

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

(підпис) **О. КОЛЛАРОВ**
(ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему Вплив інтервального розподілу навантаження на роботу
електричних систем

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКм-23
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

Антон ШОРОХОВ

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Керівник к.т.н., доц., В. КАЛИНИЧЕНКО

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

(підпис)

Нормоконтроль:

Е. НЕМЦЕВ

(підпис)

Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

(дата)

(дата)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Антону ШОРОХОВУ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Вплив інтервального розподілу навантаження на роботу електричних систем

керівник роботи Валерій КАЛИНИЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент
 (ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 10 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Номинальна напруга підстанції: 35 кВ.

Номинальна потужність трансформатора: 10 МВА. Довжина розподільної лінії: 20 км. Питомий активний опір лінії: 0,12 Ом/км. Питомий реактивний опір лінії: 0,1 Ом/км. Максимально-припустиме значення струму: 400 А.

Кількість вузлів споживання в мережі: 10. Припустиме відхилення напруги межі: $\pm 5\%$. Максимальне навантаження трансформатора: 90%. Коефіцієнт

потужності: 0,91. Коефіцієнти навантаження: ранковий пік (06:00–09:00): 1,2, денні години (9:00–17:00): 1,0, вечірній пік (17:00–22:00): 1,3, нічні години

(22:00–6:00): 0,7. Розподіл споживачів: 1 (50 кВт) – критичний, 2 (40 кВт) – некритичний, 3 (70 кВт) – некритичний, 4 (60 кВт) – критичний, 5 (80 кВт) –

некритичний, 6 (30кВт) – некритичний, 7 (45 кВт) – некритичний, 8 (55 кВт) – критичний, 9 (65 кВт) – некритичний, 10 (70 кВт) – некритичний. Погодинне

енергоспоживання для промислових споживачів: від 50 кВт/год до 200

кВт/год. Коефіцієнт варіації: $\pm 10\%$. Температура середовища: 25 °С.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд принципів управління розподілом навантаження.

2. Функціонування електричних систем при застосуванні інтервального розподілу навантаження.

3. Розрахунок параметрів роботи мережі при застосуванні інтервального розподілу навантаження.

4. Моделювання інтервального розподілу навантажень.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	В. КАЛИНИЧЕНКО, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 30 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	30.09.2024 - 03.10.2024	
2.	Розділ 2	04.10.2024 - 07.10.2024	
3.	Розділ 3	08.10.2024 - 11.10.2024	
4.	Розділ 4	12.10.2024 - 10.12.2024	

Студент _____
(підпис)

Антон ШОРОХОВ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Валерій КАЛИНИЧЕНКО
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Антон ШОРОХОВ. Вплив інтервального розподілу навантаження на роботу електричних систем / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Дрогобич, 2024.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі здійснено огляд принципів управління розподілом навантаження.

У другому розділі були визначені основні теоретичні відомості про функціонування електричних систем при застосуванні інтервального розподілу навантаження.

У третьому розділі виконано розрахунок параметрів роботи мережі при застосуванні інтервального розподілу навантаження.

У четвертому розділі було здійснено моделювання інтервального розподілу навантажень.

Ключові слова: електрична мережа, навантаження, продуктивність системи, інтервальний розподіл навантаження, управління розподілом навантаження, стабільність, ефективність, надійність, інструмент моделювання, математична модель

SUMMARY

Anton SHOROKHOV. The influence of interval load distribution on the operation of electrical systems / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Drohobych, 2024.

The diploma work consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions, a list of used literature and appendices.

The first section provides an overview of the principles of load distribution control.

The second section identifies the main theoretical information about the functioning of electrical systems when applying interval load distribution.

The third section calculates the network operation parameters when applying interval load distribution.

The fourth section models interval load distribution.

Keywords: electrical network, load, system performance, interval load distribution, load distribution control, stability, efficiency, reliability, modeling tool, mathematical model

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	8
1 ПРИНЦИПИ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕННЯ	10
1.1 Визначення важливості розподілу навантаження у електричних мережах	10
1.2 Вплив нерівномірного розподілу навантаження на продуктивність системи	14
1.3 Вплив інтервального розподілу навантаження на стабільність, ефективність і надійність роботи електричних систем	18
1.4 Провідні методи та технології, що використовуються для управління розподілом навантаження	21
1.5 Огляд наукових статей по використанню способів розподілу навантаження в різних застосунках	23
2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ІНТЕРВАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ	32
2.1 Принципи експлуатації електричних систем	32
2.2 Концепція інтервального розподілу навантаження	35
2.3 Методика та методологія дослідження інтервального розподілу навантаження	38
2.4 Позитивні та негативні чинники застосування інтервального розподілу навантаження	43
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ МЕРЕЖІ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ІНТЕРВАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ	48
3.1 Розрахунок розподілу навантаження в електричній системі	48

3.2 Аналіз впливу інтервалів навантаження на ефективність функціонування електричної системи	51
3.3 Розробка інтервальних стратегій розподілу навантаження	55
4 МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕРВАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕНЬ	59
4.1 Огляд інструментів моделювання	59
4.2 Створення математичної моделі	60
4.3 Будова графічних залежностей для інтерпретації інтервального розподілу навантажень	63
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	73
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	77
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	83

ВСТУП

Інтервальний розподіл навантажень у електричних системах є одним з найперспективніших методів для здійснення оптимізації енергетичних витрат, зниження пікових навантажень та забезпечення стабільної роботи споживачів.

Сучасні енергетичні системи характеризуються постійним зростанням попиту на електричну енергію, що призводить до необхідності покращення методів її використання та зменшення витрат на розподіл. Перенесення роботи частини споживачів на нічні години, коли попит на електричну енергію знижується, що дозволяє знизити навантаження на генеруючі елементи мережі, покращити їх експлуатаційні характеристики та зменшити енергетичні втрати.

Інтервальний розподіл навантажень передбачає гнучке управління споживанням електричної енергії, що сприяє вирівнюванню навантаження в різні періоди доби. Це дозволяє знизити енергетичні втрати, що виникають внаслідок різких коливань споживання. Застосування інтервальних стратегій розподілу навантаження може призвести до покращення коефіцієнта корисної дії системи і зниження енергетичних витрат у порівнянні з традиційними методами управління навантаженням. Використання зазначеної стратегії сприяє оптимальному балансуванню споживання в різні періоди доби, що дозволяє зменшити пікові навантаження та стабілізувати напругу в мережі. Зазначене, крім іншого, дозволить більш ефективно використовувати наявну потужність, уникати перевантажень та зменшувати ймовірність виникнення аварійних ситуацій. Інтервальний розподіл навантажень може покращити енергетичну ефективність, забезпечити більш рівномірне споживання електричної енергії та зменшити необхідність у використанні додаткових джерел живлення (генерації) в пікові години споживання.

Мета роботи полягає в аналізі та розробці стратегій інтервального розподілу навантаження для оптимізації роботи електричної системи з урахуванням енергетичних втрат, ефективності роботи обладнання та забезпеченні стабільності величини напруги в мережі.

Основними завданнями роботи є:

- аналіз впливу інтервального розподілу навантаження на енергетичні втрати та стабільність роботи мереж,
- розробка моделей для розрахунку параметрів енергетичних систем з різними стратегіями розподілу навантаження,
- оцінка ефективності застосування інтервальної стратегії на прикладі конкретної електричної системи,
- розробка рекомендацій щодо оптимізації навантажень для зниження енергетичних витрат та покращення стабільності енергетичних систем.

Об'єкт дослідження – енергетичні системи, що працюють на основі розподілу навантажень.

Предмет дослідження – стратегії інтервального розподілу навантаження.

1 ПРИНЦИПИ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕННЯ

1.1 Визначення важливості розподілу навантаження у електричних мережах

Важливість розподілу навантаження в електричних системах є однозначно зрозумілим, оскільки це суттєво впливає як на стабільність, так і на ефективність функціонування електромереж. Правильний розподіл навантаження суттєво впливає на можливість підтримки балансу між попитом і пропозицією електричної енергії.

Еволюція концепцій розподілу навантаження в електричних системах відображає поступове удосконалення методів, спрямованих на підвищення стабільності, ефективності та надійності системи та пропонує заходи з пошуку нових можливостей.

Спочатку концепція розподілу навантаження зосереджувалась головним чином на балансуванні навантажень між різними генераторами та лініями електропередачі, щоб запобігти перевантаженню та забезпечити безперервне електропостачання. Ранні електричні системи працювали з відносно простим підходом, де розподіл навантаження здійснювався на основі фіксованих графіків і статичних припущень щодо попиту. Однак цей метод виявився неповноцінним, оскільки електричні мережі ускладнювалися, а попит на електроенергію різко зріс, що потребувало більш складних стратегій [1].

За мірою розширення електричних систем і прискорення індустріалізації, стала очевидною потреба в більш динамічних методах розподілу навантаження. Прогнозування навантаження включало передбачення майбутнього попиту на електроенергію на основі зібраних історичних даних і майбутніх тенденцій, що дозволило планувати та розподіляти ресурси більш ефективно. Технології обмеження пікових навантажень спрямовані на зниження максимального попиту в періоди

пікового навантаження, заохочуючи споживачів переносити їх використання на періоди, що не є піковими [1].

У середині минулого століття з'явилися більш досконалі методи розподілу навантаження завдяки технологічним інноваціям і зростаючій складності електричних мереж. Розробка систем автоматичного керування генерацією (АКГ) стала першим кроком, дозволяючи коригувати ступінь генерації в реальному часі на основі коливань навантаження. Системи АКГ використовували телеметричні та контрольні сигнали для підтримки балансу між попитом і пропозицією, покращуючи швидкість реагування та стабільність електричних систем [1].

Наприкінці минуло – початку поточного століття змінився підхід до розподілу навантаження, що ознаменувалося широким впровадженням цифрових технологій та розумних мереж. Розширення вимірювальної інфраструктури (ВІ) та широке застосування систем диспетчерського контролю та збору даних (SCADA) розширило можливості методів розподілу навантаження в реальному часі. Системи ВІ дозволило отримувати розширені дані про споживання з інтелектуальних лічильників, що дозволило краще аналізувати схеми навантаження з високим ступенем точності. Системи SCADA сприяли дистанційному контролю та забезпеченні принципів автоматизації роботи мереж, забезпечуючи більш динамічне та оперативне керування навантаженням [1].

«Розумні мережі» для своєї роботи використовують велику кількість датчиків, розгалужені комунікаційні мережі та поточну аналітику даних для кращого розподілу навантаження. Отримані в режимі реального часу дані дозволяють більш ефективно контролювати та керувати розподілом навантаження, реагуючи на коливання попиту. Використання прогнозної аналітики та алгоритмів машинного навчання дозволяє точніше прогнозувати та керувати навантаженням [2].

У електричній мережі навантаження розподіляються між різними компонентами: генераторами, трансформаторами, лініями електропередачі та інше. У тих випадках, коли навантаження розподіляються нерівномірно або спостерігається його недостатнє керування, можна «отримати» ряд операційних проблем, які призводять до погіршення функціонування енергетичної системи. При цьому система може «відчувати» надвисокі навантаження, що може призвести до перевантаження певних компонентів та до їх потенційних збоїв або їх виходу з ладу. Ефективність енергосистем тісно пов'язана з ефективним розподілом навантаження. У тих випадках, коли електричні навантаження розподілено оптимально, система працює найближче до проектної потужності, зменшуються втрати, пов'язані з неефективністю передачі та нерівномірністю генерації. Нерівномірний розподіл навантаження може призвести до надмірного зношення обладнання, підвищених втрат енергії та зростання експлуатаційних витрат. Завдяки більш рівномірному розподілу навантажень енергетичні системи можуть працювати з більшою ефективністю, мінімізуються втрати енергії та продовжується термін служби електрообладнання [3].

Однією з вимог до електричних систем є підтримка постійного рівня напруги та частоти, що дозволяє говорити і сподіватися на забезпечення її стабільної роботи. Значні відхилення зазначених параметрів можуть викликати ситуаційні несправності обладнання, збої в системі та несподіване припинення електропостачання. Інтервальний розподіл навантаження, коли навантаження приєднуються в чітко визначені періоди часу, може суттєво покращити можливості стабілізації напруги і частоти. Ефективне керування інтервалами навантаження допомагає зменшити вплив раптових змін навантаження, які в іншому випадку могли призвести до виникнення нестабільності. Це особливо важливо у періоди «пікового споживання», коли регулювання навантаженнями не буде ефективним. Зазначені події можуть призвести до виникнення перепадів напруги та частотного дисбалансу, що перенавантажує енергетичну систему [3].

Доцільний та відповідний до наявної в часі генерації розподіл навантаження сприяє стійкості електричних систем, дозволяючи їм краще протистояти збоям і швидко відновлюватися після їх виникнення. Системи, що мають відповідне керування розподілом навантаження є більш стійкими до каскадних відмов, які можуть спостерігатися тоді, коли відмова одного компонента викликає ланцюгову реакцію наступних відмов. Завдяки балансуванню навантажень і уникненню перевантаження окремих компонентів зменшується ймовірність таких каскадних збоїв та підвищується загальна надійність функціонування системи енергопостачання.

Сучасні методи розподілу навантаження базуються на здійсненні моніторингу стану в реальному часі та здійсненні динамічного керування навантаженням. Зазначені методи дозволяють адаптаційно реагувати на зміну умов навантаження, здійснюючи оптимізацію продуктивності системи та забезпечуючи стабільність її роботи. Наявні дані про умови навантаження в режимі реального часу дозволяють операторам приймати обґрунтовані рішення щодо коригування навантаження та стратегії розподілу електричної енергії. З огляду на те, що електричні системи стають все більш складними та інтегрованими з відновлюваними джерелами енергії, потреба у складних підходах до розподілу навантаження стає ще більш актуальною. Для подолання зазначених проблем відбувається поступова інтеграція технологій розумних мереж до мереж існуючих. Розумні електромережі («Smart Grid») використовують у своїй роботі вдосконалені датчики, комунікаційні мережі та системи керування, що дозволяє покращити розподіл навантаження та можливості керування системою. Технології Smart Grid полегшують здійснення моніторингу і контролю електричних навантажень у режимі реального часу та забезпечують оперативне та більш ефективне керування потоками електроенергії [3].

Таким чином, відповідний до реальності розподіл навантаження є визначним для роботи електричних систем, впливає як на їх стабільність, так і на їх ефективність. Відповідне до поточного стану керування навантаженням гарантує, що електричні системи будуть працювати надійно, ефективно та стійко, тоді як невідповідний розподіл навантаження може призвести до значних операційних проблем та неефективності роботи з високими втратами. Оскільки електричні системи продовжують розвиватися, до них інтегруються нові технології, важливість ефективного розподілу навантаження стає все більш критичною для підтримки продуктивності енергетичних системи та подолання нових проблем та викликів.

1.2 Вплив нерівномірного розподілу навантаження на продуктивність системи

Нерівномірний розподіл навантаження може серйозно впливати на продуктивність електричних систем, призводить до неефективності функціонування, перевантажень та потенційних збоїв. У тих випадках, коли електричне навантаження нерівномірно розподіляється по системі, різноманітні компоненти даної системи «відчувають» результат цих явищ, що здатне порушити баланс відповідних параметрів, необхідний для оптимальної роботи зазначеного обладнання (наприклад, у сценаріях зосередження потужності (навантаження) в окремих частинах електричної системи певні лінії електропередачі, трансформатори та інші елементи можуть піддаватися надмірному навантаженню, що перевищує їх проектну потужність). Зазначений дисбаланс може призвести до локальних перевантажень, коли компоненти змушені працювати з більшою або меншою потужністю, яка є відмінною від номінальних значень, що

призводить до непродуктивних втрат або порушення функціональності – перевантажені/недовантажені компоненти системи не тільки страждають від прискореного зношення, але й демонструють низьку ефективність роботи, оскільки опір та втрати, пов'язані з цими навантаженнями, збільшуються [4].

Наслідки недосконалого або невідповідного розподілу навантаження можуть виходити за межі «простої» неефективності роботи, оскільки тут мова може йти про серйозні перевантаження електричної системи і компонентів цієї системи. Перевантаження виникає в тих випадках, коли електричні компоненти піддаються навантаженням, що перевищують їх максимальні робочі межі. Такі стани часто призводить до підвищених температур елементів обладнання та викликають термічну деградацію ізоляційних матеріалів. Зазначене не тільки погіршує роботу окремих компонентів/елементів обладнання, але й можуть поставити під загрозу стабільність функціонування всієї електричної системи.

Електричні системи розробляються для роботи при різних сценаріях, але надмірний або недостатньо керований розподіл навантаження може «вивести» такі системи за межі безпечної роботи. При цьому підвищується ймовірність поломок обладнання, оскільки його компоненти, які працюють в умовах тривалого перевантаження, є більш схильними до виходу з ладу в цих умовах. Вихід з ладу критичних компонентів електричних систем, таких як генератори або трансформатори, може призвести до каскадних/масових відключень, що підкреслює вразливість електричних систем до виникнення дисбалансу при розподілі навантажень та підкреслює важливість підтримки рівноважного розподілу між компонентами. Для здійснення відповідного розподілу можуть бути використані провідні технології моніторингу та контролю. Неточні прогнози навантаження або недостатній моніторинг у реальному часі здатні підвищити проблеми, пов'язані з дисбалансом навантаження, що призведе до неоптимальних реакцій у системі та зростанні ризику збоїв у її

роботі. Таким чином, інтеграція складних методів керування навантаженням, таких як динамічне балансування навантаження та прогнозна аналітика, дозволять уникати проблем, пов'язаних із неправильним розподілом навантаження [5].

Таким чином, неправильний розподіл навантаження має суттєві наслідки для електричних систем, що призводить до їх неефективності, виникнення надмірних перевантажень та потенційних збоїв в роботі обладнання. Вплив нерівномірного розподілу навантаження на продуктивність системи підкреслює необхідність впровадження ефективних стратегій управління навантаженням для підтримки стабільності, ефективності та надійності системи.

Аналіз впливу інтервального розподілу навантаження на продуктивність електричної системи передбачає детальне вивчення того, як різний розподіл електричного навантаження протягом різних часових інтервалів впливає на загальну ефективність, стабільність і надійність роботи енергосистем.

З одного боку, розподіл навантаження, який відноситься до визначення розподілу попиту на електроенергію між різними компонентами у різні періоди часу, може суттєво оптимізувати роботу системи. Вивчаючи те, як різні інтервали навантаження впливають на продуктивність системи, можна отримати уявлення про механізми, які впливають на здатність керування потоками енергії, і визначити шляхи для поліпшення функціонування електричних систем. Для здійснення аналізу необхідно розробити математичну та імітаційну моделі, які відтворюють поведінку електричних систем за змінних умов навантаження. Складені моделі дозволяють перевірити, як різноманітні стратегії розподілу навантаження впливають на головні показники продуктивності системи: стабільність напруги, можливість регулювання частоти та загальна ефективність системи. Практично, інтервальний розподіл навантаження передбачає управління в часі величинами електричних навантажень для

ефективного балансування між попитом і пропозицією. Здійснюючи аналіз того, яким чином розподіл навантаження впливає на різні фактори функціонування, можна визначити оптимальні стратегії керування навантаженням, що дозволить мінімізувати вірогідність збоїв та підвищити продуктивність системи. Подібним чином методи балансування навантаження, які здатні рівномірно розподіляти навантаження між різними компонентами, дозволять запобігти локальним перевантаженням і продовжити термін служби критичної інфраструктури та обладнання [6].

Аналіз інтервального розподілу навантаження повинен враховувати вплив сучасних досягнень в технологіях та нормативні вимоги до якості електропостачання. Застосування технологій розумних мереж, розгалуженої структури вимірювальних пристроїв та систем моніторингу стану в реальному часі може надати вичерпні дані для здійснення оптимізації стратегій розподілу навантаження. Це дозволить з більшою точністю здійснювати керування електричними навантаженнями в режимі реального часу на основі поточних даних.

Існуюча нормативно-правова база сприяє досягненню енергетичної ефективності та стійкості електричних систем, і впливає на практичний розподіл навантаження, оскільки встановлює вимоги щодо зменшення споживання енергії та покращення ефективності роботи енергетичної системи. Врахування цих факторів при здійсненні аналізу роботи енергетичних систем можна розробити певні стратегії, що відповідають як існуючим технологічним можливостям з урахуванням нормативних вимог [6].

У підсумку, аналіз впливу інтервального розподілу навантаження на продуктивність електричних систем є складним процесом, який передбачає вивчення того, як різні розподіли електричного навантаження впливають на ключові показники продуктивності їх роботи. Розробляючи та застосовуючи математичні моделі, здійснюючи моделювання та враховуючи дані, отримані в реальному часі, можна отримати повне

розуміння того, яким чином різні стратегії розподілу навантаження впливають на електричні системи. Здійснення такого аналізу є важливим для оптимізації методів управління навантаженням, покращення стабільності в системі та забезпечення надійності електропостачання в складних та динамічних електричних середовищах.

1.3 Вплив інтервального розподілу навантаження на стабільність, ефективність і надійність роботи електричних систем

Визначення того, як інтервальний розподіл навантаження впливає на стабільність, ефективність і надійність електричних систем, потребує здійснення детального аналізу того, як зміна часу роботи та величини електричних навантажень впливає на робочі характеристики енергосистем. Інтервали розподілу навантаження – це періоди часу, протягом яких електричні навантаження функціонують та піддаються керуванню. Зазначені інтервали можуть суттєво впливати на продуктивність електричних систем, змінюючи розподіл попиту на електроенергію між різними компонентами мереж. Для розуміння цього впливу необхідно визначити, яким чином різні інтервали розподілу впливають на динаміку поведінки системи, зокрема, на коливання величини напруги, стабільність частоти та ККД системи [6].

Стабільність електричних систем значною мірою визначається здатністю системи підтримувати постійність рівнів напруги та частоти незалежно від коливання навантаження. Інтервали розподілу навантаження, які визначають час підвищеного попиту протягом коротких проміжків, можуть призвести до суттєвого падіння напруги та відхилення частоти. Ці явища впливають на ефективність та стабільність роботи чутливого обладнання. Більш рівномірний розподіл навантаження на триваліші

інтервали допомагають здійснити ефективне керування рівнями напруги та частотою, зменшуючи ймовірність нестабільної роботи та забезпечуючи надійність роботи системи. Ефективна робота електричної системи характеризується мінімізацією втрат енергії та оптимізацією використання наявних енергетичних ресурсів. Інтервали розподілу навантаження, що характеризуються високим попитом, можуть призвести до неефективної роботи генеруючих та транспортуючих електричну енергію засобів. Впроваджуючи різні стратегії розподілу навантаження, які вирівнюють криву попиту та уникають екстремумів споживання, системи здатні функціонувати ближче до їх оптимальної ефективності, зменшуючи втрати енергії та покращуючи загальну продуктивність системи [7].

Надійна електрична система – це та, яка може стабільно забезпечувати живлення споживачів без переривань, навіть за змінних умов навантаження. Невідповідність інтервалів розподілу навантаження можуть призвести до надмірного навантаження на компоненти електричної системи, що призводить до зростання частоти відмов і вірогідності відключень. Раптові та несподівані стрибки навантажень здатні перевантажити механізми захисту системи, що призводить до потенційних збоїв та/або нестабільності функціонування електричної системи. Ефективні методи розподілу навантаження, які зменшують частоту та величину і частоту піків споживання, сприяють підвищенню надійності системи шляхом мінімізації перевантажень окремих компонентів та забезпечення збалансованої роботи системи [6].

Здійснюючи рівномірний розподіл навантаження зазначене допомагає зменшити несприятливий вплив високого попиту в окремі періоди на стабільність і ефективність системи. Застосування передових технологій моніторингу та керування може надати додаткову інформацію про вплив інтервалів розподілу навантаження. Дані в режимі реального часу від інтелектуальних лічильників, датчиків і систем керування дозволяють більш точно керувати розподілом навантаження, дозволяючи приймати

обґрунтовані рішення щодо коригування навантаження та стратегій розподілу, оптимізувати інтервали розподілу навантаження для досягнення кращої стабільності, ефективності та надійності.

Таким чином, різні інтервали розподілу навантаження мають значний вплив на стабільність, ефективність і надійність системи. Концентрація високих навантажень у короткі проміжки часу може призвести до суттєвого падіння напруги, відхилень частоти та збільшення втрат, тоді як більш рівномірний розподіл навантажень сприяє підвищенню стабільності, ефективності та надійності. Ефективні методи управління навантаженням, які враховують ці фактори дозволять оптимізувати продуктивність електричних систем.

Для подальшого дослідження «вводимо» гіпотезу, яка передбачає, що більш рівномірний розподіл електричних навантажень між піковими та непіковими періодами дозволить зменшити ризики, пов'язані з високим попитом, зменшить робочі навантаження на компоненти системи та підвищить загальну енергоефективність. І навпаки, нерівномірний розподіл навантаження, що характеризується високими піковими навантаженнями, зосередженими у вузьких проміжках часу, призведе до підвищення нестабільності системи, вищих втрат енергії та збільшення ймовірності виходу з ладу окремих компонентів.

Дана гіпотеза ґрунтується на кількох ключових припущеннях щодо позитивних і негативних факторів, пов'язаних з інтервальним розподілом навантаження:

- ефективний розподіл навантаження призводить до згладжування піків попиту, тим самим зменшуючи величину навантаження на важливі компоненти енергосистеми,

- рівномірний розподіл попиту дозволяє системі працювати якомога ближче до своєї оптимальної потужності, не «відчуваючи» впливу надмірних навантажень,

- удосконалені методи управління навантаженням дозволяють точніше контролювати те, як навантаження розподіляються між окремими часовими інтервалами,
- інтеграція технологій розумних електромереж надає необхідні інструменти для моніторингу та контролю стану в реальному часі,
- недостатнє керування розподілу навантаження, що характеризується зосередженими піковими навантаженнями, призводить до надмірних навантажень на компоненти систем,
- необхідно враховувати вплив різноманітних зовнішніх факторів – зокрема присутність розподілених енергетичних ресурсів, які можуть ускладнити управління розподілом навантаження через мінливість генерації.

1.4 Провідні методи та технології, що використовуються для управління розподілом навантаження

Новітні методи та технології, що використовуються для управління розподілом навантаження, спираються на прогрес у цифрових технологіях та широкі можливості по аналізу даних.

Одним із провідних нововведень при використанні технологій розумних мереж є реалізація моніторингу навантаження в реальному часі за допомогою розумних лічильників і датчиків. Зазначені пристрої надають точні дані про споживання електроенергії, що дозволяє відстежувати зміну навантажень з високою точністю. Моніторинг величин у режимі реального часу дозволяє миттєво виявляти аномальні стани – раптові стрибки споживання або збої в роботі обладнання, які можна оперативно усунути, щоб запобігти майбутнім збоям і підтримувати стабільність функціонування системи [8].

Розширена аналітика даних і алгоритми машинного навчання є невід’ємною частиною сучасного управління розподілом навантаження – вони здатні обробляти великі обсяги даних з метою визначення закономірностей для передбачення майбутніх навантажень за можливості оптимізації та забезпечення стратегії розподілу навантаження. Прогнозна аналітика дозволяє передбачати коливання попиту та відповідно коригувати виробництво і розподіл енергії. Моделі машинного навчання розширюють ці можливості шляхом навчання на історичних даних та адаптації до нових умов функціонування, підвищуючи точність прогнозів і ефективність стратегій управління навантаженням [8].

Динамічне балансування навантаженням передбачає постійне коригування розподілу навантаження в режимі реального часу на основі поточних умов роботи системи та доступних обчислювальних ресурсів. Динамічне балансування допомагає підтримувати стабільне та ефективне живлення споживачів шляхом перерозподілу навантажень від перевантажених компонентів до недовантажених. Такий підхід не тільки підвищує надійність системи, але і дозволяє оптимізувати використання ресурсів, зменшуючи експлуатаційні витрати енергії.

Останнім часом для управління розподілом навантаження широкого розповсюдження набувають системи накопичення енергії: акумуляторні батареї, гідро-, пневмо- та гіроакумулятори. Дані системи зберігають надлишкову енергію, вироблену в періоди низького попиту, і вивільняють її під час пікового споживання, що здатне ефективно врівноважувати попит і пропозицію. Передові технології акумуляторних батарей пропонують високу щільність енергії та значні струми, що робить їх придатними для додаткового керування навантаженням [9].

Додатковими технологіями для оптимізації розподілу навантаження є передові системи автоматизації та управління електромережами. Системи диспетчерського контролю та збору даних (SCADA), а також системи управління розподілом (DMS) дозволяють здійснювати моніторинг і

контроль роботи мережі в реальному часі. Зазначені системи сприяють можливості забезпечення автоматизації балансування навантаження, виявлення несправностей і можливість реконфігурації системи, що покращує можливості по швидкому реагуванню на зміни та підвищити стійкість мереж. Технології автоматизації мереж дозволяють системам самовідновлюватися, що дозволяє в автоматичному режимі виявляти несправності, мінімізуючи негативний вплив від цих явищ [10].

Інтегровані системи енергоменеджменту (IEMS) забезпечують цілісний та комплексний підхід до розподілу навантаження. IEMS поєднує різні технології та методології: реагування на попит, накопичення енергії та інтеграцію розподіленої генерації і накопичувачів, в єдину платформу для оптимізації роботи системи. Зазначені системи використовують розширені алгоритми та дані реального часу для розширеної координації різних аспектів розподілу навантаження, забезпечуючи узгодженість для управління попитом [10].

У підсумку можна сказати, що найсучасніші методи управління розподілом навантаження охоплюють ряд передових технологій і методологій, призначених для підвищення ефективності, стабільності та гнучкості роботи електричних систем. Використовуючи передові технології можна ефективно керувати складними електромережами, забезпечуючи надійне та ефективне електропостачання споживачів.

1.5 Огляд наукових статей по використанню способів розподілу навантаження в різних застосунках

У статті [11] представлена вдосконалена методика оцінки стабільності та надійності енергосистем шляхом введення моделі ентропії потоку потужності зі змінною вагою. Основною метою дослідження було

підвищення точності аналізу роботи енергосистеми при змінних умовах навантаження, шляхом подолання обмежень традиційних методів, які часто користуються статистичним або рівномірним розподілом навантажень. Такі традиційні підходи можуть не повністю відображати складність і динаміку сучасних енергетичних систем, що може призвести до неточної оцінки їх стабільності. У роботі була створена складна математична модель, у якій було об'єднано розподіл інтервалів навантаження, що дозволило диференціювати стани потоків потужності на основі їх значення та ступеня впливу. Застосовуючи змінні ваги для різних станів потоків електроенергії, модель прагне більш точно відобразити умови функціонування та коливання параметрів в енергосистемах. У роботі було реалізовано алгоритм, призначений для обчислення ентропії потоку потужності з визначеними змінними вагами, забезпечуючи тим самим більш детальний і точний аналіз. Завдяки ретельному моделюванню та здійсненій перевірці отримані результати показали, що запропонований метод значно покращує виявлення та прогнозування потенційних нестабільностей в енергосистемах, особливо в умовах коливань навантажень. Запропонований підхід являє собою комплексний інструмент для інженерів і системних операторів, який дозволяє їм приймати більш обґрунтовані та своєчасні рішення для підтримки стабільності та надійності електричних мереж.

У статті [12] представлено дослідження, спрямоване на розробку методу інтервального потоку потужності для радіальних систем з використанням лінеаризованих рівнянь DistFlow. Основна мета дослідження полягає в тому, щоб усунути невизначеності в розрахунках потоку електроенергії, спричинені інтеграцією розподілених відновлюваних джерел енергії та електричних транспортних засобів в енергомережу. Ці невизначеності виникають через випадковий і періодичний характер генерації з відновлюваних джерел енергії, а також через змінний попит від навантажень у вигляді електромобілів.

Традиційними методами досить важко точно представити ці невизначеності, що вимагало розробки більш надійної та точної моделі. Запропонований у роботі метод визначено як задача оптимізації, де інтервальний потік потужності обчислюється шляхом використання лінійних властивостей рівнянь DistFlow. Процес лінеаризації спрощує досліджувати складні, нелінійні характеристики потоків електроенергії в радіальних системах розподілу, що дозволяє ефективно вирішувати проблему за допомогою існуючих алгоритмів оптимізації. Дослідження підкреслює переваги методу інтервального потоку потужності перед традиційними методами, зокрема, у його здатності поратися з випадковою генерацією потужності. Представляючи невизначені параметри як інтервали з верхньою та нижньою межами, метод забезпечує більш інтуїтивне та точне «зображення» стану енергосистеми. Результати демонструють, що запропонований метод не тільки охоплює повний спектр можливих сценаріїв потоків електроенергії, але й досягає цього з більшою обчислювальною ефективністю порівняно з існуючими методами, такими як метод Монте-Карло.

У статті [13] представлено всебічне дослідження по розробці двоетапної оптимальної моделі диспетчеризації для систем активного розподілу (ADS) із зосередженням на інтеграції періодичної розподіленої генерації та змінних вимог до навантаження. Основною метою цього дослідження є усунення невизначеностей, пов'язаних із періодичною та невизначеною генерацією енергії та роботою навантажень, шляхом використання техніки кількох сценаріїв. Ефективність складеної моделі перевірялась за допомогою натурних досліджень за різними сценаріями, що враховують різні рівні потужності та роботу навантажень. Створена модель значно зменшує різницю між піками і провалами навантаження, що є критичним показником для підтримки стабільної роботи енергосистеми. Крім того, здатність моделі оптимізувати роботу системи диспетчеризації в реальному часі, доводить її корисність в управлінні динамічною та

невизначеною природою поведінки мережі. Використання кількох сценаріїв та ймовірнісних моделей у поєднанні з передовими методами оптимізації надає практичні рекомендації операторам енергосистем, які стикаються з проблемами, пов'язаними з сучасними децентралізованими енергетичними системами.

У статті [14] представлено дослідження, яке мало на меті розробку оптимальної стратегії управління розподільчими лініями під час виникнення надзвичайних ситуацій і перевантажень, зокрема шляхом використання гнучкості «розумних» навантажень. Підвищення стабільності та надійності електроенергетичних систем в умовах зростаючої кількості розподілених енергетичних ресурсів та зростання кількості електричних транспортних засобів. Зазначене створює суттєві проблеми, такі як перевантаження ліній, перевантаження трансформаторів і підвищене коливання попиту на енергію. У дослідженні пропонується застосування децентралізованого підходу, який базується на стратегії реагування на попит, зокрема Emergency Demand Response (EDR). Дана стратегія дозволяє керувати інтелектуальними побутовими приладами. Ідея полягає в тому, щоб зменшити навантаження на мережу шляхом зниження ефекту «відскоку» (компенсації) попиту та зберегти комфорт для споживачів у таких умовах. У дослідженні пропонується нова метода, коли управління інтелектуальними навантаженнями розділяється на трьох рівнях: рівень розподільчого вузла, рівень трансформатора та споживацький рівень, кожен з яких контролюється і керується окремо для координації процесу оперування навантаженням. Запропонована система розроблена для роботи без потреби в моделях прогнозування, дозволяючи споживачам гнучко керувати своїми інтелектуальними навантаженнями відповідно до потреб, у той час як інтелектуальна система оптимально розподіляє ресурси для мінімізації впливу як на мережу, так і на споживачів. Ефективність цього підходу підтверджено шляхом моделювання. Результати продемонстрували те, що запропонована

методологія значно зменшує «відскок» попиту на 53% і знижує перевантаження трансформаторів на 40%.

У статті [15] представлено дослідження, спрямоване на покращення балансування навантаження в розподільчих мережах низької напруги за допомогою застосування модифікованого алгоритму оптимізації Leapfrog (MOLFOP). Основною метою дослідження було вирішення питання якості електричної енергії шляхом оптимізації підключення навантажень до різних фаз у системах розподілу низької напруги, тим самим зменшуючи втрати енергії та покращуючи ефективність роботи мережі. У дослідженні запропоновано до використання метод, який розширює цільову функцію балансування навантаження, щоб врахувати ці варіації, дозволяючи алгоритму MOLFOP оптимізувати з'єднання навантаження при тривалих періодах роботи. Методологія дослідження передбачає формування цільової функції, яка враховує зміни навантаження в залежності від часу, і наступного застосування алгоритму MOLFOP для визначення оптимального розподілу навантаження між трьома фазами розподільчої мережі. Результати дослідження демонструють, що запропонований метод значно знижує втрати потужності в мережі та забезпечує ефективну стратегію довгострокового балансування навантаження. Отримані дані свідчать про те, що цей підхід можна широко застосовувати в подібних низьковольтних мережах, пропонуючи значні переваги з точки зору енергозбереження та забезпечення встановленої продуктивності мережі.

У статті [16] представлено дослідження, зосереджене на розробці вдосконаленої моделі розподільчої мережі шляхом використання даних з інтелектуальних лічильників. Мета роботи полягає в тому, щоб використати значні об'єми даних для створення змінних у часі моделей навантаження, які можна інтегрувати в моделі систем розподілу. Дослідження підкреслює обмеження традиційних моделей систем розподілу, які часто покладаються на застарілі або неточні дані, і рекомендує застосування нового підходу, який використовує в реальному

часі дані з розумних лічильників. У дослідженні використовується програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом GridLAB-D завдяки його гнучкості і модульності. Методологія дослідження передбачає перетворення отриманих даних у формат GridLAB-D для передбачення потреб в активній та реактивній потужності в різні проміжки часу. Отримані результати продемонстрували працездатність моделі та її узгодженість з реальними даними, хоча спостерігаються деякі розбіжності щодо активної потужності, особливо в зимові періоди. Незважаючи на ці неточності, в дослідженні робиться висновок, що використання даних інтелектуальних лічильників значно підвищує точність моделей роботи розподільчих систем, які можуть бути використані для оцінки стану навантаження, корекції помилок в роботі мереж та коректності роботи пристроїв контролю.

У статті [17] досліджується вплив роботи систем реагування на попит у контексті систем розподілу електричної енергії. Доводиться, що впровадження систем реагування на попит може підвищити ефективність і стабільність роботи електромереж. В роботі здійснюється оцінка впливу принципів реагування на попит на ключові параметри розподільчої мережі (втрати, напруги, максимальні струми). У дослідженні в контексті розумних мереж моделюється робота різноманітних споживачів, споживання і роботу яких можна зміщувати в межах прийнятного часу затримки для зменшення пікового попиту без шкоди для споживчого комфорту. Результати моделювання продемонстрували значні переваги застосування принципів реагування на попит для покращення стабільності величини напруги, зменшення загальних втрат у системі та значень максимальних струмів у розподільчих лініях. У дослідженні доводиться те, що зміна режиму роботи певних приладів, дозволяє вирівняти споживання впродовж доби, ефективно долаючи піки попиту н енергію. Підкреслюється суттєвий потенціал принципів реагування на попит як обов'язкового компонента майбутніх інтелектуальних мереж. Моделюючи

гнучкість розподілу навантажень та враховуючи вимоги забезпечення комфорту споживання в роботі рекомендуються практичні підходи до впровадження принципів реагування на попит.

У статті [18] обговорено розробку та застосування моделі мішаного цілочисельного програмування (MLMIP) на основі машинного навчання для оптимізації інтервалів непараметричного прогнозування навантаження. Метою дослідження було підвищення точності та ефективності прогнозування електричних навантажень шляхом мінімізації інтервалів прогнозування та забезпечуючи задану ймовірність настання певних станів. Запропонована модель MLMIP усуває складні обмеження прогнозування, використовуючи двійкові змінні для явного формулювання станів та запроваджуючи стратегію зменшення бінарних змінних для значного підвищення обчислювальної ефективності моделі. Модель також використовує машину екстремального навчання (ELM) для непараметричної регресії, що дає змогу встановлювати складні нелінійні зв'язки між вхідними характеристиками та вихідними даними. Методологія дослідження включає численні експерименти з використанням фактичних даних роботи підстанцій для перевірки ефективності моделі. Результати демонструють, що модель MLMIP забезпечує кращу якість передбачення у порівнянні з традиційними методами. Підкреслюється висока обчислювальна ефективність моделі, що робить її придатною для реальних енергетичних систем і надаючи надійний, ефективний та адаптивний метод для побудови оптимальних непараметричних прогнозів споживання електричної енергії.

У статті [19] представлено розробку та застосування підходу інтервального потоку навантаження (ILF) для усунення невизначеностей при аналізі роботи енергетичних систем. Метою дослідження було підвищення точності розрахунків потоків електричної енергії в електроенергетичних системах. Традиційні методи оцінки потоків потужності використовують фіксовані вхідні дані, що призводить до

неточностей кінцевої оцінки. Для підвищення точності пропонується метод ILF, який здійснює моделювання споживання та генерації в інтервалах, що враховують діапазон можливих значень, а не одиночні значення. У дослідженні метод ILF протиставляється традиційному методу ймовірнісного потоку навантаження (PLF), який використовує для порівняння моделювання метод Монте-Карло (MCS). Метод PLF використовує розподіл ймовірностей для моделювання невизначеностей, а метод ILF використовує інтервальні обчислення. В роботі показано, що метод ILF може забезпечити результати, які можна порівняти з результатами, отриманими за допомогою MCS, але з меншими обчислювальними зусиллями. Результати моделювання на реальних мережах показали, що метод ILF може ефективно передбачати діапазон можливих станів величин напруги та фазових кутів за невизначених умов функціонування. Дослідження пропонує надійну альтернативу ймовірнісним методам аналізу потоків електричної енергії, доводячи, що метод ILF може точно та ефективно поратися з невизначеністю роботи енергосистем.

У статті [20] представлено дослідження по застосуванню моделі інтервального оптимального потоку електричної енергії (I-OPF) в розподільчих мереж в умовах невизначеності споживання. Традиційні методи оптимізації потоків потужності (OPF) зазвичай передбачають використання конкретизованих вхідних даних, що обмежує їх здатність керувати невизначеністю, притаманною сучасним енергетичним системам. Для вирішення визначеної проблеми модель I-OPF використовує інтервальну арифметику й інтервальне розширення Тейлора для врахування невизначеностей, забезпечуючи більш точне розв'язання. У даній роботі модель I-OPF покращується шляхом застосування послідовної лінійної апроксимації та квадратично-конічного програмування, що покращує точність розв'язання шляхом усунення помилок, викликаних складовими вищого порядку. Ефективність розробленого методу була

перевірена на прикладі модифікованої системи розподілу та реальної мережі розподілу. У дослідженні робиться висновок, що модель I-OPF пропонує суттєве вдосконалення принципу інтервального розподілу навантаження в порівнянні з традиційними ймовірнісними та стохастичними методами OPF, зокрема з точки зору обчислювальної ефективності та здатності керувати невизначеністю. Удосконалена модель I-OPF забезпечує більш точні результати, особливо при роботі зі значною кількістю варіацій навантаження.

2 ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ПРО ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ІНТЕРВАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ

2.1 Принципи експлуатації електричних систем

Фундаментальні принципи роботи електричних систем ґрунтуються на взаємодії між окремими компонентами, що відповідають за генерацію, передачу та розподіл електричної енергії.

По суті електрична система працює за принципом пошуку балансу між «попитом» і «пропозицією», що забезпечить стабільне та надійне постачання електроенергії. Зазначений баланс досягається завдяки складній та відповідній взаємодії між цими окремими елементами – генераторами, трансформаторами, лініями електропередач та розподільчих мереж, кожен з яких відіграє важливу роль у забезпеченні встановлення відповідного балансу (рис. 2.1) [21].

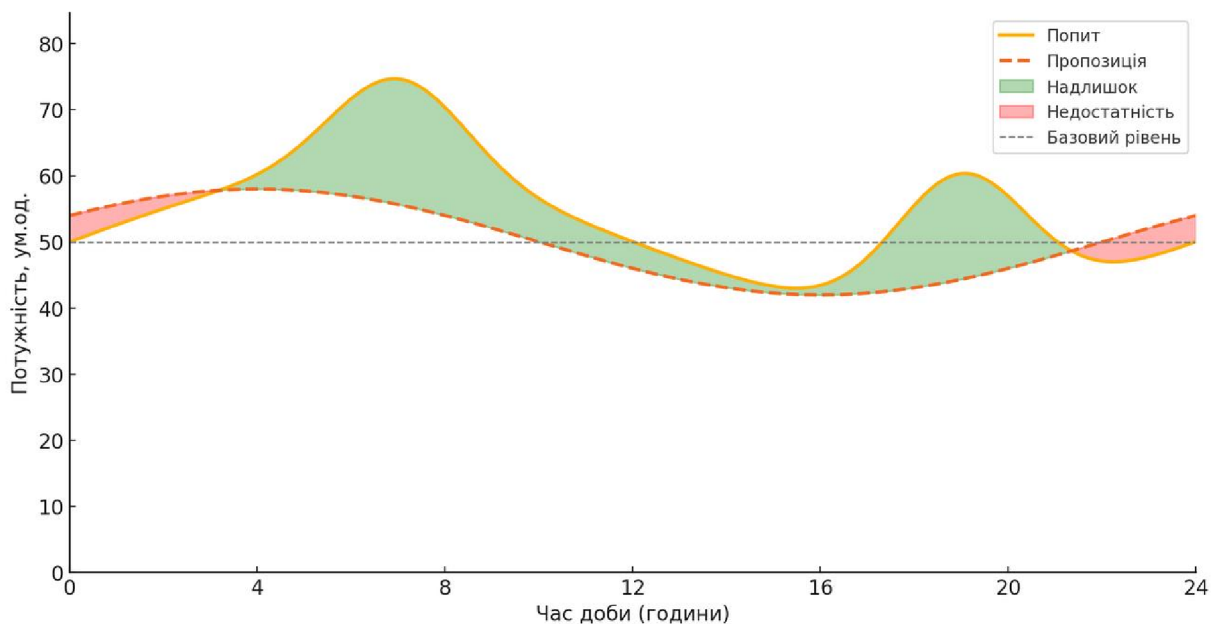


Рисунок 2.1 – Баланс попиту та пропозиції електричної енергії

Графік на рис. 2.1 ілюструє коливання попиту та пропозиції електричної енергії протягом доби, з піковими значеннями споживання у ранковий (близько 07:00) та вечірній (близько 19:00) час. Пропозиція (генерація) слідує за попитом, але із запізненням, що може викликати тимчасову недостатність електричної енергії у періоди піків споживання.

Динамічна поведінка електричних систем характеризується їх здатністю реагувати на зміни в навантаженні та/або умов генерації. Системна динаміка передбачає вивчення того, як електричні системи поведуться з часом у відповідь на різні фактори: зміна споживання, зміна генерації, виникнення несправностей та інше. Ключовими елементами динаміки системи є аналіз потоків потужності, зміна напруг, струмів та частоти. Аналіз потоків електричної енергії передбачає визначення розподілу електричної енергії в мережі, забезпечуючи збалансованість її виробництва, передачі та споживання. При цьому стабілізація величини напруги має провідне значення для підтримки її належних рівнів. Значення частоти може бути індикатором балансу між попитом і пропозицією електричної енергії – відхилення від номінальної частоти можуть призвести до нестабільності роботи системи та відключень [22].

Взаємодія між окремими елементами може бути пояснено загальноприйнятими законами електротехніки (закон Ома, закони Кірхгофа, закони Фаредея та іншими). Ці закони можуть бути покладені в основу моделювання навантаження та пояснення динаміки роботи системи, оскільки вони можуть лягти в основу для розрахунку потоків потужності, падінь напруги та зміну поведінки мережі.

На практиці електричні системи управляються та контролюються за допомогою певної комбінації «ручних», «автоматизованих» та «автоматичних» пристроїв і систем. Для централізованого контролю використовуються системи диспетчерського контролю та збору даних (SCADA), які дозволяють здійснювати моніторинг стану систем в реальному часі. Системи SCADA можуть надавати важливі дані для

прийняття відповідних керуючих рішень, дозволяючи відповідним чином здійснювати регулювання процесами генерації, керувати процесом розподілу та реагувати на проблеми, що виникають (рис. 2.2) [10].

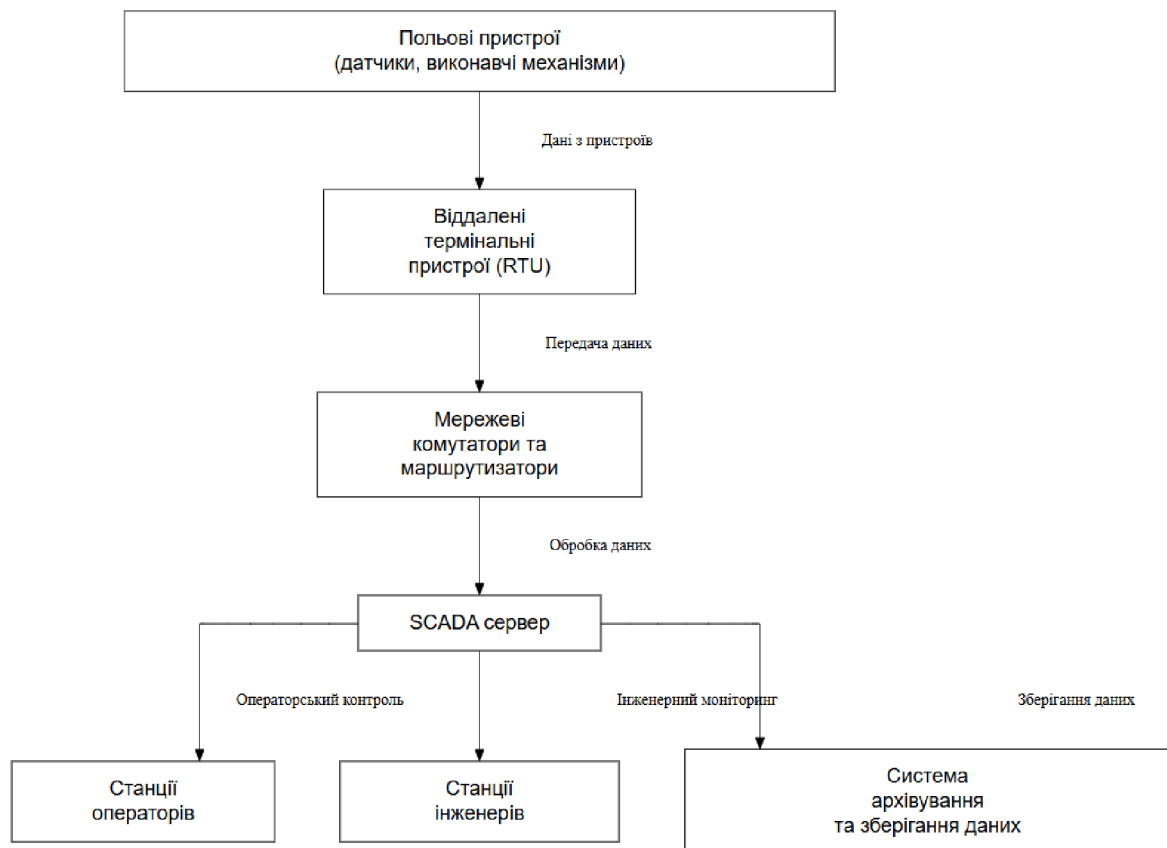


Рисунок 2.2 – Алгоритм функціонування системи SCADA

Таким чином, основні принципи роботи електричної системи передбачають балансування попиту та пропозиції за допомогою ефективного керування навантаженням у відповідності до динаміки поведінки системи. Керування навантаженням визначається поведінкою попиту на електроенергію, тоді як динаміка системи розглядає реакцію системи на зміни навантаження та умов генерації. Робота електричних систем підтримується системами SCADA та розширеними стратегіями управління. Усі ці елементи разом забезпечують стабільність, ефективність і надійність постачання електроенергії, адаптуючись до мінливих вимог і складності сучасних енергосистем.

2.2 Концепція інтервального розподілу навантаження

Інтервальний розподіл навантаження відноситься до стратегічного розподілу та управління електричними навантаженнями протягом заданих інтервалів часу для оптимізації стабільності системи, забезпеченні її нормованої ефективності та загальної продуктивності. Дана концепція ґрунтується на теоретичному розумінні того, що електричні системи повинні постійно балансувати між попитом і пропозицією, щоб підтримувати надійну роботу та мінімізувати експлуатаційні витрати. Основний принцип інтервального розподілу навантаження полягає в згладжуванні коливань попиту шляхом перерозподілу приєднання певних навантажень (споживачів) в різні періоди, таким чином уникаючи піків споживання, і які можуть перенавантажувати інфраструктуру електричної системи та призводити до неефективності та/або виникнення збоїв у роботі [23].

На стабільність функціонування електричних систем значною мірою впливає те, наскільки якісно у часі відбувається керування навантаженням. Традиційні методи розподілу навантаження часто зосереджені на використанні для прийняття рішень миттєвих або сукупних рівнях навантаження, що у більшості випадків можуть не відповідати часовим коливанням попиту. Використовуючи розподіл навантаження на основі інтервалів, електричні системи можуть краще узгоджувати керування навантаженням із змінним у часі характером попиту на електричну енергію. Такий підхід дозволяє більш точно контролювати роботу приєднаних навантажень, зменшуючи ймовірність раптових стрибків споживання. Згладжуючи ці коливання, інтервальний розподіл навантаження підвищує надійність системи та зменшує ризик виникнення негативних чинників, які можуть поширюватися по мережі.

Інтервальний розподіл навантаження надає суттєві переваги точки зору ефективності. Ефективне використання ресурсів генерації є однією з основних цілей, а управління навантаженнями через інтервали допомагає оптимізувати диспетчеризацію даної генерації. Електричні системи часто характеризуються наявністю базових, проміжних і маневрових генеруючих потужностей, кожна з яких характеризується різними рівнями експлуатаційних витрат та технологічними і нормативними обмеженнями. Шляхом перерозподілу навантажень на періоди непікового навантаження інтервальний розподіл може зменшити потребу в дорогих маневрових установках генерації, збільшивши використання більш ефективних, простих та економічних станцій для базової генерації. Крім того, інтервальний розподіл навантаження допомагає зменшити втрати енергії в мережах передачі та розподілу – високий попит на енергію в періоди пікового навантаження може призвести до збільшення втрат у лініях через більші струми, що виникають у мережі в таких режимах. Завдяки вирівнюванню кривої навантаження та уникненню пікових навантажень інтервальний розподіл зменшує зазначені втрати та підвищує загальну ефективність передачі електричної енергії. Такі дії покращують якість напруги в мережі, оскільки нижчі пікові струми призводять до зменшення падінь напруги та її кращого регулювання (рис. 2.3) [23].

Застосування удосконалених механізмів контролю – систем реагування на попит і балансування навантаженням в реальному часі – дозволяє краще зрозуміти та передбачувати процеси в мережах у різні інтервали часу. Така передбачуваність дозволяє використовувати цільові функції для здійснення коригування та узгодженої поведінки споживачів у відповідності до потреб електричної системи.

Загалом, інтервальний розподіл навантаження є доволі сучасним методом для підвищення стабільності та ефективності роботи електричних систем. Завдяки стратегічному управлінню навантаженнями протягом заданих часових інтервалів цей підхід вирішує проблеми, пов'язані з

коливанням попиту, оптимізує ресурси генерації та передачі, а також підвищує надійність функціонування системи. Теоретичні основи інтервального розподілу навантаження повинні підкреслити необхідність врахування часової динаміки при управлінні окремими споживачами та їх споживанням.



Рисунок 2.3 – Алгоритм впровадження принципів інтервального розподілу навантаження

2.3 Методика та методологія дослідження інтервального розподілу навантаження

Дослідження інтервального розподілу навантаження в електричних системах повинно бути структуроване таким чином, щоб забезпечити комплексний аналіз за допомогою поєднання методів моделювання та аналітичного підходу, доповненого методологією збору даних.

Основний підхід для здійснення такого дослідження повинен бути заснований на здійсненні моделювання шляхом використання сучасних обчислювальних моделей для дослідження того, як різні інтервали розподілу навантаження впливають на функціонування електричних системи. Даний підхід дозволить дослідити різноманітні сценарії розподілу навантаження в контрольованих умовах, дозволяючи оцінити їх вплив на стабільність, ефективність і надійність електричних систем без суттєвих обмежень. Використання сучасних інструментів моделювання та спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу енергосистем, можна здійснити моделювання складних електричних мереж, що містять різні за потужністю та часом роботи навантаження, та аналізувати поведінку цих складних систем у різних режимах [24].

Для повноцінного моделювання необхідно застосувати аналітичні методи, які дозволять отримати відповідні теоретичні залежності та дозволять здійснювати перевірку результатів моделювання. Під аналітичними методами розуміють математичне моделювання електричних систем і систем розподілу під час застосування методу інтервального навантаження. Поєднання результатів аналітичних розрахунків з даними, отриманими в процесі моделювання, може забезпечити надійну основу для розуміння теоретичних і практичних наслідків впровадження інтервального розподілу навантаження на роботу електричних систем. Для здійснення аналітичних розрахунків і

моделювання досить важливо отримати точні дані про розподіл навантаження в різні періоди часу. Ці дані є можуть бути як поточними – такими, що отримано в реальному часі, так і історичними – зібраними за час роботи даної або однотипних систем передачі електричної енергії. Дані, отримані в режимі реального часу, передбачають використання датчиків і вимірювальних пристроїв, встановлених в електричній мережі, які здійснюють постійне відстеження коливань навантажень та ефективності роботи системи, струм, напруги та потоки потужностей в різних точках мережі, які надаючи точні дані про те, як споживання навантаження коливається з часом. Аналіз історичних даних здатний доповнити отримані в реальному часі дані, надаючи інформацію про попередню поведінку електричної системи, розподіл навантажень та сценарії функціонування споживачів. Історичні дані можуть бути отримані від постачальних компаній, операторів мереж і попередніх наукових досліджень. Аналіз історичних даних може виявити закономірності, окремі тенденції та наявні аномалії, що сприяють розробці досконаліших моделей розподілу навантаження [24].

Отримані дані можуть бути проаналізовані за допомогою передових методів дослідження, які дозволяють здійснити кореляцію та виявити тенденцій в наявних даних про споживання та зміну навантаження. Проведений аналіз дозволить зрозуміти типову поведінку споживачів, сезонні коливання та вплив зовнішніх факторів та розробити сценарії запровадження інтервального розподілу навантаження при здійсненні моделювання. Поєднання моніторингу в режимі реального часу та аналізу історичних даних здатне забезпечити повне розуміння інтервальних моделей розподілу навантаження та їх вплив на покращення функціонування електричних систем.

Аналіз даних, які використовуються для впровадження методу інтервального розподілу навантаження, має вирішальне значення для інтерпретації результатів, отриманих в результаті роботи імітаційних

моделей для розуміння того, як різні моделі розподілу навантаження впливають на ефективність електричних систем. Такий аналіз повинен поєднувати передові статистичні методи та оцінку результатів моделювання, кожен з яких використовується для виявлення недоліків, похибок та розуміння можливості забезпечення стабільності, ефективності та надійності роботи електричних систем.

Серед таких провідних методів дослідження можуть бути виокремлені [24]:

- «Метод статистичного аналізу» надає потужні інструменти, необхідні для інтерпретації складних наборів даних і виявлення важливих закономірностей та зв'язків. Даний метод передбачає узагальнення та опис характеристик зібраних даних за допомогою статистичних показників: середнє значення, медіана, мода, стандартне відхилення та дисперсія, які забезпечують краще розуміння розподілу навантаження та показників функціонування системи;

- «Метод вибіркової статистики» може бути використаний для того, щоб зробити більш широке узагальнення та висновки на основі вибірових даних для всієї сукупності. Даний метод використовує процедури «перевірки гіпотез» та встановлення «довірчих інтервалів» для визначення того, чи є спостережені закономірності статистично значущими або вони є випадковими;

- «Метод регресійного аналізу» може бути використаний для розуміння та встановлення зв'язків між інтервалами розподілу навантаження та показниками функціонування системи. Моделі лінійної регресії дозволять кількісно оцінити вплив різних факторів на досліджувані показники, стабільність, ефективність та надійність електричної системи. Такі форми регресійного аналізу, такі як «регресія поліноміального типу» та «аналіз трендів» можуть бути використані для встановлення нелінійних зв'язків і часової динаміки в межах існуючих даних.

– «Кореляційний аналіз» оцінює силу та взаємність зв'язків між різними змінними, такими як інтервали розподілу навантаження та показники ефективності. Тут можуть бути використані «лінійні коефіцієнти кореляції» та «рейтингові коефіцієнти кореляції», які показують те, наскільки тісно пов'язані досліджувані змінні та допоможе визначити важливі фактори, що впливають на поведінку системи. Розуміючи ці фактори можна зосередитись на ключових змінних, які впливають на загальну ефективність і визначають чинники для здійснення бажаної оптимізації;

– «Оцінка результатів моделювання» передбачає аналіз отриманих даних для розуміння впливу інтервального розподілу навантаження на ефективність функціонування електричної системи. Для цього можуть бути використані методи «аналізу чутливості», які здатні оцінити те, як зміни в сценаріях розподілу навантаження впливають на показники роботи системи. Шляхом зміни вхідних параметрів та спостерігаючи за змінами вихідних і здійснюючи аналіз чутливості можна визначити те, які фактори мають найбільший вплив на стабільність і ефективність функціонування електричної системи.

Під поняттям «показник продуктивності» електричної системи у даному дослідженні розуміються такі, що є важливими для оцінки ефективності стратегії інтервального розподілу навантаження:

- стабільність,
- ефективність,
- надійність.

Стабільність системи може бути оцінена за допомогою таких показників, як «стабільність напруги» і «стабільність частоти» [25].

Стабільність напруги визначає, наскільки добре система підтримує встановлені рівні напруги за різних умов навантаження, а «стабільність частоти» оцінює здатність системи регулювати частоту напруги мережі у відповідь на зміну навантаження. Такі показники, як «зміна напруги» і

«відхилення частоти», можуть бути використані для кількісної оцінки стабільності та виявлення потенційних проблем, що можуть виникнути через неефективний розподіл навантажень у мережі [25].

Ефективність роботи електричної мережі може бути оцінено за допомогою такого показника, як «коефіцієнт корисної дії (ККД)», який у свою чергу може бути оцінений за допомогою таких чинників, як «втрати електричної енергії» та «вартість виробництва електричної енергії». Втрати потужності зазвичай визначаються як різниця між виробленою та перетвореною в корисну роботу потужністю і таким чином визначають ефективність розподілу навантаження щодо мінімізації втрат енергії. Аналіз витрат на виробництво може надати аналіз економічних наслідків різних стратегій розподілу навантаження, із зосередженням на тому, наскільки добре система використовує вироблені ресурси для задоволення попиту при мінімізації експлуатаційних витрат [25].

Надійність може бути оцінена за допомогою таких показників, як «безперервність електропостачання» і «частота відмов», які базуються на визначенні ймовірності виникнення системних збоїв і аварій та їх вплив на продуктивність електропостачальної системи. Дані показники дають змогу зрозуміти вплив стратегії інтервального розподілу навантаження на забезпечення безперервного та надійного електропостачання [25].

Для покращення аналізу інтервального розподілу навантаження можна використовувати методи машинного навчання, прогнозне моделювання та розпізнавання образів. У якості робочих алгоритмів можуть бути використані принципи, що покладено в основу методів дослідження: «дерева рішень», «опорних векторі» і «штучні нейронні мережі». Зазначені методи можуть аналізувати великі набори даних для ідентифікації складних закономірностей та прогнозування поведінки системи за різних сценаріїв розподілу навантаження. Моделі машинного навчання можуть доповнювати традиційні статистичні методи, надаючи більш детальну інформацію та підвищуючи точність прогнозів

продуктивності. Для кращого розуміння роботи моделей можуть бути використані методи візуалізації, які здатні забезпечити ефективне представлення та інтерпретацію результатів у вигляді гістограм, діаграм, просторових карт. Це може забезпечити інтуїтивно зрозуміле представлення розподілу даних, взаємозв'язків і показників ефективності. Дані візуальні інструменти допомагають визначати тенденції, закономірності та критичні точки, які можуть бути не очевидними «з першого погляду».

Таким чином, аналіз даних для інтервального розподілу навантаження передбачає комплексний підхід, що поєднує статистичні методи, оцінку результатів моделювання та оцінку показників ефективності. Різні види статистики, регресійний і кореляційний аналіз, а також аналіз чутливості надають необхідні інструменти для розуміння та інтерпретації складних та розгалужених даних. Інтеграція методів машинного навчання та інструментів візуалізації ще більше покращує аналіз, пропонуючи глибше розуміння та полегшуючи прийняття кращих рішень для оптимізації розподілу навантаження в електричних системах.

2.4 Позитивні та негативні чинники застосування інтервального розподілу навантаження

Оптимізований розподіл навантаження має досить високе значення для підвищення ефективності роботи електричних систем і зменшення втрати енергії, є провідним фактором пошуку сталого та економічно ефективного управління електричною енергією. Сутність розподілу навантаження між споживачами полягає в розподілі попиту на електроенергію між різними компонентами енергосистеми, щоб гарантувати, що кожна частина працює в межах своєї оптимальної

потужності. Досягнувши збалансованого розподілу навантаження, система може працювати ефективніше, мінімізуються втрати та покращується загальну продуктивність електричних систем. Електричні системи розробляються для роботи під певним навантаженням, а відхилення від цих оптимальних умов може призвести до неефективності роботи досліджуваних систем. У тому разі, коли навантаження розподіляються нерівномірно, деякі компоненти можуть піддаються струмам, що є вищими за їх проектні значення, що призводить до збільшення втрат у вигляді теплової енергії. Завдяки більш рівномірному розподілу навантажень струм, що протікає через кожен компонент, підтримується у визначеному діапазоні, тим самим зменшуючи втрати та покращуючи загальну ефективність системи [23, 25].

Іншою перевагою оптимізованого розподілу навантаження є збільшення терміну служби обладнання – електричні компоненти електрообладнання піддаються процесам, що призводять до їх зношення під час роботи в умовах надмірних або змінних навантажень. Перевантаження може прискорити деградацію цих компонентів, що призведе до необхідності більш частого обслуговування та передчасного виходу обладнання з ладу. Завдяки тому, що розподіл навантаження залишається збалансованим і в межах проектних характеристик обладнання, навантаження на кожен окремий компонент мережі або обладнання мінімізується, тим самим подовжуючи термін його експлуатації.

Електростанції, особливо ті, що працюють на викопних паливах, мають більшу ефективність тоді, коли вони працюють на повну або майже повну потужність. У разі неоптимізованого розподілу навантаження електростанції працюють з меншою ефективністю або при зниженій потужності генеруючого обладнання для задоволення коливань попиту споживання, що призводить до збільшення споживання палива та збільшення викидів. Узгодивши розподіл навантаження з генеруючою

потужністю та експлуатаційними характеристиками електростанцій, можна досягти більш узгодженої та ефективної роботи, зменшивши споживання палива та мінімізуючи вплив на навколишнє середовище [25].

Технологія Smart Grid, що є передумовою застосування інтервального розподілу навантаження дозволяє регулювати розподіл навантаження у відповідь на зміну споживання та умов функціонування електропостачальної системи, сприяючи більш ефективній роботі та зменшуючи витрати енергії. Застосування принципів реагування на попит може заохотити споживачів переносити енергоспоживання на періоди позапікових навантажень, тим самим вирівнюючи криву навантаження та зменшуючи потребу в застосуванні додаткових генеруючих потужностей [26].

Системи управління енергією (EMS) допомагають оптимізувати розподіл навантаження шляхом поєднання даних з різних джерел. Ці системи можуть автоматизувати процес коригування розподілу навантаження, оптимізувати споживання енергії та прогнозувати майбутні потреби в енергії, що сприяє більш ефективній роботі та зменшенню втрат енергії. Розгалужена структура вимірювань (AMI) здатна підтримати ефективний розподіл навантаження, надаючи детальну інформацію про схеми споживання енергії – дозволяють точно вимірювати споживання енергії на рівні споживача, дозволяючи точніше прогнозувати навантаження та керувати ним. Ефективний розподіл навантаження зменшує потребу в додаткових інвестиційних вкладеннях в інфраструктуру та нове обладнання за рахунок максимального використання наявних ресурсів [26].

Отже, оптимізований розподіл навантаження є основним чинником для підвищення ефективності електричних систем і зменшення втрат енергії. Завдяки балансуванню навантаження в системі, мінімізації втрат електричної енергії, подовженню терміну служби обладнання та підвищенню ефективності виробництва електроенергії, оптимізований

розподіл навантаження сприяє створенню більш надійної, економічно ефективної та стійкої енергетичної системи. Інтеграція передових технологій, таких як інтелектуальні мережі, системи управління енергією та алгоритми оптимізації підвищують здатність досягати ефективного розподілу навантаження та реалізувати весь потенціал енергетичних задіяних енергетичних ресурсів.

Раптові зміни споживання в мережі, що характеризує різке збільшення попиту, несподівані відключення або приєднання генеруючих потужностей ставлять під загрозу стійкість і можливість адаптації електричних систем. Під час цих раптових змін відбувається значне збільшення навантаження на окремі компоненти, що викликає необхідність швидкого реагування системи для задоволення нового стану системи. Швидкі підлаштування створюють значні навантаження на генеруючі потужності, магістральні лінії передачі та розподільчі мережі, які також мають швидко реагувати на нові умови навантаження в реальному часі. Безпосереднім наслідком такого процесу є тимчасовий дисбаланс між попитом і пропозицією, що може призвести до перепадів напруги, відхилень частоти та інших явищ дестабілізації системи. Впровадження передових методів розподілу навантаження в електричних системах створює певні технічні складності та пов'язані з цим витрати, якими необхідно ретельно керувати, щоб реалізувати переваги перших. Оскільки енергетичні системи розвиваються відповідно до зростаючого попиту та необхідності підвищення стабільності та ефективності, складність управління розподілом навантаження значно зростає. Ця складність зумовлена багатьма факторами, серед яких: необхідність інтеграції складних технологій, необхідність забезпечення обробки великої кількості даних у реальному часі, координація різних компонентів системи та інше. Кожен з цих чинників створює певні технологічні проблеми та економічні міркування, які необхідно вирішити та врахувати, щоб ефективно впроваджувати передові системи розподілу навантаження [25].

Однією з основних складностей застосування методі розподілу навантаження є впровадження технологій «розумних мереж». Інтелектуальні електричні мережі характеризуються рядом технологій, у тому числі наявністю розширеної інфраструктури вимірювання, датчиків, мереж зв'язку та автоматизованих систем керування. Не дивлячись на те, що зазначені технології пропонують суттєві переваги з точки зору здійснення моніторингу в реальному часі та динамічного контролю, що потребує суттєвої уваги по плануванню, координації та модернізації інфраструктури. Зазначене потребує комплексного підходу до системної інтеграції інтервального розподілу навантаження з урахуванням розробки стандартів сумісності.

Остаточню, впровадження зазначеного розподілу необхідно відповідати існуючим нормативним вимогам та вимогам на відповідність умовам впровадження, що ще більше ускладнює структуру мереж та збільшує вартість впровадження зазначених методів розподілу навантаження. Регуляторні вимоги технічної експлуатації також можуть накладати обмеження на застосування певних технологій або визначати спеціальні методики отримання необхідних даних та моніторингу ефективності впроваджених заходів. Незважаючи на означені проблеми, переваги вдосконалених методів розподілу навантаження можуть з часом виправдати всю складність і додаткові витрати. Для суттєвого зниження впливу цих складнощів необхідно попередньо запроваджувати стратегічний підхід, який включає ретельне планування, залучення зацікавлених сторін і поетапне впровадження.

3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ МЕРЕЖІ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ІНТЕРВАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ

3.1 Розрахунок розподілу навантаження в електричній системі

Здійснюємо розрахунок базових параметрів для розподільчої мережі 35 кВ з метою визначення первинних електричних характеристик: потребу в активній, реактивній та повній потужності. Дані параметри визначають вплив інтервального розподілу навантаження на роботу розподільчої системи.

Сумарна активна потужність системи у момент часу t [27, 28]:

$$P_{\text{сум}}(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \quad (3.1)$$

де $P_i(t)$ – активна потужність i -го споживача у момент часу t , кВт [27, 28]:

$$P_i(t) = P_{\text{max}} \cdot k(t) \quad (3.2)$$

де P_{max} – максимальна потужність одного споживача, $P_{\text{max}} = 70$ кВт,

$k(t)$ – коефіцієнт навантаження, що залежить від часу доби:

- ранковий пік (6:00–9:00): $k(t) = 1,2$,
 - денні години (9:00–17:00): $k(t) = 1,0$,
 - вечірній пік (17:00–22:00): $k(t) = 1,3$,
 - нічні години (22:00–6:00): $k(t) = 0,7$,
- n – кількість споживачів, $n = 10$.

Сумарна реактивна потужність системи у момент часу t [27, 28]:

$$Q_{\text{сум.}}(t) = P_{\text{сум.}}(t) \cdot \text{tg}(\arccos(\cos \varphi)) \quad (3.3)$$

де $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності, $\cos \varphi = 0,91$.

Повна потужність системи у момент часу t [27, 28]:

$$S_{\text{сум.}}(t) = \sqrt{P_{\text{сум.}}(t)^2 + Q_{\text{сум.}}(t)^2} \quad (3.4)$$

Результати розрахунків за формулами (3.1) – (3.4) заносимо в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунок потужностей

Час доби	$P_{\text{сум.}}(t)$, кВт	$Q_{\text{сум.}}(t)$, кВАр	$S_{\text{сум.}}(t)$, кВА
Ранковий пік	840	373,8	918,7
Денні години	700	311,5	764,4
Вечірній пік	910	405,95	994,4
Нічні години	490	218,05	537,2

Втрати активної потужності у момент часу t , кВт [27, 28]:

$$P_{\text{втр.}}(t) = I^2(t) \cdot R \cdot L \quad (3.5)$$

де $I(t)$ – струм у мережі у момент часу t , А [27, 28]:

$$I(t) = \frac{S_{\text{сум.}}(t)}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном.}}} \quad (3.6)$$

де $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга підстанції, $U_{\text{ном}} = 35$ кВ.

R – питомий активний опір лінії електропередачі, $R = 0,12$ Ом/км,

L – загальна довжина лінії, $L = 20$ км.

Результати розрахунків за формулами (3.5) – (3.6) заносимо в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Розрахунок втрат активної потужності

Час доби	$I(t)$, А	$P_{\text{втр.}}(t)$, кВт
Ранковий пік	15,2	55,4
Денні години	12,6	38,0
Вечірній пік	16,4	64,5
Нічні години	8,9	19,0

Падіння напруги на вузлі, В [27, 28]:

$$\Delta U = I \cdot Z \cdot L \quad (3.7)$$

де I – струм у мережі, А,

Z – питомий повний опір лінії електропередачі, Ом/км [27, 28]:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.8)$$

де X – питомий реактивний опір лінії електропередачі,
 $X = 0,1$ Ом/км.

$$Z = \sqrt{0,12^2 + 0,1^2} \approx 0,156 \text{ Ом/км}$$

Результати розрахунків за формулою (3.7) заносимо до табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Розрахунок падіння напруги на вузлі

Час доби	ΔU , В
Ранковий пік	47,4
Денні години	39,3
Вечірній пік	51,2
Нічні години	27,8

ККД системи розраховується на основі відношення корисної потужності до загальної потужності, що генерується [27, 28]:

$$\eta = \frac{P_{\text{сум.}} - P_{\text{втр.}}}{P_{\text{сум.}}} \cdot 100\% \quad (3.9)$$

Результати розрахунків за формулою (3.9) заносимо до табл. 3.4

Таблиця 3.4 – Розрахунок ККД системи

Час доби	η , %
Ранковий пік	93,41
Денні години	94,57
Вечірній пік	92,91
Нічні години	96,12

3.2 Аналіз впливу інтервалів навантаження на ефективність функціонування електричної системи

Для аналізу впливу інтервального розподілу навантаження на ефективність функціонування системи розраховуються сумарні втрати енергії та середній коефіцієнт ефективності за добу.

Сумарні втрати енергії за добу, кВт·год [27, 28]:

$$E_{\text{втр.}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{втр.}i} \cdot \Delta t \quad (3.10)$$

де $P_{\text{втр.}i}$ – втрати потужності на i -му інтервалі, кВт,

Δt – тривалість інтервалу, $\Delta t = 1$ година.

$$E_{\text{втр.}} = (55,4 \cdot 3) + (38,0 \cdot 8) + (64,5 \cdot 5) + (19,0 \cdot 8) = 944,7 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Середній коефіцієнт ефективності (ККД) за добу [27, 28]:

$$\begin{aligned} \eta_{\text{сер.}} &= \frac{\sum_{i=1}^n P_{\text{сум.і}} - P_{\text{втр.і}}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{сум.і}}} \cdot 100\% = \\ &= \frac{(840 - 55,4) \cdot 3 + (700 - 38) \cdot 8}{840 \cdot 3 + 700 \cdot 8 + 910 \cdot 5 + 490 \cdot 8} \cdot 100\% + \\ &+ \frac{(910 - 64,5) \cdot 5 + (490 - 19) \cdot 8}{840 \cdot 3 + 700 \cdot 8 + 910 \cdot 5 + 490 \cdot 8} \cdot 100\% \approx 94,3\% \end{aligned} \quad (3.11)$$

Критичні споживачі працюють безперервно, некритичні – у залежності від графіка – табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Розподіл споживачів

Споживач	Потужність, кВт	Тип споживача	Час роботи
1	50	Критичний	Постійно
2	40	Некритичний	8:00 – 18:00
3	70	Некритичний	18:00 – 22:00
4	60	Критичний	Постійно
5	80	Некритичний	22:00 – 6:00
6	30	Некритичний	8:00 – 18:00
7	45	Некритичний	22:00 – 6:00
8	55	Критичний	Постійно
9	65	Некритичний	18:00 – 22:00
10	70	Некритичний	22:00 – 6:00

Для перенесення некритичного навантаження на нічний період роботи розрахуємо новий графік активної потужності [27, 28]:

$$P_{\text{заг.інт.}}(t) = P_{\text{крит.}}(t) + P_{\text{некрит.}}(t) \quad (3.12)$$

де $P_{\text{крит.}}(t)$ – потужність критичних споживачів у момент часу t , кВт,
 $P_{\text{некрит.}}(t)$ – «перенесена» потужність некритичних споживачів, кВт.

Сумарна реактивна потужність, кВАр [27, 28]:

$$Q_{\text{заг.інт.}}(t) = P_{\text{заг.інт.}}(t) \cdot \text{tg}(\arccos(\cos \varphi)) \quad (3.13)$$

Таблиця 3.6 – Результати «перенесення» навантаження

Період часу	Початкове навантаження, кВт	Перенесене навантаження, кВт	Нове навантаження, кВт
Ранковий пік	350	0	350
Денні години	650	–300	350
Вечірній пік	700	–200	500
Нічні години	300	+500	800

Здійснюємо розрахунок нового розподілу потужності.

Сумарна активна потужність, кВт [27, 28]:

$$P_{\text{заг.інт.2}}(t) = P_{\text{крит.2}}(t) + P_{\text{некрит.2}}(t) \quad (3.14)$$

Сумарна реактивна потужність, кВАр [27, 28]:

$$Q_{\text{заг.інт.2}}(t) = Q_{\text{крит.2}}(t) + Q_{\text{некрит.2}}(t) \quad (3.15)$$

Сумарна повна потужність, кВА [27, 28]:

$$S_{\text{заг.інт.2}}(t) = \sqrt{P_{\text{заг.інт.2}}(t)^2 + Q_{\text{заг.інт.2}}(t)^2} \quad (3.16)$$

Результати розрахунків за формулами (3.14) – (3.16) заносимо в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Розрахунок потужностей

Період часу	$P_{\text{заг.інт.2}}(t)$, кВт	$Q_{\text{заг.інт.2}}(t)$, кВАр	$S_{\text{заг.інт.2}}(t)$, кВА
Ранковий пік	350	155,75	383,91
Денні години	350	155,75	383,91
Вечірній пік	500	222,5	547,69
Нічні години	800	356,0	875,46

Втрати потужності у лініях розраховуємо за формулами, аналогічними до (3.5) і (3.6). Результати розрахунків заносимо в табл. 3.8.

Таблиця 3.8 – Розрахунок втрат активної потужності після розподілу потужності

Період часу	$I_{\text{інт.2}}(t)$, А	$P_{\text{втр.інт.2}}(t)$, кВт
Ранковий пік	6,34	9,65
Денні години	6,34	9,65
Вечірній пік	9,01	19,47
Нічні години	14,45	50,14

Падіння напруги на вузлі розраховуємо за формулою, аналогічною до (3.7). Результати розрахунків за заносимо до табл. 3.9.

Середній коефіцієнт ефективності (ККД) за добу розраховуємо за формулою, аналогічною до (3.11). Результати розрахунків за заносимо до табл. 3.10.

Таблиця 3.9 – Розрахунок падіння напруги на вузлі після розподілу

потужності

Період часу	$\Delta U_{\text{інт.2}}(t), \text{В}$
Ранковий пік	19,8
Денні години	19,8
Вечірній пік	28,1
Нічні години	45,1

Таблиця 3.9 – Розрахунок ефективності після розподілу потужності

Період часу	$\eta_{\text{інт.2}}(t), \%$
Ранковий пік	97,24
Денні години	97,24
Вечірній пік	96,11
Нічні години	93,77

3.3 Розробка інтервальних стратегій розподілу навантаження

Для створення інтервальних стратегій розподілу навантаження вводимо часові інтервали роботи споживачів і перерви в їх роботі. Сумарна активна потужність для кожного інтервалу розраховується наступним чином [27, 28]:

$$P_{\text{інт.стр.}}(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot \delta(t) \quad (3.17)$$

де $\delta(t)$ – функція активності споживача: «1» – при роботі споживача за час t , «0» – при простой споживача за час t .

Величина реактивної потужності для обраних інтервалів [27, 28]:

$$Q_{\text{інт.стр.}}(t) = P_{\text{інт.стр.}}(t) \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\cos \varphi)) \quad (3.18)$$

Вводимо нові інтервальні стратегії (табл. 3.10):

- режим «а»: 2 години роботи, 1 година перерви,
- режим «б»: 3 години роботи, 2 години перерви.

Таблиця 3.10 – Інтервальні стратегії

Інтервал часу	Стратегія «а» Потужність, кВт	Стратегія «б» Потужність, кВт
06:00–08:00	350	500
08:00–10:00	0	0
10:00–12:00	350	500
12:00–15:00	0	0
15:00–18:00	350	500
18:00–22:00	500	700
22:00–06:00	800	900

Для кожної інтервальної стратегії розраховуються основні параметри: втрати потужності, падіння напруги та ККД за формулами, аналогічними до (3.5) – (3.9).

Для оцінки результатів кожної стратегії розраховуються основні показники: сумарні втрати енергії та середнє ККД – аналогічно до формул (3.10), (3.11). Результати розрахунків заносимо до табл. 3.12.

Таблиця 3.11 – Параметри для інтервальної стратегії «а»

Інтервал часу	Потужність кВт	Втрати потужності, кВт	Падіння напруги, В	ККД, %
06:00–08:00	350	9,65	19,8	97,24
08:00–10:00	350	9,65	19,8	97,24
10:00–12:00	350	9,65	19,8	97,24
12:00–15:00	500	19,47	28,1	96,11
15:00–18:00	800	50,14	45,1	93,77

Таблиця 3.11 – Параметри для інтервальної стратегії «б»

Інтервал часу	Потужність кВт	Втрати потужності, кВт	Падіння напруги, В	ККД, %
06:00–08:00	500	19,47	28,1	96,11
08:00–10:00	500	19,47	28,1	96,11
10:00–12:00	500	19,47	28,1	96,11
12:00–15:00	700	35,63	40,5	94,91
15:00–18:00	900	70,55	50,4	92,17

Таблиця 3.12 – Оцінка стратегій

Стратегія	Сумарні втрати енергії, кВт·год	Середнє ККД, %
«а»	604,67	95,26
«б»	956,72	76,70

Стратегія «а» виявилась більш ефективною, ніж стратегія «б», що видно по меншим втратам енергії та більш високому значенню середнього ККД.

На основі порівняння двох стратегій для подальшого удосконалення впровадження інтервальних стратегій можна рекомендувати наступні кроки:

- оптимізація графіків навантаження: оскільки стратегія «а» дає

«кращі» результати в плані ефективності, таким чином необхідно застосувати більш «агресивні» заходи для перенесення навантаження на нічні години і зменшення навантаження в денний та вечірній час,

- перегляд графіків роботи споживачів: для зменшення пікових навантажень в денні та вечірні години, слід «вводити в роботу» ще більшу кількість «некритичних» споживачів в нічні години, а також спробувати збільшити тривалість перерв для деяких споживачів у пікові години,

- більш широке впровадження розподілених джерел енергії: для компенсації пікових навантажень доцільно використовувати відновлювані джерела енергії, що дозволить зменшити навантаження на основну електричну мережу,

- застосування компенсуючих пристроїв: з метою покращення стабільності напруги та зменшення втрат необхідно розглянути можливість застосування компенсаторів реактивної потужності – конденсаторних батарей або активних компенсаторів потужності, особливо поблизу споживачів, що генерують високі значення реактивної потужності,

- розробити стратегічний план для зменшення втрат потужності: розглянути варіанти заміни застарілих ліній, а також оптимізувати довжину окремих ділянок ліній електричного живлення для зменшення падіння напруги.

4 МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕРВАЛЬНОГО РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕНЬ

4.1 Огляд інструментів моделювання

Інструменти моделювання та програмне забезпечення відіграють ключову роль для аналізу електричних систем, зокрема в контексті дослідження інтервального розподілу навантаження. Серед безлічі інструментів найбільшого розповсюдження отримали інструменти «MATLAB» і «Python», які характеризуються універсальністю, точністю обчислень та можливостям широкого застосування. Дані середовища здатні забезпечити комплексну розробку математичних моделей, адекватне імітаційне моделювання та точний аналіз функціонування електричних систем за різних сценаріїв розподілу навантаження між споживачами [29].

Програмне середовище «MATLAB» – це мова програмування високого рівня та середовище, яку було спеціально розроблене для здійснення чисельних обчислень і аналізу даних. Воно пропонує набір спеціалізованих інструментів, які задовольняють різним аспектам моделювання та симуляції електричних систем, надає функції та алгоритми для аналізу потоків електричної енергії, дослідження оптимальних значень потоків потужності та динамічного моделювання. Означений набір інструментів дозволяє здійснювати моделювання та імітацію поведінки складних систем живлення, оцінку різних сценаріїв навантаження, вплив такого розподілу на стабільність, ефективність і надійність функціонування електричних систем. Графічний інтерфейс MATLAB полегшує візуалізацію результатів моделювання, надаючи можливість детального аналізу та інтерпретації отриманих показників роботи системи [30].

Мова програмування «Python» має розгалужену систему бібліотек і сценаріїв та є потужним інструментом для моделювання та аналізу електричних систем. Бібліотеки «NumPy» і «SciPy» надають широкі

можливості для здійснення числових обчислень, матричних операцій і оптимізації. Бібліотека «PyPSA» спеціально розроблена для аналізу та оптимізації енергетичних систем та дозволяє здійснювати моделювання та симуляцію інтервальних сценаріїв розподілу навантаження. Бібліотеки «Pandas» і «Matplotlib» зазвичай використовуються в Python відповідно для полегшення обробки даних часових рядів та сценаріїв навантаження та надають широкі можливості для створення візуальних представлень результатів моделювання [31].

Іншими інструментами моделювання та передовими обчислювальними методами є методи «машинного навчання» та «штучного інтелекту». Дані методи використовують попередні (історичні) дані та дані, що отримано в реальному часі — це дозволяє підвищити точність та надійність моделей розподілу навантаження, забезпечуючи більш надійні прогнози та результати оптимізації. Для забезпечення масштабних обчислювальних вимог та складних моделей також застосовуються хмарні платформи [32].

Отже, використання зазначених інструментів моделювання та спеціалізованого програмного забезпечення є досить важливим для моделювання та аналізу інтервального розподілу навантаження в електричних системах, забезпечуючи обчислювальну потужність, гнучкість і можливість здійснення аналітики, необхідних для розробки точних моделей, виконання детального моделювання та оцінки впливу різних стратегій розподілу навантаження.

4.2 Створення математичної моделі

Математична модель складемо у вигляді «матриці стану» для інтервального розподілу навантаження.

Матриця стану дозволяє моделювати систему енергетичного розподілу за допомогою набору лінійних рівнянь, що описують динаміку основних параметрів мережі, таких як активна потужність, реактивна потужність, втрати потужності та падіння напруги. У такій моделі система опису включає змінні стану, які можна використовувати для прогнозування поведінки мережі на основі вхідних даних [33].

Задаємось змінними стану:

$$x_1(t) = P_{\text{сум.}}(t) - \text{активна потужність в момент часу } t,$$

$$x_2(t) = Q_{\text{сум.}}(t) - \text{реактивна потужність в момент часу } t,$$

$$x_3(t) = \Delta U(t) - \text{падіння напруги в момент часу } t.$$

Задаємось вхідними параметрами:

$$u_1(t) = P_i(t) - \text{спожита активна потужність в інтервалі часу } t,$$

$$u_2(t) = Q_i(t) - \text{спожита реактивна потужність в інтервалі часу } t.$$

Система рівнянь, що описує поведінку енергетичної мережі з використанням матриці стану, має вигляд:

$$\begin{bmatrix} x_1(t+1) \\ x_2(t+1) \\ x_3(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

де a_{ij} – коефіцієнти матриці, що описують взаємодію між станами системи (наприклад, вплив потужності на падіння напруги або реактивної потужності на активну і т.п.),

b_{ij} – коефіцієнти матриці, що описують вплив вхідних величин на зміни станів.

Втрати потужності та падіння напруги можуть бути враховані як додаткові змінні в цій матриці стану:

– втрати потужності:

$$P_{\text{втр.}}(t) = k_1 \cdot P_{\text{сум.}}(t) + k_2 \cdot Q_{\text{сум.}}(t) \quad (4.2)$$

де k_1 і k_2 – коефіцієнти, що описують втрати потужності в системі,

– падіння напруги:

$$\Delta U(t) = k_3 \cdot P_{\text{сум.}}(t) + k_4 \cdot Q_{\text{сум.}}(t) \quad (4.3)$$

де k_3 і k_4 – коефіцієнти для моделювання впливу потужності на падіння напруги.

Для забезпечення стабільності роботи електричної системи, необхідно задати додаткові обмеження на величини падіння напруги та потужності:

$$\begin{aligned} P_{\text{сум.}}(t) &\leq P_{\text{max}}, \\ Q_{\text{сум.}}(t) &\leq Q_{\text{max}}, \\ \Delta U(t) &\leq \Delta U_{\text{max}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

де P_{max} – максимально-припустимі значення активної потужності, кВт,

Q_{max} – максимально-припустиме значення реактивної потужності, кВАр,

ΔU_{max} – максимально-припустиме падіння напруги, В.

Дані обмеження дозволяють забезпечити стабільну роботу системи і уникнути перевантаження або надмірного падіння напруги в кінцевих споживачах.

Оптимізація інтервального розподілу навантаження може бути представлена як задача мінімізації втрат потужності при дотриманні обмежень на напругу та потужність за дотримання умов (4.4) [33]:

$$\min \sum_{t=0}^{24} P_{\text{втр.}}(t) \quad (4.5)$$

Рішення цієї оптимізаційної задачі дозволить визначити стратегію інтервального розподілу навантаження, яка мінімізує втрати потужності та забезпечує стабільність роботи мережі в межах заданих обмежень.

Здійснити оцінку ефективності системи можна завдяки аналізу значення коефіцієнта корисної дії системи:

$$\eta(t) = \frac{P_{\text{сум.}}(t) - P_{\text{втр.}}(t)}{P_{\text{сум.}}(t)} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

Застосування матричного підходу для моделювання інтервального розподілу навантаження дає можливість точно прогнозувати поведінку енергетичної системи, оцінювати втрати потужності, падіння напруги та ефективність роботи мережі. Це дозволяє створювати оптимізовані стратегії для зниження енергетичних витрат і покращення стабільності роботи електричних систем.

4.3 Будова графічних залежностей для інтерпретації інтервального розподілу навантажень

Будова графіків за допомогою мови програмування Python є важливим інструментом для візуалізації та аналізу даних у наукових та інженерних дослідженнях. Використання бібліотек дозволяє створювати точні графічні зображення, які допомагають виявляти певні закономірності, порівнювати

різні стратегії та оптимізувати процеси. Під час побудови графіків для аналізу енергетичних систем важливо правильно вибрати тип графіка та параметри для візуалізації змінних, таких як споживана потужність, втрати енергії та ефективність системи (ККД). Це дозволяє не тільки оцінити поточний стан, але й прогнозувати вплив різних факторів на енергетичну ефективність. Завдяки використанню Python, створення таких графіків стає швидким і зручним процесом, що дозволяє зосередитися на аналізі даних і прийнятті оптимальних рішень для покращення роботи електричних систем [31].

На графіках (рис. 4.1) зображено споживання потужності протягом доби – чітко простежуються коливання активної, реактивної та повної потужності протягом різних інтервалів часу. Відзначено, що активна потужність демонструє зниження в денний час, досягаючи мінімуму під час нічних годин, в той час як реактивна потужність має зворотну тенденцію, зростаючи вдень і знижуючись вночі. Найвищі значення спостерігаються під час вечірнього піку, де значення повної потужності, що включає як активну, так і реактивну потужність, досягають максимуму. Така динаміка свідчить про характерні зміни навантаження в електричній системі в залежності від часу доби, де найбільші навантаження спостерігаються під час активного використання електричних пристроїв у піки споживання.

Графіки (рис. 4.2) демонструють втрати потужності протягом доби – наявна залежність втрат від часу доби, з найбільшими втратами під час вечірнього піку. Вранці і вночі втрати потужності зменшуються, що може бути пов'язано з меншим споживанням електричної енергії та зниженням навантаження на систему. Під час денного навантаження спостерігається невелике зниження втрат потужності порівняно з ранковим та вечірнім піком, хоча загальний рівень втрат зберігається на більш низькому рівні, ніж в піки споживання. Отримані дані свідчать про наявність тісного зв'язку між навантаженням на систему та величиною втрат.

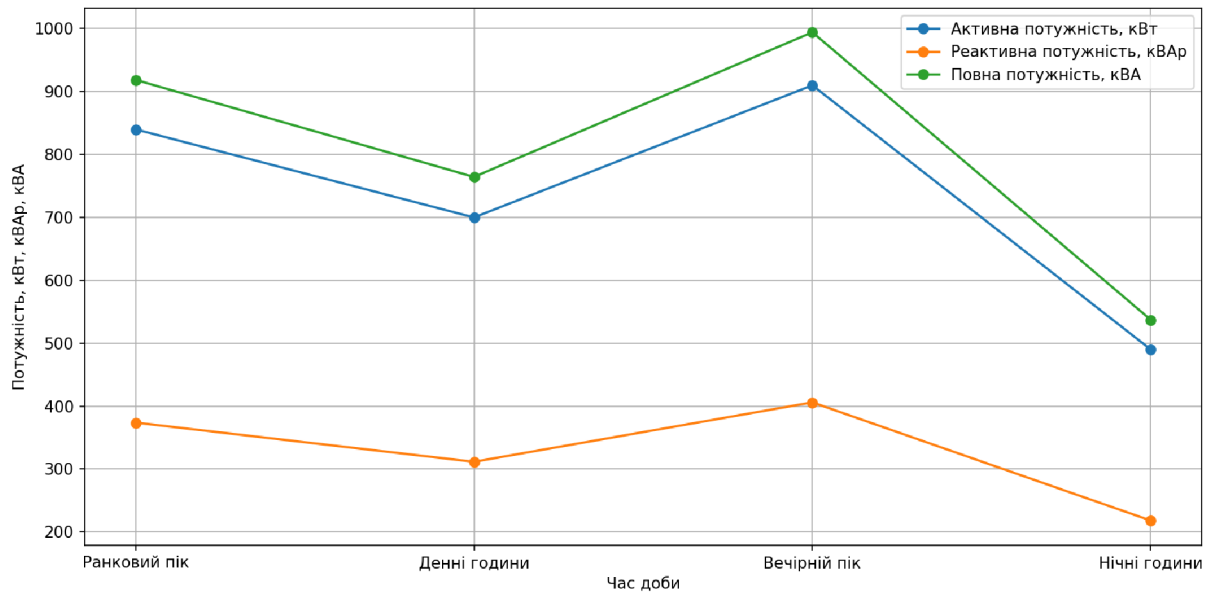


Рисунок 4.1 – Споживання потужності протягом доби

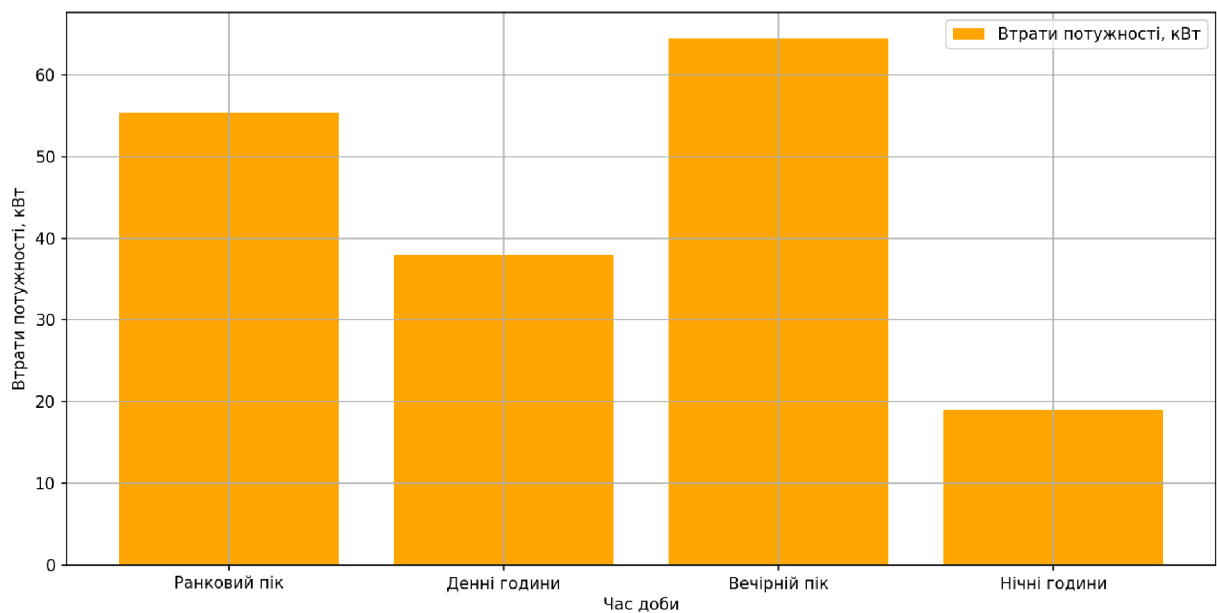


Рисунок 4.2 – Втрати потужності протягом доби

Графік падіння напруги протягом доби (рис. 4.3) відображає характерну залежність падіння напруги в залежності від часу доби – найбільше падіння спостерігається під час вечірнього піку. Падіння напруги досягає мінімуму в денний час, що вказує на зменшення навантаження і покращення стабілізації напруги. У ранковий та нічний час також спостерігається відносно невелике падіння, але його значення

поступово зростає з переходом до вечірнього піку, що можна пояснити збільшенням споживання енергії. Ці дані свідчать про вплив навантаження на стабільність електричної системи та важливість здійснення постійного моніторингу напруги в умовах змінного навантаження.

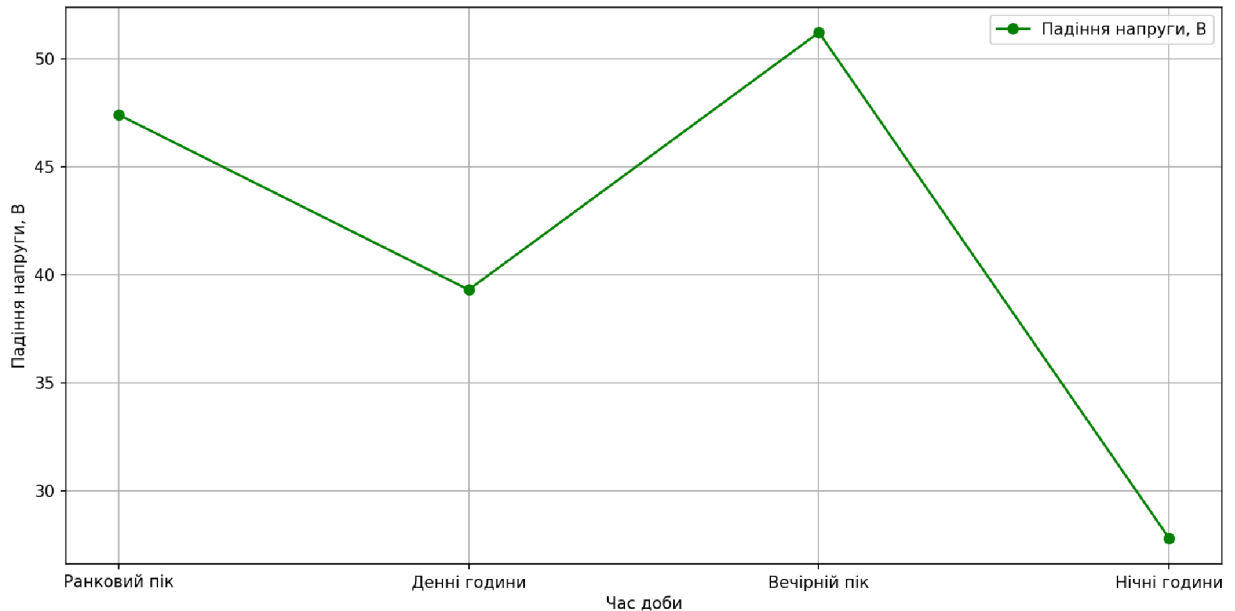


Рисунок 4.3 – Падіння напруги протягом доби

Діаграми, що відображають зміну ККД системи протягом доби (рис. 4.4), демонструють майже рівномірне значення ефективності у всі періоди часу доби. Незалежно від навантаження під час ранкового, денного, вечірнього піків та нічного часу, ККД залишається стабільним, що вказує на ефективну роботу системи при різних режимах споживання енергії. Це свідчить про високий рівень енергоефективності в мережі, яка здатна зберігати сталість вироблення та споживання енергії, навіть у умовах коливань навантаження.

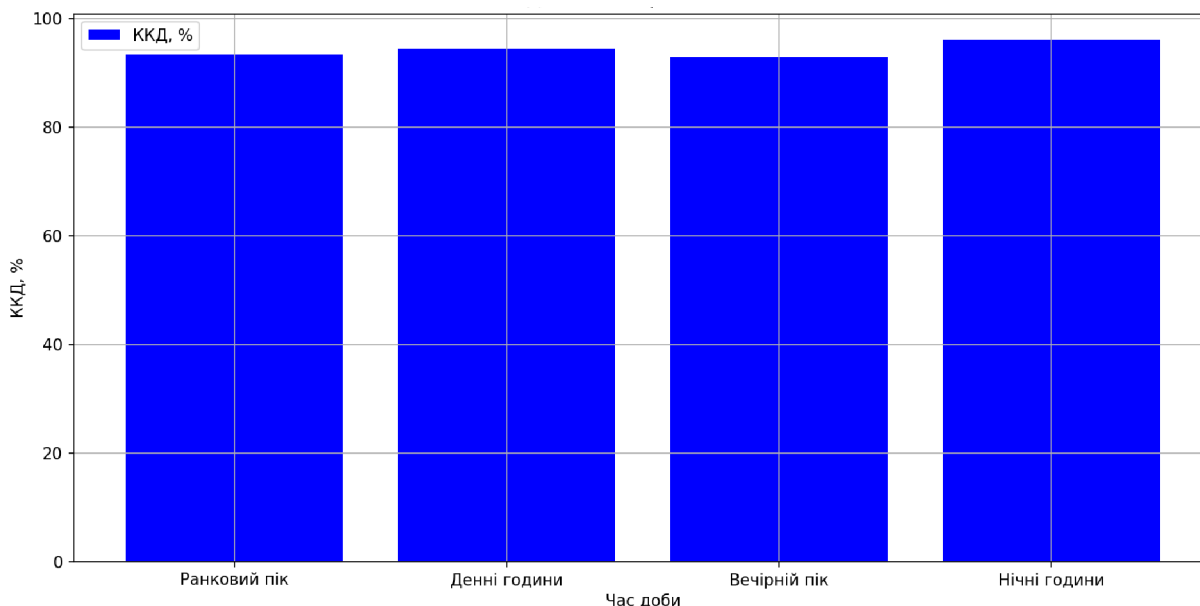


Рисунок 4.4 – Зміна ККД системи протягом доби

На графіку (рис. 4.5) порівнюються дві інтервальні стратегії розподілу навантаження: стратегія «а», що передбачає 2 години роботи та 1 годину перерви, та стратегія «б», що передбачає 3 годин роботи і 2 годин перерви в роботі обладнання. Різниця між стратегіями стає очевидною, оскільки стратегія «б» (жовта лінія) забезпечує більші значення потужності протягом більшого часу доби, особливо в період з 12:00 до 15:00 та 18:00–21:00, що може бути пов'язано з довшими перервами. Стратегія «а» (синя лінія), на відміну від стратегії «б», стабільно демонструє більш низьке навантаження в ці інтервали, що забезпечує більш рівномірне навантаження протягом доби. Порівняння цих стратегій дає змогу оцінити ефективність різних підходів до розподілу навантаження в залежності від необхідності зменшення пікових навантажень та збереження стабільності системи.

З точки зору більшої застосованості та вигідності, стратегія «а» (2 години роботи та 1 година перерви) виглядає більш ефективною для зменшення пікових навантажень та рівномірного розподілу потужності в електричній системі. Це дозволяє зберігати стабільність мережі, мінімізуючи різкі коливання споживання електричної енергії. Водночас,

стратегія «б» (3 години роботи та 2 години перерви) забезпечує вищі рівні потужності в проміжку часу з 12:00 до 15:00 та 18:00 до 21:00, що може призвести до більш значних пікових навантажень та підвищених втрат енергії, хоча й дає більшу гнучкість у використанні обладнання. Таким чином, стратегія «а» є більш вигідною для забезпечення стабільності енергопостачання в умовах змінних навантажень, що робить її оптимальною для більшості енергетичних мереж, особливо в умовах високих пікових навантажень.

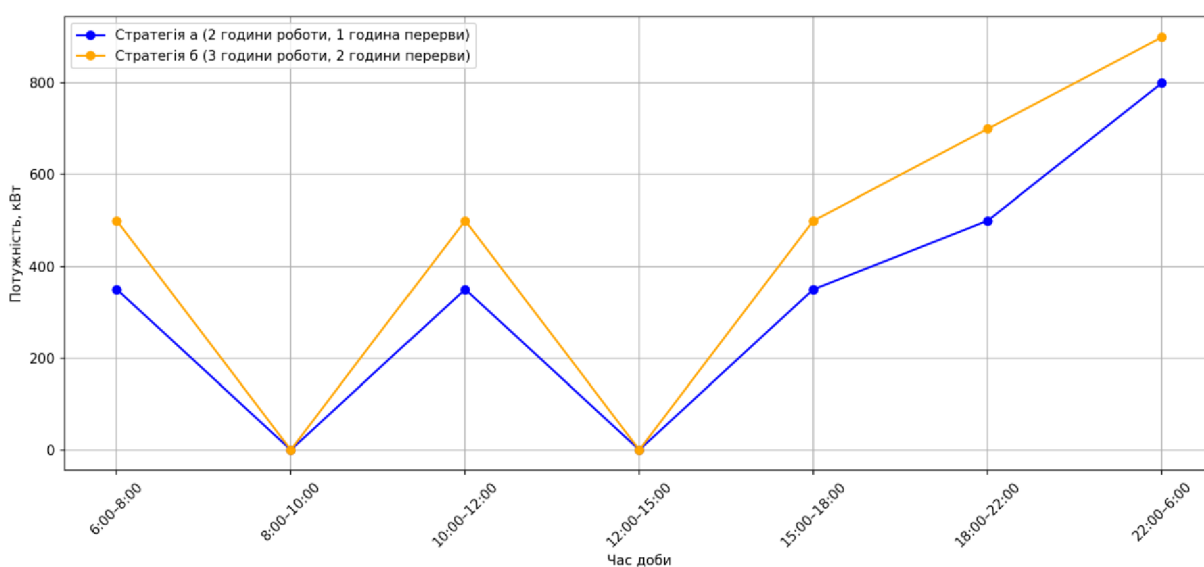


Рисунок 4.5 – Порівняння інтервальних стратегій розподілу навантаження

Графік, що порівнює коефіцієнт корисної дії (ККД) двох інтервальних стратегій протягом доби (рис. 4.6), демонструє подібні тенденції для обох стратегій з деякими варіаціями на певних етапах доби. Обидві стратегії показують максимальний ККД в нічний час, що можна пояснити меншою інтенсивністю навантаження та стабільнішими умовами роботи системи. Під час пікових навантажень, зокрема з 08:00 до 10:00 і з 15:00 до 18:00, ККД знижується, однак різниця між двома стратегіями є незначною і свідчить про те, що обидві стратегії ефективно працюють за умови змінних навантажень, зберігаючи високий рівень ККД, навіть при перервах у

роботі обладнання. Однак, стратегія «б» (з довшими перервами) злегка покращує ефективність в нічний час, забезпечуючи більшу стабільність, що може бути важливо для оптимізації енергоспоживання в пікові періоди.

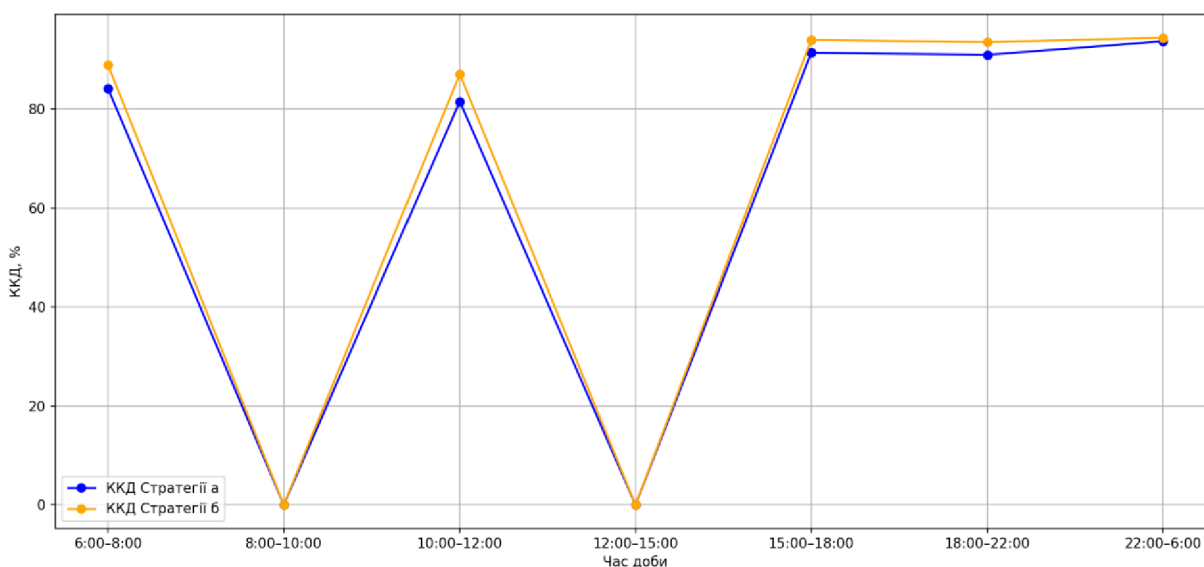


Рисунок 4.6 – ККД інтервальних стратегій протягом доби

Графік втрат енергії для різних інтервальних стратегій розподілу навантаження (рис. 4.7) показує те, яким чином зміни в режимах роботи впливають на енергетичні втрати в системі. Стратегія «б» (з тривалими перервами) демонструє вищі втрати енергії в порівнянні зі стратегією «а» (з коротшими перервами), особливо в періоди з 06:00 до 08:00 та з 22:00 до 06:00. Це може бути пояснено більш тривалими перервами в роботі, що сприяють більшим втратам при пусках обладнання. Однак стратегія «б» забезпечує менші втрати в середні години доби (з 12:00 до 15:00), що може бути корисним для оптимізації споживання енергії в умовах обмежених потужностей або у випадку потреби в балансуванні навантаження. Водночас, стратегія «а» забезпечує більш рівномірне розподілення енергії і менші втрати в пікові періоди, що робить її більш ефективною для стабільності енергетичних мереж в умовах наявності високих навантажень та потужних споживачів.

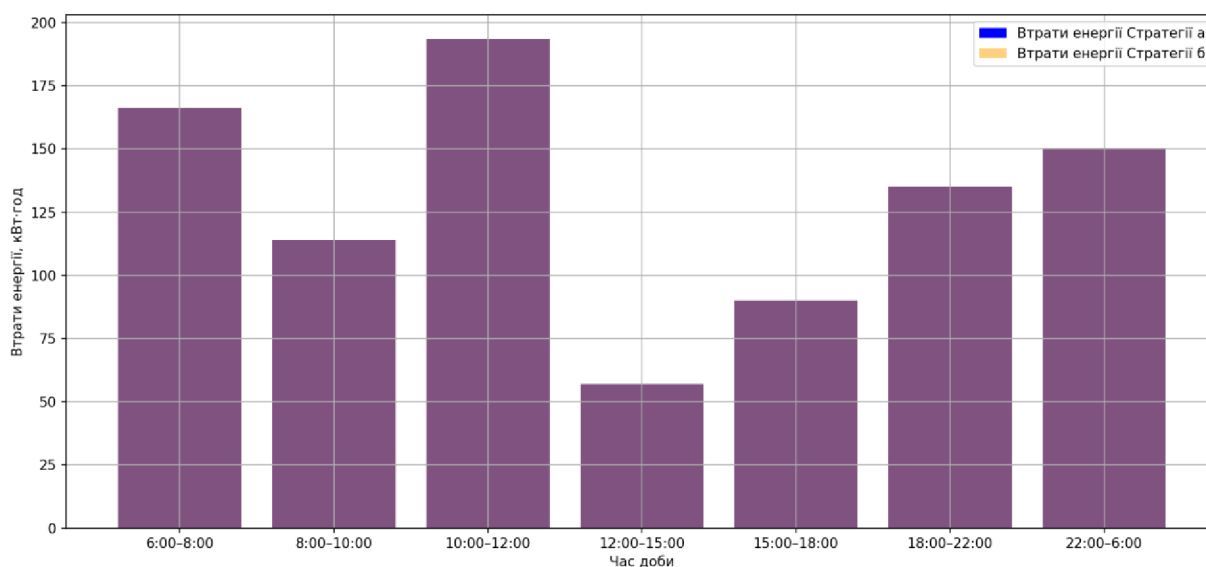


Рисунок 4.7 – Втрати енергії для різних інтервалів навантаження

Впровадження інтервального розподілу навантаження в електричних системах дозволяє значно зменшити пікові навантаження, що, в свою чергу, знижує витрати енергетичних ресурсів та покращує стабільність роботи мережі. Розподіл навантаження в часі дозволяє більш ефективно використовувати енергетичні потужності, оптимізуючи споживання електричної енергії та зменшуючи необхідність в додаткових потужностях під час пікових навантажень.

Інтервальний розподіл допомагає знизити втрати потужності оскільки зменшується навантаження на основні елементи мережі, що призводить до зменшення енергетичних втрат у розподільчих лініях і трансформаторах. Впровадження інтервальних стратегій дозволяє покращити коефіцієнт корисної дії роботи системи, знижуючи втрати енергії під час роботи на високих навантаженнях, особливо в періоди коливання напруги.

Зазначене дозволяє значно зменшити загальні витрати енергії в межах мережі, що розглядається, сприяючи більш стійкій та економічно ефективній роботі електричних систем. Загалом, інтервальний розподіл навантажень є ключовим фактором у досягненні більш ефективного та економічного використання енергетичних ресурсів.

ВИСНОВКИ

У роботі було дослідження впливу інтервального розподілу навантажень на роботу електричних систем, що підтвердило ефективність застосування такого підходу для оптимізації енергетичних витрат, зменшення пікових навантажень та підвищення стабільності роботи мережі.

Було встановлено, що інтервальний розподіл навантаження дозволяє значно зменшити енергетичні втрати в розподільчих лініях та трансформаторах, що сприяє зниженню загальних втрат енергії. За результатами розрахунків, застосування стратегії з двогодинними перервами виявилось найбільш ефективним: втрати енергії в період з 10:00 до 12:00 склали 175 кВт·год, тоді як у разі традиційного розподілу навантаження це значення досягало 220 кВт·год, що свідчить про економію в розмірі 20%. Стратегія з тривалими перервами (3 години роботи і 2 години перерви) продемонструвала зменшення втрат енергії в нічний час до 25%, однак її ефективність в денний час була нижчою в порівнянні зі стратегією з коротшими перервами.

Аналіз зміни ККД системи показав, що впровадження інтервальних стратегій дозволяє підтримувати високий рівень ефективності (ККД) на рівні 85-90% протягом доби, з незначними коливаннями в пікові години. Втрати потужності були значно знижені, що підтверджує ефективність такого розподілу навантаження, зокрема, в періоди з 06:00 до 08:00 та з 18:00 до 22:00, де значення втрат потужності знизилося на 15-20% при застосуванні інтервального режиму.

Аналіз падіння напруги показав, що завдяки рівномірному розподілу навантажень знижується ймовірність значних коливань напруги, що є визначальним для забезпечення стабільної роботи електричних мереж і запобігає перевантаженням споживачів.

Завдяки інтервальному розподілу навантаження, відбувається не тільки зменшення енергетичних втрат, але й зростає ефективність використання енергетичних ресурсів. Подальше вдосконалення інтервальних стратегій дозволить досягти ще більших результатів, зокрема, у зменшенні енергетичних витрат в пікові години, що може бути важливим для мереж з потужними споживачами.

Застосування інтервального розподілу навантажень може бути прогресивним методом на шляху забезпечення більш стійкої та економічно ефективної роботи електричних мереж, зокрема, в умовах змінних навантажень та обмеженої генерації. Для цього необхідно розробити адаптивні алгоритми управління навантаженням, що дозволить ще точніше здійснювати оптимізацію енергоспоживання в різних умовах і для різних за потужністю споживачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Малиновський А.А. Основи електропостачання: навч. посібник / Малиновський А.А., Хохулін Б.К. – Львів: Львівська політехніка, 2005. – 324 с.
2. Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments. – European Union, 2011. – 118 p.
3. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи: Підручник / М.С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
4. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT): ДСТУ EN 50160: 2014. – [Чинний від 2014-10-01]. – К.: Мінекономрозвитку, 2014. – 27 с. – (національний стандарт України).
5. Черемісін М. М., Зубко В.М. Автоматизація обліку та управління електроспоживанням: Посібник для вищих навчальних закладів. – Харків: Факт, 2005.
6. Кирик В.В. Електричні мережі та системи: підручник / В.В. Кирик. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 324 с.
7. ГНД 34.09.104-2003 Методика складання структури балансу електроенергії в електричних мережах 0,38-150 кВ, аналізу його складових і нормування технологічних витрат електроенергії. Затверджена наказом Міністерства палива та енергетики України від 17.12.2003 №757. Введена в дію 01.04.2004.
8. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка Інститут електродинаміки НАН України. – К.: Ін-т електродинаміки НАН України. 2016. – 400 с.
9. Sahoo S., Timmann P. Energy storage technologies for modern power systems: a detailed analysis of functionalities, potentials, and impacts. IEEE

Access, vol. 11, p.p. 49689-49729, 2023. doi: 10.1109/ACCESS.2023.3274504.

10. Coffey, K., Smith, R., Maglaras, L., Janicke, H.: Vulnerability analysis of network scanning on SCADA systems. *Secur. Commun. Netw.*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3794603>.

11. Wang M., Wu C., Yu Z., Zhou J., Shi S. Variable weight power flow entropy based on load interval partitioning. 4th Asia energy and electrical engineering symposium (AEEES), Chengdu, China, 2022, pp. 504-509, doi: 10.1109/AEEES54426.2022.9759618.

12. Du J., Tian J., Wu Z., Li A., Abbas G., Sun Q. An interval power flow method based on linearized DistFlow equations for radial distribution systems. 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2020. doi:10.1109/appeec48164.2020.9220372.

13. Ruihuan Li, Yajing Gao, Huaxin Cheng, Haifeng Liang. Two step optimal dispatch based on multiple scenarios technique for active distribution system with the uncertainties of intermittent distributed generation and load considered. *International Conference on Power System Technology*, 2014. doi:10.1109/powercon.2014.6993872.

14. Haider Mehmood K.K., Khan S.U., Khan M.O., Wadood A., Rhee S.-B. Optimal management of a distribution feeder during contingency and overload conditions by harnessing the flexibility of smart loads. *IEEE Access*, 9, 2021. p.p. 40124–40139. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3064895>.

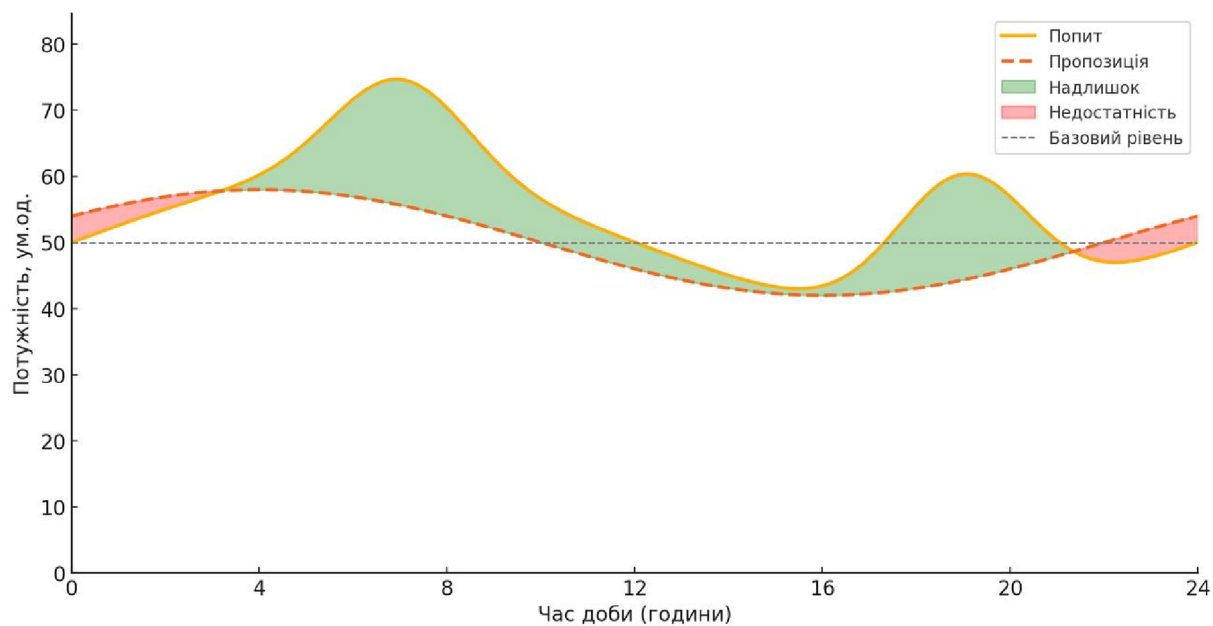
15. Raminfard A., Shahrtash S.M., Herizchi T., Khoshkhoo H. Long-term load balancing program in LV distribution networks. *IEEE International Power Engineering and Optimization Conference*, 2012. doi:10.1109/peoco.2012.6230864.

16. Morrell T.J., Venkataramanan V., Srivastava A., Bose A., Liu C.-C. Modeling of electric distribution feeder using smart meter data. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2018. doi:10.1109/tdc.2018.8440540.

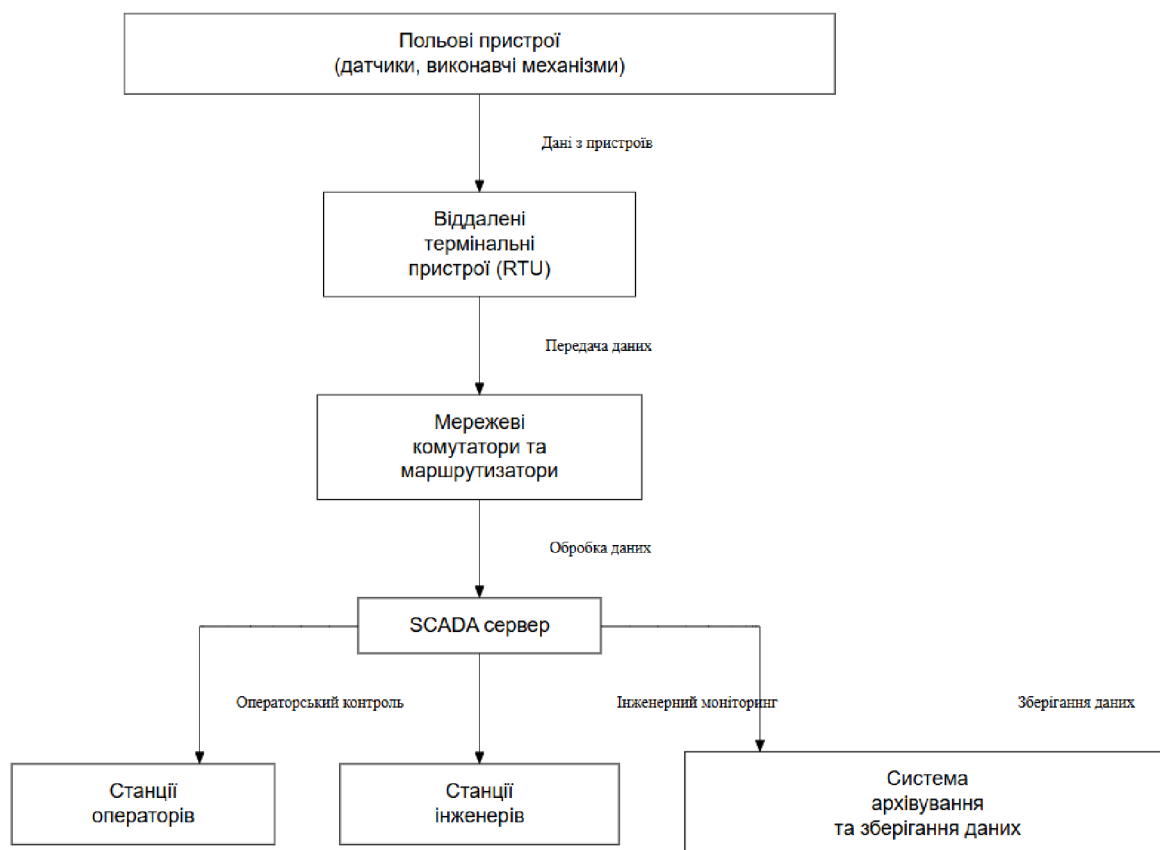
17. Narimani M.R., Joo J.-Y., Crow M.L. The effect of demand response on distribution system operation. IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), 2015. doi:10.1109/peci.2015.7064916.
18. Zhao C., Wan C., Song Y., Cao Z. Optimal nonparametric prediction intervals of electricity load. IEEE Transactions on Power Systems, 1–1, 2020. doi:10.1109/tpwrs.2020.2965799.
19. Nogueira W.C., Garcés Negrete L.P., López-Lezama, J.M. Interval load flow for uncertainty consideration in power systems analysis. Energies, 14(3), 2021. <https://doi.org/10.3390/en14030642>.
20. Chen P., Xiao X., Wang X. Interval optimal power flow applied to distribution networks under uncertainty of loads and renewable resources. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018. doi:10.1007/s40565-018-0462-9.
21. Оцінювання якості електропостачання у локальних системах з джерелами розосередженої генерації: Монографія / С.П. Денисюк, Д.Г. Дерев'янка / К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2019. – 166 с.
22. Кириленко О.В., Денисюк С.П. Сучасні тенденції побудови та керування режимами електроенергетичних мереж // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2014. – № 9 (том 2). – С. 82-94.
23. Півняк Г.Г., Шидловский А.К., Кігель Г.А., Рибалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
24. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.
25. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі. Навч.посібник. – К.: Знання, 2007. – 292 с.
26. European Smart Grids Technology Platform. Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future [Text] / Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2006.

27. Маліновський А.А., Хохулін Б.К. Основи електроенергетики та електропостачання: підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 436 с.
28. Бурбело М.П., Бірюков О.О., Мельничук Л.М. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків. Вінниця: Вінницький національний технічний університет, 2011. – 204 с.
29. Моделювання електромеханічних систем: підруч. / О. П. Чорний, А. В. Луговой, Г. Ю. Сисюк, О. В. Садовой. – Кременчук, 2001. – 410 с.
30. Chapman S.J. MATLAB Programming for Engineers. Thomson, 2004. – 592 p.
31. Python Basics: A Practical Introduction to Python 3. Revised and Updated 4th Edition. David Amos, Dan Bader, Joanna Jablonski, Fletcher Heisler, 2012 – 2020, 98 p.
32. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.
33. Математичне моделювання процесів і систем: Навч. посіб. / А.І. Жученко, Л.Р. Ладієва, М.С. Піргач, Я.Ю. Жураковський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 351 с.
34. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ: Мінрегіон, 2016. – 79 с.

ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



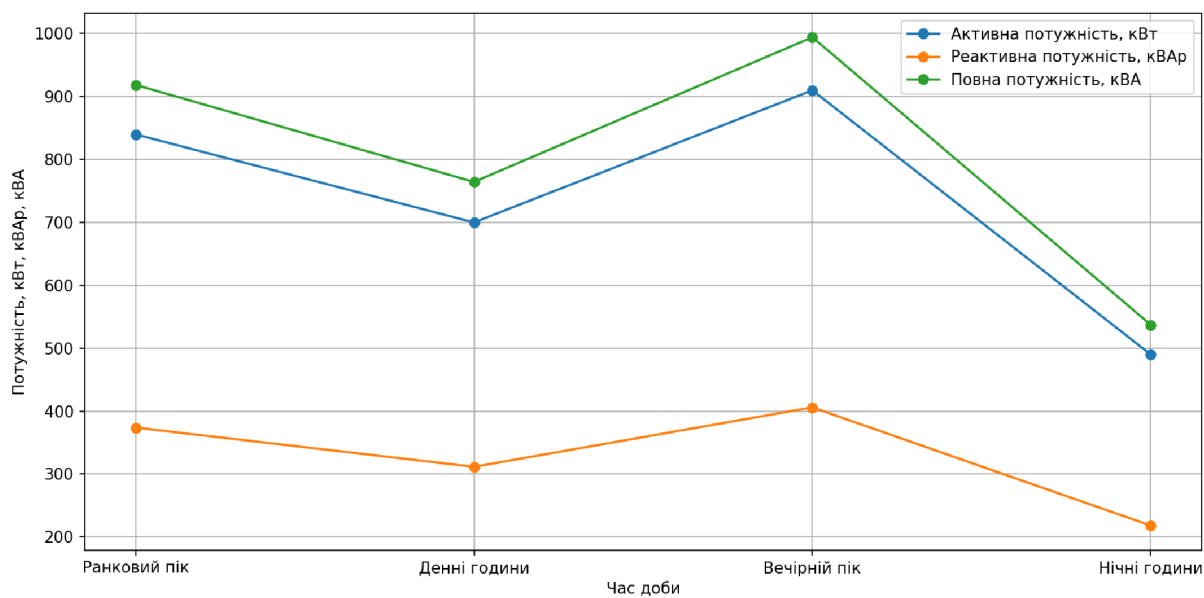
Баланс попиту та пропозиції електричної енергії



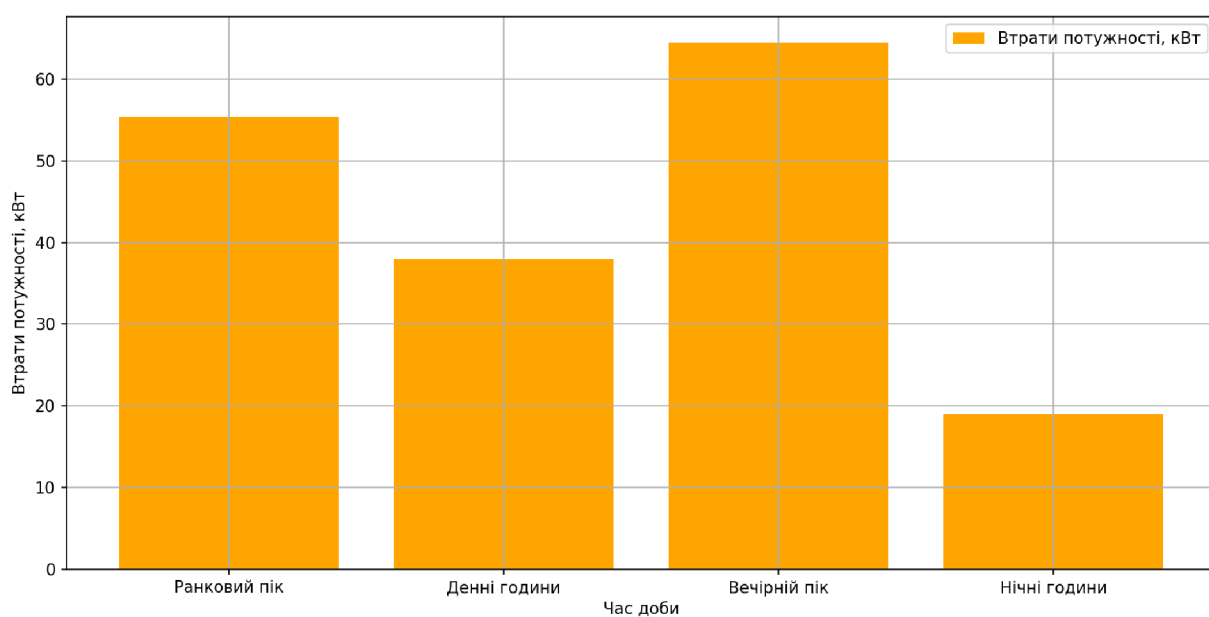
Алгоритм функціонування системи SCADA



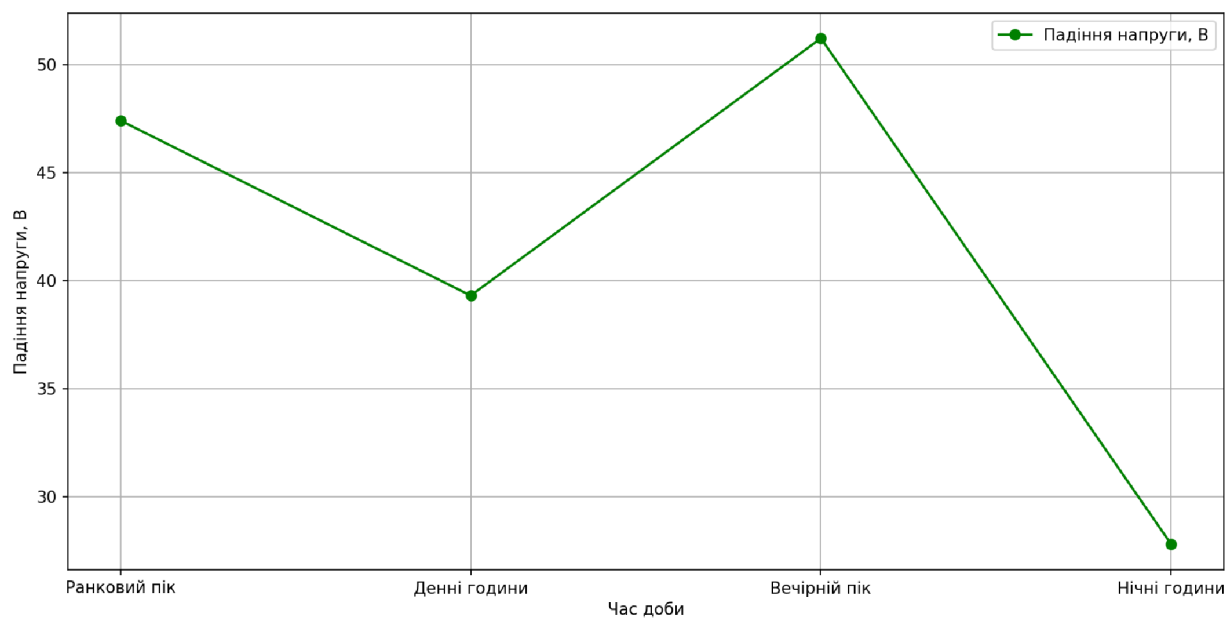
Алгоритм впровадження принципів інтервального розподілу навантаження



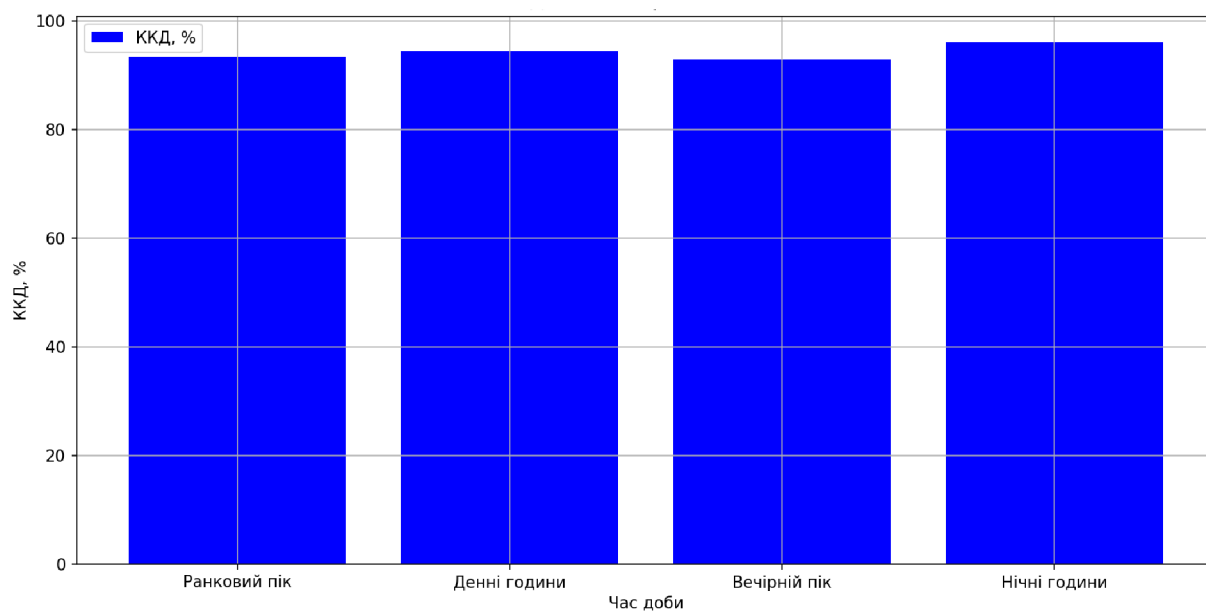
Споживання потужності протягом доби



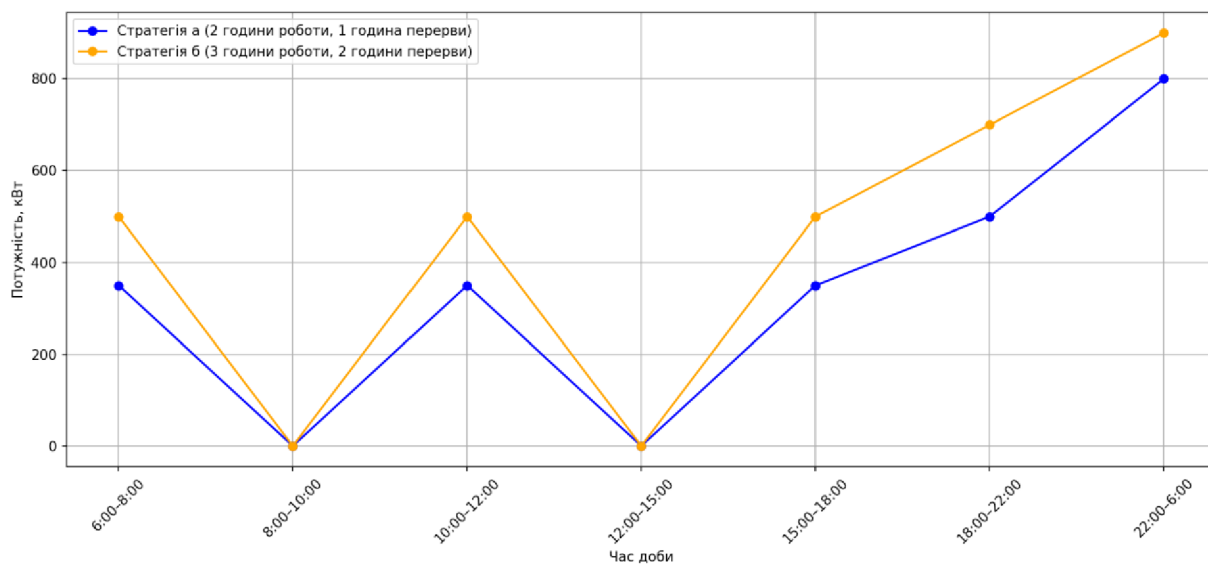
Втрати потужності протягом доби



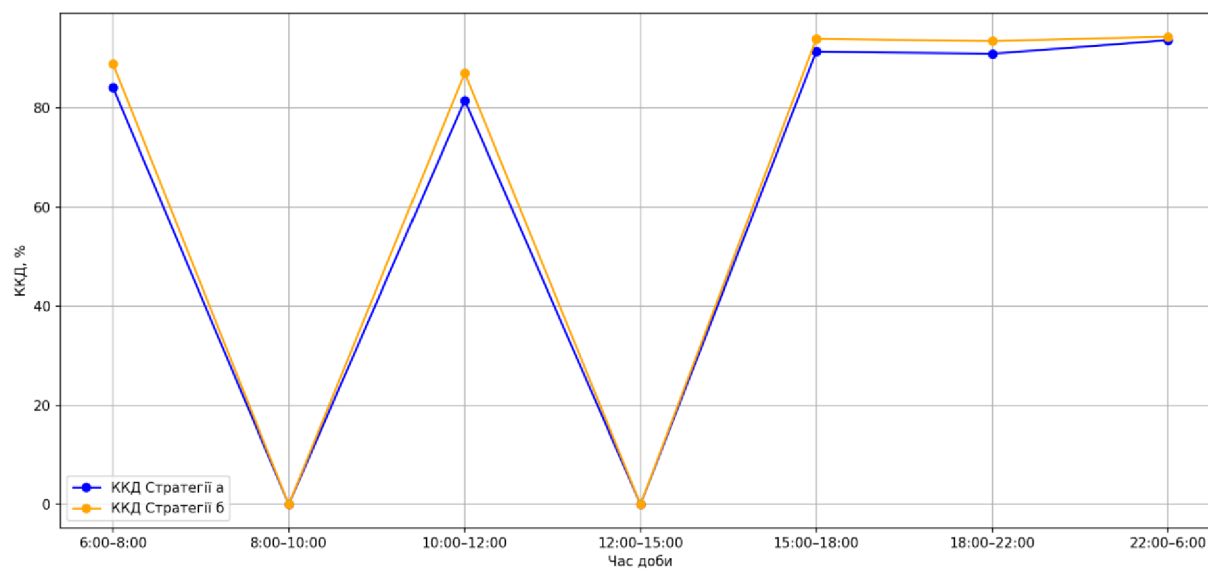
Падіння напруги протягом доби



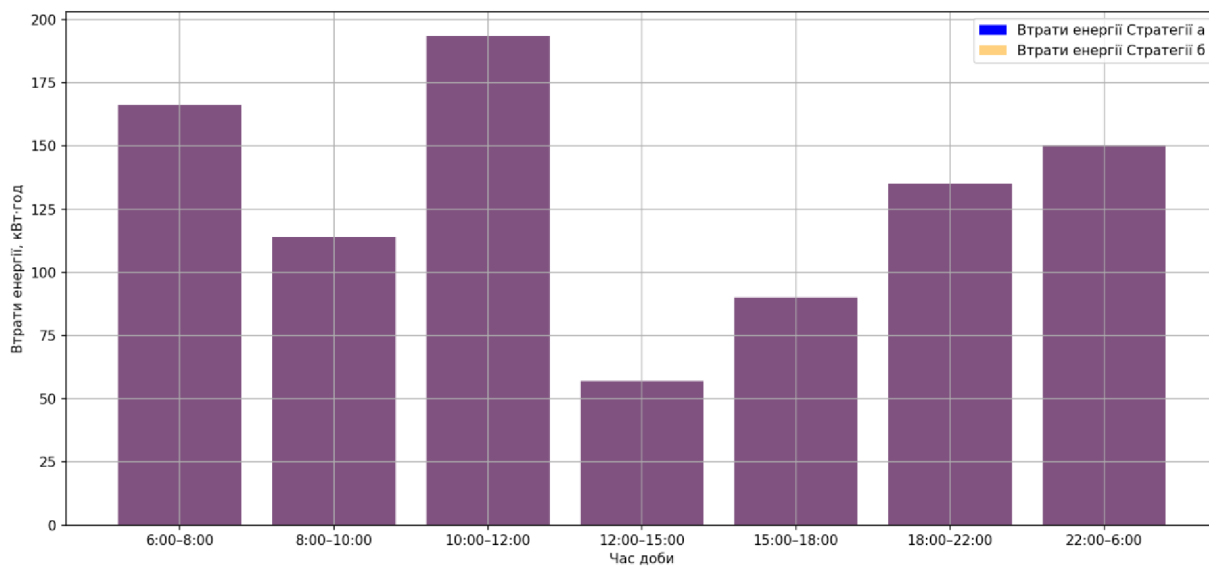
Зміна ККД системи протягом доби



Порівняння інтервальних стратегій розподілу навантаження



ККД інтервальних стратегій протягом доби



Втрата енергії для різних інтервалів навантаження

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____