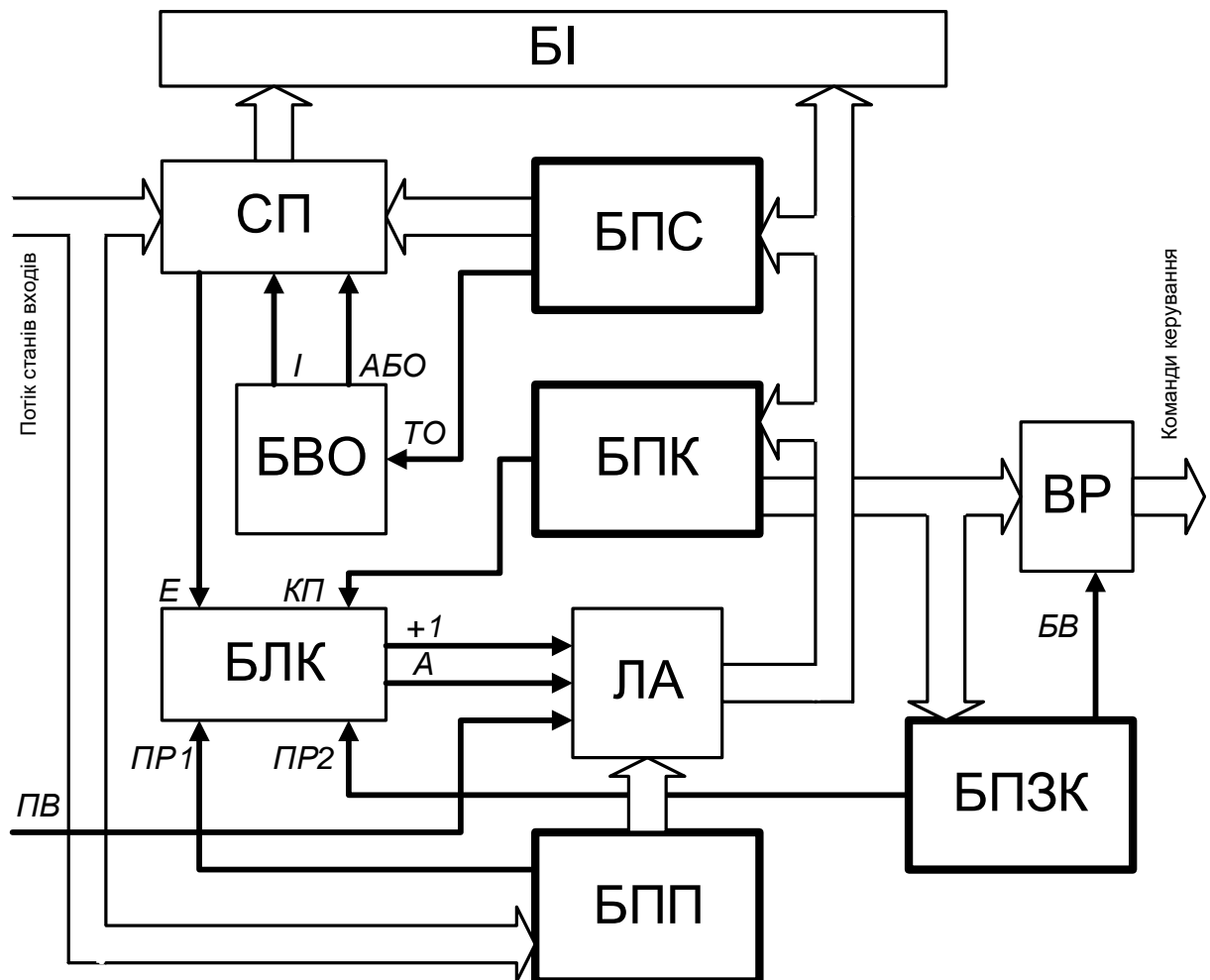


Рисунок 3.3 – Структура класичного керуючого автомату паралельної дії

Для базового розуміння процесу його функціонування вкажемо чотири базових блоки – блоки пам'яті, що формують його основну логіку роботи і процедуру переходів рядками керуючої програми:

- БПС – блок пам'яті станів;
- БПК – блок пам'яті команд;
- БПП – блок пам'яті переходів;
- БПЗК блок пам'яті заборонених комбінацій.

Призначення блоку БПС заключається у зберігання інформації про очікувані стани зовнішнього середовища (тобто інформації від датчиків детермінованих станів зовнішнього середовища, що визначають наступний крок алгоритму функціонування керуемого об'єкта). Блок БПС у загальному випадку, зберігає набір команд керування виконавчими механізмами. У випадку якщо ЛКА ПД використовується не для керування виконавчими механізмами, а для обробки потоку інформація, команди БПС можна розглядати як звичайний потік вихідних даних. Блок БПП містить у собі інформацію про адреси переходів до підпрограм (якщо алгоритм функціонування об'єкту передбачає алгоритм з розгалуженнями). При цьому розгалуження алгоритму функціонування станами стохастичних входів (стохастичних датчиків).

У контексті поточного дослідження особливо слід згадати елементи ЛКА ПД, що визначають безпекові і надійнісні характеристики ЛКА ПД (ПЛІС-контролера ПД) До таких визначальних блоків відноситься вихідний регістр (ВР) та БПЗК, до якого записуються комбінації команд керування обладнанням електромережі, видача яких є неприпустимою і має бути блокована в обов'язковому порядку (власне блокування виконується за допомогою ВР). Слід вказати, що це випадок реалізації елементів SMART GRID на ЛКА ПД для керування виконавчими елементами мережі (тобто реалізації елементів третьої групи вищерозглянутої класифікації). Детально про алгоритми і теоретичне обґрунтування роботи механізму блокування заборонених комбінацій команд керування можна ознайомитись в [3].

Для розуміння загального алгоритму функціонування ЛКА ПД вкажемо інші блоки, що призначені для забезпечення загальної логіки роботи, виконують інтерфейсні функції, а також функції індикації про

поточний стан входів:

- БЛК – блок логічного керування;
- ЛА – лічильник адреси;
- СП – схема порівняння;
- БВО – блок вибору операції;
- Бі – блок індикації;

Детально процес функціонування ЛКА ПД і функціонал деяких блоків (Бі, БВО, призначення деяких сигналів) не розглядатиметься (з ним можна ознайомитись, наприклад, в [3]), але у загальному випадку процес відпрацювання керуючої програми виглядає наступним чином.

Сигнали від детермінованих і стохастичних датчиків (потік станів входів) поступають на схему порівняння і БПП. При цьому БПП за їх значеннями визначає адресу переходу до однієї з інших підпрограм (у випадку наявності співпадіння у результаті порівняння), що записані до цього блоку. СП також порівнює вхідний потік із станами, що очікуються на поточному кроці виконання програми (і записані до БПС). У залежності від результатів виконання порівняння в блоках СП і БПП (і наявності співпадіння комбінації вхідних сигналів з такими, що записані до БПП і БПС) відбувається, або перехід до наступного кроку виконання поточної підпрограми, або перехід до початкової адреси іншої підпрограми. Пріоритети виконання того або іншого переходу залежать від алгоритму функціонування керуемого об'єкта і у загальному випадку вищий пріоритет має перехід до наступного кроку відпрацювання поточної підпрограми. Власне питаннями пріоретизації займається блок БЛК, який власне і визначає загальну логіку роботи ЛКА ПД. Лічильник адреси безпосередньо виконує фіксацію адреси для відпрацювання наступного кроку програми: у випадку істинності від блоку СП і наявності сигналу «+1» від БЛК, ЛА інкрементує адресу (рядок програми) на одиницю, чим забезпечується перехід до відпрацювання наступного рядка поточної підпрограми; у випадку істинності від блоку БПП і наявності сигналу «А» від БЛК, ЛА змінює адресу (рядок

програми) на значення від БПП, чим забезпечується перехід до першого рядка іншої підпрограми.

У загальному випадку БЛК визначає логіку роботи ЛКА ПД у відповідності до виразів (3.1) і (3.2).

$$A = КП \vee ПР1 \vee ПР2, \quad (3.1)$$

$$+1 = E \wedge \overline{КП} \wedge \overline{ПР1} \wedge \overline{ПР2}, \quad (3.2)$$

де КП – ознака кінця підпрограми;

ПР1 – ознака переривання від блоку пам'яті переходів;

ПР2 – ознака переривання від блоку пам'яті заборонених комбінацій;

A – початкова адреса підпрограми;

E – сигнал еквівалентності;

+1 – сигнал переходу до наступного рядка.

У випадку якщо ЛКА ПД розглядається не як елемент, що виконує керуючі функції, а як елемент обробки потоку даних, до БПС, БПК та інших блоків пам'яті записуються значення, що визначаються алгоритмами перетворення даних. У такому випадку не можна говорити про команди керування виконавчими механізмами, але це не означає, що ЛКА ПД не може бути використаний для таких цілей, це просто ускладнює опис логіки його роботи.

Окремо слід підкреслити, що усі розглянуті вище процеси відбуваються паралельно, одночасно за один такт дискретного автоматного часу. Таким чином час обробки потоку вхідних сигналів (вхідних даних) і формування команд керування керуючими механізмами (формування потоку вихідних даних) ніяким чином не залежить ні від кількості цих вхідних сигналів, ні від кількості керуючих пристроїв

3.3 Розробка елементів збору і обробки даних в мережі на базі ЛКА ПД з функціями нечіткого логічного висновку

Як вже було частково зазначено у попередніх розділах, класичні ЛКА ПД, а також ПЛІС-контролери паралельної дії, що побудовані на їх базі, проявляють максимум своїх переваг при створенні систем керування механізмами або процесами дискретної циклічної дії. Якщо говорити про електричні мережі взагалі або SMART GRID мережі, як їх функціонально розширені аналоги, то вони ніяк не підпадають у розряд об'єктів циклічної дії. Це призводитиме до того, що системи керування, збору або обробки даних електромережі, створені на базі керуючих пристроїв з паралельною архітектурою не зможуть повністю розкрити того потенціалу можливостей, що в них закладено. Отже було проведено дослідження щодо пошуку підходів і методів щодо розширення функціональних можливостей ЛКА ПД і ПЛК ПД, що побудовані на їх базі. У результаті було запропоновано декілька рішень [4, 2]. Серед них слід згадати розширення функціоналу за рахунок введення програмованих користувачем таймерів, а також введення математичного апарату нечіткого логічного висновку.

У контексті створення технічних засобів збору даних в інтелектуальних енергетичних мережах додатковий функціонал ЛКА ПД у вигляді програмованих таймерів не дозволяє говорити про можливості розширення сфер їх застосування. У той же час можливості роботи з математичним апаратом нечіткого логічного висновку має значні перспективи щодо побудови спеціалізованих систем і пристроїв на базі таких ЛКА (що отримали назву АПДН [1]) і тому є декілька причин, серед яких потрібно виділити дві найважливіші:

- природна паралельність процедури виконання процедури нечіткого логічного висновку;
- наявність невизначеності вхідних величин в електроенергетиці.

Розглянемо більш детально кожен з вищепойменованих причин у

контексті поточної кваліфікаційної роботи.

Якщо говорити про природну паралельність виконання процедури нечіткого логічного висновку, то це є абсолютно обов'язковою умовою інтеграції таких можливостей до ЛКА ПД. Якщо будь-який додатковий функціонал не буде відповідати цій умові, то ЛКА ПД втратить свою базову відмінність і перевагу над класичними ПЛК послідовної дії – можливість обробляти нескінченну кількість сигналів від датчиків і формувати нескінченну кількість команд керування виконавчими механізмами за один такт дискретного автоматного часу. До того ж така паралельність нечіткої логіки дозволяє дуже ефективно і просто реалізувати її у складі ЛКА ПД

Щодо наявності невизначеності вхідних величин, то це твердження базується на тому, що переважна більшість рішень, що приймаються в електроенергетиці приймаються в ситуаціях неповноти або невизначеності (у більшій або меншій мірі) інформації. Наслідком цього може бути неточність або неправильність результатів. Особливо критичною стала ця проблема у поточний час, коли у наслідок масованих атак Росії на українську енергосистему значна частина інфраструктури або пошкоджена, або повністю знищена. Таким чином невизначеність однозначно може виникнути у процесі (або спробі) вимірювання деякої фізичної величини, що характеризує технологічний процес в енергетиці. І якщо раніше можна було говорити про, так би мовити, про «звичайну» природу появи невизначеності, наприклад погрішності вимірювального приладу, наявності випадкової величини при формуванні масиву даних, або ситуація коли вимірювання відбувається опосередковано, то зараз такі невизначеності можуть мати абсолютно іншу природу. Наприклад достатньо типовою може бути ситуація, коли обладнання, що формує інформацію про фізичний процес, знаходиться у зоні бойових дій, і, можливо, є пошкодженим, або надає лише часткову інформацію, або взагалі у певні періоди часу інформація відсутня взагалі. У випадках класичних систем керування (наприклад на базі класичних ПЛК послідовної дії) можна застосувати детермінізацію (наприклад застосувавши

метод статистичного усереднення), але слід розуміти, що у такому випадку частину даних буде просто втрачено.

Перш ніж розглядати структуру АПДН необхідно з'ясувати тих вхідних і вихідних даних, з якими будемо мати справи. У загальному випадку вони можуть бути аналоговими, цифровими у двійковому форматі, а також цифровими у фазифікованому форматі.

Загальне представлення АПДН з погляду Загальне представлення АПДН з погляду на структуру його вхідних і вихідних даних представлено на рисунку 3.4, на якому показано наступну структуру вхідних і вихідних даних: $fx_1...fx_n$ – вхідні фазифіковані дані; $a_1...a_k$ – k цифрових двійкових входів; $g_1...g_p$ – p аналогових входів; $fy_1...fy_l$ – вихідні фазифіковані дані; $c_1...c_m$ – m цифрових двійкових виходів.

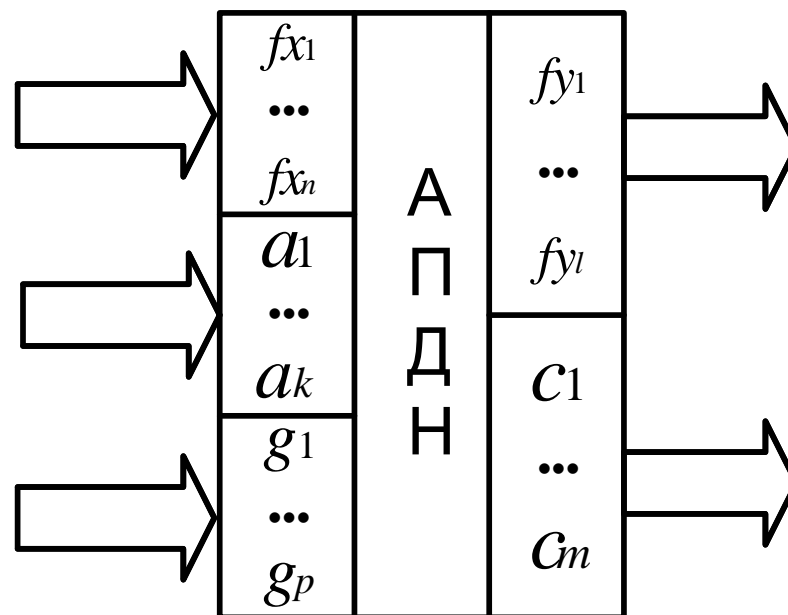


Рисунок 3.4 – Узагальнене представлення АПДН

Слід також вказати те, що вхідні і вихідні фазифіковані дані, також представлено своїм еквівалентним двійковим цифровим кодом. Так, наприклад у випадку виконання процедури фазифікації за вісьмома рівнями еквівалентний цифровий двійковий код фактично буде представлено

трьохрозрядним звичайним двійковим кодом, а у випадку шістнадцятиточкової фазифікації, код буде чотирьохрозрядним.

Якщо спробувати дійти певної уніфікації вхідних і вихідних даних, то можна дійти наступного висновку: двійкові дані можна представити так само як нечіткі, але при цьому з значенням μ -функції, може приймати лише два значення – 0 і 1. У той самий час у випадку нечіткого представлення значення μ -функції може бути представлено будь-яким значенням у діапазоні від 0 до 1. Ілюстрація μ -функції для обох наведених випадків показано на рисунку 3.5.

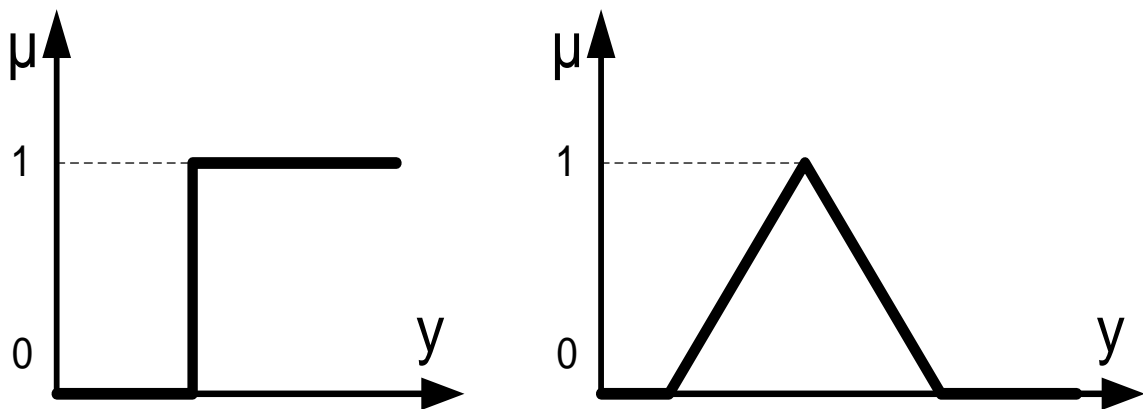


Рисунок 3.5 – Ілюстрація загального вигляду μ -функції для двійкової і нечіткої форми

Таким чином можна прийти до наступного висновку, що після виконання процедури фазифікації вхідні дані можуть бути представлені простим двійковим цифровим кодом певної розрядності. При цьому від розрядності коду залежатиме лише точність процедури фазифікації (або навпаки). У випадку якщо розрядність цифрового коду велика – маємо точну фазифікацію, у випадку зменшення розрядності – точність падатиме, вплоть до переходу до прямокутної форми μ -функції для однорозрядного цифрового коду. Отже у результаті можна прийти до наступного висновку: як

фазифіковані, так і нефазифіковані дані при обробці структурами АПДН можуть бути розглянуті як уніфікований цифровий код, і відповідно, процедура робота з цими різними типами даних буде співпадати.

Отже, якщо безпосередньо переходити до структури АПДН для збору і обробки інформації в інтелектуальних енергетичних мережах, то за основу може бути взята розглянута структура класичного ЛКА ПД, що показана на рисунку 3.3.

В [1] наведено спробу розв'язання подібної задачі, і наведено структуру АПДН, показану на рисунку 3.6.

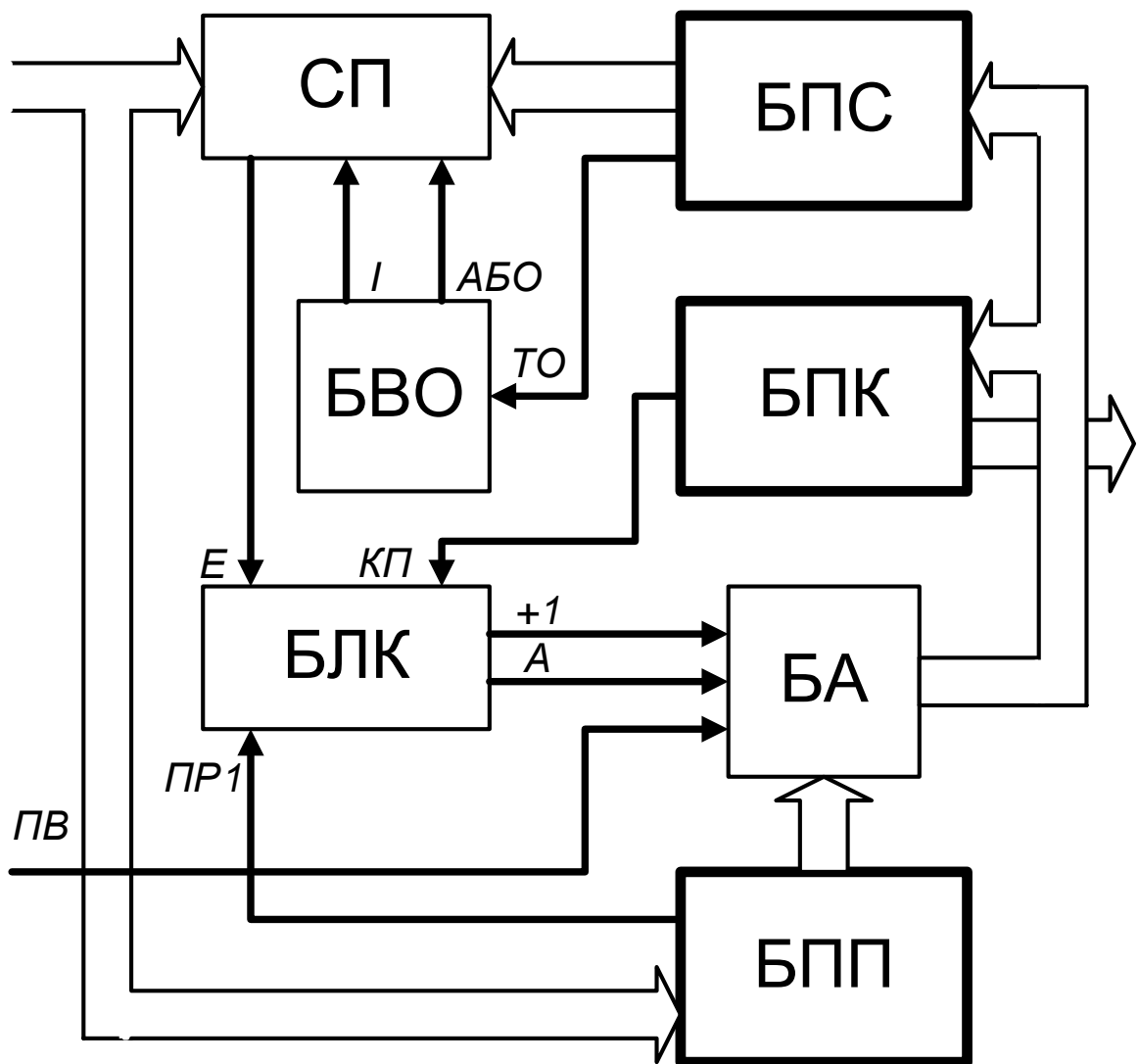


Рисунок 3.6 – Структура АПДН для функцій збору даних

Отже розглянемо базові відмінності і особливості функціонування АПДН у порівнянні з базовою структурою ЛКА ПД.

У зв'язку з тим, що візуальний контроль про хід технологічного процесу є неактуальним (особливо у випадку наявності фазифікованих вхідних-вихідних даних представлених в еквівалентному двійковому цифровому коді), зі структури було виключено блок індикації блоку індикації (БІ).

Переважає більшість інших блоків ЛКА ПД у структурі АПДН збереглась, хоча деякі з них частково або повністю змінили свою функціональність.

Розглянемо особливості та відмінності функціонування АПДН у порівнянні з ЛКА ПД для можливостей реалізації саме функцій збору інформації в SMART GRID.

Так блок пам'яті переходів БПП, через відсутність необхідності формування алгоритмів з розгалуженнями, втрачає свою функціональність з формування адрес переходів, натомість разом з блоком БПК – команд, виконує функції зберігання таблиці виконання нечіткого логічного висновку. Оскільки саме процедура нечіткого логічного висновку є базовим функціоналом АПДН, то на ці два блоки пам'яті припадає основна частина програмного навантаження.

Блок пам'яті станів БПС зберігає свою функціональність зі зберігання послідовності виконуваних команд, але у випадку відсутності такої послідовності (тобто наявності лише ситуативного реагування на потік вхідних даних) цей блок може бути виключено зі структури АПДН.

У структурі АПДН з'являється новий блок – блок адресації (БА). цей блок виконує функції подібні до лічильника адреси (ЛА) у структурі ЛКА ПД. Така зміна пов'язана з тим, що базовою функцією АПДН є формування нечіткого логічного висновку (зв'язка блоків БПП, БПК та БА), а не послідовне відпрацювання рядків програми (де базовою є зв'язка блоків БПС та ЛА)

Окремого розгляду потребує той факт, що зі структури ЛКА ПД повністю виключено елементи, що забезпечували неவிдачу заборонених (таких що можуть призвести до аварії на керованому об'єкті) комбінацій команд керування виконавчими механізмами – блок пам'яті заборонених комбінацій (БПЗК) і вихідний реєстр (ВР). Таке рішення обґрунтовано тим, що у випадку реалізації елементів збору даних в інтелектуальних енергетичних мережах (це актуально у контексті саме теми кваліфікаційної роботи), проблема видачі заборонених комбінацій команд керування дійсно відсутня. Це можна пояснити тим, що як таких керуючих механізмів може і не бути, а вихідними сигналами є інформаційний потік вихідних даних, для якого поняття «забороненої комбінації» може бути відсутнє в принципі. Таким чином у контексті розгляду класифікації, що була показана у розділі 3.1 кваліфікаційної роботи, розглянута структура АПДН повністю підходить для реалізації пристроїв першої групи (елементи призначені для первинного збору інформації).

Якщо все ж таки розширити сфери застосування АПДН і на пристрої третьої групи (елементи що безпосередньо виконують обробку інформації), про що також згадувалось раніше, то виключення блоків БПЗК і ВР зі структури ЛКА ПД є недоцільним, через те, що ці пристрої можуть надсилати команди керування пристроям четвертої групи (елементи, що виконують безпосередню комутацію або зміну режимів роботи електромереж). Абсолютно логічним є те, що у таких випадках контроль видачі забороненої комбінації команд керування є бажаною (якщо не обов'язковою) функцією.

Таким чином пропонована структура логічного керуючого автомата паралельної дії з функціями нечіткого логічного висновку і додатковими безпековими функціями, що орієнтований на реалізацію систем контролю або керування (або просто обробки інформації) в інтелектуальних мережах SMART GRID показано на рисунку 3.7.

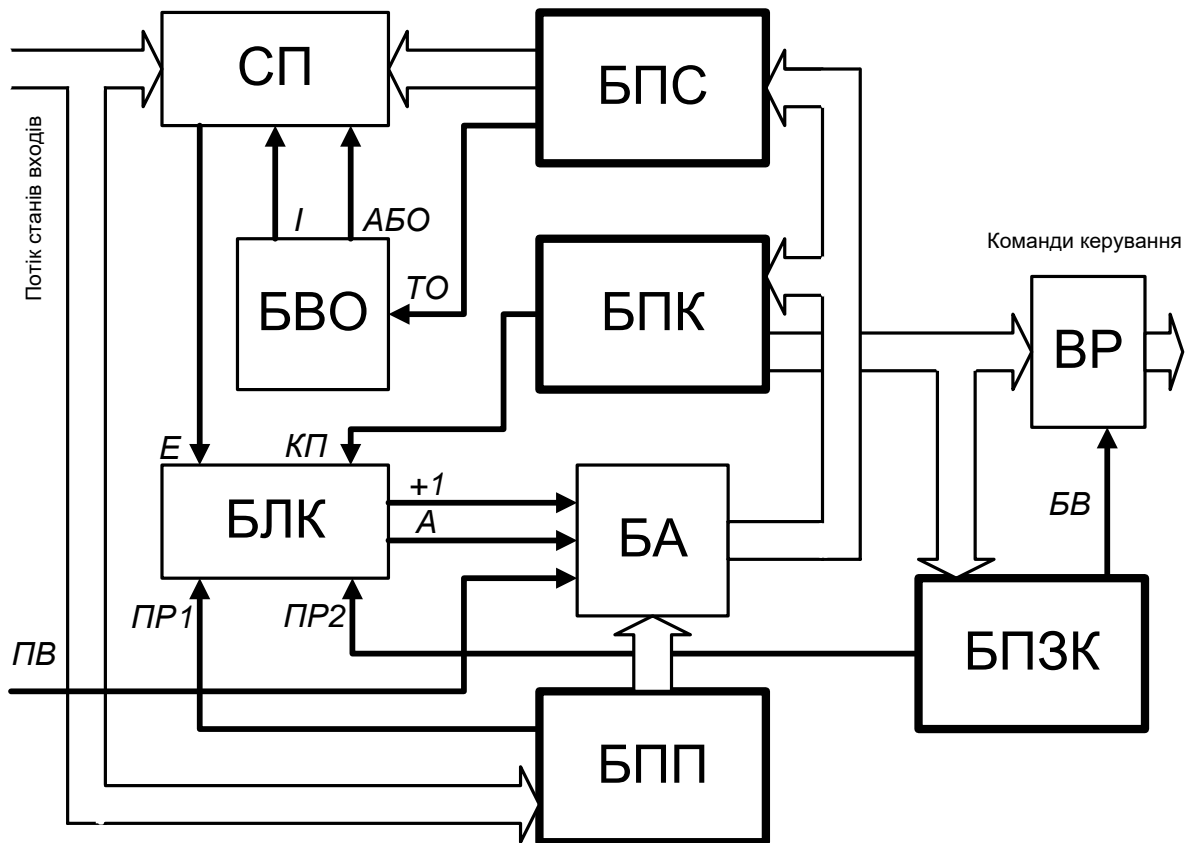


Рисунок 3.7 – Структура АПДН для виконання функцій контролю і керування

Отже принципи функціонування представленого АПДН для систем контролю і керування співпадають із принципами функціонування АПДН на рисунку 3.6, з тією різницею, що додано функцію блокування забороненої комбінації вихідних сигналів. Принцип роботи системи блокування полягає у наступному: у випадку появи забороненої комбінації команд керування керованими механізмами на виході блоку пам'яті команд БПК, блок БПЗК виявляє її еквівалентність з однією із комбінацій що зберігається у його пам'яті та ініціює формування сигналів блокування виходу «БВ» та переривання «ПР2». Ці сигнали, у свою чергу, блокують видачу забороненої комбінації на виконавчі механізми (за допомогою вихідного регістра ВР), та переводять АПДН у захисний стан (відповідним сигналом блоку логічного керування БЛК).

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було виконано огляд існуючих рішень і технологій SMART GRID мереж та напрямків їх розвитку, досліджено архітектуру розумних електричних мереж, висвітлено питання стійкості та надійності інтелектуальних енергетичних мереж, розглянуто питання інтеграції систем зберігання та керування енергією та електромобілів до розумної мережі.

Було досліджено загальні принципи і технології реалізації інтелектуальних приладів обліку енергії, наведено роботу з даними в інтелектуальних лічильниках, приділено увагу питанням безпеки та захисту даних при передачі мережею SMART GRID.

Виконано розробку елементів збору і обробки даних мереж SMART GRID на базі перспективного ЛКА ПД: запропоновано загальну структуру збору і обробки даних мережі SMART GRID; виконано реалізацію елементів інтелектуальної мережі на базі ЛКА ПД; розроблено елементи збору і обробки даних в мережі на базі ЛКА ПД з функціями нечіткого логічного висновку.

Таким чином завдання, що поставлені у кваліфікаційній роботі успішно виконані, розроблені теоретичні підходи і структури технічних засобів реалізації системи збору і обробки даних в інтелектуальних мережах дозволяють перейти до їх практичного втілення на базі кристалів ПЛІС.

За результатами досліджень кваліфікаційної роботи опубліковано тези доповіді на дванадцятій міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації» 21-22 листопада 2024 року [5].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бовчалуок С. Я. Безпечний ПЛІС-контролер паралельної дії, як інтелектуальне ядро Smart Grid / С. Я Бовчалуок, С. О. Тимчук, І. О. Фурман [та ін.] // Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України: Вісник ХНТУСГ імені Петра Василенка, вип. 187. – Харків, 2017. – С. 51–53.
2. Бовчалуок С. Я. Визначення напрямків розвитку керуючих пристроїв з паралельною архітектурою на базі ПЛІС / С. Я. Бовчалуок, О. М. Піскар'юв, С. С. Радченко, [та ін.] // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2023. – Випуск 1 (71). – С. 69-72.
3. Бовчалуок, С. Я. Новая информационная технология логического управления в энергетике и на транспорте [Текст] / С. Я. Бовчалуок // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, 2007. – Вип. 3 – С. 47-51.
4. Гаращенко Я. В., Коломоець Б. М., Коломоець В. С. Розвиток моделі та структури керуючих пристроїв з паралельною архітектурою // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2024. – Випуск 2 (76). – С. 64-66.
5. Демченко Є. В., Бовчалуок С. Я. Бовчалуок Н. І. Технологія обробки даних і керування для інтелектуальних мереж SMART GRID // ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАТИЗАЦІЇ. Тези доповідей дванадцятої науково-технічної конференції 21-22 листопада 2024 року, Том 2: секція 4. – 2024. – С. 145.
6. Инициатива «цифровые подстанции» для модернизации сетевой инфраструктуры [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://leg.co.ua/stati/iniciativa-cifrovyue-podstancii-dlya-modernizacii-setevoy-infrastruktury.html>
7. Повышение энергоэффективности сети с помощью датчиков [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://leg.co.ua/stati/povyshenie-energoeffektivnosti-seti-s-pomoschyu-datchikov.html>

8. Титов, Н. Н. Формирование ведомственной системы сбора метеоданных в условиях эффективного оптового рынка электроэнергии [Текст] / Н. Н. Титов, Н. М. Черемисин, П. Д. Лежнюк и др. – Праці інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. Енергетичні ринки: перехід до нової моделі ринку двосторонніх контрактів і балансуєчого ринку. –К: 2009. – С.41-48.

9. Фурман, И. А., Совершенствование математической модели и архитектуры логических управляющих автоматов параллельного действия [Текст] / И. А. Фурман, С. Я. Бовчалуок // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. –№3 (59). – С. 72–76.

10. Ahmadiyahangar, R., Rosin, A., Palu, I., Azizi, A., Ahmadiyahangar, R., Rosin, A., ... & Azizi, A.(2020). Challenges of smart grids implementation. Demand-Side Flexibility in Smart Grid, 1-15. 10.1007/978-981-15-4627-3_1

11. Alam, M.Z.; Masrafy, S.E. Net Zero Energy Buildings in Bangladesh: An Investigation of Solar Panel Feasibility and Potential.Eur. J. Electr. Eng. Comput. Sci. 2023, 7, 15–19.

12. Ali, M.H.; Mehanna, M.; Othman, E. Optimal Planning of RDGs in Electrical Distribution Networks Using Hybrid SAPSOAlgorithm. Int. J. Electr. Comput. Eng. 2020, 10, 6153–6163.

13. Ali, S.; Khalil, G.; Bidram, A.A.; Seyyed, C.; Ghorashi, A.; Abadi, K. Effective Utilization of Grid-Forming Cloud Hybrid EnergyStorage Systems in Islanded Clustered Dc Nano-Grids for Improving Transient Voltage Quality and Battery Lifetime. IET Gener.Transm. Distrib. 2023, 17, 1836–1856.

14. Ali, S.S.; Choi, B.J. State-of-the-Art Artificial Intelligence Techniques for Distributed Smart Grids: A Review. Electronics 2020,9, 1030.

15. Al-Badi, A.H.; Ahshan, R.; Hosseinzadeh, N.; Ghorbani, R.; Hossain, E. Survey of Smart Grid Concepts and TechnologicalDemonstrations Worldwide Emphasizing on the Oman Perspective. Appl. Syst. Innov. 2020, 3, 5.

16. Andoni, M.; Robu, V.; Flynn, D.; Abram, S.; Geach, D.; Jenkins, D.; McCallum, P.; Peacock, A. Blockchain Technology in theEnergy Sector: A

Systematic Review of Challenges and Opportunities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 100, 143–174.

17. Andrén, F.P.; Strasser, T.I.; Resch, J.; Schuiki, B.; Schöndorfer, S.; Panholzer, G.; Brandauer, C. Towards Automated Engineering and Validation of Cyber-Physical Energy Systems. *Energy Inform.* 2019, 2, 21.

18. Arévalo, P.; Benavides, D.; Tostado-Véliz, M.; Aguado, J.A.; Jurado, F. Smart Monitoring Method for Photovoltaic Systems and Failure Control Based on Power Smoothing Techniques. *Renew. Energy* 2023, 205, 366–383.

19. Arévalo, P.; Cano, A.; Jurado, F. Determination of the Power Smoothing Effect in a Photovoltaic-Hydrokinetic System by Experimental Analysis and Pattern Search. *Energy Sustain. Dev.* 2023, 74, 158–172.

20. Cameron, C.; Patsios, C.; Taylor, P.C.; Pourmirza, Z. Using Self-Organizing Architectures to Mitigate the Impacts of Denial-of-Service Attacks on Voltage Control Schemes. *IEEE Trans. Smart Grid* 2019, 10, 3010–3019.

21. Cano, A.; Arévalo, P.; Benavides, D.; Jurado, F. Comparative Analysis of HESS (Battery/Supercapacitor) for Power Smoothing of PV/HKT, Simulation and Experimental Analysis. *J. Power Sources* 2022, 549, 232137.

22. Díaz-González, F.; Chillón-Antón, C.; Llonch-Masachs, M.; Galceran-Arellano, S.; Rull-Duran, J.; Bergas-Jané, J.; Bullich-Massagué, E. A Hybrid Energy Storage Solution Based on Supercapacitors and Batteries for the Grid Integration of Utility Scale Photovoltaic Plants. *J. Energy Storage* 2022, 51, 104446.

23. Fazal, S.; Enamul Haque, M.; Taufiqul Arif, M.; Gargoom, A.; Oo, A.M.T. Grid Integration Impacts and Control Strategies for Renewable Based Microgrid. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2023, 56, 103069.

24. García-Villalobos J., I. Zamora, J.I. San Martín, F.J. Asensio, V. Aperribay, Plug-in electric vehicles in electric distribution networks: a review of smart charging approaches, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 38 (2014) 717–731.

25. Ghirardi, E.; Brumana, G.; Franchini, G.; Perdichizzi, A. H2 Contribution to Power Grid Stability in High Renewable Penetration Scenarios. *Int.*

J. Hydrogen Energy 2023, 48, 11956–11969.

26. Hu J., H. Morais, T. Sousa, M. Lind, Electric vehicle fleet management in smart grids: a review of services, optimization and control aspects, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 56 (2016) 1207–1226.

27. Hussain, H.M.; Javaid, N.; Iqbal, S.; Ul Hasan, Q.; Aurangzeb, K.; Alhoussein, M. An Efficient Demand Side Management System with a New Optimized Home Energy Management Controller in Smart Grid. *Energies* 2018, 11, 190.

28. Jihen, E.K.; Lotfi, B.; Mohamed Najeh, L. Part of Modelling and Optimal Management of Smart Grids. *Int. J. Artif. Intell. Emerg. Technol.* 2022, 5, 1–9.

29. Kelly, J.; Knottenbelt, W. The UK-DALE Dataset, Domestic Appliance-Level Electricity Demand and Whole-House Demand from Five UK Homes. *Sci. Data* 2015, 2, 150007.

30. Khatoon, A.; Verma, P.; Southernwood, J.; Massey, B.; Corcoran, P. Blockchain in Energy Efficiency: Potential Applications and Benefits. *Energies* 2019, 12, 3317.

31. Le, D.P.; Bui, D.M.; Ngo, C.C.; Le, A.M.T. FLISR Approach for Smart Distribution Networks Using E-Terra Software—A Case Study. *Energies* 2018, 11, 3333.

32. Manis, P.; Bloodworth, A.G. Climate Change and Extreme Wind Effects on Transmission Towers. *Struct. Build.* 2017, 170, 81–97.

33. Moumita, S.; Suprava, C.; Niladri, D.; Pradip, K. Role of Solar Power in Sustainable Development of India. *Indon. J. Electr. Eng.* 2015, 14, 34–41.

34. Muawad, S.A.T.; Wedaa, S.A.M.; Abuelnuor, A.A.A.; Elemam, A.E.; Ali, A.M.; Aldin, A.S.G.; Osman, I.I. Waste-to-Energy Production of Alternative Energy Source Using Landfill Technology. In *Proceedings of the International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, Khartoum, Sudan, 21–23 September 2019.

35. Musleh, A.S.; Yao, G.; Muyeen, S.M. Blockchain Applications in Smart

Grid-Review and Frameworks. IEEE Access 2019, 7, 86746–86757.

36. NYPA разрабатывает технологию для отслеживания отказов электросети [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://leg.co.ua/stati/nyra-razrabatyvaet-tehnologiyu-dlya-otslezhivaniya-otkazov-elektroseti.html>

37. PACIS – цифровая система мониторинга, защиты и управления подстанции [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <https://leg.co.ua/stati/podstancii/pacis-cifrovaya-sistema-monitoringa-zaschity-i-upravleniya-podstancii.html>

38. Palaniappan, R.; Molodchyk, O.; Shariati-Sarcheshmeh, M.; Asmah, M.W.; Liu, J.; Schlichtherle, T.; Richter, F.; Kwofie, E.A.; Festner, D.R.; Blanco, G.; et al. Experimental Verification of Smart Grid Control Functions on International Grids Using a Real-Time Simulator. IET Gener. Transm. Distrib. 2022, 16, 2747–2760.

39. Patru, I.I.; Carabaș, M.; Barbulescu, M.; Gheorghe, L. Smart Home IoT System. In Proceedings of the Networking in Education and Research: RoEduNet International Conference Edition (RoEduNet), Bucharest, Romania, 7–9 September 2016.

40. Poudel, S.; Sharma, P.; Dubey, A.; Schneider, K.P. Advanced FLISR with Intentional Islanding Operations in an ADMS Environment Using GridAPPS-D. IEEE Access 2020, 8, 113766–113778.

41. Sa’ed, J.A.; Amer, M.; Bodair, A.; Baransi, A.; Favuzza, S.; Zizzo, G. A Simplified Analytical Approach for Optimal Planning of Distributed Generation in Electrical Distribution Networks. Appl. Sci. 2019, 9, 5446.

42. Sakhnini, J.; Karimipour, H.; Dehghantanha, A.; Parizi, R.M.; Srivastava, G. Security Aspects of Internet of Things Aided Smart Grids: A Bibliometric Survey. Internet Things 2021, 14, 100111.

43. Saxena N., B.J. Choi, S. Cho, “Lightweight Privacy-Preserving Authentication Scheme for V2G Networks in the Smart Grid”, IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA, 2015, pp. 604–611.

44. Senthil, R. Recent Innovations in Solar Energy Education and Research

towards Sustainable Energy Development. *Acta Innov.* 2022, 42, 27–49.

45. Shaukata N., B. Khan, S.M. Ali, C.A. Mehmood, J. Khan, U. Farid, M. Majid, S.M. Anwar, M. Jawad, Z. Ullah, A Survey on Electric Vehicle Transportation within Smart Grid System, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, pp. 1–21.

46. Singh, A.R.; Koteswara Raju, D.; Phani Raghav, L.; Seshu Kumar, R. State-of-the-Art Review on Energy Management and Control of Networked Microgrids. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2023, 57, 103248.

47. Tulpule Pinak J., Vincenzo Marano, Yurkovich Stephen, Rizzoni Giorgio, Economic and environmental impacts of a PV powered workplace parking garage charging station, *Appl. Energy* 108 (2013) 323–332.

48. Yazdaninejadi, A.; Hamidi, A.; Golshannavaz, S.; Aminifar, F.; Teimourzadeh, S. Impact of Inverter-Based DERs Integration on Protection, Control, Operation, and Planning of Electrical Distribution Grids. *Electr. J.* 2019, 32, 43–56.