

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем магістр

«Інтеграція смарт-мереж в енергосистему міста»

Виконала: студентка 2 курсу магістратури,
групи НФ-63

Сулейманова К.Е.

спеціальність:

105 Прикладна фізика та наноматеріали

освітня програма:

Прикладна фізика енергетичних систем

Керівник: доц. Сухов Р.В.

Рецензент:

Харків – 2024

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних
системах Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень)
магістр Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітньо-професійна програма Прикладна фізика енергетичних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Руслан СУХОВ
(підпис)

“ ____ ” _____ 2024 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Сулейманова Карина Ельчинівна

1. Тема роботи: «Інтеграція смарт-мереж в енергосистему міста»
керівник роботи: Сухов Руслан Володимирович, доцент
Затверджено наказом по університету від 27 вересня 2024 року № 4201-5/3081
2. Строк подання студентом роботи 29.11.2024 р.
3. Перелік питань, які потрібно розробити:
 1. Провести огляд теоретичних основ смарт-мереж.
 2. Визначити ключові компоненти смарт-мереж, їх технології, а також окреслити основні проблеми сучасних енергосистем.
 3. Проаналізувати сучасний стан розвитку смарт-мереж у Світі та в Україні.
 4. Дослідити досвід впровадження смарт-мереж, їх основні досягнення, виклики та перспективи.
 5. Розробити програмно-апаратний комплекс для інтеграції смарт-

мереж із використанням технології LoRa, описати його архітектуру та алгоритми функціонування.

6. Оцінити ефективність, масштабованість і економічну доцільність застосування зазначеного програмно-апаратний комплексу в міських енергосистемах.

7. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми кваліфікаційної роботи
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота з літературними та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання кваліфікаційної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

8. Дата видачі завдання 27 вересня 2024 року

Студентка

підпис

Карина СУЛЕЙМАНОВА

Керівник роботи

підпис

Руслан СУХОВ

Перелік скорочень та абревіатур

ВДЕ – відновлювальні джерела енергії.

FACTS – гнучкі системи передачі змінного струму.

LoRa – технологія Long Range.

РЕФЕРАТ

Сулейманова Карина «Інтеграція смарт-мереж в енергосистему міста». Кваліфікаційна робота магістра з прикладної фізики. – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2024. – 55 с.

Робота складається зі вступу, трьох розділів та висновків. Робота містить 4 рисунки, 35 використаних літературних джерел.

Ця кваліфікаційна робота присвячена розробці програмно-апаратного комплексу для інтеграції смарт-мереж у міські енергосистеми. Вона охоплює дослідження сучасних технологій енергоменеджменту, таких як інтелектуальні лічильники, відновлювані джерела енергії та системи зберігання, з акцентом на використання технології LoRa для забезпечення енергоефективного зв'язку. Робота спрямована на вдосконалення управління енергоресурсами, підвищення їхньої надійності, економічної ефективності та екологічної стійкості в умовах сучасних міст.

Ключові слова: смарт-мережа, енергосистема, відновлювані джерела енергії, сучасні міста, технологія Long Range.

ABSTRACT

Suleimanova Karyna – «Integration of Smart Grids into Urban Energy Systems». Master's Thesis in Applied Physics. – V. N. Karazin Kharkiv National University, 2024. – 55 pages.

This thesis comprises an introduction, three chapters, and conclusions. The study includes 4 figures and references to 35 sources.

The focus of this master's thesis is the development of a hardware-software solution for integrating smart grids into urban energy systems. It explores advanced energy management technologies, including smart meters, renewable energy sources, and energy storage systems, with an emphasis on utilizing LoRa technology for energy-efficient communication. The study aims to enhance energy resource management, improve reliability, boost cost efficiency, and foster environmental sustainability within the framework of modern urban environments.

KEYWORDS: Smart Grid, energy system, renewable energy sources, modern cities, LoRa technology.

ЗМІСТ

Вступ	8
1 Теоретичні основи смарт-мереж та міських енергосистем	10
1.1 Поняття та концепція смарт-мереж	10
1.2 Технології та компоненти смарт-мереж	16
1.3 Ключові вимоги та цінності нової енергетики	23
2 Аналіз сучасного стану та досвіду впровадження смарт-мереж в містах	29
2.1 Сучасний стан розвитку смарт-мереж у світі та в Україні	29
2.2 Бар'єри та проблеми інтеграції смарт-мереж	32
2.3 Перспективи розвитку смарт-мереж в міських енергосистемах	37
3 Розробка системи та її практичне застосування в міських енергосистемах	45
3.1 Принцип побудови програмно-апаратного комплексу	45
3.2 Алгоритм функціонування системи в цілому	46
3.3 Переваги та перспективи системи	46
Висновки	51
Список використаних джерел	52

Вступ

Розвиток енергетичної інфраструктури в умовах зростаючого енергоспоживання, інтенсифікації урбанізації та інтеграції відновлюваних джерел енергії вимагає нових підходів до управління міськими енергосистемами. Традиційні централізовані енергомережі вже не можуть ефективно відповідати на виклики сучасності, такі як нестабільність генерації відновлюваних джерел, зростання попиту на електроенергію, необхідність підвищення енергоефективності та екологічні вимоги. У цьому контексті актуальним є впровадження смарт-мереж, які поєднують інноваційні технології передачі даних, автоматизацію процесів, аналіз великих обсягів інформації та інтеграцію децентралізованих джерел енергії.

Смарт-мережі дозволяють не лише забезпечити ефективне управління енергетичними потоками, але й значно підвищити гнучкість, надійність і екологічність енергетичної інфраструктури. Особливу роль у цьому відіграють технології передачі даних, такі як LoRa, які забезпечують низьке енергоспоживання, великий радіус дії та високу надійність комунікації. Інтеграція цих технологій у міські енергосистеми сприяє створенню більш стійкої, адаптивної та економічно ефективної інфраструктури, здатної відповідати сучасним і майбутнім потребам міст.

Актуальність теми цієї роботи зумовлена потребою модернізації міських енергосистем у контексті сталого розвитку. Використання смарт-мереж із сучасними засобами моніторингу, автоматизації та управління сприяє значному підвищенню енергоефективності, зменшенню втрат енергії та інтеграції відновлюваних джерел без шкоди для стабільності мережі. Технологія LoRa, яка забезпечує енергоефективний і безпечний обмін даними, стає ключовим компонентом для впровадження інноваційних рішень у міській енергетиці.

Мета цієї роботи полягає у розробці програмно-апаратного комплексу для інтеграції смарт-мереж у міські енергосистеми, який забезпечує

ефективний моніторинг, управління та аналіз енергетичних ресурсів із використанням сучасних технологій передачі даних.

Об'єктом дослідження є смарт-мережі як інноваційна складова міських енергосистем.

Предметом дослідження є програмно-апаратний комплекс, побудований на основі технології LoRa, що призначений для забезпечення моніторингу, обробки та передачі даних у міських енергомережах.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі **завдання**:

- провести огляд теоретичних основ смарт-мереж;
- визначити ключові компоненти смарт-мереж, їх технології, а також окреслити основні проблеми сучасних енергосистем;
- проаналізувати сучасний стан розвитку смарт-мереж у Світі та в Україні;
- дослідити досвід впровадження смарт-мереж, їх основні досягнення, виклики та перспективи;
- розробити програмно-апаратний комплекс для інтеграції смарт-мереж із використанням технології LoRa, описати його архітектуру та алгоритми функціонування;
- оцінити ефективність, масштабованість і економічну доцільність застосування зазначеного програмно-апаратний комплексу в міських енергосистемах.

Результати роботи спрямовані на вирішення низки ключових завдань міської енергетики, таких як підвищення ефективності управління енергоресурсами, зменшення втрат енергії, інтеграція відновлюваних джерел енергії та забезпечення надійного функціонування системи навіть у складних умовах. Запропоновані підходи та рішення мають значний потенціал для впровадження в рамках концепції "розумного міста" та відповідають сучасним вимогам сталого розвитку.

1 Теоретичні основи смарт-мереж та міських енергосистем

1.1 Поняття та концепція смарт-мереж

Сучасна енергетика перебуває на порозі фундаментальних перетворень, зумовлених глобальними викликами та тенденціями. Зростаюче споживання електроенергії, обмеженість традиційних енергетичних ресурсів, а також необхідність зменшення впливу на довкілля вимагають пошуку нових підходів до управління енергосистемами. У цьому контексті концепція смарт-мереж набуває особливої актуальності. Смарт-мережі, або інтелектуальні електричні мережі, представляють собою еволюційний розвиток електроенергетичних систем, інтегруючи в себе передові інформаційно-комунікаційні технології з метою підвищення ефективності, надійності та стійкості енергопостачання.

Поняття смарт-мережі ґрунтується на ідеї двостороннього обміну енергією та інформацією між усіма учасниками енергетичного ринку — від великих генераторів до кінцевих споживачів. Це досягається за рахунок впровадження інтелектуальних лічильників, сенсорів, автоматизованих систем управління та комунікаційних платформ, які забезпечують реальний час моніторингу та управління всіма аспектами енергосистеми [5]. Такий підхід дозволяє оптимізувати процеси генерації, передачі та споживання електроенергії, враховуючи динамічні зміни в попиті та пропозиції, а також інтегрувати відновлювані джерела енергії та децентралізовану генерацію.

З фізичної точки зору, смарт-мережі представляють собою складні динамічні системи, які вимагають глибокого розуміння електромагнітних процесів, перехідних явищ та теорії автоматичного управління [2]. Електроенергетична система, будучи одним з найбільших технічних об'єктів, функціонує на основі закону збереження енергії, а її стійкість та надійність залежать від балансу активної та реактивної потужності. Смарт-мережі дозволяють більш ефективно керувати цими параметрами, використовуючи алгоритми оптимізації та передові технології збору та аналізу даних.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) є одним з ключових аспектів смарт-мереж. ВДЕ, такі як сонячні та вітрові електростанції,

характеризуються непостійною та непередбачуваною генерацією, що ускладнює їх інтеграцію в традиційні енергосистеми. Смарт-мережі, за рахунок використання систем зберігання енергії та передових методів прогнозування, дозволяють згладжувати ці коливання та забезпечувати стабільність мережі. Крім того, розвиток технологій децентралізованої генерації та мікромереж дозволяє споживачам стати активними учасниками ринку, виробляючи електроенергію для власних потреб та продажу надлишків.

Автоматизація та цифровізація є ще одним важливим аспектом смарт-мереж. Використання інтелектуальних лічильників та сенсорів забезпечує точний та своєчасний збір даних про споживання, стан обладнання та параметри мережі [4]. Це дозволяє операторам мережі приймати обґрунтовані рішення, оперативно реагувати на аварійні ситуації та оптимізувати роботу системи. Застосування алгоритмів штучного інтелекту та машинного навчання сприяє покращенню прогнозування навантаження, виявленню аномалій та підвищенню ефективності управління.

Комунікаційні технології відіграють критично важливу роль у функціонуванні смарт-мереж. Надійна та швидка передача даних між різними компонентами системи забезпечує координацію дій та синхронізацію процесів. Використовуються як провідні технології (наприклад, Power Line Communication), так і безпроводні (Wi-Fi, ZigBee, LTE, 5G). Забезпечення кібербезпеки є невід'ємною частиною цієї інфраструктури, оскільки зростання цифровізації підвищує вразливість системи до кібератак.

Економічні аспекти впровадження смарт-мереж також є важливими. Незважаючи на значні початкові інвестиції, довгострокові вигоди включають зниження операційних витрат, покращення якості послуг та підвищення задоволеності споживачів. Впровадження динамічних тарифів та програм управління попитом стимулює споживачів до більш раціонального використання енергії, що зменшує навантаження на мережу та відкриває можливості для додаткової економії.

У міському середовищі смарт-мережі мають особливе значення. Висока щільність населення та концентрація споживання вимагають ефективного управління енергетичними ресурсами. Смарт-мережі дозволяють інтегрувати інтелектуальні будівлі, електромобілі та інші технології, що сприяють сталому розвитку міської інфраструктури. Електромобілі, зокрема, можуть виступати як мобільні системи зберігання енергії, допомагаючи балансувати навантаження та сприяючи зменшенню викидів парникових газів.

Проте впровадження смарт-мереж пов'язане з низкою викликів. Технічні проблеми включають необхідність стандартизації протоколів та інтерфейсів, забезпечення сумісності обладнання від різних виробників, а також вирішення питань кібербезпеки. Економічні виклики полягають у необхідності залучення інвестицій та розробки стійких бізнес-моделей. Соціальні аспекти включають підготовку кадрів, підвищення обізнаності населення та подолання можливого опору змінам.

З позиції фізика-енергетика, смарт-мережі відкривають широкі можливості для досліджень та інновацій. Моделювання та симуляція складних електричних систем, розробка нових алгоритмів управління, дослідження перехідних процесів та стійкості системи — все це вимагає глибоких знань електротехніки, математики та інформатики. Використання сучасних інструментів, таких як MATLAB/Simulink, DIgSILENT PowerFactory, дозволяє проводити детальний аналіз та оптимізацію роботи мережі [6].

Фізичні закони, такі як закон Ома, закони Кірхгофа, теорія електромагнітних полів, залишаються фундаментальними для розуміння роботи електричних мереж. Проте смарт-мережі додають новий рівень складності, пов'язаний з необхідністю обробки великого обсягу даних, управління динамічними змінами та врахування поведінки споживачів. Це вимагає міждисциплінарного підходу та співпраці між інженерами, фізиками, математиками та фахівцями з інформаційних технологій.

Перспективи розвитку смарт-мереж включають подальшу інтеграцію відновлюваних джерел енергії, розвиток технологій зберігання, впровадження

блокчейн-технологій для децентралізованого управління та торгівлі електроенергією, а також розвиток технологій Інтернету речей (IoT). Це сприятиме створенню більш гнучких, стійких та екологічно чистих енергосистем, здатних відповідати на виклики майбутнього.

Важливою є також роль держави та регуляторних органів у підтримці впровадження смарт-мереж. Розробка сприятливої нормативно-правової бази, стимулювання інвестицій, підтримка науково-дослідних проєктів — все це сприяє прискоренню переходу до інтелектуальних енергосистем [19]. Освіта та підготовка кваліфікованих кадрів є ще одним ключовим фактором успіху.

У підсумку, концепція смарт-мереж представляє собою комплексний підхід до модернізації енергетичної інфраструктури, який поєднує технічні, економічні та соціальні аспекти. Смарт-мережі не лише підвищують ефективність та надійність енергопостачання, але й сприяють сталому розвитку, зменшенню впливу на довкілля та підвищенню якості життя населення.

Сучасна урбанізація, яка характеризується стрімким зростанням населення в містах, створює значний тиск на існуючу енергетичну інфраструктуру. Міста, в яких проживає більше половини світового населення та споживається понад 70% всієї виробленої електроенергії, стикаються з проблемами ефективного забезпечення зростаючих енергетичних потреб. Традиційні енергосистеми, побудовані на централізованих принципах, виявляються недостатньо гнучкими та ефективними для вирішення цих викликів.

Основними недоліками таких систем є високі втрати енергії при передачі, які можуть досягати 8–15% залежно від конфігурації мережі. Крім того, централізована структура не дозволяє швидко адаптуватися до змін у попиті чи реагувати на аварійні ситуації. Недостатня інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова, обумовлена їх нестабільною генерацією, що ускладнює ефективне використання цих

ресурсів. Використання викопного палива призводить до значних викидів парникових газів, що негативно впливає на екологію.

Ці проблеми вимагають фундаментальної переоцінки підходів до управління енергосистемами міст. Одним із перспективних напрямків є інтеграція смарт-мереж, які базуються на поєднанні інформаційно-комунікаційних технологій, автоматизації та децентралізації процесів [23]. Смарт-мережі — це складні динамічні системи, в яких управління енергетичними потоками здійснюється за допомогою алгоритмів оптимізації, теорії систем та фізики мереж.

Ключовими принципами смарт-мереж є інтегрованість, самоорганізація та інформаційна взаємодія. Інтегрованість передбачає включення децентралізованих джерел енергії, таких як сонячні панелі та вітрові турбіни, а також систем зберігання енергії та нових технологій, зокрема електромобілів. Самоорганізація системи дозволяє підтримувати її стійкість навіть за змінних параметрів, використовуючи принципи теорії самоорганізованих критичних станів. Інформаційна взаємодія забезпечується через багатоканальну комунікацію між усіма елементами системи — від генерації до споживання.

Фізична основа смарт-мереж базується на законах електродинаміки, де розподіл струмів та напруг описується рівняннями Кірхгофа, адаптованими до умов динамічних потоків. Нерівномірність споживання та генерації енергії вимагає застосування стохастичних методів аналізу та моделей хаотичних систем. Алгоритми управління потоками енергії ґрунтуються на принципах варіаційного аналізу та теорії ігор, що дозволяє мінімізувати втрати та оптимізувати розподіл енергії за часом, простором і вартістю.

Смарт-мережі складаються з інтегрованих компонентів, кожен з яких має свої фізичні особливості. Інтелектуальні сенсори та лічильники, базуючись на високоточному моніторингу електричних параметрів, дозволяють в реальному часі оцінювати якість і стабільність енергопостачання. Системи зберігання енергії, такі як хімічні акумулятори (літій-іонні, натрій-сірчані) та суперконденсатори, компенсують коливання

генерації та забезпечують швидку реакцію на пікові навантаження. Інфраструктура зарядки електромобілів функціонує як джерело та споживач енергії одночасно, базуючись на принципах двосторонньої передачі енергії (vehicle-to-grid, V2G).

Центри управління енергосистемою використовують методи оптимізації великих масивів даних для прогнозування навантажень і управління потоками енергії. Комунікаційна інфраструктура, що забезпечує фізичну передачу даних між елементами мережі, реалізується за допомогою високошвидкісних оптоволоконних ліній або бездротових технологій, таких як 5G, що забезпечують мінімальні затримки сигналу [15].

Інтеграція смарт-мереж у міську енергетику базується на концепції децентралізації та підвищення ефективності використання енергоресурсів. З фізичної точки зору, це дозволяє мінімізувати втрати енергії за рахунок скорочення дистанції передачі та зменшення опору в мережі. Автоматизоване балансування потоків енергії забезпечує стабільність роботи мережі, запобігаючи перевантаженням та коливанням частоти. Самоорганізація системи в критичних умовах підвищує її надійність, розподіляючи навантаження між децентралізованими джерелами та мінімізуючи наслідки аварій.

Проте впровадження смарт-мереж супроводжується певними викликами. Сучасні технології зберігання енергії мають обмеження щодо питомої енергетичної щільності, що впливає на їх ефективність та масштабованість. Цифровізація системи відкриває нові вектори для кібератак, що можуть призвести до локальних або системних збоїв, тому питання кібербезпеки стає надзвичайно актуальним. Економічна доцільність також є критичним фактором, оскільки модернізація енергетичної інфраструктури потребує значних інвестицій, що може бути складним завданням для економік з обмеженими ресурсами.

Успішна інтеграція смарт-мереж вимагає глибокого розуміння фізичних процесів, що відбуваються в таких системах, а також

міждисциплінарного підходу, який поєднує фізику, математику, інформатику та інженерію. Розробка ефективних алгоритмів управління, моделювання динаміки системи та оптимізація потоків енергії є ключовими завданнями для фізиків-енергетиків.

Смарт-мережі відкривають нові можливості для підвищення ефективності та надійності міських енергосистем, сприяючи сталому розвитку та зменшенню екологічного впливу. Вони створюють основу для більш гнучкого, адаптивного та стійкого енергопостачання, яке відповідає сучасним вимогам суспільства. Проте для реалізації цього потенціалу необхідно подолати технічні, економічні та безпекові бар'єри, що стоять на шляху до впровадження інтелектуальних енергетичних рішень.

1.2 Технології та компоненти смарт-мереж

Відновлювані джерела енергії та інтелектуальні лічильники є фундаментальними компонентами сучасних енергетичних систем, спрямованих на підвищення ефективності, надійності та екологічної стійкості енергопостачання. У контексті глобальних викликів, таких як зміна клімату та виснаження викопних ресурсів, інтеграція цих технологій стає критично важливою для забезпечення сталого розвитку суспільства, ВДЕ використовують природні процеси, що постійно поновлюються, як-от сонячне випромінювання, вітер, рух води, геотермальну теплоту та біомасу [12]. Фізичні принципи, на яких базується використання цих джерел, дозволяють перетворювати один вид енергії в інший, дотримуючись законів збереження енергії та інших фундаментальних законів фізики.

Сонячна енергія використовує фотогальванічний ефект для перетворення світлової енергії в електричну. Фотогальванічні елементи складаються з напівпровідникових матеріалів, таких як кремній. Під дією фотонів світла електрони в напівпровіднику переходять на вищі енергетичні рівні, утворюючи електричний струм. Цей процес описується квантовою механікою та теорією зонної структури твердих тіл, вітрова енергія

перетворює кінетичну енергію повітряних мас у механічну, а потім в електричну, вітрові турбіни використовують аеродинамічні принципи, зокрема підйомну силу, що виникає на лопатях при обтіканні їх повітряним потоком. Ефективність вилучення енергії залежить від конструкції лопатей, яка оптимізується за допомогою рівнянь гідродинаміки та механіки рідин і газів.

Гідроенергетика базується на використанні потенціальної енергії води, яка перетворюється в кінетичну при падінні на турбіну, обертаючи генератор, тут застосовуються закони механіки та енергетичних перетворень, що дозволяють ефективно використовувати енергію руху води.

Геотермальна енергія використовує тепло внутрішніх шарів Землі, теплоносії переносять внутрішню енергію до поверхні для перетворення в електричну або теплову енергію. Цей процес базується на принципах термодинаміки та теплообміну, дозволяючи використовувати природне тепло Землі як надійне джерело енергії, інтеграція ВДЕ в енергетичну систему супроводжується технічними викликами, зокрема нерівномірністю та непередбачуваністю генерації. Це вимагає розробки ефективних методів прогнозування та балансування, а також впровадження систем зберігання енергії, акумуляторні батареї, гідроакумуляуючі станції та суперконденсатори використовуються для згладжування коливань генерації та споживання, базуючись на електрохімічних, механічних та електростатичних принципах відповідно [32].

Інтелектуальні лічильники є невід'ємною складовою сучасних смарт-мереж. Вони забезпечують двосторонній зв'язок між споживачем та постачальником, дозволяючи в реальному часі збирати дані про споживання енергії, напругу, струм та інші параметри. Це стає можливим завдяки інтеграції сенсорних технологій, мікропроцесорних систем та комунікаційних модулів.

Вимірювання електричних параметрів здійснюється за допомогою трансформаторів струму, ефекту Холла або оптичних сенсорів, що базуються

на законах електромагнетизму. Обробка даних відбувається вбудованими мікроконтролерами, які аналізують сигнали та перетворюють їх у цифрову форму. Передача інформації здійснюється через різні канали зв'язку, такі як Power Line Communication, Wi-Fi або мобільні мережі, з обов'язковим забезпеченням кібербезпеки та конфіденційності даних, інтелектуальні лічильники дозволяють впроваджувати динамічні тарифи, стимулюючи споживачів оптимізувати своє енергоспоживання. Це сприяє вирівнюванню навантаження на мережу та підвищенню її ефективності. Крім того, вони є основою для реалізації концепції розумних будинків та Інтернету речей в енергетиці, забезпечуючи взаємодію з іншими пристроями та системами автоматизації.

Синергія між ВДЕ та інтелектуальними лічильниками полягає в можливості інтеграції децентралізованої генерації в загальну енергетичну систему [27]. Споживачі стають активними учасниками ринку, виробляючи електроенергію та обмінюючись нею з мережею. Інтелектуальні лічильники забезпечують точний облік як споживання, так і генерації, сприяючи прозорості та ефективності енергетичних процесів.

З фізичної точки зору, інтеграція ВДЕ та інтелектуальних лічильників вимагає глибокого розуміння електротехніки, енергетичних процесів та інформаційних технологій. Виклики, пов'язані з гармонічними спотвореннями, перехідними процесами та стійкістю системи, потребують застосування сучасних методів аналізу та моделювання, таких як методи скінченних елементів та комп'ютерна симуляція, екологічні аспекти є важливим фактором у впровадженні цих технологій. ВДЕ сприяють зниженню викидів парникових газів та забруднюючих речовин, що позитивно впливає на навколишнє середовище та здоров'я людей.

Інтелектуальні лічильники допомагають споживачам усвідомлювати свій вплив на екологію та стимулюють до більш раціонального використання енергії, соціально-економічні аспекти включають створення нових робочих місць у галузях відновлюваної енергетики та інформаційних технологій,

підвищення енергетичної безпеки та зменшення залежності від імпорту енергоносіїв. Для фізика-енергетика це відкриває широкі можливості для досліджень та впровадження інновацій, які здатні змінити обличчя енергетики та зробити значний внесок у вирішення глобальних проблем людства.

Отже, відновлювані джерела енергії та інтелектуальні лічильники є ключовими складовими сучасної енергетичної інфраструктури, що базується на принципах стійкості, ефективності та інноваційності, їх інтеграція сприяє створенню гнучкої, адаптивної та надійної енергетичної системи, яка відповідає сучасним вимогам та викликам. Для досягнення повного потенціалу цих технологій необхідно продовжувати дослідження в галузі фізики енергетичних процесів, розробляти нові матеріали та методи, а також впроваджувати передові інформаційні технології в управління енергосистемами.

Економічна складова концепції Smart Grid відіграє ключову роль у трансформації сучасної енергетики, спрямовуючи її на зниження витрат і підвищення загальної ефективності. Інтелектуальні мережі відкривають можливості для значного покращення управління енергетичними ресурсами, оптимізації витрат та створення нових економічних механізмів, які вигідні як споживачам, так і енергетичним компаніям.

Однією з найбільших переваг впровадження Smart Grid є здатність суттєво зменшити втрати електроенергії. Завдяки впровадженню інтелектуальних сенсорів, автоматизованих систем моніторингу та управління потоками енергії можна швидко виявляти проблемні ділянки мережі, такі як перевантаження чи несправності [29]. Це дозволяє мінімізувати втрати під час передачі та розподілу електроенергії. У застарілих енергосистемах із високим рівнем втрат це забезпечує значний економічний ефект. Додатково, аналітичні інструменти Smart Grid дозволяють точно визначати, які сегменти мережі потребують модернізації, що значно знижує витрати на оновлення інфраструктури.

Для споживачів Smart Grid пропонує можливість економії завдяки впровадженню індивідуальних тарифів, що враховують час і обсяги споживання. Інтелектуальні лічильники дозволяють запровадити гнучке ціноутворення, яке мотивує користувачів переносити споживання енергії на періоди низького навантаження мережі. Такий підхід дозволяє споживачам суттєво знизити свої витрати, а енергетичній системі — уникнути пікових перевантажень. Крім того, автоматизація і високий рівень оперативності у виявленні та усуненні несправностей забезпечують надійність постачання, скорочуючи витрати споживачів на резервні джерела енергії.

Енергетичні компанії отримують значні вигоди завдяки автоматизації процесів, що знижує операційні витрати. Використання інтелектуальних систем дозволяє мінімізувати витрати на обслуговування та діагностику мережі, забезпечуючи більш ефективне управління потоками енергії [8]. Також інтеграція відновлюваних джерел енергії до системи сприяє зменшенню залежності від викопного палива, що знижує загальні витрати на виробництво енергії та скорочує негативний екологічний вплив.

Одним із новаторських аспектів Smart Grid є підтримка децентралізованих ринків енергії. Ця модель дозволяє споживачам, які мають власні джерела генерації, наприклад сонячні панелі, продавати надлишкову енергію до мережі. Це створює новий рівень конкуренції, що сприяє зниженню цін на енергію, а також забезпечує споживачам додаткові джерела доходу. Такий підхід значно трансформує традиційні уявлення про роль споживача в енергетиці, перетворюючи його з пасивного отримувача послуг на активного учасника ринку.

Практичні приклади, такі як впровадження Smart Grid у Копенгагені, підтверджують значний економічний ефект. Завдяки оптимізації розподільчих систем місто скоротило витрати на енергію на 20%, а впровадження динамічних тарифів дозволило зменшити пікове навантаження на 15%. Подібні результати демонструють і у Сан-Франциско, де децентралізовані

енергетичні ринки надали споживачам можливість продавати надлишкову енергію, тим самим знижуючи залежність від великих енергетичних компаній.

Таким чином, Smart Grid забезпечує економічну вигоду на всіх рівнях енергетичної системи. Вона знижує витрати на експлуатацію, модернізацію та виробництво, сприяє ефективному використанню ресурсів, стимулює інвестиції та створює нові економічні можливості. Ця модель не лише раціоналізує витрати, але й формує фундамент для сталого розвитку енергетики, орієнтованої на фінансову стабільність і екологічну безпеку, Smart Grid, або «інтелектуальні мережі електропостачання», представляють собою сучасну енергетичну інфраструктуру, побудовану на основі інформаційних і комунікаційних технологій. Їх головна мета — забезпечити більш ефективне, надійне, економічне та стійке управління виробництвом, передачею і споживанням електроенергії. В основі цих мереж лежить інтеграція технологій моніторингу, управління та оптимізації потоків енергії, що дозволяє адаптувати енергосистему до змінних умов та потреб сучасного світу.

Одним із ключових елементів Smart Grid є використання інтелектуальних лічильників і сенсорів, які забезпечують точне вимірювання параметрів електроенергії, включаючи обсяги споживання, напругу, струм і якість енергії. Ці пристрої не лише виконують функцію обліку, але й передають зібрані дані в реальному часі до центрів управління через спеціалізовані комунікаційні мережі [17]. Це відкриває можливості для автоматизації процесів, таких як розрахунок тарифів, моніторинг споживання та планування енергопостачання. Застосування інтелектуальних лічильників поширюється не лише на електроенергію, але й на інші ресурси, такі як газ, вода та тепло, що робить цю технологію універсальним інструментом управління ресурсами.

Важливим аспектом Smart Grid є інтеграція вдосконалених технологій для управління енергетичними потоками. Це включає системи моніторингу в реальному часі, автоматизовані методи контролю за роботою мережі, системи

управління попитом і розподілені системи контролю генерації. Ці рішення дозволяють знизити енергетичні втрати, уникнути перевантажень і забезпечити безперебійність постачання навіть у пікові періоди. Крім того, впровадження сучасних компонентів, таких як надпровідні кабелі, гнучкі системи передачі змінного струму (FACTS) та накопичувачі енергії, підвищує загальну ефективність роботи системи [7] та забезпечує її гнучкість, ще одним ключовим елементом Smart Grid є автоматизована інформаційно-вимірювальна система комерційного обліку електроенергії (АПС КОЕ). Це комплекс апаратних і програмних засобів, що забезпечує дистанційний збір, зберігання та аналіз даних про енергетичні потоки. АПС КОЕ дозволяє здійснювати моніторинг стану електромережі, виявляти та усувати несправності, а також автоматизувати процеси торгівлі електроенергією. Завдяки використанню ієрархічної структури ця система інтегрує вимірювально-інформаційні комплекси, інформаційно-обчислювальні системи та засоби забезпечення єдиного часу. У результаті створюється єдина платформа для управління енергетичними процесами на різних рівнях, від окремих домогосподарств до загальнонаціональних мереж.

Інтелектуальні мережі також забезпечують ефективну інтеграцію відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі та вітрові турбіни, у загальну енергетичну систему. Це досягається за рахунок впровадження технологій балансування потоків енергії та накопичення надлишкової генерації, що сприяє сталому розвитку енергетики та зниженню впливу на навколишнє середовище. Інформаційна інфраструктура Smart Grid об'єднує всі технічні елементи мережі, забезпечуючи швидкий і надійний обмін даними між компонентами системи. Це дозволяє не лише оперативно реагувати на зміни в енергетичному балансі, але й планувати розвиток системи на основі аналітичних прогнозів.

Загалом, Smart Grid є важливим кроком у трансформації енергетики, що дозволяє забезпечити її відповідність сучасним потребам суспільства та технологічним викликам. Інтелектуальні мережі забезпечують високу

ефективність, адаптивність і надійність, формуючи основу для сталого розвитку енергетичної системи майбутнього.

1.3 Ключові вимоги та цінності нової енергетики

Основні цінності концепції Smart Grid визначають фундаментальні аспекти нової енергетичної системи, яка поєднує доступність, надійність, економічність, ефективність, екологічність і безпеку. Ці критерії є базовими орієнтирами для модернізації енергетики, спрямованої на вирішення завдань забезпечення енергією сучасного суспільства. Важливою особливістю є рівноправність усіх ключових цінностей, що дозволяє гнучко адаптувати підхід до потреб конкретного споживача або організації, незалежно від масштабу їхньої діяльності.

Доступність у системі Smart Grid означає забезпечення споживачів електроенергією в необхідних обсягах і у потрібний час, без географічних чи технічних обмежень. Вона враховує індивідуальні вимоги користувачів, включаючи бажану якість постачання та доступність тарифів. Надійність передбачає стійкість енергосистеми до фізичних і інформаційних загроз, забезпечення безперебійного постачання електроенергії та можливість швидкого відновлення після збоїв [24]. Економічність спрямована на оптимізацію витрат, що охоплює як зменшення тарифів для кінцевих споживачів, так і раціоналізацію операційних витрат енергетичних компаній.

Ефективність є невід'ємною складовою Smart Grid і досягається через впровадження інноваційних технологій, оптимізацію використання ресурсів і підвищення продуктивності всіх елементів системи. Екологічність цієї концепції акцентує увагу на мінімізації впливу на довкілля, впровадженні відновлюваних джерел енергії та використанні екологічно чистих технологій. Безпека орієнтована на запобігання аварійним ситуаціям, які можуть становити загрозу для людей і природи, гарантуючи стабільну роботу всієї інфраструктури.

Рівноправність і взаємодоповнюваність цих цінностей роблять Smart Grid адаптивною до потреб різних суб'єктів енергетичних відносин — держави, регуляторів, енергокомпаній або домогосподарств. Такий підхід забезпечує можливість створення індивідуальних рішень, які враховують особливості кожного об'єкта енергосистеми, сприяючи її загальній стійкості, ефективності та відповідності вимогам сучасного світу.

Хмарні платформи, які впроваджуються в рамках концепції Smart Grid, відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного управління енергомережами та збору даних із підключених елементів. Їх можна класифікувати на два основні види: інтеграційні та аналітичні. Інтеграційні платформи орієнтовані на збір інформації з мереж і виконання завдань моніторингу, таких як автоматичне виявлення відключень або крадіжок електроенергії. Аналітичні платформи забезпечують передиктивне управління в реальному часі, дозволяючи оптимізувати роботу енергомереж, включно з управлінням програмами попиту та об'єктами розподіленої генерації. За даними I'son & Partners Consulting, у 2018 році глобальний ринок цих платформ досяг обсягу \$860 млн із середньорічним темпом зростання 85% за період 2015-2018 років. Очікується, що до 2023 року ринок зросте до \$4,8 млрд, демонструючи стабільний темп розвитку на рівні 41% CAGR, сучасні мегаполіси є основними споживачами енергії, забезпечуючи до 75% загального світового енергоспоживання, хоча їх населення становить лише 53% загальної чисельності. Згідно з прогнозами, до 2050 року частка міських жителів зросте до 86%, що спричинить збільшення потреби в енергоресурсах на 50% [25].

У зв'язку з цим міста активно впроваджують інноваційні проекти у сфері розумних електромереж, обліку енергоресурсів і технологій Smart City. Так, прогноз ABI Research передбачає, що до 2022 року кількість розумних лічильників для електроенергії, води та газу подвоїться, що значною мірою буде обумовлено розвитком мереж великого радіусу дії (LPWAN). Водночас мобільні оператори, залучені до реалізації цих проектів, очікують отримати до

2026 року прибуток у розмірі \$26 млрд лише від підключення розумних лічильників до мереж.

Європа демонструє стабільну динаміку впровадження інтелектуальних облікових пристроїв. Згідно з підрахунками Єврокомісії, до 2020 року було встановлено понад 200 млн розумних лічильників електроенергії та 45 млн лічильників газу. Ці технології охопили 72% споживачів електроенергії та 40% споживачів газу. Впровадження інтелектуальних рішень активно підтримується урядами країн ЄС [3]. Наприклад, у Великобританії процес переходу на розумні лічильники був визнаний національним пріоритетом ще у 2014 році. В Іспанії до 2018 року всі електромеханічні лічильники були замінені на сучасні електронні пристрої. Німеччина запровадила законодавчі норми, які зобов'язують обладнання нових будівель інтелектуальними системами обліку.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії у Smart Grid, зокрема сонячної та вітрової енергії, є однією з найбільших технологічних і економічних задач. Через нестабільність і переривчастість цих джерел потрібне використання сучасних систем зберігання енергії. Серед перспективних рішень виділяються гідроаккумулятори, системи стисненого повітря, батареї та хімічні сховища енергії. Хімічні технології, такі як виробництво водню або аміаку, дозволяють накопичувати енергію у великих обсягах і транспортувати її до місць споживання. Це забезпечує гнучкість і адаптивність системи, хоча такі рішення вимагають значних інвестицій у розвиток інфраструктури.

Загалом, розвиток Smart Grid сприяє підвищенню ефективності управління енергетичними ресурсами, залученню споживачів до процесів регулювання споживання та оптимізації загальної енергоефективності. Світовий досвід впровадження цих технологій демонструє їхній значний потенціал для модернізації енергетичної інфраструктури, створення умов для сталого розвитку та відповіді на виклики сучасної енергетики, це підтверджує, що інтелектуальні мережі є невід'ємною частиною майбутнього енергетики.

Смарт-мережі суттєво підвищують ефективність сучасних енергосистем завдяки інтеграції передових технологій, аналізу даних у режимі реального часу та автоматизації на всіх етапах – від генерації електроенергії до її розподілу і споживання. Вони використовують сенсори, інтелектуальні лічильники та сучасні інструменти моніторингу для збору даних про потоки енергії, попит і стан системи. Ця інформація дозволяє операторам мереж швидко виявляти неефективності, вузькі місця чи потенційні проблеми, що знижує втрати енергії та час простою.

Однією з ключових переваг є реалізація програм реагування на попит, які стимулюють споживачів змінювати свої звички споживання електроенергії в години пікового навантаження. Це знижує навантаження на мережу, сприяє більш рівномірному розподілу енергії та дозволяє зменшити витрати на виробництво електроенергії в години пікового попиту. Смарт-мережі також забезпечують ефективну інтеграцію відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна і вітрова, шляхом прогнозування їхньої генерації та використання систем зберігання енергії для балансування попиту й пропозиції. Це сприяє зменшенню залежності від викопного палива та підвищує стійкість енергосистеми [20].

У традиційних мережах часто виникають значні втрати енергії під час передачі та розподілу. Смарт-мережі мінімізують ці втрати завдяки використанню сучасних компонентів, таких як високоефективні трансформатори, надпровідні кабелі та точне регулювання напруги. Оптимізація потоків енергії забезпечує доставку електроенергії до кінцевих користувачів з мінімальними втратами. Автоматизація процесів та використання інструментів прогнозової аналітики дозволяють підтримувати належний стан мережі. Наприклад, автоматизовані системи можуть перенаправляти енергію у разі аварій або порушень, а інструменти прогнозного обслуговування виявляють потенційні поломки обладнання, дозволяючи виконувати ремонт до виникнення проблем.

Смарт-мережі забезпечують фундаментальні зміни в підходах до виробництва, передачі та споживання енергії, інтегруючи передові технології, що сприяють підвищенню ефективності, надійності й стійкості енергосистеми. Завдяки використанню інтелектуальних лічильників, сенсорів і аналітичних платформ смарт-мережі дозволяють збирати та аналізувати дані в реальному часі, що дає змогу оперативно реагувати на зміну умов, мінімізувати втрати енергії та оптимізувати роботу системи. Реалізація програм реагування на попит і використання сучасних методів балансування навантаження дозволяють зменшити пікові навантаження, що не тільки підвищує ефективність використання ресурсів, але й сприяє зниженню витрат як для енергетичних компаній, так і для споживачів.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна і вітрова енергія, стає можливою завдяки адаптивності та гнучкості смарт-мереж. Використання предикативної аналітики, систем зберігання енергії та сучасних методів прогнозування дозволяє забезпечити стабільне постачання електроенергії навіть за умов нерівномірної генерації з ВДЕ [10]. Це сприяє зниженню вуглецевого сліду та екологічного впливу енергетики, роблячи її більш стійкою та відповідальною. Удосконалення систем передачі та розподілу електроенергії, зокрема через впровадження високоефективних компонентів, таких як надпровідні кабелі чи автоматизовані трансформатори, мінімізує втрати енергії та підвищує загальну надійність мережі.

Смарт-мережі також сприяють залученню споживачів до управління власним енергоспоживанням, що формує енергоефективну поведінку та стимулює раціональне використання ресурсів. Це досягається через використання динамічних тарифів, що дозволяють споживачам економити кошти, адаптуючи свої звички споживання. Разом із цим смарт-мережі створюють умови для інтеграції інноваційних рішень, таких як електромобілі чи децентралізовані системи генерації, що формує нову модель децентралізованої енергетики.

У сукупності смарт-мережі відкривають нові горизонти для енергетичної галузі, забезпечуючи її готовність до викликів майбутнього. Вони пропонують ефективні рішення для оптимізації використання ресурсів, зниження витрат, інтеграції екологічно чистих технологій і забезпечення енергетичної безпеки. Упровадження смарт-мереж сприяє формуванню сучасної енергетичної системи, яка не лише задовольняє зростаючі потреби суспільства, але й адаптується до швидкозмінних умов, роблячи енергетику більш стійкою, економічно вигідною та екологічно відповідальною.

2 Аналіз сучасного стану та досвіду впровадження смарт-мереж в містах

2.1 Сучасний стан розвитку смарт-мереж у світі та в Україні

В останні десятиліття у світі інтенсивно розвивається напрямок інноваційного трансформування електроенергетики, що базується на концепції Smart Grid, яку в різних інтерпретаціях називають «інтелектуальною» або «розумною» енергетичною мережею. Основні ідеї цієї концепції були ініційовані в США та країнах Європейського Союзу, які прийняли її за основу своєї національної енергетичної політики й інноваційного розвитку. Згодом концепція Smart Grid отримала широке визнання у всіх розвинених країнах, де розгорнулися масштабні проєкти в цьому напрямку.

Найбільші програми реалізуються у США, ЄС, Канаді, Австралії, Китаї та Південній Кореї. У США ця програма має статус національної та здійснюється за прямої підтримки уряду [18]. У країнах ЄС для координації робіт та формування єдиної стратегії ще у 2004 році була створена технологічна платформа Smart Grids, яка визначила основні цілі розвитку європейської енергетичної системи до 2020 року і надалі.

Концепція Smart Grid сприймається як інноваційний підхід до трансформації електроенергетики, що базується на цілісному розумінні її ролі в сучасному й майбутньому суспільстві. Ця концепція визначає ключові вимоги, підходи до їх забезпечення, принципи реалізації та технологічну базу, необхідну для її втілення. Її основною метою є створення енергетичної системи, здатної відповідати сучасним викликам та вимогам.

Виникнення концепції Smart Grid обумовлено декількома глобальними факторами. По-перше, це постійне підвищення вартості електроенергії, що вимагає нових підходів до підвищення ефективності використання енергоресурсів. По-друге, є потреба в підвищенні енергетичної та екологічної ефективності, оскільки традиційні підходи вичерпують свої можливості.

Також зростають вимоги споживачів до надійності й якості електропостачання. Накопичення нових технологій, які не знаходять належного застосування в традиційній електроенергетиці, та погіршення надійності енергопостачання лише посилюють ці виклики. Нарешті, зміни у функціонуванні ринків електроенергії та потужностей також вимагають адаптації системи до нових умов.

Аналіз, проведений за кордоном, виявив серйозні обмеження старої моделі розвитку електроенергетики, яка спиралася переважно на поступове вдосконалення окремих технологій і обладнання [34]. Такий підхід більше не відповідає сучасним вимогам і вимагає кардинальних змін у принципах і механізмах функціонування галузі, серед основних факторів, які впливають на швидкість впровадження Smart Grid, виділяють кілька ключових - перш за все, це обмежені можливості подальшого збільшення генеруючих потужностей через вичерпність невідновлюваних джерел енергії та жорсткі екологічні обмеження.

Стримуючим чинником також є складність розвитку мережевої інфраструктури, особливо в густонаселених районах, через техногенні й інфраструктурні ризики. Низький потенціал підвищення ефективності існуючої технологічної бази й обмеженість інвестиційних ресурсів для будівництва нових енергетичних об'єктів також значно впливають на темпи розвитку.

Результати досліджень показують, що вирішення цих проблем потребує зміни підходів до функціонування електроенергетики. Це дозволить не лише забезпечити стабільний розвиток суспільства, але й значно підвищити ефективність використання енергії та покращити її доступність для споживачів. Smart Grid є відповіддю на ці виклики, пропонуючи інноваційний шлях розвитку галузі з акцентом на інтеграцію новітніх технологій, ефективність і стійкість.

Розвиток смарт-мереж в Україні є ключовим елементом модернізації енергетичної інфраструктури та інтеграції країни до європейського

енергетичного простору. Смарт-мережі, які використовують цифрові технології для оптимізації передачі та споживання електроенергії, стають все більш актуальними в контексті підвищення енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел енергії. Однак сучасна російсько-українська війна внесла значні корективи в процес їх розвитку, створюючи як нові виклики, так і можливості.

Одним із головних досягнень України у сфері енергетики стало успішне синхронізування з європейською енергетичною мережею ENTSO-E у 2022 році. Цей крок не лише підвищив стабільність енергосистеми країни, але й відкрив можливості для експорту та імпорту електроенергії з європейськими країнами. Впровадження смарт-лічильників та інших цифрових технологій дозволило покращити моніторинг споживання електроенергії, сприяючи більш ефективному управлінню ресурсами та зменшенню втрат. Активний розвиток відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергетика, вимагає сучасних мережевих рішень для їх інтеграції без порушення стабільності енергосистеми.

Проте війна з Росією стала серйозним випробуванням для енергетичної інфраструктури України. Постійні атаки на енергетичні об'єкти призвели до значних пошкоджень та збоїв у постачанні електроенергії. Це ускладнює не лише підтримку існуючих мереж, але й стримує впровадження нових технологій смарт-мереж. Фінансові ресурси, які могли б бути спрямовані на модернізацію та розвиток, перенаправляються на військові потреби та відновлення пошкодженої інфраструктури. Крім того, війна створює ризики для кібербезпеки енергетичних мереж, оскільки цифровізація робить їх потенційними цілями для кібератак [33].

Застаріла інфраструктура, яка потребує масштабної модернізації, є ще однією перешкодою на шляху до повноцінного впровадження смарт-мереж. Необхідність значних інвестицій та наявність кваліфікованих фахівців стають критичними факторами. Хоча Україна співпрацює з міжнародними партнерами та організаціями для залучення фінансування та технічної

допомоги, війна значно ускладнює ці процеси. Регуляторні та законодавчі бар'єри також потребують уваги, оскільки існуюча база не завжди відповідає вимогам сучасних технологій та міжнародним стандартам.

Незважаючи на ці виклики, війна підкреслила важливість енергетичної незалежності та стійкості енергосистеми. Це може стати стимулом для більш активного впровадження смарт-мереж як засобу підвищення надійності та гнучкості енергетичної інфраструктури. Інтеграція з європейськими мережами та співпраця з міжнародними партнерами відкривають нові можливості для розвитку та впровадження передових технологій.

У підсумку, розвиток смарт-мереж в Україні на тлі російсько-української війни характеризується як досягненнями, так і серйозними проблемами. Війна створює значні перешкоди, але одночасно підкреслює критичну важливість модернізації енергетичної інфраструктури. Координація зусиль уряду, бізнесу та міжнародної спільноти, а також інвестиції в технології та людський капітал є необхідними для подолання існуючих викликів і забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору України.

2.2 Бар'єри та проблеми інтеграції смарт-мереж

Смарт-мережі являють собою сучасний етап розвитку електроенергетичних систем, де традиційна інфраструктура поєднується з передовими інформаційно-комунікаційними технологіями. Метою є створення інтелектуальної, адаптивної та стійкої енергетичної системи, здатної ефективно реагувати на динаміку попиту та пропозиції, інтегрувати відновлювані джерела енергії та забезпечувати надійність постачання [26].

Ключовими технологіями в смарт-мережах є інтелектуальні лічильники, автоматизація розподільчих мереж, розподілена генерація, системи накопичення енергії, передові комунікаційні протоколи та аналітичні платформи.

Інтелектуальні лічильники забезпечують детальний моніторинг і облік споживання електроенергії в реальному часі. Вони дозволяють споживачам

отримувати актуальну інформацію про власне енергоспоживання, а операторам мережі — збирати дані для аналізу та оптимізації роботи системи. Двостороння комунікація цих лічильників дає можливість не лише збирати дані, але й надсилати сигнали для управління навантаженням та реалізовувати програми управління попитом.

Автоматизація розподільчих мереж включає використання сенсорів, контролерів і програмного забезпечення для моніторингу стану мережі та оперативного реагування на зміни. Технології, такі як системи самовідновлення та автоматизованого секціонування, дозволяють мережі швидко адаптуватися до аварійних ситуацій, мінімізуючи час простою та підвищуючи надійність постачання електроенергії.

Розподілена генерація передбачає інтеграцію локальних джерел енергії — зокрема сонячних панелей, вітрових турбін та малих гідроелектростанцій — безпосередньо в розподільчу мережу. Це вимагає використання інверторів з функціями підтримки мережі та систем управління генерацією, що забезпечують стабільність напруги і частоти. Технології мікромереж дозволяють окремим сегментам працювати автономно в разі відключення від основної мережі.

Системи накопичення енергії, такі як великомасштабні акумуляторні батареї, відіграють ключову роль у балансуванні попиту і пропозиції, особливо при високому рівні проникнення відновлюваних джерел енергії з нестабільною генерацією [11]. Вони дозволяють зберігати надлишкову енергію для використання в пікові періоди або при перебоях у постачанні, підвищуючи стабільність і гнучкість енергосистеми.

Передові комунікаційні протоколи та мережі забезпечують надійний обмін даними між різними компонентами смарт-мережі. Використовуються як дротові, так і бездротові технології зв'язку, включаючи оптоволоконні лінії, радіочастотні мережі та PLC-технології (Power Line Communication). Забезпечення кібербезпеки є критичним аспектом, оскільки зростаюча цифровізація підвищує ризики кібератак і несанкціонованого доступу.

Аналітичні платформи та системи управління даними застосовують алгоритми великих даних і штучного інтелекту для обробки та аналізу інформації з метою оптимізації роботи мережі. Це включає прогнозування попиту, виявлення аномалій, оптимізацію генерації та розподілу, що сприяє підвищенню ефективності і надійності енергопостачання.

Управління попитом є технологією, що дозволяє споживачам активно брати участь у балансуванні енергосистеми. Через динамічне ціноутворення та інші стимули споживачі можуть коригувати своє енергоспоживання у відповідь на сигнали від оператора мережі, що допомагає зменшити навантаження в пікові години та оптимізувати використання ресурсів.

Інтеграція електричного транспорту в енергосистему відкриває нові можливості і виклики. Електромобілі можуть виступати як мобільні накопичувачі енергії, а технології Vehicle-to-Grid (V2G) дозволяють використовувати їхні батареї для підтримки стабільності мережі. Це вимагає розвитку інфраструктури зарядних станцій та впровадження стандартів для сумісності і безпеки.

Стандартизація є важливим аспектом для забезпечення сумісності різних компонентів і систем смарт-мереж. Використання міжнародних стандартів, таких як IEC, IEEE та інших, сприяє інтеграції обладнання від різних виробників та стимулює розвиток інновацій [27].

Смарт-мережі є інноваційним напрямом у розвитку енергетичної інфраструктури, де центральну роль відіграють інтелектуальні лічильники, сенсори та системи зберігання енергії. Інтелектуальні лічильники забезпечують високоточний облік і моніторинг споживання електроенергії в реальному часі, надаючи як споживачам, так і операторам мережі детальну інформацію про енергоспоживання. Це дозволяє оптимізувати використання електроенергії, зменшити пікові навантаження та впроваджувати динамічне ціноутворення, що стимулює енергоефективність.

Сенсори, встановлені по всій мережі, збирають дані про різноманітні параметри: напругу, струм, частоту, температуру та інші показники якості

електроенергії. Ця інформація передається до центрів управління, де аналізується для виявлення аномалій, прогнозування попиту та оптимізації роботи мережі. Завдяки сенсорам можна швидко реагувати на аварійні ситуації, зменшуючи час простою та підвищуючи надійність постачання електроенергії.

Системи зберігання енергії, такі як акумуляторні батареї великої ємності, відіграють важливу роль у балансуванні попиту та пропозиції електроенергії. Вони дозволяють накопичувати надлишкову енергію, вироблену відновлюваними джерелами, для подальшого використання в періоди пікового навантаження або при перебоях у генерації. Це сприяє стабільності мережі та підвищує ефективність використання відновлюваних джерел енергії.

Комунікація між компонентами смарт-мережі забезпечується за допомогою різних протоколів та стандартів зв'язку. Стандарт IEC 61850 є міжнародним стандартом для автоматизації підстанцій і промислових мереж, який визначає методи обміну даними між різними пристроями та системами [13]. Він підтримує високошвидкісний обмін інформацією та забезпечує сумісність обладнання від різних виробників.

ZigBee — це бездротовий протокол зв'язку з низьким енергоспоживанням, який використовується для створення мереж сенсорів та інтелектуальних пристроїв у межах обмеженого радіусу дії. Він ідеально підходить для домашньої автоматизації, моніторингу енергоспоживання та управління освітленням.

LoRaWAN є протоколом для мереж далекого радіусу дії з низьким енергоспоживанням, що дозволяє підключати велику кількість пристроїв на значних відстанях. Це робить його придатним для моніторингу та управління розподільчими мережами, особливо у віддалених або важкодоступних районах.

Використання цих протоколів та стандартів забезпечує надійну і безпечну передачу даних, що є критично важливим для ефективної роботи

смарт-мереж. Інтеграція інтелектуальних лічильників, сенсорів та систем зберігання енергії, поєднана з передовими комунікаційними технологіями, дозволяє створити гнучку, надійну та ефективну енергетичну систему. Як досвідчений енергетик, можу стверджувати, що впровадження цих технологій є необхідним кроком для модернізації енергетичної інфраструктури, підвищення енергоефективності та забезпечення сталого розвитку енергетичного сектору.

Для формування нового, інноваційного технологічного базису в енергетиці були виділені п'ять ключових технологічних областей, які забезпечують проривний розвиток галузі. Першою з цих областей є вимірювальні прилади та пристрої, що включають передусім інтелектуальні лічильники та датчики. Ці smart-пристрої дозволяють здійснювати високоточний моніторинг і облік споживання електроенергії в реальному часі, що сприяє оптимізації використання ресурсів і підвищенню загальної енергоефективності.

Другою важливою областю є вдосконалені методи управління, які передбачають використання розподілених інтелектуальних систем та аналітичних інструментів для підтримки комунікацій на рівні об'єктів енергосистеми. Працюючи в режимі реального часу, ці системи дозволяють впроваджувати нові алгоритми та методики управління енергосистемою, включаючи керування її активними елементами. Це забезпечує більш гнучку та ефективну реакцію на зміни в попиті та пропозиції електроенергії.

Третьою ключовою технологічною областю є вдосконалені технології та компоненти електричної мережі. Сюди входять FACTS, технології передачі постійного струму, надпровідні кабелі, напівпровідникова силова електроніка, накопичувачі енергії та інші інноваційні рішення [1]. Ці технології дозволяють підвищити пропускну здатність і надійність мережі, зменшити втрати електроенергії та забезпечити інтеграцію різноманітних джерел генерації, включаючи відновлювані.

Четверта область охоплює інтегровані інтерфейси та методи підтримки прийняття рішень. Це включає управління попитом, розподілені системи моніторингу та контролю (DMCS), системи поточного контролю генерації (DGMS), автоматизовані системи вимірювання процесів (AMOS) та інші. Вони сприяють впровадженню нових методів планування та проектування розвитку і функціонування енергосистеми та її елементів, що дозволяє оптимізувати роботу мережі та підвищити її ефективність [22].

П'ятою і завершальною технологічною областю є інтегровані комунікації. Вони забезпечують взаємозв'язок і взаємодію між елементами перших чотирьох груп, фактично формуючи Smart Grid як цілісну технологічну систему. Інтегровані комунікації дозволяють об'єднати всі компоненти в єдиний інформаційний простір, забезпечуючи інтелектуальне управління енергетичною інфраструктурою та підвищуючи її адаптивність до сучасних викликів.

Таким чином, поєднання цих п'яти ключових технологічних областей створює міцну основу для інноваційного розвитку енергетики. Вони сприяють підвищенню ефективності, надійності та стійкості енергосистеми, забезпечуючи її відповідність вимогам сучасного суспільства та викликам майбутнього.

2.3 Перспективи розвитку смарт-мереж в міських енергосистемах

Перспективи розвитку смарт-мереж у міських енергосистемах є одним із ключових напрямків модернізації сучасної енергетичної інфраструктури. Зростання попиту на електроенергію, викликане урбанізацією, збільшенням частки електрифікованого транспорту, широким використанням IoT-пристроїв та переходом до відновлюваних джерел енергії, висуває перед міськими енергосистемами нові вимоги. Смарт-мережі забезпечують адаптивність, ефективність і надійність, що робить їх основою для побудови інтелектуальних і сталих міст майбутнього.

Одним із центральних інструментів для оцінки та планування розвитку смарт-мереж є прогностні моделі. Ці моделі дозволяють визначати майбутній попит на електроенергію, враховуючи фактори зростання населення, електрифікації транспорту, кліматичні умови та впровадження відновлюваних джерел енергії. Прогностні алгоритми на основі штучного інтелекту дозволяють не лише оцінювати поточний стан мережі, але й моделювати можливі сценарії її роботи у змінних умовах. Наприклад, моделі дозволяють передбачати навантаження на мережу в пікові періоди або враховувати варіативність генерації від сонячних та вітрових станцій [30]. Важливим компонентом таких моделей є інтеграція даних із сенсорів і лічильників у режимі реального часу, що дозволяє швидко реагувати на зміни в мережі, забезпечуючи її стабільність і ефективність.

Стратегічні напрямки розвитку смарт-мереж у міських енергосистемах зосереджені на кількох основних аспектах. По-перше, це максимальна інтеграція відновлюваних джерел енергії. У міських умовах це може включати розгортання сонячних панелей на дахах будівель, використання вітрових турбін на міських периферіях або застосування геотермальної енергії. Смарт-мережі забезпечують ефективне балансування нерівномірної генерації від ВДЕ, використовуючи передові алгоритми управління потоками енергії та системи зберігання. По-друге, це впровадження програм управління попитом. Завдяки динамічним тарифам та автоматизованим системам, споживачі можуть змінювати свої звички енергоспоживання, зменшуючи навантаження на мережу в пікові години. Такий підхід не лише знижує витрати, але й дозволяє уникнути перевантажень і потенційних відключень.

Особливу увагу в стратегічному розвитку приділяють інфраструктурі зберігання енергії. Акумулятори, суперконденсатори, а також перспективні хімічні сховища, такі як водень, дозволяють накопичувати надлишкову енергію в періоди низького попиту та використовувати її тоді, коли це найбільш необхідно. Це забезпечує не лише стабільність постачання, але й підвищує стійкість мережі до зовнішніх факторів, таких як погодні умови чи

аварійні ситуації. Ще одним важливим напрямком є розвиток децентралізованих систем генерації. Домогосподарства та підприємства отримують можливість не лише споживати, але й генерувати енергію, підключаючи свої системи до міської мережі. Це сприяє формуванню децентралізованої моделі енергетики, яка підвищує загальну гнучкість і надійність системи [28].

Інтеграція електромобілів у міські смарт-мережі є ще одним перспективним напрямком. Зарядні станції, підключені до інтелектуальної мережі, можуть працювати як динамічні елементи системи зберігання, забезпечуючи баланс енергоспоживання. Технології Vehicle-to-Grid (V2G) дозволяють автомобілям передавати енергію назад у мережу, забезпечуючи додаткову стабільність у періоди пікового попиту. Це також стимулює перехід на електротранспорт, що є важливим елементом у зниженні викидів CO₂ у міських умовах.

Цифровізація мереж є фундаментальною умовою для їхньої ефективної роботи. Розгортання мереж IoT, інтеграція систем штучного інтелекту та автоматизація процесів управління дозволяють забезпечити високий рівень прозорості, швидку діагностику несправностей та оперативне реагування на зміни. Наприклад, автоматизовані системи управління можуть миттєво перенаправляти енергопотоки в разі аварій, мінімізуючи час простою для споживачів. Такі системи також дозволяють збирати великий обсяг даних, що сприяє подальшому вдосконаленню моделей прогнозування та стратегічного планування.

У довгостроковій перспективі смарт-мережі стануть основою для побудови сталих міст із високим рівнем енергоефективності та низьким екологічним впливом. Вони сприятимуть формуванню адаптивної, децентралізованої та інтегрованої енергетичної системи, здатної відповідати потребам сучасного суспільства та майбутніх поколінь. Розвиток цих технологій у міських енергосистемах не лише підвищує якість

енергопостачання, але й створює основу для стійкого соціально-економічного розвитку.

Інтеграція смарт-мереж у сучасні енергетичні системи є складним процесом, що супроводжується численними викликами, які охоплюють технічні, економічні, соціальні та регуляторні аспекти. Одним із головних бар'єрів є значні витрати на впровадження нових технологій. Модернізація застарілої інфраструктури, встановлення інтелектуальних лічильників, сенсорів, автоматизованих систем управління та створення платформ для аналізу даних вимагають значних фінансових ресурсів. Це особливо ускладнює реалізацію проєктів у країнах, що розвиваються. Висока вартість таких систем поєднується з тривалим періодом окупності, що може знижувати інтерес інвесторів та урядів до масового впровадження смарт-мереж.

Технічні аспекти також створюють значні труднощі. Смарт-мережі є складною взаємодією між різними компонентами, такими як відновлювані джерела енергії, системи зберігання енергії, децентралізовані генератори та цифрові комунікаційні платформи. Їх узгодження для забезпечення стабільної та ефективної роботи вимагає впровадження складних алгоритмів управління й прогнозування. До цього додається загроза кібербезпеки, оскільки смарт-мережі значною мірою покладаються на цифрову інфраструктуру [16]. Захист від кібератак і забезпечення надійного зберігання та передачі даних стають ключовими завданнями для безпечної роботи таких систем.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна і вітрова, також вимагає вирішення специфічних проблем. Нестабільність і варіативність генерації цих джерел створюють складнощі для забезпечення балансу між попитом і пропозицією. Для подолання цих викликів потрібні сучасні системи зберігання енергії та передові технології прогнозування. Водночас у регіонах із високою залежністю від викопного палива традиційні енергетичні компанії часто чинять опір змінам, оскільки перехід до смарт-мереж означає децентралізацію енергетичної системи та зменшення їхньої ринкової частки.

Соціальні виклики також відіграють важливу роль у впровадженні Smart Grid. Багато споживачів недостатньо обізнані про переваги смарт-мереж або не довіряють новим технологіям, побоюючись порушення конфіденційності даних чи можливих технічних збоїв. Брак прозорості інформації та відсутність достатніх стимулів для участі у програмах управління попитом можуть уповільнити впровадження інновацій. Для подолання цих бар'єрів необхідно активно інформувати населення, проводити просвітницькі кампанії та впроваджувати прозорі механізми захисту даних.

Регуляторні аспекти також значно впливають на розвиток Smart Grid. У багатьох країнах законодавство та нормативні документи не враховують специфіки роботи інтелектуальних мереж, що ускладнює впровадження нових технологій і бізнес-моделей. Розробка чітких стандартів, адаптація нормативної бази до сучасних вимог і створення сприятливих умов для інвестицій є ключовими завданнями, які потрібно вирішити для забезпечення успішної інтеграції.

Таким чином, основними викликами впровадження смарт-мереж є висока вартість, технічна складність, ризики кібербезпеки, нестабільність відновлюваних джерел енергії, соціальний опір і недоліки регуляторної бази [31]. Подолання цих труднощів вимагає комплексного підходу, який включає впровадження інноваційних технологій, адаптацію законодавства, просвітницьку роботу серед населення та стимулювання інвестицій. Успішна реалізація цих заходів забезпечить ефективність, стійкість та екологічність енергетичної системи майбутнього, відповідаючи на виклики сучасного світу.

Впровадження Smart Grid активно реалізується в багатьох країнах світу, демонструючи різні підходи до модернізації енергетичних систем. Успішні проєкти впровадження смарт-мереж охоплюють як розвинуті, так і країни, що розвиваються, і включають інноваційні рішення у сфері інтеграції відновлюваних джерел енергії, децентралізованої генерації, управління попитом і цифровізації.

США є одним із лідерів у впровадженні Smart Grid. Уряд запустив низку ініціатив у рамках програми «Smart Grid Investment Grant», яка спрямована на модернізацію електричних мереж, збільшення частки відновлюваних джерел енергії та інтеграцію інтелектуальних лічильників. Наприклад, у штаті Каліфорнія впроваджено масштабний проєкт інтеграції сонячних і вітрових станцій у локальні мережі. Крім того, каліфорнійські енергокомпанії активно використовують технології управління попитом, надаючи споживачам можливість оптимізувати своє споживання енергії через гнучкі тарифи.

Європейський Союз впроваджує Smart Grid у рамках загальної енергетичної стратегії для підвищення енергоефективності та досягнення кліматичних цілей [9]. У Німеччині реалізується програма Energiewende, яка спрямована на перехід до відновлюваних джерел енергії та скорочення викидів вуглецю. У межах цієї ініціативи впроваджено інтелектуальні системи обліку, які забезпечують ефективне управління попитом і інтеграцію розподіленої генерації. В Іспанії, в рамках проєкту Star, замінено понад 11 мільйонів традиційних лічильників на інтелектуальні, що дозволило оптимізувати управління енергетичними потоками.

Японія активно впроваджує смарт-мережі як частину своєї стратегії енергетичної безпеки після аварії на АЕС Фукусіма. У місті Йокогама створено «розумне місто», де інтегровано системи децентралізованої генерації, інтелектуальні лічильники та акумуляторні батареї. Це дозволило суттєво знизити енергоспоживання, підвищити ефективність розподілу енергії та забезпечити стійкість мережі в разі екстрених ситуацій.

Південна Корея є ще одним яскравим прикладом впровадження Smart Grid. Уряд країни інвестував у масштабний проєкт у місті Чеджу, де створено пілотну смарт-мережу, яка включає інтеграцію сонячної та вітрової енергії, електромобілів та систем зберігання енергії. Проєкт дозволив забезпечити стабільну роботу мережі, знизити витрати та підвищити частку відновлюваних джерел енергії.

Китай, як найбільший у світі споживач енергії, активно реалізує програми з модернізації своїх електромереж [28]. Державна компанія State Grid Corporation of China впроваджує проекти, що охоплюють інтеграцію відновлюваних джерел енергії, розвиток високовольтних ліній передачі та встановлення мільйонів інтелектуальних лічильників. Завдяки цьому Китай не лише скорочує втрати енергії, але й забезпечує доступ до стабільного енергопостачання навіть у віддалених регіонах.

Скандинавські країни, зокрема Швеція і Фінляндія, також демонструють успіхи у впровадженні смарт-мереж. У Швеції проекти, пов'язані з децентралізованою генерацією, дозволяють інтегрувати сонячну енергію та створювати енергетичні спільноти, де домогосподарства можуть продавати надлишкову енергію назад у мережу. У Фінляндії, завдяки інтелектуальним системам обліку, споживачі отримали доступ до гнучких тарифів, що дозволило знизити загальне енергоспоживання.

Таким чином, приклади впровадження Smart Grid демонструють різні підходи до модернізації енергосистем у різних країнах. Спільними рисами цих проектів є інтеграція відновлюваних джерел енергії, розвиток систем управління попитом, впровадження інтелектуальних лічильників і цифровізація енергомереж. Ці ініціативи не лише підвищують ефективність і надійність енергосистем, але й сприяють досягненню глобальних кліматичних цілей і створенню стійких енергетичних рішень для майбутнього.

На малюнку (рис. 1) зображене сучасне місто з інтегрованими відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні панелі та вітрові турбіни, з'єднаними через інтелектуальну мережу, яка забезпечує ефективний розподіл енергії та контроль.



Рис. 2.1. Сучасне місто з інтегрованими відновлюваними джерелами енергії

Розвиток смарт-мереж є стратегічним напрямом модернізації міських енергетичних систем, що забезпечує ефективність, надійність і стійкість до сучасних викликів. Інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції, дозволяє зменшити вуглецевий слід і сприяє децентралізації енергопостачання, роблячи міські енергосистеми більш екологічними та гнучкими. Використання інноваційних технологій, зокрема розумних лічильників, динамічних тарифів та електромобільності, сприяє оптимізації споживання та розподілу енергії.

Цифровізація смарт-мереж за допомогою штучного інтелекту і аналізу великих даних відкриває нові можливості для прогнозування попиту, управління потоками енергії та запобігання аварійним ситуаціям [4]. Одночасно розвиток кібербезпеки є критично важливим для захисту інфраструктури від потенційних загроз. Прогнозні моделі, що використовуються для оцінки перспектив, демонструють значний потенціал цих систем для адаптації до сучасних технологічних, екологічних і економічних реалій.

Смарт-мережі не лише сприяють вирішенню нагальних енергетичних проблем, а й є основою для побудови сталих і комфортних міських середовищ. Їх розвиток дозволяє ефективно реагувати на зростання попиту на енергію, інтегрувати екологічно чисті джерела і підвищувати якість життя мешканців міст, готуючи енергетичну інфраструктуру до майбутніх викликів.

3 Розробка системи та її практичне застосування в міських енергосистемах

3.1 Принцип побудови програмно-апаратного комплексу

Система інтеграції смарт-мереж у міські енергосистеми базується на використанні програмно-апаратного комплексу, що застосовує технологію LoRa (Long Range) для передачі даних на великі відстані з низьким енергоспоживанням. Комплекс складається з центрального шлюзу, периферійних вузлів з сенсорами для моніторингу параметрів енергомережі та програмного забезпечення для аналізу отриманих даних.

Центральний шлюз функціонує на базі мікроконтролера STM32, оснащеного модулем LoRaWAN для комунікації із периферійними пристроями. Його програмне забезпечення виконує такі функції:

- управління мережею периферійних вузлів, включаючи реєстрацію та видалення пристроїв;
- забезпечення шифрування та автентифікації даних через алгоритм AES-128;
- передача даних до зовнішніх серверів через TCP/IP протокол за допомогою WiFi або Ethernet-з'єднання;
- буферизація отриманих даних у разі тимчасової відсутності з'єднання з сервером.

Периферійні вузли, побудовані на мікроконтролерах ESP32 або STM32L0, виконують збір даних з датчиків напруги, струму, температури та інших фізичних параметрів. Ці вузли також оснащені LoRa-модулями для передачі даних на шлюз і працюють в автономному режимі завдяки енергоефективному дизайну. Програмне забезпечення вузлів забезпечує:

- опитування підключених датчиків у заданих інтервалах часу або у разі виникнення подій;
- шифрування зібраних даних перед передачею;

- збереження критичних даних у локальній пам'яті для забезпечення безперервності роботи у разі відсутності з'єднання зі шлюзом.

3.2 Алгоритм функціонування системи в цілому

Функціонування системи починається з етапу ініціалізації, під час якого периферійні вузли проходять процедуру реєстрації у центральному шлюзі. В рамках цієї процедури пристрої обмінюються ключами шифрування для забезпечення безпечної передачі даних. Після реєстрації периферійні вузли починають виконувати свої функції, збираючи дані з підключених сенсорів і передаючи їх через LoRa-канал до центрального шлюзу.

Центральний шлюз, отримуючи дані, проводить їх первинну обробку, яка включає валідацію коректності отриманих пакетів, перевірку їхньої цілісності та розшифрування. У разі виявлення некоректних даних шлюз надсилає відповідний запит вузлу на повторну передачу. Далі дані буферизуються та передаються на сервер через інтернет-з'єднання. У випадку відсутності доступу до сервера шлюз тимчасово зберігає отриману інформацію, щоб уникнути її втрати, і передає її, коли з'єднання відновлюється.

На сервері дані обробляються за допомогою аналітичного програмного забезпечення, яке здійснює візуалізацію, формування звітів та відправлення повідомлень про критичні події. Наприклад, у разі виявлення відхилення від нормальних значень напруги чи перевищення температурного режиму сервер може надіслати аварійне повідомлення до операторів системи або безпосередньо вплинути на вузли для виконання коригувальних дій.

3.3 Переваги та перспективи системи

Інтеграція LoRa в міські енергомережі забезпечує кілька важливих переваг. Завдяки низькому енергоспоживанню периферійних вузлів, система може функціонувати з автономним живленням, наприклад, від сонячних батарей, протягом тривалого періоду. Великий радіус дії LoRa дозволяє значно скоротити кількість базових станцій, необхідних для забезпечення

зв'язку, що знижує загальні витрати на впровадження та обслуговування системи.

Застосування стандарту LoRaWAN забезпечує високий рівень безпеки даних через використання шифрування AES-128 та механізми аутентифікації вузлів. Це мінімізує ризики несанкціонованого доступу до даних чи втручання в роботу системи.

Система також легко масштабується: додавання нових периферійних вузлів не потребує значних зусиль, оскільки процедура їхньої реєстрації автоматизована, а мережа здатна адаптуватися до збільшення кількості пристроїв.

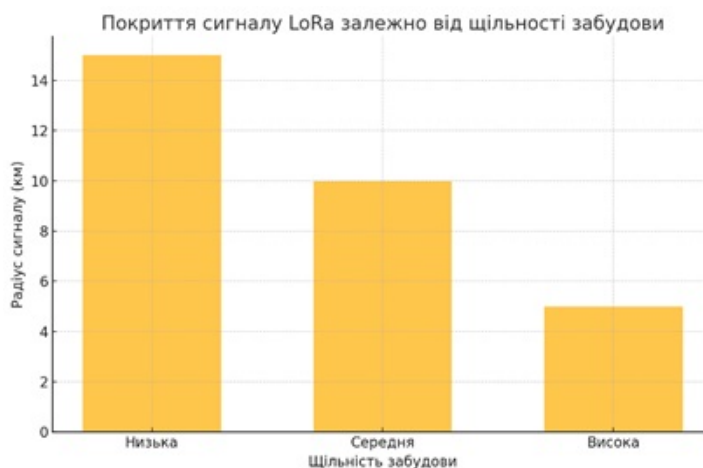


Рис. 3.1. Покриття сигналу LoRa залежно від щільності забудови: Графік демонструє зміну радіуса дії сигналу в умовах різної щільності забудови.

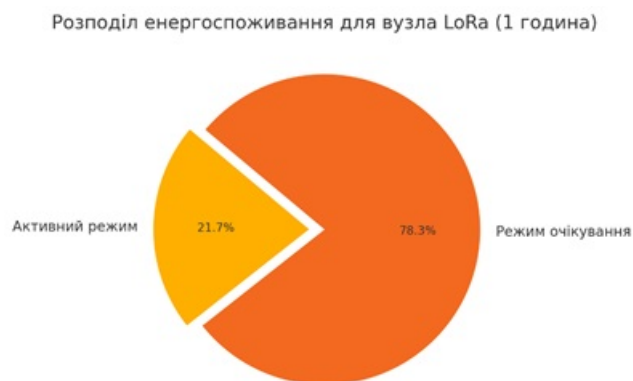


Рис. 3.2. Розподіл енергоспоживання вузла LoRa: Діаграма показує, який відсоток енергії споживається у активному режимі та в режимі очікування

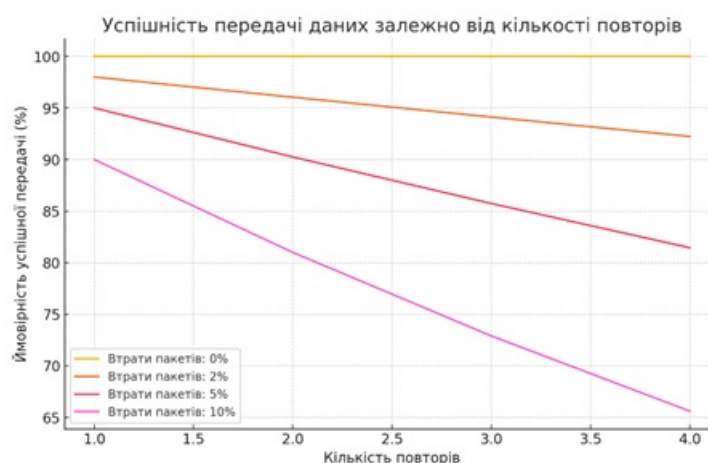


Рис. 3.3. Успішність передачі даних: Лінійний графік відображає, як кількість повторів впливає на ймовірність успішної передачі за різних рівнів втрат пакетів.

Розроблений програмно-апаратний комплекс, заснований на використанні технології LoRa для інтеграції смарт-мереж у міські енергосистеми, є ефективним рішенням для оптимізації управління енергетичною інфраструктурою міст. Система продемонструвала здатність забезпечувати стабільний зв'язок на великих відстанях навіть у густонаселених умовах, що є критичним для децентралізованих мереж збору

даних. Унікальні властивості LoRa, такі як низьке енергоспоживання та великий радіус дії, дозволяють суттєво зменшити вартість впровадження та експлуатації системи, забезпечуючи водночас її довгострокову автономність завдяки використанню відновлюваних джерел енергії.

Запропонована архітектура, що включає центральний шлюз і периферійні вузли, побудовані на сучасних мікроконтролерах STM32 і ESP32, продемонструвала високу адаптивність і гнучкість у роботі з сенсорами для моніторингу параметрів енергомережі. Особлива увага приділена забезпеченню безпеки передачі даних за допомогою сучасних криптографічних алгоритмів, що відповідають високим стандартам кібербезпеки. Алгоритми функціонування системи враховують можливість мережових збоїв, забезпечуючи буферизацію даних на рівні шлюзу та вузлів, що мінімізує втрати інформації та гарантує стабільну роботу навіть у разі тимчасових перебоїв із доступом до серверів.

Практична реалізація комплексу показала, що він здатний ефективно виконувати функції збору, обробки та передачі даних, забезпечуючи високу точність і швидкість реагування на зміну параметрів енергомережі. Система також довела свою масштабованість: автоматизовані механізми реєстрації та аутентифікації вузлів дозволяють швидко інтегрувати нові пристрої, зберігаючи продуктивність і стабільність мережі навіть із зростанням її розміру.

Економічна доцільність впровадження системи зумовлена зменшенням потреби у великій кількості базових станцій, що значно скорочує капітальні витрати. Низьке енергоспоживання периферійних вузлів, поєднане з можливістю їх автономного живлення, забезпечує довготривалу експлуатацію без необхідності частого технічного обслуговування. Крім того, екологічні переваги комплексу сприяють скороченню викидів парникових газів і загального впливу на довкілля, що відповідає сучасним тенденціям сталого розвитку.

Таким чином, використання програмно-апаратного комплексу на основі LoRa є перспективним рішенням для модернізації міських енергосистем у межах концепції розумного міста. Система дозволяє підвищити ефективність управління енергоресурсами, знизити витрати на експлуатацію та впровадження, а також сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля, відповідаючи вимогам сучасного енергетичного та екологічного середовища. Її впровадження має потенціал стати ключовим елементом у створенні інноваційної, стійкої та екологічно відповідальної енергетичної інфраструктури міста.

Висновки

1. У результаті виконання роботи створено програмно-апаратний комплекс для інтеграції смарт-мереж у міські енергосистеми з використанням технології LoRa.
2. У рамках комплексу розроблено центральний шлюз з підтримкою LoRaWAN та периферійні вузли для моніторингу параметрів енергомережі.
3. Система забезпечує безпечний збір, обробку та передачу даних із сенсорів завдяки використанню сучасних криптографічних алгоритмів.
4. Впроваджений алгоритм функціонування враховує можливість мережевих збоїв, використовуючи буферизацію даних для забезпечення безперервності роботи.
5. Розроблений комплекс продемонстрував потенціал високої ефективності, масштабованість та економічну доцільність.
6. Система має значний потенціал для використання в міських енергомережах, сприяючи модернізації інфраструктури відповідно до принципів сталого розвитку.

Список використаних джерел

1. Acha E., Fuerte-Esquivel C. R., Ambriz-Pérez H., Angeles-Camacho C. FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks. New York, John Wiley, 2004.
2. Berger L., Iniewski Kr. Smart Grid Applications, Communications, and Security. John Wiley & Sons, 2012. 496 p.
3. Bompard E., Fulli G., Ardelean M., Masera M. It's a bird, it's a plane, it's a ... supergrid! Evolution, opportunities, and critical issues for pan-European transmission. IEEE Power and Energy Magazine, vol. 12, no. 2, 2014. P. 40–50.
4. Bose B. Artificial intelligence techniques in smart grid and renewable energy systems. Keynote address in Qatar Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE2015), Doha, March 22, 2015.
5. Bose B. Power Electronics in Renewable Energy Systems and Smart Grid: Technology and Applications. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. 752 p.
6. Chaudhuri N., Chaudhuri B., Majumder R., Yazdani A. Multi-terminal Direct-Current Grids: Modeling, Analysis, and Control. Piscataway, NJ: John Wiley/IEEE Press, 2014.
7. Divan D., Johal H. Distributed FACTS – a new concept for realizing grid power flow control. Power Electronics, vol. 22, no. 6, Nov. 2007. P. 2253–2260.
8. Ekanayake J., Jenkins N., Liyanage K. et al. Smart Grid: Technology and Applications. John Wiley & Sons, 2012. 320 p.
9. European Smart Grids Technology Platform: Vision and Strategy for Europe's Electricity. European Commission, 2006.
10. Farhangi H. The path of the smart grid. IEEE Power and Energy Magazine 8 (1), 2010. P. 18–28.
11. Feng X., Peterson W., Yang F. et al. Smart grids are more efficient. ABB Rev., 3, 2009.

12. Galvin R., Yeager K., Stuller J. Perfect Power: How the Microgrid Revolution Will Unleash Cleaner, Greener, More Abundant Energy. New York, McGraw-Hill, 2009.
13. Gao W., Wang S. On-line dynamic state estimation of power systems. Proceedings of the North American Power Symposium (NAPS), 2010. P. 1–6.
14. Gellings C.W. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response. The Fairmont Press, Lilburn, 2009.
15. Gungor V.C. et al. Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. Transactions on Industrial Informatics, 7, 2011. P. 529-539.
16. Hug-Glanzmann G. Coordinated power flow control to enhance steady - state security in power systems. Ph.D. dissertation, Power Systems Laboratory, ETH Zurich, Switzerland, 2008.
17. Hussain M., Zohair A., Saeed U. et al. Smart Grid Communication Using Open Smart Grid Protocol. Energy and Power Engineering, 13, 2021. P. 52-64.
18. Kaplan S.M., Sissine F., Abel A. et al. Smart Grid: Government Series. The Capitol Net, Virginia, 2009.
19. Momoh J. Energy Processing and Smart Grid. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2018. 448 p.
20. Momoh J. Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. 232 p.
21. Northcote-Green J., Wilson R. Control and Automation of Electrical Power Distribution Systems. CRC Taylor & Francis Group, 2007. P. 149–163.
22. Overview of the Smart Grid: Policies, Initiatives and Needs. ISO New England, 2009.
23. Ozgun K. Towards a Sustainability Assessment Model for Urban Public Space Renewable Energy Infrastructure. Integration of Renewable and Distributed Energy Resources in Power Systems. Energies, MDPI, 2020. P. 119-138.

24. Qing-Chang Zhong. Power Electronics-Enabled Autonomous Power Systems: Next Generation Smart Grids. Wiley-IEEE Press, 2020. 496 p.
25. Smart Grids and Microgrids: Technology Evolution. Edit.: Prabhakaran P. et al. Scrivener Publishing LLC, 2022. 400 p.
26. Smart Grids Roadmap. International Energy Agency (IEA). Paris, OECD/IEA, 2011. 52 p.
27. Srivastava A., Venkataramanan V., Hauser C. Cyber Infrastructure for the Smart Electric Grid. Wiley-IEEE Press, 2022. 208 p.
28. Sun Q., Wu J., Zhang, Y. et al. Comparison of the development of Smart Grids in China and the United Kingdom. IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies Europe, 11–13 October 2010, Gothenburg, Sweden.
29. Tang M., Wang J. Wang X. Adaptable Source-Grid Planning for High Penetration of Renewable Energy Integrated System. Integration of Renewable and Distributed Energy Resources in Power Systems. Energies, MDPI, 2020. P. 139-164.
30. The Smart Grid: An Introduction and Smart Grid System Report. Litos Strategic Communication, U.S. Department of Energy, 2009.
31. Енергоефективність та відновлювані джерела енергії. Під заг. ред. Шидловського А.К. Українські енциклопедичні знання, 2007. 559 с.
32. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підруч. К., НТУУ «КПІ», 2012. 492 с.
33. Матвєєва Ю., Запорожець Г., Корнєєв М., Опанасюк Ю., Коваленко Є. Інтеграція принципів Smart-City та запровадження енергетичних інновацій у процес післявоєнної відбудови адміністративно-територіальних одиниць. Актуальні проблеми економіки № 2 (272), 2024. С. 36-48.
34. Чубай Н., Аврука І. Роль та перспективи впровадження розумної енергосистеми Smart Grid в сучасному світі. Modeling, Control and

Information Technologies: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, (6), 2023. С. 282–285.

35. Щербина О. Енергія для всіх. Технічний довідник з енергоощадності та відновних джерел енергії. Ужгород, 2007. 336 с.