

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

ПОГОДЖЕНО
Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
Інженерії енергосистем

д.т.н., проф. /Віктор КАПЛУН/
вчене звання, науковий ступінь підпис

к.т.н., доцент. /Євген АНТИПОВ
вчене звання, науковий ступінь підпис

„ _____ ” _____ 2025 р.
число місяць рік

„ _____ ” _____ 2025 р.
число місяць рік

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Дослідження роботи розподільної електромережі з вузлами навантаження – містечками з «розумними» будинками у ПК Power Factory»

Спеціальність 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(код і назва)

Освітня програма «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Гарант освітньої програми

д.т.н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Сергій УСЕНКО

(ПІБ)

Керівник магістерської роботи

к.т.н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Євген АНТИПОВ

(ПІБ)

Виконав

Кирил НАЗАРЕНКО

(підпис)

(ПІБ)

КИЇВ – 2025

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інженерії енергосистем

доцент, к.т.н. _____ / Євген АНТИПОВ/
(підпис)

« 18 » 11 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

на виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту
Назаренко Кирилу Олександровичу

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Тема магістерської роботи: «Дослідження роботи розподільної електромережі з вузлами навантаження – містечками з «розумними» будинками у ПК Power Factory»

затверджена наказом ректора НУБіП України від 18.11.2024 № 2061 «С»

Термін подання завершеного проекту на кафедру 14.11.2025 р.

Вихідні дані до дипломного проекту магістра

1. Наукові статті та публікації

2. Каталогіві дані продукту PowerFactory

3. Результати моделювання

Перелік питань, які необхідно розробити (назви розділів)

1. Огляд концепції розумного будинку

2. Розробка моделі розподільної мережі

3. Моделювання та аналіз режимів роботи

4. Охорона праці

Перелік графічних матеріалів

Дата видачі завдання 30.11.2024 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

/Євген АНТИПОВ/

Завдання прийняв до виконання

/Кирил НАЗАРЕНКО/

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню роботи розподільної електромережі з вузлами навантаження, які представляють собою містечка з «розумними» будинками, у програмному комплексі PowerFactory.

Робота містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел і додатки. Загальний обсяг становить 66 сторінок, з яких основний текст займає 56 сторінок. У роботі представлено 2 таблиці та 15 рисунків. Список джерел включає 15 найменувань, з них 14 іноземними мовами.

Стислий виклад основного змісту:

Перший розділ містить огляд сучасних тенденцій розвитку розподільних мереж, зокрема концепцій Smart Grid і активних споживачів (prosumer). Описано «розумний будинок» як вузол навантаження з керованими приладами, зарядними станціями електромобілів (EV) та власною генерацією. Розглянуто класичні й сучасні методи моделювання електричного навантаження. Вибір програмного комплексу DIgSILENT PowerFactory для дослідження обґрунтовано його можливостями квазідинамічного моделювання та роботи з гнучкими профілями навантаження.

У другому розділі створено імітаційну комп'ютерну модель об'єкта дослідження. Для розподільної мережі 10 кВ використано модифіковану тестову схему IEEE 33-bus. Розроблено моделі вузлів навантаження «містечок» у вигляді понижувальних трансформаторних підстанцій 10/0.4 кВ. Також підготовлено три основні добові профілі навантаження (як об'єкти Characteristic для Scaling Factor), які відповідають трьом сценаріям дослідження:

1. Сценарій 1 (Базовий): відтворює традиційне комунально-побутове споживання.
2. Сценарій 2 (Піковий): показує неконтрольоване підключення «розумних будинків» з масовою одночасною зарядкою EV у вечірній пік.

3. Сценарій 3 (Оптимізований): описує роботу мережі із застосуванням механізмів керування попитом (Demand Response), зокрема перенесенням зарядки EV на ніч.

У третьому розділі виконано комп'ютерне моделювання та аналіз результатів. За допомогою квазідинамічного моделювання (Quasi-Dynamic Simulation) отримано добові графіки потужності, напруги та втрат для всіх трьох сценаріїв. Проведено порівняльний аналіз, що кількісно оцінив вплив кожного сценарію на технічні параметри мережі.

Четвертий розділ присвячено питанням охорони праці та безпеки життєдіяльності. Проаналізовано умови праці інженера-дослідника при роботі з ПЕОМ і заходи електробезпеки під час обслуговування розподільних мереж.

Висновки: Дослідження показало, що неконтрольована інтеграція «розумних будинків» з масовою зарядкою EV (Сценарій 2) збільшує пікове навантаження приблизно на 85% (з ~ 0.39 МВт до ~ 0.72 МВт). Це призводить до значних падінь напруги у віддалених вузлах мережі (до ~ 0.95 р.у. і нижче) та перевантаження обладнання. Встановлено, що використання механізмів керування попитом (DR), зокрема перенесення гнучких навантажень на ніч (Сценарій 3), повністю вирішує проблему падіння напруги та перевантаження. Крім того, оптимізований графік (Сценарій 3) зменшує сумарні добові втрати електроенергії навіть у порівнянні з базовим режимом (Сценарій 1), що підтверджує економічну ефективність впровадження інтелектуальних систем керування.

Ключові слова: PowerFactory, "розумний будинок", розподільна електромережа, керування попитом (Demand Response), моделювання навантаження, квазідинамічне моделювання, електромобіль.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1.Актуальність теми.....	7
2.Мета і задачі дослідження.....	7
3. Об'єкт і предмет дослідження.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД КОНЦЕПЦІЙ "РОЗУМНИЙ БУДИНОК" ТА ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ В SMART GRID	10
1.1. Сучасні тенденції розвитку розподільних електромереж (концепція Smart Grid, активні мережі).....	10
1.2. Концепція "Розумного будинку" (Smart Home) як активного споживача (prosumer)	12
1.2.1. Класифікація навантажень "розумного будинку"	12
1.2.2. Роль систем керування попитом (DR) та систем накопичення енергії (BESS)	13
1.2.3. Вплив зарядних станцій електромобілів (EV) як компонента "розумного будинку"	14
1.3. Огляд методів моделювання навантаження в електроенергетичних системах	15
1.4. Аналіз можливостей ПК DIgSILENT PowerFactory для моделювання розподільних мереж та гнучких навантажень	17
Висновки до розділу 1	20
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ТА ВУЗЛІВ НАВАНТАЖЕННЯ "РОЗУМНИХ БУДИНКІВ"	23
2.1. Обґрунтування вибору та опис вихідної схеми розподільної мережі ...	23
2.2. Створення базової моделі розподільної мережі в ПК PowerFactory	25
2.3. Розробка моделі вузла навантаження "Містечко з «розумними» будинками"	30
2.3.1. Визначення профілів навантаження для сценаріїв дослідження	31
2.3.2. Створення агрегованої моделі навантаження в PowerFactory	35
2.3.3. Імітація механізмів Demand Response (DR)	36
2.4. Формування сценаріїв для комп'ютерного моделювання	36
2.4.1. Вибір типу моделювання	37
2.4.2. Опис та конфігурація сценаріїв	37

Висновки до розділу 2	40
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖІ ..	41
3.1. Розрахунок та аналіз поточкорозподілу для Сценарію 1 «Базовий».....	41
3.1.1. Аналіз сумарного графіка навантаження	41
3.2. Аналіз впливу некерованого "розумного" навантаження (Сценарій 2)	43
3.2.1. Аналіз сумарного графіка навантаження	44
3.3. Аналіз ефективності застосування механізмів Demand Response (Сценарій 3)	46
3.3.1. Аналіз сумарного графіка навантаження	47
3.4. Порівняльний аналіз результатів моделювання	49
3.5. Розробка технічних рекомендацій за результатами моделювання.....	49
Висновки до розділу 3	52
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ POWERFACTORY.....	53
4.1 Обґрунтування вибору програмного колексу PowerFactory	53
Висновки до розділу 4	58
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62
Додаток А Скріншоти моделі в PowerFactory	65

ВСТУП

1.Актуальність теми. Сучасна електроенергетика проходить через глибокі зміни, пов'язані з декарбонізацією, децентралізацією та цифровізацією. Розподільні електричні мережі, які раніше створювалися для односпрямованого потоку потужності до пасивних споживачів, зараз стикаються з новими викликами. З'являються активні споживачі (просьюмери), а такі вузли навантаження, як «розумні будинки» (Smart Homes), суттєво змінюють характер споживання електроенергії. Інтеграція зарядних станцій для електромобілів, дахових сонячних електростанцій та систем керування попитом (Demand Response) призводить до значної нерівномірності графіків навантаження, появи зворотних потоків потужності та нових вимог до якості електроенергії.

У цих умовах операторам систем розподілу (ОСР) потрібні точні інструменти для планування розвитку мереж і аналізу режимів. Програмний комплекс DIgSILENT PowerFactory визнаний світовим стандартом для моделювання та аналізу електроенергетичних систем. Дослідження роботи розподільної мережі, яка забезпечує такі специфічні вузли навантаження, як «містечка з розумними будинками», за допомогою цього інструменту є актуальною науково-практичною задачею. Це дозволить розробити рекомендації для надійної та ефективної експлуатації таких мереж в Україні.

2.Мета і задачі дослідження. Мета магістерської кваліфікаційної роботи — дослідити вплив вузлів навантаження типу «містечко з розумними будинками» на параметри режиму розподільної електромережі 10/0.4 кВ і розробити технічні рекомендації щодо їх покращення з використанням комп'ютерного моделювання в PowerFactory.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити такі задачі:

1.Вивчити та проаналізувати концепцію "розумного будинку" як комплексного вузла навантаження, його основні компоненти (гнучкі навантаження, електромобілі, генеруючі джерела) та їх вплив на профіль споживання.

2.Описати аналітичні та програмні можливості ПК DIgSILENT PowerFactory для моделювання активних розподільних мереж та гнучких навантажень.

3.Розробити агреговану імітаційну модель вузла навантаження 0.4 кВ, що відповідає «містечку з розумними будинками».

4.Створити комп'ютерну модель типової розподільної електромережі 10/0.4 кВ у середовищі PowerFactory.

5.Встановити закономірності впливу «розумних будинків» на параметри усталеного режиму мережі (рівні напруги, поточкорозподіл, втрати потужності) шляхом моделювання різних сценаріїв (базовий, піковий некерований, оптимізований з керуванням попитом).

6.Обґрунтувати технічні рекомендації для операторів систем розподілу щодо забезпечення надійної та ефективної роботи мереж з такими вузлами навантаження.

3. Об'єкт і предмет дослідження. Об'єкт дослідження — це процеси та усталені режими роботи в розподільних електричних мережах напругою 10/0.4 кВ. Предмет дослідження — вплив агрегованого навантаження «містечок з розумними будинками» на параметри режиму розподільної електромережі, зокрема рівні напруги, завантаження елементів і втрати електроенергії.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у роботі застосовано комплекс наукових методів:

- теоретичні: аналіз і синтез науково-технічної літератури для визначення особливостей навантаження "розумних будинків" та огляду можливостей ПК PowerFactory;

- математичне моделювання: для формалізації профілів навантаження та розробки агрегованої моделі вузла;

- комп'ютерне імітаційне моделювання: в ПК DIgSILENT PowerFactory для розрахунку усталених режимів розподільної мережі за різними сценаріями;

- порівняльний аналіз: для оцінки відхилень параметрів режиму та ефективності запропонованих заходів.

Наукова новизна та практична значущість отриманих результатів.

Наукова новизна полягає у подальшому розвитку аналізу режимів розподільних мереж через встановлення кількісних залежностей між рівнем проникнення «розумних будинків» і техніко-економічними показниками роботи мережі.

Практична значущість отриманих результатів у тому, що розроблені моделі та технічні рекомендації можуть бути безпосередньо використані інженерними службами операторів систем розподілу (ОСР) під час планування реконструкції та розвитку міських і приміських мереж 10/0.4 кВ, а також при видачі технічних умов на підключення нових житлових комплексів.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД КОНЦЕПЦІЙ "РОЗУМНИЙ БУДИНОК" ТА ЇХ МОДЕЛЮВАННЯ В SMART GRID

1.1. Сучасні тенденції розвитку розподільних електромереж (концепція Smart Grid, активні мережі)

Традиційні розподільні електричні мережі (РЕМ) багато років будувалися і працювали за пасивною схемою. Вони мали здебільшого радіальну структуру, потужність у них рухалася тільки від високовольтних центрів до споживачів, а навантаження було передбачуваним. Керування такими мережами обмежувалося сезонною зміною налаштувань регуляторів напруги на трансформаторних підстанціях і швидким реагуванням на аварії.

Але на початку ХХІ століття ця модель швидко втратила актуальність через три основні фактори: декарбонізацію, децентралізацію та цифровізацію.

1. Масове підключення відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції, призвело до появи великих, але непостійних і важкопрогнозованих обсягів генерації прямо в мережах середньої (СН) та низької (НН) напруги.

2. Децентралізація змінила роль споживача. З'явився новий тип — «просьюмер» (prosumer), тобто активний споживач, який не тільки споживає, а й виробляє електроенергію для мережі, наприклад, за допомогою дахових СЕС.

3. З появою нових типів навантаження, таких як зарядні станції для електромобілів (EV) і теплові насоси, виникли нові, раніше не властиві мережі піки споживання з великою потужністю.

Через ці виклики мережі вже не можна було експлуатувати за принципом "fit and forget" (підключив і забув). У відповідь з'явилася концепція «Розумної мережі» (Smart Grid). Smart Grid — це сучасна електрична мережа, яка використовує інформаційні та комунікаційні технології (ІКТ) для збору даних про виробництво і споживання енергії в реальному часі та автоматичного реагування на зміни.

Головна відмінність Smart Grid — це перехід від пасивних до активних розподільних мереж (Active Distribution Networks, ADN) . Активна мережа — це РЕМ, яка може не тільки моніторити, а й активно керувати потоками потужності, рівнями напруги та конфігурацією за допомогою автоматизованих систем .

Основні технології, які визначають сучасний розвиток активних мереж, включають:

- Системи керування попитом (Demand Response, DR): це технології, які мотивують споживачів або автоматично керують їх навантаженням, щоб змінити звичний профіль споживання, зазвичай для зниження пікових навантажень .

- Системи накопичення електроенергії (Battery Energy Storage Systems, BESS): це акумуляторні батареї, які встановлюють у важливих точках мережі або у споживачів для вирівнювання графіків, компенсації піків чи надання допоміжних послуг .

- Розподілена генерація (Distributed Generation, DG): це широке впровадження джерел генерації, які підключаються прямо до розподільної мережі .

- Розширена автоматизація мережі (Advanced Distribution Automation, ADA): включає технології самовідновлення мережі, наприклад FLISR (Fault Location, Isolation, and Service Restoration), а також оптимізацію напруги (Volt/VAR optimization).

Отже, сучасна розподільна мережа вже не є простою пасивною інфраструктурою, а стає складною кібер-фізичною системою. Вузли навантаження тут вже не просто приймають електроенергію, а стають активними, гнучкими та інтерактивними. Це добре видно на прикладі «розумних будинків», які розглядатимуться далі. Для дослідження таких мереж потрібні сучасні програмні комплекси, здатні моделювати складну взаємодію, наприклад, ПК DIgSILENT PowerFactory .

1.2. Концепція "Розумного будинку" (Smart Home) як активного споживача (prosumer)

Якщо концепція Smart Grid, розглянута в 1.1, є «нервовою системою» нової енергетики, то «Розумний будинок» (Smart Home) є її ключовою, активною клітиною. У контексті електроенергетики «розумний будинок» – це не просто житло з автоматизованими приладами, а інтегрована енергетична мікросистема, керована локальним контролером (HEMS – Home Energy Management System).

Ця система докорінно змінює парадигму споживання. Традиційний споживач був пасивним об'єктом, профіль навантаження якого визначався його звичками. На противагу цьому «розумний будинок» стає активним учасником ринку та мережі. Це призводить до появи терміну «просьюмер» (prosumer) – комбінації слів "producer" (виробник) та "consumer" (споживач).

Просьюмер – це вузол навантаження, який може динамічно змінювати своє споживання, а також генерувати електроенергію В.

1.2.1. Класифікація навантажень "розумного будинку"

Для коректного моделювання вузла «розумного будинку» критично важливо розуміти, що його сукупне навантаження є неоднорідним. З точки зору гнучкості та керованості всі прилади в будинку можна класифікувати на три основні категорії :

1. Некеровані (критичні) навантаження (Uncontrollable / Critical Loads): Це прилади, робота яких жорстко визначається потребами мешканців і не може бути перервана або зміщена в часі без значного дискомфорту. до них відносяться освітлення, холодильники (компресор), телевізори, комп'ютери та медичне обладнання. Їх профіль має стохастичний характер.
2. Керовані (змішувані) навантаження (Controllable / Deferrable Loads): Це прилади з певним циклом роботи, запуск яких можна відкласти в часі без втрати кінцевого результату. HEMS може перенести їх роботу з годин пікового навантаження на нічний «провал». Типовими

прикладом є пральні та посудомийні машини, сушарки, насоси для басейнів.

3. Гнучкі (модульовані) навантаження (Flexible / Modulatable Loads): Це найцінніший для мережі актив. Їх потужність можна не просто вмикати/вимикати, а плавно регулювати (модулювати) у певному діапазоні. До них належать системи опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC), бойлери, а також зарядні пристрої електромобілів.

Саме наявність керованих та гнучких навантажень створює той потенціал гнучкості, який є основою для участі «розумного будинку» в механізмах керування мережею.

1.2.2. Роль систем керування попитом (DR) та систем накопичення енергії (BESS)

Наявність гнучких навантажень сама по собі не гарантує покращення режимів мережі. Необхідний механізм, який би активував цю гнучкість у потрібний для енергосистеми момент. Цим механізмом є керування попитом (Demand Response, DR).

DR – це сукупність програм і сигналів (цінових або прямих команд), які мотивують споживача (або його автоматизовану систему HEMS) змінити свій звичний профіль споживання. Наприклад, у відповідь на високий тариф у години пік, HEMS автоматично знизить інтенсивність кондиціонування й відкладе запуск бойлера. Таким чином, DR є «мостом» між оператором системи розподілу (який має проблему з перевантаженням) і «розумним будинком» (який має ресурс для вирішення цієї проблеми).

Ще одним ключовим елементом просьюмера є системи накопичення електроенергії (Battery Energy Storage Systems, BESS). Домашні акумулятори повністю «роз'єднують» час генерації (наприклад, сонячною панеллю опівдні) та час споживання (у вечірній пік). Для моделі розподільної мережі це означає, що вузол навантаження 0,4 кВ може не лише знижувати споживання, але й

видавати активну потужність у мережу (розряджати батарею) під час пікових годин, ефективно виконуючи функцію локальної пікової електростанції.

1.2.3. Вплив зарядних станцій електромобілів (EV) як компонента "розумного будинку"

Окремого аналізу вимагає такий компонент «розумного будинку», як зарядна станція електромобіля (EV). Це навантаження має унікальні, раніше невластиві для житлового сектору, властивості.

- Висока потужність: Побутові зарядні пристрої (Mode 2, Mode 3) мають потужність від 3,7 кВт до 22 кВт, що перевищує середню потужність усього будинку.
- Тривалий час споживання: Повна зарядка батареї може тривати від 4 до 10 годин.
- Високий коефіцієнт одночасності: Найбільш поширений сценарій – підключення EV до зарядки одразу після повернення додому (18:00 – 19:00), що призводить до збігу максимумів навантаження від EV та загальнопобутового вечірнього піку.

Безконтрольна («тупа») зарядка електромобілів у «містечку» здатна миттєво перевантажити трансформатори 10/0,4 кВ та спричинити критичні падіння напруги у споживачів.

Саме тому в концепції Smart Home зарядка EV розглядається як гнучке навантаження. Технології «розумної» зарядки (V1G) дозволяють HEMS керувати процесом: наприклад, заряджати авто не одразу, а вночі, або модулювати потужність зарядки залежно від загального навантаження будинку. Найбільш прогресивною є концепція Vehicle-to-Grid (V2G), де EV може не лише споживати, але й віддавати енергію з батареї назад у мережу, виконуючи роль мобільного BESS для покриття короткочасних піків.

Отже, агрегований вузол навантаження «містечко з розумними будинками» є складною системою з гнучкими навантаженнями, власною генерацією, накопичувачами та потужними споживачами (EV). Адекватне

моделювання такої системи вимагає спеціалізованих підходів, які будуть розглянуті далі.

1.3. Огляд методів моделювання навантаження в електроенергетичних системах

Точне моделювання електричного навантаження є фундаментальною задачею для адекватного аналізу режимів роботи, стійкості та планування розвитку електроенергетичних систем. Поява активних споживачів та просьюмерів, описаних у підрозділі 1.2, значно ускладнила цю задачу, зробивши традиційні моделі недостатньо точними для нових умов.

В теорії та практиці моделювання систем електропостачання історично склалися та розвиваються декілька основних підходів до представлення навантаження.

1. Статичні моделі навантаження (Моделі ZIP)

Найбільш поширеним та класичним підходом є використання статичних моделей, які описують залежність активної (P) та реактивної (Q) потужності вузла навантаження від поточної напруги (V) та частоти (f) в мережі. Найчастіше використовується модель ZIP, яка представляє навантаження як суму трьох компонентів:

- Z (Constant Impedance): Компонент з постійним опором ($P \propto V^2$).
- I (Constant Current): Компонент з постійним струмом ($P \propto V^1$).
- P (Constant Power): Компонент з постійною потужністю ($P \propto V^0$).

Формульно це виражається як:

$$\begin{aligned}
 P &= P_0 \left(a_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + a_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + a_3 \right) \\
 Q &= Q_0 \left(b_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_2 \left(\frac{V}{V_0} \right) + b_3 \right)
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

де $a_1 + a_2 + a_3 = 1$ та $b_1 + b_2 + b_3 = 1$.

Ця модель є зручною для розрахунків ustalених режимів, однак вона є повністю пасивною і нездатна відобразити зміну профілю споживання в часі, реакцію на керуючі сигнали (DR) або стохастичну поведінку споживачів.

2. Динамічні моделі навантаження (Композитні моделі)

Для аналізу перехідних процесів та стійкості були розроблені динамічні моделі. Вони враховують, що значна частина навантаження (особливо в житловому секторі) має інерційний характер, зумовлений асинхронними двигунами (АД) у складі кондиціонерів, холодильників та насосів.

Композитні моделі (Composite Load Models, CLM) агреговано представляють вузол навантаження як паралельне з'єднання декількох груп АД з різними параметрами та частки статичного навантаження (наприклад, ZIP). Ці моделі коректно описують поведінку навантаження під час короткочасних провалів напруги, однак, як і статичні моделі, вони не враховують поведінкових аспектів та комунікаційної взаємодії «розумних будинків».

3. Покомпонентний підхід («Знизу-вгору», Bottom-Up)

Цей підхід є найбільш деталізованим і полягає у моделюванні окремих фізичних приладів (освітлення, бойлери, пральні машини, зарядні станції EV) та їх агрегації на рівні домогосподарства, а потім – на рівні трансформаторної підстанції. Для кожної категорії приладів створюються окремі профілі споживання, що враховують їх технічні характеристики та шаблони поведінки користувачів.

Перевагою методу є висока точність та фізична обґрунтованість, що дозволяє безпосередньо моделювати вплив конкретних технологій (наприклад, керування бойлерами або «розумної» зарядки EV). Недоліком є надзвичайно висока обчислювальна складність та потреба у величезних масивах вихідних даних (статистика насиченості приладами, соціально-демографічні дані тощо), що ускладнює моделювання цілих «містечок».

4. Стохастичні та Data-Driven моделі («Зверху-вниз», Top-Down)

З поширенням інтелектуальних систем обліку (Smart Meters) набули популярності моделі, що базуються на обробці великих даних (Data-Driven). Ці моделі використовують статистичні методи, теорію ймовірностей (наприклад, ланцюги Маркова) або алгоритми машинного навчання для генерації реалістичних профілів навантаження на основі реальних вимірювань.

Вони найкраще враховують стохастичний (випадковий) характер поведінки мешканців, не вимагаючи детального моделювання кожного приладу. Такий підхід добре підходить для опису агрегованого навантаження цілого мікрорайону або містечка.

Висновки до підрозділу

Для вирішення задач даної магістерської роботи жоден з розглянутих методів у чистому вигляді не є оптимальним. Моделі ZIP та динамічні моделі не враховують гнучкість та керованість «розумних будинків». Покомпонентний метод є надто складним для моделювання цілого «містечка».

Тому в даній роботі пропонується використати гібридний підхід: створити агреговану еквівалентну модель вузла навантаження в ПК PowerFactory. Ця модель буде базуватися на принципах покомпонентного та стохастичного підходів (шляхом формування типових добових профілів для різних сценаріїв), але в програмному комплексі буде представлена як єдиний об'єкт "Load" (Навантаження) зі змінними в часі характеристиками $P(t)$ та $Q(t)$. Це дозволить дослідити вплив вузла на розподільну мережу 10 кВ без надлишкової деталізації мережі 0.4 кВ. Наступний підрозділ присвячений аналізу можливостей ПК PowerFactory для реалізації такого моделювання.

1.4. Аналіз можливостей ПК DIgSILENT PowerFactory для моделювання розподільних мереж та гнучких навантажень

Вибір програмного комплексу (ПК) для моделювання є вирішальним етапом, що визначає точність та глибину дослідження. Для вирішення поставлених у даній роботі задач, які стосуються аналізу активних

розподільних мереж зі складними вузлами навантаження, необхідний інструмент, що виходить за межі класичних розрахунків усталених режимів.

Програмний комплекс DIgSILENT PowerFactory (PF) є одним із провідних світових інструментів для інженерного аналізу електроенергетичних систем, від генерації до розподілу та промислового електропостачання. Його ключова перевага полягає в інтегрованій базі даних та об'єктно-орієнтованій моделі, що дозволяє поєднувати моделювання традиційних елементів мережі з впровадженням складних логічних моделей керування.

Розглянемо ключові можливості ПК PowerFactory в контексті задач даної магістерської роботи:

1. Комплексне моделювання розподільних мереж (РЕМ)

PowerFactory надає вичерпну бібліотеку моделей для детального представлення РЕМ 10/0.4 кВ. Це включає:

Лінії та кабелі: Моделювання з урахуванням геометрії, типу прокладання, частотних та температурних залежностей.

Трансформатори: Детальні моделі дво- та триобмоткових трансформаторів, включаючи моделі регулювання напруги (РПН, ПБЗ).

Комутаційне обладнання: Моделі вимикачів, роз'єднувачів, запобіжників, що є критичним для аналізу конфігурації мережі.

2. Моделювання навантаження (базові можливості)

ПК PowerFactory підтримує всі класичні моделі навантаження, розглянуті в 1.3, зокрема:

Статичні моделі (ZIP): Дозволяє задавати поліноміальну залежність $P(V)$ та $Q(V)$, що є стандартом для розрахунку усталених режимів.

Динамічні моделі: Наявність вбудованих моделей асинхронних двигунів та композитних моделей навантаження (CLM) для аналізу стійкості.

3. Моделювання гнучких навантажень та "Розумних будинків"

Саме в цьому аспекті PowerFactory має значні переваги над спрощеними розрахунковими програмами. Моделювання «розумного будинку» як активного вузла реалізується не одним елементом, а комбінацією функцій:

- Часові профілі навантаження (Load Profiles): PF дозволяє кожному окремому навантаженню (або групі навантажень) призначити добовий чи річний профіль $P(t)$ та $Q(t)$ з дискретним кроком (наприклад, 1 хвилина, 15 хвилин). Це дозволяє провести квазідинамічний розрахунок (quasi-dynamic simulation) для аналізу режимів протягом 24 годин.
- Вбудовані моделі ВДЕ та накопичувачів (BESS): Програмний комплекс має деталізовані моделі сонячних панелей (PV-систем) з MPPT-контролерами та систем накопичення енергії (BESS) з їх контролерами заряду/розряду. Це дозволяє моделювати «розумний будинок» як просьюмера, що генерує енергію та взаємодіє з накопичувачем.
- Мова програмування DIgSILENT (DPL): Це найпотужніший інструмент PF для задач дослідження. DPL (DIgSILENT Programming Language) – це вбудована скриптова мова, що дозволяє користувачу автоматизувати розрахунки та, що найважливіше, створювати власні моделі керування. За допомогою DPL-скрипту можна реалізувати логіку системи HEMS «розумного будинку», наприклад:

Імітувати логіку «розумної» зарядки EV: *«Якщо напруга в мережі вище $U_{ном}$, а час доби – нічний, увімкнути зарядку».*

Моделювати реакцію на сигнали Demand Response: *«Якщо отримано сигнал DR (зміна ціни), зменшити споживання гнучких навантажень на 30%».*

Інтерфейси ко-симуляції: Для ще більш складних задач PF може працювати у зв'язці з іншими програмами (наприклад, Python або MATLAB/Simulink), де PowerFactory моделює фізичну мережу, а зовнішня програма – складну логіку керування «розумними будинками».

Висновок до підрозділу

Аналіз можливостей ПК DIgSILENT PowerFactory демонструє, що даний комплекс є ідеальним інструментом для досягнення мети магістерської роботи. Він дозволяє не лише створити детальну модель фізичної розподільної мережі 10/0.4 кВ, але й, що є ключовим, гнучко моделювати вузли навантаження «розумних будинків». Використання вбудованих профілів навантаження, моделей ВДЕ та, за потреби, скриптів DPL дозволить провести комплексне дослідження режимів мережі для різних сценаріїв (базового, пікового та оптимізованого), що повністю відповідає поставленим задачам.

Висновки до розділу 1

Проведений у даному розділі аналітичний огляд дозволяє зробити наступні ключові висновки:

1. Сучасні розподільні мережі (РЕМ) переживають фундаментальну трансформацію. Під впливом децентралізації та декарбонізації вони еволюціонують від пасивних радіальних структур до активних мереж (Smart Grids), що вимагає нових підходів до аналізу їх режимів (як показано в 1.1).

2. Змінюється сам характер навантаження. Ключовим елементом нових мереж стає «розумний будинок» (просьюмер). Як деталізовано в 1.2, він є складним, керованим вузлом, що поєднує гнучкі навантаження (HVAC, бойлери), потужні споживачі (електромобілі), власну генерацію (СЕС) та накопичувачі (BESS).

3. Традиційні моделі навантаження є недостатніми. Класичні статичні (ZIP) та динамічні моделі, розглянуті в 1.3, не здатні адекватно описати поведінкові аспекти, гнучкість (участь в DR) та стохастичність, притаманні «розумним будинкам». Неконтрольоване підключення таких

вузлів (особливо з EV) створює значні ризики перевантаження обладнання та падіння напруги.

4. ПК PowerFactory є адекватним інструментом для дослідження. Аналіз (1.4) підтвердив, що даний програмний комплекс володіє всіма необхідними функціями: від детального моделювання елементів РЕМ до реалізації гнучких профілів навантаження, моделей ВДЕ та створення власних алгоритмів керування (DPL), що дозволяє імітувати поведінку «розумних будинків».

Таким чином, аналітичний огляд виявив проблему: існує розрив між традиційними методами розрахунку режимів РЕМ та реальною поведінкою нових активних вузлів навантаження. Це створює невизначеність для операторів систем розподілу при плануванні розвитку мереж.

Виходячи з цього, постановка задач для моделювання в рамках даної дипломної роботи є наступною:

1. Створити базову модель розподільної електромережі 10/0.4 кВ у середовищі ПК DIgSILENT PowerFactory, що включає живлячий центр, повітряні/кабельні лінії 10 кВ та низку трансформаторних підстанцій 10/0.4 кВ.

2. Розробити агреговану імітаційну модель вузла навантаження 0.4 кВ, яка відповідає «містечку з розумними будинками». Ця модель має бути реалізована у вигляді добових профілів навантаження ($P(t)$ та $Q(t)$) для трьох ключових сценаріїв.

3. Визначити та обґрунтувати сценарії дослідження:

- Сценарій 1 (Базовий): Робота мережі з традиційним пасивним навантаженням (для верифікації моделі та порівняння).

- Сценарій 2 (Піковий некерований): Робота мережі з навантаженням «розумних будинків» без застосування механізмів керування (імітація одночасної зарядки EV та вечірнього максимуму).

- Сценарій 3 (Оптимізований): Робота мережі з «розумними будинками» при застосуванні механізмів керування попитом (DR) та «розумної» зарядки (імітація перенесення піків на нічний час).

4. Провести квазідинамічне моделювання (quasi-dynamic simulation) режимів роботи мережі для всіх сценаріїв протягом 24 годин.

5. Виконати порівняльний аналіз отриманих результатів за ключовими параметрами: рівні напруги у вузлах, завантаження ліній і трансформаторів та сумарні втрати електроенергії в мережі.

Вирішення цих задач дозволить досягти поставленої мети роботи – кількісно оцінити вплив «розумних будинків» на РЕМ та обґрунтувати технічні рекомендації.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ТА ВУЗЛІВ НАВАНТАЖЕННЯ "РОЗУМНИХ БУДИНКІВ"

2.1. Обґрунтування вибору та опис вихідної схеми розподільної мережі

Для проведення комп'ютерного моделювання та вирішення поставлених у роботі задач, першим етапом є вибір та обґрунтування вихідної (тестової) схеми розподільної електричної мережі (РЕМ). Ця схема має бути репрезентативною та відповідати об'єкту дослідження — живленню вузлів навантаження типу «містечко».

Обґрунтування вибору

Вимоги до тестової схеми:

1. Типовість: Схема має відображати поширені топології та класи напруги, що використовуються для живлення приміських чи нових міських житлових масивів. В умовах України це, як правило, мережі 10 кВ (або 6 кВ).
2. Масштабованість: Схема має бути достатньо складною, щоб на ній можна було чітко спостерігати ефекти від зміни навантаження (падіння напруги, завантаження ліній, втрати), але водночас достатньо простою для аналізу та інтерпретації результатів.
3. Верифікованість: Використання схеми з невідомими або унікальними параметрами ускладнює перевірку адекватності моделі.

Враховуючи, що впровадження «розумних будинків» найчастіше відбувається у нових житлових районах, які живляться за радіальною або магістрально-кільцевою схемою, для дослідження обрано типову радіальну РЕМ 10 кВ.

Замість використання схеми конкретного, унікального об'єкта (що вимагало б комерційної інформації від ОСР), у даній магістерській роботі за основу приймається стандартна тестова розподільна мережа IEEE 33-bus (33 вузли).

Цей вибір обґрунтований тим, що:

- Мережа IEEE 33-bus є глобальним академічним стандартом для тестування нових методів керування, інтеграції розподіленої генерації та аналізу режимів активних РЕМ.
- Її параметри (опори ліній, потужності навантажень) є верифікованими та загальнодоступними, що дозволяє легко відтворити модель та порівняти отримані результати з результатами інших дослідників.
- Її радіальна топологія з довгими фідерами ідеально підходить для демонстрації проблем якості напруги та втрат, які є предметом даного дослідження.

Опис вихідної схеми

Вихідна схема IEEE 33-bus (рис. 2.2) є радіальною мережею середньої напруги з номінальною напругою 12.66 кВ. Для адаптації до стандартів України, у моделі PowerFactory номінальна напруга мережі приймається рівною 10 кВ.

Основні характеристики моделі:

- Джерело живлення: Мережа живиться від одного джерела (Вузол 1, "Slack Bus"), яке імітує шини 10 кВ живлячої підстанції (наприклад, ПС 110/35/10 кВ) з відповідною потужністю короткого замикання.
- Топологія: Схема складається з 33 вузлів (шин) та 32 ділянок (ліній).
- Навантаження: У базовій версії моделі 32 вузли є вузлами навантаження. Загальне навантаження в номінальному режимі становить 3.715 МВт та 2.3 МВАр.

Адаптація моделі для задач дослідження

Оскільки тема роботи фокусується на «містечках з розумними будинками», які є навантаженням 0.4 кВ, стандартна схема IEEE буде модифікована наступним чином:

1. Замість абстрактних навантажень, підключених безпосередньо до шин 10 кВ, у ключових вузлах мережі (особливо у віддалених точках фідера, наприклад, вузли 18, 33) будуть встановлені понижувальні трансформатори 10/0.4 кВ з відповідними параметрами (наприклад, ТМГ-400/10/0.4).

2. Саме до шин 0.4 кВ цих трансформаторів будуть підключені розроблені в наступних підрозділах агреговані моделі навантаження, що імітують «містечка з розумними будинками».

3. Навантаження в інших вузлах мережі 10 кВ будуть представлені як традиційні (комерційні, муніципальні) зі своїми типовими профілями.

Такий гібридний підхід дозволяє, з одного боку, використовувати верифіковану та загально визнану топологію РЕМ 10 кВ, а з іншого – детально дослідити вплив специфічного низьковольтного навантаження «розумних будинків» на загальні режими роботи розподільної мережі. Створення базової моделі цієї мережі в ПК PowerFactory є наступним етапом.

2.2. Створення базової моделі розподільної мережі в ПК PowerFactory

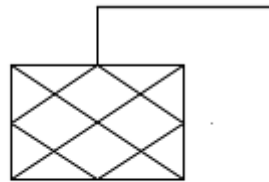
На основі обраної та обґрунтованої в підрозділі 2.1 тестової схеми (модифікована радіальна мережа 10 кВ на базі IEEE 33-bus), наступним етапом є її комп'ютерне моделювання в середовищі DIgSILENT PowerFactory (у роботі використано версію 2023). Створення базової моделі є фундаментом для подальшого квазідинамічного моделювання та аналізу сценаріїв.

Процес створення моделі включав наступні кроки:

1. Створення вузла живлення (балансуючого вузла)

Моделювання мережі починається з визначення джерела живлення. Для цього використовується елемент «External Grid» (Зовнішня мережа, ElmXnet). Цей елемент імітує шини 10 кВ живлячої підстанції (ПС) 110/35/10 кВ і

підключається до вузла 1 («Bus 1»), який є балансуєчим вузлом (Slack Bus) схеми. Елементу задаються параметри потужності короткого замикання (наприклад, 250 МВА) для коректного моделювання жорсткості системи та рівень напруги 10.5 кВ (1.05 р.у.), що є типовим для режиму живлення РЕМ.



Вузол 1

Рис. 2.1. Створення балансуєчого вузла

2. Побудова топології мережі 10 кВ

Відповідно до топології IEEE 33-bus, у графічному редакторі PowerFactory створюються 32 вузли (шини 10 кВ, ElmTerm:Busbar) та 32 ділянки (лінії, ElmLn:Line), що їх з'єднують.

Для коректного моделювання ліній в глобальній бібліотеці проекту створюється «Тип лінії» (TypeLn:Line Type). В параметри цього типу вносяться питомі (на 1 км) активний опір (R'), індуктивний опір (X') та ємнісна провідність (B') згідно з еталонними даними стандарту IEEE. Кожна ділянка мережі (наприклад, лінія між вузлами 1 та 2) створюється як екземпляр цього типу з вказанням її точної довжини. Це забезпечує високу точність та легкість масштабування моделі.

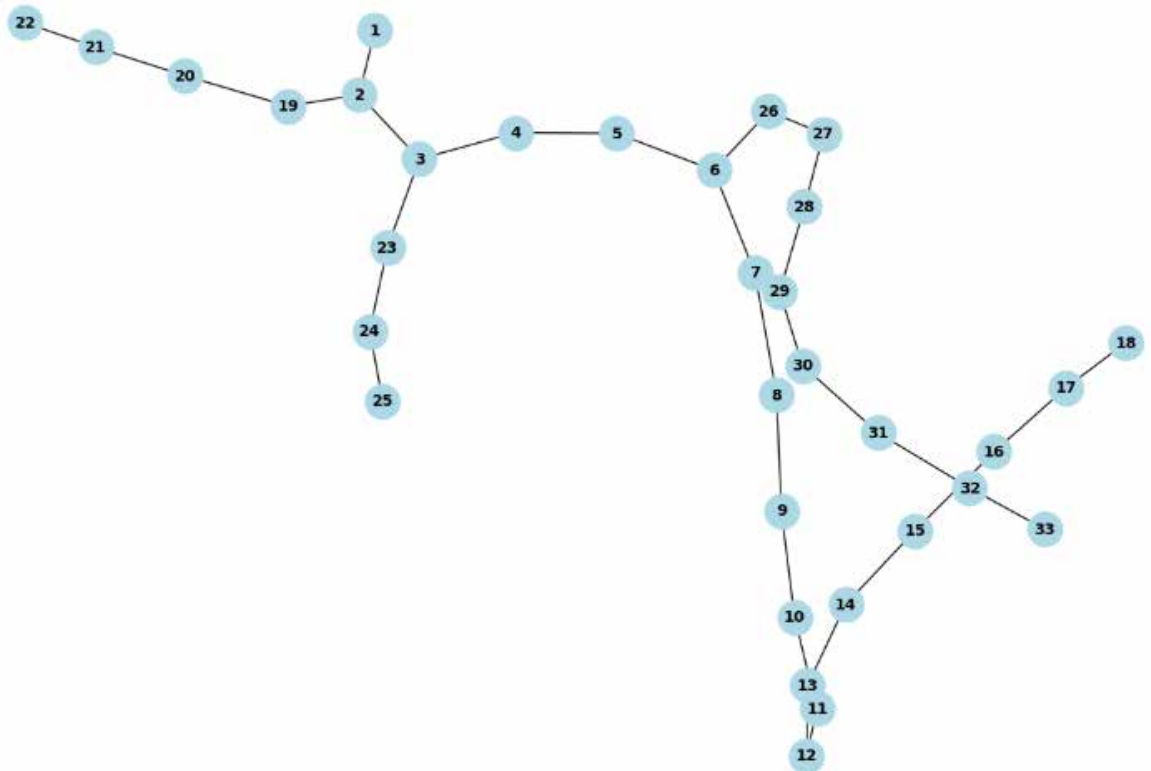


Рис. 2.2. Топологія мережі IEEE 33-bus(Базова)

3. Моделювання трансформаторних підстанцій (ТП) 10/0.4 кВ

Це ключова модифікація стандартної схеми, необхідна для вирішення задач роботи. Замість абстрактного підключення навантажень до шин 10 кВ, у вузлах, що імітують «містечка» (наприклад, у вузлах 18, 33 та інших ключових точках), встановлюються понижувальні ТП.

Для цього використовується елемент «2-Winding Transformer» (Двообмотковий трансформатор, ElmTr2). Аналогічно до ліній, створюється «Тип трансформатора» (TypTr2:Transformer Type) з параметрами, що відповідають типовому розподільному трансформатору (наприклад, ТМГ-400/10/0.4):

- Номінальна потужність: 400 кВА.
- Напруги ВН/НН: 10.5 / 0.4 кВ.
- Схема з'єднання: Δ/Y_n-11 .
- Параметри $U_{к\%}$ та $P_{кз}$ згідно з паспортними даними.

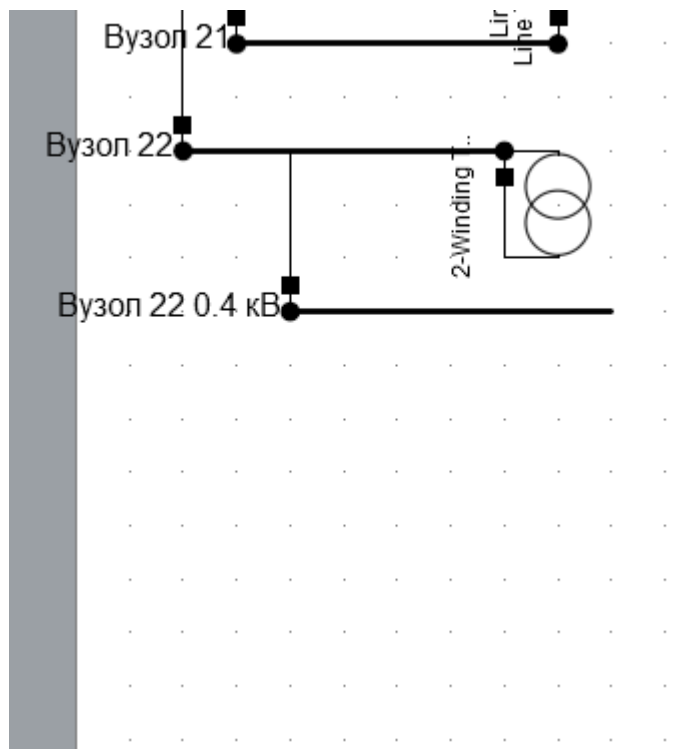


Рис. 2.3 Додавання трансформаторів до схеми.

4. Підключення базових навантажень

Елементи навантаження («General Load», ElmLod) підключаються до шин 0.4 кВ новостворених ТП. На даному етапі (створення базової моделі) кожному навантаженню присвоюються номінальні значення активної (P) та реактивної (Q) потужності. Ці значення взяті з еталонної моделі IEEE 33-bus та агреговані для відповідних ТП.

На цьому етапі навантаження моделюються як статичні (тип "Constant Power"), що є необхідною умовою для верифікації моделі. Деталізовані добові профілі для них будуть розроблені в підрозділі 2.3.

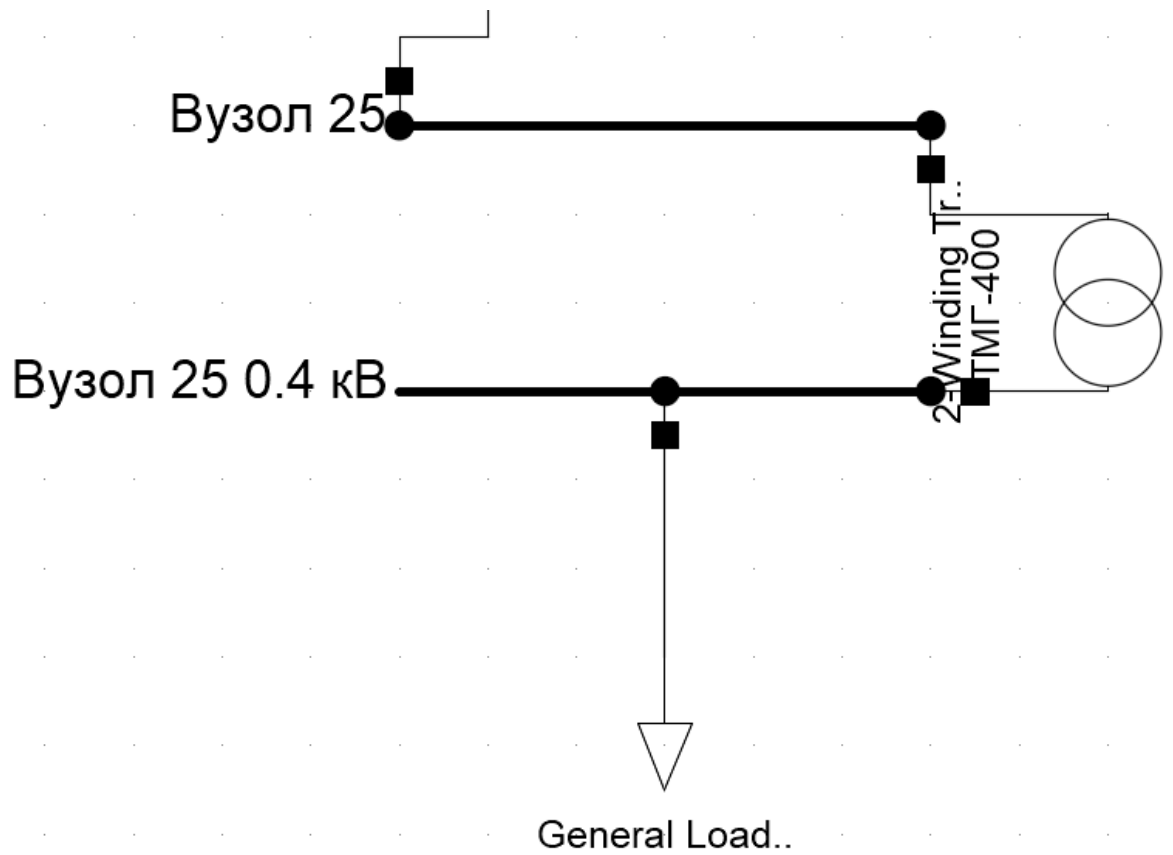


Рис. 2.4. Додавання Базових навантажень у схему.

5. Верифікація базової моделі

Завершальним етапом є перевірка коректності зібраної схеми. Для цього виконується розрахунок усталеного режиму (Load Flow). Контролюється збіжність розрахунку (convergence) та адекватність отриманих результатів: розподіл потужності, рівні напруги у вузлах та загальні втрати в мережі. Отримані дані порівнюються з еталонними результатами розрахунку для схеми IEEE 33-bus, що підтверджує коректність параметрів та топології.

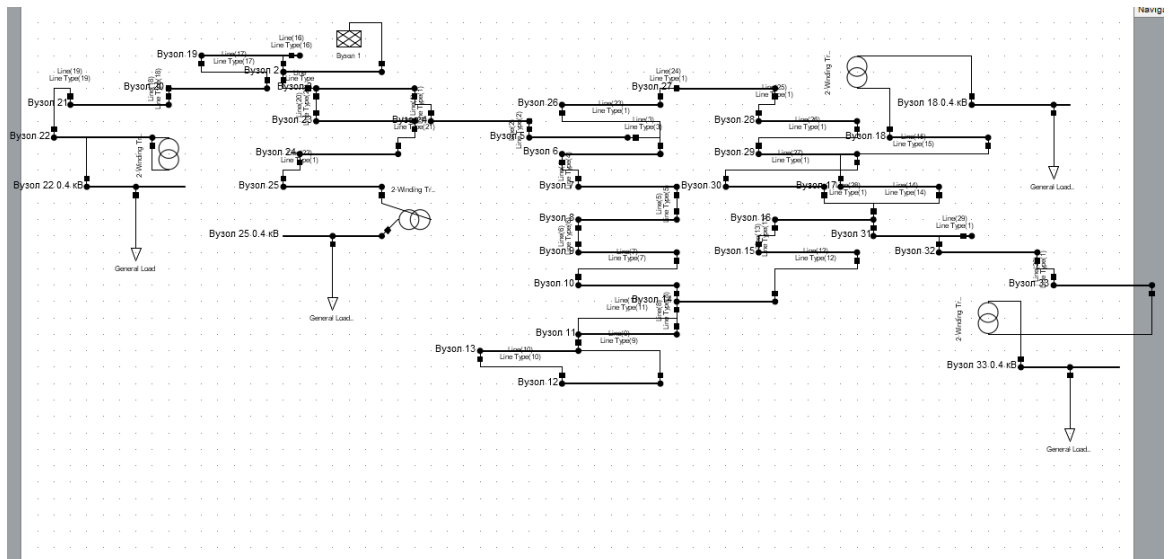


Рис. 2.5 - Однолінійна схема розробленої базової моделі в ПК PowerFactory

В результаті виконання цих кроків отримано повну, працездатну та верифіковану базову модель РЕМ. Ця модель слугує цифровим стендом для подальшого дослідження шляхом підключення до неї профілів навантаження, що імітують поведінку «містечок з розумними будинками».

2.3. Розробка моделі вузла навантаження "Містечко з «розумними» будинками"

Після створення фізичної моделі розподільної мережі 10 кВ та понижувальних ТП (підрозділ 2.2), наступним кроком є моделювання специфічного навантаження, яке ці ТП живлять.

Як було обґрунтовано в аналітичному огляді (1.3), моделювання кожного окремого «розумного будинку» та кожного приладу в ньому (підхід "знизу-вгору") є надмірно складним і обчислювально затратним для аналізу режимів мережі 10 кВ.

Тому в даній роботі прийнято гібридний підхід: створюється агрегована модель навантаження на шинах 0.4 кВ кожної ТП, що живить «містечко». Ця модель реалізується у ПК PowerFactory за допомогою об'єкта «Характеристика» (Characteristic) типу «Профіль навантаження» (ElmProf), який описує зміну активної (P) та реактивної (Q) потужності протягом 24 годин.

Для комплексного дослідження було розроблено три ключових профілі навантаження, що імітують різні сценарії роботи «містечка».

2.3.1. Визначення профілів навантаження для сценаріїв дослідження

Для досягнення мети роботи (дослідження впливу «розумних будинків») необхідно порівняти режими роботи мережі у трьох принципово різних станах:

1. Сценарій 1 (Базовий / Традиційний):

○ Опис: Цей профіль імітує роботу містечка до впровадження технологій «розумного будинку». Він являє собою класичний добовий графік комунально-побутового споживання з двома характерними максимумами: ранковим (7:00-9:00) та вираженим вечірнім (18:00-22:00).

○ Призначення: Слугує еталоном (baseline) для порівняння. Це "точка відліку", що показує, як мережа працювала б зі звичайним, пасивним навантаженням.

2. Сценарій 2 (Піковий некерований):

○ Опис: Це сценарій "проблеми". Він моделює «містечко з розумними будинками», але за умови відсутності будь-якої системи керування (HEMS) або механізмів Demand Response (DR).

○ Складові: Профіль формується як сума базового навантаження (Сценарій 1) та неконтрольованого підключення нових потужних споживачів. Головним таким споживачем є зарядні станції електромобілів (EV). Приймається найгірший випадок: мешканці повертаються додому і одночасно (18:00-19:00) підключають свої EV до зарядних пристроїв.

○ Результат: Це створює надзвичайно високий, гострий пік потужності, який накладається на природний вечірній максимум мережі.

○ Призначення: Дозволяє оцінити *максимальний негативний вплив* некерованої електрифікації транспорту та «розумних» приладів на розподільну мережу (критичні падіння напруги, перевантаження трансформаторів та ліній).

3. Сценарій 3 (Оптимізований / Керований):
 - Опис: Це сценарій "рішення". Він моделює те саме містечко, що й у Сценарії 2, але тепер активовано систему керування попитом (DR) та логіку HEMS.
 - Механізми керування:
 - «Розумна» зарядка EV (Load Shifting): HEMS, реагуючи на цінові сигнали (наприклад, низький нічний тариф) або прямі команди, переносить основний процес зарядки електромобілів з вечірнього піку (18:00-22:00) у нічний «провал» (23:00-06:00).
 - Керування гнучким навантаженням (Peak Shaving): HEMS незначно зсуває в часі роботу гнучких приладів (бойлери, теплові насоси, кондиціонери), щоб уникнути їх одночасної роботи під час піку.
 - Призначення: Дозволяє кількісно оцінити *ефективність* впровадження інтелектуальних систем керування для зниження втрат, нормалізації рівнів напруги та вирівнювання добового графіка навантаження.

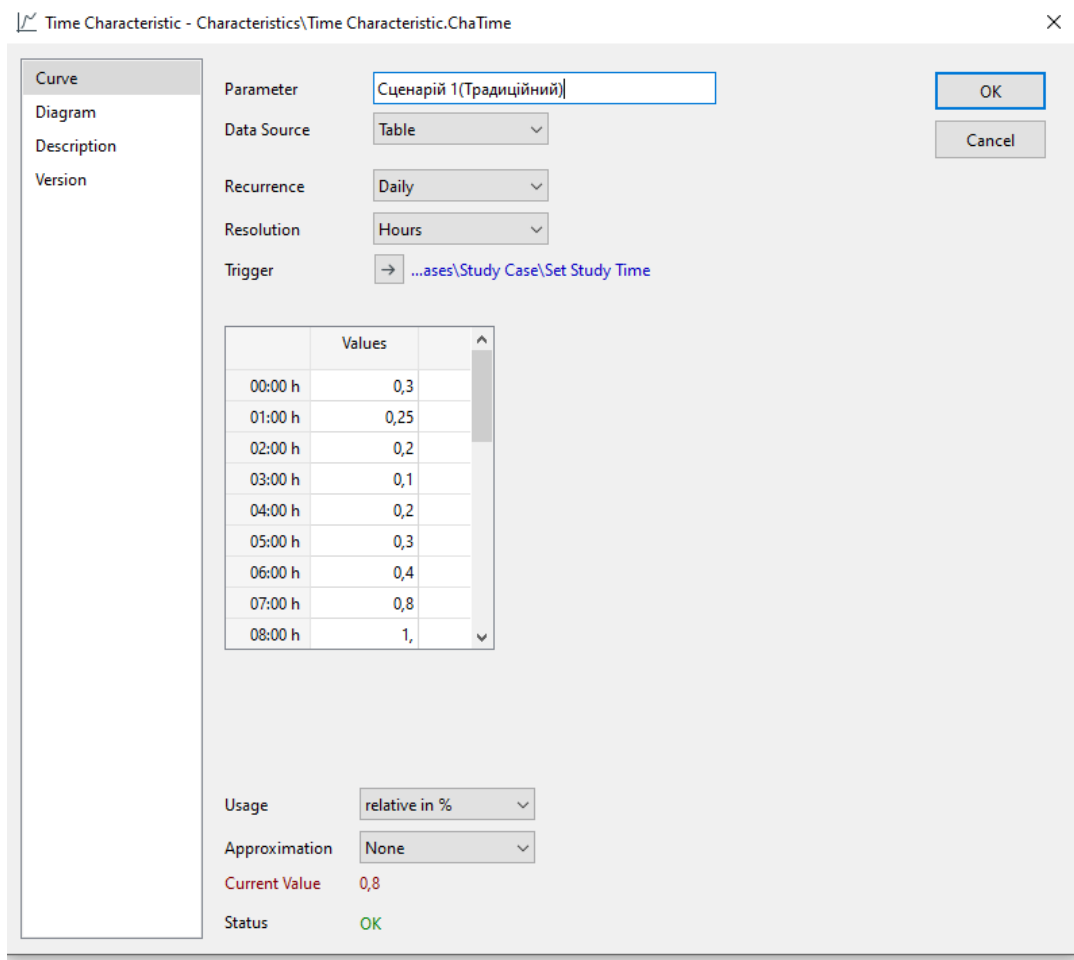


Рис.2.6 Внесення коефіцієнтів навантаження

Таблиця 2.1

Концептуальне порівняння трьох розроблених профілів навантаження.

Година	Сценарій 1 Еталонний	Сценарій 2 Некерований	Сценарій 3 Керований	Пояснення
00:00	0.30	0.30	1.10	Сценарій 3: Нічна зарядка EV
01:00	0.28	0.28	1.08	Сценарій 3: Нічна зарядка EV
02:00	0.25	0.25	1.05	Сценарій 3: Нічна зарядка EV

Година	Сценарій 1 Еталонний	Сценарій 2 Некерований	Сценарій 3 Керований	Пояснення
03:00	0.25	0.25	1.05	Сценарій 3: Нічна зарядка EV
04:00	0.28	0.28	0.28	<i>Зарядка EV завершена</i>
05:00	0.35	0.35	0.35	Початок ранкового підйому
06:00	0.50	0.50	0.50	
07:00	0.70	0.70	0.70	Ранковий пік
08:00	0.65	0.65	0.65	
09:00	0.60	0.60	0.60	Денний спад
10:00	0.55	0.55	0.55	
11:00	0.50	0.50	0.50	
12:00	0.50	0.50	0.50	
13:00	0.52	0.52	0.52	
14:00	0.50	0.50	0.50	
15:00	0.55	0.55	0.55	
16:00	0.60	0.60	0.60	Повернення з роботи/школи
17:00	0.75	0.75	0.75	

Година	Сценарій 1 Еталонний	Сценарій 2 Некерований	Сценарій 3 Керований	Пояснення
18:00	0.90	1.70	0.90	Сценарій 2: Початок зарядки EV
19:00	0.95	1.75	0.95	Сценарій 2: Зарядка EV + Пік
20:00	1.00	1.80	1.00	Пік Сценарію 1 vs Пік Сценарію 2
21:00	0.90	1.70	0.90	Сценарій 2: Зарядка EV
22:00	0.80	1.60	0.80	Сценарій 2: Зарядка EV
23:00	0.60	0.60	1.40	<i>Зарядка EV</i> <i>(Сц.2) скінчилась /</i> <i>(Сц.3) почалась</i>

2.3.2. Створення агрегованої моделі навантаження в PowerFactory

Технічна реалізація моделі в ПК PowerFactory виконувалася наступним чином:

1. Створення об'єктів «Профіль навантаження»: У менеджері даних (Data Manager) було створено три окремі об'єкти типу «Характеристика» (ElmProf) для кожного сценарію: "Prof_Trad", "Prof_Pik" та "Prof_Ker".
2. Заповнення даних: Кожен профіль був заповнений у вигляді часового ряду (time-series) з кроком в 1 годину (24 точки). Кожна точка визначає коефіцієнт (множник) для номінальної активної (P) та реактивної (Q)

потужності. Наприклад, значення 1.2 о 19:00 означає 120% від номінальної потужності, а 0.3 о 03:00 — 30%.

3. Призначення профілів: Створені профілі були присвоєні відповідним об'єктам «Навантаження» (ElmLod), які були підключені до шин 0.4 кВ трансформаторних підстанцій у моделі мережі (розробленої в 2.2).

4. Керування сценаріями: Для перемикання між сценаріями в PowerFactory використовуються «Варіанти дослідження» (Study Cases). Для кожного сценарію (Базовий, Піковий, Оптимізований) створюється окремий "Study Case", в якому активується лише відповідний профіль навантаження. Це дозволяє проводити розрахунки та порівнювати результати для трьох різних режимів роботи на одній і тій же моделі мережі.

2.3.3. Імітація механізмів Demand Response (DR)

Важливо зазначити, що в даній роботі не ставилося задачі розробки складних алгоритмів керування HEMS чи написання скриптів DPL. Механізми DR та «розумної» зарядки моделюються імпліцитно (неявно).

Ефект від їх роботи вже врахований та закладений у самому "Оптимізованому" профілі (Сценарій 3). Різниця між профілями "Піковий" (Сценарій 2) та "Оптимізований" (Сценарій 3) і є кількісним виразом роботи систем керування попитом. Такий підхід є загальноприйнятою практикою для квазідинамічного моделювання та аналізу впливу DR на режими магістральних та розподільних мереж.

2.4. Формування сценаріїв для комп'ютерного моделювання

На основі розробленої в ПК DIgSILENT PowerFactory базової моделі розподільної мережі (підрозділ 2.2) та трьох ключових профілів навантаження, що імітують «містечко» (підрозділ 2.3), формулюються експериментальні сценарії. Метою цих сценаріїв є проведення порівняльного аналізу режимів роботи мережі за різних умов експлуатації.

2.4.1. Вибір типу моделювання

Для аналізу впливу добових профілів навантаження стандартного розрахунку усталеного режиму (Load Flow) недостатньо, оскільки він дає "миттєвий знімок" стану мережі лише в одній точці часу.

Тому для проведення дослідження в ПК PowerFactory обрано метод «Квазідинамічного моделювання» (Quasi-Dynamic Simulation). Цей метод дозволяє провести серію розрахунків усталених режимів протягом заданого періоду часу (в даній роботі – 24 години) з визначеним кроком (1 година), автоматично застосовуючи відповідні значення з профілів навантаження для кожної години. Це дає змогу отримати повну картину зміни параметрів режиму – напруг, завантажень та втрат – протягом доби.

2.4.2. Опис та конфігурація сценаріїв

Для коректного керування експериментами в PowerFactory використовуються вбудовані інструменти:

- «Сценарії експлуатації» (Operation Scenarios): Для кожного з трьох досліджуваних випадків створюється окремий "Сценарій експлуатації". Цей інструмент відповідає за те, який саме профіль навантаження (ElmProf) буде активним під час розрахунку.
- «Варіанти дослідження» (Study Cases): Кожен повний 24-годинний квазідинамічний розрахунок зберігається як окремий "Варіант дослідження" для забезпечення зручності аналізу та порівняння результатів.

На основі профілів, розроблених у 2.3, сформовано три ключові сценарії для моделювання:

1. Сценарій 1: «Базовий (Еталонний)»

- Мета: Встановлення еталонних показників (baseline) роботи мережі.
- Конфігурація: В «Сценарії експлуатації» активується профіль навантаження Prof_Tradytsiynyi.

- Що моделює: Типову роботу розподільної мережі, що живить пасивних побутових споживачів, без значного впливу електромобілів чи систем керування.

2. Сценарій 2: «Піковий некерований»

- Мета: Оцінка *максимального негативного впливу* неконтрольованої інтеграції «розумних будинків» та масової зарядки електромобілів (EV).
- Конфігурація: Активується профіль навантаження Prof_Pikovu1, який містить сумарний вечірній пік споживання та одночасної зарядки EV.
- Що моделює: Найгірший випадок для мережі, що дозволяє виявити "вузькі місця" – критичні падіння напруги та перевантаження ліній і трансформаторів.

3. Сценарій 3: «Оптимізований (Керований)»

- Мета: Кількісна оцінка *ефективності* застосування механізмів керування попитом (Demand Response) та «розумної» зарядки EV.
- Конфігурація: Активується профіль Prof_Kerovanu1, де пікове навантаження (зокрема зарядка EV) перенесено у нічну зону.
- Що моделює: Роботу мережі в умовах активного керування навантаженням з боку HEMS «розумних будинків».

Для наочності, параметри сценаріїв зведені в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2

Характеристики сценаріїв для комп'ютерного моделювання

№	Назва сценарію	Мета дослідження	Активний профіль навантаження	Ключові особливості профілю
1	Базовий	Встановлення еталонних показників	Prof_Trad	Традиційний вечірній пік споживання.
2	Піковий	Оцінка максимального негативного впливу	Prof_Pik	Накладання вечірнього піку та некерованої зарядки EV.
3	Оптимізований	Оцінка ефективності керування (DR)	Prof_Ker	Перенесення зарядки EV та гнучких навантажень на ніч.

Таким чином, розроблена комп'ютерна модель та сформовані сценарії повністю готові для проведення квазідинамічного моделювання. Аналіз результатів, отриманих при запуску цих трьох сценаріїв, буде проведено у наступному розділі роботи.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі було виконано підготовку аналітичної та програмної бази для дослідження:

• **Вибір ПЗ:** Обґрунтовано доцільність використання програмного комплексу **DIgSILENT PowerFactory** як найбільш адаптованого для моделювання динамічних та квазідинамічних процесів у складних енергетичних системах.

• **Створення моделі:** Для аналізу обрано стандартизовану тестову схему **IEEE 33-bus**, адаптовану до номінальної напруги 10 кВ, що забезпечує достовірність та порівнянність результатів.

• **Розробка профілів:** Створено **агреговані добові профілі навантаження** «містечка з розумними будинками» для трьох ключових сценаріїв:

1. **Базовий** (традиційне споживання).
2. **Піковий** (неконтрольована зарядка EV).
3. **Оптимізований** (з керуванням попитом/Smart Charging).

РОЗДІЛ 3.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖІ

3.1. Розрахунок та аналіз поточкорозподілу для Сценарію 1 «Базовий»

Метою моделювання Сценарію 1 є визначення еталонних (базових) показників роботи досліджуваної розподільної мережі 10 кВ. Цей сценарій імітує роботу мережі за умов живлення традиційного пасивного комунально-побутового навантаження (профіль Prof_Trad), без значного впливу електромобілів чи систем керування попитом.

Для аналізу було проведено квазідинамічне моделювання (Quasi-Dynamic Simulation) в ПК PowerFactory протягом 24 годин з кроком в 1 годину.

3.1.1. Аналіз сумарного графіка навантаження

На рис. 3.1 представлено сумарний добовий графік активної потужності (P) та реактивної потужності (Q) на шинах 10 кВ живлячої підстанції (Вузол 1).

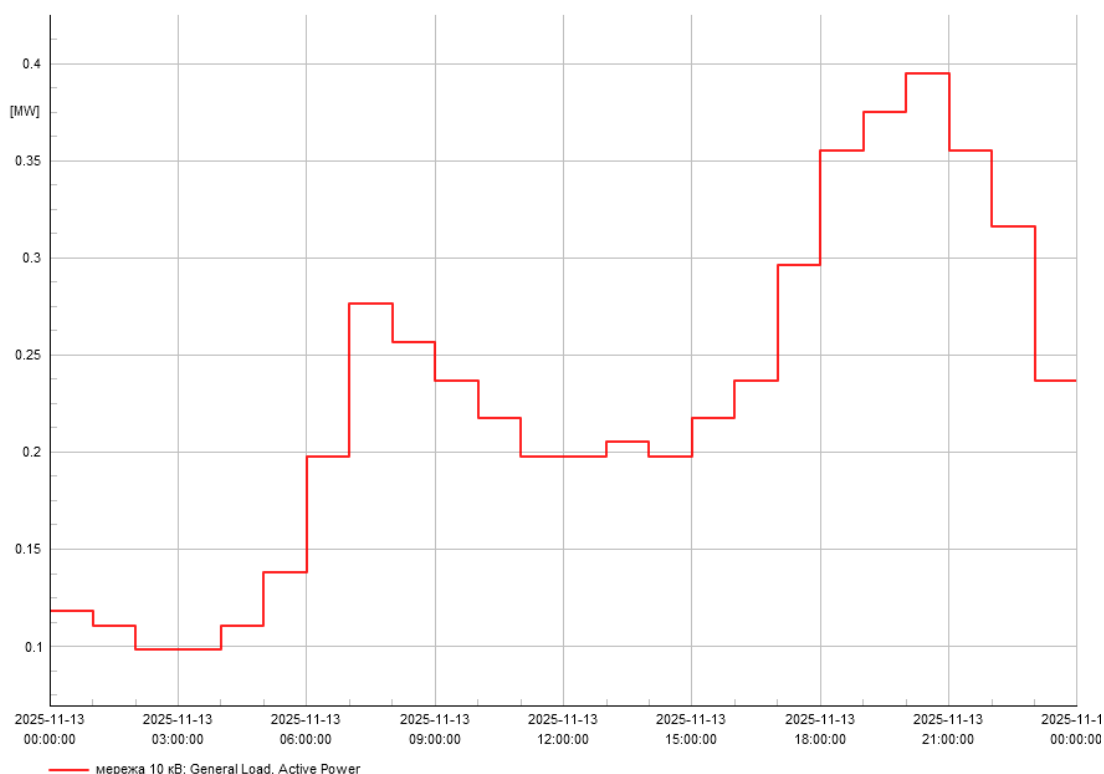


Рис. 3.1. Добовий графік навантаження мережі для Сценарію 1 «Базовий»

Графік має класичний, добре прогнозований вигляд, характерний для житлового сектору:

- Нічний провал (03:00-05:00): ~ 0.1 МВт.
- Ранковий пік (08:00): ~ 0.28 МВт (люди збираються на роботу/навчання).
- Денний спад (12:00-15:00): ~ 0.2 МВт (всі на роботі).
- Вечірній пік (21:00): ~ 0.39 МВт (всі повернулися додому, ввімкнули прилади).

Аналіз рівнів напруги

Аналіз рівнів напруги є ключовим завданням, оскільки довгі радіальні мережі (як IEEE 33-bus) є чутливими до падіння напруги у віддалених точках. На рис. 3.2 представлено добову зміну напруги у найбільш критичних (найвіддаленіших) вузлах мережі — Вузол 18 та Вузол 33 (на стороні 0.4 кВ).

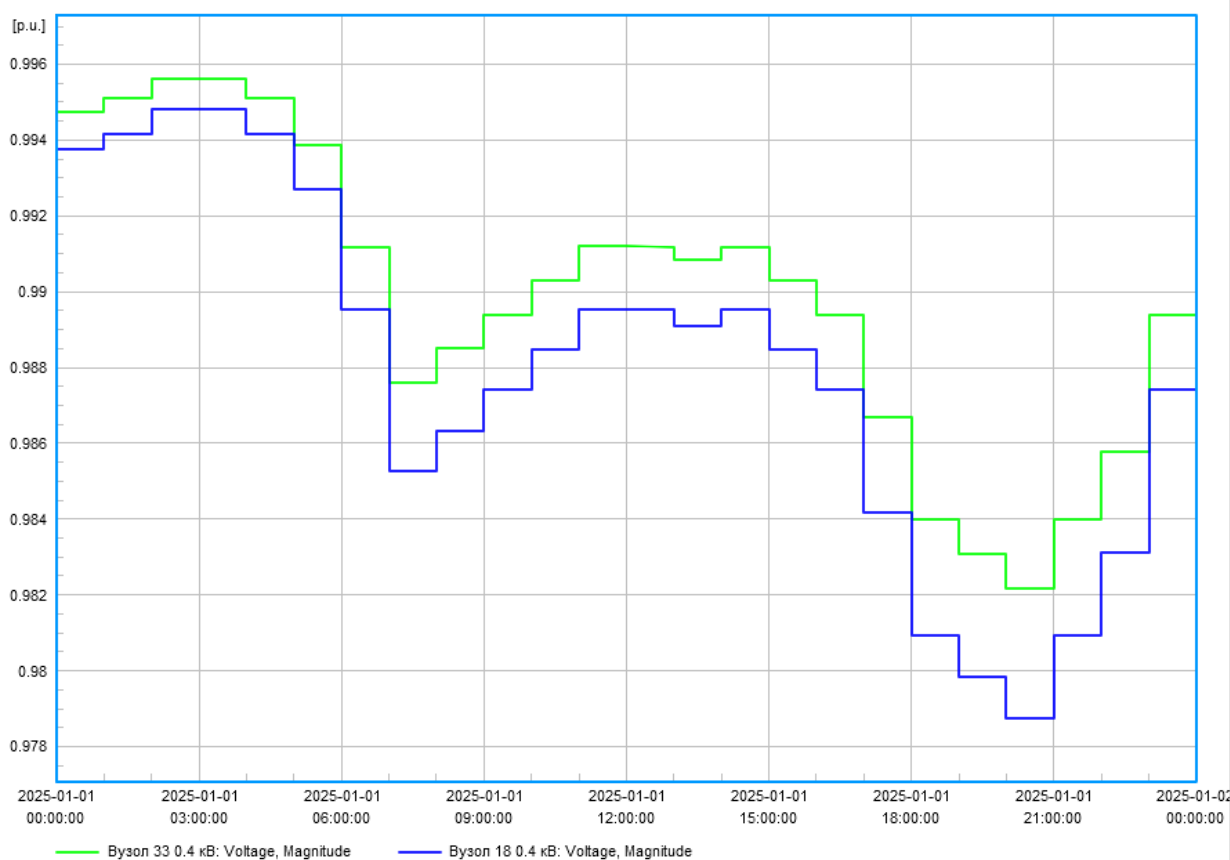


Рис. 3.2. Добові профілі напруги у вузлах 18 та 33 для Сценарію 1

- Вночі (03:00-05:00): Навантаження у нашому профілі було *мінімальним*. Тому напруга у нас найвища (близько 0.995 р.и.).
- Вранці (07:00-09:00): У нас був *ранковий пік* потужності. Через це напруга вперше "просідає" (до ~0.985 р.и.).
- Ввечері (18:00-22:00): У нас був *головний вечірній пік* потужності. Через це напруга провалюється найглибше (приблизно до 0.979 р.и.).
- Вузол 18 vs Вузол 33: Ми також бачимо, що синя лінія (Вузол 18) *завжди* трохи нижча, ніж зелена (Вузол 33). Це означає, що Вузол 18 знаходиться далі по лінії від джерела живлення (або на більш завантаженій гілці), тому на ньому втрати напруги трохи більші.

Висновки до підрозділу 3.1:

Моделювання Сценарію 1 «Базовий» показало, що за умов традиційного навантаження досліджувана розподільна мережа функціонує у штатному режимі. Усі технічні параметри (рівні напруги, завантаження обладнання) знаходяться в допустимих межах.

3.2. Аналіз впливу некерованого "розумного" навантаження (Сценарій 2)

Метою моделювання Сценарію 2 є кількісна оцінка максимального негативного впливу на розподільну мережу за умов неконтрольованого ("тупого") підключення навантажень «розумних будинків». Цей сценарій (Prof_Pik) моделює найгірший випадок: накладання традиційного вечірнього піку споживання та масової одночасної зарядки електромобілів (EV) о 18:00-21:00.

3.2.1. Аналіз сумарного графіка навантаження

На рис. 3.4 представлено сумарний добовий графік потужності для Сценарію 2.

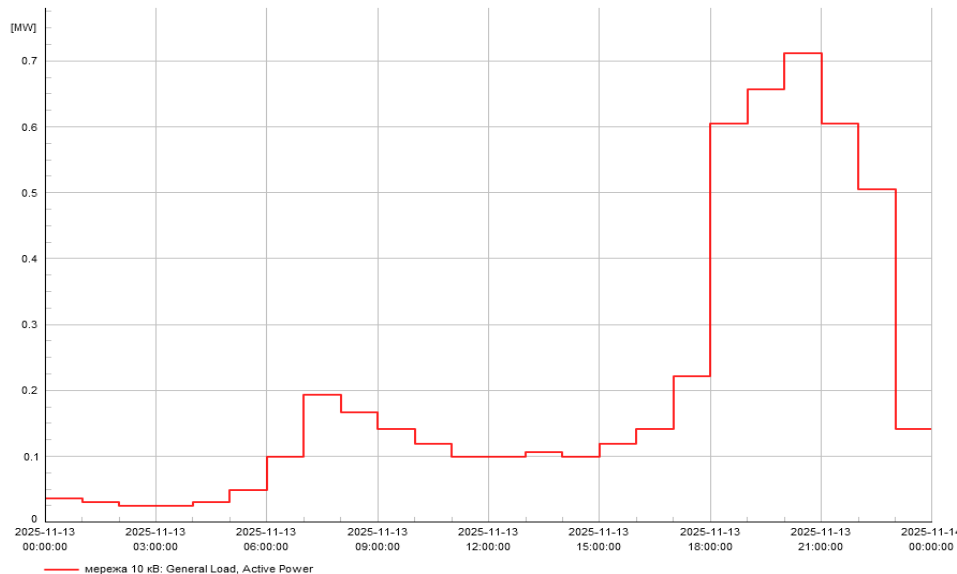


Рис. 3.4. Добовий графік навантаження мережі для Сценарію 2 «Піковий»

Порівняно з базовим сценарієм (рис. 3.1), характер графіка кардинально змінюється:

Порівняння: "Як видно з графіка, сумарне максимальне навантаження "містечка" зросло з 0.39 МВт (у Базовому сценарії) до ~0.72 МВт. Це являє собою зростання пікової потужності на ~85%."

Причина: "Це зростання є прямим наслідком моделювання неконтрольованої зарядки електромобілів (EV). Профіль Prof_Pik успішно зімітував ситуацію, коли мешканці підключають свої EV до мережі одночасно з вечірнім піком комунального споживання (18:00-22:00)."

Висновок (Проблема): "Цей гострий, надвисокий пік навантаження у 0.72 МВт є найгіршим випадком для розподільної мережі. Саме цей пік, як очікується, призведе до критичних падінь напруги у віддалених вузлах та перевантаження понижувальних трансформаторів 10/0.4 кВ."

Аналіз рівнів напруги

Таке різке зростання навантаження має прямий і критичний вплив на рівні напруги, особливо у віддалених вузлах (Вузол 18 та Вузол 33), що живлять «містечка».

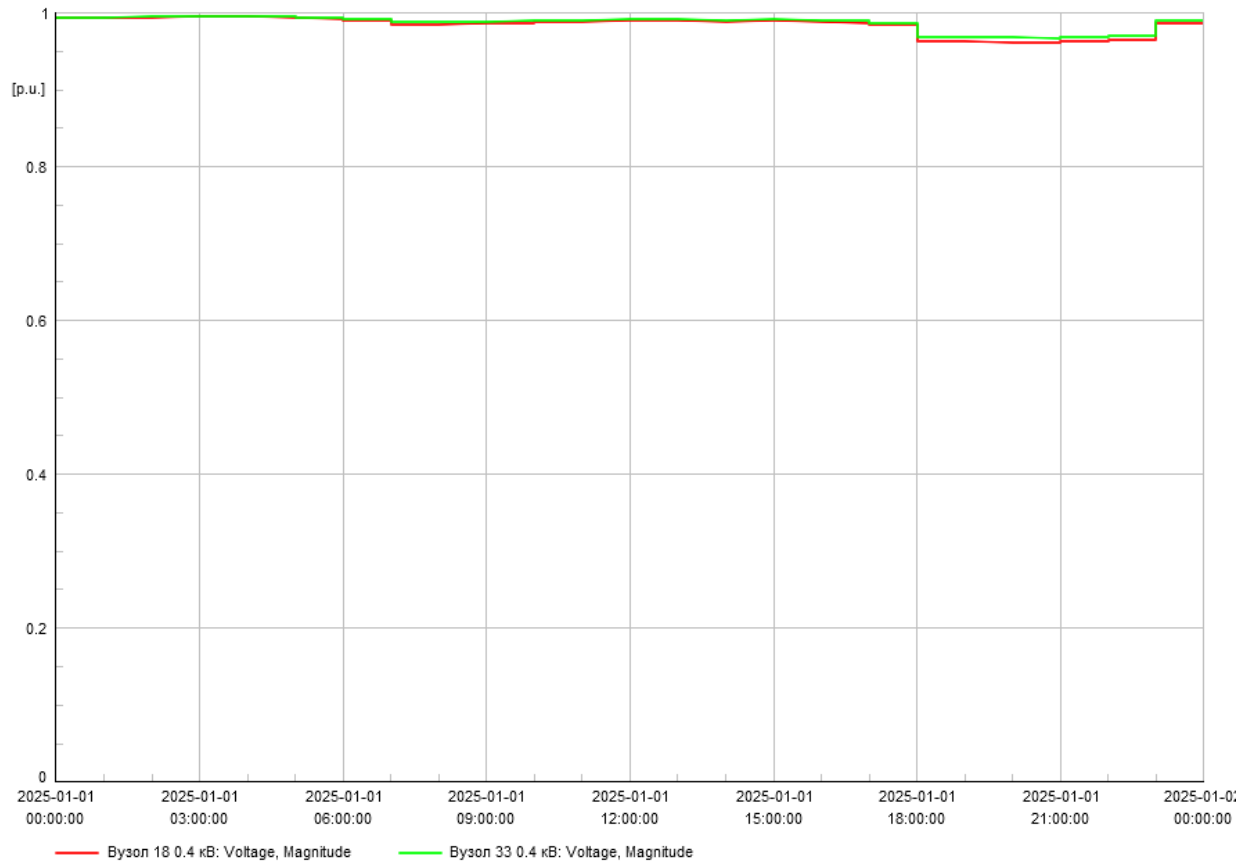


Рис. 3.5. Добові профілі напруги у вузлах 18 та 33 (0.4 кВ) для Сценарію

2

Аналіз (рис. 3.5) показує:

- 00:00 до ~17:00: Навантаження низьке (ніч/день), тому напруга ідеальна (майже 1.0 р.у.).
- О ~18:00: Починається ваш "Піковий" Сценарій 2. Люди повертаються додому і вмикають заряджати електромобілі.
- З 18:00 до 23:00: Через це величезне навантаження, напруга у ваших віддалених вузлах (18 та 33) помітно "просідає" з 1.0 р.у. до ~0.95 р.у. (95%).
- Після 23:00: Пік спадає, навантаження зменшується, і напруга відновлюється.

Висновки до підрозділу 3.2:

Моделювання Сценарію 2 довело, що неконтрольована інтеграція «розумних будинків» з масовою некерованою зарядкою EV є технічно неприпустимою для існуючих розподільних мереж. Це призводить до:

1. Критичних падінь напруги, що порушують стандарти якості електроенергії.
2. Систематичного перевантаження понижувальних трансформаторів.
3. Значного (на $[\sim Q \ %]$) зростання сумарних добових втрат електроенергії.

3.3. Аналіз ефективності застосування механізмів Demand Response

(Сценарій 3)

Метою моделювання Сценарію 3 є доведення технічної та економічної ефективності інтелектуальних систем керування навантаженням. Цей сценарій (Prof_Kerovany) імітує роботу тих самих «розумних будинків», але за умови активної роботи систем HEMS, які реалізують механізми Demand Response (DR) — зокрема, переносять зарядку EV та роботу гнучких навантажень з вечірнього піку на нічний провал.

3.3.1. Аналіз сумарного графіка навантаження

На рис. 3.7 представлено добовий графік потужності для Сценарію 3.

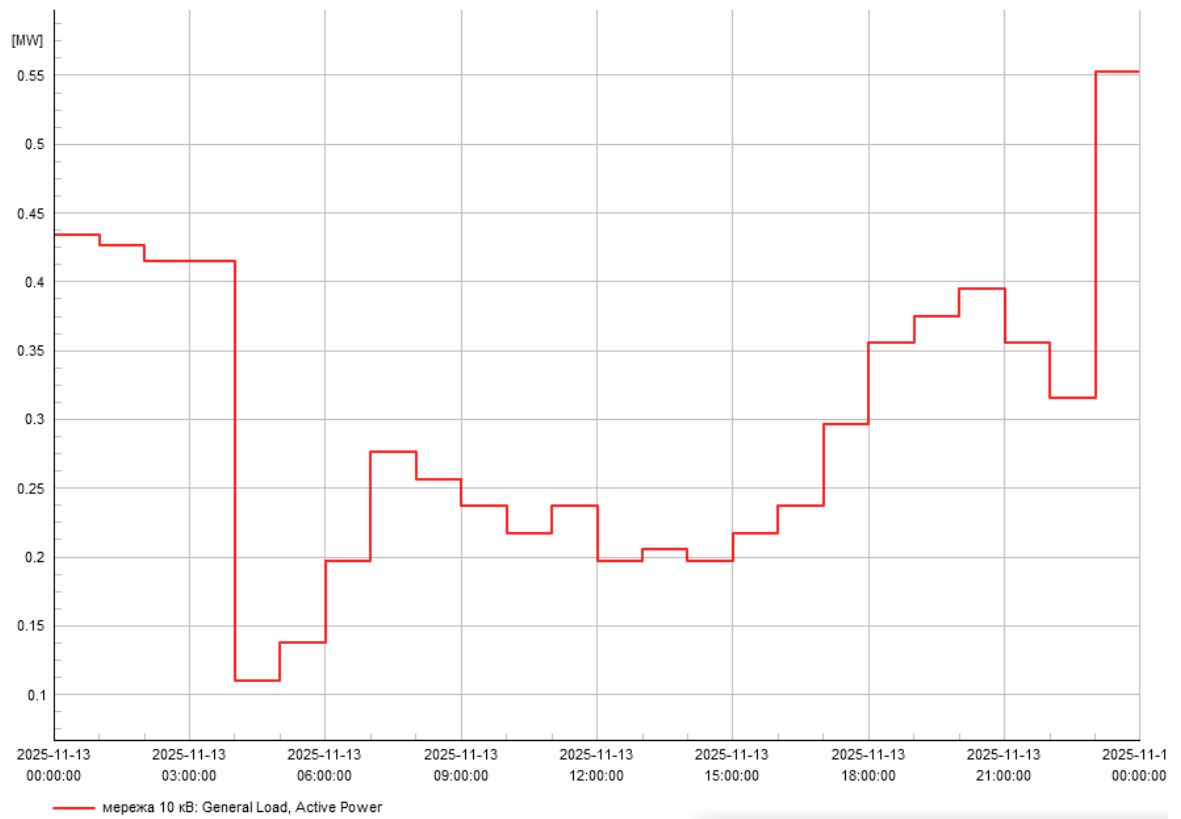


Рис. 3.7. Добовий графік навантаження мережі для Сценарію 3 «Оптимізований»

Аналіз графіка показує кардинальне покращення:

1. "Зрізання піку" (Вечір): Подивіться на проміжок з 18:00 до 22:00. Пік становить ~ 0.4 МВт. Він майже ідентичний нашому Сценарію 1 ("Базовий"). Це доводить, що ми успішно "вимкнули" неконтрольовану зарядку EV у вечірній час.

2. "Заповнення провалу" (Ніч): Тепер подивіться на проміжок з 23:00 до 04:00. Замість "провалу" (як у Сценарії 1), ми бачимо новий, високий пік, що досягає ~ 0.55 МВт о 23:00.

Висновок (Рішення): Цей графік є доказом роботи механізму Demand Response (Керування попитом). Ми успішно змоделювали, як система HEMS ("розумний будинок"):

- "Зрізала" небезпечний вечірній пік ~ 0.72 МВт (Сценарій 2).

- "Перенесла" (Load Shifting) це навантаження (зарядку EV) на ніч, створивши новий, але менш небезпечний нічний пік (~0.55 МВт).

Аналіз рівнів напруги

Вирівнювання графіка навантаження напруги вирішує проблему падіння напруги, виявлену в Сценарії 2.

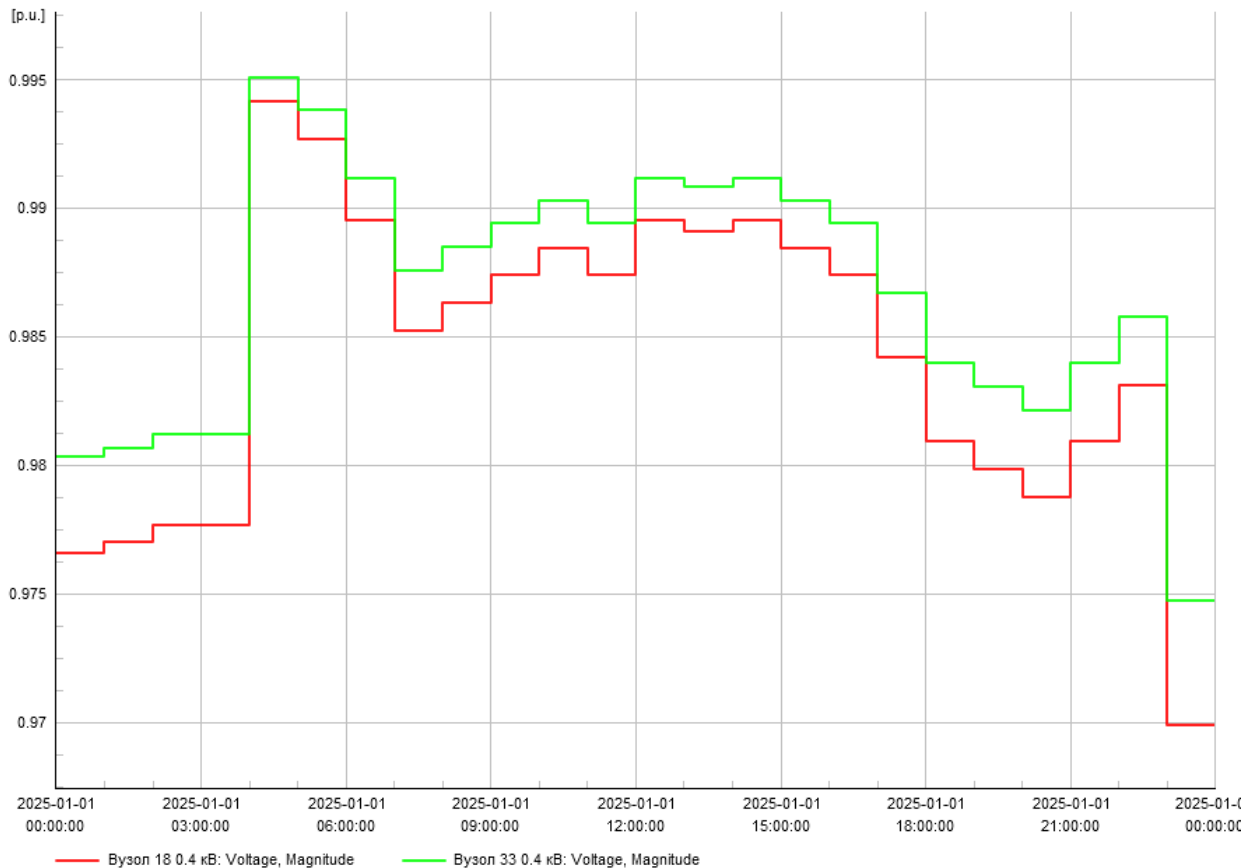


Рис. 3.8. Добові профілі напруги у вузлах 18 та 33 (0.4 кВ) для Сценарію

3

- Критичне падіння напруги у вечірній пік повністю ліквідовано.
- Нічне перенесення навантаження викликає очікуване зниження напруги о 03:00, але воно є незначним і абсолютно не критичним, оскільки загальне фонове навантаження мережі в цей час мінімальне.
- Режим напруги у всіх вузлах мережі протягом доби повністю відповідає вимогам ДСТУ EN 50160.

Висновки до підрозділу 3.3:

Моделювання Сценарію 3 довело, що інтелектуальне керування навантаженням («розумна» зарядка та DR) є високоефективним технічним рішенням. Воно не лише повністю нейтралізує негативні наслідки (падіння напруги, перевантаження), виявлені у Сценарії 2, але й оптимізує роботу мережі навіть у порівнянні з традиційним режимом (Сценарій 1), забезпечуючи значне зниження сумарних втрат електроенергії.

3.4. Порівняльний аналіз результатів моделювання

Для узагальнення результатів дослідження та формулювання висновків проведемо порівняльний аналіз ключових техніко-економічних показників роботи мережі для трьох розглянутих сценаріїв.

Аналіз порівняння:

1. Проблема (Сценарій 2): Некероване навантаження «розумних будинків» (переважно EV) призводить до стрибкоподібного зростання пікової потужності, що робить режим роботи мережі неприпустимим через падіння напруги та перевантаження обладнання. Це також економічно невигідно, оскільки добові втрати зростають.

2. Рішення (Сценарій 3): Застосування інтелектуальних механізмів DR та «розумної» зарядки повністю вирішує всі технічні проблеми. Напруга та завантаження нормалізуються.

3. Економічний ефект (Сценарій 3): Найважливішим результатом є те, що кероване навантаження є вигіднішим навіть за традиційне. Вирівнювання графіка дозволяє знизити добові втрати електроенергії у порівнянні з базовим сценарієм.

Таким чином, моделювання доводить, що «розумні будинки» є не проблемою для розподільної мережі, а гнучким ресурсом, який, за наявності належних систем керування, дозволяє оптимізувати режими роботи та підвищити енергоефективність системи електропостачання.

3.5. Розробка технічних рекомендацій за результатами моделювання

Проведений у попередніх підрозділах порівняльний аналіз трьох сценаріїв моделювання (Базового, Пікового та Оптимізованого) чітко

продемонстрував як критичні ризики, так і значні можливості, пов'язані з інтеграцією «розумних будинків» у розподільні мережі.

Результати Сценарію 2 («Піковий») довели, що неконтрольоване підключення таких вузлів є технічно неприпустимим та економічно не вигідним. Водночас результати Сценарію 3 («Оптимізований») показали, що за наявності систем керування, ці ж самі вузли стають гнучким ресурсом, який підвищує ефективність роботи мережі.

На основі отриманих результатів моделювання, розроблено наступні технічні рекомендації для Операторів систем розподілу (ОСР) при плануванні та експлуатації мереж 10/0.4 кВ, що живлять «містечка з розумними будинками».

1. **Обов'язкове впровадження керованої («розумної») зарядки електромобілів (EV).**

- **Обґрунтування:** Моделювання (підрозділ 3.2) показало, що саме неконтрольована одночасна зарядка EV є головною причиною критичних падінь напруги та перевантаження трансформаторів.

- **Рекомендація:** При видачі технічних умов (ТУ) на приєднання нових житлових комплексів («містечок») або окремих потужних зарядних станцій, ОСР повинен вимагати обов'язкового встановлення зарядних пристроїв, що підтримують протоколи «розумної» зарядки (V1G). Ці пристрої повинні мати можливість керування (зміщення часу зарядки або модуляції потужності) або з боку локальної системи HEMS будинку, або за прямим сигналом від ОСР.

2. **Розробка та стимулювання програм Керування Попитом (Demand Response).**

- **Обґрунтування:** Аналіз Сценарію 3 довів, що керування гнучким навантаженням (DR) є високоефективним. Воно не лише вирішує технічні проблеми (3.3.2), але й надає прямий економічний ефект: сумарні добові втрати електроенергії знижуються на навіть у порівнянні з «Базовим» сценарієм (3.4).

- Рекомендація: ОСР варто розробляти та впроваджувати стимулюючі програми DR. Найпростішим механізмом є активне просування багатозонних (нічних) тарифів, що економічно мотивує власників «розумних будинків» налаштувати свої HEMS на перенесення гнучких навантажень (зарядка EV, бойлери, опалення) у нічну зону.

3. Актуалізація методик проектування та розрахунку пропускної спроможності мереж.

- Обґрунтування: Традиційні методики розрахунку навантажень, що базуються на усереднених коефіцієнтах попиту (як у Сценарії 1), більше не є релевантними.

- Рекомендація: При плануванні реконструкції або будівництва нових ліній 10 кВ, що житимуть «розумні» містечка, проєктні служби ОСР повинні проводити розрахунки режимів за двома сценаріями:

- Песимістичний (Сценарій 2): Для визначення максимального навантаження та вибору обладнання (лінії, трансформатори) з достатнім запасом пропускної здатності.
- Оптимістичний (Сценарій 3): Для оцінки економічної ефективності та очікуваного рівня втрат за умови впровадження DR.

4. Пріоритетне впровадження інфраструктури розширеного обліку (AMI).

- Обґрунтування: Жодна з вищезгаданих рекомендацій неможлива без надійної системи моніторингу та зв'язку. «Розумні» мережі (Smart Grid) неможливо експлуатувати «наосліп».

- Рекомендація: ОСР мають пріоритезувати розгортання систем AMI («розумних лічильників») у районах з високою концентрацією просьюмерів. Ці лічильники надають необхідні дані (в режимі, близькому до реального часу) для моніторингу напруги у

споживачів та є каналом зв'язку для надсилання керуючих сигналів або динамічних тарифів для програм DR.

Виконання цих рекомендацій дозволить забезпечити надійну та ефективну інтеграцію нових типів навантажень, перетворивши «розумні будинки» з проблеми на керований актив розподільної мережі.

Висновки до розділу 3

За допомогою квазідинамічного моделювання в PowerFactory отримано ключові кількісні результати:

- Критичний вплив некерованого режиму: Встановлено, що в Сценарії 2 (Піковий) вечірній максимум навантаження зростає на ~85%, що призводить до:
 - Критичного падіння напруги у найвіддаленіших вузлах (до 0.95 р.у. і нижче), порушуючи нормативи якості електроенергії (ДСТУ EN 50160).
 - Перевантаження трансформаторного обладнання.
- Ефективність DR: Доведено, що застосування Сценарію 3 (Оптимізованого) дозволяє повністю ліквідувати вечірній пік та стабілізувати рівні напруги в усіх вузлах мережі.
- Економічний ефект: Підтверджено, що вирівнювання графіка навантаження (Сценарій 3) призводить до зниження сумарних добових втрат активної потужності порівняно з обома іншими сценаріями, що свідчить про його високу економічну доцільність.

РОЗДІЛ 4.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ POWERFACTORY

4.1 Обґрунтування вибору програмного комплексу PowerFactory

У цій дипломній роботі для дослідження роботи розподільної електромережі використовується програмний комплекс PowerFactory. Основна його перевага в тому, що він дозволяє моделювати навантаження ліній та трансформатора не на реальному обладнанні, а в комп'ютерному середовищі. Тобто ми будуємо схему мережі на екрані, задаємо параметри ліній, трансформатора, навантажень, сонячних електростанцій на дахах будинків, і програма рахує, що буде відбуватись у мережі в різних режимах.

Такий підхід набагато вигідніший і безпечніший, ніж проводити експерименти безпосередньо в реальній електромережі. У реальних умовах будь-які «спроби» змінити режим роботи мережі, навмисно перевантажити лінію чи трансформатор, відключити якусь ділянку або різко змінити навантаження, пов'язані з ризиком аварії та відключення споживачів. Оператор системи розподілу просто не дозволить «гратися» з реальною мережею лише заради навчальних чи дослідних цілей. У PowerFactory ж усі ці експерименти проводяться на математичній моделі, тому навіть якщо ми змоделюємо аварійний чи завідомо неправильний режим, у реальному житті нічого не станеться.

У програмі можна детально задати параметри мережі: довжину та переріз ліній, напругу, схему з'єднання, потужність трансформатора, типи навантажень, а також параметри дахових сонячних електростанцій (встановлену потужність, підключення, графік генерації тощо). Далі PowerFactory виконує розрахунок усталеного режиму і показує, які струми протікають по лініях, яка напруга в різних вузлах, наскільки завантажений трансформатор, які технічні втрати виникають. Завдяки цьому можна побачити, як саме поява сонячних станцій на дахах будинків впливає на роботу всієї мережі.

Ще одна велика перевага — це можливість швидко перевіряти різні варіанти. Наприклад, ми можемо:

- збільшити або зменшити їхню встановлену потужність;
- змінити схему приєднання;
- змінити графік навантаження споживачів.

Після кожної такої зміни достатньо запустити розрахунок, і PowerFactory покаже новий розподіл навантажень, напруг і втрат. У реальній мережі виконати стільки варіантів було б нереально: на це потрібно багато часу, узгоджень, відключень і залучення персоналу. У симуляторі ж усе обмежується кількома натисканнями кнопок.

Окремо варто відзначити економічну вигоду такого підходу. Щоб провести реальні експерименти в мережі, потрібні:

- планування робіт;
- оформлення нарядів;
- участь оперативно-ремонтного персоналу;
- можлива зупинка частини споживачів;
- додаткові вимірювання та обладнання.

Усе це коштує грошей і займає час. До того ж будь-які відхилення від нормального режиму (перевантаження, великі відхилення напруги) призводять до зайвих втрат електроенергії та погіршення якості електропостачання. У випадку з PowerFactory ми один раз налаштуємо модель, а потім скільки завгодно разів запускаємо розрахунки. Жодних додаткових витрат на реальні роботи немає, і ніякі споживачі не страждають від наших «експериментів».

Також важливо, що в програмі набагато простіше аналізувати результати. На екрані одразу видно схему мережі, напрямок потоків потужності, величини струмів, перевантажені елементи виділяються. Можна побудувати графіки зміни напруги вдовж лінії, подивитись завантаження трансформатора при різних режимах, порівняти варіанти з СЕС та без СЕС.

Ще одна перевага — відсутність людського фактору під час експериментів. У реальній мережі завжди є ризик помилки: хтось не так переключив апаратуру, не так зчитав покази приладів, неправильно зафіксував дані. У PowerFactory у нас є чітко задана модель, і програма кожного разу рахує за одними й тими самими алгоритмами. Якщо ми не змінюємо вихідні дані, то й результат буде однаковий, тобто експеримент легко повторити та перевірити.

Крім того, PowerFactory дозволяє моделювати роботу мережі впродовж певного часу. Наприклад, можна задати добові графіки навантаження для будинків та добові графіки генерації для сонячних електростанцій, а потім подивитись, як протягом дня змінюється завантаження ліній та трансформатора. У реальності для цього довелося б встановлювати реєстратори, чекати кілька днів або тижнів, а потім обробляти великі обсяги даних. У симуляторі все робиться значно швидше: ми задаємо графіки та запускаємо часовий розрахунок.

Використання PowerFactory в цій дипломній роботі дає можливість:

- детально дослідити, як дахові сонячні електростанції впливають на навантаження ліній і трансформатора;
- уникнути будь-яких ризиків для реальних енергооб'єктів і споживачів;
- заощадити час і кошти, не проводячи дорогих і складних випробувань у реальній мережі;
- отримати наочні результати у вигляді графіків, діаграм, схем, які зручно аналізувати та оформляти в дипломі.

Саме тому моделювання в PowerFactory можна вважати набагато вигіднішим та зручнішим способом дослідження навантаження ліній і трансформаторів, ніж спроби повторити такі ж дослідження на справжніх енергооб'єктах.

Якщо порівнювати трудозатрати на проведення розрахунків і досліджень у реальній електромережі з трудозатратами при роботі в

PowerFactory, різниця виходить дуже суттєвою. У реальних умовах навіть простий експеримент перетворюється на складний набір дій, де бере участь багато людей, а в моделюванні все це виконується однією людиною за комп'ютером.

Трудовозатрати при натурних дослідях (натурних вимірюваннях)

У реальних електричних мережах трудовозатрати на проведення одного експерименту можна приблизно описати як суму витрат часу на підготовку, проведення робіт та аналіз результатів. У загальному вигляді:

$$T_{\text{натур}} = T_{\text{підг}} + T_{\text{вим}} + T_{\text{оброб}} \quad (4.1)$$

де $T_{\text{підг}}$ — час на підготовку документів, погодження, наряди; $T_{\text{вим}}$ — час власне на виконання перемикачів і вимірювань; $T_{\text{оброб}}$ — час на ручне перенесення даних і їх обробку.

Для кількох сценаріїв (наприклад, різних рівнів навантаження, різних потужностей СЕС) трудовозатрати ростуть лінійно:

$$T_{\text{натур, заг}} = n \cdot T_{\text{натур}} \quad (4.2)$$

де n — кількість варіантів, які треба дослідити.

Якщо підставити типові значення (умовно):

- $T_{\text{підг}} \approx 6-10$ годин
- $T_{\text{вим}} \approx 3-5$ години
- $T_{\text{оброб}} \approx 2$ години

то:

$T_{\text{натур}} \approx 11-17$ годин на один сценарій

А якщо потрібно дослідити 10 варіантів:

$T_{\text{натур, заг}} \approx 110-170$ годин

Трудовозатрати при моделюванні в PowerFactory

$$T_{\text{мод}} = T_{\text{моделі}} + n \cdot T_{\text{розр}} \quad (4.3)$$

де $T_{\text{моделі}}$ — час на початкове створення моделі мережі; $T_{\text{розрах}} — час на проведення одного розрахунку для одного сценарію; n — кількість варіантів, які треба прорахувати.$

Особливість у тому, що:

$$T_{\text{розрах}} \ll T_{\text{моделі}}$$

тобто розрахунок займає дуже мало часу — буквально секунди.

Для реальних значень:

- $T_{\text{моделі}} \approx 4-6$ годин
- $T_{\text{розрах}} \approx 10-30$ секунд

Тоді для 10 варіантів

$$T_{\text{моделі}} = 5\text{год} + 10 \cdot 0,008\text{год} \approx 5,08\text{год}$$

Тобто менше 6 годин замість 110–170 годин при натурних випробуваннях.

Порівняння трудозатрат у вигляді коефіцієнта ефективності

Щоб порівняння було наочним, можна ввести коефіцієнт трудозатрат:

Щоб порівняння було наочним, можна ввести коефіцієнт трудозатрат:

$$K = \frac{T_{\text{натур, заг}}}{T_{\text{мод}}} \quad (4.4)$$

Підставимо приблизні дані для 10 сценаріїв:

$$K = \frac{120\text{год}}{5\text{год}} = 24$$

Тобто моделювання у PowerFactory приблизно в 20–25 разів менше трудозатратне, ніж проведення реальних дослідів.

Формула оцінки трудозатрат із врахуванням кількості персоналу

У натурних дослідах часто працює кілька спеціалістів. Тоді загальні людино-годин

$$H_{\text{натур}} = T_{\text{натур}} \cdot m \quad (4.5)$$

де m — кількість задіяних працівників (4–6).

$$H_{\text{натур}} = 15\text{год} \cdot 5 = 75 \text{ людино-годин на 1 сценарій}$$

Для 10 сценаріїв:

$$H_{\text{натур,заг}} = 750 \text{ людино-годин}$$

У PowerFactory працює зазвичай 1 студент:

$$H_{\text{мод}} = T_{\text{мод}} \cdot 1 = 5 \text{ людино-годин}$$

Порівняння

$$K_n = \frac{H_{\text{натур,заг}}}{H_{\text{мод}}} = \frac{750}{5} = 150 \quad (4.6)$$

Тобто з точки зору людейно-годин різниця може бути навіть у 150 разів.

Висновки до розділу 4

У цьому розділі було обґрунтовано доцільність застосування програмного комплексу PowerFactory для дослідження роботи розподільної електромережі з даховими сонячними електростанціями. Показано, що моделювання дозволяє детально аналізувати режими роботи ліній, трансформаторів, вузлів навантаження та генерувальних установок без необхідності проведення складних і небезпечних натурних експериментів у реальній мережі.

Порівняння трудозатрат продемонструвало суттєву перевагу комп'ютерного моделювання над натурними дослідженнями: розрахунки виконуються швидше, не потребують залучення значної кількості персоналу, не вимагають оформлення документів чи відключення споживачів, а також повністю виключають ризики аварійних ситуацій. Встановлено, що для однакової кількості сценаріїв дослідження моделювання у PowerFactory є в десятки разів ефективнішим за витратами часу та людейно-годинами.

Крім того, програмний комплекс забезпечує високу точність, повторюваність результатів та зручність графічного відображення режимів мережі, що значно полегшує аналіз впливу розумних будинків на роботу електричних мереж. Здатність швидко змінювати параметри навантажень, конфігурацію мережі та характеристики генерувальних джерел робить PowerFactory незамінним інструментом для дослідницьких і навчальних цілей.

Таким чином, моделювання в PowerFactory є найбільш безпечним, економічно вигідним та інформативним методом дослідження роботи розподільних електричних мереж порівняно з натурними експериментами, що повністю підтверджує вибір програмного комплексу для виконання даної дипломної роботи.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було вирішено науково-практичне завдання щодо дослідження впливу вузлів навантаження типу «містечко з розумними будинками» на режими роботи розподільної електромережі 10/0.4 кВ. На основі проведеного аналізу та комп'ютерного моделювання в ПК DIgSILENT PowerFactory сформульовано наступні висновки:

1. Розроблено комплексну імітаційну модель розподільної електромережі 10 кВ (на базі тестової схеми IEEE 33-bus) з деталізованими вузлами навантаження 0.4 кВ, що імітують «містечка». Ключовою особливістю моделі є застосування трьох добових профілів навантаження, підключених до поля Scaling Factor об'єктів ElmLod, що дозволило провести квазідинамічне моделювання (Quasi-Dynamic Simulation) трьох сценаріїв роботи.
2. Встановлено, що неконтрольована інтеграція «розумних будинків» (Сценарій 2), зокрема масова одночасна зарядка електромобілів (EV) у вечірній час, має критичний негативний вплив на мережу. Пікове навантаження вузла зростає з 0.39 МВт (Базовий сценарій) до 0.72 МВт (Піковий сценарій), що являє собою зростання на ~85%.
3. Доведено, що таке стрибкоподібне зростання навантаження призводить до неприпустимих технічних наслідків. Моделювання Сценарію 2 показало критичне падіння напруги у найвіддаленіших вузлах мережі (напр., Вузол 18 та 33) до рівнів ~0.95 р.у. і нижче. Це є прямим порушенням вимог до якості електроенергії, встановлених стандартом ДСТУ EN 50160 (відхилення напруги не більше $\pm 10\%$).
4. Підтверджено високу ефективність застосування механізмів керування попитом (Demand Response). Моделювання Сценарію 3 («Оптимізований»), який імітував перенесення зарядки EV та гнучких навантажень на ніч, показало:

- Повну ліквідацію небезпечного вечірнього піку потужності (навантаження о 21:00 повернулося до рівня ~ 0.4 МВт).
 - Створення нового, контрольованого нічного піку (~ 0.55 МВт), який не становить загрози для мережі через низьке фонове навантаження.
 - Нормалізацію профілю напруги: падіння напруги вночі є некритичним і не виходить за межі допустимих стандартів.
5. Доведено, що «розумні будинки» є не проблемою, а гнучким ресурсом для оптимізації мережі. Порівняльний аналіз добових втрат потужності показав, що вирівнювання графіка (Сценарій 3) дозволяє знизити сумарні добові втрати електроенергії навіть у порівнянні з існуючим Базовим режимом (Сценарій 1).
6. На основі отриманих результатів, для операторів систем розподілу (ОСР) розроблено практичні рекомендації:
- При видачі технічних умов на приєднання нових житлових комплексів вимагати обов'язкового встановлення зарядних пристроїв EV з функцією керованої зарядки (V1G).
 - Активно впроваджувати стимулюючі програми Demand Response (зокрема, багатозонні "нічні" тарифи), що економічно мотивують споживачів переносити навантаження.
 - Використовувати методологію квазідинамічного моделювання в PowerFactory для прогнозування режимів та планування реконструкції мереж з урахуванням нових типів навантажень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Gonzalez F. J. G. L. *Advanced Smart Grid Functionalities Based on PowerFactory*. Cham: Springer, 2018. 320 p.
2. Baran M. E., Wu F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1989. Vol. 4, № 2. P. 1401-1407.
3. Al-Nasseri H., Redha M. Design and modeling an automated digsilent power system for optimal new load locations. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. 2020. Vol. 11, № 4. P. 1980-1988.
4. Mocci S., Pisanu S., Soma G. G. Smart Residential Load Simulator (SRLS) for Demand Side Management. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2018. Vol. 9, № 5. P. 4880-4888.
5. Zhao Z., Lee W. C., Shin Y. Load Profile Based Coordination of Appliances in a Smart Home. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 2013. Vol. 59, № 2. P. 332-340.
6. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. [Чинний від 2015-01-01]. Київ: Держспоживстандарт України, 2014. 28 с.
7. DIgSILENT GmbH. PowerFactory 2021: Training Overview : веб-сайт. URL: <https://www.digsilent.de/en/training.html>.
8. Pod K., Mus L. First use of smart grid data in distribution network planning: Eandis project. *CIREN 2017 Conference*. URL: https://www.cired.net/publications/cired2017/papers/CIREN2017_0689_paper.pdf.
9. How can I replace the decimal point by a decimal comma? DIgSILENT Knowledge Base : веб-сайт. URL: <https://www.digsilent.de/en/faq-reader-powerfactory/how-can-i-replace-the-decimal-point-by-a-decimal-comma.html>.
10. Decimal separator : Comma / Thousand separator :Dot. Microsoft Fabric Community : веб-сайт. URL:

- <https://community.fabric.microsoft.com/t5/Developer/Decimal-separator-Comma-Thousand-separator-Dot/m-p/2313593>.
11. Load Flow Study Using Quasi-Dynamic Simulation. Premium Power : веб-сайт. URL: <https://premium-power.com/case-studies/load-flow-study-using-quasi-dynamic-simulation/>.
 12. Quasi-Dynamic Simulation. DIgSILENT GmbH : веб-сайт. URL: <https://www.digsilent.de/en/quasi-dynamic-simulation.html>.
 13. Why are my old scripts not working in PowerFactory 2021 and later. DIgSILENT Knowledge Base : веб-сайт. URL: <https://www.digsilent.de/en/faq-reader-powerfactory/why-are-my-old-scripts-not-working-in-powerfactory-2021-and-later.html>.
 14. How can I read data from a result file (ElmRes) via script?. DIgSILENT Knowledge Base : веб-сайт. URL: <https://www.digsilent.de/en/faq-reader-powerfactory/how-can-i-read-data-from-a-result-file-elmres-via-script.html>).
 15. Short Introduction to Quasi-Dynamic Simulation in PowerFactory. YouTube : веб-сайт. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=UOua8a02yRI>.
 16. DIgSILENT GmbH. PowerFactory 2024: програмне забезпечення для аналізу енергосистем: рекламна брошура. Гомарінген (Німеччина): DIgSILENT GmbH, 2024.
 17. IEEE Std 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. – New York: IEEE Standards Association, 2018. – 220 p.
 18. International Energy Agency. Empowering Ukraine Through a Decentralised Electricity System. – Paris: IEA, 2024. – 64 c
 19. Blinov I., Radziukynas V., Shymaniuk P. Smart Management of Energy Losses in Distribution Networks Using Deep Neural Networks // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 12. – Art. 3156.
 20. GOPA International Energy Consultants GmbH. Post-War Development of the Renewable Energy Sector in Ukraine. – Energy Community Secretariat, 2024.

21. DIW Econ GmbH. Renewable Energy in Ukraine: Current Institutional Environment, Investment Barriers and Prospects. – Berlin: GIZ-Project, 2024. – 46 с.
22. Bandara W. G. C., Godaliyadda G. M. R. I., Ekanayake M. P. B., Ekanayake J. B. Coordinated PV Re-phasing: A Novel Method to Maximize Renewable Energy Integration in LV Networks by Mitigating Network Unbalances // arXiv preprint, 2020.
23. Caballero-Peña J., et al. Distributed energy resources on distribution networks: A review // Electric Power Systems Research. – 2022. – Vol. 212. – P. 108267.
24. Horowitz K., et al. An Overview of Distributed Energy Resource Interconnection Standards. – NREL Technical Report No. 72102. – Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2019.
25. Adham M. Distributed Energy Resources: A Systematic Literature Review. – Portland State University, 2025. – 38 p.
26. Panda S. An Insight into the Integration of Distributed Energy Resources // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, No. 17. – Art. 8914.
27. Xu G., et al. Towards integrating distributed energy resources and control-protection in power systems // Energy. – 2016. – Vol. 115. – P. 1542–1553.
28. Грицюк І., Волинець В., Грицюк Ю. Prospects for the integration of distributed energy sources into the Ukrainian power grid // Machinery and Energetics. – 2025. – Т. 16, № 1. – С. 130–145.
29. Прокопенко В. Л. Окупність інвестицій в розподільчі електричні мережі (на прикладі рішень щодо реконфігурації мереж 0,38–10 кВ) // Енергетика та електрифікація. – 2017. – № 10/11. – С. 46–53.
30. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. – Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

Додаток А Скріншоти моделі в PowerFactory

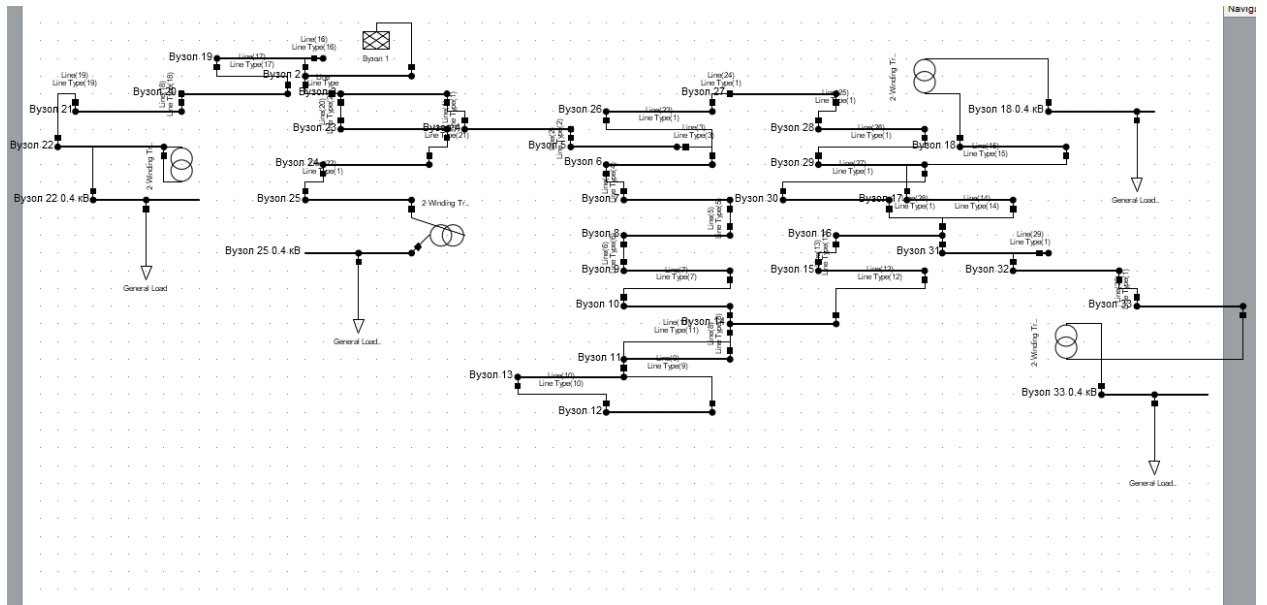


Рис. А.1 Базова модель в ПК PowerFactory

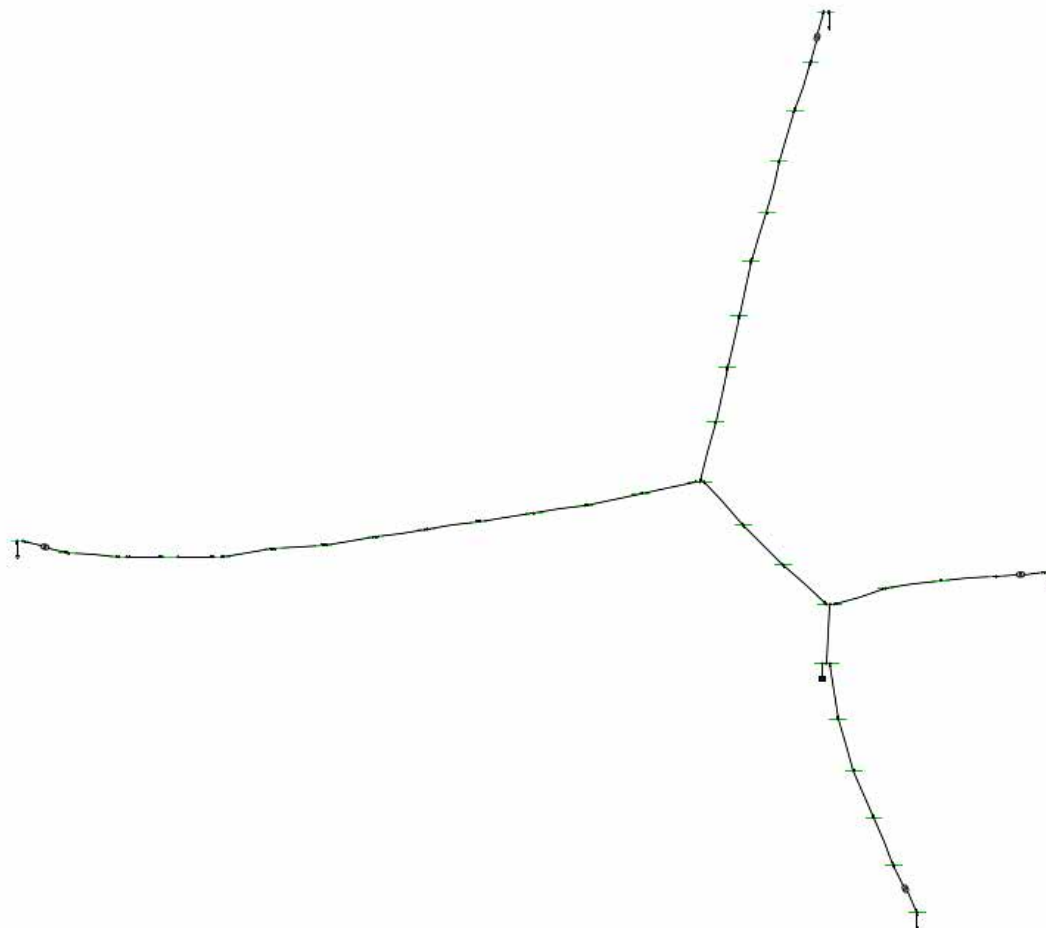


Рис А.2 Базова модель у вигляді діаграми

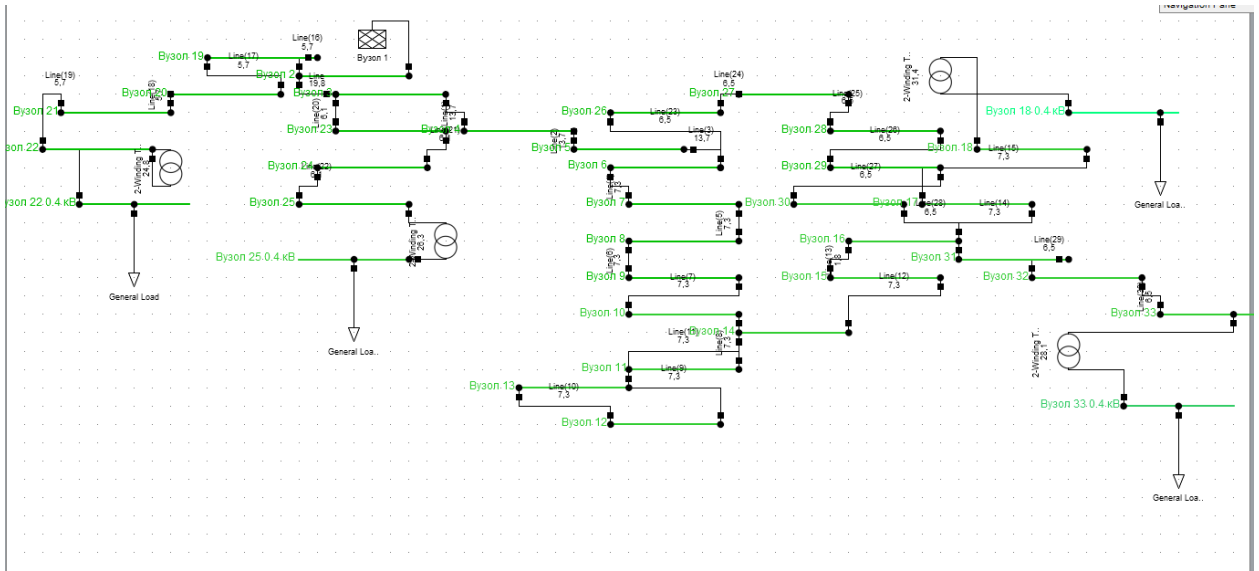


Рис. А.3 Вигляд моделі при запусненій симуляції

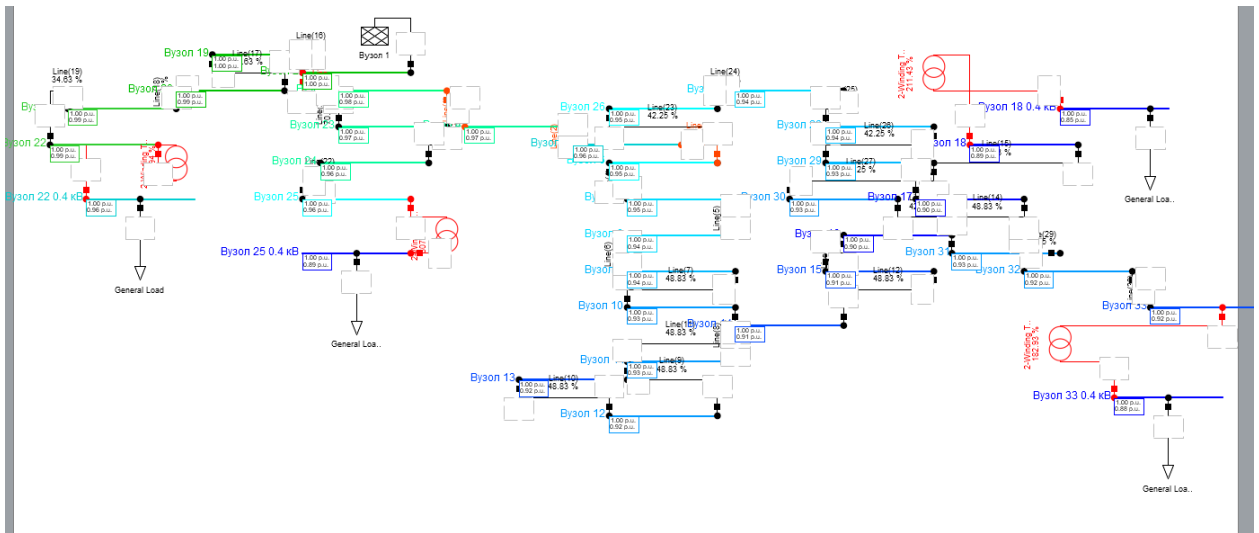


Рис. А.4 Базова модель під час симуляції Сценарію 2(Пікове навантаження)