

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і
енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
інженерії енергосистем

_____/Каплун В.В./
(підпис)

«____» _____ 2026 р.

_____/Антипов Є.О./
(підпис)

«____» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему: «ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТАТИЧНОГО ДЖЕРЕЛА
ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ В СИСТЕМІ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ
ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА»**

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Троханяк В. І.
(ПІБ)

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

Д.Т.Н. професор
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Каплун В.В.
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Кучмар О.О.
(ПІБ)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інженерії енергосистем
канд. техн. наук, доц. _____ Антипов Є.О.
“ _____ ” _____ 2024 року

**ЗАВДАННЯ
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ**

Кучмару Олексію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(код і назва)

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-наукова
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської роботи **«Дослідження параметрів статичного джерела електроживлення в системі енергоменеджменту локального об'єкта»**
затверджена наказом ректора Національного університету біоресурсів і природокористування України від 18.11.2024 р. № 2058 «С».

Термін подання завершеної роботи на кафедру 22.05.2026р
(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської роботи: -

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Всебічне вивчення патентно-кон'юктурної та прикладної бази закордонного і вітчизняного досвіду з енергоощадних технологій та обладнання, в яких використовуються електромагнітні системи супроводження горіння пальної суміші.
2. Розробка удосконаленої електромагнітної системи супроводження горіння вуглеводневої суміші.
3. Дослідження електродинамічних процесів електричного ковшного розряду при спалюванні вуглеводневої суміші.

Перелік графічного матеріалу: презентація виконана в програмному середовищі MS Power Point, наочні матеріали з результатами дослідження

Дата видачі завдання «18» листопада 2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Каплун В.В.

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Кучмар О.О.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота: 87с., 3 табл., 40 рис., 15 джерел

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності та надійності електропостачання локальних об'єктів в умовах зростання вартості енергоресурсів, а також широкого впровадження систем енергоменеджменту. Особливого значення набуває використання статичних джерел електроживлення, які забезпечують стабілізацію параметрів електроенергії, безперервність живлення та інтеграцію різнорідних джерел енергії в єдину систему.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування систем електроживлення локальних об'єктів в умовах комбінованого енергозабезпечення.

Предметом дослідження є параметри статичних джерел електроживлення та їх вплив на показники якості електроенергії, надійність та ефективність роботи систем енергоменеджменту.

Метою роботи є дослідження параметрів статичного джерела електроживлення в системі енергоменеджменту локального об'єкта, а також розробка підходів до підвищення ефективності функціонування комбінованих систем електроживлення.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішено такі задачі:

- проаналізовано сучасні підходи до організації систем енергоменеджменту;
- досліджено нормативно-технічні вимоги до управління енергоресурсами;
- розглянуто особливості функціонування локальних систем електроживлення з полігенерацією;
- проведено аналіз параметрів статичних джерел електроживлення;

- розроблено алгоритм управління комбінованим електроживленням;
- виконано порівняльний аналіз режимів роботи системи;
- проведено імітаційне моделювання процесів зміни параметрів електроживлення.

У теоретичній частині роботи розглянуто основні принципи побудови систем енергоменеджменту та їх роль у підвищенні ефективності використання енергоресурсів. Проаналізовано особливості функціонування електричних мереж локальних об'єктів та визначено ключові фактори, що впливають на якість електроенергії.

Особливу увагу приділено системам з полігенерацією, які передбачають використання декількох джерел енергії. Встановлено, що такі системи характеризуються підвищеною складністю управління, необхідністю синхронізації параметрів джерел та наявністю перехідних процесів. Показано, що статичні джерела електроживлення виконують функцію буферних елементів, забезпечуючи стабілізацію напруги та безперервність живлення.

У практичній частині роботи розроблено алгоритм управління системою електроживлення локального об'єкта, який базується на принципах безперервного моніторингу параметрів системи та адаптивного вибору режимів роботи. Алгоритм забезпечує автоматичне перемикання між джерелами живлення, оптимальний розподіл навантаження та стабілізацію параметрів електроенергії.

Проведений порівняльний аналіз режимів роботи показав, що використання статичних джерел електроживлення дозволяє значно підвищити якість електроенергії та надійність електропостачання. Найбільш ефективним є комбінований режим, який забезпечує гнучкість управління та мінімізацію втрат енергії.

Результати імітаційного моделювання підтверджують ефективність запропонованих рішень та демонструють можливість стабілізації напруги в

умовах змінного навантаження та нестабільної роботи зовнішньої електромережі.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проєктуванні, модернізації та експлуатації систем електроживлення локальних об'єктів. Запропоновані підходи можуть бути застосовані для підвищення енергоефективності, зменшення втрат та забезпечення безперебійної роботи обладнання.

Наукова новизна роботи полягає у вдосконаленні підходів до управління комбінованими системами електроживлення з використанням статичних джерел, а також у визначенні впливу їх параметрів на ефективність функціонування систем енергоменеджменту.

Таким чином, результати роботи підтверджують доцільність застосування статичних джерел електроживлення як ключового елементу сучасних систем енергоменеджменту локальних об'єктів.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	9
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1	12
НОРМАТИВНІ ТА ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ	12
1.1. Місце і роль статичних джерел живлення в сучасних системах енергозабезпечення локальних об'єктів	12
1.2. Основні положення стандартів у сфері енергоменеджменту	13
1.2.1. Енергетична політика	15
1.2.2. Енергетичний аналіз	16
1.3. Загальна характеристика енергоменеджменту	17
1.3.1. Надійність енергопостачання	20
1.3.2. Політика ціноутворення та управління енергоспоживанням.....	22
1.3.3. Ефективність використання енергії та екологічні аспекти	23
РОЗДІЛ 2	25
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТАТИЧНОГО ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ В СИСТЕМІ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА.....	25
2.1. Сучасні методи управління енергоефективністю локальних об'єктів з полігенерацією	25
2.2. Обробка даних, статистичні показники та графіки	26
2.3. Інтерпретація результатів, оцінка невизначеності та рекомендації	30
2.4. Аналіз формування балансів системи енергоменеджменту локального об'єкту на основі експериментальних даних з урахуванням сезонності	32
2.4.1. Особливості формування балансу локального об'єкту у літній період (у липні)	32
2.4.2. Особливості формування балансу локального об'єкту у осінній період (у вересні)	34
2.4.3. Особливості формування балансу локального об'єкту у зимовий період (у січні).....	36
2.5. Аналіз частки різнорідних джерел енергії в загальному балансі локального об'єкту з урахуванням сезонності.....	38

2.6. Обмеження щодо застосування параметрів елементів енергосистеми енергетичної спільноти з власними джерелами.....	42
2.7. Висновки до 2 розділу.....	43
2.8. Техніко-економічні показники впровадження локальних електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами на рівні енергетичних спільнот	44
РОЗДІЛ 3	50
ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ.....	50
3.1. Сучасні методи управління енергоефективністю локальних об'єктів з полігенерацією	50
3.2. Основи теорії електричних мереж у задачах енергоменеджменту.....	53
3.3. Принцип управління комбінованим електрозабезпеченням	55
3.4. Особливості функціонування локальних систем електроживлення з декількома джерелами	57
РОЗДІЛ 4	60
РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ПРОГРАМНО-АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА.....	60
4.1. Огляд програмно-технічних комплексів, що використовуються для управління енергоспоживанням	60
4.2. Вибір апаратно-технічної платформи та визначення її характеристик.	63
4.3. Вибір та характеристика вимірювальних модулів системи	67
4.4. Програмне забезпечення для реалізації системи динамічного енергоменеджменту	71
4.5. Опис алгоритму роботи програми управління	74
4.6. Порівняльний аналіз режимів роботи системи електроживлення.....	80
ВИСНОВКИ.....	84
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	86

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АКБ — акумуляторна батарея

АС — автоматизована система

АСУ — автоматизована система управління

ВДЕ — відновлювані джерела енергії

ГЕС — гідроелектростанція

ДБЖ (UPS) — джерело безперебійного живлення (Uninterruptible Power Supply)

ЕС — енергетична система

ЕЕ — електрична енергія

ЕМ — енергоменеджмент

ІБП — інверторно-батареєний пристрій

ККД — коефіцієнт корисної дії

КСЕ — комплексна система енергозабезпечення

ЛО — локальний об'єкт

ПЕОМ — персональна електронно-обчислювальна машина

СЕ — система електроживлення

СЕЕ — система енергетичного електропостачання

СЕМ — система енергоменеджменту

СЕС — сонячна електростанція

ТП — трансформаторна підстанція

ЧП — частотний перетворювач

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку енергетичних технологій та зростання вартості енергоресурсів питання ефективного використання електроенергії набуває особливої актуальності. Значна частина витрат підприємств, комерційних та житлових об'єктів пов'язана саме зі споживанням енергії, що безпосередньо впливає на їх економічну ефективність. У зв'язку з цим важливим напрямом розвитку є впровадження сучасних систем енергоменеджменту, які дозволяють оптимізувати процеси споживання, контролю та розподілу електроенергії.

Системи енергоменеджменту забезпечують збір, обробку та аналіз даних щодо енергоспоживання в режимі реального часу. Це дає можливість своєчасно виявляти перевитрати, прогнозувати пікові навантаження, а також приймати обґрунтовані рішення щодо підвищення енергоефективності об'єктів. Особливо важливу роль у таких системах відіграють джерела електроживлення, параметри яких визначають стабільність, надійність та якість електропостачання.

Актуальність даної роботи обумовлена необхідністю дослідження параметрів статичних джерел електроживлення в складі систем енергоменеджменту локальних об'єктів. Саме статичні джерела живлення забезпечують безперервність електропостачання, стабілізацію напруги та захист обладнання від аварійних режимів. В умовах зростаючих вимог до якості електроенергії їх правильний вибір та налаштування є критично важливими.

Використання сучасного програмного забезпечення в системах енергоменеджменту дозволяє формувати детальні звіти про споживання енергії, аналізувати тенденції, будувати графіки навантаження та прогнозувати майбутні витрати. Це сприяє більш раціональному використанню ресурсів та зменшенню фінансових витрат. Крім того, такі

системи дозволяють оперативно реагувати на відхилення в роботі енергосистеми та запобігати аварійним ситуаціям.

Об'єктом дослідження є система енергоменеджменту локального об'єкта.

Предметом дослідження виступають параметри статичного джерела електроживлення та їх вплив на ефективність функціонування системи енергоменеджменту.

Метою роботи є дослідження та аналіз параметрів статичного джерела електроживлення, а також визначення їх впливу на надійність і ефективність електропостачання локального об'єкта.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- 1) проаналізувати сучасні підходи до побудови систем енергоменеджменту;
- 2) дослідити характеристики статичних джерел електроживлення;
- 3) визначити основні параметри, що впливають на якість електропостачання;
- 4) розробити рекомендації щодо оптимізації роботи системи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при проєктуванні та модернізації систем енергоменеджменту для підвищення енергоефективності локальних об'єктів.

РОЗДІЛ 1

НОРМАТИВНІ ТА ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ДО ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

1.1. Місце і роль статичних джерел живлення в сучасних системах енергозабезпечення локальних об'єктів

У сучасних умовах розвитку енергетики локальні об'єкти дедалі частіше використовують комбіновані системи електропостачання, що інтегрують відновлювані джерела енергії, традиційні мережеві підключення та накопичувальні пристрої. Ключовим елементом таких систем виступають статичні джерела живлення — інвертори з акумулюючими потужностями, які виконують функцію інтегратора сонячної електростанції та інших джерел енергії.

Їхня роль полягає у забезпеченні стабільності та безперервності електропостачання, що особливо важливо для об'єктів із критичними навантаженнями. Інверторно-акумулюючі комплекси здійснюють перетворення постійного струму від сонячних панелей у змінний, придатний для живлення обладнання, а також накопичують надлишкову енергію в акумуляторних батареях для подальшого використання у пікові періоди або при аварійному відключенні зовнішньої мережі.

Важливим аспектом є їхня функція буферного елемента: статичні джерела згладжують коливання напруги, компенсують перехідні процеси та забезпечують синхронізацію параметрів різнорідних джерел. Це дозволяє інтегрувати сонячну електростанцію в єдину систему енергоменеджменту без ризику зниження якості електроенергії.

Крім того, інвертори з акумулюючими потужностями сприяють оптимізації розподілу навантаження між джерелами живлення. Завдяки алгоритмам адаптивного управління вони автоматично перемикають режими

роботи, мінімізуючи втрати енергії та забезпечуючи максимальний коефіцієнт корисної дії системи.

Таким чином, статичні джерела живлення займають центральне місце у сучасних системах енергозабезпечення локальних об'єктів. Вони не лише гарантують надійність та якість електропостачання, але й створюють умови для ефективної інтеграції відновлюваних джерел енергії у структуру енергоменеджменту.

1.2. Основні положення стандартів у сфері енергоменеджменту

У сучасних умовах ефективне управління енергоресурсами є одним із ключових факторів підвищення конкурентоспроможності підприємств та організацій. Саме тому значна увага приділяється впровадженню систем енергетичного менеджменту, які базуються на міжнародних стандартах.

Одним із основних нормативних документів у цій сфері є стандарт ISO 50001, який встановлює вимоги до створення, впровадження, підтримки та вдосконалення систем енергоменеджменту. Його застосування дозволяє організаціям системно підходити до процесу управління енергією, підвищувати енергоефективність та зменшувати витрати.

Головною ідеєю стандарту є забезпечення постійного покращення енергетичних показників за рахунок впровадження циклу PDCA (плануй – виконуй – перевіряй – дій).

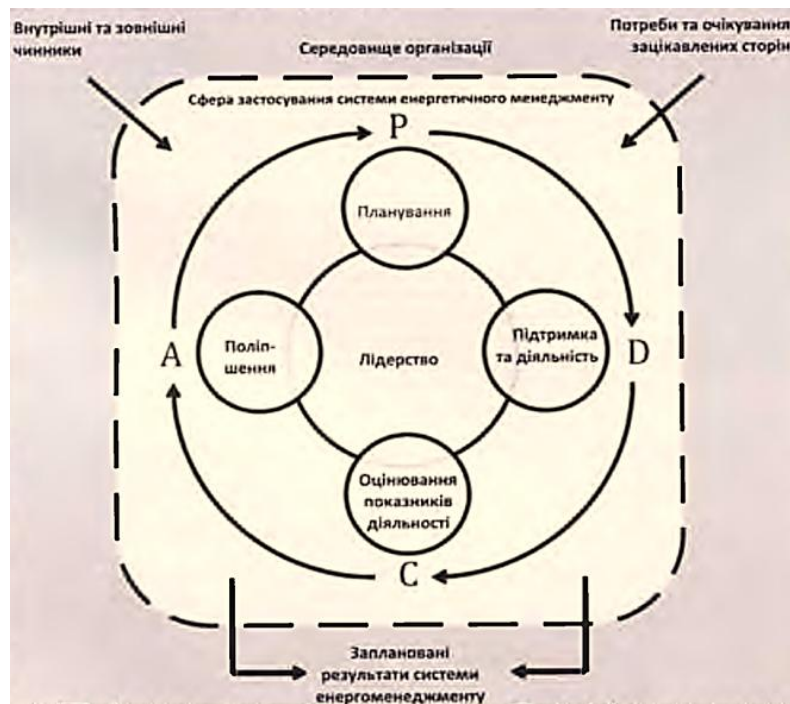


Рис. 1.1. Цикл плануй – виконуй – перевірй – дій

Даний підхід дозволяє організаціям:

- формувати енергетичну політику;
- встановлювати цілі та показники ефективності;
- здійснювати моніторинг і аналіз споживання енергії;
- впроваджувати заходи з оптимізації.

Важливою складовою стандарту є поняття енергетичної результативності, яка характеризує ефективність використання енергоресурсів. Для її оцінки застосовуються відповідні показники, що дозволяють порівнювати результати діяльності у часі та визначати напрями вдосконалення.

Застосування ISO 50001 не залежить від типу організації чи галузі діяльності. Він може бути інтегрований з іншими системами управління, що спрощує його впровадження на підприємствах різного масштабу.

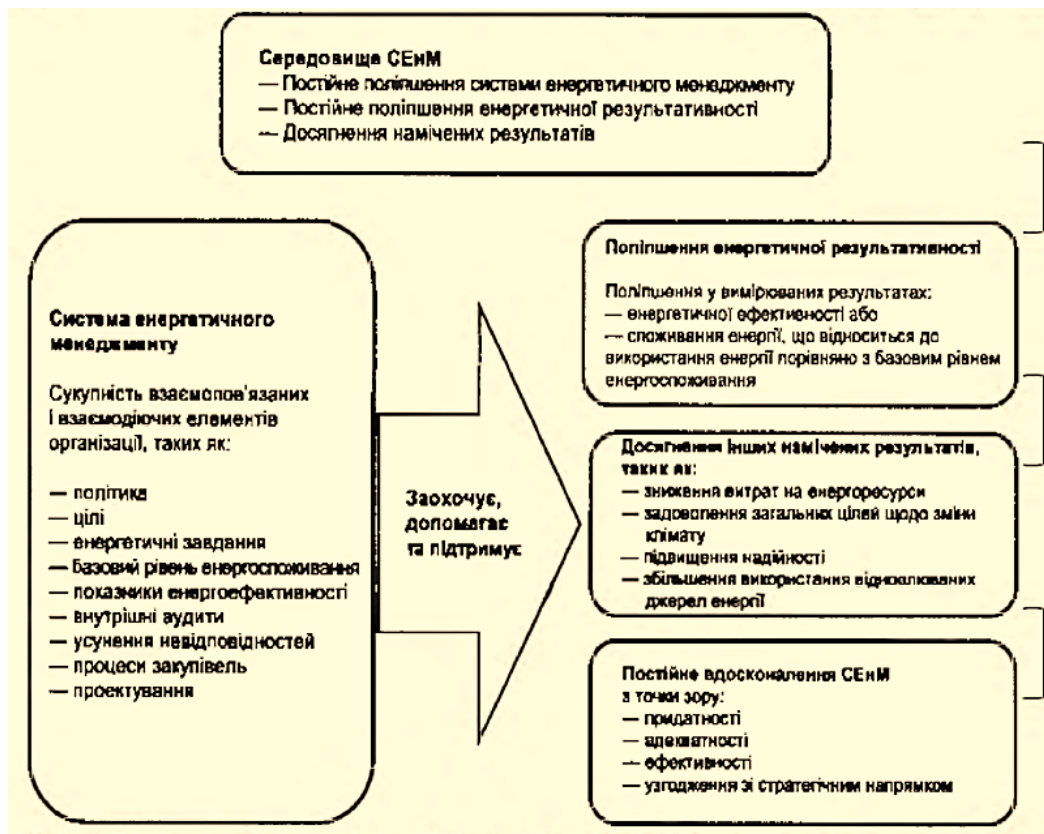


Рис. 1.2. Взаємозв'язок між енергетичною результативністю та СЕММ

1.2.1. Енергетична політика

Енергетична політика є основою функціонування системи енергоменеджменту. Вона визначає загальний напрям діяльності організації у сфері ефективного використання енергоресурсів.

Керівництво організації повинно сформулювати та задокументувати енергетичну політику, яка має:

- відповідати цілям та масштабам діяльності;
- містити зобов'язання щодо підвищення енергоефективності;
- враховувати вимоги законодавства;
- бути доступною для персоналу.

Також важливим є регулярний перегляд політики з урахуванням змін у діяльності організації та зовнішніх умов. Це дозволяє забезпечити її актуальність і ефективність.

1.2.2. Енергетичний аналіз

Енергетичний аналіз є важливим етапом впровадження системи енергоменеджменту.

Його метою є визначення структури споживання енергії та виявлення можливостей для її оптимізації.

У процесі аналізу:

- визначаються основні джерела споживання енергії;
- формується база даних щодо витрат;
- оцінюється ефективність використання ресурсів;
- визначаються потенційні заходи з енергозбереження.

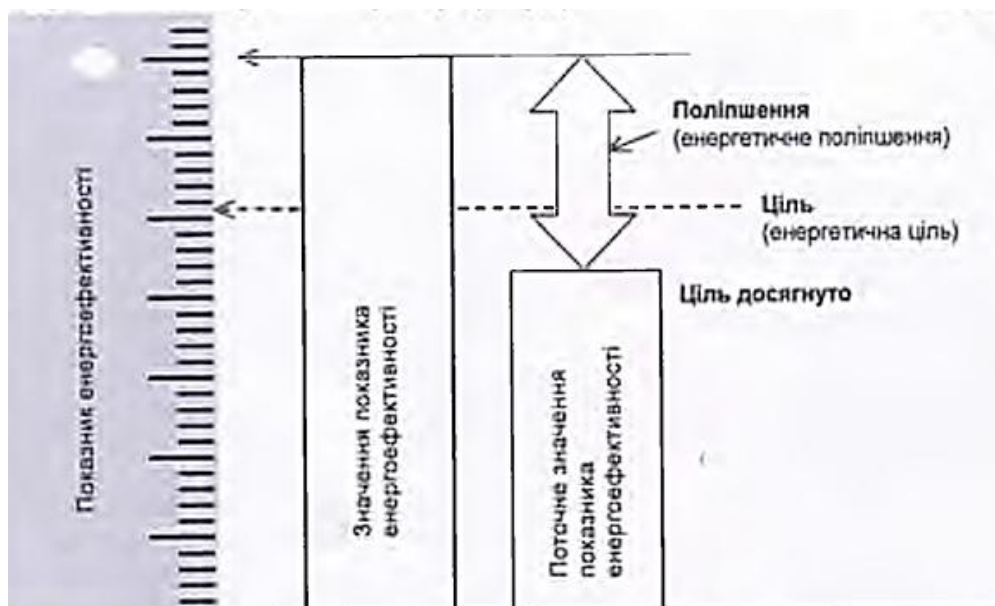


Рис. 1.3. Показник енергоефективності та виміряне значення показника енергоефективності

Результати енергетичного аналізу використовуються для встановлення базового рівня енергоспоживання та формування показників ефективності.

Крім того, важливим інструментом є енергетичний аудит, який дозволяє детально дослідити роботу окремих елементів системи та визначити причини неефективного використання енергії.

1.3. Загальна характеристика енергоменеджменту

Енергоменеджмент є важливою складовою сучасних систем управління, спрямованою на підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів та зниження витрат на їх споживання. У сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв та підвищення вимог до екологічної безпеки питання раціонального використання енергії набуває особливої актуальності.

Під енергоменеджментом розуміють сукупність організаційних, технічних та інформаційних заходів, які спрямовані на контроль, аналіз та оптимізацію процесів споживання енергії. Основною метою енергоменеджменту є досягнення максимальної ефективності використання енергоресурсів при забезпеченні необхідного рівня функціонування об'єкта.

Система енергоменеджменту охоплює всі рівні управління – від державного та регіонального до рівня окремих підприємств і локальних об'єктів. На кожному з цих рівнів вирішуються свої специфічні завдання, пов'язані з плануванням, обліком, аналізом та регулюванням енергоспоживання.

На державному рівні основними функціями є формування енергетичної політики, розробка нормативної бази, стимулювання впровадження енергоефективних технологій та контроль за використанням енергетичних ресурсів. На регіональному рівні здійснюється аналіз потенціалу енергозбереження, планування розвитку енергетичної інфраструктури та реалізація програм підвищення енергоефективності.

Найбільш важливим є рівень локальних об'єктів (підприємств, будівель, виробничих комплексів), де безпосередньо відбувається споживання енергії. Саме на цьому рівні реалізуються конкретні заходи з оптимізації енергоспоживання, впроваджуються системи моніторингу та автоматизованого управління.

Структуру сучасної системи енергоменеджменту можна представити у вигляді багаторівневої моделі, де кожен рівень виконує свої функції та взаємодіє з іншими. Така структура дозволяє забезпечити ефективне управління енергетичними потоками та координацію дій між різними учасниками процесу.



Рис. 1.4. Структурна схема енергоменеджменту

Одним із ключових елементів енергоменеджменту є система збору та обробки даних про енергоспоживання. Вона включає в себе вимірювальні прилади, канали передачі інформації та програмне забезпечення для аналізу отриманих даних. Завдяки цьому забезпечується можливість отримання достовірної інформації про обсяги споживання енергії в реальному часі.

Застосування таких систем дозволяє:

- здійснювати контроль за споживанням енергії;
- виявляти неефективні режими роботи обладнання;
- прогнозувати пікові навантаження;
- оптимізувати графіки споживання.

Важливою складовою енергоменеджменту є використання сучасних інформаційних технологій, які забезпечують автоматизацію процесів обліку та аналізу енергоресурсів. Це значно підвищує точність розрахунків та дозволяє оперативно приймати управлінські рішення.

Крім технічних аспектів, енергоменеджмент включає організаційні заходи, такі як підготовка персоналу, розробка внутрішніх регламентів та впровадження систем мотивації для зниження енергоспоживання. Важливим фактором є також формування енергетичної культури серед працівників, що сприяє більш відповідальному ставленню до використання ресурсів.

Не менш важливою складовою є впровадження енергоефективних технологій та використання альтернативних джерел енергії. Це дозволяє не лише зменшити витрати, але й знизити негативний вплив на навколишнє середовище.

У сучасних умовах особливу роль відіграють автоматизовані системи управління енергоспоживанням, які інтегрують функції моніторингу, аналізу та управління в єдину систему. Такі системи дозволяють реалізувати комплексний підхід до управління енергетичними ресурсами.

Таким чином, енергоменеджмент є складною багаторівневою системою, яка поєднує технічні, організаційні та інформаційні компоненти.

Його впровадження дозволяє підвищити ефективність використання енергії, забезпечити надійність енергопостачання та знизити витрати на експлуатацію об'єктів.

1.3.1. Надійність енергопостачання

Надійність енергопостачання є одним із ключових показників ефективності функціонування будь-якого локального об'єкта, незалежно від його призначення. У сучасних умовах навіть короточасні перебої в електропостачанні можуть призводити до значних економічних втрат, порушення технологічних процесів, втрати даних або виходу з ладу обладнання.

Під надійністю енергопостачання розуміють здатність системи забезпечувати безперервне та якісне електроживлення споживачів у заданих межах параметрів. До основних показників надійності відносять:

- безперервність електропостачання;
- стабільність напруги та частоти;
- допустимий рівень відхилень параметрів електроенергії;
- час відновлення живлення після аварій.

У структурі систем енергоменеджменту локальних об'єктів питання надійності розглядається комплексно, з урахуванням як зовнішніх факторів (стан електромережі, надійність централізованого електропостачання), так і внутрішніх (характер навантаження, наявність резервних джерел, система управління).

Особливу роль у забезпеченні надійності відіграють статичні джерела електроживлення, які використовуються для стабілізації параметрів електроенергії та забезпечення безперервності живлення. До таких джерел відносяться:

- джерела безперебійного живлення (UPS);
- випрямлячі та інвертори;

- системи накопичення енергії.

Їх використання дозволяє компенсувати провали напруги, згладжувати коливання та забезпечувати живлення критичних споживачів у разі відключення основного джерела.

У системах енергоменеджменту важливим є не лише факт наявності резервного джерела, а й правильний вибір його параметрів. До основних параметрів статичних джерел живлення відносяться:

- номінальна потужність;
- час автономної роботи;
- швидкість перемикавання;
- коефіцієнт корисної дії;
- якість вихідної напруги.

Невідповідність цих параметрів реальним потребам об'єкта може призвести до зниження ефективності всієї системи або навіть до аварійних ситуацій.

У сучасних системах також широко застосовуються автоматизовані системи управління, які дозволяють здійснювати моніторинг стану енергопостачання в режимі реального часу. Вони забезпечують:

- оперативне виявлення відхилень;
- автоматичне перемикавання на резервні джерела;
- аналіз причин аварій;
- формування статистики надійності.

Таким чином, забезпечення надійності енергопостачання є комплексною задачею, яка включає технічні, організаційні та інформаційні заходи. В умовах використання систем енергоменеджменту особливого значення набуває правильний вибір та дослідження параметрів статичних джерел електроживлення.

1.3.2. Політика ціноутворення та управління енергоспоживанням

Ефективність функціонування систем енергоменеджменту значною мірою залежить від економічних факторів, серед яких важливе місце займає політика формування тарифів на енергоресурси. Вартість електроенергії безпосередньо впливає на структуру витрат підприємств і стимулює впровадження заходів з енергозбереження.

У сучасних умовах відбувається поступовий перехід до ринкових механізмів ціноутворення, що передбачає врахування попиту і пропозиції на енергоресурси. Це призводить до появи таких явищ, як:

- пікові та нічні тарифи;
- диференціація цін залежно від обсягів споживання;
- вплив сезонних факторів.

У зв'язку з цим системи енергоменеджменту повинні враховувати не лише технічні параметри, але й економічні аспекти споживання енергії. Одним із важливих завдань є оптимізація графіків навантаження з метою зменшення витрат.

Програмне забезпечення, що використовується в системах енергоменеджменту, дозволяє:

- аналізувати структуру споживання енергії;
- прогнозувати періоди пікового навантаження;
- формувати рекомендації щодо перенесення частини навантаження на менш завантажені періоди;
- оцінювати економічний ефект від впровадження енергозберігаючих заходів.

Важливим елементом є також формування енергетичних бюджетів, які базуються на прогнозах споживання та ринкових умовах. Це дозволяє більш точно планувати витрати та уникати перевищення встановлених лімітів.

У контексті дослідження параметрів статичних джерел електроживлення слід зазначити, що їх використання також має економічне

обґрунтування. Хоча впровадження таких систем потребує додаткових інвестицій, вони дозволяють:

- зменшити втрати від аварійних відключень;
- підвищити ефективність використання електроенергії;
- забезпечити стабільну роботу обладнання.

Таким чином, поєднання технічних і економічних аспектів дозволяє досягти максимального ефекту від впровадження систем енергоменеджменту.

1.3.3. Ефективність використання енергії та екологічні аспекти

Ефективність використання енергії є одним із основних критеріїв оцінки діяльності систем енергоменеджменту. Вона характеризує співвідношення між корисним ефектом від використання енергії та її витратами.

Підвищення енергоефективності досягається за рахунок:

- модернізації обладнання;
- впровадження енергозберігаючих технологій;
- оптимізації режимів роботи;
- використання альтернативних джерел енергії.

У системах енергоменеджменту важливу роль відіграє оцінка показників енергоефективності, які дозволяють визначити рівень використання ресурсів та виявити можливості для покращення.

Крім економічного ефекту, підвищення ефективності використання енергії має значний екологічний вплив. Зменшення споживання енергоресурсів призводить до скорочення викидів шкідливих речовин в атмосферу, зокрема:

- діоксиду вуглецю (CO_2);
- оксидів азоту (NO_x);
- оксидів сірки (SO_x).

Це особливо актуально в умовах глобальних змін клімату та посилення вимог до екологічної безпеки.

Важливим напрямом є також використання відновлюваних джерел енергії, які дозволяють зменшити залежність від традиційних енергоресурсів. Однак їх впровадження потребує інтеграції з існуючими системами енергопостачання, що підвищує роль систем енергоменеджменту.

У цьому контексті статичні джерела електроживлення можуть виконувати функцію стабілізації та накопичення енергії, що особливо важливо при використанні нестабільних джерел, таких як сонячна чи вітрова енергія.

Для забезпечення ефективного функціонування системи необхідно:

- проводити регулярний моніторинг показників;
- здійснювати енергетичний аудит;
- впроваджувати заходи з підвищення ефективності;
- оцінювати результати та коригувати стратегію.

Таким чином, ефективність використання енергії є комплексним показником, який поєднує економічні, технічні та екологічні аспекти. У рамках даної роботи особливу увагу приділяється дослідженню параметрів статичних джерел електроживлення як важливого елемента підвищення енергоефективності локальних об'єктів.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТАТИЧНОГО ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ В СИСТЕМІ ЕНЕРГОМЕНДЖМЕНТУ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА

2.1. Сучасні методи управління енергоефективністю локальних об'єктів з полігенерацією

У цьому підрозділі наведено детальний опис апаратної конфігурації, умов експлуатації та процедур калібрування, які забезпечують достовірність отриманих експериментальних даних. Експериментальна установка складається з трифазного гібридного інвертора 20 кВт (модель Deye згідно з технічним паспортом), акумуляторної батареї визначеної ємності, PV-масиву, точки підключення до зовнішньої мережі та допоміжного обладнання (трансформатори струму, трансформатори напруги, запобіжники, вимикачі, погодна станція). Опис апаратної частини повинен містити: марку і модель інвертора, параметри АКБ (тип, ємність, номінальна напруга), характеристики PV-масиву (номінальна потужність, V_{oc} , I_{sc}), схему підключення та умови монтажу (температурний режим, вентиляція).

Методика вимірювань і калібрування. Перед початком серії вимірювань виконано калібрування приладів згідно з інструкціями виробника: перевірено нульову похибку, лінійність у робочому діапазоні та синхронізацію часових міток між реєстраторами і платформою DeyeCloud. Інтервали реєстрації: 1 хв для детальних добових аналізів, агрегація до добових сум для місячних/річних трендів. Для зменшення впливу шумів застосовано апаратні фільтри та програмну обробку (медіанний фільтр, видалення аномалій за правилом 3σ). Критерії відбору даних: відсутність пропусків понад 5 хв у добовому інтервалі, відсутність одночасних аномалій у всіх фазах, відсутність технічних робіт у періоді збору.

2.2. Обробка даних, статистичні показники та графіки

У цьому підрозділі описано послідовність обробки даних, перелік розрахованих статистичних показників та місця для вставки 8 графіків з DeyeCloud. Обробка виконана в кілька етапів: попередня очистка → синхронізація часових міток → фільтрація → агрегація → розрахунок статистик → візуалізація. Розраховані показники: середня активна потужність, пікова потужність, сумарна вироблена енергія, середній ККД інвертора, RMS-напруга по фазах, THD, коефіцієнт потужності, дисперсія та стандартне відхилення. Для виявлення трендів застосовано ковзне середнє та автокореляційний аналіз; для оцінки сезонності — порівняльний аналіз середніх з довірчими інтервалами.

Аналіз добового часового ряду дозволяє виявити миттєві реакції інвертора на зміну навантаження, короткочасні перехідні процеси та поведінку при пікових навантаженнях. Для цього періоду використовуються дані з агрегацією 1 година.

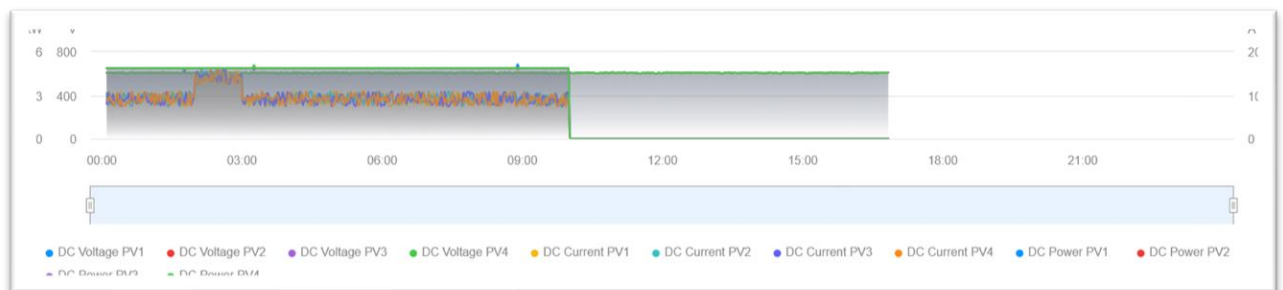


Рис. 2.1. — Останній день

Часовий ряд активної потужності та фазних напруг інвертора за останній день. На графіку показано миттєві коливання потужності, часи пікових навантажень та реакцію інвертора на короткочасні зміни споживання.

Місячний аналіз дозволяє оцінити повторюваність добових профілів, виявити тренди деградації або зміни режимів роботи, а також підрахувати сумарну вироблену енергію за місяць. Для візуалізації застосовано добову агрегацію.

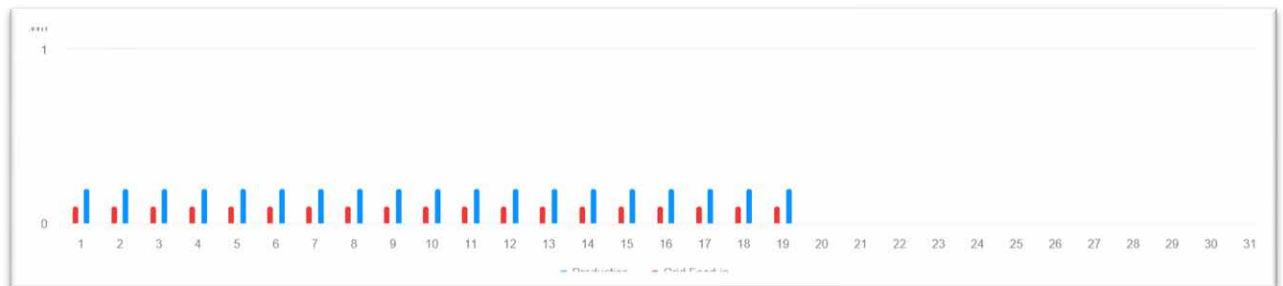


Рис. 2.2. Останній місяць

Добові значення виробленої енергії та середньої активної потужності інвертора за останній місяць. Графік ілюструє повторюваність профілів та вплив погодних/експлуатаційних факторів на добовий виробіток.

Річний аналіз дає змогу виявити довгострокові тенденції, сезонні коливання та потенційні зміни ефективності інвертора. Розглядаються місячні суми та середні показники ККД.

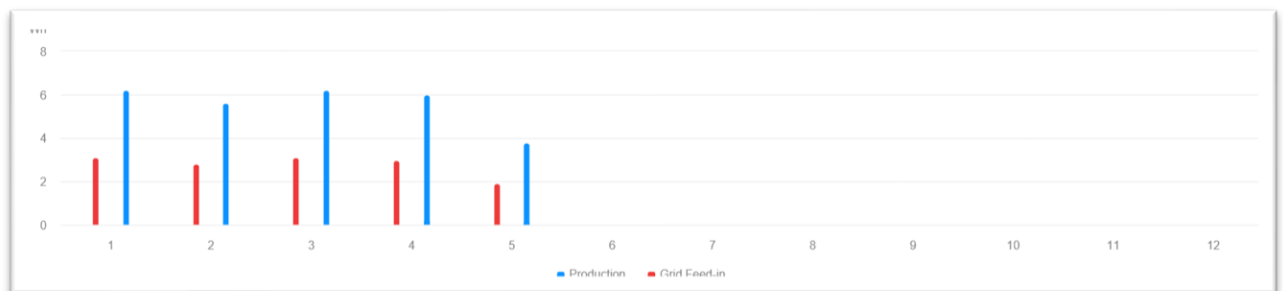


Рис. 2.3. Останній рік

Місячні суми виробленої енергії та середній ККД інвертора за останній рік. На графіку видно сезонні піки та спад виробітку, а також стабільність/зміни в ефективності роботи.

Кумулятивний аналіз всього періоду експлуатації дозволяє оцінити загальну надійність, сумарну вироблену енергію та кількість подій аварійних або нестандартних режимів. Такий огляд важливий для довгострокового планування технічного обслуговування.

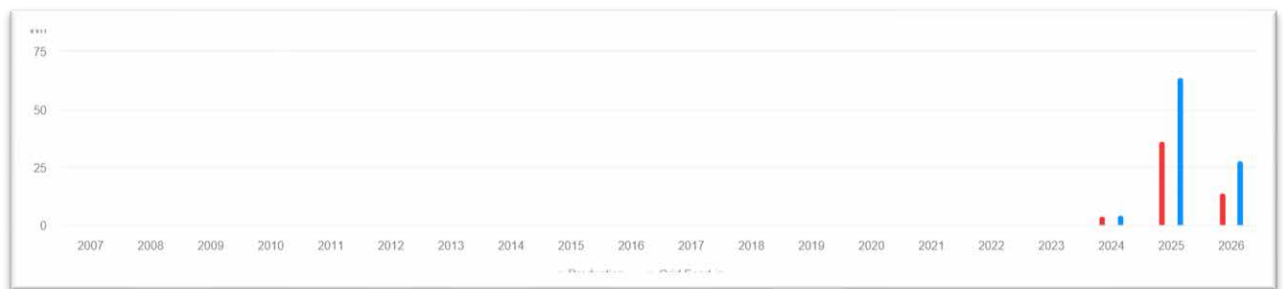


Рис. 2.4. Весь час роботи

Кумулятивна вироблена енергія та кількість зареєстрованих подій за весь період експлуатації інвертора. Графік демонструє загальну продуктивність та інциденти, що впливали на роботу системи.

Для кожного сезону 2025 року розраховано середню добову потужність, пікові значення та середній ККД. Весняний період аналізується з урахуванням характерних для сезону змін інсоляції та температурних умов.

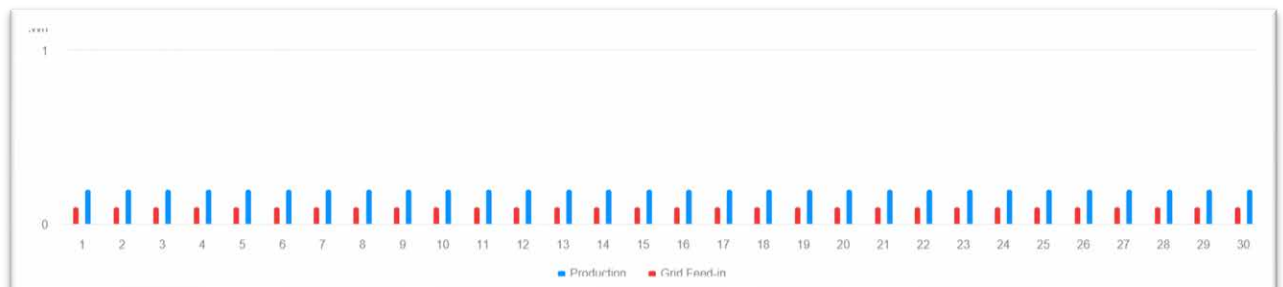


Рис. 2.5. Весна (квітень 2025р.)

Сезонний профіль роботи інвертора за весну 2025 року: середня добова потужність, пікові значення та середній ККД. Коментарі вказують на вплив змінної хмарності та температури на виробіток.

Літній період зазвичай характеризується максимальними значеннями виробітку; аналіз включає оцінку пікових навантажень та теплового режиму інвертора.

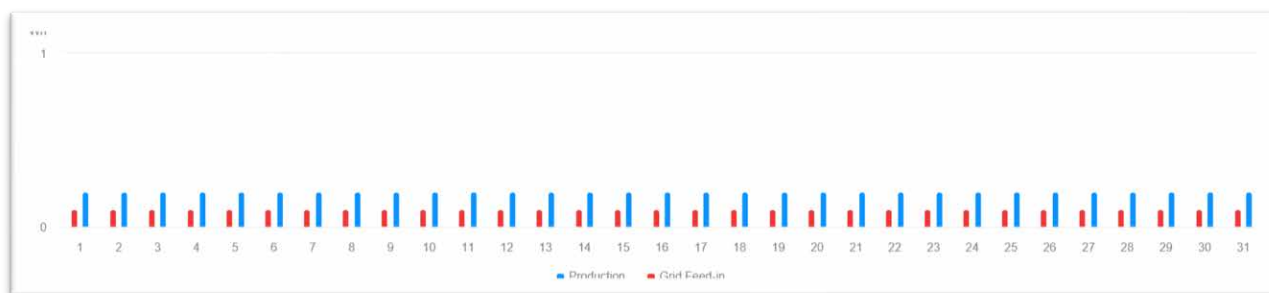


Рис. 2.6. Літо (липень 2025р.)

Сезонний профіль роботи інвертора за літо 2025 року: добові піки виробітку та середній ККД. На графіку видно максимальні значення виробленої енергії та періоди інтенсивного навантаження.

Осінній період аналізується з акцентом на зміну інсоляції та можливі збільшення кількості перехідних процесів через погодні коливання.

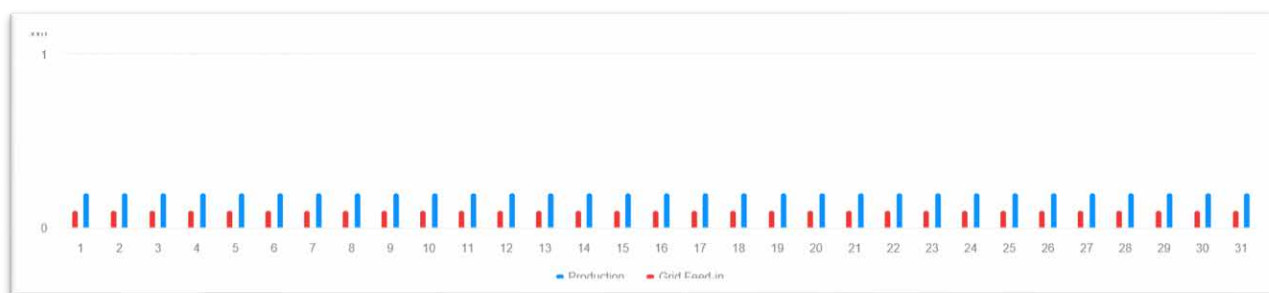


Рис. 2.7. Осінь (жовтень 2025р.)

Сезонний профіль роботи інвертора за осінь 2025 року: середні та пікові значення виробітку, а також відхилення в якості напруги. Графік ілюструє перехідні зони зниження виробітку.

Зимовий період характеризується мінімальними значеннями виробітку; аналіз включає оцінку стабільності напруги та роботи системи в умовах низької інсоляції.

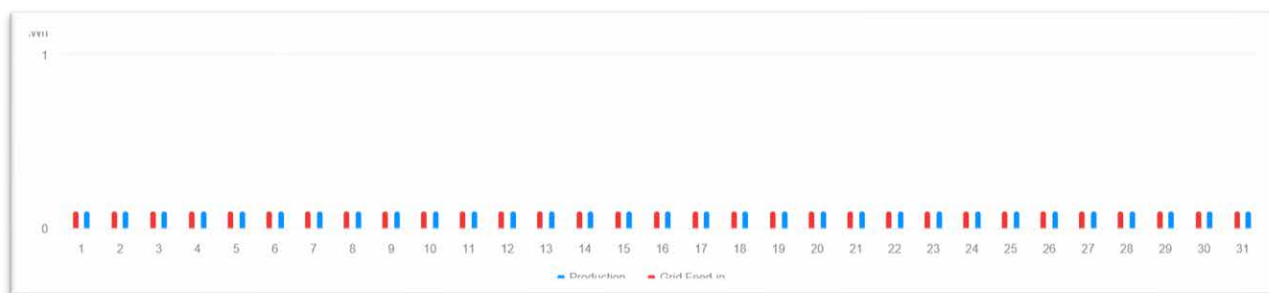


Рис. 2.8. Зима (січень 2025р.)

Сезонний профіль роботи інвертора за зиму 2025 року: добові значення виробленої енергії та показники якості напруги. На графіку видно зниження виробітку та вплив коротких світлових днів.

2.3. Інтерпретація результатів, оцінка невизначеності та рекомендації

У цьому підрозділі зосереджено увагу на інтерпретації отриманих показників, кількісній оцінці похибок та формулюванні практичних рекомендацій для системи енергоменеджменту локального об'єкта. Інтерпретація базується на зіставленні середніх, пікових та кумулятивних показників між періодами, а також на аналізі показників якості (RMS, THD, cosφ). Виявлені закономірності дозволяють визначити періоди підвищеного ризику, деградації ефективності або необхідності втручання.

Оцінка невизначеності. Для кожного ключового показника наведено оцінку систематичної та випадкової похибки; загальна невизначеність

визначена як корінь суми квадратів внесків. Рекомендується наводити значення у форматі $X \pm \Delta X$ (наприклад, $P_{avg} = 12,3 \pm 0,4$ кВт), що дозволяє коректно інтерпретувати відмінності між періодами.

Практичні рекомендації:

- Налаштування порогів автоматичного перемикання між джерелами живлення з урахуванням сезонних профілів навантаження;
- Оптимізація алгоритмів заряд/розряд АКБ (глибина розряду, часові вікна підзарядки) для мінімізації втрат та продовження ресурсу батареї;
- Впровадження заходів щодо покращення якості електроенергії (пасивні/активні фільтри гармонік, компенсатори реактивної потужності) у періоди підвищеного THD;
- Планове технічне обслуговування перед сезонами з очікуваним підвищеним навантаженням;
- Моніторинг ключових індикаторів у реальному часі та налаштування сповіщень про відхилення від норм.

Підсумок: результати дослідження дають підґрунтя для обґрунтованих рішень щодо налаштування та експлуатації статичного джерела живлення в системі енергоменеджменту локального об'єкта. Впровадження запропонованих рекомендацій дозволить підвищити надійність, покращити якість електропостачання та оптимізувати енергоефективність у різні сезони експлуатації.

2.4. Аналіз формування балансів системи енергоменеджменту локального об'єкту на основі експериментальних даних з урахуванням сезонності

2.4.1. Особливості формування балансу локального об'єкту у літній період (у липні)

Результати моніторингу складових балансу локального об'єкту на базі сонячної електростанції характерної доби, складові місячного балансу локального об'єкту, подовові частки джерел у місячному балансі локального об'єкту у липні показано на рис.2.9. – 2.11.

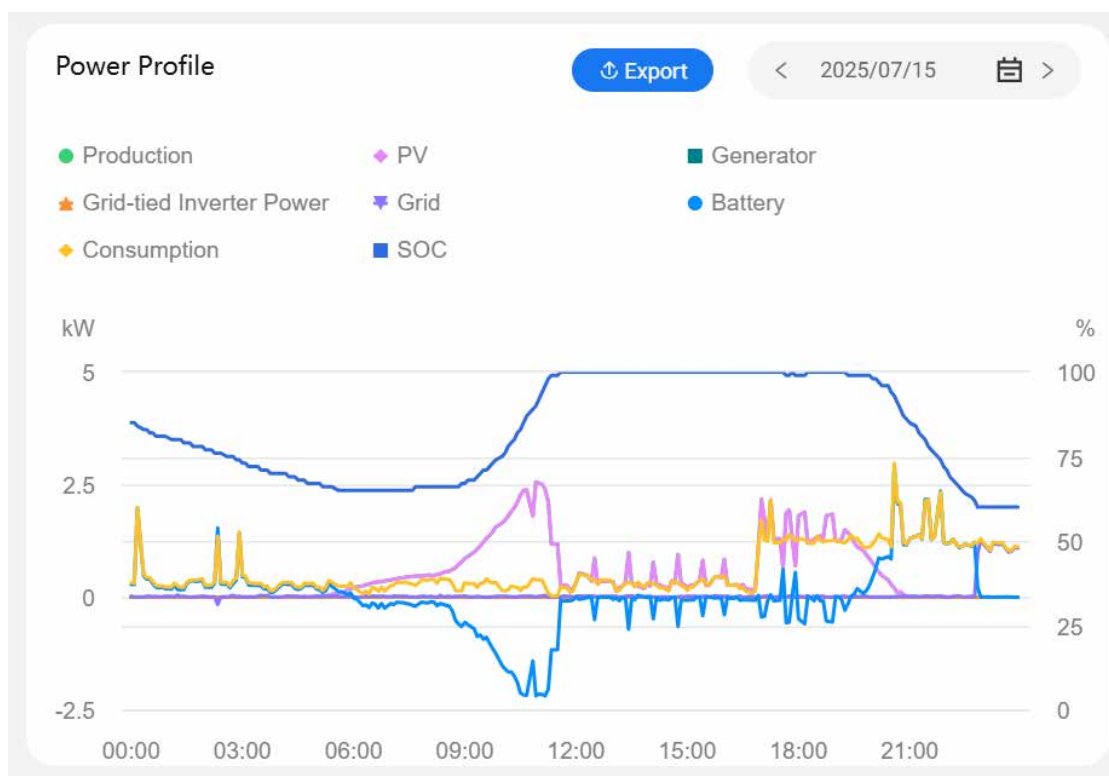


Рис. 2.9. Результати моніторингу складових балансу локального об'єкту характерної доби у липні

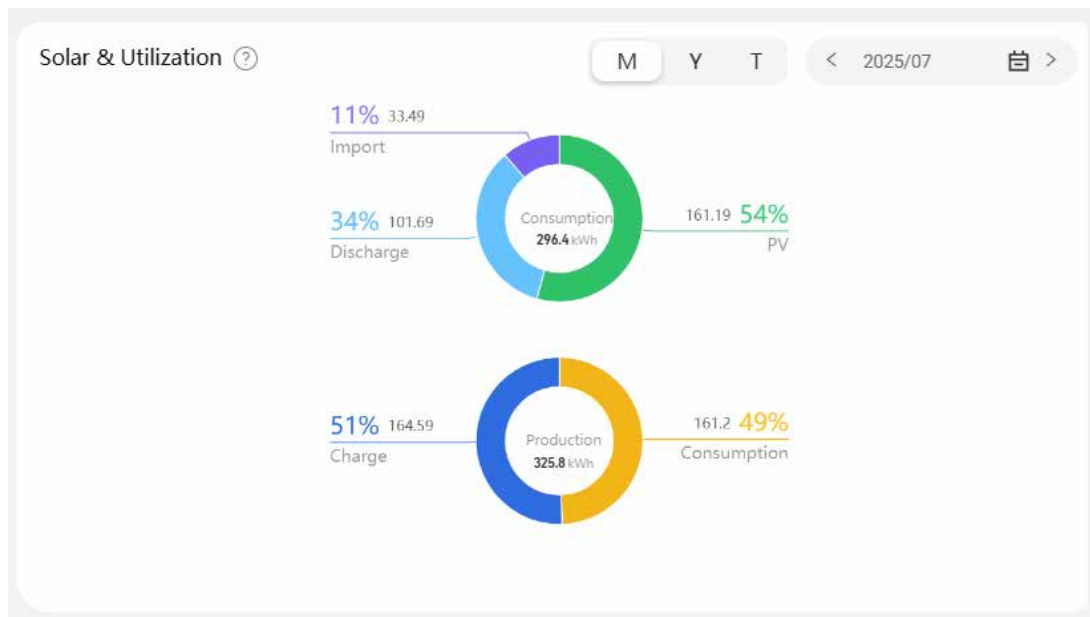


Рис. 2.10. Складові місячного балансу локального об'єкту у липні

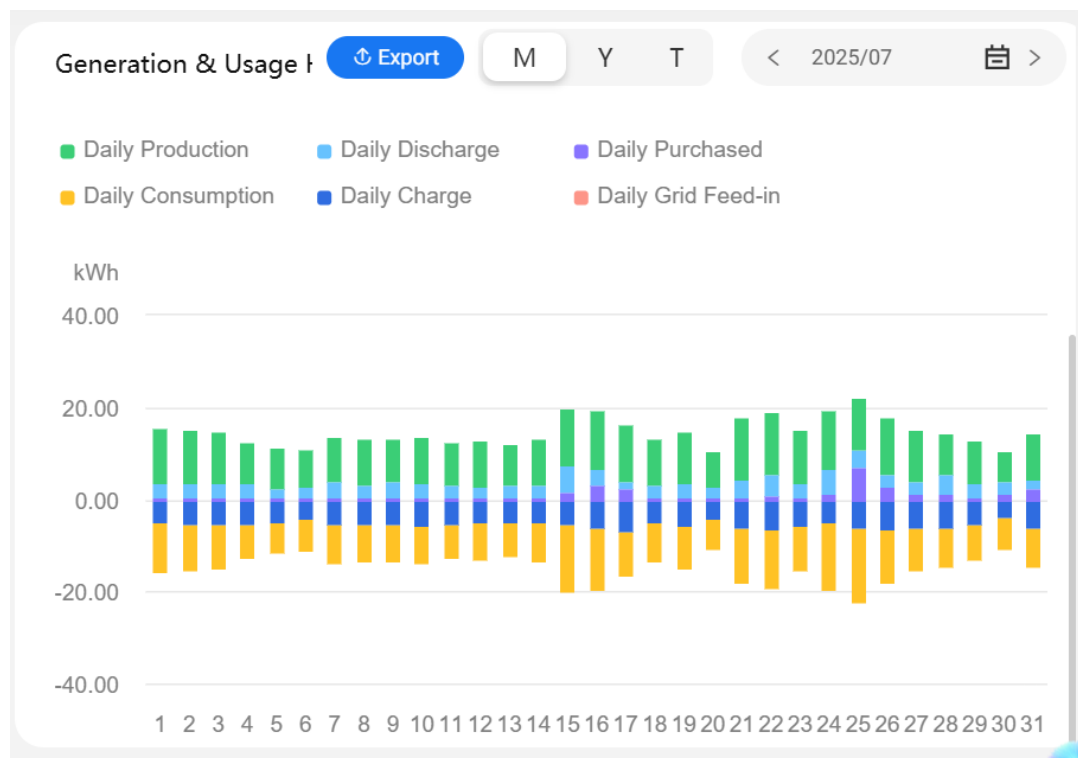


Рис. 2.11. Подобові частки джерел у місячному балансі локального об'єкту у липні

2.4.2. Особливості формування балансу локального об'єкту у осінній період (у вересні)

Результати моніторингу складових балансу локального об'єкту на базі сонячної електростанції характерної доби, складові місячного балансу локального об'єкту, подовові частки джерел у місячному балансі локального об'єкту у вересні (осінньому міжсезонні) показано на рис.2.12. – 2.14.

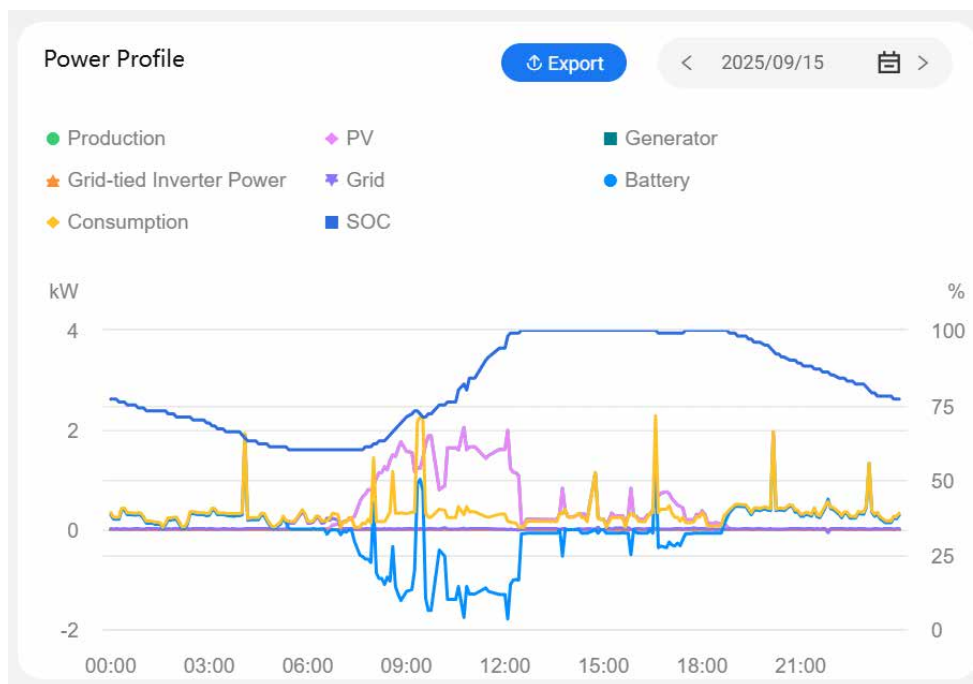


Рис 2.12. Результати моніторингу складових балансу локального об'єкту характерної доби у вересні

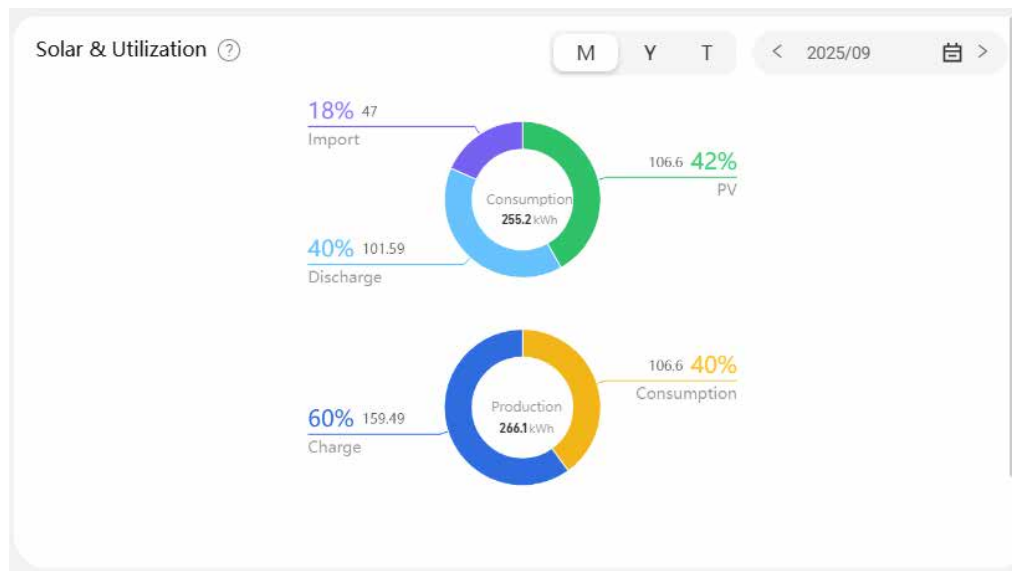


Рис. 2.13. Складові місячного балансу локального об'єкту у вересні

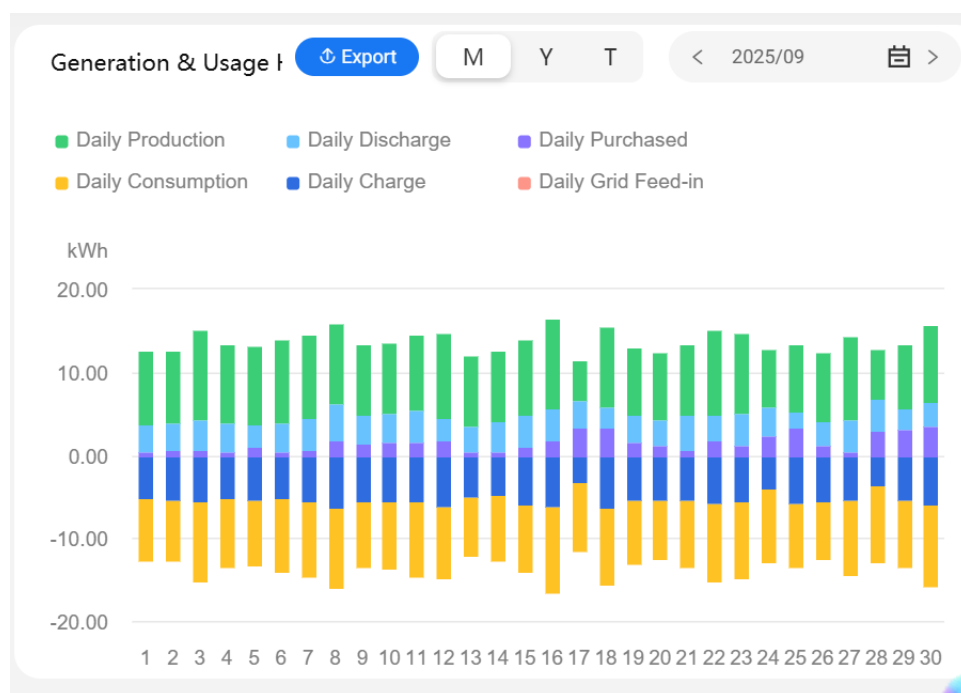


Рис. 2.14. Подобові частки джерел у місячному балансі локального об'єкту у вересні

2.4.3. Особливості формування балансу локального об'єкту у зимовий період (у січні)

Результати моніторингу складових балансу локального об'єкту з на базі сонячної електростанції характерної доби, складові місячного балансу локального об'єкту, подовові частки джерел у місячному балансі локального об'єкту у січні показано на рис.2.15. – 2.17.

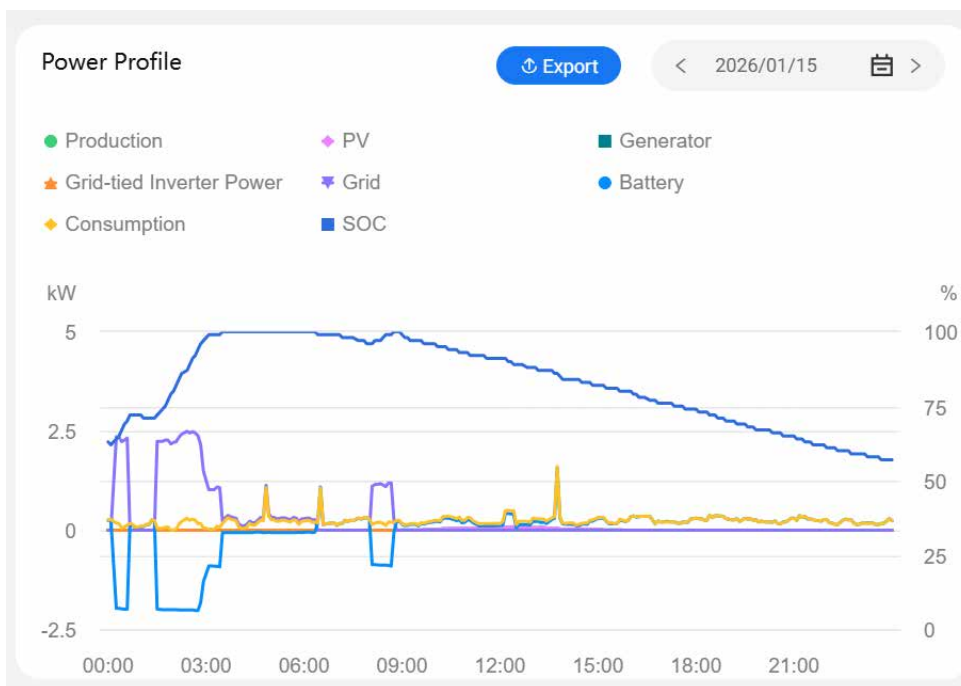


Рис. 2.15. Результати моніторингу складових балансу локальної енергосистеми характерної доби у січні

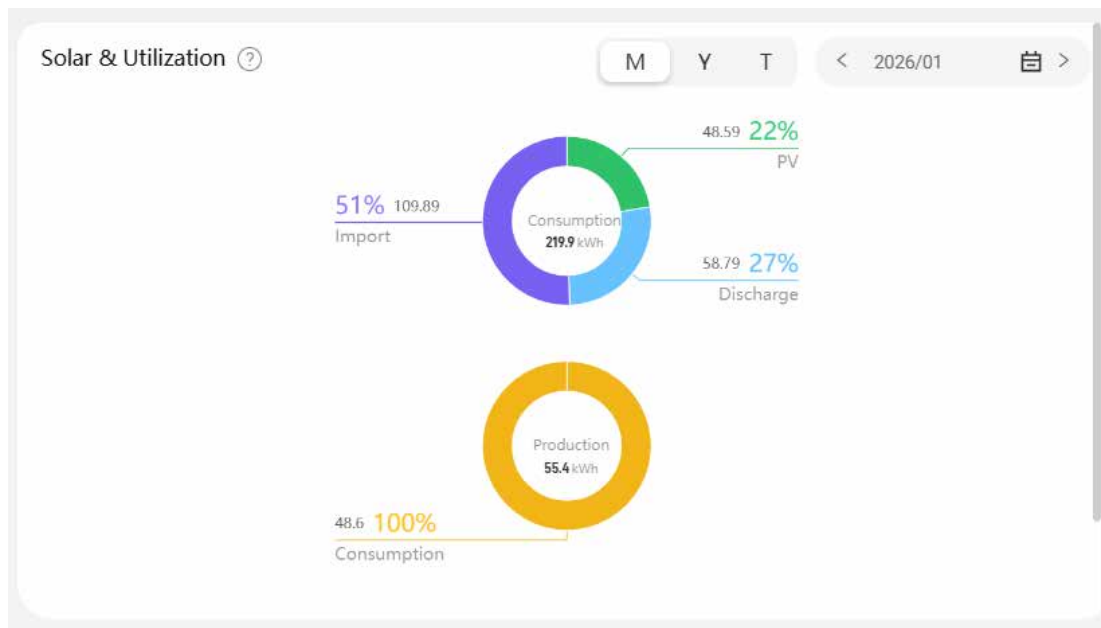


Рис. 2.16. Складові місячного балансу локальної енергосистеми у січні

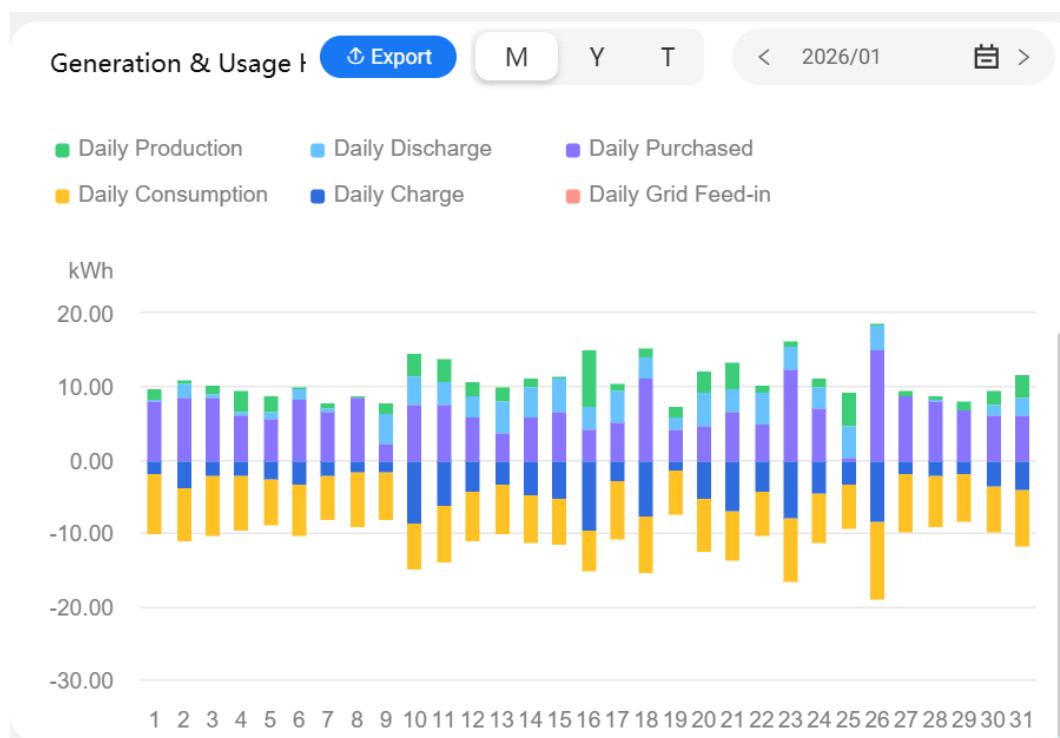


Рис. 2.17. Подобові частки джерел у місячному балансі локальної енергосистеми у січні

Аналіз наведених графіків дозволяє виявити характерні особливості добових графіків навантаження:

зимовий період, січень:

- піки споживання припадають на ранковий (8:00) та вечірній (20:00) періоди;

- відношення максимального навантаження до мінімального складає 1,6-1,7;

літній період, липень:

- графік навантаження є більш рівномірним з одним піком у вечірні години (20:00);

- відношення максимального навантаження до мінімального - 1,75;

перехідні сезони, квітень, жовтень:

- усереднені значення базового навантаження;

- графік за формою наближений до зимового, але з меншими абсолютними значеннями.

Важливо відзначити, що у літній період (травень - серпень) спостерігається суттєвий вплив генерації сонячних електростанцій на формування балансу та розподілу навантаження впродовж світлового дня. В години максимальної сонячної активності (10:00-16:00) відбувається часткова компенсація споживання за рахунок локальної генерації, що призводить до зменшення перетоків із зовнішньої мережі мережу.

2.5. Аналіз частки різнорідних джерел енергії в загальному балансі локального об'єкту з урахуванням сезонності

В результаті опрацювання сезонних графіків генерації та покриття попиту локального об'єкту на основі складових балансу були встановлені закономірності балансування локального об'єкту з урахуванням часток джерел у місячному балансі (рис.2.18. – 2.22.).

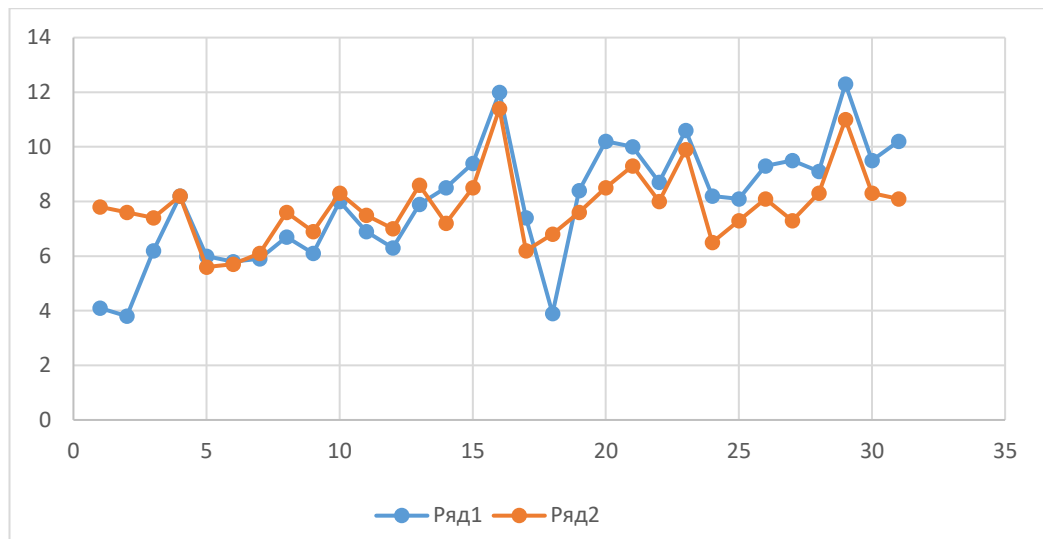


Рис 2.18. Співвідношення між генерацією СЕС (ряд1) та навантаженням енергосистеми (ряд 2) у весняне міжсезоння (березень)

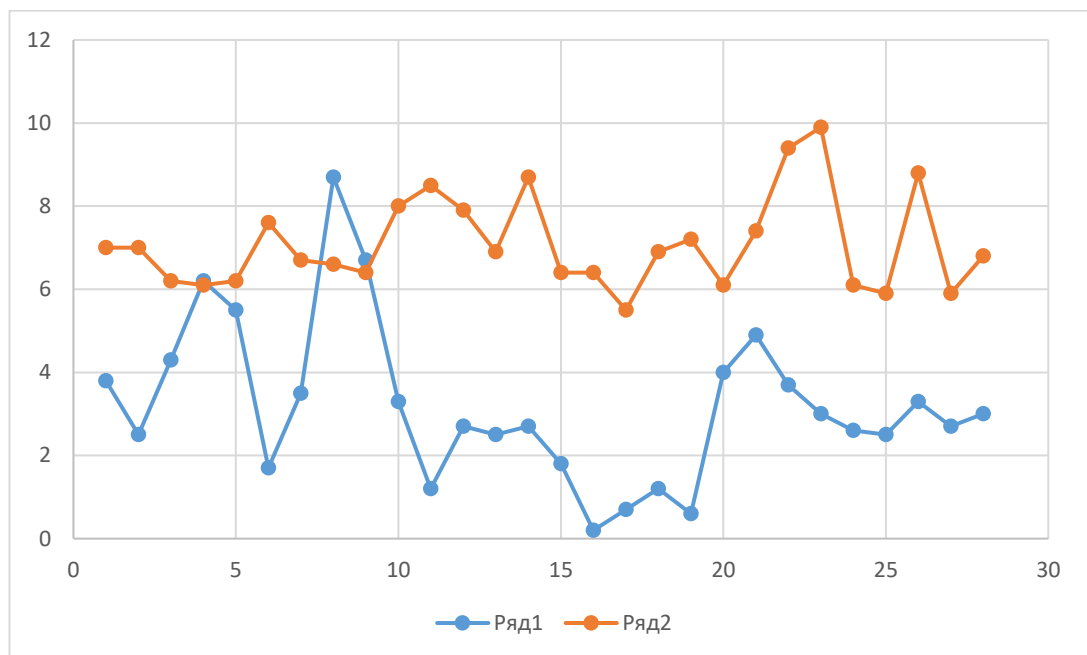


Рис. 2.19. Співвідношення між генерацією СЕС (ряд1) та навантаженням енергосистеми (ряд 2) у зимовий період (лютий)

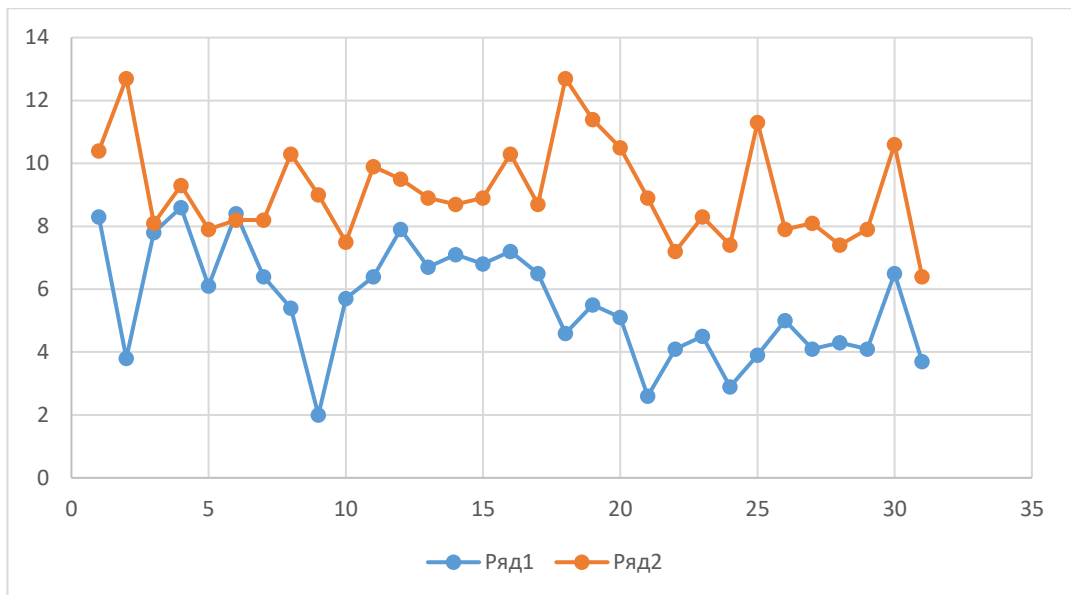


Рис. 2.20. Співвідношення між генерацією СЕС (ряд1) та навантаженням енергосистеми (ряд 2) у осіннє міжсезоння (жовтень)

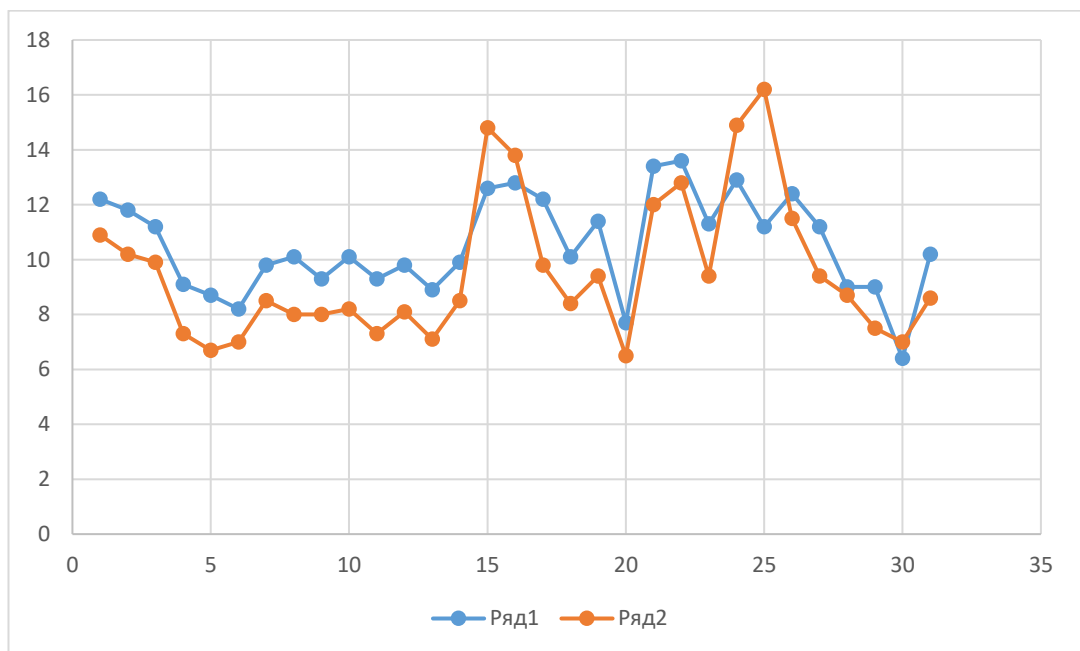


Рис. 2.21. Співвідношення між генерацією СЕС (ряд1) та навантаженням енергосистеми (ряд 2) у літній сезон (липень)

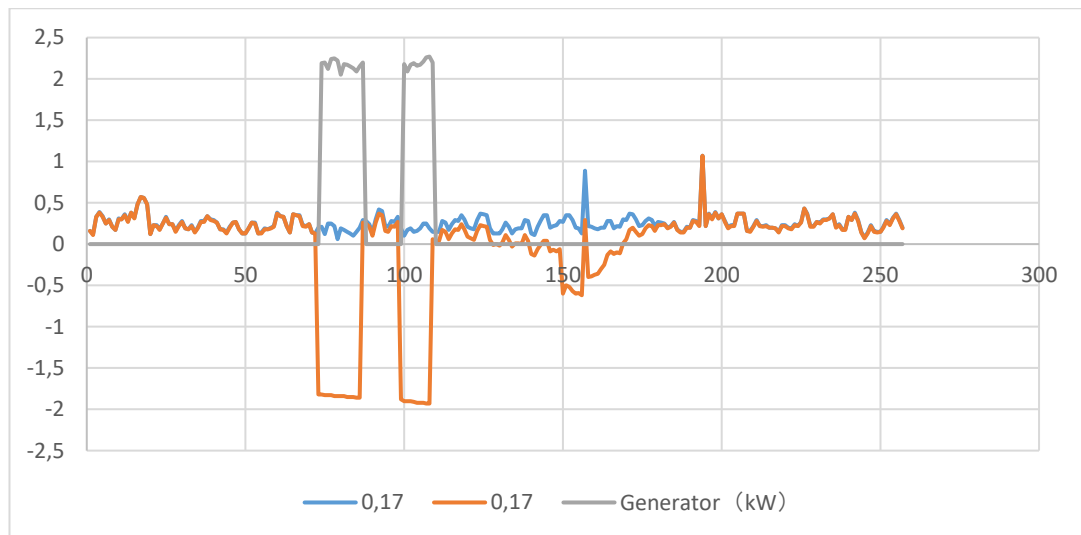


Рис. 2.22. Співвідношення між генерацією автономної електростанції з двигуном внутрішнього (ряд 1) та навантаженням енергосистеми (ряд 2) та споживанням для заряду акумуляторної батареї (ряд 3)

Важливим аспектом функціонування енергосистеми є структура джерел електроенергії. Аналіз частки різних джерел в загальному балансі електроенергії енергосистеми демонструє значну сезонну варіацію.

Оператор системи розподілу забезпечує основну частку електроенергії протягом усього року (від 78,4% до 92,6%), з мінімумом у літні місяці та максимумом у зимові та перехідні періоди.

Дизель-генератори використовуються переважно у зимовий період (7,7-9,2% від загального споживання) через часті відключення електроенергії, а його частка мінімальна влітку (2,8-3,3%).

Сонячні електростанції забезпечують значну частку електроенергії у літній період (до 18,8% у червні), тоді як у зимовий період їх внесок мінімальний (1,0-2,2%).

Важливим показником ефективності функціонування енергосистеми є зростання частки відновлюваних джерел енергії в загальному балансі. За останні три роки спостерігається позитивна динаміка: частка сонячних

електростанцій зросла з 5,7% до 9,2% завдяки встановленню нових потужностей та оптимізації використання існуючих.

Економічна ефективність енергосистеми значною мірою залежить від собівартості електроенергії, яка генерується різнорідними джерелами.

Для оптимального балансування енергосистемою з обраною структурою джерел необхідно здійснювати прогнозування генерації та споживання у реальному часі для оптимізації використання електроенергії від СЕС та накопичувачів та пошук техніко-економічних рішень для мінімізації використання дизель-генераторів, а також використання накопичувачів енергії (на даний момент на рівні окремих домогосподарств) для збереження надлишкової сонячної енергії та її використання в періоди пікового споживання.

Додатково необхідне управління попитом шляхом стимулювання споживачів до перенесення використання енергоємних приладів на періоди надлишкової сонячної генерації або нічні години з нижчим тарифом та розроблення алгоритмів диспетчеризації системи енергозабезпечення енергетичної спільноти з обраними базовими та джерелами енергії домогосподарств для забезпечення живучості мікромережі в умовах енергоострова з мінімальною вартістю електроенергії.

2.6. Обмеження щодо застосування параметрів елементів енергосистеми енергетичної спільноти з власними джерелами

Очевидно, що для застосування методів формування енергетичних спільнот у технологічному сенсі необхідно сформувати вихідні дані з наступними ідентифікаторами елементів локального об'єкту енергетичної спільноти:

- пріоритет у формуванні балансу локального об'єкту надається розосередженим джерелам у порядку: базові джерела (СЕС), СЕС у домогосподарствах, накопичувачі електроенергії, зовнішня мережа, дизель-

генератори базові, малі електростанції з двигунами внутрішнього згорання у домогосподарствах;

- просьюмери на запит диспетчера в обов'язковому порядку віддають до об'єкту енергетичної спільноти до 40% генерації власних СЕС та додатково використовують накопичувачі електроенергії з глибиною розряду до 30% ємності акумуляторних батарей;

- просьюмери на запит диспетчера в обов'язковому порядку віддають до об'єкту енергетичної спільноти 50% генерації власних малих електростанцій з двигунами внутрішнього згорання;

- диспетчер енергетичної спільноти балансує об'єкт наступним чином: при зростанні попиту – вводить по чергові групи джерел з найменшою собівартістю електроенергії; при зниженні попиту – виводить по чергові групи джерел з найвищою собівартістю;

- моделювання балансу мікромережі здійснюється для характерних діб чотирьох місяців взимку (лютий), весною (квітень), влітку (липень), восени (жовтень).

2.7. Висновки до 2 розділу

Аналіз даних моніторингу показує, що в певні періоди (переважно вдень при високій інсоляції) спостерігається від'ємний баланс споживання, коли локальна генерація від СЕС перевищує споживання, що призводить до зворотних потоків енергії.

За результатами аналізу даних моніторингу встановлено, що в період з 09:00 до 16:00 у ясні дні спостерігаються від'ємні значення активної потужності по окремих фазах на ввідному АВР трансформаторної підстанції. Зокрема, по фазі 2 зафіксовані зворотні потоки потужності до -15 кВт. Це створює як технічні виклики (необхідність контролю напруги та потужності), так і економічні можливості (зниження вартості електроенергії для споживачів кооперативу). Дані системи моніторингу дозволяють виявляти та

аналізувати такі ситуації, що є критично важливим для ефективного управління мікромережею.

Для формування однорангової (P2P) моделі балансування джерелами локальної енергетичної системи як базового елементу функціонування енергосистеми у рамках енергетичної спільноти з виконанням умов за показниками надійності та прогнозованою енергоефективністю необхідний ринковий апарат, який базується на технічних можливостях балансування енергосистеми з декількома джерелами (базовими і маневровими), який повинен показувати шлях стимулювання децентралізації джерел, надаючи споживачам можливість мати більший контроль над власною генерацією енергії, та її споживанням у межах цієї енергетичної спільноти.

Аналіз функціонування мікромережі показав, що використовуючи характеристики мінливості навантажень, необхідно встановити взаємозв'язок між попитом та пропозицією в межах можливостей власних джерел та прос'юмерів. На основі реагування на попит споживачів цінові пропозиції треба пов'язати зі зниженням пікового споживання електроенергії.

Управлінські рішення щодо диспетчеризації низького рівня та енергетичного менеджменту необхідно генерувати на основі ієрархії розподілених ресурсів.

2.8. Техніко-економічні показники впровадження локальних електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами на рівні енергетичних спільнот

Для найбільш гнучкої гармонізації виробництва та попиту на споживання в енергетичній системі доцільно розглядати щоденні сценарії оптимізації в реальному часі. Розподіл виробництва або автономне джерело – це планування виробництва електроенергії щоденно або щотижня для досягнення оптимізації витрат на електроенергію та одночасно з урахуванням різних обмежень для відновлюваних джерел (наявність

природної енергії) та магістральної мережі (ММ) за наявності денних тарифних зон, показників надійності, можливості паралельної роботи з джерелами розподіленої генерації і т.п.

Однак не завжди вдається забезпечити однаковий рівень генерації відновлюваних джерел. Тому зв'язок локальної енергосистеми з ММ та з іншими традиційними джерелами (включаючи заздалегідь визначену ємність акумуляторів) є обов'язковою умовою для надання заданого графіка споживання в енергосистемі. У табл. 2.1 представлено фрагмент вихідних даних.

Таблиця 2.1

Показники ціни та середні індекси ціни електроенергії в МЕС

Час доби ω_{ij}	Середня вартість електроенергії, згенерованої елементами МГ:			Вартість спожитої енергії з ММ (\$)	УДТ (\$)
	Ємність CEC 3 кВт (\$)	Ємність BEC 3 кВт (\$)	Ємність AEC 3 кВт (\$)		
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_0
0:30	0	0,0161	0,006	0,42	0,0219
1:00	0	0,016	0,006	0,42	0,0224
...	...	...	...	...	...
6:30	0,0011	0,0152	0,026	0,42	0,0421
7:00	0,0025	0	0,105	0,42	0,1074
...	...	...	...	...	...
11:30	0,037	0,0288	0,032	0,42	0,0976
12:00	0,0368	0,0281	0,012	0,42	0,0765
...	...	...	...	...	...
16:30	0,0099	0,0236	0,051	0,42	0,0848
17:00	0,0058	0,0207	0,122	0,42	0,1489
...	...	...	...	...	...
22:00	0	0,0067	0,121	0,42	0,1279
22:30	0	0,0138	0,048	0,42	0,0614
...	...	...	...	...	...
24:00	0	0,0184	0,005	0,42	0,0236

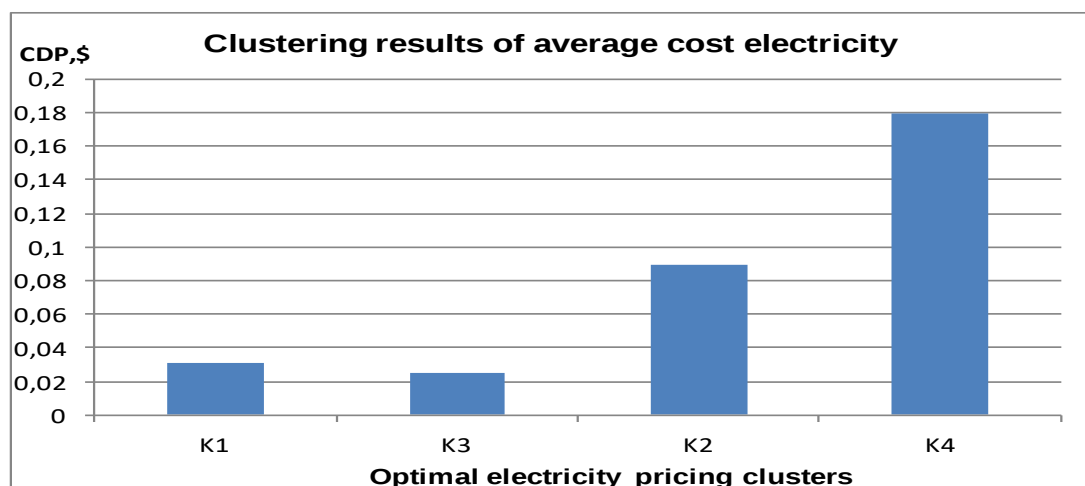
Сучасні можливості використання комбінованих енергетичних систем (КЕС) для локальних об'єктів з встановленою потужністю до 15 кВт

ґрунтуються на використанні кількох джерел (традиційних та відновлюваних з накопичувачем енергії), включаючи магістральну мережу (ММ). Такі технічні рішення спрямовані на підвищення надійності електропостачання, а також на оптимізацію вартості електропостачання локальних об'єктів. Як правило, станом на сьогодні, ці джерела електроенергії є технічно доцільними для використання в ЛЕС: сонячні електростанції, вітрогенератори, електрогенератори з двигунами внутрішнього згоряння, статичні джерела живлення з акумуляторами та ін.

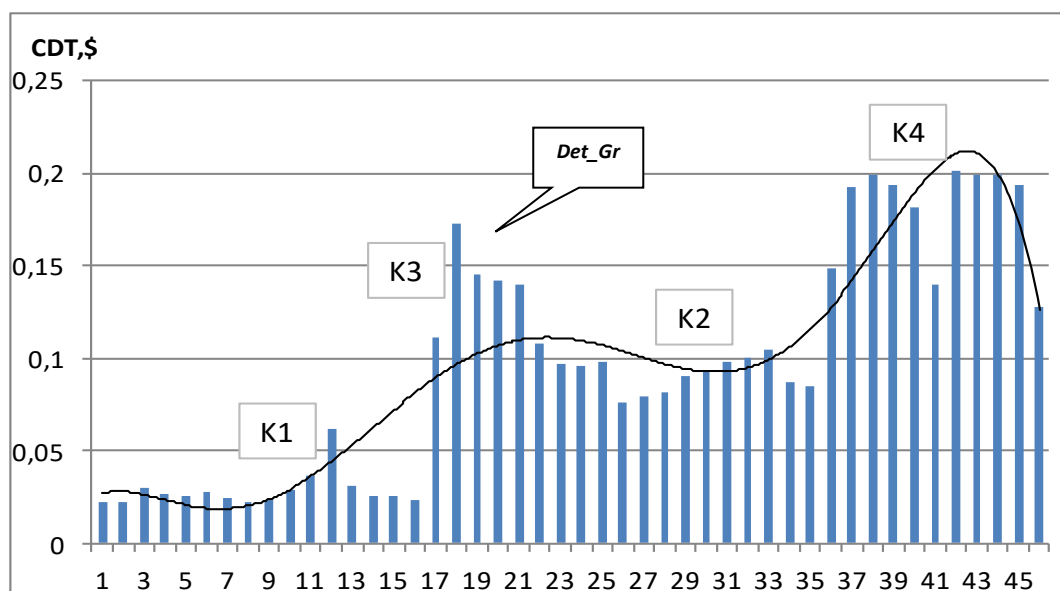
Для контролю за виробництвом та споживанням електроенергії у щоденному графіку споживання електроенергії з кількох джерел принципи, що ґрунтуються на критерії, були обґрунтовані як УДТ (Табл. 2.1).

У таблиці 2.2 на осі цільової ознаки для кожного обчисленого центру кластера, тобто значення УДТ (\$). Це дає можливість для нової поточної ситуації, для якої відомі значення вибраних алгоритмом чинників $\{x_i\}$, ми можемо однозначно знайти вартість поточного тарифу УДТ.

Нижче наведені графіки найбільш типових варіантів та результати кластеризації середньої вартості електроенергії, виробленої джерелами локальних об'єктів: кластери I, ..., IV є оптимальним розбиттям з точки зору вартості електроенергії (рис. 2.23.).



(a)



(б)

Рис. 2.23. Графіки найтипівіших варіантів кластеризації усередненої вартості електроенергії: кластери I, ..., IV є оптимальними з точки зору вартості електроенергії (а); а також те саме, але погодинно на добу (б).

Таблиця 4.2

Результати кластеризації усередненої вартості електроенергії

Час доби (об'єкти кластеризації) $\omega_j \in \Omega$	Сер. вартість к-сті електричної потужності СЕС, потужність 3 кВт (\$)	Сер. вартість к-сті електричної потужності ВЕС, потужність 3 кВт (\$)	Вартість спожитої енергії, УДТ (\$)	УДТ (\$)
1	2	3	4	5
	x_1	x_2	x_3	x_0
CLUSTER I				
1:00	0	0,016	0,006	0,0224
1:30	0	0,0157	0,007	0,0226
2:00	0	0,0294	0	0,0294
2:30	0	0,0269	0	0,0269
3:00	0	0,0259	0	0,0259
3:30	0	0,0275	0	0,0275
4:00	0	0,0144	0,01	0,0245
4:30	0	0	0,023	0,0225
5:00	0	0	0,023	0,0231
5:30	0	0,0105	0,019	0,0293
6:00	0	0,0157	0,021	0,0365

Продовження таблиці				
1	2	3	4	5
6:30	0	0,0163	0,012	0,0614
22:30	0	0,0138	0,048	0,0313
23:00	0	0,0145	0,017	0,0255
23:30	0	0,0161	0,009	0,0251
24:00:0	0	0,0184	0,005	0,0236
0				
	0	0,0174	0,0133	0,0305
CLUSTER III				
7:30	0,004	0	0,107	0,1113
8:00	0,0094	0	0,163	0,1728
8:30	0,0147	0,013	0,117	0,1447
9:00	0,0169	0,0236	0,102	0,1423
9:30	0,0266	0,0242	0,089	0,1401
10:00	0,0314	0,0243	0,052	0,1075
10:30	0,0334	0,0237	0,04	0,0969
11:00	0,0361	0,0235	0,037	0,0963
11:30	0,037	0,0288	0,032	0,0976
	0,0194	0,016	0,79	0,0250
CLUSTER II				
12:00	0,0368	0,0281	0,012	0,0765
12:30	0,0368	0,0171	0,026	0,0798
13:00	0,0344	0,0138	0,033	0,0816
13:30	0,0328	0	0,057	0,0901
14:00	0,0291	0	0,063	0,0923
14:30	0,0267	0	0,071	0,0977
15:00	0,02	0	0,08	0,1001
15:30	0,0159	0	0,088	0,1041
16:00	0,011	0,0227	0,054	0,0874
16:30	0,0099	0,0236	0,051	0,0848
	0,025	0,1051	0,054	0,0894
CLUSTER IV				
17:00	0,0058	0,0207	0,122	0,1489
17:30	0,0043	0,0196	0,169	0,1925
18:00	0,0029	0,0155	0,181	0,1991
18:30	0,001	0,0218	0,171	0,1933
19:00	0,0005	0,0242	0,157	0,1818
19:30	0,0003	0,0286	0,111	0,1394
20:00	0,0002	0,0292	0,172	0,2013
20:30	0	0,0155	0,184	0,1994
21:00	0	0,014	0,185	0,1987
21:30	0	0,0085	0,185	0,1938
22:00	0	0,0067	0,121	0,1279
	0,0014	0,186	0,015	0,1796

На рис. 2.23 (б) крива з позначенням $\langle Det_Gr \rangle$ відображає «детермінований», тобто, наприклад, наперед заданий користувачем

«усталений» для нього графік енергоспоживання в МЕС протягом доби. Оскільки у вхідному базисі налічується невелика кількість параметрів, результати моделювання практично співпали з графіком для УДТ. Звичайно, такі тривіальні випадки в реальних ситуаціях можна зустріти досить рідко, причому, зазвичай, у дуже спрощеному варіанті.

В основі нашого підходу до моделювання сценаріїв динамічного управління енергією в локальній полігенераційній енергосистемі було використано інструментарій індуктивної бікластеризації. Це дозволяє не тільки отримати статичні об'єкти, подібні до кластерів, однорідні з точки зору енергоспоживання, але й у подальшому приймати онлайн-рішення щодо переходу від одного способу споживання до іншого, більш економічного, але цілком достатнього з точки зору вартості для користувача.

Отримані результати показали, що запропоновані сценарії з використанням цінових кластерів на основі загальноприйнятого динамічного тарифу здатні підвищити енергоефективність подібних енергосистем, що працюють у режимі з'єднання з ММ.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

3.1. Сучасні методи управління енергоефективністю локальних об'єктів з полігенерацією

У сучасних умовах розвитку енергетики все більшого поширення набувають локальні об'єкти з полігенерацією, тобто такі, що використовують декілька джерел енергії одночасно. До таких джерел можуть належати як традиційні (централізоване електропостачання), так і альтернативні (сонячні панелі, акумуляторні системи, дизель-генератори тощо). Це дозволяє підвищити надійність енергопостачання, а також забезпечити більш ефективне використання енергетичних ресурсів.

Разом з тим, використання декількох джерел енергії значно ускладнює процес управління, оскільки виникає необхідність узгодження їх роботи, оптимального розподілу навантаження та забезпечення стабільних параметрів електроживлення. Саме тому особливого значення набувають сучасні методи управління енергоефективністю.

Одним із основних підходів є системний підхід до побудови комплексних систем енергозабезпечення (КСЕ), який передбачає розгляд енергетичної системи як єдиного цілого з урахуванням взаємозв'язків між її елементами. У цьому випадку система не розглядається як сукупність окремих компонентів, а як складна структура, що має ієрархічну будову та внутрішні зв'язки.

Застосування системного підходу дозволяє:

- враховувати взаємний вплив джерел енергії та споживачів;
- аналізувати різні режими роботи системи;
- визначати оптимальні параметри функціонування;
- підвищувати загальну ефективність енергозабезпечення.

Важливим етапом дослідження та управління такими системами є декомпозиція, тобто розподіл загальної задачі на ряд простіших підзадач. Це дозволяє окремо аналізувати роботу генераторів, накопичувачів енергії, систем управління та споживачів.

У сучасних умовах значну роль відіграють методи математичного моделювання, які дозволяють досліджувати поведінку системи без необхідності проведення дорогих експериментів. Моделювання дає можливість:

- прогнозувати режими роботи системи;
- оцінювати вплив різних параметрів;
- визначати оптимальні алгоритми управління;
- проводити порівняння різних варіантів структури системи.

Особливо актуальним є застосування імітаційного моделювання, яке дозволяє враховувати випадковий характер навантажень та змінні умови роботи. Це важливо для систем з полігенерацією, де значну роль відіграють нестабільні джерела енергії, наприклад, відновлювані.



Рис. 3.1. Структурно-функціональна схема КСЕ

Ще одним важливим напрямом є використання багатокритеріальної оптимізації. У цьому випадку ефективність системи оцінюється за декількома критеріями, серед яких:

- надійність електропостачання;
- якість електроенергії;
- економічні витрати;
- енергоефективність.

Оскільки ці критерії можуть суперечити один одному, задача управління полягає у знаходженні компромісного рішення, яке забезпечує оптимальний баланс між ними.

У контексті теми даної роботи особливу увагу слід приділити ролі статичних джерел електроживлення в системах з полігенерацією. Вони виконують функції:

- стабілізації параметрів електроенергії;
- резервування живлення;
- накопичення енергії;
- узгодження роботи різних джерел.

Правильний вибір параметрів таких джерел дозволяє значно підвищити ефективність всієї системи. Зокрема, важливими є такі характеристики, як потужність, швидкодія, коефіцієнт корисної дії та точність підтримання напруги.

Крім технічних методів, важливу роль відіграють алгоритми управління, які визначають порядок роботи системи в різних режимах. До основних режимів можна віднести:

- роботу від централізованої мережі;
- автономний режим;
- комбінований режим із використанням декількох джерел.

У кожному з цих режимів система повинна забезпечувати необхідні параметри електроживлення та ефективний розподіл енергії між споживачами.

Таким чином, сучасні методи управління енергоефективністю локальних об'єктів з полігенерацією базуються на поєднанні системного підходу, математичного моделювання та оптимізаційних методів. Їх застосування дозволяє забезпечити надійне, економічно ефективне та стабільне енергопостачання, що є особливо важливим при використанні статичних джерел електроживлення в системах енергоменеджменту.

3.2. Основи теорії електричних мереж у задачах енергоменеджменту

Ефективне функціонування систем енергоменеджменту локальних об'єктів неможливе без урахування основних положень теорії електричних мереж. Саме електрична мережа є середовищем передачі та розподілу електроенергії між джерелами та споживачами, а її параметри безпосередньо впливають на якість та надійність електропостачання.

Електрична мережа локального об'єкта являє собою сукупність електричних елементів, до яких відносяться джерела живлення, лінії передачі, трансформатори, розподільчі пристрої та навантаження. У задачах енергоменеджменту така мережа розглядається як система взаємопов'язаних елементів, для яких необхідно забезпечити оптимальні режими роботи.

Основними параметрами електричної мережі є напруга, струм, потужність та частота. Для аналізу режимів роботи використовуються поняття активної, реактивної та повної потужності, що дозволяє оцінити ефективність передачі електроенергії та рівень втрат у системі.

Важливим аспектом є забезпечення балансу потужності між джерелами та споживачами. Порушення цього балансу може призводити до відхилень напруги, перевантаження обладнання або зниження якості електроенергії. У

зв'язку з цим у системах енергоменеджменту застосовуються методи контролю та регулювання навантаження.

Для дослідження електричних мереж широко використовуються методи математичного моделювання, які дозволяють описати їх поведінку у різних режимах. Найбільш поширеними є:

- метод вузлових напруг;
- метод контурних струмів;
- еквівалентні схеми заміщення.

Застосування цих методів дає можливість визначати розподіл струмів і напруг у мережі, оцінювати втрати енергії та аналізувати вплив різних факторів на її роботу.

У контексті систем енергоменеджменту особливу увагу приділяють якості електроенергії, яка характеризується стабільністю напруги, відсутністю гармонічних спотворень та мінімальними втратами. Погіршення якості може негативно впливати на роботу електрообладнання та знижувати ефективність всієї системи.

Важливу роль у покращенні параметрів електромережі відіграють статичні джерела електроживлення, які дозволяють:

- стабілізувати напругу;
- компенсувати реактивну потужність;
- зменшувати вплив перешкод;
- забезпечувати безперебійність живлення.

Зокрема, використання інверторів та джерел безперебійного живлення дозволяє підтримувати необхідні параметри електроенергії навіть при нестабільній роботі зовнішньої мережі.

Крім того, в сучасних системах широко застосовуються засоби автоматизованого контролю, які забезпечують збір даних про стан мережі та дозволяють оперативно реагувати на зміни режимів роботи. Це є важливою складовою ефективного енергоменеджменту.

Таким чином, використання основ теорії електричних мереж дозволяє забезпечити раціональне управління потоками електроенергії, підвищити якість електропостачання та оптимізувати роботу локальних об'єктів. У рамках даної роботи ці положення є базою для подальшого дослідження параметрів статичних джерел електроживлення.

3.3. Принцип управління комбінованим електрозабезпеченням

Комбіноване електрозабезпечення локальних об'єктів передбачає використання декількох джерел електроенергії, які працюють спільно для забезпечення надійного та ефективного живлення споживачів. До складу таких систем можуть входити централізована електромережа, резервні генератори, відновлювані джерела енергії, а також статичні джерела електроживлення.

Основною задачею управління комбінованим електрозабезпеченням є забезпечення безперервності живлення, підтримання необхідної якості електроенергії та мінімізація витрат. Це досягається шляхом координації роботи всіх джерел енергії з урахуванням їх технічних характеристик та поточного стану системи.

Принцип управління базується на виборі оптимального режиму роботи залежно від умов функціонування системи. Як правило, виділяють такі основні режими:

- робота від зовнішньої електромережі;
- автономний режим;
- комбінований режим із паралельною роботою декількох джерел.

У нормальному режимі основним джерелом живлення виступає централізована мережа. При цьому статичні джерела електроживлення виконують функцію стабілізації параметрів електроенергії та компенсації короточасних відхилень.

У разі погіршення якості електроенергії або повного відключення мережі система автоматично переходить у автономний режим. У цьому випадку живлення забезпечується за рахунок резервних джерел, таких як акумуляторні батареї або генератори. Статичні джерела відіграють ключову роль у забезпеченні безперервності живлення, оскільки вони забезпечують миттєве перемикання без розриву електроживлення.

Комбінований режим передбачає одночасну роботу декількох джерел енергії. У цьому випадку система управління повинна забезпечити:

- розподіл навантаження між джерелами;
- узгодження параметрів напруги та частоти;
- запобігання перевантаженню окремих елементів;
- оптимізацію використання енергоресурсів.

Важливою складовою є алгоритм прийняття рішень, який базується на аналізі поточних параметрів системи, таких як рівень навантаження, стан джерел енергії та якість електроенергії. На основі цих даних система визначає найбільш доцільний режим роботи.

У сучасних системах енергоменеджменту для реалізації таких алгоритмів використовуються автоматизовані системи управління, які забезпечують:

- безперервний моніторинг параметрів;
- швидке реагування на зміни умов;
- автоматичне перемикання між режимами;
- ведення статистики роботи системи.

Особливу роль у комбінованих системах відіграють статичні джерела електроживлення, які виступають як буфер між різними джерелами енергії. Вони дозволяють згладжувати перехідні процеси, забезпечувати стабільність параметрів та підвищувати загальну ефективність системи.

Таким чином, принцип управління комбінованим електрозабезпеченням полягає у динамічному виборі режимів роботи та

координації взаємодії джерел енергії, що дозволяє забезпечити надійне, якісне та економічно ефективне електропостачання локального об'єкта.

3.4. Особливості функціонування локальних систем електроживлення з декількома джерелами

Локальні системи електроживлення з декількома джерелами (полігенерацією) характеризуються підвищеною складністю функціонування, що обумовлено необхідністю узгодження роботи різномірних джерел енергії. До складу таких систем можуть входити централізована електромережа, резервні генератори, відновлювані джерела енергії та статичні джерела електроживлення.

Однією з основних особливостей таких систем є змінний характер генерації та навантаження. Зокрема, відновлювані джерела енергії (сонячні та вітрові установки) мають нестабільний режим роботи, що призводить до коливань напруги та потужності в мережі. Це ускладнює забезпечення балансу між генерацією та споживанням енергії.

Ще однією важливою проблемою є необхідність синхронізації параметрів різних джерел. Для забезпечення їх паралельної роботи необхідно узгодити значення напруги, частоти та фазових кутів. Порушення цих умов може призводити до виникнення перехідних процесів, перевантаження обладнання та навіть аварійних режимів.

У системах з комбінованим електрозабезпеченням значну роль відіграють перехідні процеси, які виникають при зміні режимів роботи, наприклад, при переключенні між джерелами живлення або зміні навантаження. Такі процеси супроводжуються короткочасними відхиленнями параметрів електроенергії, що може негативно впливати на чутливе обладнання.

Для зменшення негативного впливу перехідних процесів використовуються статичні джерела електроживлення, які виконують функцію буферних елементів системи. Вони забезпечують:

- згладжування коливань напруги;
- компенсацію короточасних провалів;
- стабілізацію частоти;
- безперервність електроживлення під час перемикань.

Особливо важливою є їх роль у системах, де присутні відновлювані джерела енергії, оскільки вони дозволяють компенсувати їх нестабільність та забезпечити стабільні параметри електромережі.

Ще однією особливістю є необхідність оптимального розподілу навантаження між джерелами. Неефективний розподіл може призводити до перевантаження окремих елементів системи або нераціонального використання ресурсів. Тому системи енергоменеджменту повинні реалізовувати алгоритми, що враховують як технічні характеристики джерел, так і економічні фактори.

Важливим аспектом є також вплив полігенерації на якість електроенергії. Наявність інверторних джерел може призводити до появи гармонічних спотворень, що потребує застосування фільтрів та засобів компенсації.

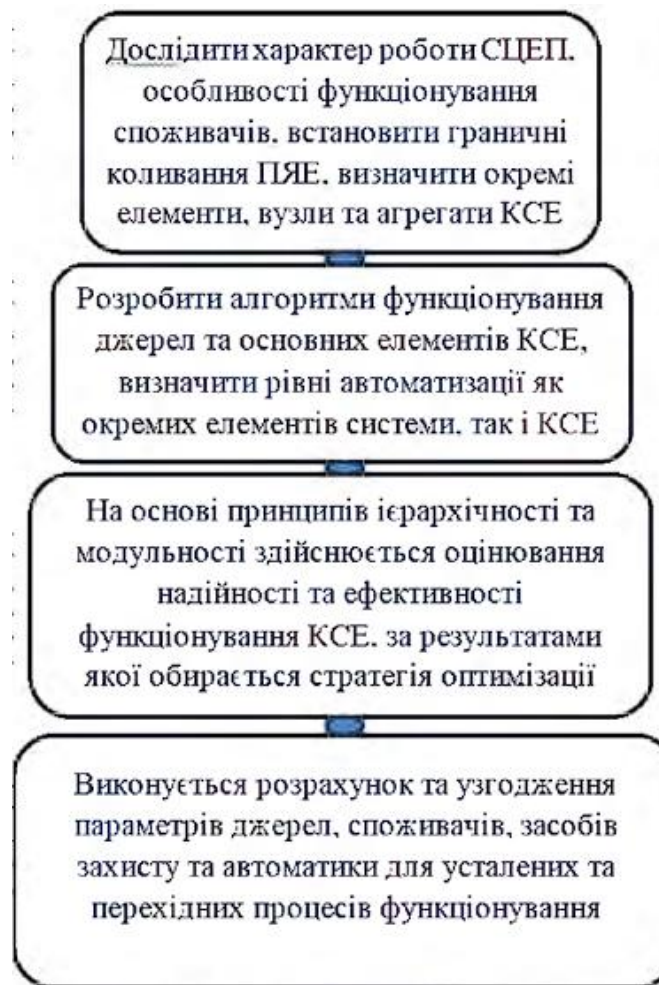


Рис. 3.2. Схема локальної системи з декількома джерелами

Таким чином, функціонування локальних систем електроживлення з декількома джерелами характеризується необхідністю вирішення задач синхронізації, стабілізації параметрів, управління перехідними процесами та оптимального розподілу навантаження. У цьому контексті статичні джерела електроживлення виступають ключовим елементом, що забезпечує підвищення надійності та ефективності систем енергоменеджменту локальних об'єктів.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ ПРОГРАМНО- АПАРАТНОГО КОМПЛЕКСУ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА

4.1. Огляд програмно-технічних комплексів, що використовуються для управління енергоспоживанням

Сучасний розвиток ринку електричної енергії в Україні супроводжується переходом до більш гнучких та конкурентних моделей взаємодії між споживачами та постачальниками. У таких умовах зростає роль інформаційних систем, що забезпечують точний облік, аналіз і управління енергоспоживанням. Формування достовірної інформаційної бази стає ключовим фактором для здійснення розрахунків за електроенергію, планування навантажень та оптимізації витрат.

Основою таких систем виступають автоматизовані комплекси обліку електричної енергії, зокрема автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Вони забезпечують збір, передачу, обробку та зберігання даних про споживання електроенергії в різних точках енергосистеми.

Структурно АСКОЕ являє собою багаторівневу систему, яка включає:

- 1) рівень первинного збору даних (лічильники та вимірювальні пристрої);
- 2) рівень передачі інформації (канали зв'язку);
- 3) рівень обробки та зберігання даних (сервери, бази даних);
- 4) рівень користувацького доступу та аналітики.

Об'єктами обліку в таких системах можуть виступати як генеруючі компанії, так і промислові підприємства, комунальні об'єкти або локальні енергетичні системи. Це дозволяє здійснювати контроль енергоспоживання на різних рівнях – від окремого споживача до енергосистеми в цілому.

Усі дані, що надходять до системи, повинні відповідати вимогам:

- достовірності;
- повноти;
- синхронності у часі;
- захищеності від несанкціонованого втручання.

Особливу роль у структурі АСКОВЕ відіграє вимірювально-інформаційна система (ВІС), яка безпосередньо здійснює вимірювання параметрів електроенергії. Саме на цьому рівні відбувається первинна фіксація даних, які в подальшому передаються до програмного забезпечення для аналізу.

Згідно з принципами побудови таких систем, усі вимірювання виконуються сертифікованими засобами, які внесені до державного реєстру. Дані зберігаються у внутрішній пам'яті пристроїв у незмінному вигляді, що гарантує їхню цілісність та достовірність.

Передача інформації може здійснюватися різними способами:

- у вигляді імпульсних сигналів;
- через цифрові інтерфейси;
- за допомогою бездротових каналів зв'язку.

Програмне забезпечення, що входить до складу системи, виконує:

- обробку отриманих даних;
- їх агрегацію;
- формування звітів;
- збереження у первинній базі даних (ПБД);
- надання доступу користувачам через інтерфейси.

У контексті енергоменеджменту локального об'єкта такі системи дозволяють не лише вести облік споживання електроенергії, але й реалізовувати функції:

- аналізу енергоспоживання;
- прогнозування навантаження;

- виявлення аномалій;
- оптимізації режимів роботи обладнання;
- підтримки прийняття управлінських рішень.

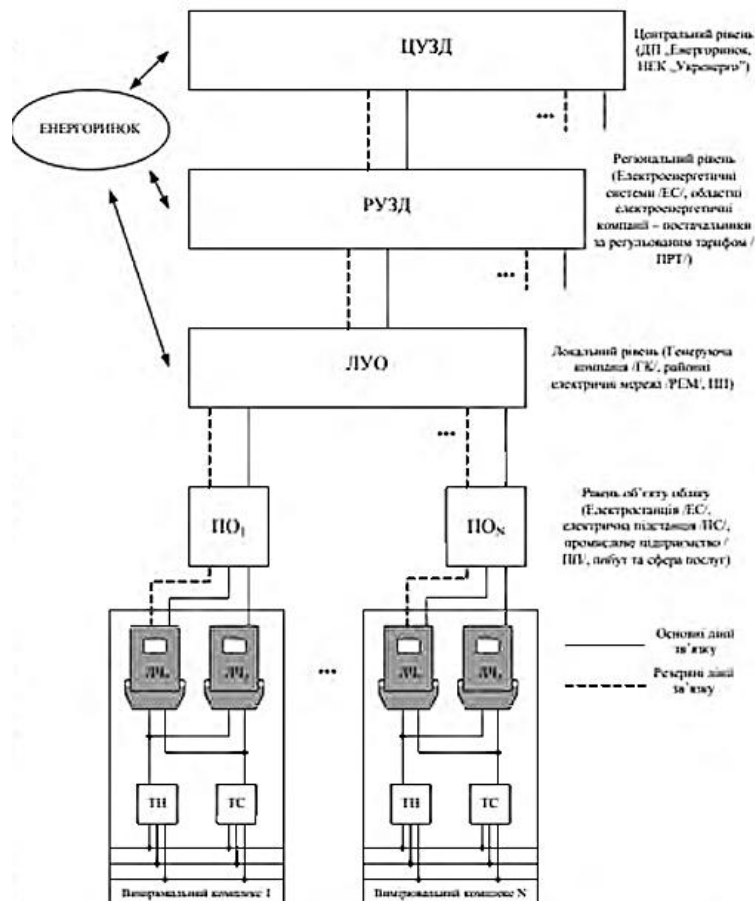


Рис. 4.1. Узагальнена структура ринку електричної енергії та місце систем обліку в ньому

Таким чином, використання сучасних програмно-технічних комплексів є необхідною умовою ефективного функціонування систем енергоменеджменту. Вони забезпечують інтеграцію вимірювальних пристроїв, засобів передачі даних та аналітичних інструментів у єдину інформаційну систему, що дозволяє підвищити енергоефективність локального об'єкта та зменшити витрати на електроенергію.

4.2. Вибір апаратно-технічної платформи та визначення її характеристик

При розробці системи енергоменеджменту локального об'єкта, що передбачає дослідження параметрів статичного джерела електроживлення, одним із ключових етапів є вибір апаратно-технічної платформи. Від правильності цього вибору залежить точність вимірювань, швидкодія системи, надійність функціонування та можливість подальшого масштабування.

Вимоги до апаратної платформи

З урахуванням специфіки досліджуваної системи до апаратної платформи висуваються такі основні вимоги:

- забезпечення багатоканального вимірювання електричних параметрів (струм, напруга);
- наявність достатньої кількості аналогових входів;
- підтримка цифрових інтерфейсів для підключення датчиків та модулів зв'язку;
- можливість обробки даних у режимі реального часу;
- достатній обсяг оперативної та постійної пам'яті;
- енергоефективність та стабільність роботи;
- простота інтеграції у систему енергоменеджменту.

Крім того, система повинна забезпечувати можливість роботи в умовах електромагнітних завад, що є характерним для електроенергетичних об'єктів.

Аналіз можливих варіантів реалізації

Для побудови програмно-апаратного комплексу можуть бути використані різні типи обчислювальних платформ:

1. Промислові контролери (PLC).

Відзначаються високою надійністю та стійкістю до зовнішніх впливів, однак мають високу вартість та обмежену гнучкість у реалізації складних алгоритмів аналізу.

2. Одноплатні комп'ютери (наприклад, Raspberry Pi).

Забезпечують високу обчислювальну потужність та можливість роботи з великими обсягами даних, проте мають недоліки у частині роботи з аналоговими сигналами (відсутність вбудованого АЦП) та нижчу надійність у промислових умовах.

3. Мікроконтролерні платформи (Arduino, STM32 тощо).

Характеризуються низькою вартістю, достатньою функціональністю та простотою реалізації вимірювальних систем. Саме цей варіант є найбільш доцільним для реалізації дослідницької системи енергоменеджменту.

З огляду на наведений аналіз, для даної роботи обрано мікроконтролерну платформу.

Обґрунтування вибору Arduino Mega 2560

У якості основи апаратної частини системи обрано мікроконтролерну плату Arduino Mega 2560, що базується на мікроконтролері ATmega2560.

Основними причинами вибору даної платформи є:

- ✓ велика кількість аналогових входів (16 каналів), що дозволяє одночасно вимірювати декілька параметрів;
- ✓ наявність 54 цифрових входів/виходів, що забезпечує підключення периферійних пристроїв;
- ✓ достатній обсяг пам'яті для реалізації алгоритмів обробки даних;
- ✓ підтримка стандартних інтерфейсів зв'язку (UART, SPI, I2C);
- ✓ простота програмування та широка екосистема бібліотек;
- ✓ низька вартість у порівнянні з промисловими рішеннями.

Зазначені характеристики дозволяють ефективно використовувати платформу для задач енергомоніторингу та дослідження параметрів статичного джерела електроживлення.



Рис. 4.2. Arduino Mega 2560

Технічні характеристики обраної платформи

Основні технічні параметри Arduino Mega 2560:

- мікроконтролер: ATmega2560;
- тактова частота: 16 МГц;
- обсяг флеш-пам'яті: 256 КБ;
- оперативна пам'ять (SRAM): 8 КБ;
- EEPROM: 4 КБ;
- кількість аналогових входів: 16;
- розрядність АЦП: 10 біт;
- робоча напруга: 5 В;
- рекомендована вхідна напруга живлення: 7–12 В.

Ці характеристики забезпечують достатній рівень продуктивності для обробки сигналів у системі енергоменеджменту локального об'єкта.

Вибір вимірювальних модулів

Для реалізації функцій контролю параметрів електроживлення до складу системи включаються:

- датчики струму (наприклад, на ефекті Холла);
- модулі вимірювання напруги;

- енергомоніторингові мікросхеми (за потреби).

Використання таких модулів дозволяє отримувати:

- миттєві значення струму та напруги;
- середньоквадратичні значення;
- потужність (активну та повну);
- коефіцієнт потужності.

Особливу увагу приділено забезпеченню гальванічної розв'язки між силовою частиною та мікроконтролером, що підвищує безпеку системи.

Інтерфейси зв'язку та передача даних

Для забезпечення взаємодії між елементами системи використовуються такі інтерфейси:

- UART – для зв'язку з модулями передачі даних;
- I2C – для підключення датчиків та допоміжних пристроїв;
- SPI – для високошвидкісного обміну даними.

Передача даних у систему верхнього рівня може здійснюватися через Wi-Fi або інші комунікаційні модулі, що дозволяє реалізувати віддалений моніторинг.

Оцінка відповідності платформи задачам дослідження

Обрана апаратно-технічна платформа повністю відповідає поставленим задачам, а саме:

- забезпечує вимірювання параметрів статичного джерела електроживлення;
- дозволяє реалізувати алгоритми обробки сигналів;
- підтримує інтеграцію в систему енергоменеджменту;
- забезпечує достатню точність та швидкодію.

Водночас слід зазначити, що для підвищення точності вимірювань у перспективі можливе використання зовнішніх АЦП з більшою розрядністю.

У результаті проведеного аналізу було обґрунтовано вибір мікроконтролерної платформи Arduino Mega 2560 як основи програмно-апаратного комплексу системи енергоменеджменту локального об'єкта. Визначено її основні технічні характеристики та доведено відповідність вимогам задачі дослідження параметрів статичного джерела електроживлення.

Обрана платформа забезпечує необхідний баланс між функціональністю, вартістю та простотою реалізації, що робить її доцільною для використання у дипломній роботі.

4.3. Вибір та характеристика вимірювальних модулів системи

Для забезпечення контролю параметрів статичного джерела електроживлення у складі програмно-апаратного комплексу використовуються спеціалізовані вимірювальні модулі, які дозволяють визначати струм, напругу та енергетичні характеристики навантаження. Вибір конкретних компонентів здійснювався з урахуванням їх точності, доступності, сумісності з мікроконтролером та простоти інтеграції.

Датчики струму (на ефекті Холла)

Для вимірювання струму у системі доцільно використовувати датчики на ефекті Холла, оскільки вони забезпечують гальванічну розв'язку між силовим колом та вимірювальною частиною, що значно підвищує безпеку та надійність роботи.

У роботі може бути застосований датчик типу:
ACS712 30A current sensor module



Рис 4.3. ACS712 30A GY-712

Даний датчик реалізує вимірювання струму шляхом перетворення магнітного поля, що створюється провідником зі струмом, у пропорційну напругу на виході. Основні характеристики:

- діапазон вимірювання: до ± 30 А (залежно від версії);
- вихідний сигнал: аналоговий (лінійно пропорційний струму);
- чутливість: 66–185 мВ/А;
- напруга живлення: 5 В;
- гальванічна ізоляція до 2,1 кВ

Принцип дії базується на ефекті Холла – при протіканні струму через провідник створюється магнітне поле, яке реєструється сенсорним елементом та перетворюється в електричний сигнал. Вихідна напруга зміщується відносно середнього рівня ($\approx 2,5$ В), що дозволяє вимірювати як змінний, так і постійний струм.

Застосування таких датчиків у системі енергоменеджменту дозволяє здійснювати безпечний моніторинг струмів навантаження без прямого електричного контакту з високовольтною частиною.

Модулі вимірювання напруги

Для контролю напруги змінного струму використовується спеціалізований вимірювальний модуль:

ZMPT101B voltage sensor module

Цей модуль побудований на основі малопотужного трансформатора напруги, що забезпечує:

- гальванічну розв'язку;
- зниження високої напруги до безпечного рівня;
- формування аналогового сигналу для мікроконтролера.

Основні характеристики:

- діапазон вимірювання: до 250 В змінної напруги;
- вихід: аналоговий сигнал;
- наявність підстроювального резистора для калібрування;
- висока точність при правильному налаштуванні.

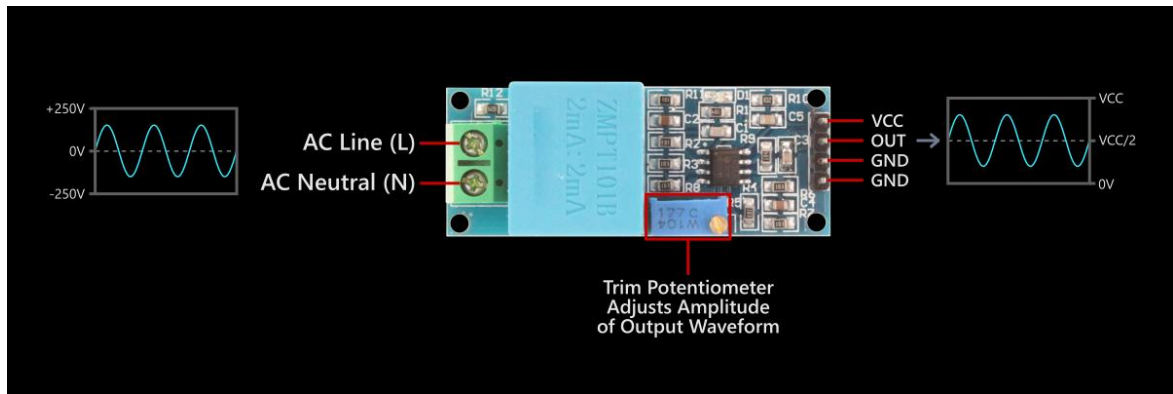


Рис 4.4. ZMPT101B

Принцип роботи полягає у пропорційному перетворенні вхідної напруги у зменшений сигнал, який подається на аналоговий вхід мікроконтролера. Це дозволяє визначати як миттєві, так і ефективні значення напруги.

Використання даного модуля є доцільним для дослідження параметрів статичного джерела електроживлення, зокрема стабільності вихідної напруги.

Енергомоніторингові мікросхеми

Для розширення функціональних можливостей системи та підвищення точності розрахунків можуть застосовуватися спеціалізовані енергомоніторингові мікросхеми.

Одним із типових рішень є:

ADE7753 energy metering IC

Дана мікросхема призначена для точного вимірювання параметрів електроенергії та забезпечує:

- вимірювання активної та повної потужності;
- обчислення спожитої електроенергії;
- цифровий інтерфейс (SPI) для передачі даних;
- високу точність вимірювань.

Альтернативним готовим рішенням (модулем) є:

PZEM-004T energy monitoring module

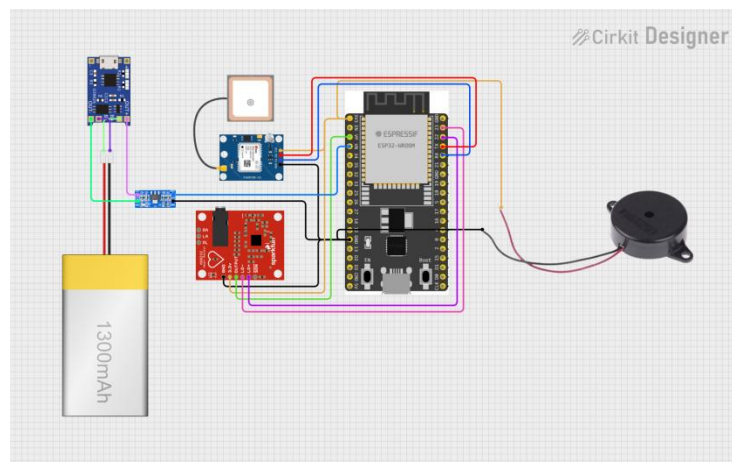


Рис. 4.5. ADE7753

Цей модуль дозволяє безпосередньо отримувати:

- напругу;
- струм;

- потужність;
- енергію;
- частоту мережі.

Перевагою таких рішень є інтеграція всіх необхідних функцій в одному пристрої, що значно спрощує реалізацію системи.

4.4. Програмне забезпечення для реалізації системи динамічного енергоменеджменту

Ефективне функціонування системи енергоменеджменту локального об'єкта значною мірою визначається якістю програмного забезпечення, яке забезпечує обробку вимірювальних даних, аналіз параметрів статичного джерела електроживлення та формування керуючих впливів. У даній роботі розроблено програмне забезпечення, що реалізує принципи динамічного енергоменеджменту з урахуванням змінних режимів навантаження.

Загальна структура програмного забезпечення

Програмне забезпечення системи має модульну структуру та складається з таких основних компонентів:

- модуль збору даних;
- модуль обробки та фільтрації сигналів;
- модуль розрахунку енергетичних параметрів;
- модуль аналізу та прийняття рішень;
- модуль передачі та візуалізації інформації.

Така структура дозволяє забезпечити гнучкість системи та можливість її подальшого розширення.

Модуль збору та попередньої обробки даних

На першому етапі роботи програмного забезпечення здійснюється зчитування сигналів з датчиків струму та напруги через аналогово-цифровий перетворювач мікроконтролера.

Для підвищення точності вимірювань реалізовано:

- багатократне вибіркове зчитування (sampling);
- усереднення значень;
- фільтрацію шумів (простий цифровий фільтр).

Це дозволяє зменшити вплив електромагнітних завад та нестабільності сигналу.

Розрахунок електричних параметрів

На основі отриманих даних програмно визначаються основні параметри електроживлення.

Для змінного струму розрахунок ефективних значень виконується за формулою:

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2}, \quad I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N i_i^2}$$

Активна потужність визначається як:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \cdot i_i$$

Повна потужність:

$$S = U_{rms} \cdot I_{rms}$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Реалізація цих обчислень у програмному коді дозволяє отримувати актуальні параметри в реальному часі та оцінювати ефективність роботи статичного джерела електроживлення.

Модуль аналізу та динамічного енергоменеджменту

Ключовим елементом програмного забезпечення є алгоритм динамічного управління енергоспоживанням. Його робота базується на аналізі поточних параметрів та їх змін у часі.

Основні функції модуля:

- виявлення перевантажень;

- контроль відхилень напруги;
- аналіз пікових навантажень;
- визначення неефективних режимів роботи.

У разі виявлення відхилень система може:

- о формувати сигнал попередження;
- о змінювати режим роботи навантаження;
- о обмежувати споживання енергії;
- о переключати джерела живлення (за наявності резерву).

Таким чином реалізується принцип динамічного енергоменеджменту – адаптація системи до поточних умов роботи.

Алгоритм роботи системи

Загальний алгоритм функціонування програмного забезпечення включає такі етапи:

1. Ініціалізація системи та налаштування периферії.
2. Зчитування даних з датчиків струму та напруги.
3. Фільтрація та усереднення сигналів.
4. Обчислення електричних параметрів.
5. Аналіз отриманих значень.
6. Прийняття рішення щодо режиму роботи.
7. Передача даних на верхній рівень (ПК або сервер).
8. Повторення циклу у реальному часі.

Такий циклічний алгоритм забезпечує безперервний моніторинг і оперативне реагування на зміни режимів роботи системи.

Передача та візуалізація даних

Для забезпечення зручності використання результати обробки передаються на зовнішні пристрої через інтерфейси зв'язку (UART, Wi-Fi тощо). Дані можуть відображатися у вигляді:

- графіків зміни напруги та струму;
- залежності потужності від часу;

- статистики енергоспоживання.

Це дозволяє користувачу оцінювати ефективність роботи системи та приймати обґрунтовані рішення щодо її оптимізації.

Особливості програмної реалізації

Програмне забезпечення реалізовано мовою C/C++ у середовищі Arduino IDE. Основними перевагами такого підходу є:

- ✓ простота розробки та налагодження;
- ✓ наявність великої кількості бібліотек;
- ✓ можливість швидкої інтеграції апаратних компонентів.

Код організовано у вигляді окремих функціональних блоків, що відповідають за різні етапи обробки даних, що підвищує читабельність та зручність модифікації.

4.5. Опис алгоритму роботи програми управління

Програма управління системою енергоменеджменту локального об'єкта призначена для забезпечення ефективного та надійного функціонування комбінованого електроживлення з використанням декількох джерел енергії. Основною метою алгоритму є підтримання необхідних параметрів електроживлення, забезпечення безперервності енергопостачання та оптимізація розподілу навантаження між доступними джерелами.

Алгоритм роботи програми базується на принципі безперервного моніторингу стану системи з подальшим прийняттям рішень щодо режиму роботи. На першому етапі здійснюється збір вхідних даних від вимірювальних пристроїв, до яких відносяться датчики напруги, струму, потужності, а також стану джерел електроживлення.

До основних параметрів, що аналізуються програмою, належать:

- рівень напруги на вході та виході системи;
- частота електромережі;
- потужність навантаження;

- стан зовнішньої електромережі;
- рівень заряду акумуляторних батарей;
- технічний стан резервних джерел.

Після збору даних виконується їх обробка та порівняння з допустимими значеннями. У разі, якщо всі параметри знаходяться в межах норми, система продовжує роботу у стандартному режимі, використовуючи основне джерело живлення – централізовану електромережу.

У випадку виявлення відхилень, наприклад зниження напруги або порушення частоти, програма формує команду на підключення статичного джерела електроживлення. При цьому важливою особливістю є мінімальний час реакції системи, що дозволяє забезпечити безперервність живлення без переривання роботи споживачів.

У разі повного зникнення напруги в основній мережі система автоматично переходить в автономний режим. Живлення навантаження здійснюється за рахунок акумуляторних батарей або інших резервних джерел через статичний перетворювач (інвертор). Паралельно програма контролює рівень заряду акумуляторів та визначає допустимий час автономної роботи.

Після відновлення зовнішнього електропостачання алгоритм передбачає плавне повернення до нормального режиму роботи. Це включає синхронізацію параметрів напруги та частоти, а також поступове переключення навантаження на основне джерело.

Важливою частиною алгоритму є функція оптимального розподілу навантаження у випадку комбінованого режиму роботи. У цьому режимі програма визначає частку потужності, яка повинна забезпечуватися кожним джерелом, з урахуванням їх технічних характеристик та економічної доцільності.

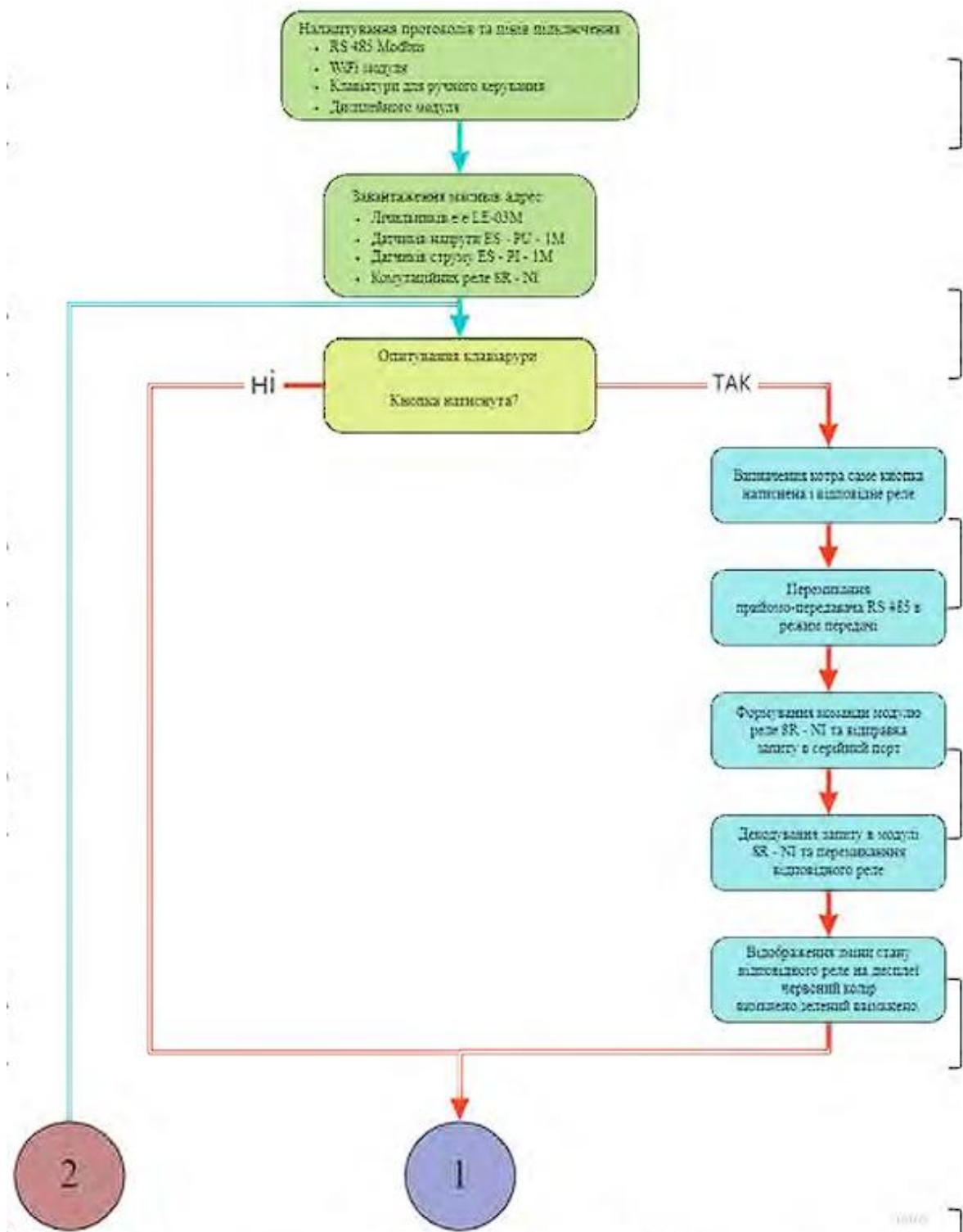


Рис. 4.6. Блок схема функціонування алгоритму



Рис. 4.7. Алгоритм отримання даних від лічильника



Рис. 4.8. Алгоритм отримання даних від вимірювача напруги



Рис. 4.9. Алгоритм отримання даних від вимірювача струму

Також алгоритм передбачає обробку аварійних ситуацій. У разі перевантаження, короткого замикання або виходу з ладу одного з джерел, система здійснює автоматичне відключення несправного елемента та перерозподіл навантаження між іншими джерелами.

Додатково реалізується функція ведення журналу подій, що дозволяє фіксувати всі зміни режимів роботи системи, аварійні ситуації та параметри електроживлення. Це є важливим для подальшого аналізу та вдосконалення роботи системи.

Таким чином, запропонований алгоритм роботи програми управління забезпечує ефективне використання енергетичних ресурсів, підвищення надійності електропостачання та стабільність параметрів електроенергії в системі енергоменеджменту локального об'єкта.

4.6. Порівняльний аналіз режимів роботи системи електроживлення

Для оцінки ефективності застосування статичного джерела електроживлення в системі енергоменеджменту локального об'єкта доцільно провести порівняльний аналіз різних режимів роботи системи. Такий аналіз дозволяє визначити вплив використання статичних джерел на якість електроенергії, надійність електропостачання та загальну ефективність функціонування системи.

У рамках даної роботи розглянуто три основні режими функціонування системи електроживлення:

- робота тільки від централізованої електромережі;
- робота з використанням статичного джерела електроживлення (UPS);
- комбінований режим з використанням декількох джерел.

Перший режим передбачає живлення навантаження виключно від зовнішньої електромережі. У цьому випадку система є найбільш простою з

точки зору реалізації, однак має суттєві недоліки. Зокрема, якість електроенергії повністю залежить від стану мережі, що може призводити до коливань напруги, провалів та короточасних відключень. Відсутність резервного джерела знижує надійність електропостачання та може спричиняти втрати у випадку аварійних ситуацій.

Другий режим передбачає використання статичного джерела електроживлення як проміжної ланки між мережею та навантаженням. У нормальному режимі електроенергія надходить від мережі, однак проходить через систему перетворення, що дозволяє стабілізувати параметри напруги. У разі відключення мережі живлення автоматично переключається на акумуляторні батареї без переривання подачі електроенергії. Це значно підвищує якість електроживлення та забезпечує безперервність роботи споживачів.

Комбінований режим передбачає використання декількох джерел енергії, включаючи централізовану мережу, статичні джерела та, за необхідності, резервні генератори або відновлювані джерела. У цьому випадку система працює найбільш гнучко, оскільки має можливість перерозподілу навантаження між джерелами. Проте реалізація такого режиму потребує складніших алгоритмів управління та узгодження параметрів.

Для більш наочного порівняння основних характеристик розглянутих режимів складено узагальнену таблицю.

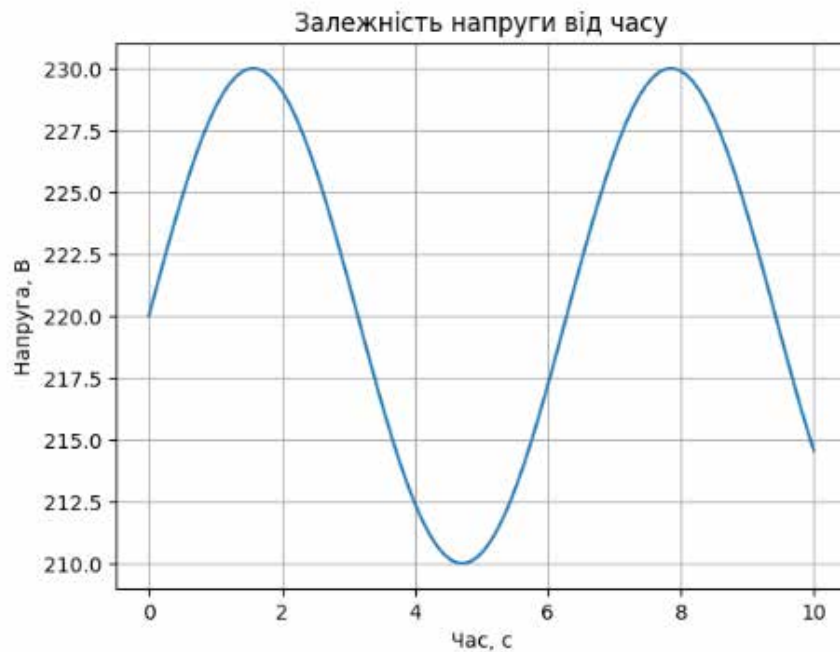


Рис. 4.10. Залежність напруги від часу в електромережі

Таблиця 4.1

Порівняння основних характеристик розглянутих режимів

Параметр	Тільки мережа	Зі статичним джерелом	Комбінований режим
Якість напруги	нестабільна	стабілізована	стабілізована
Безперервність живлення	низька	висока	дуже висока
Складність системи	низька	середня	висока
Енергоефективність	середня	висока	висока
Гнучкість управління	низька	середня	висока

Аналіз наведених даних показує, що використання статичних джерел електроживлення дозволяє значно підвищити якість електроенергії за рахунок стабілізації напруги та зменшення впливу перехідних процесів. Крім того, забезпечується безперервність електроживлення при аварійних

відключеннях, що є критично важливим для локальних об'єктів з чутливим обладнанням.

Комбінований режим має найкращі показники з точки зору надійності та гнучкості, однак його реалізація потребує більш складної системи управління та додаткових витрат. У цьому випадку особливо важливу роль відіграє алгоритм управління, який забезпечує оптимальний розподіл навантаження та узгодження роботи джерел.

Таким чином, проведений порівняльний аналіз підтверджує доцільність використання статичних джерел електроживлення в системах енергоменеджменту локальних об'єктів. Вони забезпечують підвищення якості електроенергії, зменшення втрат та покращення надійності електропостачання. Найбільш ефективним є комбінований режим роботи, який дозволяє максимально реалізувати переваги різних джерел енергії.

ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи на тему «Дослідження параметрів статичного джерела електроживлення в системі енергоменеджменту локального об'єкта» було проведено комплексний аналіз сучасних підходів до організації ефективного електропостачання в умовах використання декількох джерел енергії.

У теоретичній частині роботи розглянуто основні положення систем енергоменеджменту, їх роль у підвищенні енергоефективності та зниженні витрат на електроспоживання. Проаналізовано нормативні вимоги та сучасні стандарти у сфері управління енергоресурсами, а також визначено ключові фактори, що впливають на надійність та якість електропостачання локальних об'єктів.

Особливу увагу приділено дослідженню особливостей функціонування систем електроживлення з полігенерацією. Встановлено, що використання декількох джерел енергії дозволяє підвищити надійність системи, однак потребує реалізації складних алгоритмів управління, спрямованих на узгодження їх роботи, забезпечення стабільності параметрів електроенергії та оптимальний розподіл навантаження.

У роботі детально розглянуто принципи функціонування статичних джерел електроживлення та визначено їх ключову роль у системах енергоменеджменту. Показано, що такі джерела виступають як буферні елементи, які забезпечують згладжування перехідних процесів, стабілізацію напруги та безперервність живлення споживачів. Дослідження їх параметрів дозволило визначити найбільш значущі характеристики, що впливають на ефективність роботи системи.

У практичній частині було розроблено алгоритм роботи програми управління комбінованим електроживленням локального об'єкта. Запропонований алгоритм базується на принципах безперервного

моніторингу параметрів системи та адаптивного вибору режимів роботи. Це дозволяє забезпечити оперативне реагування на зміни умов функціонування та підвищити надійність електропостачання.

Отримані результати підтверджують, що ефективне використання статичних джерел електроживлення у поєднанні з сучасними системами енергоменеджменту дозволяє значно підвищити якість електроенергії, зменшити втрати та забезпечити стабільну роботу локальних об'єктів навіть у складних умовах експлуатації.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання розроблених підходів та алгоритмів при проектуванні та модернізації систем електроживлення, що працюють в умовах полігенерації. Запропоновані рішення можуть бути застосовані для підвищення енергоефективності підприємств, адміністративних будівель та інших об'єктів.

Таким чином, поставлена мета роботи досягнута, а отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку систем енергоменеджменту та вдосконалення методів управління електроживленням локальних об'єктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Енергоменеджмент: навчальний посібник / за ред. О. М. Суходолі. – Київ: Центр учбової літератури, 2015. – 344 с.
2. Денисюк С. П. Енергетичний менеджмент: навчальний посібник. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 276 с.
3. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії. – Київ: НТУУ «КПІ», 2012. – 492 с.
4. Жежеленко І. В. Якість електричної енергії в електричних мережах. – Київ: Вища школа, 2008. – 256 с.
5. Костенко М. П., Перельмутер В. М. Електричні машини. – Київ: Вища школа, 2004. – 640 с.
6. Баранов В. І. Джерела безперебійного живлення: принципи побудови та застосування. – Харків: ХНУРЕ, 2016. – 198 с.
7. Бойко В. С. Системи електроживлення та електропостачання підприємств. – Київ: Либідь, 2014. – 312 с.
8. Козирський В. В. Електропостачання промислових підприємств. – Київ: Вища школа, 2013. – 408 с.
9. International Organization for Standardization. ISO 50001:2018 Energy management systems – Requirements with guidance for use. – Geneva: ISO, 2018.
10. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо використання. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020.
11. IEEE Std 519-2014. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. – IEEE, 2014.
12. Hingorani N. G., Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. – New York: IEEE Press, 2000. – 432 p.

13. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications and Design. – New York: Wiley, 2003. – 824 p.
14. Rashid M. H. Power Electronics Handbook. – Oxford: Elsevier, 2011. – 1360 p.
15. Офіційний сайт Міжнародного енергетичного агентства (IEA). – Режим доступу: <https://www.iea.org>