

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ БЕЗПЕКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕА-Е23мг-
2

спеціальності : 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____ / Олена КОШОВА

(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____ / Вячеслав МЕЛЬНИКОВ

(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____ / Олег ПОДОЛЯК

(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____ / Артем ЧЕРНЮК

(підпис) (ім'я та прізвище)

Нормоконтроль _____ / Юлія ОЛІЙНИК

(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____ / Ігор КИРИСОВ

(підпис) (ім'я та

прізвище)

Харків – 2024 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія

Кафедра електротехніки та електроенергетики

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма Енергетична безпека

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК

(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Олена КОШОВА

1. Тема «ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ БЕЗПЕКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ»

затверджена наказом по академії № 4801-5/3345 від «12» 10 2024 р.

2. Термін здачі закінченої роботи « 10 » 12 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Рівень напруги, умови експлуатації, характеристика струмоведучих частин, типи кабельних ліній, метод апарат дослідження, завдання, параметри обладнання

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):

Вступ. Перелік умовних позначень. Формування системи індикаторів для оцінювання рівня енергетичної безпеки України. Основні категорії індикаторів для оцінювання рівня енергетичної безпеки. Методологія визначення меж безпечного існування індикаторів енергетичної безпеки України. Підвищення ефективності розподільчої мережі та управління перевантаженнями за допомогою оптимального зберігання акумулятора та моделювання потоку електроенергії. Актуальність знаження перевантаження в електричних мережах старн ЄС. Висновки. Список посилань

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал): _____ Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «_12_» _____ 10 _____ 2024 __р.

Керівник

(підпис)Вячеслав МЕЛЬНИКОВ

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)Олена КОШОВА

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/ п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	02.10.24 – 05.10.24	
2	Проведення аналізу наукової літератури	06.10.24 – 15.10.24	
3	Виконання першого розділу дипломної роботи	16.10.24 – 29.10.24	
4	Виконання другого та третього розділу дипломної роботи	30.10.24 – 26.11.24	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.24 – 07.12.24	

Студент (ка)

(підпис)Олена КОШОВА

(ім'я, прізвище)

Нормоконтроль

(підпис)Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ
до магістерської роботи на тему

«ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ БЕЗПЕКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ»

Олена КОШОВА

Магістерська робота виконана на 65 стр., містить 13 таблиці, 16 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 36 літературних посилань.

Об'єкт дослідження – режими роботи електричних мереж.

Предмет дослідження – електричні мережі.

Мета роботи – ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ БЕЗПЕКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ.

Ступінь впровадження: проектні інститути.

Економічна ефективність значимість роботи: дана робота має високу значимість теоретичного й практичного рівня.

Проведене дослідження описує методологію підвищення ефективності розподільчої мережі та управління перевантаженнями за допомогою оптимального зберігання акумулятора та моделювання потоку електроенергії, в рамках магістерської роботи проаналізоване формулювання першої моделі, яка називається моделлю введення шини, формулювання другої запропонованої моделі, яка називається моделлю потоку гілки, формулювання моделі батареї та цільова функція задачі. Показні характеристики та особливості досліджуваної мережі. Представлені результати моделювання.

Підвищення ефективності роботи електричних мереж прямим чином впливає на формування енергетичної безпеки об'єкта, що розглядається у роботі.

Для майбутніх напрямків досліджень пропонується вивчити інтеграцію гнучкості з боку попиту або електричних транспортних засобів, щоб зменшити надмірне навантаження на батареї. Цей підхід задіяв би три джерела гнучкості та підвищив адаптивність в рамках електромережі. Такі території пропонують нові можливості для подальшого підвищення ефективності та управління електроенергетичною системою. Крім того, також пропонується запровадити різні джерела відновлюваної енергії, такі як фотоелектричні чи вітрові, разом із відповідними профілями генерації для аналізу динамічної поведінки мережі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МІСЦЕ НЕСПРАВНОСТІ, АВАРІЙНІ РЕЖИМИ, ЕНЕРГЕТИЧНА БЕЗПЕКА, ІНДИКАЦІЯ ПРОХОДЖЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ, ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ, ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЙ, НЕТРАДИЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЙ, ІНДИКАЦІЯ ПРОХОДЖЕННЯ НЕСПРАВНОСТІ, ОПТИМАЛЬНИЙ ПОТІК ПОТУЖНОСТІ ; ГНУЧКІСТЬ ; ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ МЕРЕЖІ ; ОПУКЛА ОПТИМІЗАЦІЯ

ABSTRACT
up to master's thesis on the topic

**“ADVANCED INFLECTION OF ELECTRICAL ROBOTICS MODES
 FOR ENERGY SECURITY OF THE ENERGY SYSTEM”**

Olena KOSHOVA

The master's work is published on 65 pages, there are 13 tables, 16 figures that characterize the results of the research, there are 36 literary essays.

The object of investigation is the operating modes of electrical lines.

The subject of investigation is electrical lines.

Meta robots – ADVANCED INTEGRATION OF ELECTRICAL ROBOT MODES FOR THE ENERGY SECURITY OF THE ENERGY SYSTEM.

Stage of advancement: design institutes.

Economical effectiveness and significance of the robot: this robot has a high significance on a theoretical and practical level.

The research carried out describes the methodology for increasing the efficiency of the distribution network and managing re-vantages through optimal battery conservation and modeling the flow of electricity, as part of a master's work. The formulation of the first model, called the bus insertion model, the formulation of the other derived model, called the flow model, the formulation of the battery model and the goal function of the problem are analyzed. Show the characteristics and features of the monitored measure. The results of the modeling are presented.

The increase in the efficiency of electrical welding robots directly affects the formation of the energy security of the object that is smoothed by the robot.

For future directions, it is necessary to consider the integration of power supply from the side of the water supply or electrical transport devices in order to change the excessive load on the battery. This approach touches three elements of flexibility and promotes adaptability within the power limit. Such areas will demonstrate new opportunities to further improve the efficiency and management of the electricity system. In addition, it is also proposed to supply different sources of fresh energy, such as photovoltaics and wind, together with different generation profiles to analyze the dynamic behavior measures.

KEY WORDS: FAILURE POINT, EMERGENCY MODES, ENERGY SAFETY, PASSING FAILURE INDICATION, ELECTRICAL INTERRUPTIONS, PERMANENT STREAM, DEVELOPMENTAL JERELA ENERGY, NON-TRADITIONAL GEREL ENERGY, INDICATION OF PASSING FAILURE, OPTIMUM FLOW OF TENSION; GNUCHKIST; PEREVANTAZHENNYA MEREZHA; OPUKLA OPTIMIZATION

ЗМІСТ

	с.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ІНДИКАТОРІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ	10
1.1. Основні категорії індикаторів для оцінювання рівня енергетичної безпеки	10
1.2. Методологія визначення меж безпечного існування індикаторів енергетичної безпеки України	23
1.3. Формалізований підхід щодо обґрунтування вектора порогових значень	25
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	30
РОЗДІЛ 2. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЬЧОЇ МЕРЕЖІ ТА УПРАВЛІННЯ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИМАЛЬНОГО ЗБЕРІГАННЯ АКУМУЛЯТОРА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	31
2.1. Актуальність знаження перевантаження в електричних мережах старн ЄС	31
2.2. Методика дослідження	31
2.3. Рецептури ОБТК	36
2.3.1. Формулювання моделі впорскування шини	36
2.3.2. Формулювання моделі потоку Браха	39
2.3.3. Модель батареї	43
2.3.4. Функція об'єкта	45
2.4. Кейс-стаді	45
2.5. Аналіз результатів дослідження	51
2.5.1. Аналіз перевантаженості лінії в початковій ситуації	51
2.5.2. Оптимальна робота батареї для управління	

перевантаженням мережі	52
2.5.3. Порівняння між двома моделями оптимізації	54
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	59
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	61
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

BIGT – тиристори із ізольованим затвором

BIM – модель інжекції шини

BFM – модель розгалуженого потоку

BGCT – двомодові комутовані тиристори

CSC – перетворювач джерела струму

DT – динамічні тарифи

DPT – щоденні мережеві тарифи

DSO – оператор систем передачі електроенергії

HVDC – постійний струм високої напруги

LCC – лінійно-комутовані перетворювачі

MMC – модульні багаторівневі перетворювачі

MMK – модульний багаторівневий перетворювач

OPF – оптимальні потоки електроенергії

SOCR-OPF – опуклий конус другого порядку

VSC – перетворювач напруга-джерело

ЕМ – електричні мережі

ПС – підстанція

ВСТУП

Значне зростання попиту на електроенергію призвело до зростання перенапруг та «заторів» у розподільчих мережах. Проблема двояка: необхідно розширити та модернізувати нашу мережу, щоб задовольнити цей підвищений попит, а також запровадити технології розумних мереж для підвищення ефективності та надійності розподілу електроенергії. Щоб пом'якшити ці перенапруги та знизити пропускну здатність ліній, можна використовувати нові підходи з використанням джерел гнучкості, таких як акумуляторна батарея. Це передбачає використання систем зберігання акумуляторів для поглинання надлишку енергії в періоди низького попиту та вивільнення її в години пік, ефективно балансує навантаження та зменшуючи навантаження на мережу. В дослідженні проведено аналіз двох формул оптимального потоку потужності: модель потоку розгалуження (неопукла) і модель розслабленої інжекції шини (опукла). Ці формули визначають оптимальну роботу джерел гнучкості, тобто накопичення енергії акумулятора, з метою мінімізації втрат електроенергії, уникаючи перевантажень. Крім того, виконується порівняння ефективності цих двох формулювань, аналізуючи результати цільової функції та операцію гнучкості. Для цього була використана справжня розподільча мережа з відповідними даними про навантаження за сім днів.

У зв'язку з цим метою цієї магістерської роботи є ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НА ЕНЕРГЕТИЧНУ БЕЗПЕКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ.

Об'єкт дослідження – режими роботи електричних мереж.

Предмет дослідження – електричні мережі.

РОЗДІЛ 1. ФОРМУВАННЯ СИСТЕМИ ІНДИКАТОРІВ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ

1.1. Основні категорії індикаторів для оцінювання рівня енергетичної безпеки

Формування системи індикаторів для оцінювання рівня енергетичної безпеки України є важливим кроком для забезпечення ефективного моніторингу та управління енергетичними процесами. Індикатори повинні охоплювати різноманітні аспекти енергетичної безпеки, зокрема економічні, технологічні, екологічні та соціальні фактори.

Основні категорії індикаторів для оцінювання рівня енергетичної безпеки України:

1. Економічні індикатори

- Енергетичні витрати в структурі ВВП: Частка витрат на енергію у валовому внутрішньому продукті. Це дозволяє оцінити економічну ефективність енергетичного використання та залежність економіки від енергетичних ресурсів.
- Зростання енергоефективності: Темпи зниження споживання енергії на одиницю продукції або послуг. Це показує, наскільки ефективно країна використовує свої енергетичні ресурси.
- Частка енергії, що імпортується: Відсоток енергії, яка імпортується з інших країн. Високий рівень імпорту може вказувати на залежність від зовнішніх джерел і вразливість до коливань на міжнародних енергетичних ринках.
- Ціни на енергоносії: Динаміка цін на нафтопродукти, газ, вугілля та електроенергію, яка впливає на економічну стабільність та конкурентоспроможність країни.

2. Технологічні індикатори

- Рівень диверсифікації енергетичних джерел: Частка різних джерел енергії в загальному енергетичному балансі. Більша диверсифікація знижує ризики від залежності від одного джерела або маршруту постачання.
- Розвиток відновлювальних джерел енергії (ВДЕ): Частка сонячної, вітрової, біоенергетики в загальному енергетичному балансі. Це показує прогрес у зменшенні залежності від традиційних енергоресурсів та підвищення стійкості енергетичної системи.
- Інновації в енергетичній інфраструктурі: Рівень впровадження новітніх технологій, таких як накопичувальні системи енергії, системи управління енергоспоживанням, інтелектуальні мережі.
- Наявність та стан критичної енергетичної інфраструктури: Оцінка стану і безпеки енергетичних об'єктів (станцій, мереж, трубопроводів) для забезпечення стійкості енергосистеми.

3. Екологічні індикатори

- Емісія парникових газів: Викиди CO_2 та інших парникових газів внаслідок енергетичної діяльності. Зниження цього показника є важливим для досягнення міжнародних кліматичних цілей та забезпечення сталого розвитку.
- Використання водних ресурсів: Обсяг води, використаної для охолодження ТЕС і АЕС, а також для інших енергетичних процесів. Це важливо для оцінки впливу енергетичних технологій на водні ресурси країни.
- Чистота повітря: Рівень забруднення повітря від спалювання викопних видів палива. Це дає уявлення про екологічну безпеку в енергетичній сфері.

4. Соціальні індикатори

- Доступ до енергії: Частка населення, яке має доступ до стабільних джерел енергії. Це забезпечує соціальну стабільність і рівність.
- Ціна енергії для кінцевих споживачів: Вартість енергетичних ресурсів для домогосподарств та промисловості. Високі ціни можуть негативно впливати на добробут населення та економіку.

- **Енергетична грамотність:** Рівень обізнаності громадян та підприємств щодо енергоефективності, відновлювальних джерел енергії та способів збереження енергії.

5. Політичні та управлінські індикатори

- **Стабільність енергетичної політики:** Оцінка наявності чіткої та послідовної енергетичної політики, що сприяє досягненню цілей енергетичної безпеки.

- **Міжнародна співпраця у енергетичній сфері:** Ступінь інтеграції України в міжнародні енергетичні ринки, участь у міжнародних енергетичних проектах, таких як енергетичний союз або угоди щодо зміни клімату.

- **Інвестиції в енергетичну інфраструктуру:** Обсяг інвестицій у модернізацію енергетичної інфраструктури, розбудову відновлювальних джерел та підвищення ефективності енергетичного сектора.

Система індикаторів має бути комплексною, зокрема, з урахуванням взаємозв'язку між економічними, екологічними, соціальними та технологічними факторами. Це дозволить не тільки оцінити поточний рівень енергетичної безпеки, але й здійснювати моніторинг та коригування стратегічних планів з енергетичного розвитку країни, забезпечуючи її сталий розвиток.

Для вирішення завдання інтегрального оцінювання рівня енергетичної безпеки України, використовуючи універсальну методологію ідентифікації та стратегування в сфері національної безпеки, необхідно застосувати підхід, що дозволяє порівнювати індикатори різних сфер безпеки і обґрунтовувати стратегічні сценарії розвитку. Цей підхід передбачає кілька етапів і методів, які забезпечують точну та об'єктивну оцінку.

Ключові етапи для інтегрального оцінювання рівня енергетичної безпеки:

1. **Вибір індикаторів енергетичної безпеки:** Індикатори для оцінки енергетичної безпеки повинні охоплювати різні аспекти, такі як економічні, технологічні, екологічні, соціальні та політичні фактори. Важливо, щоб ці

індикатори дозволяли здійснювати порівняння та відображали реальний стан енергетичної безпеки.

2. Нормалізація індикаторів: Оскільки індикатори можуть мати різні розмірності (наприклад, кількість викидів CO₂ може вимірюватися в тоннах, а рівень енергоефективності — у відсотках), необхідно перевести їх до безрозмірних величин. Це досягається за допомогою методів нормування, таких як:

- Лінійне нормування: Приведення індикаторів до діапазону [0, 1], де максимальне значення індикатора має нормоване значення 1, а мінімальне — 0.
- Застосування стандартних відхилень: Використання середнього значення та стандартного відхилення для переведення даних в стандартизовані показники.
- Метод мінімального/максимального значення: Нормалізація значень за допомогою мінімального та максимального значення для кожного індикатора.

3. Визначення вагових коефіцієнтів: Кожен індикатор має різний вплив на загальний рівень енергетичної безпеки. Вагові коефіцієнти визначають важливість кожного індикатора в інтегральній оцінці. Це дозволяє підвищити або знизити значення певних індикаторів у загальній оцінці, враховуючи їх стратегічну важливість для забезпечення енергетичної безпеки. Наприклад, для енергетичних ресурсів важливим є індикатор диверсифікації джерел енергії, а для екологічної безпеки — рівень викидів CO₂.

4. Вибір стимуляторів і дестимуляторів: У процесі підготовки оцінки енергетичної безпеки важливо визначити, які індикатори є стимуляторами (їх значення повинні збільшуватися для покращення безпеки) та які — дестимуляторами (їх значення повинні зменшуватися для покращення безпеки). Наприклад:

- Стимулятори: рівень енергоефективності, частка відновлювальних джерел енергії в енергетичному балансі.

- Дестимулятори: залежність від імпортованих енергоносіїв, викиди CO₂, кількість аварій на енергетичних об'єктах.

5. Інтегральна оцінка енергетичної безпеки: Після того як всі індикатори будуть нормалізовані та отримують вагові коефіцієнти, можна здійснити підсумкову оцінку інтегрального рівня енергетичної безпеки. Це здійснюється шляхом підсумовування нормованих значень індикаторів, з урахуванням їх вагової значущості:

6. Моделювання сценаріїв розвитку: Використовуючи інтегральний показник енергетичної безпеки, можна сформулювати різні стратегічні сценарії розвитку енергетичної політики України. Це включає варіанти з різними рівнями інвестицій у відновлювальні джерела енергії, розвиток енергоефективних технологій, зниження залежності від імпортованих енергоносіїв та зменшення екологічного навантаження.

Застосування системного підходу до аналізу сфери енергетичної безпеки є важливим кроком для формування точніших і більш ефективних методів оцінювання рівня безпеки в енергетичному секторі. Системний підхід дозволяє врахувати не тільки внутрішні процеси трансформації енергетичної системи, але й вплив зовнішнього середовища, що значно розширює горизонти для прогностичних оцінок та планування. У цьому контексті можна виділити кілька ключових аспектів:

1. Врахування динаміки системи та зовнішнього середовища:

Системний підхід дозволяє оцінювати енергетичну безпеку з урахуванням як внутрішніх процесів, таких як зміни в енергетичних технологіях, структури виробництва, так і зовнішніх факторів — політичних, економічних, кліматичних змін, розвитку міжнародних енергетичних ринків. Це допомагає створити комплексну картину та точніше передбачати, як ці фактори можуть впливати на безпеку енергетичної системи в майбутньому.

2. Необхідність збору "нової" інформації:

Оскільки енергетична система постійно трансформується, а нові технології та процеси змінюють її динаміку, виникає потреба в актуалізації

системи збору інформації. Система збору даних повинна включати не лише традиційні показники (виробництво, споживання енергії, запаси), а й враховувати нові аспекти, такі як інвестиційні потоки, приватні ініціативи на ринку енергетики, вплив кліматичних змін на енергетичні потужності тощо.

3. Лібералізація енергетичних ринків та складність доступу до інформації:

Лібералізація енергетичних ринків, яка відбувається в багатьох країнах, включаючи Україну, створює нові виклики для збору достовірної інформації. Це пов'язано з тим, що на ринку з'являються приватні інвестори, які, з огляду на комерційну таємницю, не зацікавлені в розкритті важливої інформації, що стосується їхніх інвестиційних рішень. Це ускладнює оцінку таких показників, як рівень інвестиційної привабливості енергетичної сфери, ефективність проектів в області відновлювальних джерел енергії, або вартість виробництва електроенергії.

4. Необхідність адаптації системи збору інформації:

Для того, щоб ефективно оцінювати рівень енергетичної безпеки, необхідно створити адаптовану систему збору та аналізу даних, яка враховує нові процеси в енергетичному секторі. Це включає, зокрема, моніторинг нових технологій (наприклад, вітрових і сонячних установок), процесів лібералізації та дерегуляції ринків, а також прогнозування наслідків зміни клімату для енергетичних систем.

5. Завдання для дослідників і управлінців:

Для вирішення цих проблем потрібно залучити дослідників та управлінців, які спеціалізуються на розвитку енергетичних технологій та інфраструктури, а також фахівців з аналізу великих даних. Завдання полягає в створенні методологій для збору, обробки та аналізу "нової" інформації, а також розробці стратегій для подолання викликів, які постають перед енергетичною безпекою в умовах глобальних змін.

Загалом, системний підхід дозволяє отримати більш глибоке і точне розуміння енергетичної безпеки України, враховуючи всі її складові та

взаємодії, а також забезпечує основу для ефективного управління енергетичними ресурсами та політиками.

У зв'язку з необхідністю оцінки складних і динамічних процесів на енергетичних ринках, підхід через використання експертних опитувань та індикаторів стає важливим етапом для визначення рівня енергетичної безпеки країни. Оскільки багато факторів, що впливають на енергетичну безпеку, не мають легко доступної та достовірної публічної інформації, використання нових індикаторів і процесів, таких як «ліквідність ринків» чи «ризиковість ринків», є важливими для оцінки інвестиційної привабливості енергетичної сфери.

Основні аспекти для оцінки рівня енергетичної безпеки:

1. Індикатори ліквідності та ризиковості ринків: Ці індикатори допомагають зрозуміти, наскільки привабливою є енергетика країни для інвесторів. Ліквідність ринку показує, наскільки швидко та ефективно можна здійснювати операції з енергетичними ресурсами, в той час як ризиковість ринку відображає потенційні загрози для інвестицій, пов'язані з політичними, економічними або природними факторами. Обидва індикатори сприяють формуванню прогнозів щодо стабільності та прозорості функціонування енергетичної галузі.

2. Оцінка прозорості та стабільності ринку: Інвестори мають велику потребу в передбачуваності та стабільності енергетичних ринків. Відсутність прозорості або раптові зміни в політиці можуть зробити країну менш привабливою для інвестицій. Тому, одними з важливих індикаторів є ступінь регуляторної прозорості та рівень стабільності політичної ситуації, що безпосередньо впливає на енергетичний сектор.

3. Проблеми з отриманням достовірної інформації: Оскільки інформація про енергетичні ринки часто є конфіденційною і недоступною для загального обміну, створення спеціалізованих баз даних для збору та аналізу цих показників є важливою умовою для подальшого моделювання рівня

енергетичної безпеки. Це дозволить отримувати більш точні і своєчасні дані для оцінки ризиків та прогнозування розвитку енергетичних ринків.

4. Вибір і нормалізація індикаторів: Вибрані індикатори для оцінки енергетичної безпеки повинні бути нормалізованими для забезпечення їх зіставності. Наприклад, деякі показники можуть мати різні одиниці виміру, тому їх потрібно перевести у безрозмірні величини. Це дозволяє використовувати їх для порівняння та складання інтегрального індикатора енергетичної безпеки.

Таблиця 1.1 – Набір індикаторів для оцінювання енергетичної безпеки України

№	Індикатори	Одиниці вимірювання
1	ВВП на 1 особу, (S)	тис. дол. США/ос. (за поточним обмінним курсом)
2	вартість витрат на енергоресурси для країни, (D)	% ВВП
3	споживання електроенергії на 1 особу, (S)	МВт*год/рік
4	енергоспоживання на 1 особу, (S)	т.н.е./рік
5	рівень витрат на забезпечення житлово-комунальних послуг на домогосподарство, (D)	% від сукупних доходів
6	енергоємність ВВП, (D)	т.н.е./1000 дол. США
7	частка енергетики у ВВП, (D)	% ВДВ у ВВП
8	рівень залученості до ринків ЄС, (S)	% (експертна оцінка)
9	рівень інвестування підприємств ПЕК, (S)	% випуску ПЕК
10	рівень оновлення основних засобів ПЕК, (D)	%
11	рівень тінізації ПЕК, (D)	% ВДВ ПЕК
12	рівень оплати праці у ПЕК, (S)	% випуску ПЕК
13	рівень тіньового завантаження капіталу в ПЕК (добувна галузь та виробництво електроенергії, газу і води), (D)	% офіційного
14	рівень тіньового споживання ПЕР, (D)	% ВВП України
15	концентрація ринків за індексом Герфіндаля – Гіршмана, (D)	індекс (за постачальниками)
16	рівень викидів CO ₂ на TPES, (D)	т CO ₂ /т.н.е.
17	рівень викидів CO ₂ на одиницю ВВП, (D)	кг/дол. США
18	кінцева вуглеємність енергії, (D)	г CO ₂ /МДж
19	задоволення потреб з власних джерел за видами ПЕР, (S)	% загального споживання
20	вартість імпорту енергоресурсів для країни, (D)	% ВВП
21	частка домінуючої країни (постачальника) у загальному обсязі імпорту за видами ПЕР, (D)	% імпорту ПЕР
22	рівень технологічної залежності імпорту/експорту з одного джерела (за видами енергетичних технологій), (D)	% (експертна оцінка)
23	рівень запасів/резервів від обсягів річного/місячного споживання за видами ПЕР, (S)	% (експертна оцінка)
24	індекс тривалості довгих перерв в електропостачанні на одного споживача (SAIDI), (D)	хв/рік
25	наявність законодавства, (S)	% (експертна оцінка)
26	управлінські процеси та інфраструктура, (S)	% (експертна оцінка)
27	допоміжні та сервісні процеси та інфраструктура, (S)	% (експертна оцінка)
28	процеси та інфраструктура з підтримки об'єктів на всіх етапах життєвого циклу, (S)	% (експертна оцінка)
29	інформаційно-комунікаційні процеси та інфраструктура, (S)	% (експертна оцінка)
30	прогнозованість та послідовність змін політики та регуляторних змін, (S)	% (експертна оцінка)

31	виробничі процеси та інфраструктура, (S)	% (експертна оцінка)
32–38	енергетичний баланс: нафта та нафтопродукти (D); природний газ (D); вугілля, (D); ядерна та термоядерна енергія, (S); гідроенергетика, (S); сонячна та вітрова енергетика, (S); біоенергетика, (S)	% у балансі ПЕР
39	якість державної політики, (S)	% (експертна оцінка)
40	якість послуг (первинних ресурсів, продуктів та енергії), (S)	% (експертна оцінка)
41	якість кадрів (технічних та управлінських), (S)	% (експертна оцінка)
42	відповідність політичних лідерів завданням, що постають перед системою, (S)	% (експертна оцінка)

Для оцінки рівня енергетичної безпеки України, моделювання буде базуватися на скороченому наборі індикаторів, що враховують доступність та достовірність даних. Цей набір може включати такі індикатори:

- Ліквідність ринку: як показник ефективності енергетичних ринків.
- Ризиковість ринку: визначення впливу нестабільності або несприятливих факторів.
- Інвестиційна привабливість: оцінка капіталовкладень в енергетичні проекти.
- Ступінь регулювання: рівень контролю та прозорості державної політики в енергетиці.

Таке моделювання допоможе скласти точнішу картину енергетичної безпеки та передбачити можливі зміни в енергетичному секторі України на найближчі роки.

Структура енергетичної безпеки, що містить 42 індикатори, є результатом аналізу та спробою охопити всі важливі аспекти, які впливають на енергетичну стабільність країни. Ці індикатори включають як об'єктивні, так і суб'єктивні показники, причому частина з них (14) є оцінками експертів. Цей набір індикаторів є гнучким і може змінюватися в залежності від конкретних цілей та глибини дослідження.

Ключові аспекти для формування індикаторів енергетичної безпеки:

1. Компроміс між спрощенням та складністю: Ідеальне використання індикаторів вимагає балансу між простотою і складністю. Спрощення може призвести до втрати важливих нюансів, у той час як велика кількість індикаторів може створити складнощі в їх аналізі, викликаючи так звану

проблему "прокляття розмірності". Це означає, що надмірна кількість індикаторів ускладнює не тільки збирання та обробку даних, але й точне інтерпретування результатів.

2. Гнучкість переліку індикаторів: Перелік індикаторів не є універсальним і може бути адаптований до специфічних умов дослідження. Кожен індикатор має своє значення залежно від контексту — наприклад, для оцінки енергетичної безпеки в умовах зміни клімату важливими можуть бути різні показники порівняно з тими, що використовуються для оцінки безпеки на енергетичних ринках.

3. «Тіньові» індикатори: Однією з особливостей цієї структури є так звані "тіньові" індикатори, які важливі для комплексної оцінки енергетичної безпеки, але не завжди можуть бути безпосередньо виміряні чи відображаються в офіційній статистиці. Ці індикатори розраховуються за методом соціальної справедливості, що дозволяє враховувати соціальні та економічні аспекти безпеки, зокрема вплив на добробут населення. Їхній внесок в оцінку енергетичної безпеки критично важливий, оскільки без цього елемента оцінка буде неповною та не відповідатиме реальному стану справ.

4. Залучення експертних оцінок: Чимало індикаторів визначаються не тільки на основі об'єктивних даних, але й через експертні оцінки, що дозволяє врахувати специфічні контексти чи нові фактори, які можуть не відображатися в загальнодоступній статистиці. Це дозволяє забезпечити більш глибоке та комплексне бачення ситуації.

Проблеми «прокляття розмірності»: це явище, коли великий набір індикаторів ускладнює їх інтеграцію і створює додаткові труднощі в обробці даних. Враховуючи це, важливо правильно вибрати кількість і тип індикаторів для забезпечення точності та ефективності моделювання рівня енергетичної безпеки.

Таким чином, структура енергетичної безпеки, включаючи «тіньові» індикатори та експертні оцінки, надає повнішу картину стану енергетичної

ситуації в країні, забезпечуючи більш гнучку і точну оцінку для прийняття стратегічних рішень.

Групування індикаторів енергетичної безпеки в системному підході є важливим етапом для спрощення та удосконалення процесу моделювання і оцінки енергетичних ризиків та можливостей. Вибір підходу до групування залежить від практичних цілей дослідження та здатності користувачів сприймати ці дані. Наведені два способи групування індикаторів дозволяють зручно структурувати інформацію для подальшого аналізу.

Підходи до групування індикаторів:

1. Групування за розширенням сфери управління: Цей підхід орієнтований на те, щоб допомогти управляти складністю рішень у процесі управління енергетичною безпекою. Індикатори групуються за такими параметрами:

- Ресурсна забезпеченість: Оцінка доступності та надійності ресурсів (палених, електричних, людських тощо).
- Економічна доступність: Вартість енергетичних ресурсів і можливість їх використання в умовах економічних обмежень.
- Економічна прийнятність: Відповідність енергетичних стратегій та рішень до економічних стандартів і норм.
- Екологічна прийнятність: Вплив енергетичних рішень на навколишнє середовище.
- Модель стійкості: Оцінка здатності енергетичної системи функціонувати в умовах нестабільності чи змін.
- Якість управління: Ефективність управлінських структур і процесів у сфері енергетики.

2. Групування за системним описом об'єкта управління: У цьому підході індикатори об'єднуються відповідно до аспектів, що відображають цілісну структуру та функціонування енергетичної системи:

- Цілісний опис системи: Оцінка енергетичної безпеки як єдиного цілого, яке включає всі елементи та їх взаємодію.
- Інституційно-організаційна структура системи: Оцінка ефективності організаційних структур, які забезпечують управління енергетичною безпекою.
- Функціональна структура системи: Вивчення функцій і ролей різних підсистем у забезпеченні енергетичної безпеки.
- Процесне відображення системи: Аналіз енергетичних процесів, які відбуваються в системі, і їх вплив на загальний стан безпеки.
- Якість матеріалу системи: Вивчення технічних та матеріальних аспектів енергетичних об'єктів, їх надійності та стану.

Групування індикаторів має допомогти полегшити сприйняття складних результатів моделювання. Це особливо важливо для того, щоб дослідження могли бути зрозумілі й прийняті більш широкою аудиторією, включаючи експертів та практиків у галузі енергетики. Велика кількість чинників може зробити результат моделювання складним для інтерпретації, тому групування допомагає у зручному поданні цієї інформації.

Для дослідників і практиків постають наступні питання:

- Підготовка до сприйняття результатів: Важливо враховувати, що групування індикаторів має бути спрощеним для сприйняття кінцевими користувачами, зокрема для тих, хто працює в галузі енергетики.
- Адаптація до нового системного підходу: Зважаючи на те, що запропонована система є новою, вона може бути складною для розуміння. Тому наявність прикладів групування індикаторів за більш звичним підходом, таким як метод «4's» (Safety, Security, Sustainability, and Supply), дозволяє більш легко ввести цю концепцію у практичну діяльність.

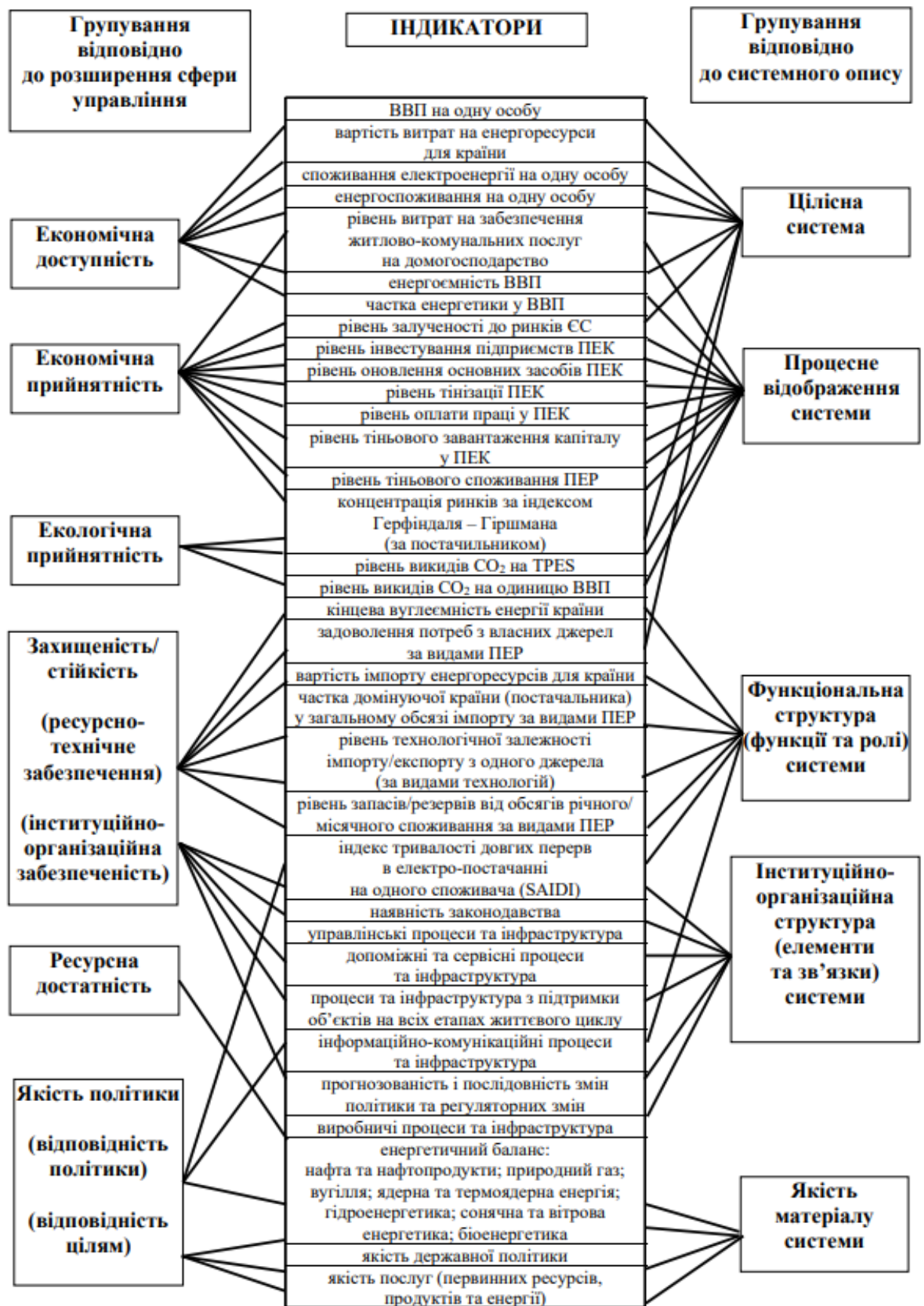


Рисунок 1.1. – Способи групування індикаторів для моделювання

1.2. Методологія визначення меж безпечного існування індикаторів енергетичної безпеки України

Методологія визначення меж безпечного існування індикаторів енергетичної безпеки є важливим етапом у забезпеченні стабільності енергетичної системи країни. Вона передбачає створення набору критеріїв для оцінки поточного стану та визначення допустимих рівнів різних індикаторів, які характеризують енергетичну безпеку. Ці межі дозволяють оцінювати, наскільки енергетична система є стійкою до зовнішніх та внутрішніх загроз, а також визначити, при яких значеннях індикаторів система може функціонувати без суттєвих ризиків для національної безпеки.

Основні етапи методології включають:

1. Ідентифікація основних індикаторів енергетичної безпеки: Визначення ключових показників, що характеризують різні аспекти енергетичної безпеки, таких як:

- Ресурсна забезпеченість (запаси енергоресурсів, диверсифікація джерел).
- Економічна доступність (вартість енергії, інвестиційна привабливість).
- Екологічна прийнятність (викиди CO₂, вплив на навколишнє середовище).
- Технічна надійність (стан енергетичної інфраструктури, рівень зношеності).

2. Встановлення меж безпечного існування для кожного індикатора: Для кожного з індикаторів необхідно визначити мінімальні та максимальні межі, при яких енергетична система може стабільно функціонувати. Наприклад:

- Ресурсна забезпеченість: Мінімальний рівень запасів енергоресурсів, при якому країна не зазнає загрози енергетичних дефіцитів.

- Економічна доступність: Максимальний рівень цін на енергію, що не призводить до економічного колапсу чи соціальних протестів.

- Екологічна прийнятність: Межі викидів, які не перевищують екологічно допустимі норми.

Ці межі можуть бути розраховані на основі досвіду інших країн, прогнозів зростання попиту на енергію, а також економічних та екологічних моделей.

3. Аналіз поточного стану індикаторів: Визначення поточного стану кожного індикатора дає можливість оцінити, чи знаходиться країна в межах безпечного існування. Для цього використовується збір та аналіз даних, отриманих з національних статистичних органів, міжнародних організацій, а також спеціалізованих аналітичних центрів.

4. Моделювання та прогнозування: Моделювання енергетичної безпеки на основі поточних даних дозволяє оцінити, як зміна різних факторів може вплинути на безпеку країни. Це включає в себе аналіз сценаріїв розвитку, таких як зміни цін на енергоносії, коливання попиту, нові технології та інші економічні та екологічні фактори.

5. Розробка стратегічних рекомендацій: На основі визначених меж безпечного існування індикаторів формуються стратегії для підтримки стабільності енергетичної безпеки. Це може включати:

- Створення резервів енергетичних ресурсів.
- Підвищення енергоефективності та зниження енергетичних витрат.
- Розвиток альтернативних джерел енергії.
- Модернізація енергетичної інфраструктури.

6. Моніторинг та коригування меж: З часом, у зв'язку з розвитком економіки, технологій та зміною зовнішньополітичної ситуації, межі безпечного існування можуть потребувати коригування. Постійний моніторинг індикаторів енергетичної безпеки дозволяє вчасно реагувати на потенційні загрози та забезпечити ефективне управління енергетичними ризиками.

Цей підхід дозволяє не лише визначити поточний стан енергетичної безпеки, а й створити стратегію, яка забезпечить стійкість енергетичної системи в майбутньому, враховуючи різноманітні виклики, такі як зміни клімату, технологічні інновації та геополітичні ризики.

1.3. Формалізований підхід щодо обґрунтування вектора порогових значень

Визначення меж безпечного існування є критично важливим етапом у процесі оцінювання рівня безпеки. Системний підхід до проблеми сталого розвитку з точки зору безпеки передбачає чітке визначення меж, за яких система може функціонувати без загроз для своїх життєво важливих інтересів. Без знання цих меж неможливо забезпечити необхідний рівень захисту для об'єктів безпеки.

Для кожного індикатора енергетичної безпеки необхідно визначити вектор порогових значень, який включає кілька ключових рівнів:

- Нижнє критичне значення (нкрих): мінімальний рівень, при якому система переходить в критичний стан, що потребує негайного втручання.
- Нижній поріг (нпорх): рівень, що позначає межу, нижче якої система вже не може функціонувати в належному режимі, хоча і не є критичним.
- Нижнє оптимальне значення (ноптх): найкращий рівень, при якому функціонування системи є ефективним, але є можливість для певного покращення.
- Верхнє оптимальне значення (воптх): максимальний рівень, на якому система все ще функціонує на оптимальному рівні без значних негативних наслідків.
- Верхній поріг (впорх): межа, при досягненні якої система починає функціонувати неефективно, але ще не переходить в критичний стан.
- Верхнє критичне значення (вкрих): максимальний рівень, при якому система перебуває в небезпечному стані, що може призвести до її руйнування або серйозних порушень функціонування.

Ці порогові значення, розподілені між критичними і оптимальними, утворюють так зване гомеостатичне плато, що описує оптимальний діапазон функціонування системи. У межах цього плато система може підтримувати стабільність завдяки від'ємному зворотному зв'язку, що стабілізує її функціонування.

Ідея «гомеостатичного плато» була вперше запропонована Ван Гігом у контексті прикладної теорії систем, де це поняття охоплює стабільні зони (плато) та зони руйнування системи з обох боків цих меж. Далі це поняття було розвинене в інших працях, де додано діапазон порогових та критичних значень, що включають зони нейтрального та додатного зворотного зв'язку. Зміна типу зворотного зв'язку не відбувається миттєво при перетині цих меж; спочатку існуючий тип зворотного зв'язку слабшає експоненційно, після чого наростає новий тип зворотного зв'язку, також за експоненціальною закономірністю.

Такий підхід дозволяє краще зрозуміти динаміку системи та розробити ефективні механізми управління для підтримки стабільного функціонування енергетичної безпеки України.

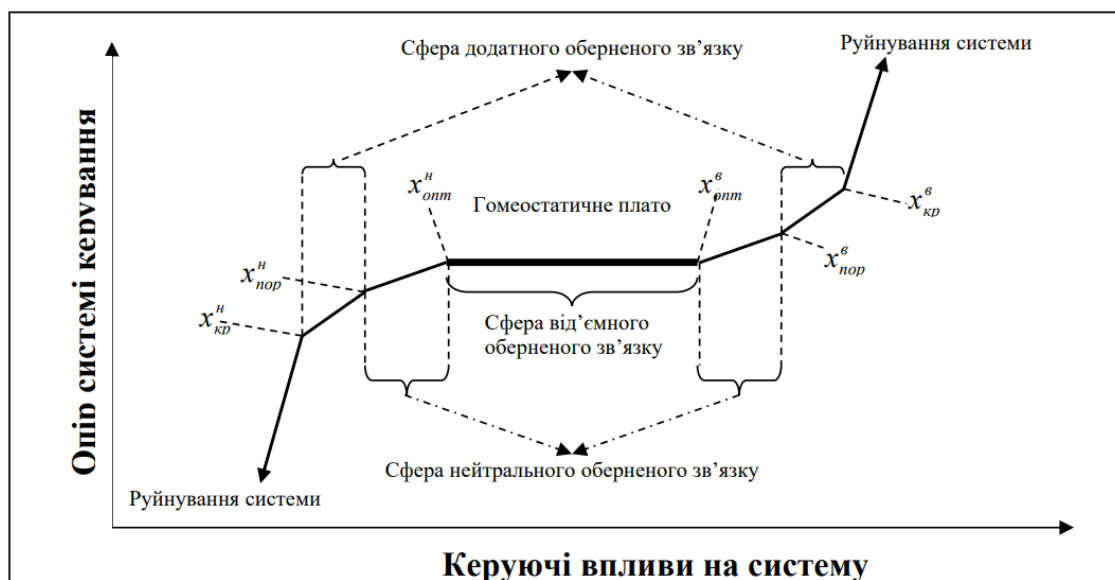


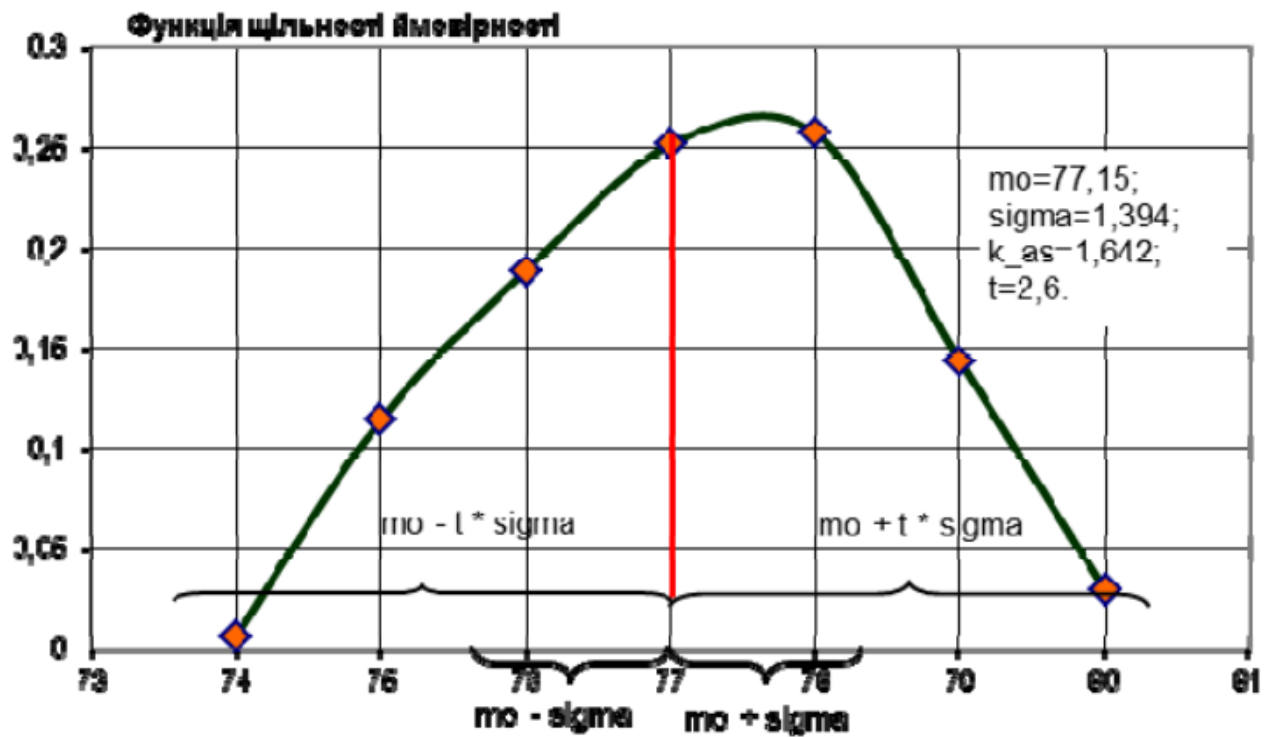
Рисунок 1.2. – Розширене гомеостатичне плато динамічної системи

Визначення порогових значень тісно пов'язане з поняттям динамічної стійкості системи та її компонентів, або з механізмом гомеостазу –

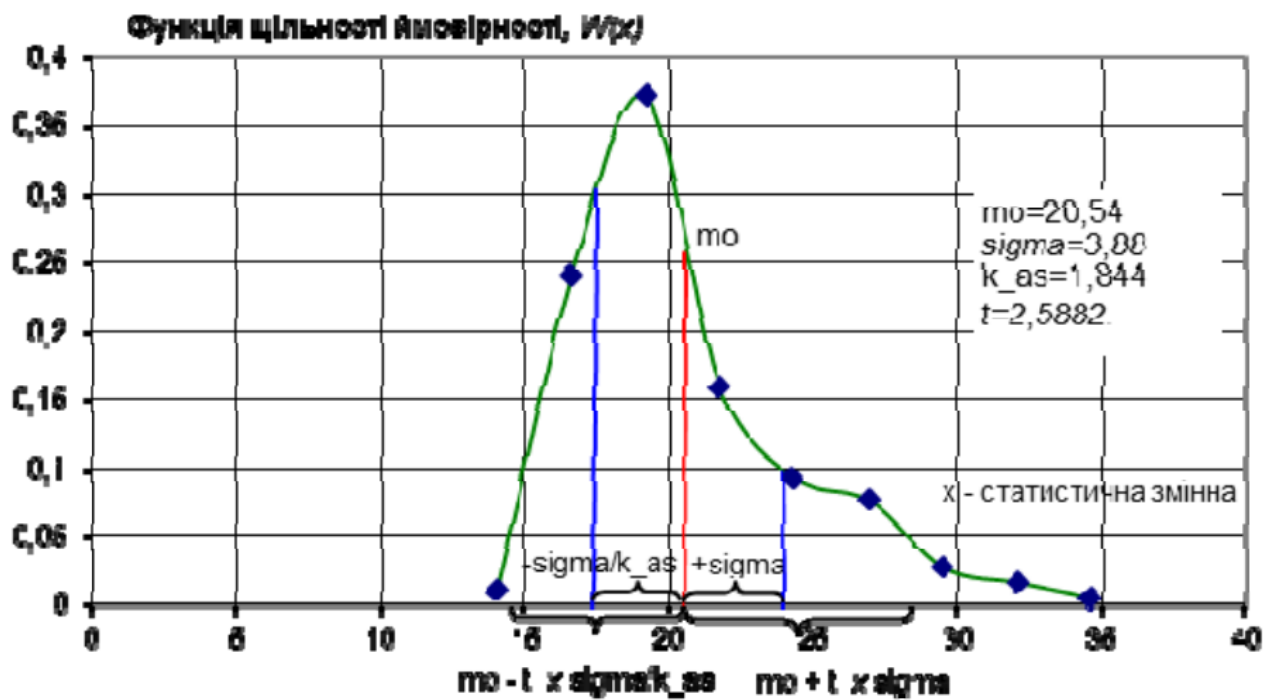
саморегуляції, здатності відкритої системи підтримувати стійкість внутрішнього стану через скоординовані реакції, що спрямовані на підтримання динамічної рівноваги. Це досягається через порівняння динаміки інтегральних індексів з інтегральними пороговими значеннями.

Ця властивість системи зв'язує поняття безпеки з поняттям стійкості динамічної системи, що означає стійкий розвиток. Без такого порівняння спостерігатимемо лише динаміку інтегральних індексів сталого розвитку, яка визначатиме їхнє збільшення чи зменшення в окремі періоди. Це може призвести до хибного висновку щодо максимізації інтегрального індексу. Кожна динамічна система має запас стійкості, тому перетинання критичних точок не означає негайну зміну типу зворотного зв'язку. Спочатку зворотний зв'язок зменшується експоненційно, а потім збільшується інший тип зв'язку (також експоненційно).

Серед методів визначення вектора порогових значень найбільш адекватними і доступними є методи макроекономічних моделей, які відображають наслідки дестабілізуючих факторів для умов конкретної країни у поточний період; функціональні залежності (макро- та мікроекономічні аналітичні або статистичні рівняння, Ахієзера – Гольца, теорії інформації, «золотого перетину»); стохастичні методи (t-критерію, діагностування кластерного аналізу, нечітких множин, логістичної регресії).



a)



б)

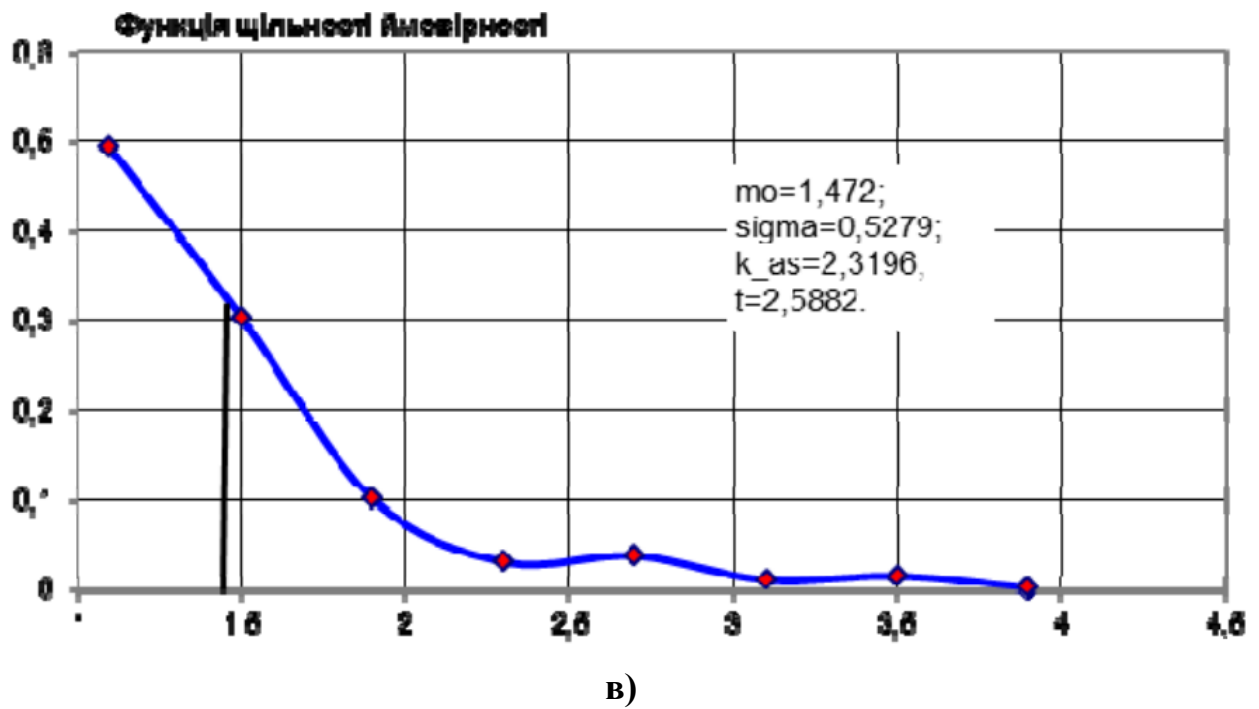


Рисунок 1.3. – Характерні типи функцій щільності ймовірності індикаторів: а) нормальний; б) логнормальний; в) експоненціальний

Дослідження та аналіз індикаторів енергетичної безпеки виявили необхідність удосконалення формалізованого опису вектора порогових значень для логнормального та експоненціального типів розподілу, а саме: «хвіст вправо», «хвіст вліво» (таблиця 1.2).

Таблиця 1.2. – Формалізовані значення вектора порогових значень

Тип функцій щільності ймовірності індикаторів	Нижнє порогове значення	Нижнє оптимальне	Верхнє оптимальне	Верхнє порогове значення
Нормальний	$\mu - t \times \sigma$	$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma$	$\mu + t \times \sigma$
Логнормальний (хвіст вправо)	$\mu - t \times \sigma / k_{as}$	$\mu - \sigma / k_{as}$	$\mu + \sigma$	$\mu + t \times \sigma$
Логнормальний (хвіст вліво)	$\mu - t \times \sigma$	$\mu - \sigma$	$\mu + \sigma / k_{as}$	$\mu + t \times \sigma / k_{as}$
Експоненціальний (хвіст вправо)	$\mu - \sigma / k_{as}$	μ	$\mu + \sigma$	$\mu + t \times \sigma$
Експоненціальний (хвіст вліво)	$\mu - t \times \sigma$	$\mu - \sigma$	μ	$\mu + \sigma / k_{as}$

Формалізоване визначення меж безпечного існування – вектора

порогових значень містить суб'єктивізм, що значно підсилює наукову й практичну значущість отриманих результатів. Наукове обґрунтування дозволяє достовірніше визначати потенційні «зони небезпеки» та умови для посилення економічного імунітету досліджуваної системи, порівнюючи інтегральні індекси з інтегральними пороговими значеннями.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Проведення моделювання дозволяє визначити найбільш ефективні стратегії розвитку енергетичної безпеки України, враховуючи як поточний стан, так і можливі сценарії на майбутнє. Визначення оптимального рівня енергетичної безпеки сприятиме забезпеченню сталого розвитку країни, зменшенню ризиків та підвищенню стійкості енергетичної системи.

Пропоновані методи групування індикаторів дозволяють зробити оцінку енергетичної безпеки більш зрозумілою та зручною для аналізу, забезпечуючи при цьому точні та гнучкі результати, що відповідають вимогам як дослідників, так і практиків.

РОЗДІЛ 2. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ТА УПРАВЛІННЯ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯМИ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПТИМАЛЬНОГО ЗБЕРІГАННЯ АКУМУЛЯТОРА ТА МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1. Актуальність знаження перевантаження в електричних мережах старн ЄС

Сьогодні в електрифікації європейських країн відбувається чудова та прискорена трансформація, оскільки Європейський Союз поставив два значних завдання, пов'язані зі скороченням викидів: перше: викиди парникових газів мають бути зменшені на 20 відсотків порівняно з рівнем 1990 року та по-друге, кожна держава-член повинна досягати 20 відсотків споживання енергії з відновлюваних джерел [11, 12, 13].

Через таку посилену електрифікацію системи розподілу електроенергії мають розвиватися та адаптуватися до мінливих вимог, щоб полегшити та врахувати ці зміни. Ці зміни включають роботу з більшими навантаженнями, адаптацію до більших струмів, керування двонаправленими потоками електроенергії, оптимізацію мережевих конфігурацій для підвищення ефективності та пом'якшення перевантаження за допомогою джерел гнучкості [14].

Щоб сприяти стабільності електроенергетичної системи, гнучкість можна визначити як здатність змінювати моделі виробництва або споживання у відповідь на зовнішній сигнал (сигнали активації). Це важлива сила для рушіїв, деякі приклади якої: інтеграція відновлюваної енергії, яка є періодичною та важко передбачуваною; системи електрифікації, які споживають більше, включаючи електромобілі; підтримання балансу між виробництвом і попитом; і допомога в декарбонізації електроенергетичної системи [15, 16].

Різні автори пропонують використовувати гнучкість для вирішення перевантажень мережі. Автори в [17] обговорюють усі аспекти розгортання електромобілів, зокрема їх функції підтримки мережі в системі транспортного

засобу до мережі (V2G). Він також розглядає інтеграцію електрифікованого парку з відновлюваними джерелами енергії в розумну мережу. У двох словах, автори використовують можливості V2G електромобілів і аналізують їхній потенціал, але вони не розглядають оптимізацію гнучкості, тобто використання гнучкості оптимальним чином.

У дослідженні [18] розглядається технічна здійсненність і потенційні переваги використання накопичувачів енергії для збільшення пропускної спроможності перевантажених систем передачі, що обслуговують регіони країни з великою кількістю виробництва енергії з відновлюваних джерел. Він також містить короткий опис різноманітних додатків зберігання та огляд попередньої роботи EPRI та інших дослідників використання зберігання в системі передачі. Коротше кажучи, він використовує накопичення енергії, але не покладається на оптимізацію. Навпаки, кілька досліджень [19, 20, 21] пропонують ринковий механізм для зменшення перевантажень розподільної мережі за допомогою централізованої та скоординованої системи домашнього енергоменеджменту (HEMS). У цій моделі оператор системи розподілу (DSO) застосовує динамічні тарифи (DT) і щоденні мережеві тарифи (DPT) для керування перевантаженнями, спричиненими електромобілями та НР. Безумовно, він використовує попит як гнучкість мережі, але не реалізує оптимальні потоки електроенергії (OPF) [22, 23].

Іншим джерелом гнучкості, яке слід враховувати, є коливання попиту в галузі. У літературі [24, 25, 26, 27] досліджується, як реалізувати цю нову концепцію в розподільчих мережах. Однак оптимізація потоку електроенергії не проводиться.

Оптимізація інженерних проблем передбачає три кроки. В основі першої частини лежить математична постановка задачі, що розв'язується. На даний момент ми знаходимося в різних випадках оптимізації, які пояснюються в літературі [28]. Друга частина полягає у виборі середовища програмування та моделюванні рівнянь для цього конкретного середовища. Зараз існує багато різних типів мов, і тому цікаво провести порівняння між ними, і це порівняння

робиться в літературі [29]. Нарешті, є вибір розв'язувача, який виконуватиме розв'язування та повертатиме значення цільової функції. Існує багато розв'язувачів, найпоширенішими з яких є Gurobi, GLPK, CPLEX та IPOPT.

Що стосується оптимізації перевантажених мереж розподілу електроенергії, це пояснюється в [30], але джерело гнучкості не використовується. Рецептури OPF були проаналізовані в [31, 32, 33]. Одним з них є неопуклий OPF. Це означає, що знайти глобальне оптимальне рішення не можна гарантувати. Щоб вирішити цю проблему, для радіальних мереж було вивчено опуклий конус другого порядку (SOCP-OPF) [34, 35, 36]. У той час як [34, 35] вивчають властивості складу SOCP-OPF, ref. [36] включає в модель фотоелектричні та дизельні генератори.

Метою цього дослідження є аналіз двох формулювань моделі оптимального потоку потужності, які використовуються в літературі: (i) так звана модель інжекції шини (BIM), невикукла, нелінійна модель оптимального потоку потужності, і (ii) модель розгалуженого потоку (BFM), розслаблена опукла конічна задача другого порядку. В роботі проведена порівняльна оцінка BIM і BFM з точки зору оптимізації втрат у мережі, зосереджуючись на таких показниках, як час виконання та мінімізація втрат. Крім того, ці моделі можуть забезпечити оптимальне планування заряду батареї на основі конкретної ємності батареї та місця розташування. Метою цього планування батареї є зменшення навантаження в розподільних лініях при перевищенні попередньо визначеного порогу, що забезпечує рівень безпеки розподільних мереж.

Крім того, у роботі дана оцінка запропонованих моделей на прикладі реального управління перевантаженнями. Наша мета полягає в тому, щоб запропонувати цінну інформацію та рішення для проектування систем розподілу електроенергії, які є надійними та стійкими для сталого майбутнього.

2.2. Методика дослідження

Методологія, показана на рисунку 2.1, описує дві різні моделі оптимізації для планування акумуляторів у мережі розподілу електроенергії. Ця методологія враховує параметри мережі, профілі генерації, профілі попиту та параметри батареї для створення та виконання аналізу оптимізації.

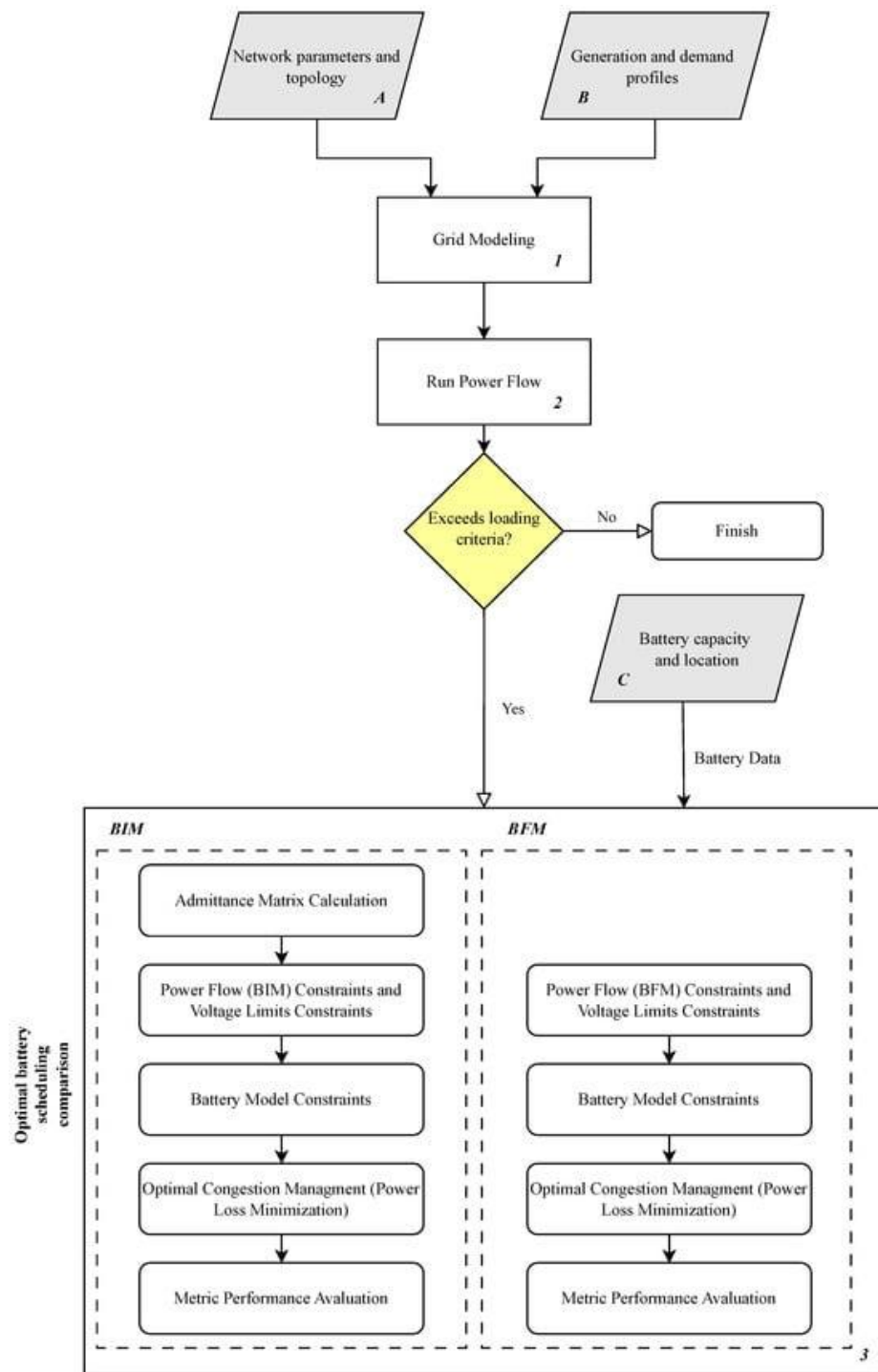


Рисунок 2.1. – Блок-схема методології дослідження

Модуль 1 — Моделювання розподільчої мережі: за допомогою Pandapower, програмного забезпечення на основі Python, цей модуль будує детальну модель розподільчої мережі. Цей процес імітує реалістичну мережеву поведінку та взаємодію.

Модуль 2 — Симуляція потоку потужності: за допомогою стандартного методу Ньютона-Рафсона цей модуль виконує моделювання потоку потужності для визначення критичних показників, таких як потоки потужності в розгалуженнях, відхилення напруги на кожній шині та навантаження трансформатора. Це моделювання визначає потенційні перевантаження мережі та області для вдосконалення.

Оцінка критеріїв навантаження: невід’ємною частиною методології є оцінка мережевих активів за попередньо визначеними пороговими значеннями DSO. Перевищення цих порогових значень запускає реалізацію оптимального графіка заряджання/розряджання батареї, щоб зменшити ризик перевантаження та підвищити надійність мережі.

Модуль 3 — Порівняння моделі оптимізації: цей модуль передбачає порівняльний аналіз двох моделей оптимізації: моделі на основі поточного розгалуження (BIM) і моделі потоку розгалуження (BFM). Основною метою є мінімізація загальних втрат у мережі, дотримуючись наступних критеріїв: Модель оптимізації BIM: ця модель формулює матрицю пропуску, що інкапсулює рівняння потоку електроенергії та мережеві обмеження, включаючи обмеження моделі батареї та оптимальні стратегії управління перевантаженнями. Оцінка зосереджується на таких показниках ефективності, як час виконання та ефективність мінімізації втрат. Модель оптимізації BFM: на відміну від BIM, BFM не включає матрицю пропускну здатності, але моделює рівняння потоку електроенергії та мережеві обмеження, а також обмеження моделі батареї та оптимальне управління перевантаженнями. Оцінка також підкреслює ефективність у часі виконання та зменшенні втрат. Нарешті, проблема оптимізації вирішується за допомогою внутрішнього вирішувача точок, об’єднаного гілкою та прив’язаного для відстеження бінарних змінних.

2.3. Рецепттури ОБТК

2.3.1. Формулювання моделі впорскування шини

Розрахунок змінних в електричній мережі зазвичай виконується з використанням потоку навантаження. Цей метод дозволяє отримати потужність, що протікає через мережу, і різні значення напруги або струму в кожній точці мережі. Однак робота мережі передбачає необхідність задовольнити певні вимоги та обмеження безпеки. Таким чином, завдання експлуатації мережі полягає в тому, щоб задовольнити цю вимогу, одночасно дотримуючись обмежень мережі та мінімізуючи певну цільову функцію. Ця операція виходить шляхом застосування задачі оптимізації на основі рівнянь потоку навантаження, яка називається оптимальним потоком потужності.

- **Матриця пропуску**

Рівняння моделі інжекції шини (BIM) потребують отримання кількох характеристик мережі. Зокрема, спочатку необхідно отримати матрицю адмітансу сітки, щоб провести всі розрахунки. Матриця пропуску дуже добре відома, але в цій роботі згадується, що її основа є ключовою для розробки розглянутої моделі.

Розмір матриці $n \times n$, де n — кількість вузлів у мережі. Для його розрахунку необхідно розрізняти діагональні елементи матриці та недіагональні елементи. Метод, якого слід дотримуватися для кожного:

(i) Діагональні елементи (Y_{ii}): дорівнює сумі всіх пропусків, підключених до шини i ($i = 1, \dots, n; i=1, \dots, n$).

(ii) Елементи поза діагоналлю (Y_{ij}): дорівнює пропускну здатності між шинами i та j ($i, j = 1, \dots, n; i \neq j, j = 1, \dots, n; i \neq j$) змінив знак.

Це дає матрицю пропускну здатності Y_{bus} . Це також можна виразити як суму двох матриць, дійсну частину (G_{bus}) та уявну частину (B_{bus}) з Y_{bus} , як показано в рівнянні (2.1). Ця форма використовується в цій моделі, оскільки вона дозволяє працювати лише з реальними значеннями, що робить розрахунки набагато простішими.

$$[Y_{bus}] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} = [G_{bus}] + j[B_{bus}] \quad (2.1)$$

• Формулювання ВІМ

По-перше, індекси, пов'язані зі змінними або параметрами, показані в таблиці 2.1. Вони більш точно вказують, до якого конкретного елемента відноситься змінна або параметр. Таблиця 2.2 показує номенклатуру змінних, що використовуються в цьому формулюванні, а таблиця 2.3 описує необхідні параметри моделі. Вони мають фіксоване значення, яке визначається самою характеристикою мережі.

Таблиця 2.1. – Показники для моделі ВІМ

Індекс	Визначення
$n = (1 \dots N)$	Вузли мережі (слабкий вузол: $n = 1$)
$m = (1 \dots M)$	Вузли мережі
Φ	Вузли мережі, де знаходяться батареї
L	Лінії (n, m) з'єднують вузли n і m
T	Періоди моделювання

Таблиця 2.2. – Змінні моделі ВІМ

змінна	Визначення
V_{nt}	Напруга у вузлі n у момент часу t
δ_{nt}	Кут напруги у вузлі n у момент часу t
P_{nt}	Активна потужність, що вводиться в мережу через вузол n у момент часу t
Q_{nt}	Реактивна потужність, подана в мережу через вузол n у момент часу t
PG_{nt}	Активна потужність, що генерується у вузлі n у момент часу t
QG_{nt}	Реактивна потужність, вироблена у вузлі n у момент часу t
P_{nmt}	Активна потужність, передана від вузла n до вузла m у момент часу t
Q_{nmt}	Реактивна потужність, передана від вузла n до вузла m у момент часу t

Таблиця 2.3. – Параметри моделі ВІМ

Параметр	Визначення
Pd_{nt}	Активна потужність, споживана у вузлі n у момент часу t
Qd_{nt}	Реактивна потужність, споживана у вузлі n у момент часу t
G_{nm}	Дійсна частина матриці адмітансу між вузлами n і m
B_{nm}	Уявна частина матриці адмітансу між вузлами n і m
$g_{l\ n\ m}$	Дійсна частина матриці адмітансу між вузлами n і m по лінії l
$b_{l\ n\ m}$	Уявна частина матриці адмітансу між вузлами n і m по лінії l
V_{slack}	Напруга на провисаючому вузлі
$S_{max\ nm}$	Максимальна повна потужність на лінії, що з'єднує вузли n і m
LP_{max}	Максимальний відсоток завантаження рядка

• Рівняння OPF-ВІМ

Формулювання ВІМ є найпоширенішим формулюванням і в основному базується на змінних, пов'язаних із вузлом. Баланси потужностей у вузлах показані в рівняннях (2.2) і (2.3).

$$P_{nt} = V_{nt} \sum_{m=1}^n (V_{mt} (G_{nm} \cdot \cos(\delta_{nt} - \delta_{mt}) + B_{nm} \cdot \sin(\delta_{nt} - \delta_{mt}))) \quad \forall t \in T; \forall n \in N; (2.2)$$

$$Q_{nt} = V_{nt} \sum_{m=1}^n (V_{mt} (G_{nm} \cdot \sin(\delta_{nt} - \delta_{mt}) - B_{nm} \cdot \cos(\delta_{nt} - \delta_{mt}))) \quad \forall t \in T; \forall n \in N; (2.3)$$

Ця потужність пов'язана з генерацією та попитом відповідно до рівнянь (2.4) і (2.5). Таким чином, потужність, що вводиться в мережу, вважається позитивною, а споживана – негативною.

$$P_{nt} = PG_{nt} - Pd_{nt} \quad \forall t \in T; \forall n \in N; (2.4)$$

$$Q_{nt} = QG_{nt} - Qd_{nt} \quad \forall t \in T; \forall n \in N; (2.5)$$

Щоб вирішити потік навантаження, необхідно зафіксувати напругу та кут конкретного вузла. Як зазвичай, обраний вузол Slack відповідає підключенню до високовольтного трансформатора. Модуль напруги та його кут встановлюються згідно (2.6):

$$V_{nt} = V_{slack} \quad \forall t \in T; n = 1; (2.6)$$

$$n_t = 0 \quad \forall t \in T; n = 1; \quad (2.7)$$

Основна мета цієї оптимізації полягає в тому, щоб лінії не перевищували певний відсоток навантаження. Щоб цього досягти, необхідно отримати змінні, що стосуються ліній, а не тільки вузлів. У цьому формулюванні, як видно з рівнянь (2.8) і (2.9), потужності між вузлами обчислюються, щоб накласти на них обмеження, таким чином обмежуючи їхнє навантаження.

$$P_{nmt} = V_{nt}(g_{nml}V_{nt} - g_{nml}V_{mt} \cos(\delta_{nt} - \delta_{mt}) + b_{nml}V_{mt} \sin(\delta_{nt} - \delta_{mt})) \quad \forall t \in T; \forall (n, m) \in L; \quad (2.8)$$

$$Q_{nmt} = -V_{nt}(b_{nml}V_{nt} + b_{nml}V_{mt} \cos(\delta_{nt} - \delta_{mt}) + g_{nml}V_{mt} \sin(\delta_{nt} - \delta_{mt})) \quad \forall t \in T; \forall (n, m) \in L; \quad (2.9)$$

Для моделі ВІМ обмеження визначається максимальною видимою потужністю лінії, тому рівняння (2.10)

$$P_{nmt}^2 + Q_{nmt}^2 = (LP_{\max} \cdot S_{\max m})^2 \quad \forall t \in T; \forall (n, m) \in L; \quad (2.10)$$

2.3.2. Формулювання моделі потоку Браха

Конусна задача другого порядку (SOCP) — опукла оптимізаційна задача, яка веде до глобальних оптимальних рішень. Щоб отримати SOCP за допомогою формулювання ВІМ і знайти глобально оптимальне рішення, ми робимо послаблення рівнянь, яке пояснюється нижче.

- **Формулювання моделі потоку гілок**

Індекси цієї моделі додають ще два елементи, які враховують, чи є вузли джерелом або пунктом призначення лінії. Це видно з таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. – Показники моделі BFM

Індекс	Визначення
H	Вузли мережі (слабкий вузол: $n = 1$)
L	Лінії(n, m) перехід від вузла n (початку) до вузла m (призначення)
$u(n)$	Вузли $m \in N$ які є джерелом вузла $n \in N$
$d(n)$	Вузли $m \in N$ які є місцем призначення вузла $n \in N$
Φ	Вузли мережі, де знаходяться батареї
T	Періоди моделювання

У цій моделі напруга шини та лінійний струм зводяться в квадрат, а кут напруг не враховується, як можна побачити в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5. – Змінні моделі BFM

змінна	Визначення
v_{nt}	Квадрат напруги у вузлі n у момент часу t
i_{nmt}	Квадрат струму, що протікає між вузлом n і m у момент часу t
P_{nt}	Активна потужність, введена у вузол n у момент часу t
Q_{nt}	Реактивна потужність, подана у вузол n у момент часу t
PG_{nt}	Активна потужність, що генерується у вузлі n у момент часу t
QG_{nt}	Реактивна потужність, вироблена у вузлі n у момент часу t
P_{nmt}	Активна потужність, передана від вузла n до вузла m у момент часу t
Q_{nmt}	Реактивна потужність, передана від вузла n до вузла m у момент часу t

У моделі BFM не використовується матриця пропускну́ї здатності, а опір і імпеданс кожної лінії використовуються безпосередньо. Нижче наведено таблицю 2.6 із параметрами.

Таблиця 2.6. – Параметри моделі BFM

Параметр	Визначення
r_{mn}	Опір лінії від вузла n до m
x_{mn}	Реактивний опір лінії від вузла n до m
$v_{\text{провисання}}$	Квадрат напруги у вузлі провисання
Pd_{nt}	Активна потужність, споживана у вузлі n у момент часу t
Qd_{nt}	Реактивна потужність, споживана у вузлі n у момент часу t
$i_{max_{nm}}$	Максимальний квадрат струму в лінії від вузла n до m
LP_{max}	Максимальний відсоток завантаження рядка

• Рівняння OPF-BFM

Друге формулювання оптимального потоку навантаження називається моделлю потоку гілок (BFM). На відміну від попередньої, ця модель використовує в основному лінійні змінні замість вузлових змінних і призначена для радіальних мереж.

Баланси активної та реактивної потужності вузла провисання показані на (2.11) та (2.12) відповідно. Це відрізняється від інших тим, що він завжди буде вихідним вузлом ліній і ніколи вузлом призначення. Баланс на решті вузлів детально описано в (2.13) і (2.14). Це враховує втрати потужності, спричинені опором та індуктивністю ліній. Споживання на вузлі дорівнює вхідній потужності мінус вихідна потужність.

$$P_{nt}^G = \sum_{m \in d(n)} P_{nmt} \quad \forall t \in T; n = 1; \quad (2.11)$$

$$Q_{nt}^G = \sum_{m \in d(n)} Q_{nmt} \quad \forall t \in T; n = 1; \quad (2.12)$$

$$P_{nt} = \sum_{m \in u(n)} (P_{nmt} - r_{mn} \cdot i_{mnt}) - \sum_{m \in d(n)} P_{nmt} \quad \forall t \in T; \forall n \in N \setminus \{1\}; \quad (2.13)$$

$$Q_{nt} = \sum_{m \in u(n)} (Q_{nmt} - x_{mn} \cdot i_{mnt}) - \sum_{m \in d(n)} Q_{nmt} \quad \forall t \in T; \forall n \in N \setminus \{1\}; \quad (2.14)$$

Рівняння споживання показано в рівняннях (2.15) і (2.16). Вони представляють очікуваний попит мінус потужність, вироблену на цьому вузлі.

На відміну від моделі BFM, позитивна потужність вважається у вузлі, якщо вона споживається, а негативна вводиться в мережу.

$$P_{nt} = Pd_{nt} - PG_{nt} \quad \forall t \in T; \forall n \in N; \quad (2.15)$$

$$Q_{nt} = Qd_{nt} - QG_{nt} \quad \forall t \in T; \forall n \in N; \quad (2.16)$$

Падіння напруги виражається відповідно до (2.17). Як і в попередньому випадку, напруга провисання встановлюється на певне значення. Ці напруги відносяться до квадрату напруги шини, так само як струм також є квадратом лінійного струму. Ця зміна змінної дає змогу отримати лінійні рівняння, полегшуючи їх обчислення. Крім того, слід зазначити, що в цьому формулюванні матриця пропускну здатності не потрібна.

$$v_{mt} = v_{nt} - 2(r_{nm}P_{nmt} + x_{nm}Q_{nmt}) + i_{nmt}(r_{nm}^2 + x_{nm}^2) \quad \forall t \in T; \forall n \in N; \forall m \in M; \quad (2.17)$$

$$v_{nt} = v_{slack} \quad \forall t \in T; n = 1 \quad (2.18)$$

Потужність, що протікає між вузлами, виражається відповідно до (2.19). Однак це обмеження явно нелінійне, а також невикукле. Це проблема для її вирішення, оскільки це ускладнює отримання глобального оптимуму проблеми. Щоб її вирішити, обмеження пом'якшується, перетворюючись на (20), отримуючи опукле обмеження.

$$i_{nmt} = \frac{P_{nmt}^2 + Q_{nmt}^2}{v_{nt}} \quad \forall t \in T; \forall n \in N; \forall m \in d(n); \quad (2.19)$$

$$i_{nmt} \cdot v_{nt} \geq P_{nmt}^2 + Q_{nmt}^2 \quad \forall t \in T; \forall n \in N; \forall m \in d(n); \quad (2.20)$$

Це послаблення, однак, може призвести до фізично безглузлого результату, якщо рівність не виконується. З цієї причини після виконання моделювання необхідно перевірити, чи відповідає отриманий результат обмеженню рівності. Якщо це не так, цільову функцію необхідно змінити та виконати ітераційний процес.

Для моделі BFM відповідно до відсотка максимально допустимого навантаження квадрат струму, що протікає по лініях, також обмежений відповідно до виразу (2.21).

$$i_{nmt} = (i_{nm}^{max} \cdot LP^{max})^2 \quad (2.21)$$

$$\forall t \in T; \forall n \in N; \forall m \in d(n);$$

2.3.3. Модель батареї

Батареї мають унікальну здатність контролювати потоки енергії та поглинати їх. Це дозволяє динамічно регулювати навантаження на лінію та ефективно перерозподіляти енергію. Такі проблеми, як перевантаження мережі, інтеграція переривчастих відновлюваних джерел енергії та підвищення стабільності та якості електропостачання, можна вирішити, використовуючи цю можливість.

- **Склад батареї**

Змінні батареї однакові в обох моделях і обговорюються в таблиці 2.7:

Таблиця 2.7. – Змінні батареї

змінна	Визначення
$S_{OC_{nt}}$	Стан заряду батареї у вузлі n у момент часу t (невід'ємна змінна)
P_{nt}^{Dis}	Потужність розряду батареї у вузлі n у момент часу t (невід'ємна змінна)
P_{nt}^{Ch}	Потужність зарядки батареї у вузлі n у момент часу t (невід'ємна змінна)
α_{nt}	Двійкова змінна, що вказує, чи заряджається акумулятор у вузлі n у момент часу t

Згодом також відображаються параметри, пов'язані з акумулятором, які, як і змінні, однакові для обох моделей. Нижче наведено таблицю 2.8 із параметрами.

Таблиця 2.8. – Параметри батареї

Параметр	Визначення
η	Ефективність батареї
C_n	Ємність батареї у вузлі n
$SOC_{min,t}$	Мінімальний стан заряду батареї у вузлі n
$SOC_{max,t}$	Максимальний стан заряду батареї у вузлі n
$PDis_{n,Max}$	Максимальна потужність розряду батареї у вузлі n
$PCh_{n,Max}$	Максимальна потужність зарядки батареї у вузлі n

• Рівняння батареї

Далі моделюються джерела гнучкості, в даному випадку батареї. Ступінь заряду кожної батареї (SOC) розраховується відповідно до (2.22). Це враховує продуктивність батареї, яка створює втрати потужності під час взаємодії з мережею.

$$SOC_{nt} = \frac{P_{nt}^{Ch} \cdot \Delta T \cdot \eta}{C_n} - \frac{P_{nt}^{Dis} \cdot \Delta T}{C_n \cdot \eta} + SOC_{n(t-1)} \quad \forall t \in T \setminus \{1\}; \forall n \in F; \quad (2.22)$$

Заряджання батареї обмежено робочим діапазоном відповідно до (2.23), щоб збільшити життєвий цикл батареї, оскільки це дозволяє уникнути повних циклів заряджання/розряджання. Початковий стан заряду кожної батареї показано на (2.24).

$$SOC_n^{min} \leq SOC_{nt} \leq SOC_n^{max} \quad \forall t \in T; \forall n \in F; \quad (2.23)$$

$$SOC_{nt} = SOC_n^{ini} \quad \text{si } t = 1; \quad \forall n \in F; \quad (2.24)$$

Потужність заряджання та розряджання батареї обмежена відповідно до (2.25) та (2.26). Це забезпечує постійний заряд або розряд акумулятора.

$$P_{nt}^{Dis} \cdot (1 - \alpha_{nt}) \leq P_{n,Max}^{Dis} \quad \forall t \in T; \forall n \in F; \quad (2.25)$$

$$P_{nt}^{Ch} \cdot \alpha_{nt} \leq P_{n,Max}^{Ch} \quad \forall t \in T; \forall n \in F; \quad (2.26)$$

Потужність, що генерується у вузлах з гнучкістю, показана в (2.27) і дорівнює потужності розряду мінус потужність навантаження.

$$P_{nt}^G = P_{nt}^{Dis} - P_{nt}^{Ch} \quad \forall t \in T; \forall n \in F; \quad (2.27)$$

2.3.4. Функція об'єкта

Цільова функція є останнім рівнянням, яке необхідно визначити в задачі оптимізації, спрямованої на мінімізацію втрат мережі. Таким чином, у першій моделі цільова функція, яку потрібно мінімізувати, виражається як (2.28):

$$Obj = \sum_{(n,T)} P_{nt} \quad (2.28)$$

З іншого боку, у другій моделі цільова функція мінімізована у виразі (2.29).

$$Obj = \sum_{(n,m,T)} r_{mn} \cdot i_{nmt} \quad (2.29)$$

Можна побачити, що в обох функціях обчислюється те саме, але різними способами через різні формулювання моделі. Однак це не впливає на результат. В обох моделях втрати мінімізуються або законом Ома, або основними формулами для мереж електропередачі.

2.4. Кейс-стаді

Мережа, використана в аналізі цього дослідження, є 116-вузловою іспанською розподільчою мережею з номінальною напругою 25 кВ, а номінальна потужність на першій ділянці (від вузла 1 до вузла 2) становить 10,5 МВА. Він складається з магістралі з двома гілками, як показано на рисунку 2.2. З характеристиками та параметрами мережі можна ознайомитись у таблиці.

Таблиця А1. – Характеристика мережі кейс-стаді

від	до	Довжина (км)	r ($\Omega \cdot$ км)	x ($\Omega \cdot$ км)	від	до	Довжина (км)	r ($\Omega \cdot$ км)	x ($\Omega \cdot$ км)
0	1	0,125	0,078	0,1050	58	59	0,126	0,078	0,1050
1	2	0,201	0,078	0,1020	59	60	0,074	0,078	0,1050
2	3	0,197	0,078	0,1020	60	61	0,019	0,078	0,1050
3	4	0,133	0,078	0,1050	61	62	0,027	0,078	0,1050
4	5	0,132	0,078	0,1020	62	63	0,063	0,078	0,1050
5	6	0,135	0,078	0,1020	63	64	0,109	0,078	0,1050
6	7	0,534	0,078	0,1050	64	65	0,008	0,078	0,1050
7	8	0,802	0,078	0,1050	65	66	0,034	0,078	0,1050
8	9	0,061	0,125	0,1130	66	67	0,131	0,078	0,1050
9	10	0,365	0,078	0,1020	67	68	0,046	0,078	0,1050
10	11	0,007	0,078	0,1020	68	69	0,02	0,078	0,1050
11	12	0,021	0,078	0,1020	69	70	0,016	0,078	0,1050
12	13	0,378	0,078	0,1050	70	71	0,017	0,078	0,1050
13	14	1,115	0,078	0,1020	71	72	0,086	0,078	0,1050
14	15	0,019	0,078	0,1050	72	73	0,045	0,078	0,1050
15	16	0,086	0,078	0,1050	73	74	0,006	0,078	0,1050
16	17	0,154	0,078	0,1050	74	75	0,04	0,078	0,1020
17	18	0,019	0,078	0,1050	75	76	0,053	0,078	0,1050

17	18	0,019	0,078	0,1050	75	76	0,053	0,078	0,1050
18	19	0,02	0,078	0,1050	76	77	0,091	0,078	0,1050
19	20	0,13	0,078	0,1050	77	78	0,052	0,078	0,1050
20	21	0,053	0,078	0,1050	78	79	0,045	0,078	0,1020
21	22	0,051	0,078	0,1050	79	80	0,044	0,078	0,1020
22	23	0,088	0,078	0,1050	80	81	0,053	0,078	0,1020
23	24	0,31	0,078	0,1020	81	82	0,055	0,078	0,1050
24	25	0,31	0,078	0,1020	82	83	0,019	0,078	0,1050
25	26	0,001	0,078	0,1020	83	84	0,168	0,078	0,1050
26	27	0,05	0,078	0,1050	84	85	0,01	0,125	0,1090
27	28	0,047	0,078	0,1050	85	86	0,002	0,125	0,1090
28	29	0,064	0,078	0,1020	86	87	0,013	0,078	0,1020
29	30	0,067	0,078	0,1050	87	88	0,006	0,078	0,1020
30	31	0,02	0,078	0,1050	88	89	0,018	0,078	0,1020
31	32	0,04	0,078	0,1020	89	90	0,03	0,078	0,1020
32	33	0,041	0,078	0,1020	90	91	0,075	0,125	0,1130
33	34	0,078	0,078	0,1050	91	92	0,056	0,125	0,1130
34	35	0,013	0,078	0,1050	49	93	0,16	0,125	0,1090
35	36	0,04	0,078	0,1050	93	94	0,073	0,078	0,1020
36	37	0,01	0,078	0,1050	94	95	0,036	0,193	0,1330
37	38	0,009	0,078	0,1050	95	96	0,004	0,125	0,1130
38	39	0,334	0,078	0,1050	96	97	0,003	0,193	0,1330

39	40	0,041	0,078	0,1020	97	98	0,127	0,193	0,330
40	41	0,047	0,078	0,1020	98	99	0,006	0,125	0,1130
41	42	0,504	0,078	0,1050	99	100	0,055	0,193	0,1330
42	43	0,07	0,078	0,1050	100	101	0,017	0,078	0,1050
43	44	0,015	0,078	0,1050	101	102	0,011	0,078	0,1050
44	45	0,011	0,078	0,1050	102	103	0,105	0,193	0,1330
45	46	0,03	0,078	0,1050	103	104	0,049	0,078	0,1050
46	47	0,059	0,078	0,1050	104	105	0,053	0,078	0,1050
47	48	0,096	0,078	0,1050	105	106	0,033	0,193	0,1330
48	49	0,057	0,078	0,1050	106	107	0,04	0,125	0,1130
49	50	0,104	0,078	0,1050	107	108	0,009	0,125	0,1130
50	51	0,073	0,078	0,1050	108	109	0,454	0,193	0,1330
51	52	0,176	0,078	0,1050	109	110	0,121	0,193	0,1330
52	53	0,014	0,078	0,1050	110	111	0,013	0,125	0,1130
53	54	0,102	0,078	0,1050	111	112	0,015	0,125	0,1130
54	55	0,102	0,078	0,1050	112	113	0,093	0,193	0,1330
55	56	0,11	0,078	0,1050	113	114	0,026	0,078	0,1050
56	57	0,049	0,078	0,1050	114	115	0,031	0,078	0,1050
57	58	0,04	0,078	0,0970	115	116	0,123	0,193	0,1330

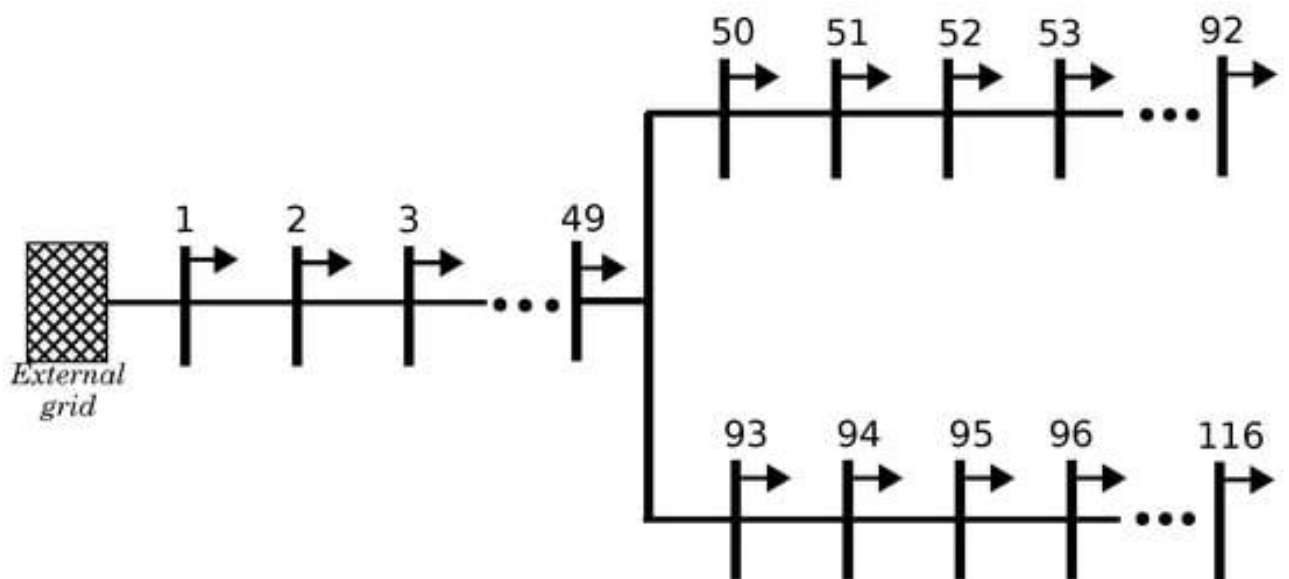


Рисунок 2.2. – Дослідження структури та топології розподільчої мережі

Зосереджуючись на даних попиту на енергію в мережі, вони розподіляються між різними вузлами. Попит на кожен вузол мережі можна побачити на рисунку 2.3 . На цьому рисунку метою є показати поведінку цих вузлів і побачити шкалу величини споживання, яка коливається від 0 до 0,6.

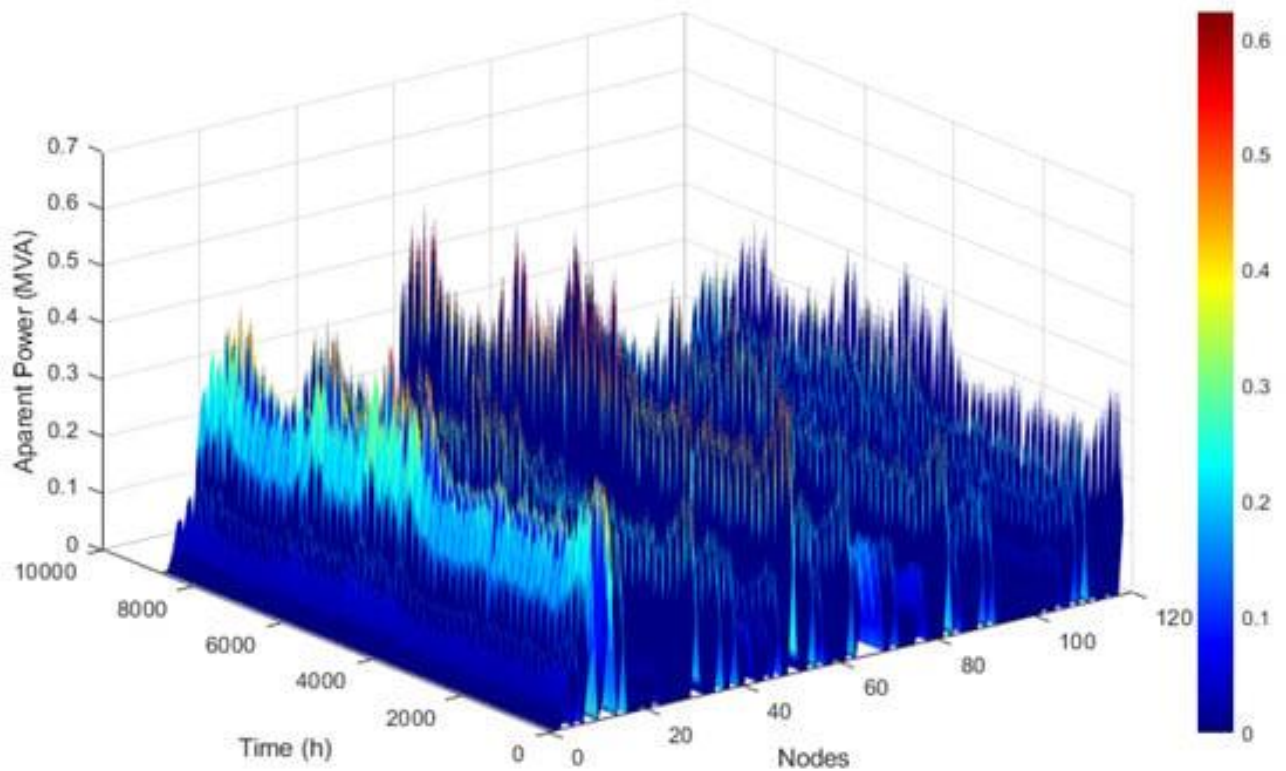


Рисунок 2.3. – Потужність, щогодини споживається кожним вузлом мережі протягом року

З іншого боку, сукупний попит на нестабільному вузлі такої мережі за рік можна побачити на рисунку 2.4 . Видно, що є деякі піки попиту на 9 і 10 МВА. Проте попит залишається відносно постійним протягом року на рівні приблизно 4 МВА базової та 7 МВА пікової. Слід зазначити, що бувають випадки, коли попит дорівнює 0, і це нібито пов'язано з днями технічного обслуговування мережі.

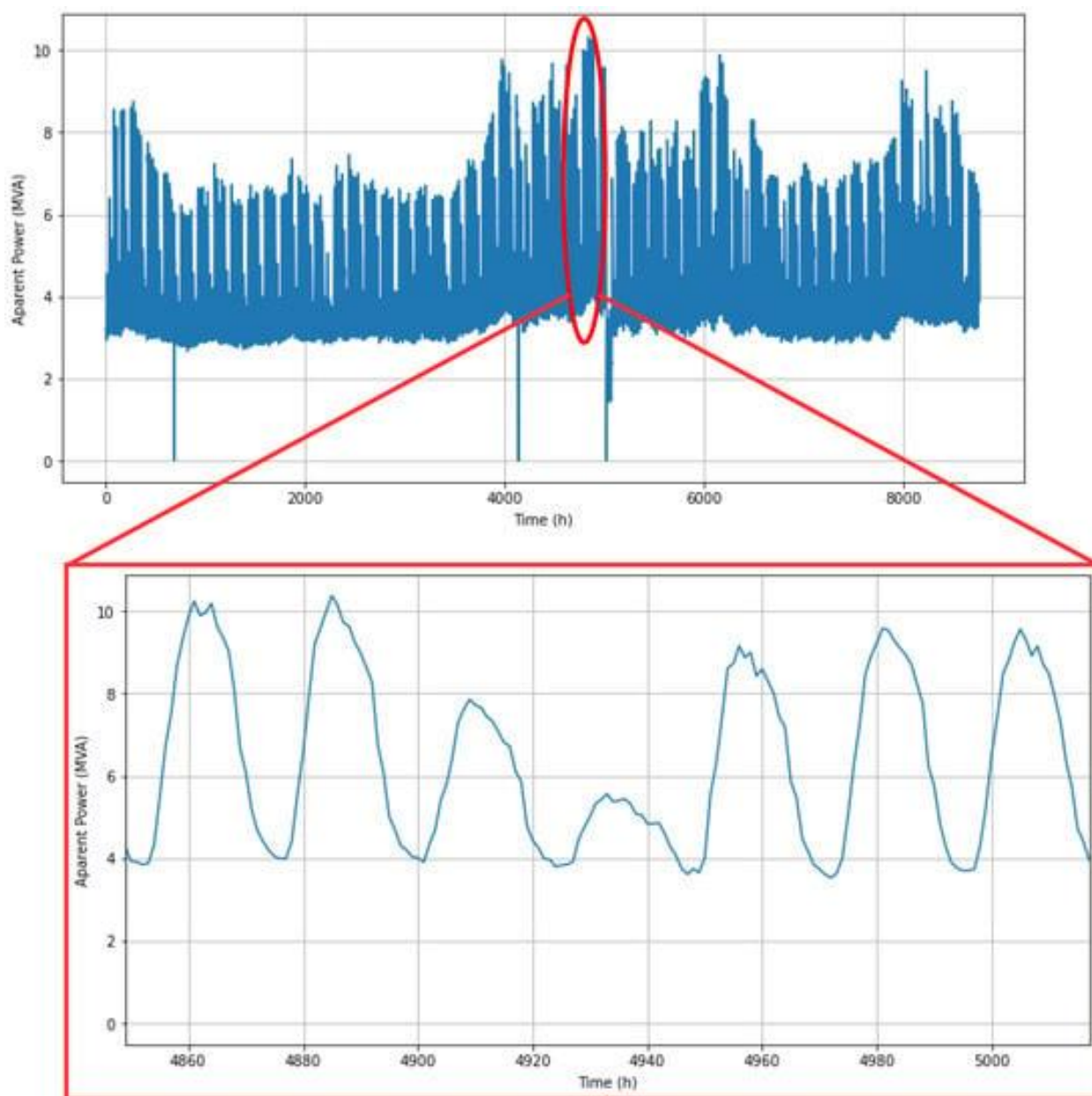


Рисунок 2.4. – Уявна потужність, агрегована до слабого вузла протягом року, і масштаб тижня з найбільшим споживанням за рік

Зверніть увагу, що якщо ми подивимося на Рисунок 4 у збільшеному вигляді, ми можемо спостерігати періодичність у поведінці споживання, де споживання вище протягом тижня, ніж у вихідні дні.

Коли всі дані відомі, розроблені оптимальні моделі потоку електроенергії можна аналізувати та перевіряти.

2.5. Аналіз результатів дослідження

Отримані результати перевірено за допомогою інструменту розрахунку потоку навантаження (Matpower), який підтверджує, що результати відповідають рівнянням потоку потужності.

2.5.1. Аналіз перевантаженості лінії в початковій ситуації

Наразі аналізована мережа не має джерела гнучкості. У різні періоди високого попиту виконується низка потоків електроенергії, щоб перевірити, чи потрібні мережі механізми пом'якшення перевантаження. Зокрема, найцікавіший аналіз зосереджений на тижні з найвищим споживанням з 202 по 209 день, що відповідає 22 по 28 липня. Загальний результат для всіх ліній можна побачити на рисунку 2.5.

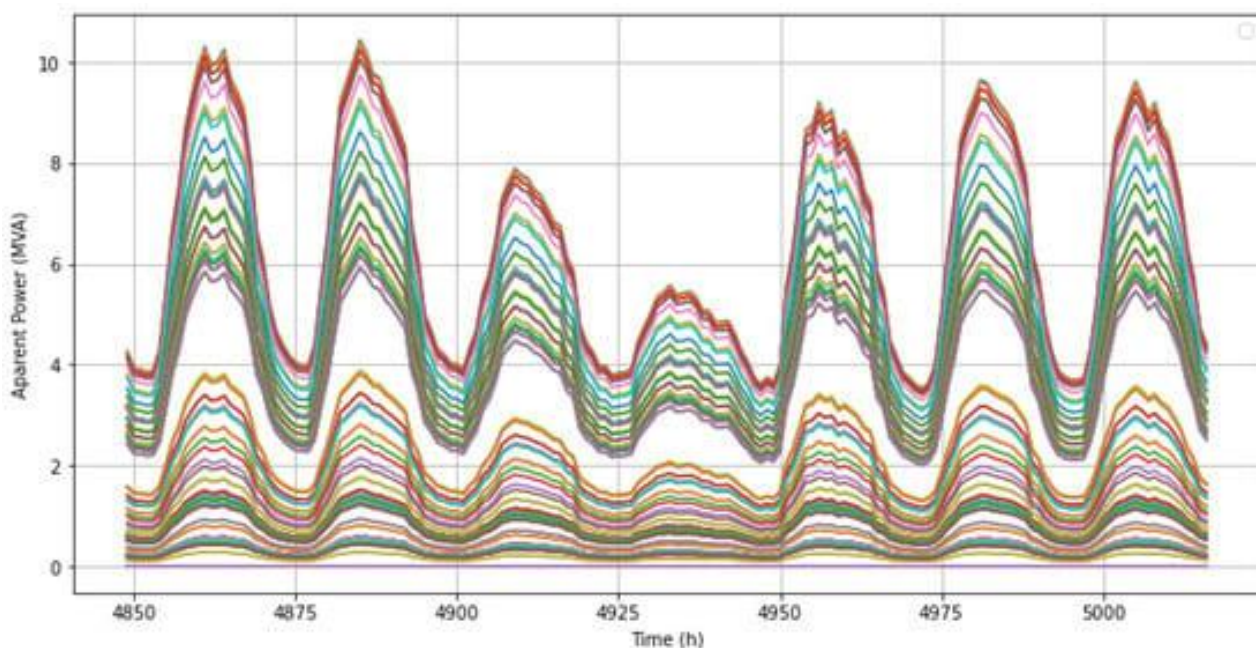


Рисунок 2.5. – Результат потоку потужності. Через кожну лінію мережі проходить повна потужність

Оскільки наведений вище Рисунок може бути важко інтерпретувати, як приклад, результат для найбільш перевантаженої лінії показано на рисунку 6 :

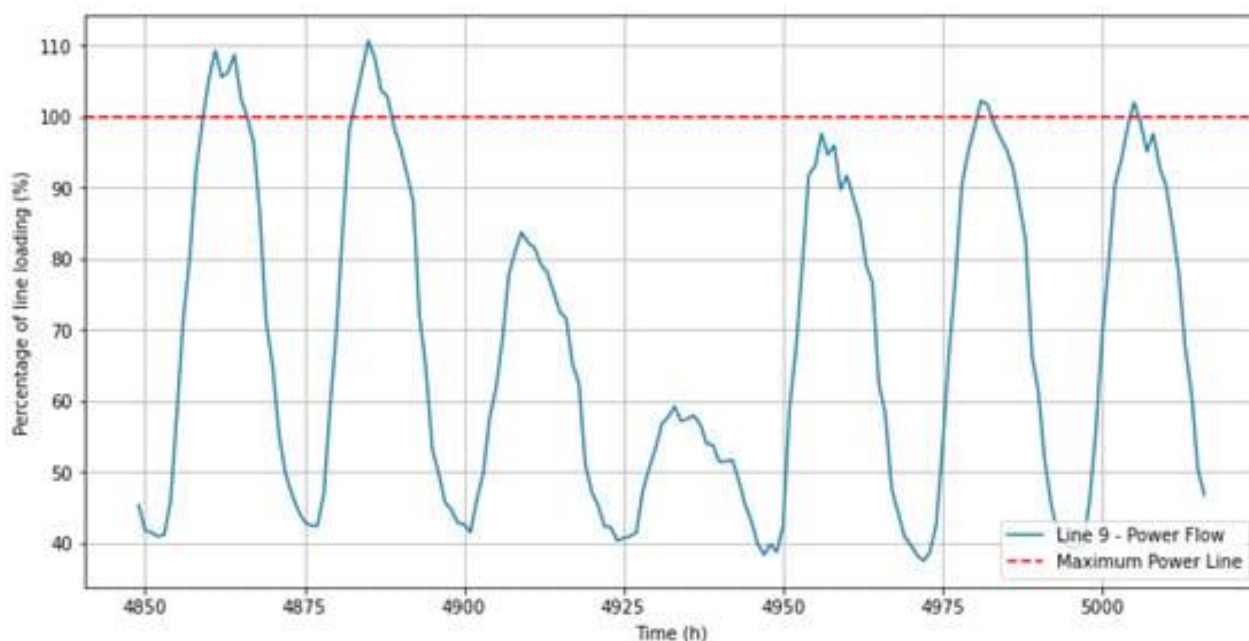


Рисунок 2.6. – Уявна потужність, що протікає через лінію 9 мережі під час передачі потужності

Видно, що лінія 9 мережі перевантажена до чотирьох разів. Відповідно, оператор системи розподілу (DSO) оцінює встановлення джерела гнучкості на основі батареї у вузлі 49, щоб уникнути перевантаження мережі.

2.5.2. Оптимальна робота батареї для управління перевантаженням мережі

Запропоновану батарею планується встановити у вузлі 49, оскільки конфігурація мережі є біфуркаційною мережею, де вузол 49 є точкою, де вона розділяється на дві частини. Це оптимальний вузол, щоб уникнути перевантаження. На рисунку 2.5 показано, як, починаючи з однієї лінії, розподіл потужності, що циркулює в мережі, значно падає, і ця зміна відбувається в цьому вузлі, де є біфуркація.

Характеристики батареї наведені в таблиці 2.9 . В якості початкової гіпотези передбачається початковий стан заряду 50%, оскільки це не дуже високе і цілком ймовірне значення.

Таблиця 2.9. – Параметри батареї

Параметр	Визначення
Початковий заряд акумулятора	50%
Ємність акумулятора	35 МВт
Ефективність батареї	90%
Максимальна потужність акумулятора	3 МВт

З появою батареї ми можемо почати розвантажувати мережу. Ми обмежимо максимальну повну потужність, яка може циркулювати через лінію, до 90%. Обмеження встановлено на рівні 90% з міркувань безпеки оператора системи розподілу. Це пояснюється тим, що прогнози, які вони роблять, можуть бути помилковими, таким чином гарантуючи, що мережа завжди працює правильно.

Для оптимальної роботи батареї та уникнення перевантажень виконується оптимальний потік потужності, описаний у роботі. Результат роботи батареї показано на рисунку 2.7.

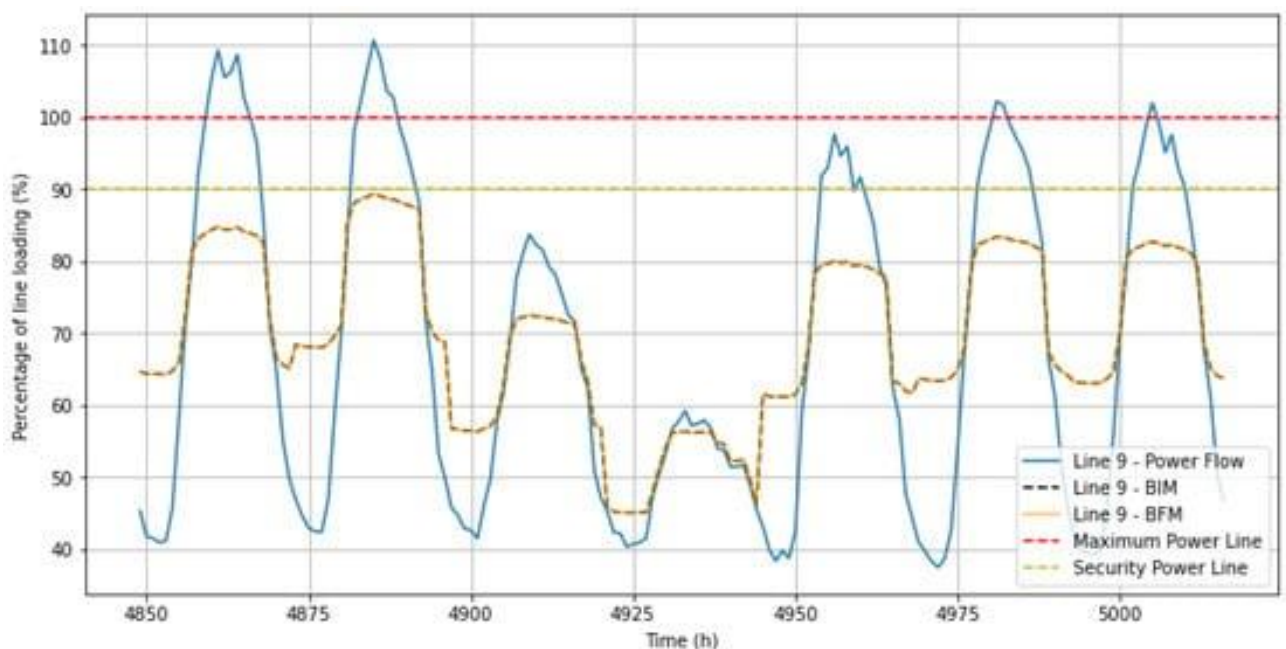


Рисунок 2.7. – Відсоткове навантаження лінії мережі 9 для кожної досліджуваної моделі (Power Flow, BIM і BFM) і обмеження максимальної потужності та безпеки DSO

Можна спостерігати, що періоди перевантажень на лінії 9 зникли і що в цілому мережа працює більш плавно, тобто її відсоток навантаження нижчий у випадках, коли використовуються оптимальні потоки електроенергії, завдяки використанню батареї. Акумуляторна батарея оптимізує роботу мережі та знижує навантаження на розподільні лінії за рахунок живлення та відбору енергії з мережі.

Буде показано, що оптимальний потік потужності лінії ніколи не досягає межі безпеки, встановленої DSO (жовта розривна лінія); це важливий аспект, який слід підкреслити, оскільки в деяких сценаріях прогноз DSO може бути неправильним, і цей 10%-й ліміт безпеки запобігає роботі мережі під навантаженням.

2.5.3. Порівняння між двома моделями оптимізації

Ми порівняємо дві моделі в різних сферах інтересів, щоб вирішити, яка є більш оптимальною та масштабованою, коли переконаємося, що дві моделі придатні для розвантаження мережі.

З одного боку, ми зосередимося на використанні акумулятора. Якщо ми подивимося на Рисунок 2.8 , то побачимо, що миттєвий стан заряду обох моделей однаковий. Це цілком логічно, оскільки вони обидва оптимізують SOC.

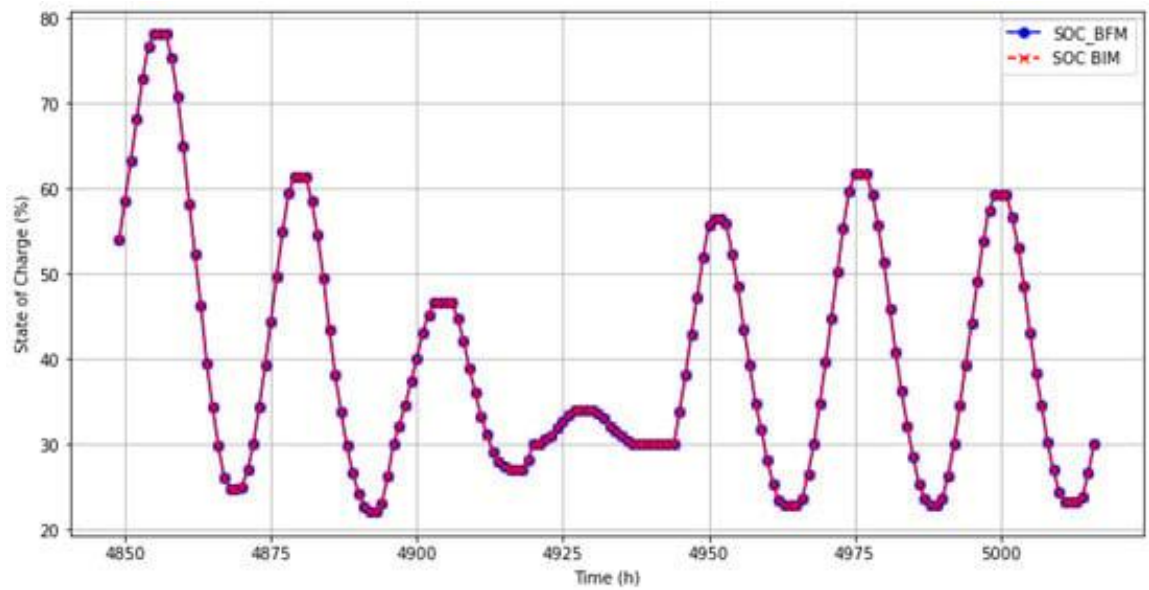
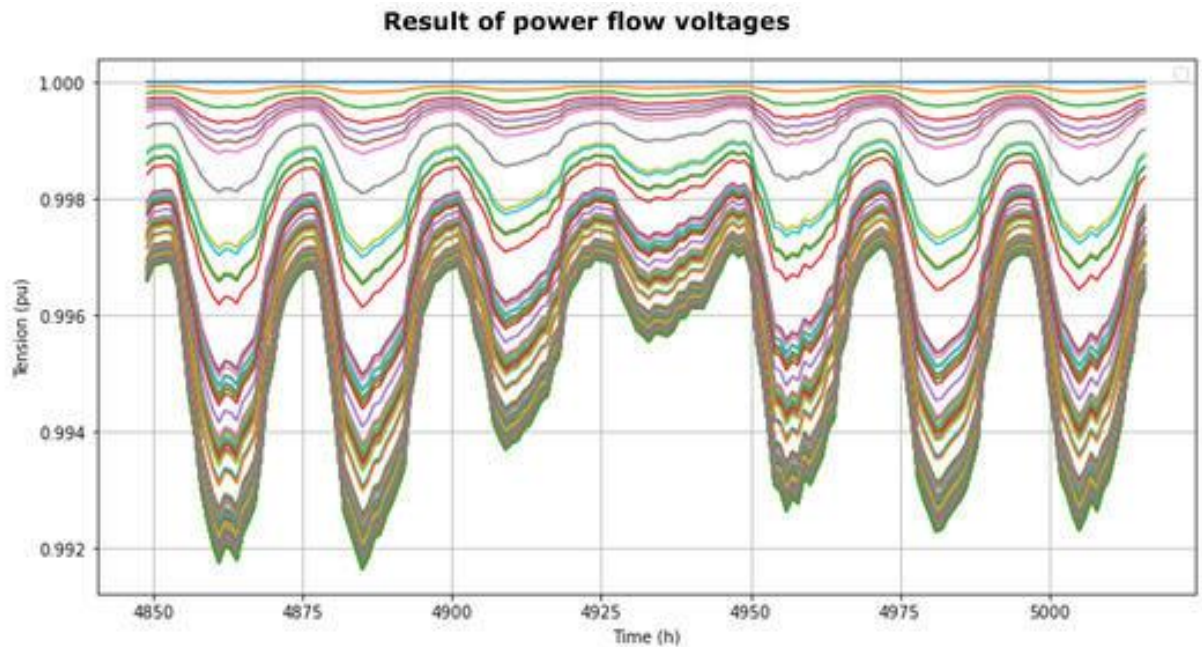


Рисунок 2.8. – Поведінка стану заряду системи мережевого зберігання протягом 7 періодів часу.

На рисунку 2.9. показано зміну поведінки напружень вузлів при оптимізації; можна побачити, що вони зазвичай мають менші та плоскіші піки. Але як раніше проблем не було, так і зараз немає, хоча поведінка краща.



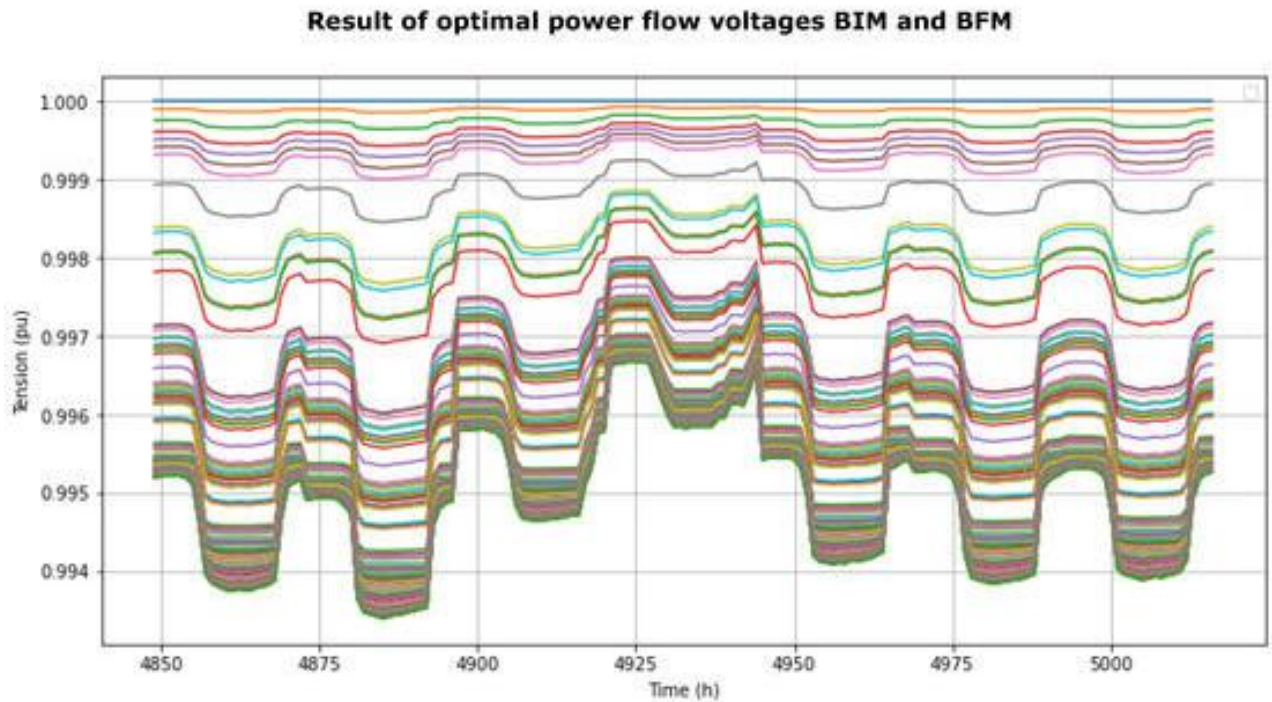


Рисунок 2.9. – Порівняння між результатами напруги для потоку потужності та оптимального потоку потужності

З іншого боку, діаграма коробки/вуса використовується для аналізу результату цільової функції. На рисунку 2.10 можна побачити, що функція моделі BFM трохи краща, ніж у моделі BIM. Якщо ми обчислимо реальну похибку між двома рішеннями, то побачимо, що максимальна різниця становить 0,11641 у першій ітерації. З плином днів ця різниця зменшується.

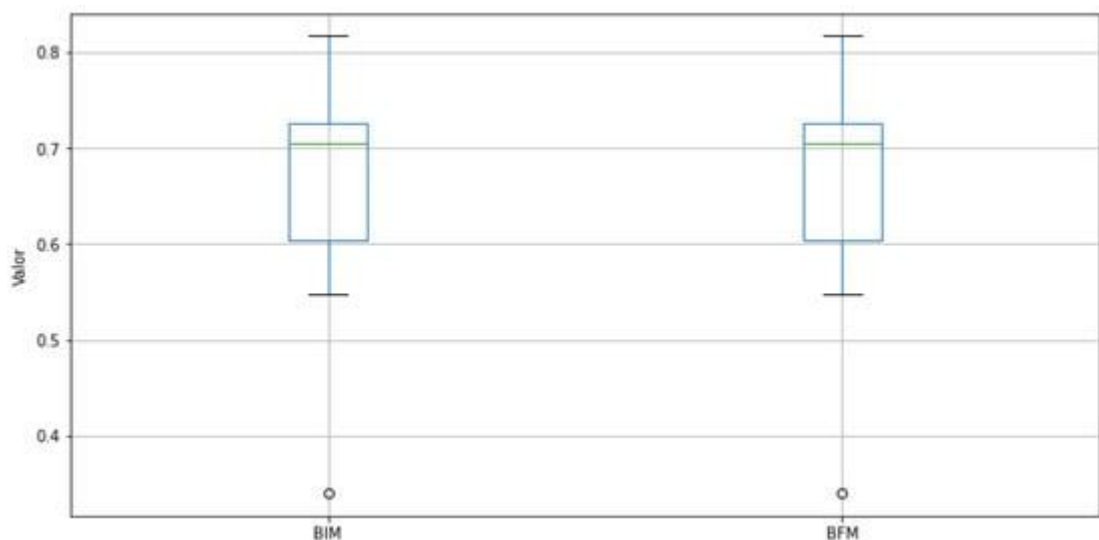


Рисунок 2.10. – BoxPlot результатів цільової функції з моделями BIM і BFM.

Потім вивчається modelstat оптимізації, оскільки він дає нам інформацію про відповідну модель: перевірка моделі, ефективна оптимізація та можливість узагальнення для нових сценаріїв. У нашому випадку modelstat для двох моделей відрізняється. Для моделі BIM це 8, що в GAMS означає перевірену оптимальність, тобто математично доведено, що вона відповідає всім вимогам проблеми, але модель не гарантує, що це найкраще рішення. Однак у BFM це 1, що в GAMS означає глобально оптимальне, тобто це найкраще ймовірне рішення.

Дивлячись на результати щодо часу обчислення роботи кожної моделі на рисунку 2.11, можна побачити, що час, потрібний BFM для виконання кожної оптимізації, приблизно в чотири рази довший, ніж у моделі BIM.

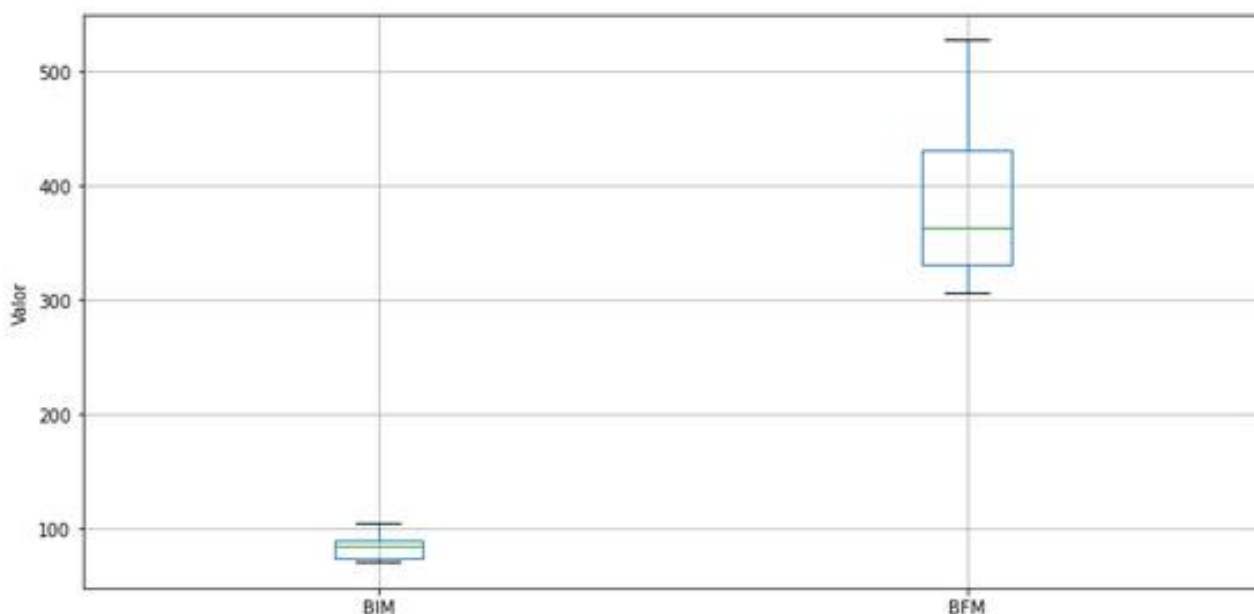


Рисунок 2.11. – Порівняння часу обчислення з використанням моделей BIM і BFM

Зокрема, у таблиці 2.10 аналізується час розрахунку кожного періоду, залишаючи список значень 7 оптимізованих періодів.

Таблиця 2.10. – Значення часу обчислення для ВІМ та ВФМ

Крапка	Час обчислення ВІМ (с)	Час обчислення ВФМ (с)
1	104.42	306.252
2	86,149	527,227
3	75.3	324,046
4	72,966	362,967
5	70,792	456,844
6	91,234	405,74
7	84,457	337,046

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

В рамках магістерської роботи досліджується перевантаження активів на лініях розподілу електроенергії, яке може виникнути через збільшення електрифікації. Порівнюються дві оптимальні моделі потоку потужності, модель впорскування шини та модель потоку в гілки, щоб мінімізувати втрати та пом'якшити перевантаження. Дослідження демонструє, що ці моделі підтримують перевантаження нижче 90% пропускної здатності лінії, підкреслюючи однакову ефективність управління ресурсами обох моделей. Ще один цікавий висновок полягає в тому, що використання батареї є ідентичним в обох формулюваннях при пом'якшенні заторів на лінії, що вказує на послідовне управління ресурсами.

Крім того, значення цільової функції моделі BFM було трохи вищим, ніж у моделі BIM, що підкреслює ефективність запропонованого формулювання. Максимальна різниця між двома рішеннями в моделюванні одного дня становить 0,11, що відповідає першому змодельованому дню ; у наступні дні похибка між двома моделями становить близько 0,01. У цьому випадку релаксаційний зазор залишається нульовим протягом періоду оптимізації, що свідчить про стійкість у розв'язанні запропонованої проблеми. З точки зору часу обчислення, модель BIM значно ефективніша, ніж BFM, як показано в таблиці 10 , практично в усіх періодах моделювання час обчислення BFM у чотири рази довший за час обчислення BIM. Однак важливо враховувати, що модель BFM досягає глобального оптимуму. У прикладі цієї роботи результати цільової функції досить схожі. Однак, загалом, BIM не може забезпечити знаходження глобального оптимуму.

Нарешті, спостерігаючи за падінням напруги у вузлах мережі, можна побачити, що навіть якщо немає проблем з обмеженнями напруги, коли проводиться оптимізація та вводиться батарея, рівні покращуються відносно початкового випадку; Зокрема, до появи батареї піки напруги впали до 0,992 о.е., а тепер лише до 0,994 о.е., як можна побачити на рисунку 2.9 . Слід

зазначити, що в стані заряду батареї в цьому випадку результати BIM і BFM ідентичні.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ

Проведене дослідження описує методологію підвищення ефективності розподільчої мережі та управління перевантаженнями за допомогою оптимального зберігання акумулятора та моделювання потоку електроенергії, в рамках магістерської роботи проаналізоване формулювання першої моделі, яка називається моделлю введення шини, формулювання другої запропонованої моделі, яка називається моделлю потоку гілки, формулювання моделі батареї та цільова функція задачі. Показні характеристики та особливості досліджуваної мережі. Представлені результати моделювання.

Підвищення ефективності роботи електричних мереж прямим чином впливає на формування енергетичної безпеки об'єкта, що розглядається у роботі.

Для майбутніх напрямків досліджень пропонується вивчити інтеграцію гнучкості з боку попиту або електричних транспортних засобів, щоб зменшити надмірне навантаження на батареї. Цей підхід задіяв би три джерела гнучкості та підвищив адаптивність в рамках електромережі. Такі території пропонують нові можливості для подальшого підвищення ефективності та управління електроенергетичною системою. Крім того, також пропонується запровадити різні джерела відновлюваної енергії, такі як фотоелектричні чи вітрові, разом із відповідними профілями генерації для аналізу динамічної поведінки мережі.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Конституція України : Конституція України; Верховна Рада України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР // База даних «Законодавство України» / 45 Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80>.
2. Омельченко Володимир. Сектор відновлюваної енергетики України до, під час та після війни. Центр Разумкова. 2022. URL: <https://razumkov.org.ua/statti/sektor-vidnovlyuvanoyi-energetyky-ukrayiny-do-pidchas-ta-pislya-viyny>.
3. Про Концепцію діяльності органів виконавчої влади у забезпеченні енергетичної безпеки України : Постанова Кабінету Міністрів України від 19.01.1998 № 48 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/48-98-%D0%BF/>
4. Про нафту і газ : Закон України від 12.07.2001 № 2665-III URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2665-14>.
5. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; План, Заходи від 12.2021 № 1803-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1803-2021-%D1%80>.
6. Про Національну комісію, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг : Закон України від 22.09.2016 № 1540-VIII // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1540-19>.
7. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2019-19>.
8. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України; Концепція, План, Заходи від 14.10.2022 № 908-р // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/908-2022-%D1%80> .

9. Про схвалення Плану розвитку системи передачі на 2021-2030 роки: Постанова; Нацком.енергетики, ком.послуг від 20.01.2021 № 57 // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0057874-21>.
10. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, – 2001. – 398 с.
11. Circular Economy. Available online: https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy_en (accessed on 8 February 2024).
12. Energy. Available online: https://energy.ec.europa.eu/index_en (accessed on 8 February 2024).
13. Mobility and Transport. Available online: https://transport.ec.europa.eu/index_en (accessed on 8 February 2024).
14. Olivella-Rosell, P.; Bullich-Massagué, E.; Aragüés-Peñalba, M.; Sumper, A.; Ødegaard Ottesen, S.; Vidal-Clos, J.A.; Villafáfila-Robles, R. Optimization problem for meeting distribution system operator requests in local flexibility markets with distributed energy resources. *Appl. Energy* 2018, 210, 881–895. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
15. Degefa, M.Z.; Sperstad, I.B.; Sæle, H. Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources. *Electr. Power Syst. Res.* 2021, 194, 107022. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
16. O'Dwyer, C.; Duignan, R.; O'Malley, M. Modeling demand response in the residential sector for the provision of reserves. In *Proceedings of the IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 22–26 July 2012*. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
17. Bibak, B.; Tekiner-Moğulkoç, H. A comprehensive analysis of Vehicle to Grid (V2G) systems and scholarly literature on the application of such systems. *Renew. Energy Focus* 2021, 36, 1–20. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
18. Rosso, A.D.D.; Eckroad, S.W. Energy storage for relief of transmission congestion. *IEEE Trans. Smart Grid* 2014, 5, 1138–1146. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

19. Ghazvini, M.A.F.; Lipari, G.; Pau, M.; Ponci, F.; Monti, A.; Soares, J.; Castro, R.; Vale, Z. Congestion management in active distribution networks through demand response implementation. *Sustain. Energy Grids Netw.* 2019, 17, 100185. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
20. Huang, S.; Wu, Q. Real-time congestion management in distribution networks by flexible demand swap. *IEEE Trans. Smart Grid* 2018, 9, 4346–4355. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
21. Vo, T.H.; Haque, A.N.M.M.; Nguyen, P.H.; Kamphuis, I.G.; Eijgelaar, M.; Bouwman, I. A study of Congestion Management in Smart Distribution Networks based on Demand Flexibility. In *Proceedings of the 2017 IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, UK, 18–22 June 2017. [[Google Scholar](#)]
22. Morales-España, G.; Martínez-Gordón, R.; Sijm, J. Classifying and modelling demand response in power systems. *Energy* 2022, 242. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
23. Ribó-Pérez, D.; Larrosa-López, L.; Pecondón-Tricas, D.; Alcázar-Ortega, M. A critical review of demand response products as resource for ancillary services: International experience and policy recommendations. *Energies* 2021, 14, 846. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
24. Wan, P.K.; Ranaboldo, M.; Burgio, A.; Caccamo, C.; Fragapane, G. A Framework for Enabling Manufacturing Flexibility and Optimizing Industrial Demand Response Services; Springer Science and Business Media Deutschland GmbH: Cham, Germany, 2023; Volume 692 AICT, pp. 634–649. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
25. FLEX4FACT Project. Available online: <https://flex4fact.eu> (accessed on 3 June 2024).
26. Lund, P.D.; Lindgren, J.; Mikkola, J.; Salpakari, J. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 45, 785–807. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
27. Nižetić, S.; Arıcı, M.; Hoang, A.T. Smart and Sustainable Technologies in energy transition. *J. Clean. Prod.* 2023, 389, 135944. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
28. Boyd, S.P.; Vandenberghe, L. *Convex Optimization*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2004; p. 716. [[Google Scholar](#)]

29. Hofmann, F. Linopy: Linear optimization with n-dimensional labeled variables. *J. Open Source Softw.* 2023, 8, 4823. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
30. Nguyen, D.B.; Scherpen, J.M.; Bliet, F. Distributed Optimal Control of Smart Electricity Grids with Congestion Management. *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.* 2017, 14, 494–504. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
31. Caballero, J.A.; Grossmann, I.E. Una revisión del estado del arte en optimización. *Rev. Iberoam. Autom. Inform. Ind. RIAI* 2007, 4, 5–23. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
32. Subhonmesh, B.; Low, S.H.; Chandy, K.M. Equivalence of branch flow and bus injection models. In *Proceedings of the 2012 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)*, Monticello, IL, USA, 1–5 October 2012; pp. 1893–1899. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
33. Yang, T.; Guo, Y.; Deng, L.; Sun, H.; Wu, W. A Linear Branch Flow Model for Radial Distribution Networks and Its Application to Reactive Power Optimization and Network Reconfiguration. *IEEE Trans. Smart Grid* 2021, 12, 2027–2036. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
34. Farivar, M.; Low, S.H. Branch flow model: Relaxations and convexification-part i. *IEEE Trans. Power Syst.* 2013, 28, 2554–2564. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
35. Yuan, Z. Formulations and Approximations of Branch Flow Model for General Power Networks. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2022, 10, 1110–1126. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
36. Bullich-Massagué, E.; Aragüés-Peñalba, M.; Prieto-Araujo, E.; Sumper, A.; Caire, R. Optimal feeder flow control for grid connected microgrids. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2019, 112, 144–155. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]