



USAID
ВІД АМЕРИКАНСЬКОГО НАРОДУ



ФОТО: KOSSSMOSS-STOCK.ADOBE.COM

МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБЛЕННЯ МІКРОМЕРЕЖ ЗВІТ

Проект енергетичної безпеки (ПЕБ)

10 липня 2024 року

Ред. D

Цей документ став можливим завдяки підтримці американського народу через Агентство США з міжнародного розвитку (USAID). Зміст цього документа є виключною відповідальністю компанії Tetra Tech ES, Inc., і не обов'язково відображає погляди USAID чи Уряду Сполучених Штатів Америки. Цей документ було підготовлено компанією Tetra Tech ES, Inc., яка є підрядником USAID для Проекту енергетичної безпеки (ПЕБ), договір USAID № 72012118C00003.

USAID
КЕТЛІН КІРШ [KATHLEEN KIRSCH]
ПРЕДСТАВНИЦЯ ВІДПОВІДАЛЬНОГО ЗА
КОНТРАКТИ
USAID/УКРАЇНА
М. КИЇВ, УКРАЇНА

**USAID ПРОЄКТ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ
БЕЗПЕКИ**
«TETRA TECH ES, INC.», ПІДРЯДНИК
USAID
МАЙКЛ ТРЕЙНОР
КЕРІВНИК ПРОЄКТУ
MIKE.TRAINOR@TETRATECH.COM
ВУЛ. ЯРОСЛАВІВ ВАЛ, 14А,
М. КИЇВ, УКРАЇНА, 01030

ЗМІСТ

СКОРОЧЕННЯ	4
РЕЗЮМЕ	5
РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОБЛЕМ В УКРАЇНСЬКОМУ КОНТЕКСТІ	5
ОБСЯГ І СТРУКТУРА	5
ПРОБЛЕМИ: БАЛАНСУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ Й ПІДТРИМАННЯ ЧАСТОТИ	6
ТЕХНОЛОГІЇ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ БАЛАНСУВАННЯ	6
ОГЛЯД МЕТОДОЛОГІЇ	7
ОСНОВНІ ЕТАПИ РОЗРОБЛЕННЯ ДИЗАЙН-ПРОЄКТУ	7
ПОЕТАПНИЙ ПРОЦЕС ДООПРАЦЮВАННЯ ДИЗАЙН-ПРОЄКТУ	9
ВАРІАНТИ ДИЗАЙНУ Й КОНФІГУРАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ	10
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ ДИЗАЙНУ МІКРОМЕРЕЖ	12
ПЛАНУВАННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТУ	13
ВИСНОВОК	14
1. ВИМОГИ ДО ДАНИХ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ПРОЄКТУ МІКРОМЕРЕЖІ	15
2. ВСТАНОВЛЕННЯ МЕЖ МІКРОМЕРЕЖІ	26
2.1. ОЦІНЮВАННЯ ВРАЗЛИВОСТІ МЕРЕЖІ В ЦІЛЯХ ПОБУДОВИ МІКРОМЕРЕЖІ	26
2.2. ПОДІЛ НАЯВНИХ ПУНКТІВ НАВАНТАЖЕНЬ І ГЕНЕРАЦІЇ ЗА КАТЕГОРІЯМИ Й ГРУПАМИ	26
2.3. АНАЛІЗ КРИТИЧНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ МІКРОМЕРЕЖІ	27
2.4. ВИБІР ТОЧОК ІЗОЛЯЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ	28
2.5. ТОПОЛОГІЧНІ ВАРІАНТИ МЕЖ МІКРОМЕРЕЖІ	29
2.6. ДИНАМІЧНЕ УПРАВЛІННЯ МЕЖАМИ МІКРОМЕРЕЖІ	30
3. ВАРІАНТИ ДИЗАЙНУ КОНФІГУРАЦІЇ Й ПАРАМЕТРІВ МІКРОМЕРЕЖІ	35
3.1. ПОТЕНЦІЙНІ ВАРІАНТИ ДИЗАЙНУ КОНФІГУРАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ	35
3.2. КЛЮЧОВІ ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ ДИЗАЙНУ КОНФІГУРАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ	41
4. ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ МІКРОМЕРЕЖІ В ОСТРІВНОМУ РЕЖИМІ ТА РЕЖИМІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	44
4.1. ОСТРІВНИЙ РЕЖИМ	44
4.2. РЕЖИМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	46
4.3. ПЕРЕКЛЮЧЕННЯ МІЖ РЕЖИМАМИ	47
5. АНАЛІЗ НАВАНТАЖЕННЯ	49
6. АНАЛІЗ ГЕНЕРАЦІЇ. БАЛАНС МІЖ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТА НАВАНТАЖЕННЯМ	52
6.1. АНАЛІЗ ГЕНЕРАЦІЇ	52
6.2. НАЯВНІ ДЖЕРЕЛА ГЕНЕРАЦІЇ	53
6.3. НОВІ ДЖЕРЕЛА ГЕНЕРАЦІЇ	57

7.	МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ ТА АНАЛІЗ ЕНЕРГОСИСТЕМ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ СЦЕНАРІЇВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖ	61
8.	ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ТЕЛЕМЕТРІЇ/ТЕЛЕКЕРУВАННЯ ТА СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ МІКРОМЕРЕЖАМИ	66
8.1.	АСПЕКТИ ДИЗАЙНУ, ПОВ'ЯЗАНІ З ПИТАННЯМИ ТЕЛЕМЕТРІЇ ТА ТЕЛЕКЕРУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖЕЮ	66
8.2.	СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОМЕРЕЖЕЮ ТА ЇЇ ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ	68
8.3.	КРОКИ З ПРОЄКТУВАННЯ ТЕЛЕМЕТРІЇ/ТЕЛЕКЕРУВАННЯ	77
8.4.	ПРОЄКТУВАННЯ КОМУНІКАЦІЙНОЇ АРХІТЕКТУРИ ДЛЯ ТЕЛЕМЕТРІЇ/ТЕЛЕКЕРУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖЕЮ	78
8.5.	РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО КІБЕРБЕЗПЕКИ ДЛЯ ДИЗАЙНУ МІКРОМЕРЕЖІ	80
9.	ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДЛЯ НОВОГО ОБЛАДНАННЯ	83
9.1.	ТИПИ НОВОГО ОБЛАДНАННЯ	83
9.2.	ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІЙНИХ НОВИХ КОМПОНЕНТІВ	85
10.	КОШТОРИС	90
11.	ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ ДИЗАЙНУ (АБО ПРОЄКТНЕ РІШЕННЯ ЧЕРЕЗ ОПТИМІЗАЦІЮ)	93
11.1.	ПІДХІД НА ОСНОВІ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ	93
11.2.	ПОРІВНЯННЯ НОРМОВАНОЇ ВАРТОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВАРІАНТІВ ДИЗАЙНУ	96
11.3.	ЗАУВАЖЕННЯ ЩОДО ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВІДМОВИСТІЙКОСТІ В ПРОЄКТАХ МІКРОМЕРЕЖІ	99
12.	ПЛАН ВПРОВАДЖЕННЯ МІКРОМЕРЕЖІ	101
12.1.	ЗАХОДИ	101
12.2.	СТАНДАРТНИЙ ПЛАН ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОЄКТУ МІКРОМЕРЕЖІ	107
	ДОДАТОК. ПРОГРАМНІ ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖІ	108

ПЕРЕЛІК РИСУНКІВ

Рисунок 1. Ітеративний процес узгодження KPI з дизайном мікромережі	10
Рисунок 2. Різні потенційні типи меж мікромережі	30
Рисунок 3. Поетапний процес забезпечення якості дизайну мікромережі	61
Рисунок 4. Моделювання мережі та аналіз енергосистеми	62
Рисунок 5. Приклад топології рішення для телеметрії/телекерування мікромережею	66
Рисунок 6. Системне рішення для управління мікромережею	69
Рисунок 7. Керування ФЕ-установками	72
Рисунок 8. Керування генераторною установкою	75
Рисунок 9. Скидання навантаження залежно від потужності	75
Рисунок 10. Скидання/поновлення навантаження залежно від потужності	76
Рисунок 11. Приклад комунікаційної архітектури	80

ПЕРЕЛІК ТАБЛИЦЬ

Таблиця 1. Рекомендації щодо даних, які необхідно отримати для проєктування мікромережі	16
Таблиця 2: Технічні характеристики наявних компонентів системи, які необхідно отримати	22
Таблиця 3. Варіанти конфігурації мікромережі	35
Таблиця 4. Аспекти критеріїв ухвалення рішень	38
Таблиця 5. Крі для порівняння варіантів дизайну конфігурації мікромережі	42
Таблиця 6. Характеристики мікромереж із відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ)	52
Таблиця 7. Стандартна таблиця для порівняння LCOE за різними варіантами	98

СКОРОЧЕННЯ

AMR	Автоматичне зняття показань (Automatic Meter Reading)
BESS	Система зберігання енергії (Battery Energy Storage System)
CAPEX	Капітальні витрати
РДЕ	Розподілені джерела енергії
ОСР	Оператор системи розподілу
DTU	Пристрій приймання-передавання даних
ГІС	Географічна інформаційна система
Ід. №	Ідентифікаційний номер
МЕК	Міжнародна електротехнічна комісія
кА	Кілоампер
км	Кілометр
KPI	Ключовий показник ефективності (Key Performance Indicator)
кВ	Кіловольт
кВА	Кіловольт-ампер
кВАр	Кіловольт-ампер реактивний
кВт	Кіловат
кВт·год	Кіловат-година
LCOE	Нормована вартість електроенергії (Levelized Cost Of Energy)
НН	Низька напруга
MGMS	Система управління мікромережами (Microgrid Management System)
MILP	Змішане цілочислове лінійне програмування (Mixed-Integer Linear Programming)
СН	Середня напруга
МВАр	Мегавольт-ампер реактивний
МВт	Мегават
ОРЕХ	Операційні витрати
ФЕ	Фотоелектричний
Pval	Поточна вартість
ВДЕ	Відновлювані джерела енергії
РЧ	Радіочастота
RTU	Віддалений термінал (Remote Terminal Unit)
с	Секунди
SAIDI	Індекс середньої тривалості переривання в роботі системи (System Average Interruption Duration Index)
SAIFI	Індекс середньої частоти відключень у системі (System Average Interruption Frequency Index)
SCADA	Диспетчерське управління і збір даних (Supervisory Control And Data Acquisition)
SoC	Стан заряду
ВАр	Вольт-ампер реактивний
VOLL	Вартість недовідпуску електроенергії (Value Of Lost Load)

РЕЗЮМЕ

РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОБЛЕМ В УКРАЇНСЬКОМУ КОНТЕКСТІ

Цей посібник надає комплексну основу для розроблення й впровадження систем мікромереж, зокрема в таких регіонах, як Україна, де часто трапляються перебої в електропостачанні, спричинені геополітичними проблемами. У посібнику головну увагу приділено інтеграції ефективних і сталих розподілених джерел енергії (РДЕ), як-от сонячні фотоелектричні (ФЕ), газові генератори, біопаливні й дизельні генератори на рівні операторів систем розподілу. Мета посібника полягає в побудові мікромереж, здатних працювати в екстремальних умовах, з одночасним вдосконаленням місцевих енергетичних систем і посиленням стійкості громад.

У його основу покладено успішні стратегії, реалізовані в різних регіонах світу, з наголосом на підвищенні стійкості електропостачання у вибраних регіонах. Розглянуті в ньому стратегії спрямовані на:

- **Підвищення відмовостійкості та надійності:** підвищення стійкості локальної мережі до збоїв і відключень, а також забезпечення надійного електропостачання під час масштабних і тривалих відключень завдяки застосуванню мережевих рішень і надійних методів проектування та аналізу.
- **Сприяння енергетичній незалежності:** зменшення залежності від зовнішнього енергопостачання завдяки використанню доступних на місцевому рівні відновлюваних ресурсів і розвитку децентралізованих джерел енергії, що підвищуватиме рівень місцевої енергетичної безпеки та автономії.
- **Оптимізацію операційної ефективності:** підготовку детальних методик інтеграції РДЕ. Це передбачає проведення таких важливих аналізів як оцінювання поточного розподілу, короткого замикання та стабільності для адаптації до змін навантаження й забезпечення ефективності мікромережі за різних сценаріїв.
- **Використання адаптивного дизайну та управління:** запровадження гнучких та ефективних систем управління мікромережами, здатних швидко адаптуватися до мінливих умов і графіків ремонту, що є критично важливим для відновлення й стабілізації в постконфліктному періоді. Це передбачає інтеграцію відновлюваного та розподіленого виробництва для сприяння сталості й зменшення впливу на довкілля.

ОБСЯГ І СТРУКТУРА

Структура цього звіту передбачає проходження на системній основі критичних етапів проектування мікромереж, зокрема:

- Початкове планування та збір даних із наголосом на розумінні конкретних енергетичних потреб та інфраструктурних можливостей на місцевому рівні.
- Детальне моделювання експлуатації мікромережі та проведення імітаційних експериментів для оптимізації ефективності роботи й надійності в нормальних і в екстремальних умовах.

- Стратегії впровадження з урахуванням як технічної, так і економічної доцільності, що зокрема є актуальним для регіонів, де тривають бойові дії, або регіонів, які перебувають на етапі відновлення.

ПРОБЛЕМИ: БАЛАНСУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ Й ПІДТРИМАННЯ ЧАСТОТИ

Острівні мікромережі мають значні проблеми, зокрема в питаннях балансування потужності й підтримання частоти. Наявність цих проблем має суттєве значення для підтримання стабільності та ефективності роботи, зокрема в разі відключення від основної мережі.

- **Балансування потужності**
 - **Узгодження попиту й пропозиції:** мікромережі мають забезпечувати динамічне балансування попиту та пропозиції для підтримання стабільності системи. Це передбачає застосування складних систем керування, здатних управляти мінливістю, спричиненою особливостями відновлюваних джерел енергії та різкими змінами попиту на навантаження.
 - **Інтеграція систем зберігання:** керовані належним чином системи зберігання енергії (BESS) необхідної місткості є критично важливими для стабілізації мікромережі шляхом поглинання надлишку енергії в періоди низького попиту й постачання енергії в періоди пікового попиту.
- **Підтримання частоти**
 - **Підтримання стабільності частоти:** в острівному режимі мікромережі повинні самостійно підтримувати стабільність частоти, що є складним завданням з огляду на їх менший масштаб і нижчу інерцію.
 - **Удосконалені стратегії управління:** такі методи, як контроль падіння й віртуальна інерція, застосовуються для стабілізації частоти мережі шляхом забезпечення істотної інерції та демпфування.

ТЕХНОЛОГІЇ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ БАЛАНСУВАННЯ

Ці проблеми можуть бути розв'язані шляхом застосування в мікромережах різних технологій диспетчеризації РДЕ:

- **Газові турбіни.** Вони надають можливість оперативного реагування для швидкого регулювання вихідної потужності, щоб управляти коливаннями попиту й пропозиції. Крім того, вони забезпечують гнучкість у використанні палива, адже можуть працювати на природному газі, біогазі й водні.
- **Системи комбінованого виробництва тепла та електроенергії.** Ці системи підвищують загальну енергоефективність завдяки одночасному виробництву електроенергії й тепла. Вони здатні адаптувати власну вихідну потужність до поточних вимог щодо електрики та тепла, допомагаючи балансувати потужність і підтримувати частоту.

- **Газові/дизельні/двопаливні генератори.** Вони є надійними резервними джерелами енергії, які можуть працювати незалежно від мережі, забезпечуючи безперервне електропостачання. Вони є доступними, а їхні технології — перевіреними, що забезпечує швидкість їх розгортання та обслуговування.
- **Енергетичні системи на основі біомаси.** У них паливом для виробництва енергії слугують органічні матеріали. Ці системи є сталим і відновлюваним джерелом енергії, допомагають балансувати енергопостачання в мікромережі.
- **Системи зберігання енергії.** BESS є критично важливими для управління переривчастістю вироблення відновлюваної енергії. Вони забезпечують енергетичний арбітраж шляхом накопичення енергії в періоди низького попиту й вивільнення її в періоди пікового попиту, завдяки чому відбувається оптимізація використання енергії в мікромережі.

ОГЛЯД МЕТОДОЛОГІЇ

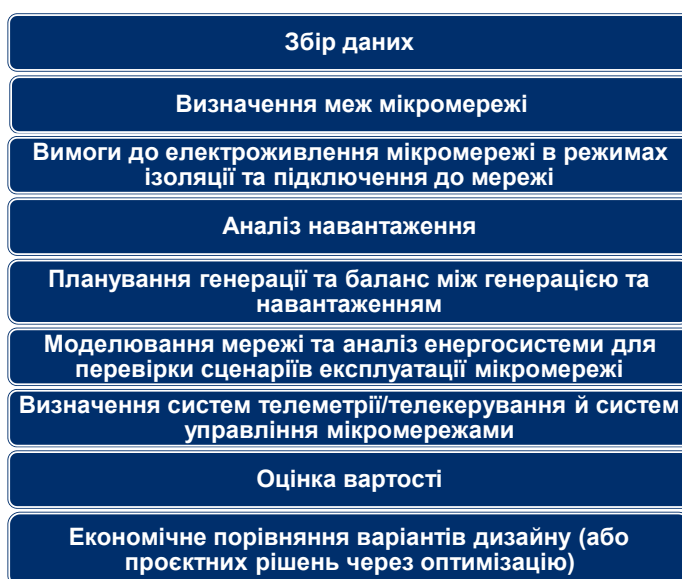
Рекомендована методологія пропонує починати роботу з проведення ретельного оцінювання визначеного регіону, зокрема комплексного збору даних щодо споживання енергії, ресурсів та інфраструктури, з наступним проведенням географічного, екологічного аналізу та аналізу критичності попиту. Ця основоположна робота є критично важливою, оскільки її результати стають підґрунтям для наступних етапів, як-от ідентифікація джерела енергії, визначення пріоритетів у навантаженні та складання мапи громади, і забезпечують узгодження проєкту з місцевими потребами й нормативно-правовою базою.

На етапах технічного розроблення передбачено розв’язання питань безпеки, управління ризиками, проєктування й кошторисного розрахунку з потужним наголосом на виборі відповідних технологій для об’єктів генерації, зберігання й розподілу. Основні принципи експлуатації включають довговічність, здатність до безперебійного постачання й вибір РДЕ для задоволення конкретних потреб громади чи об’єкта експлуатації. В основі гнучкості, масштабованості та ефективності мікромережі лежить інтеграція інтелектуальних мережевих технологій і BESS.

ОСНОВНІ ЕТАПИ РОЗРОБЛЕННЯ ДИЗАЙН-ПРОЄКТУ

Основні технічні етапи є такими:

1. **Збір даних.** Збір точних даних про мережеву інфраструктуру, вимоги до навантаження й можливості РДЕ, які стануть підґрунтям для роботи на етапах проєктування та



моделювання. Це передбачає збір інформації про споживання енергії, ресурси та наявну інфраструктуру.

2. **Визначення меж мікромережі.** Застосування багатокритеріального інструменту ухвалення рішень для оцінювання й визначення пріоритетності регіонів, виходячи з уразливості мережі, критичності навантаження та потенціалу інтеграції РДЕ. На цьому етапі відбувається чітке визначення меж мікромережі з їх оптимізацією для підвищення ефективності та відмовостійкості.
3. **Вимоги до електроживлення мікромережі в режимах ізоляції та підключення до мережі.** Проектування конфігурацій, оптимальних із погляду надійності, економічної ефективності та впливу на довкілля, що підтримується вибором відповідних конфігурацій РДЕ і визначенням її розмірності. Це включає розуміння енергетичних потреб за умов ізоляції та підключення до мережі.
4. **Аналіз навантаження.** Аналіз профілів навантаження за експлуатації в нормальних і пікових умовах для забезпечення достатньої потужності генерації та відстеження навантаження. Цей етап включає детальні дослідження навантаження для ефективного узгодження виробництва з попитом.
5. **Планування генерації та баланс між генерацією та навантаженням.** Оптиміальне розміщення та інтеграція РДЕ, які є критично важливими для підвищення ефективності й стабільності мережі, зменшення втрат і покращення управління навантаженням завдяки стратегічному вибору точки підключення. Це передбачає планування як за наявними, так і за новими джерелами генерації для задоволення потреб мікромережі.
6. **Моделювання мережі та аналіз енергосистеми для перевірки сценаріїв експлуатації мікромережі:** виконання детального моделювання для перевірки сценаріїв експлуатації мікромережі за різних умов. На цьому етапі перевіряються надійність дизайну мікромережі та його здатність справлятися з різними експлуатаційними проблемами.
7. **Визначення систем телеметрії/телекерування й систем управління мікромережами.** Впровадження надійних систем телеметрії та телекерування, інтегрованих із системами управління мікромережами, для моніторингу й управління в реальному часі, що підвищує експлуатаційну надійність і швидкість реагування. Це включає створення необхідної інфраструктури зв'язку та управління.
8. **Оцінка вартості.** Ретельний добір та інтеграція нового обладнання за результатами детального технічного та експлуатаційного аналізу. Таким чином, забезпечуються сумісність і функціональність мікромережі із задоволенням поточних і майбутніх енергетичних потреб. Цей етап передбачає оцінювання витрат, пов'язаних із різними варіантами дизайну та обладнанням.
9. **Економічне порівняння варіантів дизайну (або проєктних рішень через оптимізацію).** Порівняння різних сценаріїв проектування для оптимізації економічної доцільності та експлуатаційної ефективності. Це передбачає використання інструментів і методологій, призначених для ухвалення

обґрунтованих рішень щодо найкращих варіантів дизайну, виходячи з економічних і експлуатаційних критеріїв.

ПОЕТАПНИЙ ПРОЦЕС ДООПРАЦЮВАННЯ ДИЗАЙН-ПРОЄКТУ

Основний блок 1. Визначення сценарію. Ця стадія є досить ітеративною й передбачає підзавдання, відображені в загальній послідовності, але висновки, отримані в будь-якій конкретній області, можуть вимагати перегляду результатів роботи в суміжних областях. Початковий етап включає опис характеристик системи та встановлення цілей, результатом чого є визначення географічних меж мікромережі. У цьому блоці також відбувається визначення та уточнення загальних цілей, зокрема фізичних параметрів і цільових ключових показників ефективності (KPI). Наступний етап — аналіз наявної у визначених межах інфраструктури. За наведеними в цьому документі настановами визначають критичні навантаження та інфраструктуру, а також встановлюють їх пріоритетність з урахуванням особливостей регіону, у якому планується розгортання мікромережі. Після критичної інвентаризаційної оцінки необхідно оцінити й визначити параметри конфігурації, а також межі системи та вимоги до РДЕ й накопичувачів.

Основний блок 2. Розроблення рішення. На цій стадії, на основі висновків, отриманих на попередньому етапі, визначають кількісні параметри концептуального проєкту мікромережі. Проводять аналіз комбінації відновлюваних і звичайних генераторів для обслуговування пікових значень критичного навантаження (або, у деяких випадках, усієї інфраструктури) і визначають систему. Далі здійснюють оцінювання витрат і ефективності роботи. Цей блок докладно описується далі в дизайн-проєкті, у ньому розкриваються питання життєздатності, можливості альтернативних варіантів та обмеження вартості. Якщо не буде знайдено обґрунтований концептуальний шлях розвитку, розробники проєкту мікромережі можуть повернутися до попереднього етапу, щоб удруге проаналізувати дані.

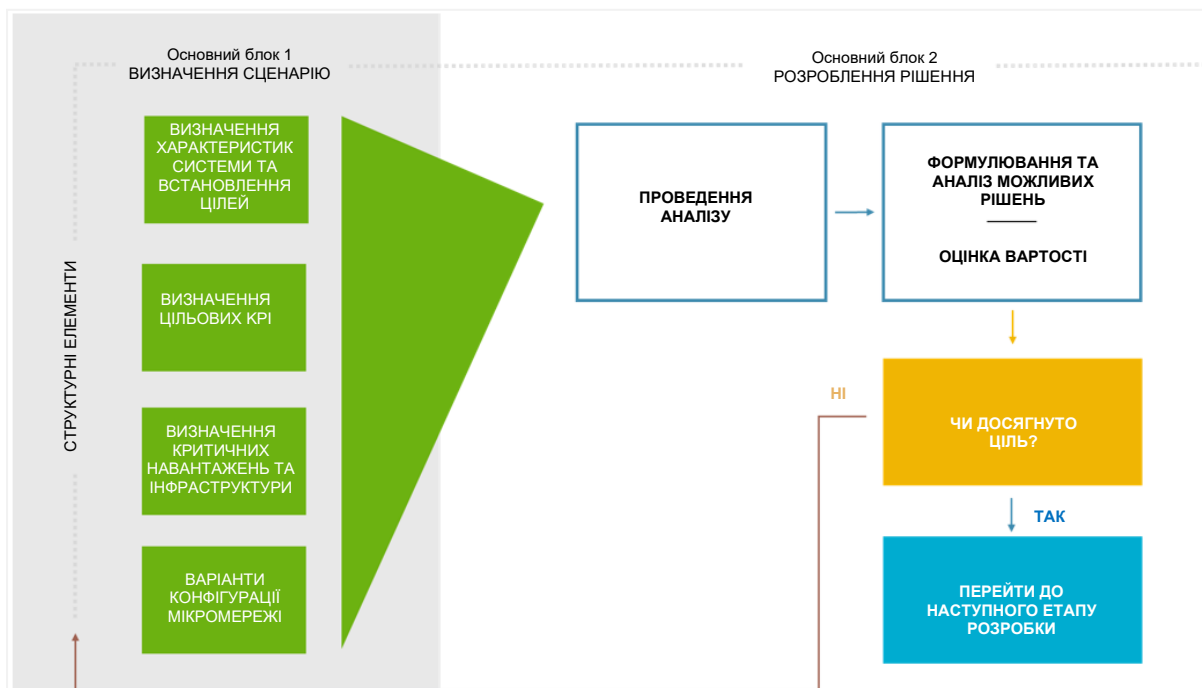


Рисунок 1. Ітеративний процес узгодження KPI з дизайном мікромережі

ВАРІАНТИ ДИЗАЙНУ Й КОНФІГУРАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ

Конфігурація мікромережі та гнучкість дизайну. У посібнику докладно описано низку конфігурацій мікромережі, розроблених для підвищення надійності, ефективності та сталості електропостачання. Зацікавлені сторони можуть модифікувати проекти мікромереж відповідно до конкретних експлуатаційних вимог, а також адаптувати їх до певних географічних, економічних та екологічних умов. Цей процес ухвалення рішень передбачає оцінювання кількох параметрів, як-от розмірність, джерела енергії, стратегії управління й системи керування, кожен із яких передбачає чіткі переваги за певними сценаріями.

Повний огляд варіантів. У наведеній нижче таблиці представлено класифікацію потенційних конфігурацій мікромережі та окреслено ключові аспекти, як-от попит, який необхідно задовольнити, тривалість роботи поза мережею, типи РДЕ й стратегії управління. Ці конфігурації розроблено для оптимізації роботи за різними показниками, як-от відмовостійкість системи, економічна ефективність і вплив на довкілля. У такий спосіб буде забезпечено не лише відповідність мікромережі поточним енергетичним потребам, але й можливість її масштабування та адаптації до майбутніх змін.

Стратегічний підхід до проєктування мікромереж. Розуміння цих варіантів дає проєктувальникам та інженерам змогу розробляти ефективні та відмовостійкі мікромережі, які бездоганно інтегруються в наявну енергетичну інфраструктуру або можуть працювати незалежно як автономні системи. Цей стратегічний підхід має суттєве значення для розв'язання питань дедалі більшої складності сучасних енергетичних систем та подолання нових викликів, що постають перед ними, він сприяє виробленню сталіших і надійніших енергетичних рішень.





КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ	ВАРІАНТИ				
Необхідні розміри/вимоги до мікромережі	Тільки критичні навантаження	Критичні й некритичні навантаження	Тільки навантаження вдень	Повне навантаження (вдень і вночі)	
Очікувана тривалість роботи мікромережі поза мережею	2 години	8 годин	24 години	1 місяць	Невизначена
Тип/джерело РДЕ	Сонячн. ФЕ + батарея	Дизель + батарея	Газогенератор + батарея	Сонячн. + дизель + газ	Сонячн. ФЕ + газогенератор
Топологія генерації	Централізована	Децентралізована	Гібридна	Модульна	Мобільна
Управління межами мікромережі	Статичне/визначене	Динамічне/адаптивне			
Стратегії управління	Централізовані	Децентралізовані	Однорангові		
Перехід на керування мікромережею	Перехід на ручне керування на місці	Перехід на ручне керування за допомогою телекерування	Автономна/режим «гарячого резерву»	Запрограмований час	

Ключові показники ефективності. У посібнику також представлено набір ключових показників ефективності, важливих для оцінювання й порівняння ефективності роботи, результативності та відмовостійкості різних дизайнів мікромереж. Ці KPI полегшують проведення індивідуального аналізу, що узгоджується з конкретними потребами проекту, та гарантують, що процес оцінки є ґрунтовним і може бути адаптований під специфічні вимоги. За допомогою таких KPI оцінюють:

- **Витривалість і автономність** – тривалість автономної роботи мікромережі в періоди пікових навантажень без зовнішньої підтримки.
- **Управління потужністю** – здатність працювати з критичними навантаженнями й здійснювати їх пріоритезацію за сценаріїв стандартного й високого попиту.
- **Швидкість реагування системи** – час і ефективність переходу з режиму підключення до мережі на острівний режим і навпаки, включно з часом на стабілізацію системи.
- **Використання ресурсів** – ефективність у використанні РДЕ й забезпеченні роботи під час збоїв компонентів.
- **Сталість** – частка відновлюваних джерел енергії в загальній потужності мікромережі.
- **Управління системою та моніторинг** – ефективність систем керування в забезпеченні своєчасного й точного оперативного зворотного зв'язку.

- **Масштабованість** – здатність мікромережі до розширення без істотних змін інфраструктури.
- **Економічні переваги** – зниження витрат завдяки операціям у режимі підключення до мережі, як-от реагування на попит і зменшення пікових навантажень.
- **Якість електроенергії** – підтримання належних рівнів напруги й частоти під час автономної роботи для забезпечення безпеки та функціональності.

Цей звіт містить ключові рекомендації щодо вибору оптимальної основної конфігурації, зведені за такими головними компонентами:

 <p>Визначення критичних і некритичних навантажень</p> <p>Почніть із визначення й класифікації критичних і некритичних електричних навантажень у тій частині розподільної мережі, яку було вибрано як регіон, де планується розгортання мікромережі. Сюди входить оцінювання енергетичних потреб за кожним трансформатором і фідером для розуміння вимог до електроживлення й критичності з погляду доступу до безперебійного постачання.</p>	 <p>Оцінювання наявних можливостей мережі й генерації</p> <p>Здійсніть огляд наявної енергосистеми, зокрема об'єктів генерації й системи розподілу. Проаналізуйте розташування наявних генераторів, систем зберігання й резервних відсіків автоматичних вимикачів. Такий аналіз допомагає ефективно використовувати наявні компоненти, мінімізувати потреби в новому будівництві й знизити витрати.</p>	 <p>Визначення оптимальних точок ізоляції мікромережі</p> <p>Виберіть точки перемикання електричних мереж, виходячи з розташування критичних навантажень, наявної мережі й генерації. Метою вибору точок перемикання має бути включення всіх критичних навантажень до мікромережі з урахуванням економічної ефективності включення або виключення певних некритичних навантажень, виходячи з їхнього географічного розподілу й доцільності підключення.</p>	 <p>Включення джерел нового покоління</p> <p>Визначте межі, всередині яких будуть розташовані нові джерела генерації або зберігання, заплановані для використання в мікромережі. Точки фізичного та електричного підключення таких нових об'єктів повинні узгоджуватися з загальним проектом для оптимізації ефективності й відмовостійкості мікромережі.</p>
---	---	---	---

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ ДИЗАЙНУ МІКРОМЕРЕЖ

Оскільки проекти мікромереж – а насамперед ті з них, що мають на меті посилення стійкості, а не отримання безпосередніх фінансових прибутків – мають унікальні цілі та стикаються з унікальними викликами, у цьому дослідженні рекомендується змістити наголос із питання загальної доцільності проектів мікромереж на користь більш збалансованого підходу. Краще не обмежуватися лише аналізом загальної економічної доцільності мікромережі, а здійснити порівняння альтернативних варіантів її дизайну й оптимізувати її конфігурацію та розміри.

Натомість варто розглянути два альтернативні підходи до оцінювання дизайну мікромережі: підхід на основі цільової функції оптимізації та підхід на основі нормованої вартості електроенергії.

Підхід на основі цільової функції та оптимізації передбачає застосування передових методів оптимізації, як-от змішане цілочисельне лінійне програмування, для дослідження різних конфігурацій з метою мінімізації загальних витрат на придбання та експлуатацію з одночасним максимальним збільшенням ефективності й надійності системи.

Підхід на основі нормованої вартості електроенергії забезпечує наявність чітких показників для порівняння економічної ефективності різних дизайнів мікромережі, що сприяє виявленню найефективніших з економічного погляду конфігурацій.

Техніко-економічне порівняння альтернативних конфігурацій мікромережі потребує ретельного аналізу з урахуванням як початкових капітальних, так і поточних експлуатаційних витрат. Мета – мінімізувати ці витрати, водночас максимально збільшивши ефективність системи й покриття навантаження (а також інші ключові показники ефективності, представлені в цьому звіті). Цього можна досягти шляхом стратегічного вибору й визначення місткості РДЕ, а також впровадження розширених систем контролю, які оптимізують експлуатаційні витрати впродовж життєвого циклу системи.

ПЛАНУВАННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЄКТУ

Для успішного розгортання мікромереж важливою є наявність добре структурованого плану впровадження. Процес починається з визначення структури проєкту, що включає встановлення його обсягу і змісту та виявлення всіх відповідних зацікавлених сторін. Далі іде детальне планування, де головна увага приділяється дослідженням техніко-економічної доцільності й дизайну системи для оптимізації мікромережі з урахуванням місцевих умов.

Процеси на кожній стадії розроблено таким чином, щоб забезпечити плавний перехід до наступної стадії. При цьому зацікавленим сторонам надається високорівнева оцінка тривалості відповідного етапу для забезпечення своєчасного та ефективного завершення проєкту. Така комплексна структура з можливістю адаптації має суттєве значення для створення технічно життєздатних, рентабельних та оптимально інтегрованих у наявну інфраструктуру мікромереж, зокрема в таких країнах як Україна, де відмовостійкість і надійність є критично важливими з огляду на конфлікт, що триває.

Рекомендовані строки основних стадій реалізації можуть суттєво відрізнятись залежно від низки чинників, як-от наявність РДЕ, масштаб мікромережі, особливості фінансування проєкту, ефективність тендерного процесу, отримання погоджень від регуляторних органів та залучення зацікавлених сторін. Утім, вони мають включати такі етапи.

1. Період проєктування й проведення тендеру

- Цей етап починається з завершення роботи над дизайн-проєктом і включає такі заходи, як дослідження системи, аналіз впливу на довкілля й тендерний процес.
- **Тривалість:** приблизно 3 місяці (з початку 1-го місяця до кінця 3-го місяця).

2. Період укладення договорів і підготовки до будівництва

- Цей етап включає доопрацювання договорів, проведення детального обстеження ділянок робіт та підготовку до будівництва.
- **Тривалість:** приблизно 3 місяці (з 3-го по 6-й місяць).

3. Стадія реалізації

- На цьому етапі проводяться основні будівельні роботи, зокрема з встановлення основних компонентів та інтеграції системи.
- **Тривалість:** 4 місяці (із 6-го по 10-й місяць).

4. Початкова подача живлення та введення в експлуатацію

- Цей етап включає початкову подачу живлення, тестову експлуатацію та остаточне налаштування аж до передачі в експлуатацію.
- **Тривалість:** близько 2 місяців (з 10-го по 12-й місяць).

Разом ці етапи охоплюють повний 12-місячний період, протягом якого планується реалізація проєкту мікромережі, і визначають часові рамки для робіт – від дизайн-проєкту до повного введення мікромережі в експлуатацію.

Враховуючи наявний дефіцит потужностей в Україні, системи генерації й накопичення електроенергії можуть бути введені в експлуатацію на ранній стадії підготовки проєкту мікромережі для синхронізації їхньої роботи з основною мережею.

ВИСНОВОК

Ці рекомендації створюють комплексну та адаптивну основу для розвитку мікромереж, призначену допомогти подолати складності проєктування на рівні розподілу з наголосом на практичних рішеннях, які можна масштабувати. Оскільки першочергова увага в ній приділяється питанням життєздатності, економічної рентабельності та оптимізації рішень, ця структура сприяє інтегруванню передових технологій і відновлюваних джерел енергії. Метою цього посібника є сприяння розгортанню РДЕ й мікромереж як основного елемента сталої та стійкої енергетичної інфраструктури шляхом ретельного планування, застосування складних аналітичних інструментів і правильного вибору компонентів. Посібник є особливо актуальним для громад, схожих на громади в Україні, де пануючі обставини конфлікту вимагають потужних і надійних енергетичних рішень, здатних сприяти забезпеченню регіональної стабільності та енергетичної незалежності.

1. ВИМОГИ ДО ДАНИХ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ПРОЄКТУ МІКРОМЕРЕЖІ

Процес збору та оцінювання даних є критично важливим як початковий крок методології створення мікромережі. Отримана інформація буде основою для таких подальших видів аналізу, як визначення розмірів мікромережі, генерування та балансування навантаження, аналіз витрат, моделювання мережі та аналітичні роботи, призначені для перевірки дизайну, проектування системи автоматизації, а також визначення та оптимізації нових системних компонентів (інвестицій), необхідних для впровадження мікромережі.

Щойно буде точно визначено регіон, у якому планується розгортання мікромережі, важливим буде отримати вичерпні дані про електроенергетичну інфраструктуру. Першорядне значення має забезпечення наявності повної цифрової моделі мережі. Ця модель являє собою детальну схему наявної мережі, що включає всі електричні компоненти та взаємозв'язок між ними. Якщо готової цифрової моделі немає, її необхідно розробити з нуля.

Далі необхідно визначити точні координати розташування всіх трансформаторів і розподільних ліній у межах регіону, у якому планується розгортання мікромережі. Для планування дій на випадок аварійних ситуацій необхідно виявити будь-які запасні фідери на підстанціях середньої напруги (СН), комутаційних і трансформаторних підстанціях. Крім того, необхідно скласти інвестиційні плани та окреслити в них наступні п'ять років експлуатації мережі розподілу електроенергії, щоб забезпечити їх узгодження з вектором майбутнього розвитку проєкту мікромережі.

Також важливою є інформація про статус, потужність, тип і географічне розташування наявних розподілених генераторів, серед яких – сонячні генератори, когенераційні установки, дизельні генератори та інші засоби «вбудованої» генерації. Точки підключення до мережі, дані щодо структури власності, коефіцієнти потужності та профілі виробництва минулих періодів дають чітке уявлення про наявні об'єкти генерації. Для розуміння умов експлуатації необхідна також детальна інформація щодо інверторних технологій на сонячних електростанціях, а також систем автоматизації та захисту на наявних електростанціях.

Для ефективного проектування мікромережі, яка б відповідала різним вимогам усієї розподільчої мережі, важливо зібрати повні дані про навантаження – як погодинне, так і пікове – від трансформаторних центрів, фідерів і трансформаторів у всіх регіонах, де планується розгортання мікромережі. Такий розширений підхід гарантує, що мікромережа зможе динамічно адаптувати свої операційні межі експлуатаційних параметрів, підтримуючи безперебійне постачання до критичних і некритичних точок навантажень, розташованих усією мережею. Класифікація споживачів – від критичних до некритичних – має вирішальне значення для встановлення пріоритетів енергопостачання й спрощення ефективних розрахунків балансу генерації та навантаження. Це передбачає не лише документальну фіксацію загальної кількості споживачів та структури їхнього споживання, але й складання детальної мапи, що відобразить точки їх підключення до електромережі, зокрема підстанції, фідери СН, розподільні трансформатори й точки обслуговування. Завдяки фіксації детальних даних про навантаження щодо всіх компонентів мережі, а не лише компонентів, безпосередньо підключених до критичних навантажень, дизайн-проєкт гарантує роботу

мікромережі за належних експлуатаційних обмежень у будь-який час, водночас підвищуючи надійність і функціональність роботи системи в усій розподільчій мережі.

Для того, щоб наявні системи автоматизації, диспетчерського управління й збору даних (SCADA), а також зняття показань та захисту відповідали вимогам мережі з її потенційним розширенням або модифікацією, потрібна ґрунтовна інвентаризація. Така інвентаризація включає складання докладного списку як одиниць обладнання, встановлених у межах розподільних електромереж і мереж низької напруги (НН), так і пов'язаних із ними процесів, що стосуються основних принципів захисту.

Крім того, з урахуванням місцевих умов, пов'язаних зі збройним конфліктом та загрозами безпеці, у процесі оцінювання необхідно брати до уваги такі чинники, як фізичні заходи безпеки для компонентів мережі, резервування в критичній інфраструктурі й потенційні кіберзагрози. Ці елементи істотно впливають на здатність мікромережі долати унікальні виклики, пов'язані з місцевими умовами, та адаптуватися до них.

Нарешті, підготовка вичерпного прайс-листа й технічних специфікацій за всіма одиницями потенційного обладнання, що використовуватиметься в проєкті мікромережі, допомагає створити чіткі бюджетні рамки для реалізації проєкту. Такий каталог міститиме довідкову інформацію, необхідну для проведення закупівель, і допоможе під час планування фінансових аспектів проєкту.

У таблиці нижче представлено набір загальних рекомендацій щодо даних, які потрібно отримати. Утім, фактичні вимоги до даних можуть відрізнятися залежно від об'єкта. Адаптація процесу збору даних до конкретних потреб і умов кожного окремого об'єкта забезпечить адекватний характер рішення для мікромережі та його оптимізацію в умовах передбачуваного середовища використання.

ТАБЛИЦЯ 1. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ДАНИХ, ЯКІ НЕОБХІДНО ОТРИМАТИ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖІ

ЕЛЕМЕНТ ДАНИХ	ОПИС	ДОСЛІДЖЕННЯ/ЦІЛЬ ВИКОРИСТАННЯ	ОСНОВНИЙ ВЛАСНИК І ФОРМАТ ДАНИХ
Цифрова модель мережі	Повна схема наявної архітектури мережі, що включає всі електричні компоненти й підключення	Необхідна для проведення аналізу енергосистеми й визначення можливостей передачі електроенергії наявними провідниками й трансформаторами або визначення необхідних заходів із модернізації, покликаних збільшити потужність	Оператор системи розподілу (ОСР), у форматі DigSILENT PowerFactory або аналогічного програмного забезпечення
Географічні дані	Координати й фізичні адреси всіх підстанцій високої та середньої напруги	Важливе значення для оптимального фізичного розподілу критичних навантажень і об'єктів генерації в мережі	ОСР, мапи географічних інформаційних систем (ГІС) (векторні дані)
	Координати всіх розподільних трансформаторів (СН/НН)	Важливі для складання точної мапи мережі й планування інфраструктури розподілу	ОСР, мапи ГІС (векторні дані)

ТАБЛИЦЯ 1. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ДАНИХ, ЯКІ НЕОБХІДНО ОТРИМАТИ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖІ

ЕЛЕМЕНТ ДАНИХ	ОПИС	ДОСЛІДЖЕННЯ/ЦІЛЬ ВИКОРИСТАННЯ	ОСНОВНИЙ ВЛАСНИК І ФОРМАТ ДАНИХ
	Детальні мапи з зображенням шляхів проходження всіх повітряних і кабельних ліній електропередачі	Необхідні для точного планування та прокладання нових ліній електропередачі та забезпечення резервування в схемі мережі та її надійності	ОСР, мапи ГІС (векторні дані)
	Деталізовані топографічні дані, для планування фізичної схеми нових компонентів мережі з урахуванням можливостей пошкодження внаслідок обстрілів	Використовуються для розширеного планування фізичної схеми компонентів мережі з урахуванням проблем, пов'язаних із географічним розташуванням, і потенційних безпекових загроз	Органи місцевого самоврядування або місцеві органи влади, мапи
	Мапи, що показують резервування в критичній інфраструктурі для визначення областей, у яких бракує систем резервування та які потребують вдосконалення	Використовуються для виявлення слабких місць у мережі, у яких бракує можливостей для резервування, а також для підготовки заходів із модернізації, спрямованих на підвищення надійності та відмовостійкості мережі	Органи місцевого самоврядування або місцеві органи влади, мапи
	Інвентаризація запасних фідерів на підстанціях СН	Важлива для визначення наявної інфраструктури, яку можна переоптимізувати або модернізувати для забезпечення роботи мікромережі й пунктів секціонування	ОСР, табличні дані або однолінійні схеми
Детальні дані щодо підстанцій і ліній передачі	Стан і потужність усіх наявних розподільних вбудованих генераторів із зазначенням типу (сонячні, когенераційні, дизельні тощо) потужності, географічного розташування й точок підключення до мережі	Необхідні для комплексної оцінки наявних і потенційних джерел генерації – як диспетчеризованих, так і змінних, забезпечення потужності, достатньої для задоволення вимог до електричного навантаження з урахуванням експлуатаційних характеристик, наявності палива й відповідних витрат	ОСР, табличні дані (передбачається, що ОСР отримує ці дані від власників/операторів РДЕ та оновлює їх)
	Детальні дані про навантаження для кожної підстанції, кожного фідера й трансформатора	Важливі для аналізу даних про навантаження з високою роздільною здатністю, забезпечення точного визначення розміру та оптимальної ефективності як у режимі підключення до мережі, так і в острівному режимі роботи	ОСР, табличні дані (з системи SCADA, автоматичного зняття показань лічильника (AMR) або іншої системи телеметрії)
	Дані пікового навантаження для розподільних трансформаторів (СН/НН)	Необхідні для визначення максимального навантаження й планування заходів із модернізації або зміцнення розподільної мережі	ОСР, табличні дані (з системи SCADA чи AMR або за результатами заходів із вимірювання пікових значень)

ТАБЛИЦЯ 1. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ДАНИХ, ЯКІ НЕОБХІДНО ОТРИМАТИ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖІ

ЕЛЕМЕНТ ДАНИХ	ОПИС	ДОСЛІДЖЕННЯ/ЦІЛЬ ВИКОРИСТАННЯ	ОСНОВНИЙ ВЛАСНИК І ФОРМАТ ДАНИХ
	Наявні фізичні заходи з безпеки компонентів мережі та оцінювання їх ефективності з наголосом на секторах, де раніше ставалися перебої	Необхідні для оцінювання поточного стану безпеки компонентів мережі та планування заходів із модернізації, спрямованих на посилення захисту від перебоїв у майбутньому	ОСР, неструктуровані дані
Дані щодо розподілених джерел енергії (РДЕ)/генерації	Повний перелік усіх розподілених джерел генерації з точними координатами	Необхідний для комплексного оцінювання джерел генерації, сприяння їх оптимальній інтеграції в мікромережу й забезпечення відповідності вимогам географічної зони впровадження проєкту	ОСР, табличні дані (передбачається, що ОСР отримує ці дані від власників/операторів РДЕ та оновлює їх)
	Потужність генерації електроенергії та тип кожного джерела	Важливі для оцінювання ролі кожного джерела генерації в забезпеченні загальної стабільності й надійності мережі	
	Дані минулих періодів щодо ефективності роботи й перебоїв у роботі за кожним джерелом генерації (за наявності)	Критично важливі для аналізу минулих показників ефективності роботи й надійності для прогнозування майбутнього функціонування та оптимізації графіків технічного обслуговування	Власники РДЕ, табличні дані
	Доступність і місця зберігання альтернативних видів палива, які можна використовувати для генераторів, зокрема газу, дизельного палива, біомаси або інших видів палива з місцевих джерел, які можуть бути доступними під час перебоїв	Важливі дані для забезпечення безпеки й планування постачання палива на випадок аварійних ситуацій у роботі генератора під час перебоїв у мережі	Розробник проєкту ОСР або мікромережі, неструктуровані дані
Інвестиції й планування на майбутнє	Документація за вже здійсненими інвестиціями в розподіл на наступні п'ять років із детальним описом обсягу, очікуваних результатів і відповідних термінів	Важлива для узгодження планів розвитку мікромережі з майбутніми інвестиціями в мережу, забезпечення узгодженості й синергії в розвитку інфраструктури	ОСР, табличні дані з плану розвитку розподільної мережі
Інвентаризація обладнання й компонентів	Комплексна бібліотека одиниць обладнання за типами, що містить детальні специфікації й моделі всіх апаратних компонентів, які є елементами мережі	Важлива для перевірки сумісності й забезпечення доступності компонентів, необхідних для впровадження мікромережі	ОСР, табличний або програмний формат (наприклад, DlgSILENT)
	Прайс-листи з зазначенням вартості одиниць критичних	Використовуються для забезпечення фінансового планування й процесів	ОСР, табличні дані

ТАБЛИЦЯ 1. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ДАНИХ, ЯКІ НЕОБХІДНО ОТРИМАТИ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖІ

ЕЛЕМЕНТ ДАНИХ	ОПИС	ДОСЛІДЖЕННЯ/ЦІЛЬ ВИКОРИСТАННЯ	ОСНОВНИЙ ВЛАСНИК І ФОРМАТ ДАНИХ
	компонентів розподільної мережі, зокрема підстанцій, повітряних і кабельних розподільних ліній, силових трансформаторів, розподільних трансформаторів, автоматичних вимикачів, запобіжників, трансформаторів струму й напруги та реле	закупівель, забезпечуючи економічно ефективне придбання основних компонентів для розгортання мікромережі	
Дані щодо енергії й попиту для критичних навантажень	Пікове й середнє енергоспоживання: дані про пікове та середнє енергоспоживання щодо кожного критично важливого об'єкта, як-от лікарні, водоочисні станції й центри зв'язку	Необхідні для точного прогнозування навантаження та управління попитом; забезпечують відповідність мікромережі вимогам до критичного навантаження за різних сценаріїв роботи	ОСР, дані AMR або ручного зняття показань лічильника
	Схеми енергоспоживання: зміни в енергоспоживанні для цих об'єктів за часом доби та сезонного характеру	Використовуються для детального визначення профілів навантаження та оптимізації експлуатації мікромережі відповідно до схем споживання	ОСР, дані AMR або ручного зняття показань лічильника
	Специфікації систем резервного живлення: специфікації й потужність наявних установок резервного живлення (наприклад, дизельних генераторів, джерел безперебійного живлення) на кожному важливому об'єкті	Важливе значення для забезпечення належного функціонування систем резервного живлення за умов критичних навантажень під час відключень мережі	ОСР, дані AMR або ручного зняття показань лічильника
Можливості скидання навантаження	Протоколи скидання навантаження: докладні описи поточних протоколів скидання навантаження, з зазначенням навантажень для скидання, послідовності й умов скидання	Важливі для підготовки ефективних схем скидання навантаження для підтримання стабільності й надійності мережі в умовах пікових навантажень або аварійних ситуацій	ОСР, неструктуровані дані
	Облікові дані щодо ефективності: дані за минулі періоди щодо випадків скидання навантаження, зокрема їх тривалості, зон впливу та ефективності в плані зниження попиту в мережі	Використовуються для оцінювання ефективності та доопрацювання протоколів скидання навантаження для підвищення стабільності мережі	ОСР, табличні дані з відомостей про експлуатацію

ТАБЛИЦЯ 1. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ДАНИХ, ЯКІ НЕОБХІДНО ОТРИМАТИ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖІ

ЕЛЕМЕНТ ДАНИХ	ОПИС	ДОСЛІДЖЕННЯ/ЦІЛЬ ВИКОРИСТАННЯ	ОСНОВНИЙ ВЛАСНИК І ФОРМАТ ДАНИХ
Індекс пріоритетності об'єктів навантаження	Рейтинги критичності об'єктів: перелік критично важливих об'єктів, упорядкованих за критерієм необхідності підтримувати безперебійне живлення, з обґрунтуванням рейтингів на основі впливу на здоров'я й безпеку населення	Використовується для визначення пріоритетності скидання навантаження й забезпечення роботи критично важливих об'єктів як у режимі підключення до мережі, так і в острівному режимі	ОСР або розробник проєкту мікромережі, табличні дані
	Матриця взаємозалежності інфраструктури: дані, що показують залежність важливих об'єктів одне від одного (наприклад, залежність лікарень від водоочисних станцій)	Використовується для відповідної пріоритетизації взаємозалежних важливих об'єктів під час функціонування мікромережі та в контексті планування на випадок аварійних ситуацій	ОСР або розробник проєкту мікромережі, табличні дані
Дані про навантаження й споживачів	Типові профілі навантаження для різних категорій споживачів	Важливі для точного формування моделей попиту й споживання для різних сегментів споживачів; допомагають в управлінні попитом і прогнозуванні навантаження	ОСР, профілі навантаження
	Кількість споживачів і детальна статистика споживання за кожною категорією споживачів, наприклад, житлового, комерційного і промислового секторів	Важливі дані для розуміння розподілу навантаження між різними категоріями споживачів і планування індивідуальних стратегій регулювання попиту	ОСР, табличні дані
Захист системи й моніторинг	Детальний перелік характеристик і налаштувань реле захисту, зокрема увімкнених схем/типів захисту й типових параметрів реле	Важливий для забезпечення наявності належних схем захисту мікромережі від збоїв і підтримання її надійної роботи	ОСР, табличні дані
	Інформація про час усунення несправностей у різних частинах мережі	Важлива для розроблення систем захисту, які забезпечують швидке усунення несправностей, мінімізуючи збої та пошкодження мережевої інфраструктури	ОСР, табличні дані
	Технічні характеристики й можливості наявних SCADA, енергоаналізаторів, систем автоматизації підстанцій та вимірювальних систем і технічних рішень для оцінювання	Необхідні для аналізу інтеграції наявних систем у структуру управління мікромережею та визначення необхідних заходів із модернізації або оновлення функціоналу	ОСР, наявні документи з описом системи

ТАБЛИЦЯ 1. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ДАНИХ, ЯКІ НЕОБХІДНО ОТРИМАТИ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖІ

ЕЛЕМЕНТ ДАНИХ	ОПИС	ДОСЛІДЖЕННЯ/ЦІЛЬ ВИКОРИСТАННЯ	ОСНОВНИЙ ВЛАСНИК І ФОРМАТ ДАНИХ
	необхідності в подальшій модернізації або в новому функціоналі		
Наявні системи телеметрії та телекерування	Будь-які наявні системи SCADA, AMR мікромережі тощо, які слід розглядати як елемент системи управління мікромережею або інтегрувати до нової системи моніторингу й управління	Необхідні для моніторингу й контролю мікромережі в режимі реального часу; забезпечують безперебійну інтеграцію наявних систем телеметрії та телекерування	ОСР, наявні документи з описом системи
Поточні надійність і ефективність роботи основної мережі	Дані минулих періодів щодо показників надійності й ефективності роботи мережі (наприклад, SAIFI, SAIDI)	Важливі для забезпечення підвищення загальної надійності та відмовостійкості системи внаслідок реалізації запропонованих технічних рішень щодо мікромережі на основі оглядів наявних систем і методів обслуговування на окремих об'єктах	ОСР, табличні дані

Для забезпечення узгодженості з провідним галузевим програмним забезпеченням аналізу та моделювання енергосистем, як-от DigSILENT PowerFactory, PSS Sincal, DAKAR тощо, у наведеній далі таблиці викладено необхідні технічні характеристики різних РДЕ, підстанцій, трансформаторів і розподільних ліній. У ній містяться основні категорії даних, зокрема загальна інформація, електричні характеристики, експлуатаційні дані, деталі підключення, унікальні ідентифікатори, координати розташування, дані про право власності, типи компонентів системи й дати їх введення в експлуатацію. Крім того, у таблиці наведено детальну інформацію щодо номінальної потужності, кількості одиниць, технічних характеристик інвертора, уставок коефіцієнта потужності й схем підключення. А також, для сприяння ефективній інтеграції цих компонентів до моделей енергосистеми детально описано експлуатаційні показники, як-от дані минулих періодів щодо генерування, коефіцієнти потужності, графіки технічного обслуговування та експлуатаційні обмеження відповідно до екологічних вимог.

Завдяки методичному збору й використанню цих даних фахівці-практики можуть за точними сценаріями здійснювати моделювання та аналіз, необхідні для оцінювання функціонування системи, визначення потенційних заходів із модернізації та забезпечення надійної роботи в різних умовах.

ТАБЛИЦЯ 2: ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЯВНИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ, ЯКІ НЕОБХІДНО ОТРИМАТИ

ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ	КАТЕГОРІЯ ДАНИХ	КЛЮЧОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
Наявні РДЕ	Загальна інформація	<p>Назва/ід. №: унікальний ідентифікатор РДЕ</p> <p>Розташування (координати): широта й довгота</p> <p>Власник: назва організації, яка є власником РДЕ</p> <p>Тип (сонячні, вітрові, дизельні тощо): конкретний тип РДЕ</p> <p>Дата введення в експлуатацію: дата підключення РДЕ до мережі</p>
	Електричні характеристики	<p>Номінальна потужність (МВт): номінальна вихідна потужність</p> <p>Кількість одиниць: загальна кількість одиниць генерації</p> <p>Характеристики інвертора:</p> <ul style="list-style-type: none"> Тип (наприклад, центральний, стринговий) Потужність (кВт/МВт) Максимальний діапазон відстеження точки живлення Режим управління (напруга, коефіцієнт потужності тощо) <p>Коефіцієнт потужності (cos φ): стандартне задане значення й можливий робочий діапазон</p> <p>Можливість реактивної потужності (МВАР): діапазон регулювання реактивної потужності (достатнім буде діапазон cos φ або МВАР)</p> <p>Рівень напруги (кіловольт, кВ): рівень напруги підключення</p> <p>Схема підключення: схема підключення РДЕ (пряме підключення або підключення через трансформатор, підстанцію тощо)</p> <p>Обмеження швидкості зміни (МВт/хв): швидкість зміни вихідної потужності</p>
	Експлуатаційні дані	<p>Дані минулих періодів щодо генерації (щогодини, щодня, щомісяця): часові ряди даних щодо генерації</p> <p>Коефіцієнт потужності: середня вихідна потужність, поділена на номінальну потужність</p> <p>Коефіцієнт доступності: відсоток часу, протягом якого працює одиниця обладнання</p> <p>Графік технічного обслуговування: заплановані періоди технічного обслуговування (за наявності заздалегідь визначених планів)</p> <p>Експлуатаційні обмеження (наприклад, температура, швидкість вітру): експлуатаційні обмеження відповідно до екологічних вимог</p>
	Дані щодо підключення	<p>Точка підключення (наприклад, підстанція, фідер): конкретна точка підключення до мережі</p> <p>Договір про підключення до мережі: умови підключення до мережі</p> <p>Параметри захисту (наприклад, налаштування реле): спеціальні параметри захисту</p> <p>Дані щодо системи управління (наприклад, інтеграції SCADA): дані щодо системи зв'язку та управління</p> <p>Імпеданс (комплексний імпеданс (опір + реактивний опір): R+jX): імпеданс з'єднувальної лінії та/або трансформатора</p>

ТАБЛИЦЯ 2: ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЯВНИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ, ЯКІ НЕОБХІДНО ОТРИМАТИ

ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ	КАТЕГОРІЯ ДАНИХ	КЛЮЧОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
Підстанції СН	Загальна інформація	<p>Назва/ід. №: унікальний ідентифікатор підстанції</p> <p>Розташування (координати): широта й довгота</p> <p>Власник/оператор: суб'єкт, відповідальний за функціонування підстанції (ОСР або третя сторона)</p> <p>Дата введення в експлуатацію: дата введення підстанції в експлуатацію</p>
	Електричні характеристики	<p>Рівні напруги (первинної та вторинної): номінальні рівні напруги (наприклад, 35/6 кВ)</p> <p>Номінальні характеристики трансформатора (МВА): видима потужність</p> <p>Кількість трансформаторів: загальна кількість трансформаторів на підстанції</p> <p>Імпеданс (%Z): імпеданс трансформаторів у відсотках</p> <p>Тип охолодження (природне оливне з примусовою циркуляцією оливи, природне оливне з природною циркуляцією оливи тощо): метод охолодження</p> <p>Рівень струмів короткого замикання (кілоампер, кА): максимальний струм короткого замикання</p> <p>Системи захисту:</p> <ul style="list-style-type: none"> Типи й налаштування реле: конкретні моделі та налаштування реле захисту Технічні характеристики автоматичних вимикачів: номінальні характеристики й типи Системи ізоляції й заземлення: дані щодо заземлення <p>Конфігурація ошинування: одинарна шина, подвійна шина тощо</p> <p>Інші типи й номінальні характеристики розподільних пристроїв: номінальні характеристики й типи роз'єднувачів і вимикачів навантаження</p>
	Експлуатаційні дані	<p>Дані навантаження: пікове, середнє й мінімальне навантаження</p> <p>Профілі навантаження минулих періодів: дані часових рядів навантаження</p> <p>Документація з технічного обслуговування: минулі заходи з технічного обслуговування</p> <p>Дані щодо надійності (SAIFI, SAIDI): індекси надійності системи</p>
	Дані топології	<p>Однолінійні схеми або</p> <ul style="list-style-type: none"> • Вхідні та вихідні фідери: дані підключених до підстанції фідерів • Підключення до мережі електропередачі: точки підключення до мережі вищої напруги <p>SCADA й системи моніторингу: основні параметри систем управління та моніторингу</p>
	Розподільні трансформатори (трансформаторні)	Загальна інформація

ТАБЛИЦЯ 2: ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЯВНИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ, ЯКІ НЕОБХІДНО ОТРИМАТИ

ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ	КАТЕГОРІЯ ДАНИХ	КЛЮЧОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
підстанції (СН/ІНН)		Власник/оператор: суб'єкт, відповідальний за функціонування трансформатора (ОСР або третя сторона) Дата введення в експлуатацію: дата введення трансформатора в експлуатацію
	Електричні характеристики	Номінальна потужність (кіловольт-ампер, кВА): номінальна потужність Первинна й вторинна напруги (кВ): рівень напруги з обох сторін Імпеданс (%Z): імпеданс у відсотках Тип охолодження: природне оливо з примусовою циркуляцією оливи, природне оливо з природною циркуляцією оливи тощо Дані перемикача відводів (під навантаженням, без навантаження): технічні характеристики перемикача відводів Векторна група: група з'єднань обмоток трансформатора Імпеданс короткого замикання (R+jX): значення імпедансу для досліджень короткого замикання
	Експлуатаційні дані	Дані навантаження: пікове, середнє й мінімальне навантаження Профілі навантаження минулих періодів: дані часових рядів навантаження
	Захист і управління	Системи захисту (налаштування реле): конкретні налаштування й типи реле Технічні характеристики автоматичних вимикачів: номінальні характеристики й типи Дані заземлення: спосіб заземлення й опір (за наявності) Системи керування (дистанційне/локальне керування): дані системи керування
	Загальна інформація	Ід. №/назва лінії: унікальний ідентифікатор лінії Опис маршруту: фізичний опис маршруту Власник/оператор: суб'єкт, відповідальний за лінію Дата введення в експлуатацію: дата введення лінії в експлуатацію
Лінія розподілу	Електричні характеристики	Рівень напруги (кВ): номінальний рівень напруги Тип і розмір провідника: тип (наприклад, алюмінієвий провідник, армований сталлю) і площа поперечного перерізу Довжина лінії (кілометрів, км): загальна довжина лінії Імпеданс (R+jX/км): опір і реактивний опір на кілометр Теплова потужність (сила струму в амперах): максимальна потужність струму Система заземлення: дані заземлення (за наявності)
	Експлуатаційні дані	Дані щодо навантаження: пікове, середнє й мінімальне значення навантаження Профілі навантаження минулих періодів: дані часових рядів навантаження

ТАБЛИЦЯ 2: ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАЯВНИХ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ, ЯКІ НЕОБХІДНО ОТРИМАТИ

ОСНОВНІ КОМПОНЕНТИ СИСТЕМИ	КАТЕГОРІЯ ДАНИХ	КЛЮЧОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ
		<p>Реєстр несправностей: реєстр несправностей і відключень (за наявності)</p> <p>Документація з технічного обслуговування: минулі заходи з технічного обслуговування (за наявності)</p> <p>Дані щодо надійності (SAIFI, SAIDI): індекси надійності системи (за наявності)</p>
	Захист і управління	<p>Системи захисту (налаштування реле): спеціальні налаштування реле захисту</p> <p>Дані розподільних пристроїв: типи й номінальні характеристики одиниць розподільного обладнання</p> <p>Секційні роз'єднувачі/реклоузери: детальні дані автоматичних систем секціонування</p> <p>Інтеграція SCADA: дані щодо інтеграції системи SCADA</p>

2. ВСТАНОВЛЕННЯ МЕЖ МІКРОМЕРЕЖІ

Процес визначення меж мікромережі починається з ретельного аналізу місцевої електромережі. Він включає виявлення й класифікацію критичних і некритичних електричних навантажень у межах області, де планується розгортання мікромережі. Необхідно глибоко розуміти потребу в електропостачанні й ступінь важливості кожного трансформатора та фідера, адже це дозволяє визначити, які об'єкти потребують безперебійного живлення.

2.1. ОЦІНЮВАННЯ ВРАЗЛИВОСТІ МЕРЕЖІ В ЦІЛЯХ ПОБУДОВИ МІКРОМЕРЕЖІ

Першим кроком є оцінювання вразливості мережі. Цей процес включає аналіз чутливості електричної мережі до перебоїв, що впливають на електропостачання та стабільність. Визначення сценаріїв експлуатації є критично важливим для функціонування мікромережі. Коло цих сценаріїв включає тривале відключення енергопостачання, зниження напруги внаслідок дефіциту потужності, аварійну ситуацію N-1 (N-1) або, у критично важливих випадках, аварійну ситуацію N-2 (N-2) і масштабні відключення в системі розподілу.

Оцінка ймовірності відключень різних ступенів передбачає проведення імовірнісного аналізу. Він допомагає визначити пріоритетність регіонів на основі їхньої вразливості до перебоїв.

Аналіз відключень минулих періодів, зокрема тривалих відключень енергопостачання, знижень напруги внаслідок дефіциту потужності й аварійні ситуації N-1/N-2, дає змогу отримати розуміння надійності мережі й стандартних проблем.

Регіони, зокрема вразливі до таких зовнішніх загроз, як війна чи стихійні лиха, вимагають оцінювання їх потенційного впливу на енергомережу.

Аналіз здатності мережі справлятися з одно- та двокомпонентними аваріями (аварійні ситуації N-1 і N-2) дає змогу визначити зони, де відмовостійкість мережі є недостатньою.

У процесі геопросторового аналізу за допомогою інструментів ГІС здійснюється накладення даних на регіональну мапу з визначенням найвразливіших зон на основі ймовірності відключень, даних минулих періодів і ризиків виникнення аварійних ситуацій. Таке візуальне представлення допомагає визначити регіони, де потреба в заходах зі створення мікромереж є найбільшою.

2.2. ПОДІЛ НАЯВНИХ ПУНКТИВ НАВАНТАЖЕНЬ І ГЕНЕРАЦІЇ ЗА КАТЕГОРІЯМИ Й ГРУПАМИ

Після визначення регіону, у якому планується розгортання мікромережі, логічним кроком є впорядкування наявних навантажень і будь-яких доступних генерувальних ресурсів. Це робиться шляхом застосування в системі розподілу наявних або потенційно нових компонентів електричної ізоляції, як-от перемикачі або вимикачі. Ці компоненти є критично важливими для визначення меж мікромережі й виконують дві основні функції:

- Визначення точок ізоляції. Вони допомагають вибрати конкретні точки в розподільній мережі, які виконуватимуть роль шлюзів у мікромережі, забезпечуючи її ефективну ізоляцію від основної мережі під час переорієнтації оперативної діяльності або відключень електроенергії.
- Відокремлення навантажень. Це допомагає визначити, які навантаження – як критичні, так і не критичні – лежать на боці споживача від цих точок ізоляції, а отже, є включеними в мікромережу.

Розташування цих точок ізоляції має стратегічне значення і залежить від численних чинників, зокрема розташування критичних навантажень і наявних генерувальних потужностей. У процесі ухвалення рішень має бути враховане таке:

- Розташування критичних навантажень. Розташування точок критичного навантаження часто визначає вибір точок ізоляції. Наприклад, проєкт мікромережі може передбачати включення всієї критичної інфраструктури до єдиного ізольованого сегмента для забезпечення її безперебійної роботи під час збоїв у мережі.
- Фінансові аспекти. Використання наявної інфраструктури як точок ізоляції може виявитися економічно ефективнішим за створення нових установок. Йдеться не лише про фізичні компоненти, а й про інтеграцію цих точок до наявної схеми мережі.
- Інтеграція наявних і нових об'єктів генерації. Включення наявних генерувальних ресурсів і потенційне додавання нових джерел енергії може вплинути на розширення або звуження меж мікромережі. Додавання нових генерувальних потужностей може потребувати коригування наявних меж для ефективного розміщення таких джерел.
- Поточний і прогнозований попит на електроенергію необхідно проаналізувати в різних регіонах з урахуванням демографічних тенденцій та перспектив економічного зростання. Особливу увагу слід приділити зонам із потенційно високими темпами зростання у важливих секторах, як-от промислові зони та комерційні хаби, де підвищення попиту на навантаження може перевищити пропускну здатність наявної мережі. Цей крок допомагає визначити зони, які отримують найбільшу користь від посилення стабільності й потужності, яке забезпечать мікромережі.

2.3. АНАЛІЗ КРИТИЧНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ МІКРОМЕРЕЖІ

Цей етап передбачає аналіз критичної інфраструктури, як-от лікарень, центрів оброблення даних, державних органів і оборонних об'єктів, щоб визначити потенційний вплив перебоїв в електропостачанні на їхню роботу. Цей аналіз повинен включати оцінку вартості недовідпуску електроенергії (VOLL) та економічної активності в регіоні, щоб обчислити збитки від відключень електроенергії для таких критично важливих об'єктів. Завдяки аналізу критичності навантаження можна визначити пріоритетні регіони, де надійність електропостачання є ключовим чинником для побудови мікромереж.

Необхідно визначити й класифікувати об'єкти критичної інфраструктури, щоб зрозуміти, де потреба в надійності живлення є найбільшою для забезпечення безперервності ключових функцій і послуг. До їхнього кола входять:

- Лікарні й медичні центри: заклади, які надають критично важливі медичні послуги, зокрема відділення невідкладної допомоги, відділення інтенсивної терапії, а також інші медичні послуги, які залежать від стабільного живлення.
- Центри оброблення даних і телекомунікаційні центри: основні центри оброблення даних і телекомунікаційні вузли, необхідні для підтримання функціонування систем зв'язку, зокрема під час надзвичайних ситуацій.
- Державні та комунальні установи: ключові об'єкти комунального господарства, як-от водоочисні та каналізаційні споруди, а також служби, що діють у надзвичайних ситуаціях, як-от пожежні частини та поліцейські дільниці, які потребують безперебійного живлення для забезпечення громадської безпеки та охорони здоров'я.
- Оборонні об'єкти: військові бази та пов'язані з обороною об'єкти, надійність енергопостачання до яких має вирішальне значення для діяльності у сфері національної безпеки.
- Промислові об'єкти: масштабні промислові процеси, які чинять суттєвий вплив на місцеву чи регіональну економіку, зокрема такі, що передбачають високий рівень автоматизації й застосування критично важливих виробничих процесів.

Рекомендується провести високорівневе оцінювання економічного впливу та VOLL після визначення критичних навантажень. Таке оцінювання повинно включати:

- Оцінювання економічної активності: рекомендується оцінити загальну економічну діяльність у регіоні, насамперед вплив надійності енергопостачання на промислове виробництво, зайнятість та економічну стабільність.
- Факультативне оцінювання VOLL: рекомендується розрахувати VOLL для критично важливих об'єктів, щоб мати змогу обчислити економічні витрати, пов'язані з відключеннями електроенергії. Таке оцінювання потрібно провести в регіонах із точними даними щодо зазначеного економічного впливу.
- Високорівневий огляд економічного впливу: у регіонах, де не можна детально розрахувати VOLL, рекомендується проводити загальне оцінювання потенційного економічного впливу на основі даних відключень минулих періодів і наявності критичної інфраструктури, що забезпечить достатній обсяг інформації для визначення пріоритетних регіонів на основі економічних ризиків, пов'язаних із відключеннями електроенергії.

2.4. ВИБІР ТОЧОК ІЗОЛЯЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ

Визначення оптимальних точок ізоляції мікромережі має важливе значення для інтеграції мікромережі до наявних енергосистем. Цей процес гарантує включення всіх критичних навантажень у мікромережу з одночасним оцінюванням економічної

ефективності включення або виключення некритичних навантажень на підставі їхнього географічного розташування й можливостей підключення.

- Включення критичних навантажень: першочергову увагу слід приділити включенню до мережі всіх основних об'єктів (як-от лікарні й служби екстреного реагування) з метою гарантованого забезпечення безперебійного енергопостачання під час збоїв у мережі.
- Економічна ефективність і некритичні навантаження: слід провести аналіз економічної ефективності включення до мережі некритичних навантажень (як-от житлових і некритичних комерційних об'єктів). Ці об'єкти навантаження слід включати лише в тому разі, якщо це не призведе до непотрібного ускладнення мережі та непропорційного збільшення витрат у порівнянні з її перевагами.
- Використання наявної інфраструктури: вибір точок перемикання електроенергії, у яких мікромережа від'єднується від основної мережі, значною мірою залежить від наявної схеми мережі й наявних об'єктів генерації. Оптимальні точки – це точки, які мінімізують потребу в побудові нових відповідних об'єктів та які можна ефективно підключити до наявних генерувальних ресурсів.
- Оптимізація конфігурації мережі: цей процес передбачає використання інструментів моделювання різних сценаріїв, що допомагає вдосконалити конфігурацію мікромережі. Його мета полягає в задоволенні критичних потреб в ефективний спосіб та в збереженні адаптивності до подальших розширень функціональності.

2.5. ТОПОЛОГІЧНІ ВАРІАНТИ МЕЖ МІКРОМЕРЕЖІ

Можна буде розглянути потенційні топологічні варіанти визначення меж мікромережі для забезпечення масштабованості та адаптивності мікромережі в розподільній мережі. На *Рисунок 2* представлено різні типи конфігурацій мікромережі, впорядковані за масштабом і складністю інтеграції з наявною електричною інфраструктурою.

1. Повна мікромережа рівня підстанції (фіолетова зона). Ця конфігурація охоплює всю територію, яку обслуговує розподільна підстанція або підстанція мережі живлення. Вона включає всі фідери й джерела генерації, підключені на цьому рівні, що полегшує комплексне управління генерацією й розподілом у цих межах. Мікромережа цього типу здатна обслуговувати велику територію з різними видами навантажень і типами генерації, забезпечуючи надійну відмовостійкість і управління енергією у великих масштабах.
2. Повна мікромережа рівня фідера (зелена зона). Це – менша, більш компактна зона в межах мікромережі рівня підстанції, що включає всі навантаження та джерела генерації вздовж лінії єдиного фідера. Вона дає можливість конкретного управління на рівні фідера, дозволяє здійснювати цільове управління енергією та застосовувати стратегії відмовостійкості. Такі налаштування підходять для територій із критичними навантаженнями, які потребують спеціального управління, як-от промислових зон або великих ділових кварталів.
3. Часткова мікромережа рівня фідера (синя зона). Представляючи сегмент фідера, мікромережа цього типу включає лише частину навантажень і генерувальних ресурсів, розташованих уздовж конкретної лінії фідера. Вона ідеально підходить для локальних енергетичних рішень, де лише певні ділянки фідера вимагають

підвищеної надійності й контролю (наприклад, лікарняні комплекси чи невеликі житлові території з критично важливими потребами).

4. Мікромережа з одним навантаженням (помаранчева зона). Мікромережа цього типу є найменшою з проілюстрованих. Вона призначена для забезпечення одного критичного навантаження (як-от лікарня, центр оброблення даних або екстрена служба). Зазвичай вона включає одне або кілька локальних джерел генерації, безпосередньо підключених до навантаження, що максимально збільшує контроль над якістю живлення та безперервністю надання важливих послуг.

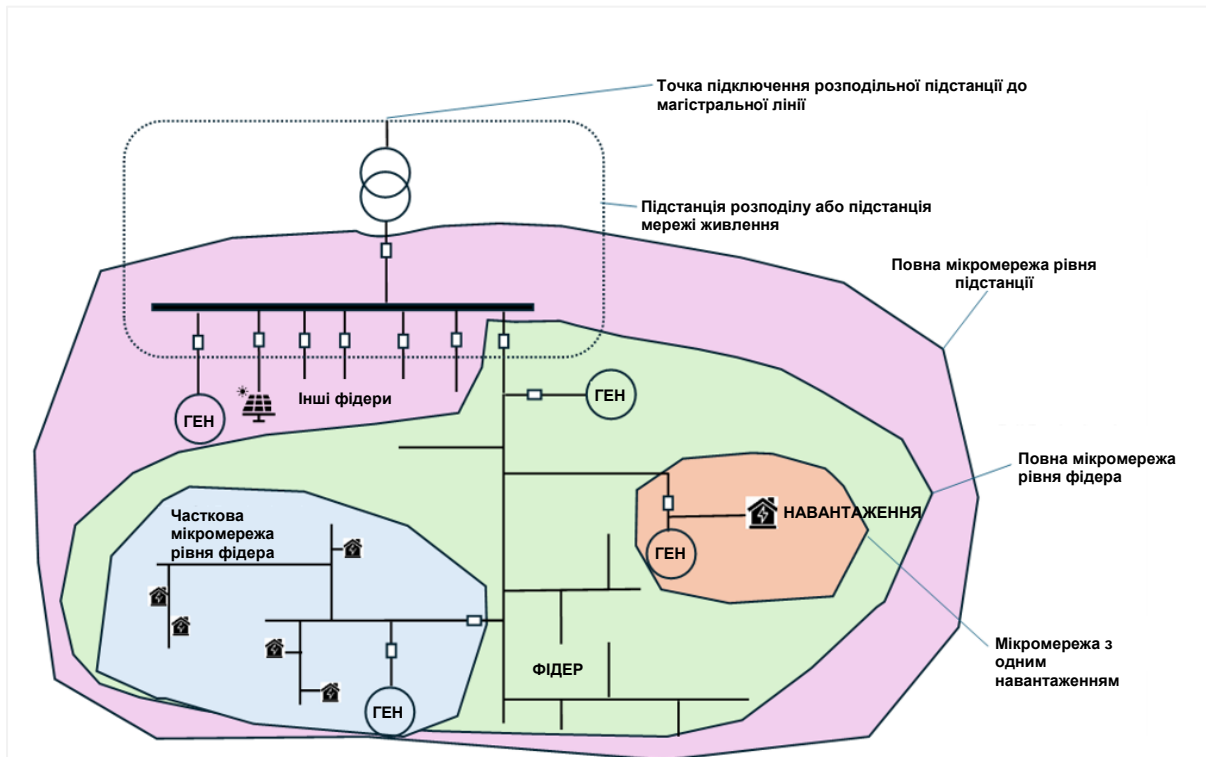


Рисунок 2. Різні потенційні типи меж мікромережі

Застосування цих принципів може дуже різнитися залежно від цілей проекту та конкретних передбачених сценаріїв. Наприклад:

- Мікромережа може включати різноманітні засоби генерації, як-от дизельні генератори, газові двигуни й сонячні фотоелектричні (ФЕ) батареї, кожен із яких буде підключеним у різних точках системи розподілу.
- У сценаріях, де додаються нові джерела генерування, як-от сонячні батареї, межі можуть бути скориговані в частині включення таких об'єктів, що іноді потребує нового аналізу щодо найефективніших з економічного погляду точок електричної ізоляції.

2.6. ДИНАМІЧНЕ УПРАВЛІННЯ МЕЖАМИ МІКРОМЕРЕЖІ

Динамічне управління межами мікромереж дозволяє виконати складний поділ системи розподілу електроенергії на менші, самодостатні одиниці з гнучкими межами, які можна регулювати в режимі реального часу з урахуванням поточних умов експлуатації. Ця адаптивність підвищує стійкість і є, зокрема, корисною в сценаріях із високим рівнем

використання відновлюваних джерел енергії, коли доступна відновлювана енергія використовується в оптимальний спосіб. Однак, попри свої переваги, цей метод істотно збільшує складність системи, а отже, унаслідок ускладнених вимог до її реалізації, не завжди може бути кращим проектним рішенням.

Ключові аспекти динамічного управління межами включають сегментацію, встановлення динамічних меж, визначення пріоритетів у навантаженні, сценарії експлуатації, математичні формули перемикавання та оцінювання визначених нижче показників стійкості. Такий деталізований підхід гарантує живлення критичних об'єктів навантаження під час відключень і загальне збереження надійності мережі та її здатності до адаптації.

1. Сегментація. Систему розподілу слід розділити на менші, самодостатні мікромережі з гнучкими межами.
2. Динамічні межі. Слід заздалегідь спланувати гнучкі межі для їх адаптації під час нормальної експлуатації або експлуатації за надзвичайних ситуацій. Автоматизовані комутатори та засоби управління можуть динамічно регулювати межі мікромережі залежно від умов експлуатації.
3. Змішане цілочислове лінійне програмування (MILP). MILP використовують для визначення оптимальних дій із перемикавання для регулювання меж і забезпечення критичних навантажень.
4. Визначення пріоритетів у навантаженні.
 - Класифікація. Навантаження слід розподілити на критичні, середньо-критичні й некритичні, виходячи з їхньої важливості для стабільності мережі.
 - Цільова функція. Призначення цільової функції полягає в максимальному збільшенні постачання до пунктів критичних навантажень під час відключень.
5. Сценарії експлуатації.
 - Планування сценаріїв. Слід розглянути різні сценарії експлуатації (день, ніч), кожен з яких передбачає різні вимоги до навантаження й можливості генерації.
 - Моделювання. Інструменти моделювання (наприклад, мови DigSILENT DPL; MATLAB; GridLAB-D) слід використовувати для перевірки експлуатаційної придатності конфігурацій мікромереж.
6. Нижче наведені математичні формули для визначення можливих дій із перемикавання для управління динамічними межами мікромереж(i):

Рівняння для визначення попиту на потужність

$$P_{Source} = \Delta_n * (\sum P_i - \sum P_{DG_m})$$

$$Q_{Source} = \Delta_n * (\sum Q_i - \sum Q_{DG_m})$$

де:

- P_{Source} і Q_{Source} – джерела активної та реактивної потужності
- Δ_n – коефіцієнт дефіциту для сценарію n
- P_i та Q_i – активна й реактивна потужність споживання у вузлі i
- P_{DG_m} та Q_{DG_m} – активна й реактивна вихідна потужність розподіленої генерації в мікромережі m

Обмеження формування кластерів

$$\sum \alpha_{i_m} = 1 \text{ для всіх } i \text{ в } N$$

$$\alpha_{i_m} = 1 \text{ для } i = m, \text{ для всіх } i \text{ в } N, m \text{ в } M$$

де:

- α_{i_m} – двійкова змінна, що вказує, чи належить вузол до мікромережі m

Обмеження поточкорозподілу

- Обмеження по напрузі

$$|V_i^{\min}| \leq |V_i| \leq |V_i^{\max}|$$

де:

- V_i – напруга на вузлі i
 - V_i^{\min} та V_i^{\max} : мінімальна й максимальна допустима напруга
- Обмеження пропускної здатності вітки

$$|I_F^i| \leq |I_F^{\max}| \text{ та } |I_R^i| \leq |I_R^{\max}|$$

де:

- I_F^i та I_R^i – пропускна здатність прямого й зворотного струму у вітці i
 - I_F^{\max} та I_R^{\max} : максимально допустимі значення струму
- Обмеження потужності розподіленої генерації (РГ)

$$P_{DG_{\min}} \leq P_{DG} \leq P_{DG_{\max}}$$

$$Q_{DG_{\min}} \leq Q_{DG} \leq Q_{DG_{\max}}$$

де:

- P_{DG} та Q_{DG} – активна й реактивна потужність розподіленої генерації
 - P_{DGmin} та P_{DGmax} – мінімальна й максимальна допустима активна потужність
 - Q_{DGmin} та Q_{DGmax} – мінімальна й максимальна допустима реактивна потужність
7. Показники відмовостійкості: загальну оцінку відмовостійкості можна використовувати для оцінювання загальної стійкості конфігурацій мікромережі. Ця оцінка базуватиметься на кількох ключових показниках:
- Діаметр: діаметр мережі – це найдовший із найкоротших шляхів між будь-якими двома вузлами. Менший діаметр свідчить про вищу стійкість мікромережі, оскільки передбачає коротші шляхи розподілу електроенергії та швидшу локалізацію несправностей.
 - Центральність за проміжними шляхами. Вона визначає те, якою мірою певний вузол лежить на шляхах між іншими вузлами. Вузли з високою центральністю за проміжними шляхами є критично важливими для підтримання зв'язності в мережі. Виявлення таких вузлів допомагає підвищити відмовостійкість мережі шляхом захисту критичних точок.
 - Алгебраїчна зв'язність. Алгебраїчна зв'язність – або друге найменше власне значення матриці Лапласа мережі – відображає її надійність. Вища алгебраїчна зв'язність свідчить про вищу стійкість мережі, оскільки передбачає кращу загальну зв'язність і відмовостійкість.
8. Процес аналітичної ієрархії. Процес аналітичної ієрархії можна використовувати для присвоєння вагових коефіцієнтів показникам стійкості та обчислення зведеної оцінки для кожної конфігурації мікромережі. Він передбачає:
- Визначення критеріїв. Встановлення критеріїв на основі вибраних показників стійкості (діаметр, центральність за проміжними шляхами, алгебраїчна зв'язність).
 - Парне порівняння. Виконання парного порівняння критеріїв для визначення їх відносної важливості. Таке порівняння зазвичай ґрунтується на оцінках експертів і передбачає присвоєння числових значень для визначення важливості одного критерію порівняно з іншим.
 - Обчислення вагових коефіцієнтів. Скористайтеся матрицею парного порівняння для обчислення вагових коефіцієнтів кожного критерію. Ці вагові коефіцієнти відображають відносну важливість кожного показника в загальній сукупній оцінці.
 - Оцінювання конфігурацій. Оцініть кожну конфігурацію мікромережі за визначеними критеріями. Помножте оцінку для кожного критерію на відповідний ваговий коефіцієнт і підсумуйте результати, щоб отримати загальну оцінку стійкості.

9. Автоматичні перемикачі й пункти управління.

- Автоматичні перемикачі (це можуть бути дистанційно керовані реклоузери повітряних ліній) повинні бути розміщені на ключових вузлах для полегшення регулювання динамічних меж.
- Необхідно виділити засоби контролю для координування РДЕ й керування обміном інформацією між кластерами. Ці засоби контролю можуть регулювати динамічні межі мікромереж для оптимізації відмовостійкості системи.

10. Динамічна реконфігурація.

- Необхідно встановити заздалегідь заплановані межі для різних сценаріїв (наприклад, денні й нічні операції).
- Для коригування меж відповідно до поточних умов слід використовувати дані в режимі реального часу та автоматизовані системи з забезпеченням їх оптимальної роботи та стійкості.

11. Алгоритм встановлення динамічних меж.

- Він починається з планування заздалегідь меж мікромережі, виходячи з нормальних умов експлуатації.
- Важливе значення має безперервний моніторинг стану енергосистеми, зокрема попиту на навантаження й наявності згенерованої енергії.
- У разі виявлення несправності слід застосувати MILP для визначення оптимального коригування межі з метою локалізації несправностей і підтримання постачання живлення на критичні навантаження.
- Коригування меж має здійснюватися за допомогою автоматичних перемикачів із забезпеченням роботи мікромереж у конфігураціях, що гарантують найбільшу стійкість.

12. Моделювання й перевірка.

- Такі інструменти як MATLAB слід використовувати для моделювання різних конфігурацій мікромережі й перевірки їхньої роботи за різними сценаріями.
- Запропоновані конфігурації повинні відповідати всім експлуатаційним обмеженням і максимально збільшувати відмовостійкість.

13. Експлуатаційні процедури.

- Конфігурації мікромережі слід регулярно оновлювати залежно від навантаження й потужності генерації.
- У надзвичайних ситуаціях слід швидко змінювати межі мікромережі й стани перемикачів для локалізації несправностей і підтримки постачання живлення на критичні навантаження.

3. ВАРІАНТИ ДИЗАЙНУ КОНФІГУРАЦІЇ Й ПАРАМЕТРІВ МІКРОМЕРЕЖІ

3.1. ПОТЕНЦІЙНІ ВАРІАНТИ ДИЗАЙНУ КОНФІГУРАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ

Конфігурації мікромережі проєктуються для забезпечення індивідуальних енергетичних рішень, які підвищують надійність, ефективність і сталість електропостачання в різноманітних середовищах. Оцінюючи різні варіанти конфігурації, зацікавлені сторони можуть оптимізувати проєкт мікромережі для задоволення конкретних експлуатаційних вимог і адаптації до географічних, економічних та екологічних умов. Цей процес ухвалення рішень включає розгляд різних питань, як-от розміри мікромережі, джерела енергії, стратегії управління й системи контролю, при цьому кожен варіант містить певні переваги та є придатним для певних сценаріїв.

У наведеній нижче таблиці представлено комплексний огляд потенційних конфігурацій мікромережі з їх класифікацією за кількома ключовими аспектами, як-от попит, який має задовольнити мікромережа, тривалість експлуатації в острівному режимі, типи РДЕ й стратегії управління. Ці аспекти є важливими не тільки для забезпечення відповідності мікромережі поточним енергетичним потребам, але й для можливості її масштабування та адаптивності до майбутніх змін. Кожен варіант конфігурації пов'язаний із певними експлуатаційними можливостями та слугує оптимізації роботи за різними показниками, як-от відмовостійкість системи, економічна ефективність і вплив на довкілля. Вибір належної конфігурації є важливим для досягнення балансу між експлуатаційними вимогами й цілями щодо сталості, що забезпечує тривалу успішну роботу створеної мікромережі.

Розуміння цих варіантів дає проєктувальникам та інженерам змогу проєктувати мікромережі, які є не тільки ефективними та стійкими, але й здатними легко інтегруватися з наявною енергетичною інфраструктурою або працювати незалежно як автономні системи. Цей стратегічний підхід до проєктування мікромережі має суттєве значення для розв'язання питань дедалі більшої складності сучасних енергетичних систем та подолання нових викликів, що постають перед ними, сприяючи виробленню сталих і надійних енергетичних рішень.

ТАБЛИЦЯ 3. ВАРІАНТИ КОНФІГУРАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ

КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ	ВАРІАНТИ				
	Тільки критичні навантаження	Критичні й некритичні навантаження	Тільки навантаження вдень	Повне навантаження (вдень і вночі)	
Необхідні розміри/ вимоги до мікромережі					
Очікувана тривалість роботи мікромережі поза мережею	2 години	8 годин	24 години	1 місяць	Невизначена
Тип/джерело РДЕ	Сонячн. ФЕ + батарея	Дизель + батарея	Газогенератор + батарея	Сонячн. + дизель + газ	Сонячн. ФЕ + газогенератор

ТАБЛИЦЯ 3. ВАРІАНТИ КОНФІГУРАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ

КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ	ВАРІАНТИ				
Топологія генерації	Централізована	Децентралізована	Гібридна	Модульна	Мобільна
Управління межами мікромережі	Статичне/визначене	Динамічне/адаптивне			
Стратегії управління	Централізовані	Децентралізовані	Однорангові		
Перехід на керування мікромережею	Перехід на ручне керування на місці	Перехід на ручне керування за допомогою телекерування	Автономна/режим «гарячого резерву»	Запрограмований час	

1. Необхідні розміри/вимоги до мікромережі

- Тільки критичні навантаження. Мікромережа спроектована для забезпечення лише надання основних послуг та роботи критичної інфраструктури.
- Критичні й некритичні навантаження. Живлення не обмежується пунктами критичних навантажень, а включає об'єкти, що не є критично важливими; підвищується експлуатаційна гнучкість.
- Лише денні навантаження. Забезпечення електроенергією насамперед протягом денних годин, зазвичай відповідно до періодів пікового виробництва сонячної енергії.
- Повне навантаження (вдень і вночі). Забезпечення безперервної роботи всіх пунктів навантажень удень і вночі, з максимальною доступністю.

2. Очікувана тривалість роботи мікромережі в острівному режимі

- 2 години. Придатна для роботи в умовах короткострокових відключень, головним чином для забезпечення безперервності роботи в разі коротких перебоїв.
- 8 годин. Працює протягом повного робочого дня, що є корисним для регіонів із частими, але короткостроковими перебоями щодо стабільності мережі.
- 24 години. Призначена для підтримання роботи протягом цілого дня без підтримки з боку мережі, ідеально підходить для використання в регіонах із тривалими перебоями електропостачання.
- 1 місяць. Забезпечує довгострокову відмовостійкість, підходить для використання в екстремальних умовах або в зонах, для яких характерними є сезонні проблеми з електромережами.

- Безстрокова. Мікромережа здатна працювати незалежно від мережі протягом необмеженого періоду часу, зазвичай характеризується значною кількістю відновлюваних джерел енергії та значною ємністю накопичувача.

3. Тип/джерело РДЕ

- Сонячна ФЕ система + батарея. Використання фотоелектричних панелей та акумуляторних систем зберігання; акцент на сталості й відновлюваних джерелах.
- Дизель + батарея. Поєднання традиційних дизельних генераторів із батареями; забезпечення надійності й деяких переваг у плані зберігання енергії.
- Газогенераторна установка + батарея. Об'єднання генерації на основі газової установки з акумуляторною системою зберігання; баланс між ефективністю та зменшенням викидів.
- Сонячна енергія + дизель + газ. Гібридний підхід із використанням сонячної енергії, дизельного палива й газу; забезпечення високої надійності та управління змінним навантаженням.
- Сонячна ФЕ система + газогенераторна установка. Поєднання сонячної енергії з газовими генераторами; баланс відновлюваної енергії та надійної енергії на основі газу.

4. Топологія генерації

- Централізована. Єдине центральне джерело генерації електроенергії, що спрощує управління, але потенційно підвищує вразливість.
- Децентралізована. Кілька джерел генерації, розподілених по всій мікромережі, що підвищує відмовостійкість і зменшує втрати під час передачі.
- Гібридна. Поєднання централізованих і децентралізованих елементів; оптимізація відмовостійкості та ефективності.
- Модульна. Містить компоненти, орієнтовані на просте підключення (plug-and-play) з можливістю масштабування або зміни конфігурації за потреби.
- Портативна. Мобільне обладнання для генерації, яке можна за потреби перемістити, придатне для тимчасового використання або використання за надзвичайних ситуацій.

5. Управління межами мікромережі

- Статичні/визначені. Фіксовані межі з попередньо визначеними точками підключення до основної мережі та відключення від неї.
- Динамічні/адаптивні. Гнучкі межі з можливістю зміни залежно від потреб у навантаженні, потужності генерації та інших умов.

6. Стратегії управління

- Централізовані. Усі рішення щодо управління ухвалюються в центральному пункті, що спрощує координацію, але може збільшити час реагування на локальні зміни.
- Децентралізовані. Керування розподілено між різними компонентами, що підвищує швидкість реагування й покращує локальну оптимізацію.
- Однорангові. Використовується мережевий підхід, за яким зв'язок між компонентами та ухвалення рішень відбуваються без централізованого нагляду, що сприяє забезпеченню відмовостійкості та гнучкості.

7. Перехід на керування мікромережею

- Перехід на ручне керування на місці. Перехід на ручне керування операціями здійснює персонал на місцях, що забезпечує можливість втручання з боку людини.
- Перехід на ручне керування за допомогою телекерування. Ручне керування здійснюється у віддаленому режимі, що забезпечує гнучкість і миттєве реагування без необхідності присутності на місці.
- Автономне/режим «гарячого резерву». Повністю автоматизовані системи, здатні в критичних ситуаціях здійснювати керування самостійно без втручання людини.
- Запрограмований час. Перемикання операцій заплановане заздалегідь або запускається за певних умов, що забезпечує прогнозованість і реагування на основі плану.

Нижче наведено детальну інструкцію, у якій окреслено ключові аспекти та критерії ухвалення рішень, які слід враховувати для забезпечення надійної та ефективної конструкції мікромережі.

ТАБЛИЦЯ 4. АСПЕКТИ КРИТЕРІЇВ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ

АСПЕКТИ ДИЗАЙНУ МІКРОМЕРЕЖІ	КРИТЕРІЇ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ
Необхідні розміри/вимоги до мікромережі	1. Критичність навантажень; 2. Доступна потужність генерації; 3. Можливості накопичення енергії; 4. Витрати
Очікувана тривалість роботи мікромережі поза мережею	1. Дані минулих періодів щодо тривалості відключень; 2. Оцінка ризику потенційних загроз; 3. Можливості зберігання палива; 4. Можливості інтеграції джерел відновлюваної енергії; 5. Критичність навантаження для вирішення важливих завдань
Тип/джерело РДЕ	1. Наявність місцевих ресурсів (сонячне опромінення, запас палива); 2. Аспекти, пов'язані з захистом довкілля; 3. Початкові й операційні витрати; 4. Вимоги до надійності й технічного обслуговування; 5. Просторові обмеження
Топологія генерації	1. Географічний розподіл навантажень; 2. Вимоги до масштабування; 3. Потреби у відмовостійкості; 4. Наявна інфраструктура; 5. Експлуатаційна гнучкість

ТАБЛИЦЯ 4. АСПЕКТИ КРИТЕРІЇВ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ

АСПЕКТИ ДИЗАЙНУ МІКРОМЕРЕЖІ	КРИТЕРІЇ УХВАЛЕННЯ РІШЕНЬ
Управління межами мікромережі	1. Мінливість навантаження; 2. Складність системи; 3. Експлуатаційні вимоги; 4. Можливості системи управління; 5. Плани щодо майбутнього розширення
Стратегії управління	1. Розмір і складність системи; 2. Комунаційна інфраструктура; 3. Бажаний рівень автономії; 4. Аспекти, пов'язані з кібербезпекою
Перехід на керування мікромережею	1. Наявність персоналу і його кваліфікація; 2. Вимоги щодо швидкості реагування; 3. Можливості віддаленого моніторингу; 4. Бажаний рівень автоматизації; 5. Нормативна відповідність кодексу мережі й технічним регламентам

Необхідні розміри/вимоги до мікромережі

- Критичність навантажень. Акцент робиться на енергозабезпеченні основних об'єктів, важливих із погляду безпеки та критичних видів діяльності.
- Доступна потужність генерації. Визначте загальну потужність усіх доступних генераторів і відновлюваних джерел енергії для ефективного задоволення попиту.
- Можливості з накопичення енергії. Оцініть, наскільки акумулятори та інші засоби збереження енергії здатні в належний спосіб підтримувати безперервне живлення під час збоїв у мережі або в періоди пікового попиту.
- Витрати. Врахуйте як початкові інвестиції, так і поточні експлуатаційні витрати, пов'язані з різними варіантами розміру мікромережі.

Очікувана тривалість роботи мікромережі в острівному режимі

- Дані минулих періодів щодо тривалості відключень. Скористайтеся даними минулих періодів, щоб оцінити можливості відключень у майбутньому й визначити, яка потужність необхідна для забезпечення потрібної тривалості роботи.
- Оцінка ризиків потенційних загроз. Проаналізуйте ризики стихійних лих, кібератак або збоїв у роботі обладнання, які можуть вплинути на стабільність мережі.
- Можливості для зберігання палива. Визначте резерви палива, необхідні для підтримання роботи під час тривалих збоїв у мережі.
- Можливості інтеграції відновлюваних джерел енергії. Проаналізуйте доцільність включення відновлюваних джерел енергії для підвищення стійкості та зменшення залежності від традиційних видів палива.
- Критичність навантаження для вирішення важливих завдань. Визначте критично важливі пункти навантаження, роботу яких необхідно підтримувати для забезпечення надання життєво важливих послуг.

Тип/джерело РДЕ

- Доступність місцевих ресурсів. Дослідіть наявність місцевих ресурсів, як-от сонячне опромінення й запаси палива.
- Екологічні аспекти. Оцініть вплив розгортання певних РДЕ на довкілля для забезпечення практик, пов'язаних зі сталим розвитком.
- Початкові та експлуатаційні витрати. Проаналізуйте витрати, пов'язані з монтажем, обслуговуванням та експлуатацією РДЕ.
- Вимоги до надійності та технічного обслуговування. Оцініть надійність РДЕ в кожному варіанті, а також необхідний обсяг робіт з їх технічного обслуговування.
- Просторові обмеження. Врахуйте вимоги до фізичного простору, які слід виконати під час монтажу систем РДЕ.

Топологія генерації

- Географічний розподіл навантажень. Здійсніть планування об'єктів генерації з урахуванням розподілу попиту в просторі в межах мікромережі.
- Вимоги щодо можливості масштабування. Проектуйте систему з урахуванням можливості її масштабування за умов майбутнього зростання попиту або технічного прогресу.
- Потреби у відмовостійкості. Переконайтеся в тому, що інфраструктура може достатньо надійно витримувати різні перебої та підтримувати безперервну роботу.
- Наявна інфраструктура. Скористайтеся наявною інфраструктурою для оптимізації витрат і підвищення ефективності системи.
- Експлуатаційна гнучкість. Передбачте можливість коригування стратегії експлуатації, виходячи з динаміки умов або змін попиту.

Управління межами мікромережі

- Мінливість навантаження. Ефективно керуйте коливаннями попиту, змінюючи стратегії електропостачання.
- Складність системи. Розв'язуйте проблеми, пов'язані з інтеграцією кількох джерел енергії та керуванням взаємодією між ними.
- Експлуатаційні вимоги. Виконайте конкретні експлуатаційні вимоги відповідно до призначення та масштабу мікромережі.
- Можливості системи керування. Забезпечте ефективне управління змінами в середовищі експлуатації мікромережі з боку систем керування.
- Плани щодо майбутнього розширення. Розгляньте потенціал майбутнього розширення й можливість інтеграції нових технологічних рішень без істотного перепроектування.

Стратегії управління

- Розмір і складність системи. Розробіть стратегії управління відповідно до розміру й складності системи.
- Інфраструктура зв'язку. Побудуйте надійну мережу зв'язку для забезпечення ефективного контролю та моніторингу.
- Необхідний рівень автономії. Визначте відповідний рівень автоматизації, необхідний для мінімізації ручних втручань з одночасним збереженням надійності.
- Аспекти, пов'язані з кібербезпекою. Запровадьте потужні заходи з кібербезпеки для захисту системи від цифрових загроз.

Перехід на керування мікромережею

- Наявність персоналу і його кваліфікація. Забезпечте наявність підготовленого в належний спосіб персоналу для експлуатації системи та дій в умовах надзвичайних ситуацій.
- Вимоги щодо швидкості реагування. Налаштуйте протоколи швидкого реагування на перебої або збої в роботі системи.
- Можливості віддаленого моніторингу. Скористайтеся передовими технологіями для віддаленого моніторингу й керування системою.
- Необхідний рівень автоматизації. Інтегруйте засоби автоматизації, щоб підвищити оперативність реагування системи та ефективність її роботи.
- Відповідність нормативним вимогам. Дотримуйтеся всіх відповідних правил технічної експлуатації електричних мереж, а також технічних регламентів для забезпечення безпечної експлуатації мережі відповідно до норм законодавства.

3.2. КЛЮЧОВІ ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ ДИЗАЙНУ КОНФІГУРАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ

Під час оцінювання конфігурацій мікромереж використання набору ключових показників ефективності (KPI) надає важливі параметри для оцінювання та порівняння ефективності та результативності роботи, а також відмовостійкості різних проєктів мікромережі. Хоча не всі KPI потрібно застосовувати одночасно в кожному сценарії оцінювання, такий комплексний набір гарантує можливість вибору зацікавленими сторонами найвідповідніших показників, виходячи з конкретних цілей експлуатації, екологічних умов і нормативних вимог. Така гнучкість дає змогу проводити індивідуальний аналіз, який узгоджується з конкретними потребами проєкту, що робить процес оцінювання ретельним і адаптованим.

Визначені KPI включають широкий діапазон вимірюваних результатів – від експлуатаційної та енергетичної ефективності до економічної доцільності й впливу на довкілля. Ключові показники ефективності розроблено для забезпечення математичної основи для ухвалення рішень і полегшення порівняння різних моделей і конфігурацій мікромережі в різних умовах.

ТАБЛИЦЯ 5. КРІ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ ДИЗАЙНУ КОНФІГУРАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ

КРІ	ОПИС
Тривалість роботи поза мережею	Вимірює максимальну тривалість (у годинах або днях) можливої незалежної роботи мікромережі в умовах пікового критичного навантаження без зовнішньої підтримки з боку мережі.
Пікове критичне навантаження, яке система здатна витримати	Визначає в конкретних числах здатність мікромережі витримувати пікові навантаження (вимірювані в кВт або МВт) критичних систем за сценаріїв експлуатації зі стандартними або підвищеними вимогами.
Рівень скидання навантаження	Визначає відсоток загального навантаження, яке можна відключити (вимкнути), щоб визначити пріоритетність критично важливих операцій в умовах дефіциту енергії, з забезпеченням підтримання основної функціональності.
Час відновлення й належний перехід	Вимірює час (у секундах або хвилинах), необхідний для переходу від режиму централізованого електропостачання до острівного режиму після відключення, і так само час на повторний перехід до режиму централізованого електропостачання з оцінюванням плавності переходу й стабільності системи.
Оптимізований коефіцієнт завантаження РДЕ	Оцінює коефіцієнт завантаження РДЕ з метою досягнення високого відсотка використання протягом часу для зменшення кількості випадків недовикористання й покращення загальної ефективності.
Аварійна ситуація N-1	Визначає здатність мікромережі підтримувати критичне навантаження (у відсотках від загальної потужності) у разі відмови будь-якого значного компонента РДЕ для забезпечення безперервності роботи.
Частка відновлюваної енергії	Вимірює відсоток від загальної енергії, виробленої мікромережею, який припадає на відновлювані джерела, з наголосом на стійкості системи й залежності від відновлюваної енергії.
Операційний контроль	Оцінює ефективність систем управління мікромережею шляхом обчислення затримки в одержанні зворотного зв'язку від системи моніторингу (у секундах реального часу) і точності представлення операційних даних.
Можливість розширення й нового налаштування конфігурації	Оцінює здатність мікромережі до розширення з погляду додаткового навантаження та інтеграції інфраструктури, обчислену у відсотках збільшення навантаження або потужності генерації без необхідності значної модернізації інфраструктури.
Економічне застосування в режимі підключення до мережі	Вимірювання економічних переваг від операцій у режимі підключення до мережі, як-от економія коштів унаслідок реагування на попит і заходів з обмеження пікового навантаження, виражених у відсотках зниження енергетичних витрат.
Якість електропостачання	Відстежує коливання рівнів напруги й частоти в межах прийнятних галузевих стандартів під час роботи в острівному режимі; ціль – утримувати ці коливання в межах жорсткого відсоткового діапазону для забезпечення стабільності й безпеки підключених навантажень.

Під час вибору оптимальної конфігурації мікромережі обов'язковим є проведення систематичного оцінювання, у якому були б враховані численні чинники, які мають вирішальне значення для успіху проекту. Цей процес ухвалення рішень ґрунтується на структурованій методології, яка передбачає визначення критеріїв, оцінювання різних варіантів і обчислення зважених балів для об'єктивного оцінювання кожної потенційної конфігурації. У наведених нижче інструкціях застосовано покроковий підхід до такого процесу оцінювання з урахуванням усіх відповідних аспектів, як-от відмовостійкість, економічна ефективність і вплив на довкілля. Проведення такого комплексного аналізу допомагає зацікавленим сторонам ухвалювати обґрунтовані рішення, що

задовольняють безпосередні потреби та водночас відповідають довгостроковим стратегічним цілям створення мікромережі.

- Визначте вагу критеріїв. Кожному критерію слід присвоїти вагу, яка відобразить його важливість з огляду на цілі мікромережі, зокрема підвищення відмовостійкості, мінімізацію витрат або максимальне збільшення переваг для довкілля.
- Оцініть кожен варіант. Кожен варіант проєкту слід оцінити за шкалою від 1 до 5 на основі його відповідності критеріям, з використанням даних моделювання й пілотних проєктів, якщо такі є.
- Обчисліть зважені бали. Вплив кожного варіанта дизайну оцінюють кількісно, помножуючи його бали на вагу критерію й підсумовуючи результат для отримання загального балу, який буде покладено в основу процесу ухвалення рішень.
- Аналіз рішень. Вибір оптимального дизайну може визначатися не лише на підставі найвищого балу, але враховувати такі стратегічні чинники, як можливість масштабування в майбутньому, потенційні зміни нормативного середовища та інтеграція з наявною інфраструктурою.

4. ВИМОГИ ДО ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ МІКРОМЕРЕЖІ В ОСТРІВНОМУ РЕЖИМІ ТА РЕЖИМІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Мікромережі призначені для підвищення відмовостійкості шляхом роботи у двох різних режимах: острівному режимі та режимі централізованого електропостачання. Кожен режим характеризується унікальною номінальною потужністю, зокрема в контексті підтримання стабільності й надійності під час перебоїв. У цьому розділі докладно описано технічні аспекти таких вимог з акцентом на забезпеченні надійного джерела живлення.

4.1. ОСТРІВНИЙ РЕЖИМ

В острівному режимі мікромережа працює незалежно від основної мережі. Цей режим потрібен під час відключень у мережі або у віддалених районах, у яких відсутній доступ до мережі. Основні вимоги до електроживлення:

- Виконання рівнянь для визначення потужності
 - $P_{Source} = \Delta_n * (\sum P_i - \sum P_{DG_m})$
 - $Q_{Source} = \Delta_n * (\sum Q_i - \sum Q_{DG_m})$де:
 - P_{Source} і Q_{Source} – джерела активної та реактивної потужності
 - Δ_n – коефіцієнт дефіциту для сценарію n
 - P_i та Q_i – активне та реактивне навантаження у вузлі i
 - P_{DG_m} та Q_{DG_m} – активна й реактивна вихідна потужність розподіленої генерації в мікромережі m
- Належна потужність генерації. Потужність генерації повинна перевищувати вимоги до пікового навантаження для забезпечення безперервної роботи в острівному режимі. Сюди входить включення диспетчеризованих джерел генерації для оперативного задоволення змін у попиті на навантаження. Резервування за сценаріями N-1 або N-2 підвищує відмовостійкість, забезпечуючи можливість підтримання роботи системи навіть у разі виходу з ладу одного або кількох джерел генерації.
- Керування навантаженням. Динамічне керування навантаженням є важливим для запобігання перевантаженням і забезпечення безперервного постачання. Сюди входять моніторинг і контроль навантажень у режимі реального часу, а також визначення пріоритетності критичних навантажень над некритичними. Можна застосовувати стратегії реагування на попит для коригування профілів навантаження відповідно до доступної потужності генерації.
- Стабільність і контроль. Стабільність напруги та частоти мають надзвичайно важливе значення. Для регулювання напруги та частоти в прийнятних межах

потрібні вдосконалені системи керування. Інверторні РДЕ повинні бути оснащені алгоритмами керування для забезпечення можливості формування мережі, що забезпечуватиме стабільне й стійке електропостачання.

- Порядок пріоритезації РДЕ: мікромережа повинна оптимізувати використання РДЕ з урахуванням їх доступності, вартості та впливу на довкілля. Спочатку слід використовувати відновлювані джерела енергії, потім – накопичену енергію, і в останню чергу – невідновлювані джерела генерації (за необхідності).
- Управління пусковими струмами. Розміри генераторів повинні уможливлувати ефективне управління пусковими струмами, що зазвичай виникають під час подання живлення на трансформатори й запуску двигунів. Такі розміри забезпечують здатність системи працювати без перебоїв в умовах раптового зростання попиту.
- Постачання реактивної потужності. Усі джерела генерації повинні забезпечувати як активну, так і реактивну потужність для відповідності вимогам щодо коефіцієнта потужності мікромережі. Належний вибір і розміри обладнання для генерації забезпечують наявність достатньої реактивної потужності, що підвищує стабільність і ефективність.

Крім того, постачання реактивної потужності може здійснюватися за допомогою конденсаторів для коригування коефіцієнта потужності, інверторів, динамічних вольт-амперних реактивних (ВАр) компенсаторів та інших джерел. В острівних системах реактивну потужність зазвичай забезпечують підключені генератори, хоча в деяких системах також функціонують конденсатори на підстанціях, які допомагають скоригувати коефіцієнт потужності безпосередньо в точках вторинного розподілу трансформатора. Ці конденсатори можуть регулювати власну вихідну потужність, виходячи з вимог до коефіцієнта потужності навантаження, і часто бувають призначені для зменшення індуктивних втрат трансформаторів.

Розподілені конденсатори в острівному режимі є вигідними, оскільки вони знижують потребу в реактивній потужності від генераторів і скорочують загальні втрати в системі шляхом забезпечення реактивної потужності ближче до того місця, де вона потрібна. Генератори зазвичай мають коефіцієнт потужності 0,8; наприклад, генератор із номінальною потужністю 1200 кВт/1500 кВА може забезпечити до 900 кВАр для навантаження з відстаючим коефіцієнтом потужності. Однак, якщо система має випереджувальний коефіцієнт потужності, що свідчить про перевагу ємнісних навантажень над індуктивними, генератор може бути перевантажено, що може мати потенційний вплив на стабільність системи. В ідеалі загальний коефіцієнт потужності навантаження має дорівнювати майже одиниці (з невеликим відставанням), що є критично важливим чинником під час проєктування та аналізу острівних режимів.

- Планування на випадок аварійних ситуацій і зростання навантаження. Генератори повинні працювати з урахуванням коефіцієнта аварійних ситуацій (зазвичай на 15–20% вище пікового навантаження), щоб витримувати неочікувані стрибки навантаження і його зростання в майбутньому. Таке планування запобігає неефективній експлуатації та потенційній шкоді, забезпечуючи масштабованість зі зростанням вимог.

- Гармоніки й балансування навантаження. Хоча гармонійні спотворення зазвичай не становлять серйозних проблем для мікромереж, розрахованих на відмовостійкість, вони все одно можуть впливати на тривалість та ефективність роботи. Нелінійні й незбалансовані навантаження можуть генерувати гармонічні струми, спотворюючи форми електричних сигналів і спричиняючи неефективність.

У стандартних умовах підключення до мережі, низький імпеданс джерела пом'якшує значні гармонічні впливи. Однак у мікромережах, які працюють від генераторів із вищим імпедансом джерела, як-от дизель або газ, можливим є посилення гармонійних ефектів, що потенційно призведе до більших падінь напруги й дестабілізації генераторів.

Для усунення гармонійних спотворень, зокрема під час довгострокової експлуатації мікромереж, можна розглянути можливість використання фільтрів гасіння гармонік (як пасивних, так і активних). Пасивні фільтри використовують реактори й конденсатори для виявлення й гасіння певних гармонік; активні фільтри чинять динамічну протидію гармонікам шляхом введення протилежних струмів. Ці стратегії усунення допомагають підтримувати стабільність роботи й захищати обладнання в мікромережі.

Крім того, для вибору відповідних розмірів і місць розташування фільтрів до обсягу проєктної діяльності можна додати інженерну оцінку, зокрема оцінку обладнання, що генерує гармоніки, і величини згенерованих гармонік. Така оцінка гарантує стратегічне розміщення фільтрів гармонік для оптимізації їх ефективності, підвищення загальної якості електроенергії та стабільності мікромережі.

4.2. РЕЖИМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У режимі централізованого електропостачання мікромережа працює паралельно з основною електромережею, що забезпечує обмін електроенергією. Цей режим забезпечує гнучкість і підвищує загальну відмовостійкість мережі. Основні вимоги до електроживлення:

- Синхронізація мережі. Повинна відбуватися синхронізація власної напруги, частоти й фази мікромережі з цими ж параметрами основної мережі для забезпечення безперебійної роботи. Для управління переходом із режиму ізолюваної роботи в режим підключення до мережі й навпаки необхідні протоколи синхронізації та системи керування.
- Управління піковим навантаженням. У періоди високого попиту мікромережа може отримувати додаткову енергію від основної мережі для задоволення місцевих потреб. І навпаки, у періоди низького попиту можливе експортування надлишку виробленої в мікромережі енергії в основну мережу.
- Порядок пріоритезації РДЕ. Так само як і під час роботи в режимі ізоляції, використання РДЕ необхідно оптимізувати з урахуванням таких параметрів як доступність, вартість і вплив на довкілля, при цьому перевагу слід віддавати відновлюваним джерелам енергії.
- Вимоги до безперебійного переходу. Для критично важливих операцій, які вимагають безперебійного живлення, мікромережі повинні бути відповідно

обладнані для безперервного переходу з режиму підключення до мережі на острівний режим і навпаки. Потрібні спеціалізовані джерела генерації й системи керування, здатні швидко перемикаєти навантаження.

- Технічні особливості є такими:

Обмеження поточкорозподілу

- Обмеження напруги

$$|V_i^{\min}| \leq |V_i| \leq |V_i^{\max}|$$

де:

- V_i : напруга на вузлі i
- V_i^{\min} та V_i^{\max} : мінімальна й максимальна допустима напруга

- Обмеження пропускної здатності вітки

$$|I^i| \leq |I^{\max}| \text{ та } |I_R^i| \leq |I_R^{\max}|$$

де:

- I^i and I_R^i – пропускна здатність прямого й зворотного струму у вітці i
- I^{\max} та I_R^{\max} : максимально допустимі значення струму

Обмеження потужності розподіленої генерації

$$P_{DG_{\min}} \leq P_{DG} \leq P_{DG_{\max}}$$

$$Q_{DG_{\min}} \leq Q_{DG} \leq Q_{DG_{\max}}$$

де:

- P_{DG} та Q_{DG} – активна й реактивна потужність розподіленої генерації
- $P_{DG_{\min}}$ та $P_{DG_{\max}}$ – мінімальна й максимальна допустима активна потужність
- $Q_{DG_{\min}}$ та $Q_{DG_{\max}}$ – мінімальна й максимальна допустима реактивна потужність

4.3. ПЕРЕКЛЮЧЕННЯ МІЖ РЕЖИМАМИ

Переключення з острівного режиму до режиму підключення до мережі й навпаки вимагає ретельного координування й застосування передових стратегій управління для забезпечення стабільності й безперервності постачання. При цьому ключові його аспекти є такими:

- Плавний перехід. Система управління мікромережею повинна виявляти збої в мережі та ініціювати плавний перехід до режиму ізоляції. Так само й коли відбувається стабілізація основної мережі, синхронізація та повторне підключення мікромережі мають відбутися без перебоїв.

- Стратегії управління. Ієрархічні стратегії, зокрема первинні, вторинні й третинні засоби управління, здійснюють управління переключенням між режимами. Первинний контроль забезпечує негайне реагування на зміни, вторинний контроль коригує уставки, а третинний – оптимізує загальну роботу.
- Механізми захисту. Для ізолювання несправностей і захисту обладнання під час переключень повинні бути встановлені механізми захисту, як-от реле та автоматичні вимикачі. Системи захисту швидкого спрацювання необхідні для мінімізації впливу перешкод.

5. АНАЛІЗ НАВАНТАЖЕННЯ

Під час проєктування мікромережі вкрай важливо забезпечити здатність системи підтримувати пікове навантаження критичних систем як під час звичайної, так і під час пікової активності. Це передбачає управління не тільки критичними, але й некритичними навантаженнями, які неможливо відокремити. Для визначення можливостей мікромережі необхідно провести комплексний аналіз профілю навантаження за різних режимів роботи – звичайного та пікового. Це гарантуватиме наявність достатньої генерації та потужності для роботи в маневровому режимі (слідкування за навантаженням) для задоволення цих вимог без шкоди для стабільності системи.

Цей аналіз включає конкретні типи навантажень, які створюють унікальні проблеми. Ступінчасті навантаження, надзвичайно нелінійні навантаження, навантаження двигунів та індуктивні навантаження з високими VAR-характеристиками потребують особливої уваги, оскільки вони здатні порушувати стабільність і ефективність системи. Ці навантаження досліджуються як у режимі підключення до мережі, так і в острівному режимі, щоб забезпечити збереження функціональності мікромережі за різних сценаріїв. Таке оцінювання робиться на основі як прогнозованих, так і фактичних або тестових вимог, що забезпечує надійну основу для розуміння й планування можливостей мікромережі.

У сценаріях із високим показником інтеграції джерел відновлюваної енергії адаптивність мікромережі набуває вирішального значення. Адаптивна стратегія визначення меж здатна ефективно розширювати експлуатаційні межі мікромережі в години з високим рівнем використання відновлюваної енергії, оптимізуючи використання доступної енергії з відновлюваних джерел і зменшуючи залежність від невідновлюваних джерел.

Скидання навантаження є ще одним важливим компонентом управління мікромережею, зокрема в цілях підвищення здатності витримувати навантаження з вищим пріоритетом. Скидання навантаження шляхом перемикання трансформатора або фідера є методичним підходом до активного управління розподілом навантаження. Це не лише максимально підвищує здатність витримувати критичні навантаження в автономному режимі, але й підтримує загальну енергетичну стійкість системи. Ця стратегія включає детальні плани послідовного відновлення електропостачання вимикачами підстанцій або використання скидання навантаження при зниженні частоти, які розроблені для забезпечення живлення критично важливих об'єктів навіть під час збоїв.

Щобільше, у ситуаціях із некритичними навантаженнями, які важко піддаються відокремленню, під час проєктування необхідно ретельно зважити можливі компроміси. Це означає розгляд доцільності включення додаткового розподільного пристрою для скидання навантаження, який може допомогти в ефективнішому управлінні цими навантаженнями коштом потенційного збільшення системних витрат та витрат на генерацію. Таке рішення є важливим для забезпечення можливості надання мікромережею надійних послуг без надмірних фінансових витрат із забезпеченням балансу між витратами й надійністю та сталістю.

Стратегія пріоритезації

Об'єкти, визначені як критично важливі, повинні бути віднесені до найвищої категорії і включені до проєкту мікрмережі, адже вони мають суттєве значення для забезпечення здоров'я, безпеки й добробуту населення під час відключень електроенергії. Такі критично важливі об'єкти є незамінними під час надзвичайних ситуацій. Для них має бути гарантоване безперебійне електропостачання. І навпаки, об'єкти, віднесені до категорії некритичних, можуть бути відключені під час таких подій як збої в електромережі. Це оптимізуватиме розподіл ресурсів і гарантуватиме резервування енергопостачання для важливих об'єктів.

Рекомендації щодо вибору об'єктів критичних навантажень (приклад)

- Інфраструктура громадського здоров'я та безпеки: критично важливі послуги водопостачання, необхідні для закладів охорони здоров'я та пожежних частин, очищення стічних вод для закладів охорони здоров'я та пов'язані з ними експлуатаційні потреби, як-от інфраструктура для викачування зливових стоків.



- Інфраструктура зв'язку: ключові компоненти, необхідні для підтримання зв'язку під час надзвичайних ситуацій, зокрема інфраструктура Інтернет-зв'язку, телефонного зв'язку, радіо- та телевізійних станцій, а також центрів оброблення даних. Пріоритетність може відрізнятися залежно від конкретної ролі цих закладів у реагуванні на надзвичайні ситуації.
- Служби реагування на надзвичайні ситуації: базова інфраструктура поліції, пожежної охорони, швидкої допомоги та оперативних центрів із надзвичайних ситуацій, які координують найважливіші комунікації в екстрених ситуаціях.
- Заклади охорони здоров'я: лікарні, центри догляду за пацієнтами групи ризику, аптеки й служби швидкої допомоги, які надають життєво важливі медичні послуги та повинні зберігати повну життєздатність для забезпечення здоров'я населення.
- Громадські послуги та безпека: продуктові магазини, автозаправні станції, сховища, включно зі школами, що використовуються як сховища – вони підтримують стійкість громади й забезпечують населення товарами першої необхідності й надають притулок у надзвичайних ситуаціях.
- Транспортна інфраструктура: критично важливі системи управління перевезеннями, зокрема системи автомобільного, залізничного та авіаційного

транспорту, які мають вирішальне значення для безпечного та ефективного пересування під час надзвичайних ситуацій.

- Підтримання критично важливої господарської діяльності: інші необхідні види господарської діяльності, які істотно впливають на функціонування чи економічну стабільність громади й можуть включати комунальні послуги й послуги, що мають критичне значення для добробуту суспільства.

6. АНАЛІЗ ГЕНЕРАЦІЇ. БАЛАНС МІЖ ГЕНЕРАЦІЄЮ ТА НАВАНТАЖЕННЯМ

Вибір джерел генерації для мікромережі є важливим проєктним рішенням. Під час експлуатації здійснюватиметься управління такими джерелами для забезпечення стабільності та якості електроенергії. Остаточний вибір джерел генерування залежатиме від вимог до електроживлення, доступних відновлюваних джерел енергії, наявних об'єктів генерації, доступних на регіональному рівні видів палива, викидів у повітря й окупності витрат. Важливо також знайти баланс технічних можливостей для забезпечення відповідності між навантаженням та іншими пріоритетами проєкту, такими як витрати, сталість і резервування.

6.1. АНАЛІЗ ГЕНЕРАЦІЇ

У вдосконалених мікромережах джерела генерації часто поєднуються в гібридні системи. Ці системи можуть за потреби диспетчеризувати й обмежувати генерацію, використовуючи переваги як диспетчеризованої, так і змінної генерації. Наприклад, система може оптимізувати відновлювані ресурси, щоб мінімізувати експлуатаційні витрати з одночасним їх обмеженням для підтримання якості електроенергії.

Характеристики гібридних енергосистем:

- Низька частка відновлюваної енергії. Диспетчеризована генерація працює постійно, при цьому відновлювані джерела енергії зменшують чисте навантаження. Зазвичай система керування не потрібна.
- Середня частка відновлюваної енергії. Диспетчеризована генерація працює безперервно. За підвищення частки відновлюваної енергії подається додаткове навантаження або відновлювані джерела обмежуються задля уникнення надмірної генерації. Потрібна базова система керування.
- Висока частка відновлюваної енергії (зі зберіганням). Відновлювані джерела енергії накопичувачі можуть забезпечувати живлення навантаження без обертових генераторів, які можна тимчасово вимкнути. Потрібні базові системи керування.
- Висока частка відновлюваної енергії (без зберігання). Обертовий генератор можна вимкнути або ж залишити як обертовий резерв. Потрібні комплексні системи керування.

ТАБЛИЦЯ 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОМЕРЕЖ ІЗ ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ (ВДЕ)

РІВЕНЬ ВДЕ В МІКРОМЕРЕЖІ	ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	ЧАСТКА ВДЕ В ПІКОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ	ЧАСТКА ВДЕ В РІЧНОМУ ОБСЯЗІ ЕНЕРГІЇ	РІВЕНЬ ЗРІЛОСТІ
Низький	<ul style="list-style-type: none">• Диспетчеризована генерація працює постійно• Відновлювані джерела енергії зменшують чисте навантаження на диспетчеризовану генерацію• Уся відновлювана енергія йде безпосередньо на навантаження	Менше ніж 30%	Понад 20%	Високий, багато прикладів великого й малого масштабу

ТАБЛИЦЯ 6. ХАРАКТЕРИСТИКИ МІКРОМЕРЕЖ ІЗ ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ (ВДЕ)

РІВЕНЬ ВДЕ В МІКРОМЕРЕЖІ	ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ	ЧАСТКА ВДЕ В ПІКОВОМУ НАВАНТАЖЕННІ	ЧАСТКА ВДЕ В РІЧНОМУ ОБСЯЗІ ЕНЕРГІЇ	РІВЕНЬ ЗРІЛОСТІ
	<ul style="list-style-type: none"> Система керування часто відсутня 			
Середній	<ul style="list-style-type: none"> Диспетчеризована генерація працює майже постійно Відновлювані джерела енергії зменшують чисте навантаження на диспетчеризовану генерацію Якщо частка підвищується, додається додаткове навантаження або скорочується відновлювана енергія Зазвичай потрібна базова система керування 	30%–75%	20%–50%	Високий, багато прикладів великого й малого масштабу
Високий (зі зберіганням енергії)	<ul style="list-style-type: none"> Відновлювані джерела енергії та зберігання можуть жити навантаження без обертових генераторів Обертові генератори використовуються в основному для заряджання накопичувачів у періоди з низьким рівнем відновлюваної енергії Необхідна наявність мінімальної базової системи керування Генерація з відновлюваних джерел може перевищувати пікові навантаження, при цьому надлишкова енергія накопичуватиметься 	50%–100%	50%–100%	Високий, здебільшого в малих масштабах
Високий (без зберігання енергії)	<ul style="list-style-type: none"> Обертові генератори можна вимкнути або залишити як додатковий резерв, коли відновлювана енергія відповідає вимогам навантаження Необхідні додаткові компоненти для забезпечення якості електроенергії, коли генератор вимкнено Потрібна складна система контролю 	50%–100%	50%–100%	Від низького до середнього, кілька прикладів, здебільшого – малого масштабу

6.2. НАЯВНІ ДЖЕРЕЛА ГЕНЕРАЦІЇ

Інтеграція наявних об'єктів генерації. Використання наявних генерувальних потужностей може значно скоротити обсяг нових капітальних витрат (CAPEX). Важливо оцінити технічну придатність, надійність і залишковий строк експлуатації цих об'єктів. Ключові технічні параметри включають таке:

- Потужність (кВт): максимальна потужність, яку може виробити генератор.
- Енергоефективність (%): відношення корисної вихідної до загальної споживаної потужності.

- Документація з технічного обслуговування. Дані минулих періодів щодо технічного обслуговування й ремонту, які допомагають спрогнозувати роботу в майбутньому.

Оцінюючи ці параметри, проектні групи можуть визначити доцільність використання наявних об'єктів генерації.

Загальні характеристики. Наявні об'єкти генерації повинні бути проаналізовані за типом, ємністю, експлуатаційними обмеженнями та надійністю за даними минулих періодів. Об'єкти, строк експлуатації яких майже сплив, або об'єкти з низькою надійністю можуть бути непридатними. Важливі параметри включають таке:

- Вік (у роках): кількість років експлуатації об'єкта генерації.
- Години експлуатації (годин/рік): середньорічна кількість годин експлуатації.
- Рівень відмов (кількість відмов/рік): частота відмов, що впливає на надійність і вартість обслуговування.

Оцінюючи ці характеристики, групи, що розробляють проєкт, можуть визначити доцільність використання і придатність наявних об'єктів генерації.

Структура власності та експлуатаційні обмеження. Структура власності об'єктів генерації значно впливає на їх інтеграцію в мікромережу. Блоки, які працюють згідно з угодами про закупівлю електроенергії, потребують технічних модифікацій та внесення змін до угод для забезпечення можливості роботи після їх відключення від основної мережі. Ключові аспекти цього включають таке:

- Договірні умови: угоди, що визначають обов'язки та обмеження.
- Права контролю: ступінь контролю об'єктів із боку оператора мікромережі.
- Обов'язки з технічного обслуговування: розподіл завдань із технічного обслуговування між власниками установки та сторонніми власниками.

Усунення цих обмежень забезпечує ефективну інтеграцію об'єктів генерації та управління ними.

Стратегічне розміщення в системі розподілу. Наявні джерела генерації повинні бути стратегічно розміщені всередині визначених електричних меж мікромережі. Це забезпечує оптимальні сценарії роботи з включенням як джерел генерації, так і критичних навантажень у точках ізоляції. До важливих факторів належать:

- Близькість до критичних навантажень (у метрах): відстань між джерелами генерації й навантаженнями, які вони обслуговують.
- Точки з'єднання: точки, у яких джерела генерації підключаються до мікромережі.
- Можливості локалізації несправностей: можливість локалізувати несправності й запобігти їхньому впливу на всю мікромережу.

Враховуючи ці фактори, групи, що розробляють проєкт, можуть підвищити ефективність і надійність мікромережі.

Сумісність із системою керування. Наявні джерела генерації повинні бути сумісними з системою керування мікромережею. Для цього часто потрібна наявність додаткових засобів контролю й інфраструктури зв'язку. Ключові параметри включають таке:

- Час реагування (у секундах): час, необхідний системі керування, щоб відреагувати на зміни.
- Протоколи зв'язку (Modbus, IEC104 тощо): стандарти, які використовують для зв'язку між системами керування й генерувальними потужностями.
- Гнучкість керування: можливість налаштовувати параметри керування залежно від різних сценаріїв експлуатації.

Забезпечення сумісності має критично важливе значення для бездоганної інтеграції та ефективного управління.

Режими керування генератором. Під час інтеграції як наявних генераторних установок, так і нових РДЕ до мікромереж наявність кількох режимів керування є важливою для підтримання стабільності та ефективності системи.

- Режим базового навантаження використовується для безперервного електропостачання за постійної реальної вихідної потужності та фіксованого коефіцієнта потужності; цей режим підходить як для традиційних, так і для нових генераторів, синхронізованих із частотою мережі.
- Режим змінного навантаження добре адаптується до відновлюваних РДЕ, наприклад, сонячних, дозволяючи коливання вихідної потужності залежно від доступності ресурсу.
- Ізохронний режим необхідний для підтримання генератором або групою генераторів стабільної частоти незалежно від змін навантаження, що є зокрема корисним в ізольованих системах без підтримки з боку мережі. Цей режим допомагає в ситуаціях, коли важливими є постійна якість електроенергії та стабільність частоти.
- Переваги ізохронного режиму розподілу навантаження посилюються дедалі більше завдяки розподілу змін навантаження між кількома генераторами для спільної стабілізації частоти, що є ідеальним для складних мікромереж з об'єктами змішаної генерації.
- Статичний режим забезпечує гнучке реагування на зміну навантажень шляхом регулювання частоти й потужності генератора. Цей режим є важливим для систем зі значними змінами навантаження, у яких він допомагає динамічно збалансувати генерацію без централізованого регулювання частоти, зокрема в автономних мікромережах.

Паралельні резервні генератори. Використання наявних центральних або резервних об'єктів генерації в мікромережі може збільшити її потужність, водночас зменшуючи капітальні витрати. Однак важливо враховувати можливість роботи таких генераторів паралельно з мікромережею. У більшості резервних генераторів відсутні необхідні регулятори збудження/блоки управління збудженням і паралельні комутаційні пристрої,

які мають суттєве значення для інтеграції мікромережі, а це вимагає додаткових інвестицій в обладнання та комунікаційну інфраструктуру.

Важливі чинники інтеграції резервних генераторів включають таке:

- Можливості синхронізації: забезпечення відповідності генератора частоті й напрузі мікромережі.
- Регулятори збудження/блоки управління збудженням: механізми керування вихідною потужністю генератора.
- Номінальні характеристики розподільного пристрою (КА): здатність розподільного пристрою витримувати високі рівні струму.

Додатково слід врахувати такі питання, як засоби керування генератором і його сумісність, характеристики автоматичних перемикачів, налаштування захисту системи й вимоги до з'єднання з локальними мережами. Якщо резервні генератори вважаються придатними для інтеграції в мікромережу, важливо встановити правила за принципом «не нашкодь» задля уникнення підвищеного ризику пошкодження таких генераторів. Наприклад, у разі збою зв'язку в мікромережі або збою в системі розподілу резервні генератори повинні мати можливість працювати незалежно під час відключення.

Управління операційним ризиком у резервних генераторах. Для резервних генераторів, що використовуються в мікромережі, необхідно розробити сценарій експлуатації за принципом «не нашкодь». Цим буде забезпечено їхнє ефективне функціонування в автономному режимі під час відключень без великого ризику пошкодження. Ключові параметри включають таке:

- Відмовостійкість: здатність витримувати збої без суттєвих пошкоджень.
- Пропускна здатність: максимальне навантаження, яке можуть витримати резервні генератори.
- Механізми захисту від збоїв: системи для захисту генераторів від пошкоджень у разі збоїв або несправностей системи керування.

Керованість. Система управління мікромережею повинна мати можливість контролю за наявними джерелами генерації. Це часто передбачає модернізацію шляхом облаштування нових систем керування та інфраструктури зв'язку. Ключові параметри включають таке:

- Точність керування (%): точність налаштувань керування.
- Затримка (мілісекунди): затримка між командою системи керування і реакцією з боку генератора.
- Масштабованість: можливість розширення систем керування в разі появи додаткових джерел генерації або навантажень.

Забезпечення можливості керування має критично важливе значення для підтримання стабільності та оптимізації роботи.

Економічна диспетчеризація. Для підвищення економічної рентабельності мікромережі наявні об'єкти генерації повинні давати економічні вигоди за умови підключення до мережі, наприклад, згладжувати пікові навантаження або надавати мережеві послуги. Краще використовувати ресурси, що характеризуються нижчими експлуатаційними витратами й меншими обмеженнями, наприклад, газові генератори. Важливі параметри включають таке:

- Вартість палива (\$/кВт·год): вартість палива для генераторів.
- Викиди ($\text{gCO}_2/\text{кВт}\cdot\text{год}$): вплив генераторів на довкілля.
- Експлуатаційна гнучкість: можливість регулювати потужність генерації, виходячи з економічних умов і вимог мережі.

6.3. НОВІ ДЖЕРЕЛА ГЕНЕРАЦІЇ

Вибір нових джерел генерації для мікромережі передбачає проведення детального аналізу й ретельного планування, щоб забезпечити ефективне та продуктивне виконання системою вимог до електроживлення. Обсяги нових джерел диспетчеризованої генерації зазвичай розраховують на основі вимог до пікового навантаження за врахуванням потужності наявної диспетчеризованої генерації. Для забезпечення надійності й стабільності в цьому процесі визначення обсягів мають бути враховані такі чинники як пускові струми, майбутнє розширення й вимоги до резервування.

Об'єкти диспетчеризованої генерації. Такі об'єкти диспетчеризованої генерації як газові генератори й дизельні генератори, є критично важливими для задоволення постійних потреб мікромережі в електроенергії. Ці джерела повинні бути надійними, гнучкими й здатними швидко реагувати на зміни попиту на навантаження. Вибираючи об'єкти диспетчеризованої генерації, важливо враховувати таке:

- Доступність і вартість палива. Важливими чинниками є доступність і вартість такого палива як природний газ або дизельне паливо. Під час аналізу слід брати до уваги місцеву інфраструктуру постачання, логістику транспортування палива та довгострокову цінову стабільність.
- Викиди та вплив на довкілля. Необхідно оцінити профіль викидів і вплив на довкілля кожного джерела генерації. Дизельні генератори, наприклад, можуть характеризуватися вищим рівнем викидів порівняно з генераторами, які працюють на природному газі, тож можуть виникнути питання в плані виконання відповідних вимог дозвільних документів і нормативно-правових актів.
- Експлуатаційна ефективність і вимоги до технічного обслуговування. Газові генератори зазвичай характеризуються вищою ефективністю й нижчими витратами на технічне обслуговування порівняно з дизельними генераторами. Важливими чинниками є періодичність технічного обслуговування, доступність запчастин і простота проведення ремонтних робіт.
- Можливість масштабування і резервування. Об'єкти генерації повинні характеризуватися здатністю до масштабування для роботи в умовах майбутнього зростання навантаження й можливістю резервування для підвищення надійності

системи. Системи резервування можуть забезпечити безперебійну роботу навіть у разі виходу з ладу одного блоку.

Гнучкість і надійність. Експлуатаційна гнучкість, яка визначається швидкістю виходу РДЕ на потужність та поступового її зниження, має вирішальне значення, зокрема в мікромережах із підвищеною присутністю відновлюваних джерел із високою мінливістю. Показники надійності, такі як час безвідмовної роботи й графіки технічного обслуговування, є також важливими для забезпечення безперервного електропостачання. Аналіз цих показників допомагає з вибором джерел генерації, які можуть адаптуватися до змін навантаження й підтримувати стабільність.

Один блок або кілька блоків. Вибір між одним великим або кількома меншими блоками впливає на резервування, можливість масштабування і відмовостійкість. Кілька менших блоків можуть бути більш надійними завдяки резервуванню, забезпечуючи безперервність електропостачання навіть у разі відмови одного блоку, і можуть краще відповідати на місцеві коливання попиту. І навпаки, один великий блок може мати переваги у вигляді ефекту масштабу з погляду капітальних та операційних витрат, але збільшувати ризики, будучи єдиною вразливою до збоїв ланкою. Таке рішення повинно бути компромісом між перевагами здатності до масштабування й надійності, з одного боку, та економічною ефективністю та управлінням ризиками, з іншого.

Об'єкти відновлюваної генерації. Відновлювані джерела генерації мають низку переваг, зокрема нижчу вартість енергії та зменшення впливу на довкілля; крім того, вони є самодостатніми енергетичним ресурсом. Вибираючи об'єкти відновлюваної генерації, важливо враховувати їх локацію, наявність ресурсів, тип технології, дозвільні вимоги, умови договорів про майбутню закупівлю й варіанти фінансування. Такі інструменти, як System Advisor Model від Національної лабораторії відновлюваних джерел енергії США (NREL) і HOMER Pro, є корисними для оцінювання доцільності цих проєктів у сфері відновлюваної енергетики. Ці інструменти надають детальну інформацію про потенційну ефективність та економічну доцільність різних технологій відновлюваної енергії.

Зберігання енергії. Системи зберігання енергії (BESS) відіграють критично важливу роль у сучасних мікромережах завдяки негайному реагуванню на зміни навантаження участі в підтриманні стабільності системи. BESS також можна використовувати для пуску з нуля, завдяки чому мікромережа може мати здатність до самостійного перезапуску після повного відключення. На додаток до перелічених експлуатаційних переваг BESS може використовуватися в прибуткових видах діяльності, як-от усунення пікових навантажень і реагування на попит. Зменшуючи піковий попит і беручи участь у програмах реагування на попит мікромережі з BESS можуть знизити енерговитрати та забезпечити додаткове джерело доходу, що сприятиме підвищенню загальної економічної ефективності системи.

Обсяг нових джерел генерації. Потреба в нових джерелах генерації часто виникає тоді, коли наявних джерел недостатньо для задоволення потреб мікромережі. Потребу в новій диспетчеризованій потужності генерації можна розрахувати таким чином:

$$G_{new} = P_{peak} - G_{existing_dispatchable}$$

де:

- G_{new} – нова потрібна потужність генерації
- P_{peak} – пікове значення для вибраного навантаження
- $G_{existing_dispatchable}$ – потужність наявної диспетчеризованої генерації

Об'єкти диспетчеризованої генерації. Об'єкти диспетчеризованої генерації мають важливе значення для задоволення постійних енергетичних потреб мікромережі. Необхідну потужність можна визначити, використовуючи формулу:

$$G_r = P_L - G_{existing_dispatchable}$$

де:

- G_r – необхідна диспетчеризована потужність генерації
- P_L – пікове навантаження
- $G_{existing_dispatchable}$ – наявна використовувана диспетчеризована генерація

Обсяг нових диспетчеризованих джерел слід визначати на основі пікового попиту з вирахуванням наявної генерації та з урахуванням таких аспектів, як пускові струми, майбутнє розширення й потреби в резервуванні.

Вибір навантаження та управління навантаженням. Мікромережі слід проектувати з метою вибіркового задоволення попиту на пікове навантаження і зменшення непотрібних капітальних витрат на потужність генерації. Такі стратегії, як скидання навантаження в пікові години або години з нульовим використанням ВДЕ, можуть мінімізувати потребу в більших потужностях генерації, тим самим зменшуючи витрати.

$$P_{eff} = P_L \times \text{Coverage Ratio}$$

де:

- P_{eff} – ефективне пікове навантаження
- P_L – пікове навантаження
- Коефіцієнт покриття – частка пікового навантаження, яку необхідно покрити (наприклад, 90%)

Забезпечення паливом. Важливо оцінити потужність і тиск наявних систем, що працюють на природному газі, або доступність інших видів палива. Належне й надійне забезпечення паливом гарантує безперервну роботу диспетчеризованих генераторів.

Аспекти, пов'язані з відновлюваною генерацією. Під час проектування мікромережі необхідно враховувати наявність відновлюваних джерел енергії на місцях, придатність технологій та питання економічної доцільності. Інструменти й бази даних – наприклад, атласи відновлюваних джерел енергії, – можна використовувати для дослідження потенціалу ВДЕ.

Розмір накопичувача енергії. Системи накопичення енергії необхідні для забезпечення негайного реагування на зміни навантаження й підтримання частоти в системі. Необхідну ємність накопичувача можна розрахувати за такою формулою:

$$S_r = \Delta_L \times t$$

де:

- S_r – необхідна ємність накопичувача
- Δ_L – максимальна зміна навантаження
- t – бажана тривалість резервування

Баланс між генерацією та навантаженням. Важливо підтримувати збалансованість навантаження й генерації, насамперед в острівному режимі. Контролер мікромережі повинен забезпечити баланс між генерацією та навантаженням, тримаючи водночас напругу й частоту в прийнятних межах. Цей баланс є динамічним з огляду на різницю в побудові систем, у завантаженості та в генерації з відновлюваних джерел.

Доступна потужність генерації й потужність генерації системи зберігання повинні завжди відповідати динамічному навантаженню:

$$G_{\text{available}} + S_{\text{gen}} \geq L_t$$

де:

- $G_{\text{available}}$ – доступна потужність генерації
- S_{gen} – потужність генерації системи зберігання
- L_t – динамічне навантаження в момент часу t

Рекомендується проведення детального моделювання (бажано за проміжками тривалістю одна година або 15 хвилин) для точного узгодження навантаження мікромережі з можливостями генерації. Для цієї практики можна використовувати такі інструменти, як HOMER, але так само й спеціальні сценарії в базових програмних засобах типу MS Excel.

7. МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ ТА АНАЛІЗ ЕНЕРГОСИСТЕМ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ СЦЕНАРІЇВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖ

Після завершення конфігурування й проєктування мікромережі важливо перевірити її роботу в належних експлуатаційних межах як в острівному режимі, так і в режимі підключення до мережі за різних сценаріїв. Цей крок гарантує відповідність дизайн-проєкту критеріям ефективності. Процес перевірки, у якому використовують передові інструменти моделювання, як-от DlgSILENT PowerFactory, включає комплексне моделювання мережі та аналіз енергосистеми.



Рисунок 3. Поетапний процес забезпечення якості дизайну мікромережі

Збір даних є першим кроком в аналізі мережі й моделюванні для запровадження мікромережі. Це основне завдання полягає в зборі всієї відповідної інформації про наявну енергетичну інфраструктуру, зокрема даних про моделі енергоспоживання, фізичне розташування поточної мережі, детальний перелік об'єктів мереж із зазначенням відповідних параметрів і віку об'єктів, а також специфіку наявних РДЕ. Збір повних і точних даних має суттєве значення для створення реалістичної моделі мікромережі, яка становитиме основу для всіх подальших аналізів і рішень.

Розроблення **моделі цифрової мережі** є важливим для ефективною візуалізації й моделювання роботи мікромережі в різних умовах. Цей процес починається з вибору складних інструментів моделювання, таких як DlgSILENT PowerFactory, які полегшують створення детального віртуального зображення мікромережі. Ця модель об'єднує зібрані дані для відображення операційних і структурних аспектів мікромережі, забезпечуючи комплексне моделювання поведінки мережі. Такі моделювання є вкрай важливими для виявлення потенційних проблем і тестування різних сценаріїв у безпечному середовищі. Цей процес включає перевірку моделі шляхом порівняння змодельованих результатів із фактичними даними для забезпечення точності й проведення аналізу чутливості для визначення критичних чинників ефективності. Цей системний підхід значно сприяє плануванню та оптимізації дизайну мікромережі, він забезпечує здатність системи ефективно реагувати на різноманітні виклики в процесі експлуатації.

Аналіз стаціонарного режиму проводять, щоб зрозуміти, як мікромережа поводить себе за нормальних умов експлуатації. Це передбачає оцінку роботи мережі за умов, коли попит і пропозиція збалансовані й стабільні. Результати аналізу стаціонарних режимів допомагають забезпечити здатність мікромережі задовольняти попит на електроенергію. У його ході визначаються сектори, які, можливо, потребуватимуть коригування або вдосконалення для оптимізації роботи.

Аналіз потокорозподілу є важливим видом аналізу стаціонарних режимів під час моделювання мережі, який надає детальну інформацію про рух електроенергії через мікромережу за різних сценаріїв навантаження. Цей аналіз допомагає визначити рівні напруги в різних точках мережі, виявити потенційні вузькі місця й оцінити вплив інтеграції нових РДЕ. Завдяки моделюванню конкретних умов навантаження, як-от періоди пікових і низьких навантажень, цей аналіз виявляє такі проблеми, як падіння напруги, дисбаланс навантаження й точки перевантаження. Він також дає змогу оцінити, як нові РДЕ впливають на схеми перетоку електроенергії й загальну роботу системи. Наявність стратегій з ліквідації цих проблем гарантує ефективність роботи мікромережі та збереження стабільності її роботи за різних сценаріїв.

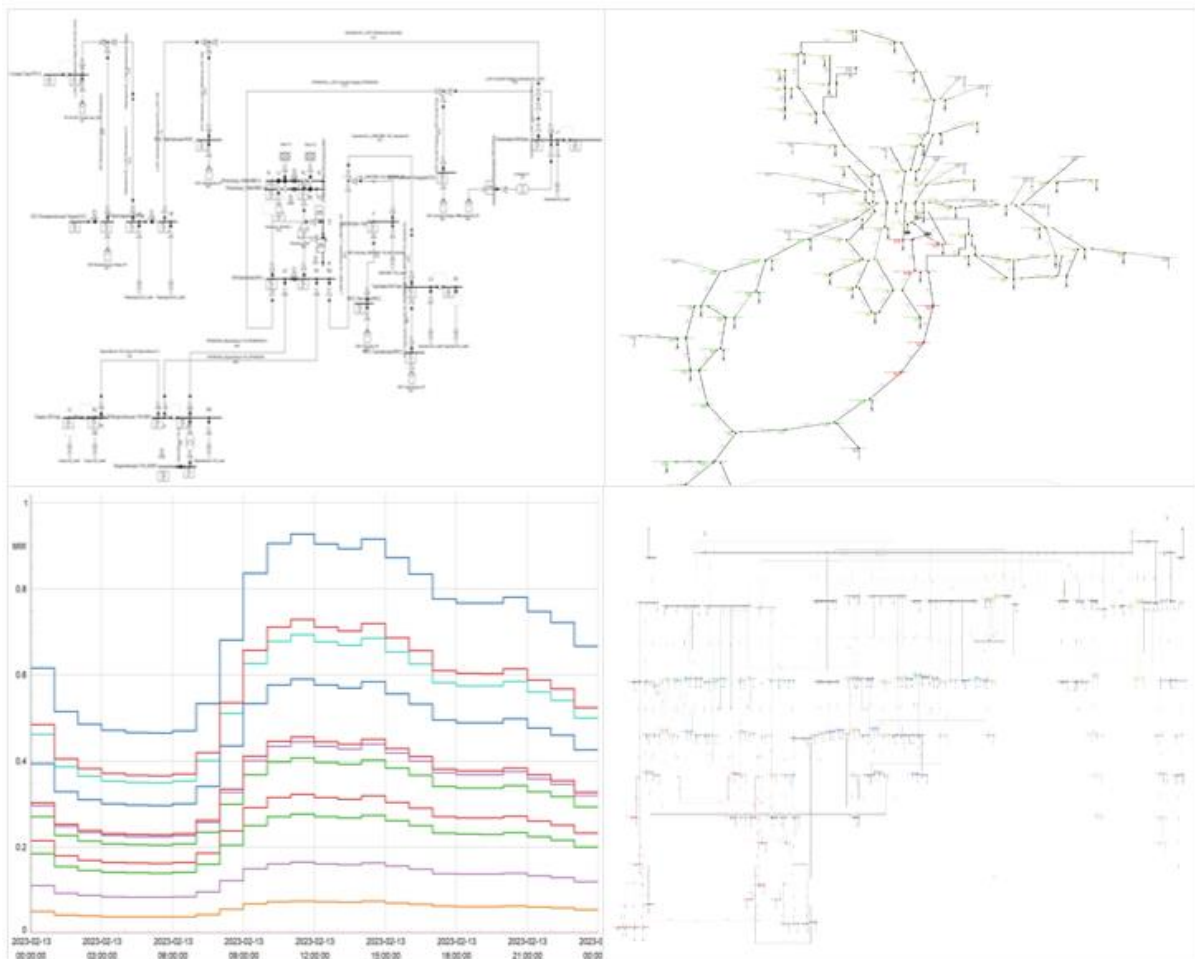


Рисунок 4. Моделювання мережі та аналіз енергосистеми

Квазидинамічний аналіз розширює уявлення, отримані за результатами аналізу стаціонарного режиму й потокорозподілу, оскільки враховує зміни в часі, хоча й не з тією повною роздільною здатністю в часі, яка властива динамічному моделюванню.

Цей підхід особливо корисний для оцінювання того, як мікромережа реагує на коливання попиту або пропозиції протягом різних періодів, що дає змогу передбачити й пом'якшити потенційні проблеми, які можуть виникнути через коливання генерації з ВДЕ чи зміну моделей споживання.

Мета квазідинамічного аналізу полягає в моделюванні реагування мікромережі на тимчасові зміни моделей попиту й пропозиції, зокрема під час включення змінних джерел відновлюваної енергії. Використовуючи профілі навантаження, які змінюються з часом, цей метод відображає зміни як в попиті, так і в генерації, наприклад, збільшення навантаження вдень у житлових районах або зниження навантаження вночі в офісних кварталах.

Періоди часу та сценарії визначаються для врахування мінливості попиту й пропозиції, зокрема коливань генерації з ВДЕ та змін попиту на навантаження протягом дня й року. Процес моделювання відтворює поведінку мікромережі протягом цих періодів, фіксуючи коливання у виробництві відновлюваної енергії й попит на навантаження. Із часом, для спостереження за цим впливом тестуються різні стратегії експлуатації, як-от коригування обсягів генерації з відновлюваних і традиційних джерел, використання акумуляторних систем зберігання енергії, реконфігурація мережі й зміни її меж.

Аналіз результатів моделювання допомагає визначити потенційні проблеми в роботі та області, де мікромережа може працювати не оптимально за різних умов. Цей аналіз забезпечує не лише теоретичну обґрунтованість проєктів, а і їхню практичну життєздатність, що значно знижує ризик експлуатаційних відмов і підвищує загальну стабільність. На основі висновків, отриманих за результатами моделювання, відбувається коригування стратегій управління та експлуатаційних параметрів із метою підвищення відмовостійкості й надійності системи, що забезпечує надійну основу в динамічних умовах енергоспоживання.

Проведення *аналізу коротких замикань* є важливим для оцінювання безпеки й відмовостійкості мікромережі. Цей аналіз визначає потенційний вплив аварійних ситуацій, як-от короткі замикання, на мережу, включно з визначенням максимального струму короткого замикання, який може виникнути. Отримана інформація має вирішальне значення для вибору відповідного захисного обладнання й підготовки стратегій керування несправностями для гарантування безпеки мікромережі та її споживачів.

Метою аналізу короткого замикання є оцінювання реагування мікромережі на різні аварійні сценарії шляхом виявлення потенційних струмів замикання та їхнього впливу на компоненти мережі. Сценарії аварійних ситуацій, які включають різні типи пошкоджень та їх розташування, визначаються для комплексного оцінювання реагування мікромережі на потенційні електричні аварії. Моделювання проводиться для визначення струмів короткого замикання, їхнього впливу на компоненти мережі, а також аналізу того, як аварійна ситуація шириться мікромережею, та тиску на електричні компоненти, що виникає в результаті цього.

Аналіз визначає області, у яких струми короткого замикання перевищують номінальні характеристики обладнання та становлять загрозу безпеці. Потім обираються відповідні захисні пристрої та параметри координації для пом'якшення впливу цих замикань та мінімізації пошкодження та перебоїв. Стратегії усунення пошкоджень

розробляються для підвищення загальної безпеки й надійності мікромережі в умовах несправності й призначені для швидкої локалізації пошкоджень, мінімізації їх впливу, а також швидкого й безпечного відновлення нормальної роботи.

Координація захисту забезпечує належну координацію системи захисту мікромережі з урахуванням динамічної інтеграції РДЕ, зміни напрямків перетікань електроенергії та потенційних змін конфігурації меж мікромережі. Це передбачає аналіз наявних налаштувань захисту та таких пристроїв, як реле, автоматичні вимикачі й запобіжники, для оцінювання їх ефективності за різних сценаріїв роботи, зокрема інтеграції РДЕ, які можуть змінювати струми короткого замикання й потік електроенергії. Інструменти моделювання дають змогу змодельовати різні сценарії поточкорозподілу, зокрема зворотні перетікання електроенергії та вплив зміни конфігурації мікромережі на налаштування захисту. Цей аналіз поширюється на такі типи РДЕ, як сонячні ФЕ установки, дизельні генератори, газові турбіни й системи зберігання енергії. Підготовка координаційного плану для всіх захисних пристроїв забезпечує їхню роботу в правильній послідовності, мінімізацію зони відключення й захист обладнання. Застосування такого програмного забезпечення, як DlgSILENT PowerFactory, автоматизує обчислення параметрів і налаштувань, забезпечуючи оптимальну координацію за всіх сценаріїв.

Модель поточкорозподілу в електричних системах слід використовувати в ході кількох різних аналізів. Зокрема, цю модель слід використовувати для виконання паралельних досліджень захисту. У цьому випадку слово «паралельний» означає необхідність проведення двох повних досліджень координації захисних пристроїв: одне в режимі підключення до мережі, інше – в острівному режимі. Такі паралельні дослідження захисту слід використовувати для визначення нових налаштувань захисних реле системи розподілу й захисних пристроїв.

Аналіз стабільності напруги є допоміжним компонентом для визначення здатності мікромережі підтримувати стабільні рівні напруги за різних умов експлуатації. Проведення цього аналізу забезпечує здатність мікромережі витримувати раптові зміни навантаження або генерації без падінь напруги або значних її коливань, що є зокрема важливим з огляду на унікальні конфігурації й велику частку відновлюваних джерел енергії в мікромережах.

Основною метою аналізу стабільності напруги є підтвердження здатності мікромережі підтримувати стабільні рівні напруги за різних сценаріїв. Це означає як стаціонарні, так і динамічні умови, з наголосом насамперед на переходах від режиму підключення до мережі до острівного режиму й навпаки. Такі переходи є критично важливими, оскільки вони можуть спричинити значні коливання рівнів напруги.

Для досягнення поставлених цілей визначаються і моделюються сценарії з потенційними проблемами щодо стабільності напруги, як-от раптові масштабні відключення РДЕ або різкі зміни навантаження. У цих моделюваннях використовуються такі передові інструменти як DlgSILENT PowerFactory для аналізу реагування мікромережі на відповідні умови, визначення в мережі зон, вразливих до нестабільності напруги, наприклад, вузлів зі слабкими зв'язками або зон, віддалених від джерел генерації.

Крім того, підлягає оцінюванню вплив інтеграції нових РДЕ на стабільність напруги, щоб визначити, наскільки ці ресурси посилюють або знижують потенційну нестабільність. Предметом аналізу є конкретні характеристики та вплив на стабільність напруги в мікромережі різних ДРЕ, як-от сонячні ФЕ установки, дизельні генератори, газові генератори й системи зберігання енергії.

Оцінка динамічної стабільності є важливою для оцінювання стабільності генераторів під час реагування на коливання генерації або навантаження в енергосистемі. Цей аналіз набуває особливої важливості в контексті планування мікромережі з двох основних причин. По-перше, будь-які зміни в навантаженні або генерації в мікромережі можуть стосуватися значної частини потужності генератора мікромережі. Це означає, що навіть невеликі коливання можуть мати суттєвий вплив. По-друге, у мікромережі принаймні один генератор повинен регулювати напругу й частоту – цю роль зазвичай виконує комунальне підприємство в режимі підключення до мережі. Ця вимога визначає критичну важливість аналізу динамічної стабільності для належного вибору параметрів засобів управління генератором.

Основним аспектом цього аналізу є моніторинг динаміки кута вильоту ротора поміж генераторами мікромережі. Важливо переконатися, що ці кути вильоту ротора залишаються стабільними, інакше робота генераторів може стати нестабільною, а генератори можуть від'єднатися від системи, що призведе до потенційних перебоїв в електропостачанні. Проведення ретельного аналізу динамічної стабільності дає планувальникам змогу визначити й зменшувати ризики, підвищувати надійність та ефективність роботи мікромережі за різних умов експлуатації.

Для розроблення мікромережі обов'язковим є застосування комплексного підходу до аналізу й моделювання мережі. Цей процес – від збору детальних даних до комплексного аналізу – дає змогу визначити оптимальний дизайн і стратегії експлуатації. Досконально зрозумівши поведінку мікромережі за різних умов, розробники можуть забезпечити не лише ефективність та сталість остаточної системи, але і її надійність та здатність гарантувати надійне живлення як у нормальних умовах, так і в умовах збоїв.

8. ХАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМ ТЕЛЕМЕТРІЇ/ТЕЛЕКЕРУВАННЯ ТА СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ МІКРОМЕРЕЖАМИ

8.1. АСПЕКТИ ДИЗАЙНУ, ПОВ'ЯЗАНІ З ПИТАННЯМИ ТЕЛЕМЕТРІЇ ТА ТЕЛЕКЕРУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖЕЮ

Розроблення ефективної системи телеметрії та телекерування для мікромережі важливе в контексті належної спостережуваності/керуваності, експлуатаційної надійності та підвищення здатності системи до реагування. Системи телеметрії та телекерування дозволяють здійснювати збір даних у режимі реального часу, здійснювати моніторинг і керування різними компонентами мікромережі, сприяють динамічному оперативному ухваленню рішень. Завдяки запровадженню комплексних механізмів моніторингу й контролю мікромережа може забезпечити оптимальну роботу та підвищену відмовостійкість системи, а також покращити інтеграцію РДЕ.

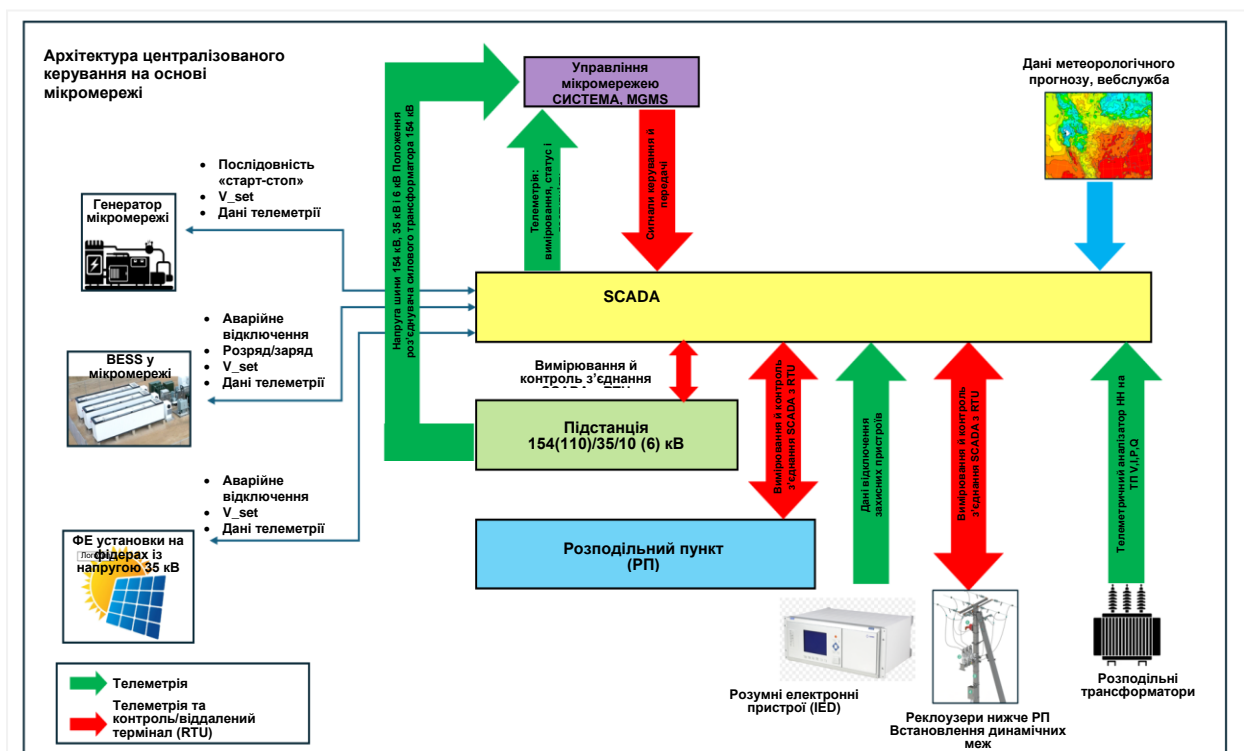


Рисунок 5. Приклад топології рішення для телеметрії/телекерування мікромережею

Моніторинг і контроль головного фідера. Забезпечення ефективного розподілу електроенергії та підтримання спостережуваності й керуваності роботи мікромережі мають важливе значення. Запровадження надійних механізмів моніторингу й контролю для головних фідерів передбачає розгортання датчиків і пристроїв керування, здатних здійснювати збір даних і керувати діями в реальному часі. Ці механізми надають важливу інформацію про потоки електроенергії, забезпечуючи точне керування розподілом електроенергії в мікромережі. Ведучи постійне спостереження за головними фідерами, оператори можуть швидко виявляти будь-які відхилення й реагувати на них, забезпечуючи стабільність і надійність роботи мікромережі.

Моніторинг і контроль комутаційної станції. Підтримання експлуатаційної надійності та підвищення здатності системи до реагування потребує застосування передових

систем моніторингу й контролю на комутаційних станціях. Ці системи відстежують стан і роботу комутаційних пристроїв, дозволяючи швидко втручатися в їхню роботу в разі несправностей або експлуатаційних змін. Впроваджуючи розумні електронні пристрої та системи SCADA, оператори можуть реалізовувати команди управління у віддаленому режимі, оптимізуючи потік електроенергії й підтримуючи стабільність системи. Ефективний моніторинг на комутаційних станціях також дозволяє проводити профілактичне обслуговування, зменшуючи ризик неочікуваних відмов.

Додавання нових точок перемикання. Підвищення гнучкості й відмовостійкості мікромережі передбачає впровадження нових точок перемикання, як-от реклоузерів або додаткових комутаційних підстанцій. Ці нові точки підвищують здатність мікромережі до самостійної зміни конфігурації у відповідь на аварійні ситуації або потреби в технічному обслуговуванні. Таке стратегічне доповнення забезпечує більшу гнучкість в управлінні потоками електроенергії та ізоляції ділянок мережі для технічного обслуговування, не порушуючи загальну роботу. У такий спосіб гарантується можливість адаптації мікромережі до мінливих умов і підтримання високого рівня надійності та відмовостійкості.

Рішення щодо моніторингу для трансформаторів СН/НН та точок навантаження. Оптимізація роботи й можливість раннього виявлення потенційних проблем забезпечуються шляхом розгортання комплексних рішень із моніторингу роботи трансформаторів СН і НН та точок навантаження. Ці рішення включають встановлення датчиків і систем збору даних, які відстежують такі ключові показники ефективності, як напруга, струм і температура. Постійне відстежування цих параметрів дозволяє операторам виявляти й розв'язувати проблеми до їх загострення, водночас забезпечуючи оптимальну роботу і продовжуючи строк служби критично важливого обладнання.

Телеметрія й телекерування на об'єктах РДЕ. Полегшення безперешкодної інтеграції об'єктів РДЕ зі SCADA/системою управління мікромережею (MGMS) має важливе значення для ефективного управління мікромережею. Це передбачає встановлення пристроїв зв'язку й систем керування, що забезпечують обмін даними в режимі реального часу та дистанційне керування РДЕ. Завдяки інтеграції ділянок РДЕ в структуру SCADA/MGMS оператори можуть ефективніше керувати відновлюваними джерелами енергії та системами зберігання, а також оптимізувати свій внесок у загальне виробництво енергії з різних джерел та підвищення стабільності мережі.

Рішення з інтеграції SCADA: ключовим питанням є забезпечення надійної інтеграції системи автоматизації мережі зі SCADA. Серед можливих варіантів – використання контролерів підстанцій, віддалених терміналів (RTU), міні-RTU, пристроїв приймання-передавання даних (DTU), перетворювачів протоколів і базових засобів віддаленого зняття показань (лічильників AMR). Ці технології забезпечують комплексний збір даних і контроль в усій мікромережі, що дозволяє інтегрувати всі компоненти в єдину систему управління. Безпроблемна інтеграція цих пристроїв забезпечує ефективну роботу мікромережі та оперативне реагування на вимоги експлуатації.

Схема захисту. Мікромережі зазвичай запроваджують у розподільних мережах, які мають радіальну топологію або працюють у радіально-сітчастій структурі. Схема захисту розподільної мережі переважно ґрунтується на захисті від надструмів, причому налаштування сильно залежать від живлення мережі в точці міжфазного зв'язку. При

переході до острівної системи мікромережі можливим є значне зміщення струму замикання через відокремлення від мережі. Нові схеми захисту повинні бути проаналізовані та перевірені, щоб забезпечити відповідність наявних реле новій конфігурації мікромережі, зокрема під час генерації малих об'ємів.

Важливими етапами є повторний розрахунок струмів короткого замикання й налаштування реле захисту, якщо вони мають функцію зміни налаштувань відповідно до режиму експлуатації. В автономних мікромережах ступінчасті зміни навантаження спричиняють слабшу реакцію порівняно з режимом централізованого електропостачання, що вимагає зміни розмірів захисних зон для роботи в умовах невеликих втрат навантаження у випадках несправності фідера. Сильно навантажені фідери можуть потребувати використання реклоузерів або вимикачів, щоб запобігти одночасній втраті всіх навантажень фідера.

Якщо встановлено будь-який захист у вигляді автоматичного частотного розвантаження, його необхідно налаштувати або вимкнути, щоб забезпечити ширший діапазон частоти в мікромережі під час перехідних процесів або змін навантаження. Параметри захисту від перевантажень за напругою також необхідно перевірити й налаштувати таким чином, щоб вони відповідали ширшим коливанням напруги, які є типовими для мікромережі. Встановлення нових розумних електронних пристроїв і реле, здатних працювати як у режимі мікромережі, так і в режимі централізованого електропостачання, дає переваги, тому що дозволяє встановлювати декілька налаштувань щодо перевантаження за струмом, які можна динамічно змінювати на основі команд, які надходять із MGMS. Крім того, для забезпечення безпечних сценаріїв роботи в режимі двостороннього живлення вирішальне значення мають питання блокування перемикачів зсунутих за фазою струмів.

8.2. СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОМЕРЕЖЕЮ ТА ЇЇ ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ

Мікромережа – це сукупність взаємопов'язаних навантажень і РДЕ, окреслених чіткими електричними межами. Вона функціонує як уніфікований і контрольований об'єкт у межах великої електричної мережі. Мікромережа має здатність бути підключеною до основної мережі або від'єднаною від неї. Це полегшує її роботу як у режимі підключення до мережі, так і в острівному режимі. На наведеному нижче рисунку представлено загальну схему мікромережі та її компонентів. Деякі, проте не всі ресурси, включаються до всіх видів дизайну мікромереж.

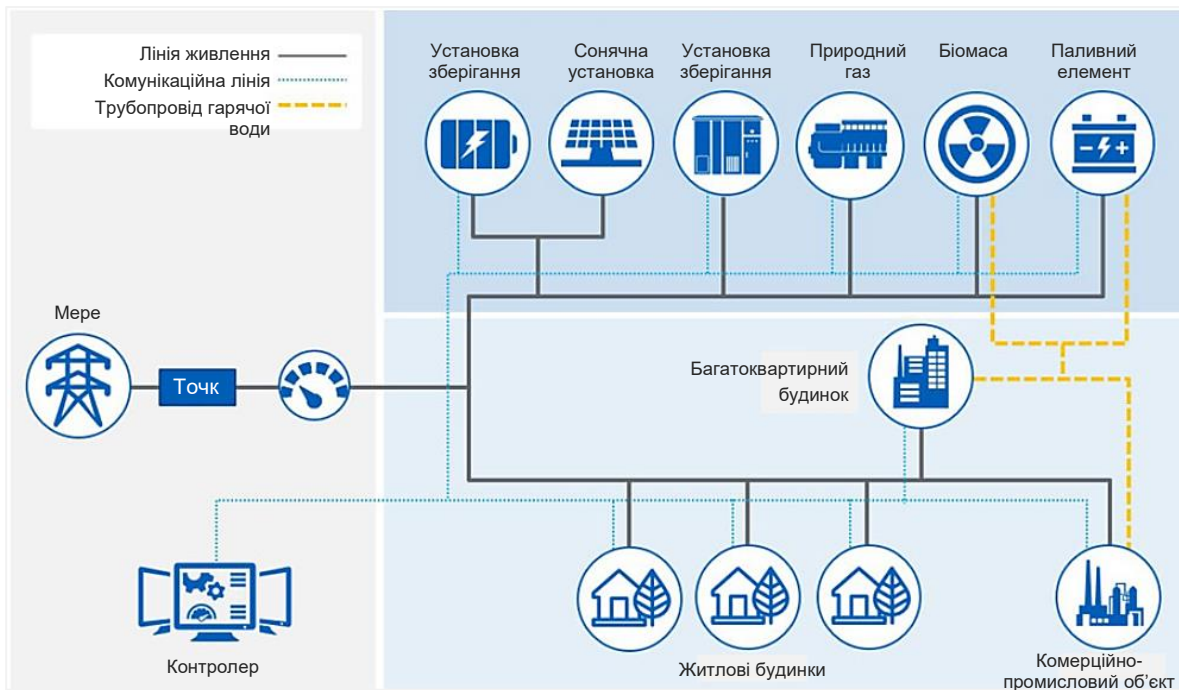


Рисунок 6. Системне рішення для управління мікромережею¹

Централізоване управління мікромережею здійснюється за допомогою MGMS і SCADA, у межах яких здійснюється весь процес ухвалення рішень з управління. MGMS зв'язується з головним терміналом SCADA для отримання всіх телеметричних і прогнозних даних. Однак, щоб уникнути помилкового перемикавання або помилкової синхронізації генератора електроенергії, MGMS вимірює стан напруги високовольтної системи й напруги розподілу на головній підстанції та положення перемикача силового трансформатора (якщо високовольтна/середньовольтна підстанція є частиною проекту).

Усі ці умови підлягають перевірці перед переходом до режиму мікромережі.

- Послідовність пуску. Система мікромережі працює в режимі готовності за нормальних умов роботи мережі. Телеметричні функції працюють у режимі онлайн, але всі функції автономного перемикавання мають бути деактивовані. Команди на виконання оператором запланованих дій з управління можуть передаватися через людино-машинний інтерфейс SCADA. Для запуску роботи мікромережі відокремлення мікромережі від головної мережі є основною умовою в контексті послідовності ввімкнення. Онлайн-переходу до мікромережі або паралельної роботи мережі не передбачено. Запуск мікромережі пов'язаний з відключенням електроенергії на підстанції й активацією вимикачів трансформатора.
- Область динамічної межі. Динамічна межа підлягає класифікації для забезпечення критичного, менш критичного й некритичного навантаження. MGMS отримує топологічний статус прогнозу загального навантаження мережі, прогнозу ФЕ-генерації та стану BESS, які обробляються в SCADA. Очікується, що прогноз навантаження та прогноз ФЕ-генерації буде виконуватися в SCADA. Динамічну

¹ [Microgrid Solutions \(gegridsolutions.com\)](http://Microgrid Solutions (gegridsolutions.com))

межу й операційний режим роботи визначатиме MGMS. Команди про зміну меж надходять від MGMS до SCADA.

- Керування ФЕ-генерацією за допомогою BESS. Прогноз навантаження й ФЕ-генерації виконується в SCADA і вводиться в MGMS, яка розраховує, чи потрібно перервати роботу ФЕ-модулів, або розраховує стан заряду/розряду BESS.

MGMS являє собою складне поєднання механізмів управління, програмних засобів і протоколів, призначених для якомога кращого використання можливостей сучасних мікромереж. Вона виступає мозковим центром, який керує роботою різних компонентів і енергетичних ресурсів для забезпечення безперервної роботи. Більш детальний аналіз його структури й можливостей наведено нижче.

Архітектура та функції системи. MGMS функціонує на основі багаторівневої архітектури, яка поєднує збір даних у режимі реального часу, розширену аналітику, алгоритми управління та інтерактивні інтерфейси, що взаємодіють із людиною. Модульна конструкція системи забезпечує масштабованість та адаптивність, надаючи широкий спектр функціональних можливостей для ефективного управління мікромережами.

Управління мікромережею полегшується завдяки ефективному інструменту MGMS. Завданням MGMS є нагляд за роботою мікромережі як в острівному режимі, так і в режимі підключення до мережі. Вона включає різні функціональні можливості, що мають вирішальне значення для забезпечення оптимальної роботи й стабільності мікромережі. У цьому дослідженні ми розглянемо такі елементи та функції MGMS:

- Модуль керування й оптимізації
- Модуль управління енергоспоживанням
- Модуль розширеного захисту та відмовостійкості
- Людино-машинний інтерфейс і візуалізація
- Послідовність пуску з нуля
- Управління ФЕ-установками
- Керування BESS
- Керування генераторною установкою
- Керування навантаженням

Модуль керування й оптимізації. Цей модуль є мозком MGMS, він поєднує передові алгоритми прогнозного управління для передбачення майбутніх умов і відповідної оптимізації операцій. Він використовує складні математичні моделі для моделювання різних сценаріїв, включно з прогнозами генерації електроенергії з відновлюваних джерел, прогнозами навантаження й ринковими індикаторами. Алгоритми оптимізації працюють над мінімізацією операційних витрат за умови дотримання певних обмежень, як-от строк служби акумуляторів, теплові обмеження обладнання й

нормативні вимоги. Стратегії управління, які впливають із цих алгоритмів, виконуються в режимі реального часу, забезпечуючи найбільш ефективний розподіл енергоресурсів.

Модуль управління енергоспоживанням. Цей сегмент MGMS виконує постійне балансування виробництва та попиту, залучаючи розподілені джерела енергії до гармонійного управління на стороні генерування. Він включає такі функції, як моніторинг потоків енергії в режимі реального часу, управління станом заряду акумуляторів і можливості управління попитом. Він також може динамічно підлаштовуватися під мінливі умови, як-от раптові падіння або сплески навантаження, змінюючи потужність генерації чи швидкість розряду акумуляторів. Інтелектуальна конструкція цього модуля забезпечує інтеграцію нестабільних відновлюваних ресурсів з одночасним підтриманням якості й надійності електроенергії.

Модуль розширеного захисту та відмовостійкості. У цьому модулі наголос робиться на питаннях безпеки. Він призначений для підвищення здатності мікромережі протистояти перебоям у роботі та швидко відновлюватися після них. Він інтегрує механізми виявлення, ізоляції й відновлення несправностей, які використовують високошвидкісний зв'язок для майже миттєвої локалізації несправностей. Цей модуль також використовує багаторівневі стратегії захисту від кіберзагроз, зокрема шифрування, системи виявлення вторгнень і постійний моніторинг аномалій у структурі даних, які можуть свідчити про кібератаки.

Людино-машинний інтерфейс і візуалізація. Цей модуль надає операторам вичерпну інформацію про ситуацію за допомогою візуалізації в реальному часі, інформаційних панелей та інтерфейсів управління. Він перетворює складні дані й інформацію діагностики системи на інтуїтивно зрозумілі графічні зображення, що дає змогу легко інтерпретувати їх і швидко ухвалювати рішення. Людино-машинний інтерфейс розроблено з метою ергономічної взаємодії. Він надає можливість персоналізованої візуалізації відповідно до різних робочих ролей і вподобань.

Послідовність пуску з нуля. Можливість запуску з нуля – це здатність мікромережі, що працює автономно, без підключення до мережі, відновлювати генерацію електроенергії та поступово відновлювати енергопостачання в умовах відсутності зв'язку з мережею. У таких сценаріях функція пуску з нуля залежить від первинного джерела енергії на кшталт мережевого інвертора (у разі наявності) або генератора з ізохронним регулюванням частоти обертання.

У системі MGMS передбачено спеціальні операції логіки управління для легшого відновлення електропостачання:

- Початкові кроки контролю для оцінювання електричного стану й позиціонування
- Активація первинного джерела енергії (наприклад, електрогенератора)
- Увімкнення живлення основної електричної шини після стабілізації первинного джерела
- Систематичне послідовне підключення навантажень на основі заздалегідь визначених рівнів пріоритету

Управління ФЕ-установками. Управління ФЕ-установками передбачає регулювання виробництва фотоелектричної енергії в мікромережі. MGMS контролює виробництво ФЕ-енергії, обмежуючи її виробництво в певних ситуаціях, як-от нестабільність через надмірну вихідну потужність, необхідність запобігти подачі електроенергії в мережу або проблеми з живленням спаду генерації. Для забезпечення безпечної експлуатації механізм відключення, показаний на *Рисунок 7*, може бути прийнятий як запобіжний захід.

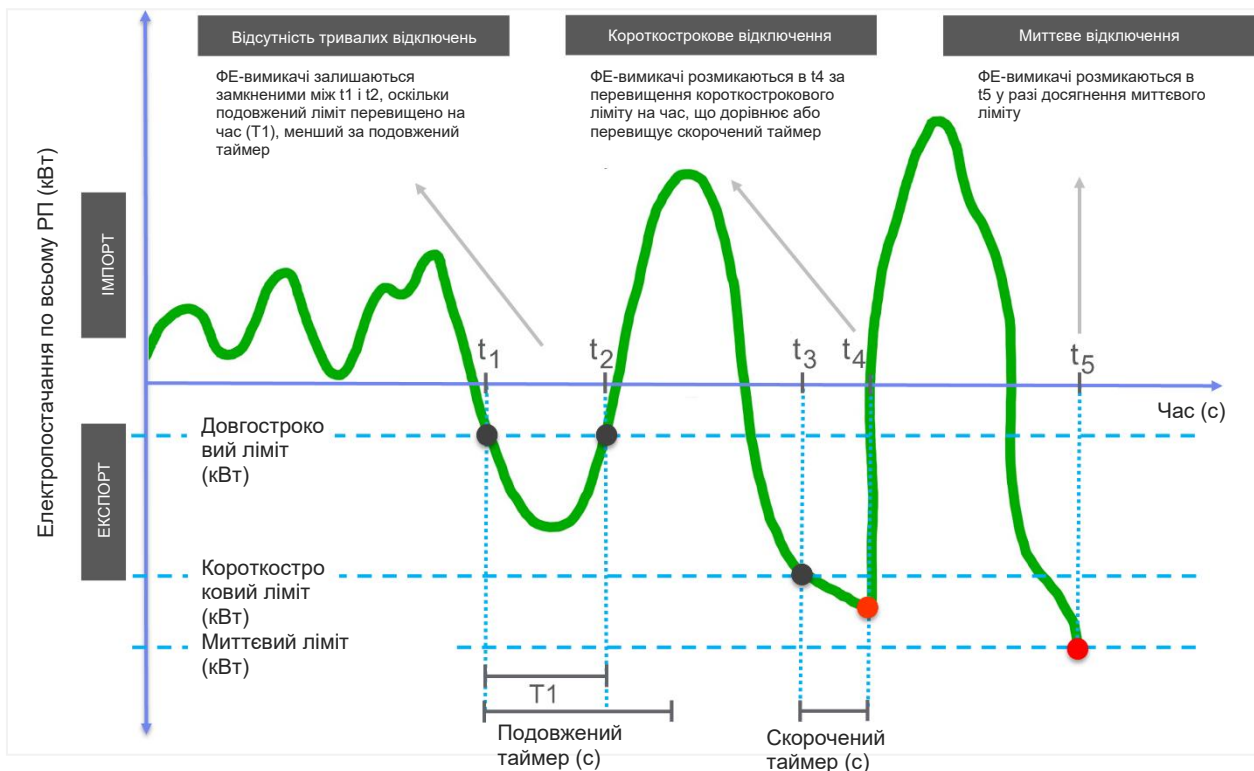


Рисунок 7. Керування ФЕ-установками²

Цей механізм має можливість активувати ФЕ-вимикачі в разі будь-яких проблем у плані скорочення ФЕ-потужностей. Він працює на основі трьох порогових значень і пов'язаних із ними таймерів (довгострокового, короткострокового, миттєвого). Він застосовується по відношенню як до енергії електропостачання, так і до енергії живлення спаду генерації, де термін «енергія» означає енергію електропостачання (наприклад, генеровану енергію) через розподільний пристрій, а також енергію живлення спаду генерації.

Тривале відключення:

- Якщо значення потужності падає в діапазон між довгостроковим (кВт) і короткостроковим (кВт) лімітом протягом часу, коротшого за подовжений таймер (с), ФЕ-вимикачі залишаються замкненими.

² Керування живленням в умовах острівного режиму – 0100DB2302 Керівництво з проєктування мікромереж Microgrid Flex (schneider-electric.com)

- Якщо значення потужності падає в діапазон між довгостроковим лімітом (кВт) і короткостроковим лімітом (кВт) протягом часу, що дорівнює або перевищує подовжений таймер (с), ФЕ-вимикачі поступово розмикаються.

Короткострокове відключення:

- Якщо значення потужності падає в діапазон між короткостроковим (кВт) і миттєвим лімітом (кВт) протягом часу, коротшого за подовжений таймер (с), ФЕ-вимикачі залишаються замкненими.
- Якщо значення потужності падає в діапазон між короткостроковим (кВт) і миттєвим лімітом (кВт) протягом часу, що дорівнює або перевищує час скороченого таймера (с), ФЕ-вимикачі поступово розмикаються.

Миттєве відключення:

Якщо значення потужності перевищує миттєвий ліміт (кВт), ФЕ-вимикачі поступово розмикаються.

Якщо параметри налаштовані непослідовно, MGMS подасть сигнал попередження з дотриманням такої ієрархії:

- Довга межа (кВ) > коротка межа (кВ) > миттєва межа (кВ)
- Подовжений таймер (с) < скорочений таймер (с)

Раптова поява або зникнення джерел має миттєвий вплив на генерацію ФЕ-енергії, зумовлюючи стрімкі коливання. Такі коливання можуть спричинити порушення стабільності, особливо під час роботи в острівному режимі. Наприклад, раптовий перепад вихідної потужності ФЕ-установки може призвести до небажаного зворотного живлення генераторної установки. Отже, MGMS послідовно регулює виробництво сонячної енергії, обмежуючи різке зростання і поступово збільшуючи рівні потужності ФЕ, щоб запобігти стрибкам частоти.

Управління BESS в умовах низького рівня заряду. Нижче наведено перелік стратегій, застосовних до систем, які оснащено BESS і ФЕ-установками.

Метод 1. Скидання навантаження й експлуатація BESS

За тих сценаріїв, де BESS працює на низькому рівні заряду, а присутність сонячних ФЕ-станцій обмежена або вони відсутні, потужності для підтримання мережі зі стабільною напругою і частотою може бути недостатньо. У таких випадках MGMS дасть команду від'єднати навантаження, до того, як BESS досягне свого мінімального стану заряду, у той час, як BESS залишається в режимі формування мережі й може заряджатися від ФЕ-генерації. Щойно стан заряду BESS перевищить заздалегідь визначений поріг, функція керування навантаженням автоматично перепід'єднає всі навантаження.

Метод 2. Гібернація BESS і перезавантаження в ручному режимі

У ситуаціях, коли BESS працює на низькому рівні заряду, а присутність сонячних ФЕ-модулів обмежена чи вони відсутні, потужності для підтримки мережі зі стабільною напругою й частотою може бути недостатньо. За цього сценарію MGMS видасть команду на повне вимкнення системи. Це передбачає переведення BESS в автономний режим і відключення всіх навантажень, до того, як SoC BESS досягне мінімального рівня. Коли сонячна ФЕ-енергія знову стане доступною, мікромережу можна буде перезапустити в один із таких способів:

- Вручну оператором за умови виробництва сонячної енергії
- Автоматично через MGMS після відновлення програми

Керування генераторною установкою. Коли генераторна установка функціонує як опорний ресурс, вона працює незалежно від команд диспетчера. Тому вихідна активна потужність генераторної установки залежить від характеристик навантажень і локальних ресурсів, під'єднаних до шини. Єдиним ефективним способом контролювати вихідну активну потужність генераторної установки в заздалегідь визначених межах є управління навантаженням і локальними ресурсами. У цьому контексті MGMS регулює роботу генераторної установки в межах максимальної допустимої потужності, керуючи BESS та ФЕ установками та/або скидаючи певні навантаження. Приклад цього сценарію проілюстровано на *Рисунок 8*, згідно з яким потужність фотоелектричних установок зменшується, щоб забезпечити роботу генераторної установки вище мінімально допустимого рівня.

MGMS забезпечує скоординовану роботу як фотоелектричних модулів, так і BESS із генерувальною установкою, що слугує енергоутворювальним ресурсом. Така інтеграція допомагає зменшити споживання пального та викиди вуглекислого газу (CO₂). У випадках, коли BESS розряджена або фотоелектрична генерація недостатня, споживачі можуть використовувати мобільну генераторну установку для аварійних навантажень.

Керування навантаженням. Під час роботи поза мережею мікромережа може увійти в стан дисбалансу, коли загальне навантаження перевищує максимально доступну потужність. Цей дисбаланс може призвести до потенційних перевантажень на решту РДЕ, що своєю чергою може призвести до повного порушення роботи мікромережі.

В автономних сценаріях MGMS бере на себе відповідальність за підтримання загальної стабільності системи. Залежно від стану системи, він може видавати команди на скидання навантаження для підтримки стабільності системи. Крім того, MGMS автоматично відновлює навантаження, коли це можливо.

Коли вихідна потужність опорного ресурсу (наприклад, генераторної установки або BESS) досягає дуже високого рівня, що наближається до його номінальної потужності, MGMS ініціює поступове скидання навантаження.

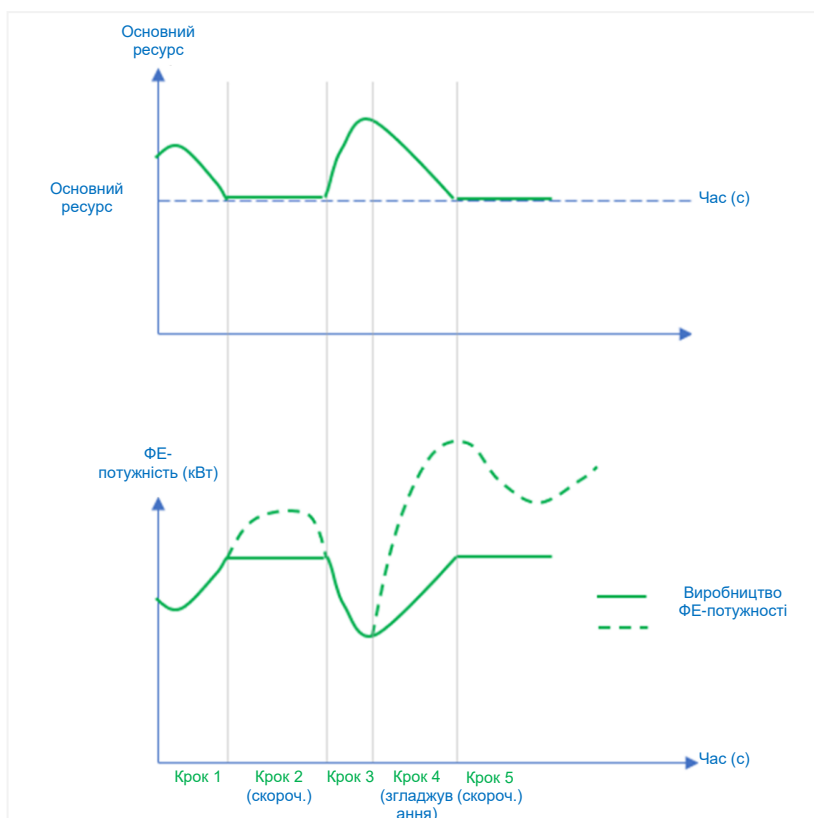


Рисунок 8. Керування генераторною установкою³

Скидання навантаження залежно від потужності

Ця дія має на меті запобігти зменшенню резервної норми. Ця функціональність проілюстрована на Рисунок 9 нижче для утримання зарезервованої потужності в межах прийнятної запасу, що передбачає такі три кроки:

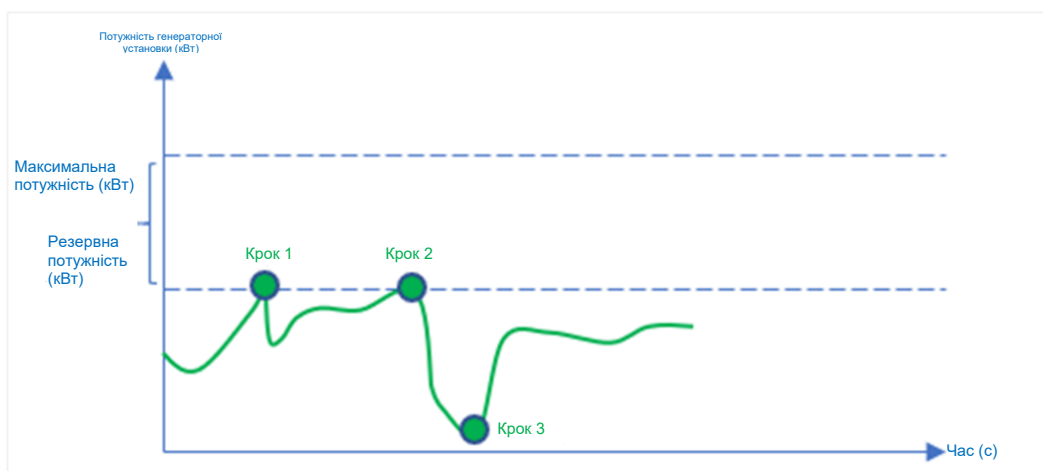


Рисунок 9. Скидання навантаження залежно від потужності

³ Керування живленням в умовах острівного режиму – 0100DB2302 Керівництво з проєктування мікромереж Microgrid Flex (schneider-electric.com)

- Крок 1. Якщо зарезервована потужність генераторної установки зменшується до рівня, який вважається занадто малим, активується MGMS і відключається навантаження з найнижчим пріоритетом.
- Крок 2. Див. крок 1.
- Крок 3. Коли зарезервована потужність генераторної установки перевищує поріг, який вважається надмірним, MGMS автоматично перепід'єднає найбільш пріоритетне навантаження.

Скидання/підключення навантаження на основі енергії

Коли рівень заряду акумуляторної батареї падає до низького рівня, MGMS застосовує системний підхід до управління навантаженням. Спочатку він скидає всі несуттєві навантаження, щоб полегшити роботу BESS. Якщо рівня заряду все ще недостатньо, MGMS переходить до скидання основних навантажень. Зрештою, якщо заряд досягає мінімально допустимого рівня (SoC_min), усі навантаження скидаються. Варто зазначити, що пріоритети навантаження можна регулювати за допомогою локального людино-машинного інтерфейсу.

У випадках, коли BESS виконує роль основного або опорного ресурсу, за умови, що її обортовий резерв вважається достатнім, а рівень заряду перевищує попередньо визначений поріг, MGMS починає послідовно перепідключати навантаження. MGMS вводить регульовану затримку між двома послідовними перепідключеннями навантаження.

Описаний вище механізм скидання/підключення навантаження зображено на *Рисунок 10* нижче, на якому детально пояснюються наступні кроки.

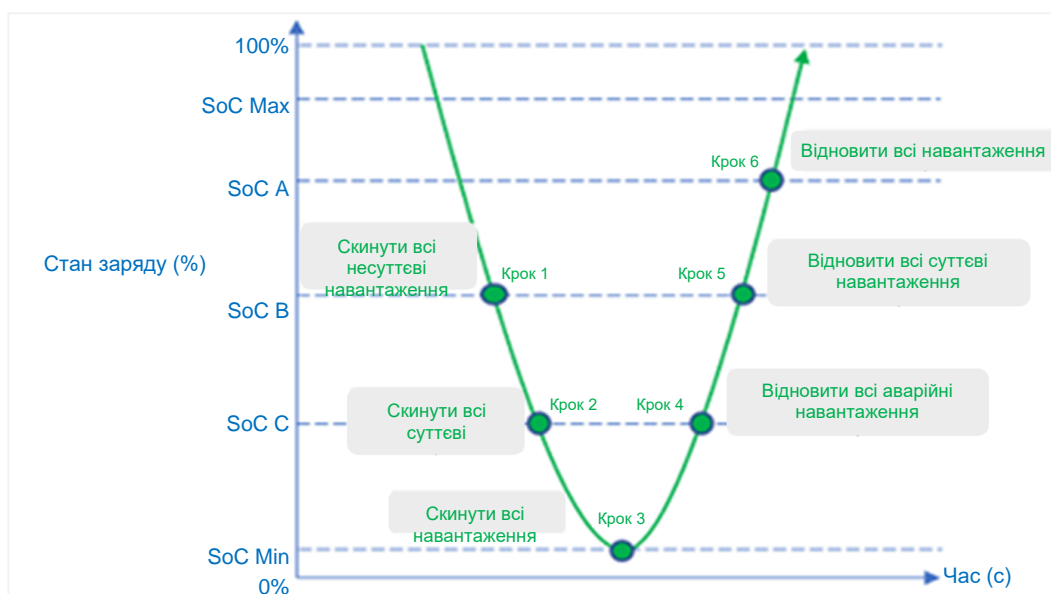


Рисунок 10. Скидання/поновлення навантаження залежно від потужності

- Крок 1. Якщо $SoC < SoC_{Essential}$ і досягає SoC_B , MGMS скидає всі другорядні навантаження.
- Крок 2. Якщо $SoC < SoC_{Emergency}$ і досягає SoC_C , MGMS скидає всі суттєві навантаження.
- Крок 3. Якщо $SoC < SoC_{min}$, MGMS скидає всі навантаження.
- Крок 4. Якщо $SoC > SoC_{min}$ і досягає SoC_C , MGMS відновлює всі аварійні навантаження по черзі, якщо дозволяє резерв обертання BESS.
- Крок 5. Якщо $SoC > SoC_{Emergency}$ навантаження й досягає SoC_B , MGMS відновлює всі суттєві навантаження по черзі, якщо дозволяє резерв обертання BESS.
- Крок 6. Якщо $SoC > SoC_{Essential}$ навантаження й досягає SoC_A , MGMS відновлює всі навантаження по черзі, якщо дозволяє резерв обертання BESS.

8.3. КРОКИ З ПРОЄКТУВАННЯ ТЕЛЕМЕТРІЇ/ТЕЛЕКЕРУВАННЯ

Крок 1. Проєктування MGMS, інтегрованої зі SCADA.

- Процес починається з визначення функціональних вимог до MGMS з акцентом на комунікації, контролі та оптимізації. Детальний аналіз екосистеми мікромережі визначає ключові компоненти та взаємозалежність між ними, закладаючи основу для дизайн-проєкту архітектури MGMS, яка включає передові методи зв'язку й керування.
- Важливою частиною цього кроку є оцінювання наявної розподільчої системи SCADA, щоб визначити, чи можлива її інтеграція з MGMS, або ж необхідно розробити й отримати нове комбіноване рішення, що включає SCADA та MGMS. Таке оцінювання забезпечує не лише надійність архітектури системи, але і її сумісність із наявною інфраструктурою, що має результатом спрощення процесу її інтеграції й розгортання.
- Необхідно розробити дизайн-проєкт архітектури MGMS, який включає передові методи зв'язку, контролю та оптимізації.
- Далі розробник завершує проєктування та готує технічні специфікації для її реалізації.

Крок 2. Проєктування пунктів телеметрії та телекерування

- Моніторинг і контроль головного фідера. Встановлюються механізми моніторингу й контролю головних фідерів, щоб забезпечити ефективний розподіл електроенергії та можливість спостережності/контролю операцій у мікромережі.
- Моніторинг і контроль комутаційних підстанцій. Розширені системи моніторингу й контролю на комутаційних підстанціях мають вирішальне значення для підтримки експлуатаційної надійності та підвищення здатності мікромережі до реагування.
- Додавання нових точок перемикачів. Вважається, що нові точки перемикачів, які потенційно включають реклоузери й нові комутаційні підстанції, підвищують гнучкість і відмовостійкість мікромережі.

- Рішення з моніторингу для трансформаторів СН/НН та точок навантаження. Вони мають вирішальне значення для оптимізації роботи й раннього виявлення потенційних проблем, що сприяє загальній стабільності мікромережі.
- Телеметрія та телекерування на об'єктах РДЕ. Розширення цих можливостей на об'єктах РДЕ полегшує їх безпроблемну інтеграцію з SCADA/MGMS і покращує керованість мікромережі.
- Рішення з інтеграції SCADA. Для інтеграції автоматизації мікромережі в SCADA обираються відповідні технології; вони можуть включати, наприклад, контролери підстанцій, RTU, DTU/перетворювачі протоколів, а також базові засоби віддаленого зняття показань (лічильники AMR).
- Рішення для зв'язку. Розробляється комунікаційна структура насамперед на основі радіочастотної (РЧ) технології зі стільниковим резервним копіюванням, щоб забезпечити надійну передачу даних і надійний контроль у всіх точках телекерування мікромережею.

8.4. ПРОЄКТУВАННЯ КОМУНІКАЦІЙНОЇ АРХІТЕКТУРИ ДЛЯ ТЕЛЕМЕТРІЇ/ТЕЛЕКЕРУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖЕЮ

Надійна та ефективна комунікаційна архітектура має важливе значення для ефективної роботи мікромереж, оскільки вона полегшує телеметрію в реальному часі та телекерування різними компонентами. Далі розглядаються принципи проєктування й ключові характеристики ідеальної комунікаційної архітектури для мікромереж.

Інтеграція оптоволоконних, радіочастотних і стільникових технологій.

Рекомендується інтеграція кількох технологій, зокрема оптоволоконних, радіочастотних і стільникових, для забезпечення швидкого й надійного обміну даними між усіма вузлами мікромережі.

- **Оптоволоконно.** Воно забезпечує високу швидкість передачі даних великої ємності з мінімальною затримкою, що робить його ідеальним для критичного обміну даними між центральними блоками керування й основними компонентами, як-от джерела електроенергії та підстанції. Використання наявних оптоволоконних ниток у поточних кабелях або встановлення нових оптоволоконних кабелів у запасних каналах може бути економічно ефективною стратегією.
- **Радіочастота.** РЧ-зв'язок використовують як бездротовий зв'язок у місцях, де прокладання оптоволоконна є недоцільним. РЧ-зв'язок підтримує передачу даних на помірній швидкості й може покривати великі території, що робить його придатним для дистанційного моніторингу та контролю РДЕ.
- **Стільникові технології.** Стільникові мережі пропонують гнучкі та здатні до масштабування комунікаційні рішення, особливо корисні для мобільних або тимчасових установок. Ці мережі забезпечують надійне з'єднання для віддалених об'єктів і передачу даних навіть у місцях, де немає іншої інфраструктури.

Механізми резервування й відновлення після збоїв. Для підтримання безперебійної роботи навіть у разі перебоїв у роботі мережі до структури комунікацій необхідно включити механізми резервування й відновлення після збоїв. Цим

забезпечується збереження робочого стану критичних каналів зв'язку та можливість продовження ефективного функціонування мікромережі за несприятливих умов.

- Резервні канали зв'язку. Встановлення кількох каналів зв'язку для ключових з'єднань дозволяє перенаправляти дані в разі збою в основному каналі.
- Протоколи перемикавання в разі відмови. Рекомендується застосовувати протоколи автоматичного перемикавання в разі відмови для виявлення збоїв у системах зв'язку та перемикавання на резервні системи без людського втручання з мінімізацією часу простою та підтриманням безперервності роботи.

Підтримання централізованих і розподілених стратегій управління. Структура мережі повинна забезпечувати реалізацію стратегій як централізованого, так і розподіленого управління для оптимізації роботи мікромережі й забезпечення її адаптивності до різних сценаріїв експлуатації.

- Централізоване управління. Комунікаційна мережа повинна забезпечувати можливість нагляду й управління всією мікромережею з боку центрального блоку управління та ухвалення високорівневих рішень на основі комплексних системних даних.
- Розподілене управління. Локальні блоки управління в мікромережі повинні працювати автономно, здійснюючи коригування в реальному часі для оптимізації роботи й реагування на зміну місцевих умов. Комунікаційна архітектура повинна підтримувати обмін даними та координацію між цими розподіленими блоками та центральним блоком управління.

Випробування в умовах експлуатації та перевірка. Випробування інфраструктури зв'язку в умовах експлуатації необхідно проводити в різних умовах середовища та експлуатації, щоб перевірити ефективність і надійність її роботи.

- Випробування в різних умовах середовища. Системи зв'язку слід перевіряти в різних умовах середовища, як-от екстремальні температури, вологість та електромагнітні перешкоди, щоб переконатися, що вони можуть витримувати ситуації реальної роботи та надійно працювати в них.
- Експлуатаційне випробування. Інфраструктуру слід тестувати в нормальних і аварійних умовах експлуатації, щоб оцінити швидкість її реагування, затримку й цілісність даних. Сюди відносяться моделювання збоїв у мережі й нагляд за ефективністю резервування й механізмів відновлення після відмови.

Відповідність стандарту IEC 62351. Рекомендовано дотримуватися стандарту IEC 62351, який містить настанови щодо безпеки протоколів зв'язку в енергосистемах. У цьому стандарті йдеться про забезпечення конфіденційності, цілісності й доступності даних, він містить заходи, спрямовані на автентифікацію, шифрування й безпечне керування ключами та сертифікатами.

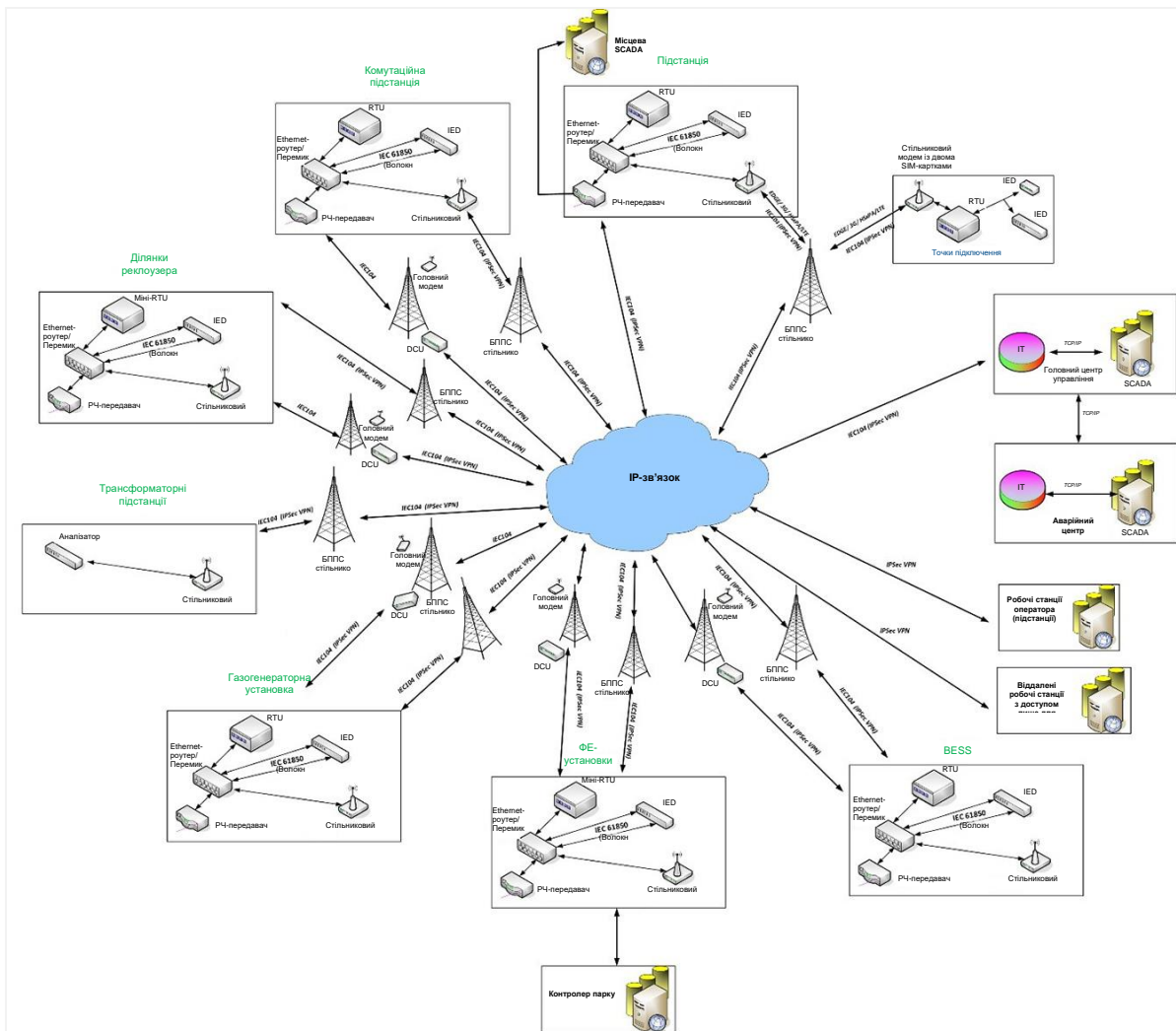


Рисунок 11. Приклад комунікаційної архітектури

8.5. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО КІБЕРБЕЗПЕКИ ДЛЯ ДИЗАЙНУ МІКРОМЕРЕЖІ

Забезпечення надійної кібербезпеки мікромережових систем має суттєве значення для підтримання їх надійності, цілісності та стійкості в умовах потенційних кіберзагроз. У цьому розділі викладено ключові рекомендації та технічні вимоги щодо захисту систем управління мікромережами та їхньої інфраструктури управління. Ці рекомендації включають заходи з контролю фізичного й логічного доступу, дотримання стандартних рамкових принципів кібербезпеки, сегментацію мережі, посилення апаратного й програмного забезпечення, а також впровадження безпечних протоколів автентифікації та шифрування. Крім того, у технічних вимогах до кібербезпеки MGMS наголошується на безпеці автентифікації, шифруванні даних, виявленні атак, управлінні виправленнями, можливостях аудиту й ведення журналів, резервуванні, безпечному керуванні конфігурацією та регулярному аналізу питань безпеки. Дотримуючись цих настанов, оператори мікромереж можуть значно підвищити рівень кібербезпеки своїх систем, забезпечуючи їх безперервну й безпечну роботу.

- Контроль фізичного й логічного доступу. Важливо забезпечити суворий контроль фізичного й логічного доступу до систем управління мікромережею. Критичні компоненти мають бути фізично захищеними. Крім того, слід застосовувати

суворий контроль доступу, щоб обмежити несанкціонований доступ до мережі й пристроїв системи.

- Сегментація та ізоляція мережі. Важливо виконати сегментацію мережі для ізолювання критичних систем від некритичних. Вона обмежує поширення потенційних кібератак і допомагає захистити вразливі системи управління. Для моніторингу й контролю мережевого трафіку слід використовувати брандмауери та системи виявлення вторгнень.
- Захист апаратного й програмного забезпечення. Необхідно посилити всі компоненти апаратного й програмного забезпечення, відключивши непотрібні сервіси й порти, видаливши непотрібне програмне забезпечення та регулярно застосовуючи патчі безпеки. Це зменшує потенційну поверхню атаки та знижує вразливість.
- Управління пароллями та автентифікація. Важливо дотримуватися правил щодо надійних паролів, зокрема вимог до складності, їх регулярних змін і належного зберігання. Для підвищення безпеки слід використовувати багатофакторну автентифікацію, дозволяючи лише авторизованому персоналу отримувати доступ до систем управління мікромережею.
- Регулярні оновлення системи безпеки. Своєчасне застосування патчів безпеки та оновлень мікропрограмного забезпечення для всіх мережевих пристроїв у мікромережі є вкрай важливим. Ця практика допомагає усунути прогалини в безпеці та забезпечує захист від нещодавно виявлених загроз.
- Плани реагування на інциденти й плани відновлення. Вирішальне значення має підготовка та виконання плану реагування на інциденти, який включає процедури виявлення, реагування на й відновлення після кіберінцидентів. Слід регулярно тестувати ці плани на предмет ефективності й готовності до дій.
- Безперервний моніторинг і ведення журналів. Важливе значення має здійснення постійного моніторингу та реєстрації мережевого трафіку й дій у системі. Ці журнали можна використовувати для виявлення відхилень, застосування політик безпеки й надання даних для слідства в разі порушення безпеки.
- Використання протоколів захищеного зв'язку. Використання протоколів захищеного зв'язку, як-от протоколу безпеки транспортного рівня/протоколу безпечних з'єднань (TLS/SSL) для передачі даних у мікромережі, забезпечує цілісність даних і конфіденційність під час зв'язку між різними компонентами мікромережі.
- Відповідність вимогам стандарту IEC 62351. Важливим є дотримання стандарту IEC 62351, який містить настанови щодо безпеки протоколів зв'язку в енергосистемах. У цьому стандарті йдеться про захист конфіденційності, цілісності й доступності даних. Він включає заходи з автентифікації, шифрування й безпечного керування ключами та сертифікатами.

Технічні вимоги до кібербезпеки для MGMS

- Безпечна автентифікація та авторизація. MGMS має впроваджувати безпечні механізми автентифікації, як-от багатофакторна автентифікація, для перевірки

особистості користувачів і верифікації пристроїв. Слід використовувати рольову модель управління доступом для забезпечення виключного доступу авторизованого персоналу до певних системних функцій і даних.

- Шифрування даних. Усі дані, що передаються в межах MGMS, зокрема сигнали керування й робочі дані, мають бути зашифровані за допомогою надійних алгоритмів шифрування. Це захищає конфіденційність і цілісність даних, запобігаючи несанкціонованому доступу до них та їх підробці.
- Системи виявлення вторгнень і запобігання вторгненням. MGMS має включати системи виявлення вторгнень та запобігання їм для моніторингу мережевого трафіку на наявність підозрілих дій та потенційних порушень безпеки. Ці системи повинні бути здатні відповідним чином сповіщати операторів і автоматично реагувати на виявлені загрози.
- Управління виправленнями. У MGMS повинен бути забезпечений надійний процес управління виправленнями для підтримки актуальності версій усього програмного та мікропрограмного забезпечення з застосуванням останніх патчів безпеки. Це допомагає зменшити вразливості й забезпечити захист від відомих експлоїтів.
- Можливості аудиту й ведення журналів. MGMS повинна мати комплексні можливості аудиту та ведення журналів для відстеження дій користувачів, системних подій та інцидентів безпеки. Журнали повинні надійно зберігатися й підлягати регулярній перевірці для виявлення потенційних проблем безпеки та їх усунення.
- Механізми резервування й відновлення після відмови. MGMS повинна мати механізми резервування й відновлення після відмови для забезпечення безперебійної роботи й доступності критичних функцій у разі кібератаки чи збою апаратного забезпечення. Це підвищує відмовостійкість і надійність системи.
- Захищене керування конфігурацією. MGMS має дотримуватися безпечних методів керування конфігурацією, зокрема використовувати базові параметри конфігурації та проводити регулярні аудити для забезпечення відповідності вимогам політик і стандартів безпеки. Слід виявляти несанкціоновані зміни конфігурацій системи та запобігати їм.
- Проведення аналізу питань безпеки на регулярній основі. Необхідно на регулярній основі здійснювати аналіз безпеки MGMS, зокрема оцінювання вразливості й тестування на предмет проникнення, для виявлення та усунення потенційних слабких із погляду безпеки місць. Такого роду аналіз допомагає підтримувати безпеку й відмовостійкість системи.

9. ВИЗНАЧЕННЯ ВИМОГ ДЛЯ НОВОГО ОБЛАДНАННЯ

У динамічному ландшафті функціонування сучасних енергетичних систем розвиток мікромереж є ключовою стратегією підвищення відмовостійкості, ефективності та сталості енергосистеми. Дизайн та впровадження мікромережі потребують ретельного врахування різноманітних чинників – від принципів експлуатації й до передових технологій. У цьому контексті вибір та інтеграція нового обладнання відіграють вирішальну роль у формуванні функціоналу та показників роботи мікромережових систем. Таке обладнання забезпечує оптимальну ефективність роботи, адаптовану до особливих потреб і вимог мікромережі, якщо воно вибране згідно з принципами роботи мікромережі та на основі даних аналізу мережі й досліджень для визначення її розміру.

9.1. ТИПИ НОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Додаткові РДЕ. Додаткові РДЕ є важливими компонентами мікромережі, від яких залежить потужність виробництва енергії й загальна гнучкість мікромережі. Ці ресурси (як-от сонячні батареї, газогенератори, дизельні генератори тощо) дозволяють мікромережі використовувати як відновлювані, так і традиційні джерела енергії, зменшуючи залежність від централізованих електромереж і підвищуючи її відмовостійкість і сталість.

Система зберігання енергії. BESS відіграє критичну роль у стабілізації мікромережі шляхом зберігання надлишкової енергії, виробленої в періоди низького попиту, і вивільнення її в періоди пікового попиту або у випадках коливань пропозиції. BESS допомагає збалансувати попит і пропозицію, покращити стабільність мережі та забезпечити інтеграцію відновлюваної енергії, підвищуючи цим надійність та ефективність мікромережі.

Повітряна лінія низької/середньої напруги. Повітряні лінії низької та середньої напруги є важливими компонентами мікромережі, призначеними для передачі електроенергії. Ці лінії полегшують розподіл електроенергії від джерел генерації до кінцевих споживачів, надаючи економічний та функціонально ефективний спосіб передачі енергії, особливо в сільській місцевості чи віддалених районах, де підземні кабелі прокладати недоцільно.

Кабельна лінія низької/середньої напруги. У містах чи густонаселених районах кабельні лінії низької й середньої напруги є естетично привабливою та компактною альтернативою повітряним лініям. Ці кабелі мінімізують візуальний вплив, знижують ризик пошкодження внаслідок дії чинників довкілля або актів вандалізму та підвищують надійність розподілу електроенергії в мікромережі.

Віддалений термінал/міні-RTU/стільникові розподільні термінали. RTU, міні-RTU та стільникові DTU є критично важливими компонентами інфраструктури моніторингу й управління мікромережею. Ці пристрої забезпечують збір даних у режимі реального часу, телеметрію та функції дистанційного керування, що дозволяє операторам здійснювати контроль та ефективне керування роботою мікромережі з центрального пункту.

Аналізатор енергії (телеметрія). Аналізатори енергії надають детальну інформацію про моделі споживання, генерації та розподілу енергії в мікромережі. Ці телеметричні пристрої здійснюють збір та аналіз даних про рівні напруги, якість і потоки

електроенергії, дозволяючи операторам оптимізувати роботу системи, виявляти прояви неефективності та ухвалювати обґрунтовані рішення з покращення загального управління електроенергією.

Цифрове реле. Цифрові реле є захисними пристроями в мікромережі, які виявляють та усувають несправності, щоб запобігти пошкодженню обладнання й забезпечити безпеку персоналу. Ці передові реле забезпечують швидке й точне виявлення несправностей, мінімізуючи простої та перебої в роботі мікромережі й підвищуючи загальну надійність системи.

Радіочастотний зв'язок. Системи РЧ-зв'язку забезпечують бездротову передачу даних між різними компонентами мікромережі, допомагаючи налагодити безперебійний зв'язок та координувати його. Технологія радіочастотного зв'язку забезпечує надійне та безпечне підключення, що дозволяє здійснювати моніторинг РДЕ, розподільних об'єктів і пристроїв контролю, керування ними та їх координацію в реальному часі.

Стільниковий зв'язок. Технологія стільникового зв'язку забезпечує надійний і доступний засіб зв'язку для дистанційного моніторингу й керування об'єктами мікромережі. Стільникові мережі забезпечують надійне покриття, високу швидкість передачі даних і безпечні канали зв'язку, що робить їх ідеально придатними для застосування в умовах, які вимагають дистанційного доступу й контролю, наприклад, управління розумною мережею та моніторинг об'єктів.

Реклоузер. Реклоузери – це автоматичні вимикачі, оснащені можливостями інтелектуального керування. Вони призначені для виявлення та усунення тимчасових несправностей у розподільчій мережі мікромережі. Ці пристрої допомагають мінімізувати тривалість відключень, автоматично відновлюючи після усунення несправності живлення ділянок мережі, які не постраждали, та підвищуючи загальну надійність і відмовостійкість системи.

Автоматичний вимикач. Автоматичні вимикачі є важливими запобіжними пристроями в мікромережі, призначеними для захисту електричних ланцюгів від перевантаження за струмом та коротких замикань. Ці пристрої переривають потік електроенергії в разі несправності, запобігаючи пошкодженню обладнання та знижуючи ризик займання чи ураження електричним струмом. Автоматичні вимикачі бувають різних типів і конфігурацій відповідно до різних рівнів напруги й вимог до їх експлуатації в межах мікромережі.

Підвищувальний/знижувальний трансформатор. Підвищувальний і знижувальний трансформатори використовуються для регулювання рівнів напруги в мікромережі, що сприяє ефективним передачі й розподілу електроенергії. Підвищувальні трансформатори підвищують рівні напруги для передачі енергії на великі відстані, знижувальні трансформатори знижують рівні напруги для розподілу енергії серед кінцевих користувачів. Ці трансформатори відіграють важливу роль у підтриманні якості електроенергії, мінімізації втрат і забезпеченні сумісності різних компонентів мікромережі.

Включення цих нових компонентів обладнання в структуру мікромережі підтримує надійність, ефективність і відмовостійкість системи, що, зрештою, дозволяє їй задовольняти енергетичні потреби своїх користувачів та досягати екологічних,

економічних і експлуатаційних цілей. Кожна одиниця обладнання сприяє загальній функціональності й ефективності роботи мікромережі, тому їхній ретельний відбір та інтеграція в процесі розроблення є вкрай важливими.

9.2. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІЙНИХ НОВИХ КОМПОНЕНТІВ

Цілі роботи мікромережі, що включають її завдання та експлуатаційні вимоги, мають підлягати ретельній перевірці для забезпечення відповідності вибору нового обладнання цим основоположним принципам. Комплексний аналіз мережі повинен визначити ті області мікромережі, які отримають користь від модернізації або використання додаткового обладнання, спрямованих на підвищення загальної функціональності та ефективності. Вимоги до розмірів і потужності нового обладнання визначаються, виходячи з детальної оцінки поточного й прогнозованого навантаження мікромережі, а також потужності її генерації. Завдяки цьому вибране обладнання зможе гарантовано і в ефективний спосіб відповідати експлуатаційним вимогам мікромережі.

Потенційний новий компонент 1: додаткові РДЕ

- Необхідно ретельно оцінити можливості інтеграції відновлюваної енергії в мікромережу (як результат визначеного збільшення обсягів попиту) з урахуванням конкретних енергетичних потреб мікромережі та вимог до навантаження. Таке оцінювання є критично важливим для визначення необхідності й обсягу додаткових РДЕ.
- Вибір додаткових РДЕ, як-от сонячні батареї, дизельні генератори, газогенератори тощо, залежить від їхньої здатності підвищувати потужність мікромережі для виробництва енергії та відповідності цілям сталого розвитку. На вибір цих систем впливає їхня сумісність із наявною енергетичною інфраструктурою та вплив на довкілля.
- Оптимальне розташування й потужність таких додаткових РДЕ визначаються шляхом аналізу доступності ресурсів, географічних умов та наявної мережі розподілу енергії всередині мікромережі. Таке стратегічне розташування забезпечує максимальну ефективність та інтеграцію з найменшими збоями в роботі поточної системи.

Потенційний новий компонент 2: BESS

- Для підтримання енергетичного балансу та стабільності важливо проаналізувати потреби в накопиченні енергії з урахуванням мінливості відновлюваних джерел енергії та профілів навантаження мікромережі.
- Визначення вимог до потужності й ефективності роботи BESS є важливим для задоволення експлуатаційних вимог мікромережі.
- Вибір відповідних технологій і конфігурацій акумуляторів з урахуванням таких чинників як швидкість заряджання/розряджання, ефективність і життєвий цикл, має важливе значення для оптимізації зберігання та вивільнення енергії.

Потенційний новий компонент 3: повітряна лінія низької/середньої напруги

- Визначення областей, у яких потрібні нові повітряні лінії для підключення компонентів мікромережі, є важливим для розширення мережі й покращення зв'язку між РДЕ.
- Визначення номінальної напруги й пропускної здатності повітряних ліній на основі вимог до навантаження має вирішальне значення для забезпечення їхньої здатності витримувати прогнозовані електричні навантаження без шкоди для ефективності чи безпеки.
- Проектування маршруту повітряної лінії вимагає ретельного врахування рельєфу місцевості, смуги відведення та впливу на довкілля з метою мінімізації перебоїв і дотримання місцевих норм.
- Під час закупівлі матеріалів та обладнання для будівництва повітряних ліній необхідно забезпечити їх якість і сумісність із наявною інфраструктурою.

Потенційний новий компонент 4: підземний кабель низької/середньої напруги

- Аналіз територій, де потрібно прокласти підземні кабелі для розширення мережі або підвищення надійності, є важливим для забезпечення розширення та відмовостійкості мікромережі.
- Визначення номінальної напруги й потужності підземних кабелів на основі вимог до навантаження має вирішальне значення для здатності інфраструктури належним чином задовольняти потреби в розподілі енергії.
- Проектування маршруту кабельної лінії вимагає врахування таких чинників як стан ґрунту, глибина й близькість до інших комунікацій з метою запобігання перебоєм і дотримання місцевих норм.
- Під час закупівлі матеріалів і обладнання для прокладання підземних кабелів необхідно дотримуватися певних технічних норм і норм безпеки.
- Риття траншей, прокладання кабелів і засипка траншей відповідно до специфікацій є важливими кроками в процесі їх прокладення, які вимагають точності й дотримання проєктних планів.

Потенційний новий компонент 5: реклоузер

- Визначення місць, де потрібні реклоузери для автоматичного виявлення та ізоляції несправностей, має важливе значення для підтримання цілісності та відмовостійкості мікромережі під час несправностей.
- Вибір реклоузерів із номінальними параметрами й налаштуваннями, які б відповідали експлуатаційним умовам мікромережі, є важливим для забезпечення їх оптимальної роботи за різних електричних навантажень та збоїв.
- Для максимального підвищення ефективності реклоузерів у локалізації несправностей і мінімізації зон відключення слід їх встановлювати та налаштовувати саме в стратегічних точках уздовж розподільчої мережі.

- Необхідно протестувати роботу реклоузерів за різних сценаріїв несправностей для забезпечення їх належного функціонування, а також щоб перевірити, наскільки ефективно завдяки їм зростає надійність мережі.

Потенційний новий компонент 6: автоматичний вимикач

- Визначення потреби в автоматичних вимикачах для захисту компонентів мікромережі від перевантаження за струмом та несправностей має важливе значення для запобігання пошкодженню обладнання й забезпечення безпеки.
- Вибір автоматичних вимикачів із відповідними номінальними характеристиками й параметрами, які б відповідали рівням напруги мікромережі та умовам навантаження, є важливим, адже це гарантує, що вони зможуть належним чином працювати з урахуванням електричних вимог та в умовах несправності мікромережі.
- Встановлення й налаштування автоматичних вимикачів у ключових точках мікромережі є необхідним для ефективного захисту різних ділянок мережі.
- Координація налаштувань автоматичного вимикача з іншими захисними пристроями для їх узгодженої роботи є важливою для забезпечення цілісної стратегії захисту, яка підвищує загальну стабільність і безпеку мережі.

Потенційний новий компонент 7: підвищувальний/знижувальний трансформатор

- Оцінювання необхідності регулювання рівнів напруги в мікромережі за допомогою трансформаторів має вирішальне значення для ефективного розподілу електроенергії та мінімізації її втрат.
- Визначення необхідних коефіцієнтів напруги й потужностей підвищувальних і знижувальних трансформаторів є необхідним для узгодження профілів генерації та споживання в мікромережі.
- Вибір трансформаторів зі специфікаціями, які відповідають профілю напруги мікромережі й вимогам до навантаження є важливим для забезпечення ефективного регулювання напруги та сумісності з підключеним обладнанням.
- Необхідно встановити та ввести в експлуатацію трансформатори у відповідних точках мікромережі для їх безпроблемної інтеграції в наявну інфраструктуру.

Потенційний новий компонент 8: RTU/міні-RTU/стільниковий DTU

- Визначення потреб у RTU і DTU для цілей моніторингу й керування є важливим для ефективного управління мікромережею.
- Необхідно обрати відповідний RTU або DTU на основі вимог до зв'язку й сумісності з системою для забезпечення безпроблемної їх інтеграції до мережі та функціонування в ній.
- Необхідно встановити та налаштувати RTU або DTU саме в стратегічних точках мікромережі для максимального збільшення покриття й можливостей керування.

- Встановлення протоколів зв'язку та інтерфейсів із MGMS є важливим для здійснення послідовного й надійного обміну даними.

Потенційний новий компонент 9: аналізатор енергії (телеметрія)

- Визначення потреби в аналізаторах енергії для моніторингу роботи системи та енергетичних потоків є важливим для ефективного управління енергією в мікромережі.
- Необхідно вибрати системи аналізаторів енергії, здатні надавати телеметричні дані в режимі реального часу, для динамічного відстеження та оптимізації споживання й генерації електроенергії.
- Встановлення аналізаторів енергії в ключових точках мікромережі для фіксації відповідних даних є необхідним для детального моніторингу роботи.
- Інтеграція даних аналізатора енергії до MGMS для аналізу та оптимізації сприяє ухваленню обґрунтованих рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності й надійності мікромережі.

Потенційний новий компонент 10: цифрове реле

- Слід проаналізувати наявну систему захисту та визначити зони, де цифрові реле будуть потрібні для вдосконалення виявлення несправностей, і де координація є критично важливою для безпеки системи.
- Необхідно обирати цифрові реле з розширеними функціями захисту й можливостями комунікації для покращення захисних функцій мікромережі.
- Встановлення та налаштування цифрових реле в критичних точках мікромережі забезпечить надійний захист від збоїв і відхилень.
- Узгодження налаштувань з іншими захисними пристроями для надійної та скоординованої роботи підвищить загальну стабільність мікромережі.

Потенційний новий компонент 11: РЧ-зв'язок

- Визначення потреби в РЧ-системах зв'язку для передачі даних у межах мікромережі є важливим для встановлення надійних і гнучких каналів зв'язку.
- Необхідно вибрати такі технології РЧ-зв'язку, які відповідають експлуатаційним вимогам мікромережі та екологічним умовам, що є важливим для надійної роботи.
- Встановлення обладнання для РЧ-зв'язку та встановлення зв'язку між компонентами мікромережі сприятиме безперебійній передачі потоку даних.
- Тестування та оптимізація роботи РЧ-зв'язку для забезпечення надійної передачі даних має важливе значення для підтримки експлуатаційної цілісності.

Потенційний новий компонент 12: компоненти стільникового зв'язку

- Важливо проаналізувати потреби в стільниковому зв'язку для віддаленого моніторингу та керування компонентами мікромережі для розширення контролю за межами локальних мереж.
- Вибір технологій стільникового зв'язку, сумісних із MGMS, є вкрай важливим для забезпечення надійного й безпечного зв'язку.
- Встановлення пристроїв стільникового зв'язку та з'єднань зі стільниковими мережами забезпечує резервування та застосування інших форм зв'язку.
- Вжиття заходів безпеки для захисту стільникового зв'язку від несанкціонованого доступу є важливим для захисту системних даних і операцій.

Інтегруючи нове обладнання в проєкт мікромережі, важливо визнати, що не кожна мікромережа потребує всіх цих компонентів. Вибираючи додаткове обладнання, слід керуватися конкретними експлуатаційними потребами, потужністю системи й загальними принципами проєктування мікромережі. Кожен компонент надає потенційні переваги, але їх слід розглядати, спираючись на конкретні цілі та обмеження проєкту мікромережі. Такий підхід гарантує, що інтеграція нового обладнання покращить функціональність, ефективність і відмовостійкість мікромережі, не спричиняючи при цьому зайвих ускладнень чи витрат.

10. КОШТОРИС

Оцінка вартості є фундаментальним аспектом проектування мікромережі, що забезпечує фінансову основу, необхідну для планування проєкту та ухвалення рішень. Точна оцінка вартості враховує всі потенційні витрати, що допомагає зацікавленим сторонам скласти якісний бюджет і оцінити економічну доцільність проєкту мікромережі. У цьому розділі описано ключові компоненти й міркування, пов'язані з оцінкою витрат на проектування та впровадження мікромережі.

Компоненти

Під час оцінювання вартості мікромережі, важливо враховувати широкий спектр компонентів, які можна умовно розділити на такі категорії: компоненти електричної системи, генерація та накопичення енергії, засоби керування й комунікації, нове будівництво або реконструкція, системна інтеграція, кібербезпека, експлуатація й технічне обслуговування, інженерне проектування, системні дослідження та загальні проєктні витрати.

- Компоненти електричної системи
 - Нові секційні вимикачі, автоматичні вимикачі, реле й кабелі: ці компоненти необхідні для забезпечення надійного розподілу електроенергії та захисту мікромережі. Вартість може змінюватися залежно від технічних характеристик і якості необхідного обладнання.
- Генерування й зберігання енергії
 - BESS: включається вартість батарей, систем управління батареями та їх встановлення.
 - Газові та дизельні генератори: включається вартість генераторів, монтажу, а також будь-якого необхідного допоміжного обладнання, як-от вихлопні системи та системи зберігання палива.
 - ФЕ-системи: включається вартість сонячних панелей, монтажних конструкцій, інверторів та інтеграції в наявну мережу.
- Керування й комунікації
 - Лінії зв'язку та контролери мікромережі: включається вартість апаратного та програмного забезпечення, а також встановлення.
 - Системи диспетчерського управління й збору даних: апаратне й програмне забезпечення для моніторингу й управління в режимі реального часу буде, скоріш за все, дорогим.
 - Системи управління мікромережами: включається вартість сучасного програмного забезпечення та необхідної обчислювальної інфраструктури.
- Нове будівництво або реконструкція

- Пункт керування мікромережею та пов'язані з ним об'єкти: необхідно включити вартість нового будівництва або реконструкції наявних структур для розміщення обладнання й персоналу. Сюди також входить вартість інженерної інфраструктури та інженерної підготовки будівельного майданчика.
- Інтеграція системи
 - Комплексна інтеграція електричних, механічних систем і систем керування: вартість інтеграції покривають витрати, пов'язані з забезпеченням безперебійної спільної роботи всіх систем. Це вимагає значного планування, проектування та праці.
- Експлуатація та технічне обслуговування
 - Витрати на годину роботи для обслуговування дизель-генератора та іншого обладнання: необхідно врахувати поточні витрати на експлуатацію та технічне обслуговування, зокрема планове технічне обслуговування, ремонт і заміну.
- Витрати на інженерне проектування
 - Професійні гонорари за послуги з інженерного проектування: це включає витрати на наймання інженерів для проектування мікромережі, розроблення детальних планів і нагляду за проектом.
- Витрати на проведення системних досліджень
 - Дослідження захисту, взаємозв'язку та інших систем: включає вартість дослідження схем захисту, вимог до взаємозв'язку та інших технічних аспектів, які є важливими для забезпечення безпеки й надійності мікромережі.
- Загальні проектні витрати
 - Безпека, управління проектом, загальні положення, накладні витрати та прибуток: це додаткові витрати, пов'язані з забезпеченням безпечного та вчасного завершення проекту в межах бюджету. Сюди також входять накладні витрати підрядника й норми прибутку.

Стандартні кроки для дослідження кошторисної вартості

- Комплексне визначення обсягу: першим кроком є чітке визначення обсягу проекту. Це включає окреслення всіх компонентів і систем, які будуть включені в мікромережу: кожний необхідний елемент слід розглянути на самому початку.
- Детальна відомість обсягів робіт: далі слід створити детальну відомість обсягів робіт. Ця відомість повинна бути складена на основі архітектурних і функціональних специфікацій мікромережі та повинна в деталях враховувати кожний необхідний компонент.
- Ринкова ціна: для складання точного кошторису необхідно отримати актуальні ринкові ціни на кожен компонент. Часто для цього необхідно зв'язатися з кількома постачальниками, щоб отримати конкурентоспроможні тендерні або цінові

пропозиції. Крім того, у кошторис необхідно включити витрати на будь-які нестандартні компоненти або спеціалізовані технології, які потрібні саме для дизайну конкретної мікромережі. Це гарантуватиме належне врахування будь-яких особливих вимог під час планування витрат.

- Детальна розбивка витрат: усі потенційні витрати повинні бути деталізовані та мають включати витрати на обладнання, матеріали, робочу силу й збори, визначені законодавством. Детальна розбивка допомагає зрозуміти загальний обсяг фінансових потреб і визначити сфери, де можна буде заощадити кошти.
- Витрати на монтаж та інтеграцію: суттєве значення має аналіз витрат на оплату робіт із монтажу. Сюди входить робота персоналу, який виконує фізичний монтаж, електричну інтеграцію й тестування системи. Крім того, слід враховувати витрати, пов'язані з інтеграцією нових компонентів у наявну інфраструктуру. Цей розділ також може включати витрати на додаткове апаратне забезпечення або виконання модифікацій для забезпечення безпроблемної інтеграції.
- Отримання дозволів і забезпечення відповідності нормативним вимогам: цей пункт може передбачати значні витрати. Сюди входить проведення екологічних оцінок, сплата визначених законодавством обов'язкових зборів, необхідних для забезпечення відповідності проекту вимогам усіх місцевих і національних норм. Ці витрати повинні бути включені в загальний бюджет.
- Планування на випадок непередбачених ситуацій: зрештою, важливо закласти бюджет на випадок непередбачених ситуацій. У цьому бюджеті закладають непередбачені витрати або зміни обсягу проекту, забезпечуючи фінансову подушку для розв'язання будь-яких непередбачених проблем, які можуть виникнути в процесі реалізації проекту.

11. ЕКОНОМІЧНЕ ПОРІВНЯННЯ ВАРІАНТІВ ДИЗАЙНУ (АБО ПРОЄКТНЕ РІШЕННЯ ЧЕРЕЗ ОПТИМІЗАЦІЮ)

Комплексне техніко-економічне порівняння альтернативних варіантів дизайну передбачає оцінювання експлуатаційної ефективності та економічної доцільності різних конфігурацій мікромережі. У цьому аналізі враховуються капітальні та експлуатаційні витрати, ефективність системи, її надійність і масштабованість. Шляхом порівняння різних джерел енергії, варіантів зберігання енергії та стратегій управління можна визначити оптимальну конструкцію, забезпечуючи збереження балансу між економічною ефективністю й технічною надійністю на основі двох можливих підходів.

Підхід на основі цільової функції та оптимізації. У проектуванні мікромережі застосування підходу на основі цільової функції та оптимізації передбачає створення математичної моделі, у якій був би зафіксований складний баланс між вартістю, ефективністю роботи та експлуатаційними обмеженнями компонентів мікромережі. Призначення цільової функції полягає в мінімізації загальних експлуатаційних витрат, зокрема капітальних витрат, експлуатаційних витрат і витрат на технічне обслуговування, з одночасним максимальним підвищенням ефективності й надійності системи. Серед обмежень можуть бути інтеграція відновлюваних джерел енергії, ємність накопичувачів енергії та вимоги до мережевого підключення. Для дослідження різних конфігурацій РДЕ, систем зберігання та стратегій управління навантаженням застосовують передові методи оптимізації, як-от MILP або генетичні алгоритми. Цей підхід дозволяє здійснювати точне порівняння альтернативних варіантів дизайну мікромережі на основі даних, допомагаючи вибрати варіант, який би був найбільш рентабельним та технічно обґрунтованим.

Порівняння нормованої вартості електроенергії для альтернативних варіантів дизайну. Підхід на основі порівняння нормованої вартості електроенергії (LCOE) до проектування мікромережі надає чіткі показники для порівняння економічної ефективності різних варіантів дизайну. LCOE обчислюється шляхом ділення загальних витрат упродовж життєвого циклу мікромережі, включно з початковими капітальними інвестиціями й витратами на експлуатацію та технічне обслуговування, на загальну кількість енергії, виробленої впродовж життєвого циклу системи. Цей метод дозволяє здійснювати пряме порівняння різних конфігурацій – наприклад, різних комбінації сонячних панелей, вітряних турбін, акумуляторних батарей і резервних генераторів. Оскільки підхід на основі LCOE приділяє першочергову увагу вартості одиниці поданої енергії, він допомагає визначити найбільш економічно життєздатний дизайн мікромережі з урахуванням таких чинників, як частка відновлюваної енергії, ефективність зберігання енергії та профілі навантаження. Це гарантує, що вибраний варіант дизайну не тільки відповідатиме енергетичним потребам, але й забезпечуватиме найкращу фінансову віддачу протягом терміну експлуатації.

11.1. ПІДХІД НА ОСНОВІ ЦІЛЬОВОЇ ФУНКЦІЇ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ

Метою цього підходу є мінімізація загальних витрат протягом життєвого циклу, зокрема капітальних, експлуатаційних витрат, витрат на технічне обслуговування, паливо й систему управління, а також показників відмовостійкості й надійності протягом усього життєвого циклу проекту:

Minimize z

$$= \frac{C_{cap}(X_{new}, Y, Z, control) + \sum_{t=1}^T (C_{op,t}(X_{new}, X_{old}, Y, Z, S_t) + C_{main,t}(X_{new}, X_{old}, Y, Z))}{(1+r)^t + C_{control(z)} + C_{reliability} + C_{resilience}}$$

де:

- Z – загальна вартість.
- X_{new} – потужність нових генераційних установок.
- X_{old} – потужність наявних генераторів.
- Y – ємність BESS.
- Z – інші компоненти інфраструктури.
- $control$ – елементи витрат, пов'язані з системами керування та автоматизації.
- S_t – змінні планування генерації для всіх типів генераторів у момент часу t .
- C_{cap} – функція капітальних витрат.
- $C_{op,t}$ – експлуатаційні витрати за рік t .
- $C_{main,t}$ – витрати на технічне обслуговування за рік t .
- $C_{control}$ – функція витрат системи керування.
- $C_{reliability}$ – витрати, пов'язані з показниками надійності.
- $C_{resilience}$ – витрати, пов'язані з показниками відмовостійкості.
- r – ставка дисконтування.
- T – життєвий цикл проекту.

Обмеження:

1. Обмеження балансу потужності:

$$P_{gen,new,t}^{S_{new,t}} + P_{gen,old,t}^{S_{old,t}} + P_{RES,t}^{S_{RES,t}} + P_{RES,t} + P_{BESS,t} = P_{load,t}$$

для всіх t , де $P_{gen,new,t}^{S_{new,t}}$, $P_{gen,old,t}^{S_{old,t}}$ and $P_{RES,t}^{S_{RES,t}}$ – вихідна потужність від, відповідно, нових традиційних, старих традиційних і відновлюваних джерел енергії, яка залежить від відповідних рішень щодо їх розподілу $S_{new,t}$, $S_{old,t}$ та $S_{RES,t}$.

2. Експлуатаційні межі генератора:

$$0 \leq x_{new} \leq x_{new,max} \text{ та } 0 \leq x_{old} \leq x_{old,max}$$

3. Експлуатаційні межі й межі потужності батареї:

$$0 \leq y \leq y_{max} \text{ та } SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max}$$

4. Тривалість роботи в острівному режимі:

$$\sum_{t=1}^D (P_{gen,new,t} + P_{gen,old,t} + P_{RES,t} + P_{BESS,t}) \geq \sum_{t=1}^D P_{load,t}$$

де D – мінімальна тривалість необхідної операції в острівному режимі.

5. Відповідність надійності N-1:

Забезпечити відповідність надійності N-1 шляхом моделювань енергосистеми. Це передбачає перевірку здатності системи витримати відмову будь-якого окремого компонента (генератора, лінії, трансформатора тощо) без відключення всієї системи. Метою проведення моделювань є підтвердження здатності мікромережі до збереження експлуатаційної надійності за умов N-1.

6. Стратегія вибору розміщення й розмірів генератора:

Щоб вирішити, як розгортати потужність генерації – централізовано чи децентралізовано, введіть двійкові змінні рішення $d_{central}$ і $d_{decentral}$, які впливають на дизайн системи й витрати:

$$d_{central} + d_{decentral} = 1$$

$$x_{new} = x_{central} \times d_{decentral} + x_{decentral} \times d_{decentral}$$

де $x_{central}$ та $x_{decentral}$ – потужності за умови, відповідно, централізації та децентралізації.

7. Залежність вартості системи управління:

Вартість системи управління може змінюватися залежно від того, який підхід – централізований чи децентралізований – було обрано з огляду на різні потреби в технологіях зв'язку, моніторингу та управління:

$$C_{control(z)} = C_{central} \times d_{decentral} + C_{decentral} \times d_{decentral}$$

Стратегія оптимізації. Ця модель передбачає складний рівень ухвалення рішень не лише стосовно розміру й диспетчеризації об'єктів генерації та зберігання, але й стосовно оптимальної структуризації таких об'єктів і контролю за ними потенційно в кількох пунктах або вузлах у межах мікромережі. Це передбачає розв'язання масштабної задачі змішаного цілочисельного нелінійного програмування через двійкові рішення щодо централізації порівняно з децентралізацією та нелінійності, пов'язані з функціями витрат і операційними обмеженнями.

Інструменти й методи. Потрібне передове програмне забезпечення для оптимізації, здатне працювати зі змішаним цілочисельним нелінійним програмуванням. Такі інструменти як GAMS, Puomo або MATLAB (з відповідними програмними засобами розв'язання задач, наприклад, CPLEX, Gurobi або BARON), підходять для формулювання й розв'язання такого типу задач. Застосування оптимізації на основі

моделювання або аналізу сценаріїв також може бути корисним для роботи з невизначеністю в умовах експлуатації та кошторисах, зокрема під час порівняння принципово різних архітектур систем (як-от централізованих та децентралізованих систем).

11.2. ПОРІВНЯННЯ НОРМОВАНОЇ ВАРТОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВАРІАНТІВ ДИЗАЙНУ

У цьому підході порівнюють різні конфігурації мікромереж шляхом обчислення їхніх значень LCOE й вибору найбільш економічно ефективного варіанту.

Етапи

- Визначення сценаріїв: визначте сценарії для різних варіантів дизайну мікромережі, наприклад:
 - Сценарій 1. Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) + BESS
 - Сценарій 2. Тільки газогенератор
 - Сценарій 3. Газ + ВДЕ
 - Сценарій 4. Газ + ВДЕ + BESS
- Визначте компоненти витрат: поділіть витрати на CAPEX і операційні витрати (OPEX).
- Розрахуйте поточну вартість (PVal) витрат
 - Скористайтеся ставкою дисконтування для розрахунку поточної вартості CAPEX і OPEX упродовж життєвого циклу проєкту.
 - Поточна вартість CAPEX ($PVal_{CAPEX}$) є сумою всіх початкових капітальних витрат.
 - Поточна вартість OPEX ($PVal_{OPEX}$) є сумою річних OPEX, дисконтованих упродовж життєвого циклу проєкту.
- Обчисліть поточну вартість виробництва енергії.
 - Визначте поточну вартість загального обсягу енергії, виробленої впродовж життєвого циклу проєкту.
 - Поточна вартість виробництва енергії ($PVal_{Energy}$) є сумою річного обсягу виробленої енергії, дисконтованого впродовж життєвого циклу проєкту.
- Обчисліть LCOE для кожного сценарію, розділивши загальну поточну вартість витрат на загальну поточну вартість виробництва енергії: $LCOE = (PVal_{CAPEX} + PVal_{OPEX}) / PVal_{енергії}$

- Порівняйте значення LCOE за різними сценаріями. Сценарій із найнижчою LCOE зазвичай є найбільш економічно ефективним варіантом з урахуванням життєвого циклу проекту.

$$\begin{aligned}
 \text{LCOE} = & \left(\sum_{t=0}^T (\text{CAPEX}_{\text{grid}} + \text{CAPEX}_{\text{RES}} + \text{CAPEX}_{\text{disp}} + \text{CAPEX}_{\text{grid_comp}} + \text{CAPEX}_{\text{control}} \right. \\
 & + \text{OPEX}_{\text{grid},t} + \text{OPEX}_{\text{RES},t} + \text{OPEX}_{\text{disp},t} + \text{OPEX}_{\text{grid_comp},t} + \text{OPEX}_{\text{control},t} \\
 & + \text{OPEX}_{\text{fuel},t} + \text{OPEX}_{\text{BESS},t} + \text{VOLL}_t) \Big) \div ((1+r)^t) \\
 & \div \left(\sum_{t=0}^T E_{\text{new},t} + E_{\text{old},t} \right) \div (1+r)^t
 \end{aligned}$$

де:

- $\text{CAPEX}_{\text{grid}}$ – капітальні витрати на інфраструктуру мережі.
- $\text{CAPEX}_{\text{RES}}$ – капітальні витрати на нові відновлювані джерела енергії.
- $\text{CAPEX}_{\text{disp}}$ – капітальні витрати на нову диспетчеризовану генерацію (наприклад, газові двигуни).
- $\text{CAPEX}_{\text{grid_comp}}$ – капітальні витрати на нові компоненти мережі.
- $\text{CAPEX}_{\text{control}}$ – капітальні витрати на системи керування та автоматизації.
- $\text{OPEX}_{\text{grid},t}$ – операційні витрати на інфраструктуру мережі за рік t .
- $\text{OPEX}_{\text{RES},t}$ – операційні витрати на відновлювані джерела енергії за рік t .
- $\text{OPEX}_{\text{disp},t}$ – операційні витрати на диспетчеризовану генерацію за рік t .
- $\text{OPEX}_{\text{grid_comp},t}$ – операційні витрати на компоненти мережі за рік t .
- $\text{OPEX}_{\text{control},t}$ – операційні витрати на системи керування за рік t .
- $\text{OPEX}_{\text{fuel},t}$ – витрати палива на традиційну генерацію за рік t .
- $\text{OPEX}_{\text{BESS},t}$ – операційні витрати на систему зберігання енергії за рік t .
- VOLL_t – вартість незадоволеного попиту (вартість втраченого навантаження) на рік t .
- $E_{\text{new},t}$ – енергія, вироблена в межах нової генерації, за рік t .
- $E_{\text{old},t}$ – енергія, вироблена в межах наявної генерації, за рік t .
- r – ставка дисконтування.
- T – життєвий цикл проекту.

Обчислення поточної вартості (PVal)

Щоб обчислити поточну вартість витрат і виробництва енергії:

- Поточна вартість CAPEX:

$$PVal_{CAPEX} = CAPEX_{grid} + CAPEX_{RES} + CAPEX_{disp} + CAPEX_{grid_comp} + CAPEX_{control}$$

- Поточна вартість OPEX:

$PVal_{OPEX}$

$$= \left(\sum_{t=0}^T (OPEX_{grid,t} + OPEX_{RES,t} + OPEX_{disp,t} + OPEX_{grid_comp,t} + OPEX_{control,t} + OPEX_{fuel,t} + OPEX_{BESS,t} + VOLL_t) \right) \div ((1+r)^t)$$

- Поточна вартість виробництва енергії:

$$PVal_{Energy} = \left(\sum_{t=0}^T (E_{new,t} + E_{old,t}) \right) \div (1+r)^t$$

ТАБЛИЦЯ 7. СТАНДАРТНА ТАБЛИЦЯ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ LCOE ЗА РІЗНИМИ ВАРІАНТАМИ⁴

СТАТТЯ ВИТРАТ	ВДЕ + BESS	ТІЛЬКИ ГАЗОГЕНЕРАТОР	ГАЗ + ВДЕ	ГАЗ + ВДЕ + BESS
CAPEX				
Мережа (дол. США)	200	200	200	200
Нові ВДЕ (дол. США)	1 000 000	0	500	500
Диспетчеризована генерація (дол. США)	0	600	600	600
Компоненти мережі (дол. США)	500	100	100	500
Системи керування (дол. США)	300	100	100	300
OPEX (на рік)				
Мережа (дол. США)	20	20	20	20
Нові ВДЕ (дол. США)	30	0	20	20
Диспетчеризована генерація (дол. США)	0	50	50	50
Компоненти мережі (дол. США)	50	10	10	50
Системи керування (дол. США)	40	10	20	40

⁴ Рисунки, які є виключно ілюстративними, наведено для відображення структури кінцевої порівняльної таблиці.

ТАБЛИЦЯ 7. СТАНДАРТНА ТАБЛИЦЯ ДЛЯ ПОРІВНЯННЯ LCOE ЗА РІЗНИМИ ВАРІАНТАМИ⁴

СТАТТЯ ВИТРАТ	ВДЕ + BESS	ТІЛЬКИ ГАЗОГЕНЕРАТОР	ГАЗ + ВДЕ	ГАЗ + ВДЕ + BESS
Паливо (дол. США)	0	200	150	150
BESS (дол. США)	200	0	0	200
VOLL (дол. США)	20	50	30	20
Виробництво енергії				
Щороку (кВт-год/рік)	1 500 000	1 000 000	1 200 000	1 500 000
Життєвий цикл (років)	20	20	20	20
LCOE (дол. США/кВт-год)	0,410	0,580	0,520	0,540

11.3. ЗАУВАЖЕННЯ ЩОДО ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВІДМОВСТІЙКОСТІ В ПРОЄКТАХ МІКРОМЕРЕЖІ

Оцінюючи фінансову життєздатність проєктів мікромережі, зокрема проєктів, спрямованих на підвищення відмовостійкості мікромережі, важливо розуміти, що чимало проєктів не обов'язково дадуть прямий позитивний фінансовий результат виключно шляхом економії. Однак ці проєкти все одно можуть бути фінансово життєздатними за певних умов. Позитивний фінансовий результат часто залежить від унікальної комбінації таких чинників, як місце монтажу, доступні фінансові стимули та наявна інфраструктура на ділянці.

Установки, для яких відмовостійкість є критичною вимогою, можливо, не потребуватимуть суворого узгодження фінансових показників зі стандартними цілями економії. У таких випадках цінність мікромережі виходить за межі безпосередньої економічної віддачі. Вона вдосконалює можливості установки, знижує операційні ризики і є формою страхування від перебоїв. Це є особливо актуальним для об'єктів, які потребують безперебійного живлення для критичних операцій.

Оскільки проєкти мікромереж – а насамперед ті з них, що мають на меті посилення стійкості, а не отримання безпосередніх фінансових прибутків – мають унікальні цілі та стикаються з унікальними викликами, у цьому дослідженні рекомендується змістити наголос із питання загальної доцільності проєктів мікромереж на користь більш збалансованого підходу. Краще не обмежуватися самим лише аналізом загальної економічної доцільності мікромережі, а здійснити порівняння альтернативних варіантів її дизайну й оптимізувати її конфігурацію та розміри. Це пояснюється такими міркуваннями:

- Пріоритет – відмовостійкість. Для установок, де безперебійне живлення є критично важливим, головна цінність мікромережі полягає в її здатності вдосконалити можливості об'єкта, зменшити ризики та забезпечити надійне електропостачання під час перебоїв. Така відмовостійкість є об'єктивною цінністю, яку неможливо виміряти напряму в традиційних економічних термінах, проте вона має критично важливе значення для безперервності операцій.

- Економія коштів чи стратегічна важливість? Там, де відмовостійкість є критично важливою вимогою, економічний аналіз проєктів мікромережі повинен вийти за межі самої лише економії коштів. Включення VOLL до економічних оцінок є прикладом цього підходу, адже воно дозволяє виміряти в грошах переваги від уникнення відключень, що може виправдати інвестиції зі стратегічного, а не з суто фінансового погляду.
- Оптимізація понад доцільність. Зосередження на оптимізації дизайну мікромережі (наприклад, на коригуванні її розміру й конфігурації), а не на доведенні її економічної доцільності в широкому сенсі дозволяє зацікавленим сторонам адаптувати системи для задоволення конкретних експлуатаційних потреб в ефективний спосіб. Такий підхід дозволяє детально оцінити вплив різних конфігурацій на відмовостійкість і економічну ефективність проєкту з урахуванням унікальних обставин, пов'язаних із кожним об'єктом.
- Контекстуальна життєздатність. Якщо визнати, що позитивний фінансовий результат залежить від таких чинників, як місце розташування, наявна інфраструктура та доступні стимули, життєво важливою стає адаптація кожного проєкту для ефективного використання цих елементів. Такий адресний підхід забезпечує оптимізацію кожного варіанту дизайну мікромережі в конкретному контексті з урахуванням як ефективності роботи, так і фінансової ефективності.

Включення VOLL до обсягу техніко-економічного оцінювання може стати додатковим обґрунтуванням інвестицій у мікромережеві проєкти з ширшого погляду. VOLL – це вартість, яку споживачі готові заплатити, щоб уникнути перебоїв в електропостачанні. Цей показник надає кількісну оцінку економічних наслідків перебоїв у постачанні. Включення VOLL дає зацікавленим сторонам змогу оцінити економічні переваги посиленої надійності та відмовостійкості, що забезпечують мікромережі, зокрема у випадках, коли ці системи запобігають значним втратам під час відключень електроенергії. Цей підхід не лише підкреслює об'єктивну цінність підтримання безперервної роботи критично важливих об'єктів, але й забезпечує узгодження фінансової оцінки зі стратегічною важливістю безперервності роботи.

12. ПЛАН ВПРОВАДЖЕННЯ МІКРОМЕРЕЖІ

12.1. ЗАХОДИ

Впровадження мікромережі потребує застосування структурованого й системного підходу для забезпечення її успішної та сталої роботи. У цьому розділі описано основні етапи впровадження та відповідні заходи – від початкової екологічної оцінки й фінансового планування до робіт з обстеження місця розгортання, дотримання нормативних вимог і остаточного введення мікромережі в експлуатацію. Кожен крок спрямований на розв'язання технічних, фінансових та експлуатаційних задач і забезпечує ефективність і надійність мікромережі та її здатність задовольняти місцеві енергетичні потреби. Цифри в дужках відповідають завданням зі зразка плану реалізації, наведеного в наступному розділі. Цей план заходів ставить на меті, завдяки ретельному плануванню та виконанню, реалізацію стійкого та сталого енергетичного рішення, адаптованого до конкретних потреб громади.

1. Етап проєктування й проведення тендера

- Завершення дизайн-проєкту (T01-T02)
 - Визначення цілей і сценаріїв проєкту (T01)
 - Визначення загальних цілей і конкретних завдань проєкту мікромережі.
 - Підготовка різних сценаріїв реалізації проєкту з врахуванням різного роду обмежень і вимог.
 - Підготовка початкової концепції та визначення ділянки (T02)
 - Підготовка початкової концепції мікромережі, зокрема потенційних конфігурацій і схем.
 - Визначення й оцінювання потенційних ділянок для монтажу мікромережі, виходячи з критеріїв придатності та можливості реалізації.
 - Підготовка концепції. Концептуальне проєктування є початковим етапом, що включає розроблення загальної архітектури мікромережі, визначення її обсягу, розмірів (кількість фідерів, загальне навантаження для постачання, тривалість постачання), функцій роботи в мережі та поза мережею, експлуатаційної гнучкості, SCADA й телекомунікацій. Монтаж нових компонентів/систем або заміна обладнання (шафи, контрольно-вимірювальні прилади тощо), монтаж нових ліній/розподільних пристроїв і розміщення нових установок – усе це планується переважно на цьому етапі. Крім того, визначаються питання проведення детальних технічних оцінювань та оцінювань витрат, включно з проведенням економічної оптимізації розмірів мікромережі й типів ресурсів. Сюди ж включаються технічні специфікації основних компонентів і функціональні специфікації систем/підсистем.

- Системні дослідження та проектування конфігурації (T03)
 - Проведення детальних досліджень системи для розуміння технічних вимог та обмежень.
 - Проектування конфігурації мікромережі, включно з вибором відповідних технологій і компонентів.
- Оцінювання впливу на довкілля (T04)
 - Проведення оцінювання впливу на довкілля для визначення потенційних екологічних ризиків і стратегій їх усунення.
 - Підготовка звіту про оцінку впливу на довкілля та його подання до компетентних органів на розгляд та погодження.
- Фінансове планування (T05)
 - Щойно отримано дизайн-проект разом з економічним аналізом та кошторисом – готується фінансовий аналіз проекту мікромережі для складання бюджету відповідно до загального графіка реалізації. Сюди входить планування ресурсів, подання матеріалів, необхідних для внесення змін до бюджету, оновлення, за необхідності, інформації про доходи організації-власника (включення, у разі необхідності, вартості проекту до тарифу) і затвердження бюджету органами влади. Якщо йдеться про залучення міжнародних фінансових ресурсів, можливі додаткові етапи розгляду залежно від вимог донора.
 - Отримання необхідних фінансових ресурсів і погоджень для забезпечення життєздатності проекту.
- Обстеження місця розгортання та розвідувальні роботи (T06)
 - Обстеження місця розгортання для збору даних про топографію, стан ґрунту та наявну інфраструктуру.
 - Проведення геотехнічних та інших відповідних досліджень для збору інформації, необхідної для проектування й планування будівництва.
- Дозволи й погодження (T07)
 - Отримання всіх необхідних дозволів і погоджень від місцевих, регіональних і центральних органів влади.
 - Забезпечення дотримання норм зонування, землекористування та захисту довкілля.
- Підготовка та оголошення тендера (T08)
 - Підготовка вичерпної тендерної документації, включно з детальними специфікаціями проекту, обсягом робіт та умовами контракту. Етап проведення тендера потребує погодження з боку різних підрозділів організації-власника та організацій, що надають дозволи. Власник проекту може мати зобов'язання за

законодавством про державні закупівлі, яке визначає проміжки часу для отримання дозволів, видачі тендерної документації та укладення угод. Висновок про оцінку впливу на довкілля та юридичні дозволи на будівництво об'єкта необхідно отримати до початку тендера. Тендери можуть бути публічними й прозорими, а заперечення з боку учасників можуть забрати додатковий час.

- Публічне оголошення тендеру й запрошення до участі підрядників і постачальників, які відповідають вимогам.
- Оцінювання тендерних пропозицій і підписання контракту (T09)
 - Оцінювання тендерних пропозицій за технічними й фінансовими критеріями.
 - Вибір оптимального(-их) підрядника(-ів) та остаточне формулювання умов контракту.
 - Підписання контракту на будівництво з вибраним(-и) підрядником(-ами).

2. Період укладення договорів і підготовки до будівництва

- Підготовка повного набору проектної документації (T10)
 - Підготовка та погодження повного набору проектної документації, включно з інженерним проектом, планами електричних мереж і специфікаціями на будівництво.
 - Стадія інженерного проектування в основному реалізується на основі дизайн-проекту та зазвичай визначається в тендерному процесі й виконується головним підрядником. Після завершення тендерного процесу головний підрядник готує інженерні проекти та забезпечує їх погодження замовником/уповноваженим підрозділом. Після погодження реалізуються етапи виробництва, тестування, доставки на об'єкт і впровадження.
- Передача й підготовка земельної ділянки (T11-T12)
 - Передача земельної ділянки підряднику (T11): офіційна передача ділянки проекту підряднику для початку робіт.
 - Підготовка ділянки, залучення сил і засобів, підготовка обладнання (T12).
 - Проведення робіт із підготовки ділянки, включно з її розчищенням і вирівнюванням.
 - Залучення будівельних бригад, обладнання й матеріалів на місці реалізації проекту.
 - Встановлення тимчасових приміщень, включно з офісними, складськими приміщеннями й житлом для працівників.
- Підготовка та подання проектів із реалізації (T13)

- Підготовка й подання підрядниками детальної документації за проектом реалізації та виробництва.
- Розгляд і затвердження органами влади поданих документів для забезпечення відповідності вимогам проекту.

3. Стадія впровадження

Етап реалізації включає період після тендера й передачі земельної ділянки до приймального контролю і фізичного встановлення систем на ділянці. Він включає закупівлю та приймання обладнання, здачу об'єкта після погодження, подання робочого плану та плану залучення сил і засобів, виконання земельних робіт згідно з робочим планом. Заміна основних компонентів або встановлення нових систем вимагає планових відключень, тому може знадобитися координація з регіональними диспетчерськими центрами (оператором системи передачі або розподілу).

- Екскаваційні роботи та підготовка будівельних майданчиків (T14-T15)
 - Екскаваційні роботи та підготовка підстанції, BESS та зони генератора (T14): екскаваційні роботи й підготовка призначених ділянок для монтажу підстанції, BESS і генератора.
 - Будівельні роботи за межами підстанції (T15): початок будівельних робіт за межами основної зони проекту, включно з під'їзними шляхами та інженерними комунікаціями.
- Закупівля й виготовлення обладнання (T16-T17)
 - Замовлення й виготовлення основного обладнання (T16): розміщення замовлення на основне обладнання, необхідне для впровадження мікромережі й нагляд за процесом виробництва.
 - Будівельні роботи на ділянці(-ках) мікромережі (T17): початок будівельних робіт на ділянці(-ках) мікромережі з особливою увагою до побудови необхідної інфраструктури та монтажу компонентів.
- Тестування й доставка (T18-T19)
 - Типові/стандартні випробування основних компонентів (T18). Проведення типових та стандартних випробувань основних компонентів для перевірки їх відповідності стандартам якості та ефективності.
 - Доставка техніки й обладнання на земельну ділянку (T19). Координація доставки обладнання на ділянку, де реалізується проект, забезпечення безпечної та своєчасної доставки.
- Монтаж вторинної інфраструктури та систем (T20-T21)
 - Встановлення вторинної інфраструктури на підстанціях і у віддалених точках, трансформаторних підстанціях, у комунікаційній мережі управління (T20).

- Монтаж розподільних пристроїв, систем управління й захисту, а також BESS і електрогенераторів (T21).
- Функціональне тестування (T22). Проведення функціональних тестів усіх встановлених на ділянці компонентів і систем для забезпечення їх належної роботи та інтеграції.

4. Початкова подача живлення та введення в експлуатацію

- Початкова подача живлення (T23)
 - Початкова подача живлення в систему мікромережі в контрольованому середовищі під наглядом.
 - Перевірка наявності всіх протоколів безпеки й дотримання передбачених ними вимог під час подання напруги.
- Тестування ділянки під напругою (T24)
 - Проведення тестувань ділянки під напругою для моделювання реальних умов експлуатації.
 - Відстеження роботи системи, часу реагування та стійкості до можливих перебоїв.
- Введення в експлуатацію й тестова експлуатація (T25)
 - Підрядник подає заявку на введення в експлуатацію після завершення монтажних робіт. Перед початковою подачею живлення можуть бути проведені випробування на місці робіт. Початкова подача живлення й тестова експлуатація можуть бути елементами процесу введення в експлуатацію або самостійними етапами, залежно від місцевої практики. Для тестової експлуатації мікромережі, розробленої для надзвичайних умов, потрібна співпраця, можливо, з відокремленням регіону розгортання мікромережі від основної електромережі. Необхідна тісна співпраця задля уникнення роботи зі збоями або масштабних перебоїв. Тестова експлуатація може тривати кілька місяців і включати періодичне проведення операцій для перевірки всіх функцій і можливостей.
 - Проведення тестової експлуатації мікромережі для підтвердження її готовності до повномасштабної роботи.
 - Відстеження й документування даних щодо роботи системи з визначенням сфер для вдосконалення.
- Остаточне налаштування й коригування (T26)
 - Виконання необхідних налаштувань і коригувань для оптимізації роботи системи.
 - Перевірка роботи всіх систем відповідно до специфікацій проєкту.

- Моніторинг і остаточна перевірка налаштувань (T27)
 - У процесі тестової експлуатації буде виявлено відхилення від результатів проектування, що дасть можливість оновити налаштування або внести незначні зміни. Успішне завершення моніторингу та перевірки свідчить про те, що мікромережа працюватиме безпечно й надійно в реальних умовах, коли це буде необхідно. Моніторинг і налаштування параметрів здебільшого відбуваються протягом тестової експлуатації.
 - Підготовка комплексної документації для введення в експлуатацію, включно з результатами тестувань, даними щодо роботи та остаточними налаштуваннями.
 - Подання документації у відповідні органи влади для погодження.
 - Передання повністю введеної в експлуатацію системи мікромережі групі з експлуатації та технічного обслуговування.
 - Навчання й підтримка для забезпечення безперешкодного переходу до експлуатаційного режиму.

ДОДАТОК. ПРОГРАМНІ ІНСТРУМЕНТИ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ МІКРОМЕРЕЖІ

Дизайн та оптимізація мікромереж потребують застосування складних програмних засобів, здатних моделювати та аналізувати різні аспекти вартості та ефективності. Ці інструменти відіграють вирішальну роль під час оцінювання різних сценаріїв, інтеграції різноманітних технологій і врахуванні економічних чинників для забезпечення ефективної роботи мікромережі. У цьому розділі представлено основні програмні інструменти, які використовуються для проєктування мікромереж, з наголосом на моделюванні вартості та ефективності, а також самої енергосистеми. Здатність точно моделювати витрати й ефективність роботи гарантує не тільки можливість технічної реалізації мікромереж, але і їх економічну життєздатність і сталість у довгостроковій перспективі.

ІНСТРУМЕНТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВИТРАТ І СЦЕНАРІЇВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ

Інструменти моделювання витрат і сценаріїв відіграють важливу роль в оптимізації проєктування та стратегій експлуатації мікромереж під час дизайну мікромережі. Ці інструменти дозволяють проводити комплексний аналіз різних конфігурацій, сприяючи цим ухваленню обґрунтованих рішень.

Інструменти моделювання вартості та ефективності роботи мікромережі є важливими з кількох причин:

- Економічна доцільність. Ці інструменти допомагають визначити економічну доцільність проєкту мікромережі шляхом аналізу CAPEX, OPEX та потенційних надходжень доходу. Моделюючи різні сценарії, зацікавлені сторони можуть визначити найефективніші з економічного погляду рішення та уникнути надмірних інвестицій.
- Оптимізація ресурсів. Надаючи можливість детального моделювання, ці інструменти дозволяють оптимізувати ресурси, включно з інтеграцією відновлюваних джерел енергії, систем зберігання енергії та звичайних генераторів. Це гарантує здатність мікромережі ефективно задовольняти власні потреби в навантаженні й мінімізувати витрати.
- Аналіз сценаріїв. Ці інструменти дозволяють оцінювати різні сценарії, як-от різні варіанти поєднання енергоресурсів, профілі навантаження та прогнози попиту на майбутнє. Така гнучкість допомагає планувати невизначеності та адаптуватися до мінливих умов.
- Аналіз чутливості. Аналіз чутливості дозволяє користувачам зрозуміти, як зміни ключових параметрів, як-от цін на паливо або зростання навантаження, впливають на загальну якість роботи та вартість мікромережі. Це розуміння має суттєве значення для оцінювання ризиків та управління ними.

Кілька прикладів таких інструментів:

- HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources [Гібридна оптимізація кількох енергетичних ресурсів]) – широко використовуваний інструмент для

оптимізації проектування мікромереж і гібридних енергосистем. За допомогою цього інструмента можна моделювати різні конфігурації енергетичних систем для пошуку найбільш економічно ефективного рішення. HOMER дозволяє проаналізувати як автономні, так і приєднані до мережі системи, з урахуванням відновлюваних джерел енергії, накопичувачів і звичайних генераторів.

- Microgrid Design Toolkit (MDT) був розроблений компанією Sandia National Laboratories. Цей інструмент допомагає в проектуванні та оптимізації мікромереж. Він працює з параметрами надійності, економічності та інтеграції відновлюваних джерел енергії. MDT надає платформу для аналізу різних архітектур мікромереж та їх роботи за різними сценаріями.
- MicrogridUp1 призначений для швидкого оцінювання та оптимізації проєктів мікромереж. Він має інструменти для аналізу сценаріїв, оцінювання вартості й порівняльного аналізу ефективності роботи, що робить його придатним як для попереднього, так і для детального проектування.
- REopt (Renewable Energy Optimization [Оптимізація відновлюваної енергії]) – інструмент, розроблений Національною лабораторією відновлюваних джерел енергії США (NREL), який допомагає оптимізувати енергетичні системи будівель, кампусів, громад і мікромереж. Цей інструмент аналізує інтеграцію відновлюваних джерел енергії та систем зберігання й надає рекомендації щодо економічно ефективних та стійких енергетичних рішень.
- XENDEE – це комплексна платформа для проектування та оптимізації мікромереж. У ній поєднано фінансові та інженерні моделі для оцінювання ефективності роботи мікромережі, а наголос зроблено на економії коштів, енергоефективності та відмовостійкості. XENDEE підтримує планування й розгортання мікромереж, надаючи можливість проведення детального економічного й технічного аналізу.
- DER-VET (Distributed Energy Resources Value Estimation Tool [Інструмент оцінювання вартості розподілених джерел енергії]) – це інструмент із відкритим кодом, розроблений Інститутом досліджень електроенергії (EPRI). Він оцінює вартість РДЕ, включно з їх інтеграцією в мікромережі. DER-VET розглядає різні потоки створення цінностей, як-от енергозбереження, надійність і переваги для довкілля, для підтримки інвестиційних рішень.

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Програмне забезпечення для моделювання енергосистем є ключовим інструментом проектування та аналізу електромереж у мікромережах. Такі інструменти полегшують проведення детальних досліджень різних критичних аспектів, таких як потік навантаження, стабільність, аналіз відмов та інтеграція РДЕ. Завдяки забезпеченню комплексного моделювання такі інструменти гарантують технічну надійність проєктів мікромереж і їхню здатність задовольняти експлуатаційні вимоги.

- Аналіз поточкорозподілу визначає потоки струму, активної та реактивної потужності та рівні напруги в електромережі в стаціонарних умовах. Проведення цього аналізу є важливим для забезпечення здатності мікромережі витримувати очікувані навантаження без таких проблем, як падіння напруги або надмірні втрати.

Моделюючи різні сценарії, інженери можуть оптимізувати розміщення й потужність компонентів, щоб підвищити ефективність і надійність мережі.

- У дослідженнях стабільності оцінюють, як мікромережа реагує на такі порушення, як, наприклад, раптові зміни навантаження або втрата генерувальної установки. Ці дослідження є критично важливими для забезпечення здатності мікромережі підтримувати стабільну роботу за різних умов. Моделюючи динамічну поведінку, інженери можуть розробляти стратегії управління та схеми захисту, які підвищують відмовостійкість мікромережі.
- Аналіз відмов передбачає моделювання умов збоїв (наприклад, короткого замикання), яке дозволяє зрозуміти вплив таких відмов на мікромережу й розробити відповідні системи захисту. Цей аналіз допомагає виявити потенційні слабкі місця в мережі й розробити стратегії швидкої локалізації несправностей, щоб запобігти масовим відключенням і пошкодженням обладнання.
- Інтеграція РДЕ – сонячних панелей, дизельних генераторів, систем зберігання енергії тощо – у мікромережу пов'язана з особливими проблемами. Інструменти моделювання дозволяють детально змоделювати ці ресурси, включно з їх переривчастим характером і взаємодію з мережею. Зрозумівши цю динаміку, інженери зможуть оптимізувати інтеграцію РДЕ, щоб підвищити якість роботи та стійкість мікромережі.

Приклади програмного забезпечення для моделювання енергосистем:

- DigSILENT PowerFactory – універсальний і широко використовуваний інструмент аналізу енергосистем, призначений для забезпечення моделювання мікромереж. Він містить комплексні функції аналізу потоку навантаження, дослідження стабільності, аналізу відмов та інтеграції РДЕ. PowerFactory відомий своєю точністю й можливостями детального моделювання, що робить його кращим вибором для інженерів.
- PSS®SINCAL від Siemens – комплексний засіб моделювання енергосистем для планування, моделювання та аналізу електричних або трубопровідних мереж, зокрема мереж розподілу й промислових мереж. Цей інструмент містить низку функцій аналізу, включно з аналізом якості електроенергії, стабільності частоти, взаємозв'язку розподіленої генерації, координації захисту та економічних рішень із дизайну.
- NEPLAN – комплексний набір інструментів для аналізу й планування енергосистем. Він підтримує функції аналізу потоку навантаження, аналізу відмов, стійкості в перехідному режимі та оптимізації розподіленої генерації. NEPLAN відомий своїм зручним інтерфейсом і універсальними можливостями моделювання, що робить його чудовим інструментом проектування та оптимізації мікромереж.
- SYME розроблений для аналізу та планування електричних мереж. Цей інструмент має модулі аналізу потоку навантаження, короткого замикання, гармонік та інтеграції РДЕ. SYME широко використовують для проектування та оптимізації мікромереж, щоб забезпечити їх ефективну й надійну роботу.

Такі інструменти моделювання вартості та ефективності роботи як HOMER і REopt дозволяють проводити комплексні види економічного й технічного аналізу для забезпечення технічної обґрунтованості та економічної життєздатності мікромереж. Програмне забезпечення для моделювання енергосистем, зокрема DIgSILENT PowerFactory та PSS®SINCAL, допомагає провести детальний аналіз електромереж для забезпечення надійності їх дизайну та їх здатності відповідати експлуатаційним вимогам. Завдяки використанню цих передових інструментів інженери можуть розробляти ефективні, стійкі та сталі мікромережі.