

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 мережі за напругою в характерних  
точках приєднання ВДЕ 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**

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Сергій УСЕНКО.

(ПІБ)

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

К.Т.Н., доцент

(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Євген АНТИПОВ.

(ПІБ)

**Виконав**

\_\_\_\_\_ Андрій КРУПЕНО.

(підпис)

(ПІБ)



## РЕФЕРАТ

Об'єкт дослідження – режими роботи розподільної електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії з моделюванням в програмному комплексі PowerFactory.

Предмет дослідження – Процеси зміни напруги та режими роботи розподільної електричної мережі в характерних точках приєднання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), а також особливості їх моделювання та аналізу в програмному комплексі DIgSILENT PowerFactor

Мета дослідження – моделювання режиму роботи розподільної електричної мережі, при якому за допомогою систем регулювання під навантаженням трансформаторів досягається регулювання напруги у вузлах мережі, зміна якої спричинена підключенням відновлюваних джерел енергії.

Приведено опис розподільної електричної мережі 10/0,4 кВ з ВДЕ. Наведено аналіз впливу відновлюваних джерел енергії на електромережу, зокрема на напругу в її вузлах.. Здійснено моделювання підстанції моделювання розподільної електричної мережі 10/0,4 кВ. Розроблено модель сонячної електростанції. Проведено дослідження впливу ВДЕ на напругу в вузлах мереж. Отримані результати показують, що збільшення встановленої потужності ВДЕ без удосконалення системи регулювання призводить до підвищення напруги на периферійних ділянках мережі та збільшення втрат електроенергії у проводах. Підключення ВДЕ також впливає на зміну напрямку потоків потужності, що може спричинити некоректну роботу релейного захисту та регуляторів напруги трансформаторів.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 . ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО ВПЛИВУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА РЕЖИМНІ ПОКАЗНИКИ ТА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМАХ.....	8
1.1 Аналіз підключення та взаємодії ВДЕ з електричною мережею.....	8
1.2 Вплив відновлюваних джерел на експлуатаційні аспекти та надійність електроенергетичної системи .....	10
1.3 Обґрунтування актуальності теми роботи.....	12
1.3 Висновок.....	12
РОЗДІЛ 2. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ. ....	15
2.1 Обґрунтування впливу відновлюваних джерел енергії на роботу та розвиток розподільчої мережі.....	15
2.2 Умови та технічні аспекти приєднання об’єктів ВДЕ, що визначають особливості їх взаємодії з розподільною електромережею та впливають на її нормальне функціонуванн .....	19
2.3 Вплив ВДЕ на показники якості електроенергії та операційну стійкість розподільних мереж.....	20
2.4 Аналіз способів керування рівнем напруги в розподільній мережі за умов інтеграції відновлюваних джерел енергії.....	23
2.5 Висновок.....	23
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ЗА НАПРУГОЮ В ХАРАКТЕРНИХ ТОЧКАХ ПРИЄДНАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ .....	30
3.1 Розробка моделі розподільної електричної мережі для аналізу інтеграції відновлюваних джерел енергії .....	30
3.1.1. Огляд та застосування програмного забезпечення PowerFactory як інструменту аналізу розподільних систем.....	30
3.1.2. Моделювання складових розподільної електричної мережі.....	32
3.2. Дослідження роботи розподільної мережі за напругою в характерних точках приєднання ВДЕ .....	46
3.3. Висновок.....	46
Список використаних джерел.....	56

## ВСТУП

Сучасний розвиток енергетичних систем характеризується інтенсивним зростанням частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у структурі генерації електричної енергії. Особливо динамічно цей процес відбувається у розподільних електричних мережах, де переважна більшість сонячних та вітрових електростанцій підключається на рівні напруги 10–35 кВ. Така тенденція відповідає світовим енергетичним трендам, проте водночас створює низку технічних викликів, що потребують поглибленого дослідження та наукового обґрунтування.

Однією з ключових проблем інтеграції ВДЕ є забезпечення нормативних рівнів напруги в характерних точках мережі, враховуючи непостійний та стохастичний характер генерації. Нетрадиційні джерела енергії, особливо фотоелектричні станції, здатні генерувати значну кількість активної потужності у періоди мінімального навантаження, що може спричинити підвищення напруги, порушення статичного та динамічного режимів, зворотні перетіки потужності та додаткові навантаження на комутаційне та трансформаторне обладнання. В окремих випадках такі процеси можуть приводити до порушення вимог ДСТУ EN 50160, Кодексу систем розподілу та правил технічної експлуатації електричних станцій і мереж.

Забезпечення надійної, стійкої та безаварійної роботи мережі за умов високої проникності ВДЕ вимагає застосування сучасних методів моделювання, прогнозування та аналізу електричних режимів. Одним з найефективніших інструментів для наукових та інженерних досліджень є програмний комплекс DIgSILENT PowerFactory, який дозволяє здійснювати точне моделювання розподільних мереж, враховуючи їхню топологію, параметри обладнання та часові залежності навантажувальних і генераційних профілів.

У контексті даної магістерської роботи актуальним є системне дослідження впливу ВДЕ на рівень напруги в характерних точках приєднання та визначення технічних умов, за яких мережа зберігає здатність функціонувати у прийнятному режимі. Отримані результати дозволяють сформулювати рекомендації щодо

підвищення стійкості й керованості розподільних систем за рахунок оптимізації конфігурації мережі, застосування засобів регулювання напруги та корекції режимів роботи ВДЕ.

Метою роботи є дослідження режимів розподільної мережі за напругою у характерних точках приєднання ВДЕ з використанням ПК DIgSILENT PowerFactory та оцінка відповідності отриманих показників нормативним вимогам.

## РОЗДІЛ 1

# ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО ВПЛИВУ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА РЕЖИМНІ ПОКАЗНИКИ ТА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬНИХ СИСТЕМАХ

### 1.1 Аналіз підключення та взаємодії ВДЕ з електричною мережею

Застосування екологічно чистих джерел для виробництва енергії стає важливою передумовою забезпечення енергетичної незалежності та сталого економічного і соціального розвитку суспільства. Відновлювані джерела займають ключове місце у процесі сучасних змін у сфері енергетики. Для прогнозування трансформації електричних мереж активно виконуються різноманітні дослідження, що мають на меті підтримку стабільності системи навіть у разі виникнення значних зовнішніх впливів. Отримані результати дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо доцільності модернізації або підсилення електромереж.

Дослідження режимів роботи, що включають як статичний, так і динамічний аналіз, є фундаментальними для оцінки надійності та сталості енергосистеми, а також можливостей впровадження розподіленої генерації. У стаціонарному аналізі особливу увагу приділяють визначенню перетоків потужності по лініях електропередачі, профілям напруг на шинах і трансформаторах системи. Ці розрахунки необхідні для правильного планування майбутньої інтеграції розподілених джерел у наявну мережу. Додатково, аналіз стійкості до відмов елементів інфраструктури (сценарії N-1) дозволяє гарантувати безпеку й надійність енергопостачання. У сферу статичних досліджень також входить розрахунок коротких замикань, який допомагає оцінити допустиму частку розподіленої генерації в структурі системи.

У численних роботах акцентується, що для успішної інтеграції відновлюваних джерел потрібен сучасний підхід до аналізу, що включає моделювання й управління динамікою роботи таких джерел, наприклад, вітрових турбін на базі DFIG у збалансованих умовах. Також актуальними залишаються питання обліку географічного розподілу, особливостей споживання (максимальні,

середні та мінімальні навантаження), а також впливу демографічних та індустріальних змін на структуру попиту й генерації. При проведенні досліджень у сфері розвитку електричних мереж, обов'язковим є врахування прогнозованих значень навантаження. Останні десятиліття для мереж класу напруги 0,38 кВ відзначаються суттєвими змінами у динаміці попиту, що обумовлено економічним ростом, урбанізацією та демографічними процесами. Україна, використовуючи свої геополітичні переваги та зберігаючи відносну політичну стабільність, активно розширює промисловий комплекс та спостерігає постійне збільшення кількості населення. Рівень споживання електроенергії невідмінно зростає, а темпи приросту навантаження в окремих регіонах можуть сягати понад 6% на рік, що ставить під сумнів здатність існуючих мереж повністю задовольнити майбутній попит без стратегічного оновлення та модернізації.

Основним виробником та постачальником електроенергії в державі є ПРАТ «ДТЕК», який ініціює масштабні проєкти з укріплення та оновлення мережевої інфраструктури для забезпечення високої якості енергопостачання українських споживачів. Для коректної роботи електроенергетичної системи необхідна підтримка балансу між обсягом виробленої та споживаної електроенергії. У стратегічних планах України передбачене введення нових енергогенерувальних потужностей, зокрема у промисловому секторі, із акцентом на підвищення екологічної ефективності й зниження залежності від традиційного палива.

Особливе місце відводиться впровадженню ВДЕ, у тому числі будівництву великих сонячних і вітрових електростанцій у південних областях країни, де існує значний енергетичний потенціал. Проведення сценарних розрахунків перетоків електроенергії та аналізу технічного стану мереж дають можливість визначити потенційні ризики інтеграції нових джерел генерації. Масове ввімкнення відновлюваних джерел створює нові виклики для операторів, зокрема через нестабільний та змінний характер генерування, а також труднощі з точним прогнозуванням таких параметрів, як швидкість вітру чи генерація сонячних електростанцій.

В роботах сучасних фахівців розглядаються комплексні заходи для підвищення надійності мереж, що включають моніторинг режимів, розробку механізмів балансування та врахування сценаріїв аварійного виходу окремих елементів з експлуатації. Такі підходи забезпечують підвищення стійкості енергосистеми до зовнішніх впливів і задовольняють сучасні вимоги до якості, безпеки та надійності електропостачання.

## **1.2 Вплив відновлюваних джерел на експлуатаційні аспекти та надійність електроенергетичної системи**

В епоху технологічного прогресу, розвитку промисловості та індустріалізації спостерігається стрімке зростання споживання електричної енергії, основна частка якої досі забезпечується за рахунок викопних джерел палива [1]. Такі ресурси є не лише дорогими й обмеженими, а й створюють значне антропогенне навантаження на навколишнє середовище. З метою зменшення викидів вуглекислого газу, підвищення енергоефективності та екологічної стійкості, у світовій енергетиці активно впроваджуються технології відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [2].

Перехід до чистих, економічно ефективних і безвуглецевих технологій є основною тенденцією сучасної енергетики [3]. ВДЕ за своїми характеристиками поділяють на керовані (гідроенергетика, геотермальна енергія, біомаса) та змінні (варіабельні) — до яких належать вітрові та фотоелектричні установки.

Протягом останнього десятиліття саме змінні відновлювані джерела енергії (VRES) демонструють найінтенсивніше зростання обсягів генерації, особливо у таких регіонах як Європа, США та Китай. Зокрема, Китай наразі є світовим лідером у галузі відновлюваної енергетики, перевищивши показники США та ЄС, і поставив ціль забезпечити не менше 35% споживання електроенергії з ВДЕ до 2030 року [4].

Однак використання ВДЕ супроводжується низкою технічних проблем, оскільки їхня генерація безпосередньо залежить від кліматичних умов та географічного розташування. Ця залежність породжує невизначеність і

стохастичність процесів генерації, що впливає на стійкість, надійність та баланс енергосистеми [5].

У класичній електроенергетиці гнучкість системи визначається як здатність генераційних потужностей реагувати на раптові зміни навантаження або структури системи [6, 7]. За визначенням Міжнародного енергетичного агентства (IEA), енергосистема вважається гнучкою, якщо в межах економічно доцільних параметрів вона здатна швидко адаптуватися до суттєвих коливань виробництва та споживання електроенергії, забезпечуючи стабільність роботи навіть у разі планових чи аварійних відхилень [6].

Масове впровадження ВДЕ призводить до фундаментальних змін у моделях планування, управління та експлуатації електроенергетичних систем [8, 9]. Зокрема, для опису процесів у таких системах необхідно враховувати стохастичні фактори, що впливають на потоки потужності, частоту, напругу та загальну стабільність системи [9, 10].

Забезпечення надійної та стійкої роботи енергосистеми з високим рівнем проникнення ВДЕ потребує підвищеної гнучкості та адаптивності системного управління [11]. Дослідження показують, що значна частка фотоелектричної (PV) генерації може впливати на перехідні процеси, стабільність напруги, рівень втрат потужності та якість електроенергії [12].

Однією з ключових проблем є регулювання напруги у мережах з великою часткою ВДЕ, адже прогнозування погодних умов залишається неточним, що ускладнює балансування виробництва та споживання електроенергії [13–15].

Ступінь впливу ВДЕ на роботу енергосистеми визначається низкою чинників:

1. Встановленою потужністю та динамічними характеристиками джерел;
2. Параметрами електричних мереж, до яких вони приєднані;
3. Особливостями режимів роботи традиційних генераторів [16].

При підключенні ВДЕ до енергосистеми необхідно виконати комплексний аналіз інтеграційних процесів, що охоплює три основні напрями:

1. Аналіз технічних можливостей інтеграції — оцінка режимів роботи та граничних умов локальної мережі, до якої приєднується ВДЕ.
2. Аналіз експлуатаційних режимів після підключення ВДЕ — дослідження зміни характеристик напруги, частоти, навантаження та втрат потужності в зоні впливу.
3. Оцінка річних операційних умов — порівняння миттєвої генерованої потужності з прогнозними значеннями для визначення діапазону коливань та рівня ефективності використання ресурсів.

### **1.3 Обґрунтування актуальності теми роботи**

Сучасна енергетика переживає суттєві зміни, зумовлені переходом до екологічно чистих технологій виробництва електроенергії. Відновлювані джерела енергії, такі як сонячні та вітрові електростанції, активно впроваджуються у всьому світі, у тому числі й в Україні. Вони дозволяють зменшити залежність від традиційних видів палива, скоротити викиди парникових газів та підвищити енергетичну безпеку держави. Проте інтеграція ВДЕ у вже існуючі розподільні мережі створює нові технічні проблеми, які необхідно враховувати при проектуванні та експлуатації енергосистем.

Проблематика дослідження пов'язана з тим, що генерація відновлюваних джерел є нестабільною та залежить від погодних умов. Потужність вітрових і сонячних станцій може суттєво змінюватися протягом доби або навіть кількох хвилин. Такі коливання створюють труднощі у підтриманні необхідного рівня напруги в мережі, особливо у слабких розподільних мережах, де кожна зміна потужності впливає на роботу споживачів. Це призводить до проблем із якістю електроенергії, появи перенапруг або провалів напруги, збільшення втрат потужності та зниження надійності електропостачання.

Особливо гостро ці питання постають для мереж середньої напруги (6–35 кВ), де відновлювані джерела підключаються безпосередньо до розподільних ліній. Такі системи потребують точного аналізу впливу ВДЕ на напругу в характерних точках приєднання, оскільки навіть незначне перевищення чи зниження напруги

може призвести до некоректної роботи обладнання, пошкодження чутливих електроприладів або відключення генерації інверторів.

Актуальність цієї теми полягає у необхідності розроблення підходів до моделювання та дослідження роботи розподільної мережі з інтегрованими відновлюваними джерелами енергії. Для цього доцільно використовувати сучасні програмні комплекси, що дозволяють точно відтворювати поведінку електричних мереж у різних режимах роботи. Одним із найпотужніших інструментів для такого аналізу є програмне середовище DIgSILENT PowerFactory.

Ця програма забезпечує можливість детального моделювання електроенергетичних систем, розрахунку усталених і перехідних режимів, аналізу напруги, частоти, втрат потужності та якості електроенергії. У PowerFactory можна будувати як статичні, так і динамічні моделі, що дозволяє вивчати роботу мережі в реальних умовах, враховуючи коливання генерації ВДЕ, аварійні відключення або зміну конфігурації мережі. Це робить дослідження максимально наближеним до практичної експлуатації.

У межах даної роботи планується побудова моделі розподільної мережі напругою 10 кВ у програмі PowerFactory з урахуванням підключення відновлюваних джерел енергії. На основі цієї моделі проводиться аналіз рівня напруги у ключових вузлах мережі — на шинах підстанцій, у точках підключення сонячних чи вітрових установок та у кінцевих споживачів. Для цього розглядаються різні режими роботи: нормальний режим, максимальна генерація ВДЕ, мінімальне навантаження, аварійні та перехідні процеси.

У результаті моделювання буде отримано значення напруг у характерних точках, визначено ділянки, де спостерігаються найбільші відхилення, та проведено оцінку стабільності режимів. Окрему увагу буде приділено впливу коефіцієнта потужності генераторів ВДЕ, довжини ліній, потужності трансформаторів і типу підключення на поведінку напруги. Це дозволить сформувані обґрунтовані рекомендації щодо стабілізації напруги, зокрема за рахунок компенсації реактивної потужності, використання регуляторів напруги або систем накопичення енергії.

Важливим етапом дослідження є порівняння результатів для різних сценаріїв роботи системи. Це допоможе оцінити ефективність можливих технічних рішень, таких як регулювання вихідної потужності ВДЕ, застосування компенсаторів реактивної потужності або оптимізація топології мережі. За допомогою аналізу в PowerFactory можна виявити потенційні вузли, у яких можливе перевищення допустимих відхилень напруги, і визначити оптимальні місця для встановлення пристроїв керування режимом.

У сучасних умовах енергетичного переходу точне моделювання поведінки розподільних мереж з великою кількістю ВДЕ є необхідною складовою проектування та експлуатації енергосистем. Це дозволяє не лише запобігти перевантаженням і пошкодженням обладнання, а й оптимізувати структуру мережі з точки зору економічної ефективності.

Отже, обґрунтування актуальності даної теми полягає в тому, що аналіз роботи розподільної мережі з відновлюваними джерелами енергії дає змогу виявити потенційні проблеми ще на етапі проектування та запобігти їх виникненню під час експлуатації. Використання програмного комплексу PowerFactory дозволяє отримати точні результати, необхідні для прийняття технічно обґрунтованих рішень щодо підвищення надійності, стабільності та якості електропостачання.

Таким чином, дослідження впливу ВДЕ на напругу в характерних точках розподільної мережі є надзвичайно актуальним завданням сучасної енергетики. Його результати можуть бути використані для вдосконалення процесів інтеграції ВДЕ, розроблення нових методів управління режимами роботи мереж, а також для практичної реалізації заходів із забезпечення надійності та енергоефективності електричних систем.

## РОЗДІЛ 2.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ 3  
ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.**2.1 Обґрунтування впливу відновлюваних джерел енергії на роботу та розвиток розподільчої мережі**

Більшість енергії, яку людство використовує, має сонячне походження. Сонячна радіація є первинним джерелом майже всіх форм енергії на Землі — від фотосинтезу до руху повітряних і водних мас. Хоча лише частина сонячного випромінювання досягає земної поверхні (приблизно  $1,5 \cdot 10^9$  ТВт·год на рік), її енергетичний потенціал залишається колосальним. Близько 30% цієї енергії відбивається назад у космос, тоді як 70% (близько  $1,05 \cdot 10^9$  ТВт·год) засвоюється Землею, підтримуючи природні енергетичні процеси

Основні напрямки використання енергії Сонця опосередковані:  
через фотосинтез утворюється хімічна енергія біомаси, яка у подальшому може бути перетворена у тепло або електроенергію;  
через випаровування води та циркуляцію повітря формується потенціал для гідро- та вітроенергетики;  
через рух океанічних течій і хвиль утворюється кінетична енергія морів.

Лише невелика частка сонячної енергії використовується безпосередньо — у фотоелектричних системах. Сучасна електроенергетика активно розвиває технології відновлюваних джерел, серед яких особливе місце займають: вітрові, гідро-, сонячні, геотермальні, біоенергетичні електростанції, паливні елементи, а також установки, що використовують енергію хвиль і припливів

Залежно від встановленої потужності відновлювані електростанції можуть бути підключені як до розподільчих, так і до передавальних мереж. Зокрема, установки потужністю до 1 МВт, як правило, приєднуються до розподільних мереж, а більші — до систем передачі напругою 35 кВ і вище.

Окрему категорію становлять когенераційні установки — об'єкти, які одночасно виробляють електричну та теплову енергію. Вони класифікуються за потужністю на мікро-, малі, середні та великі когенераційні системи. Такий підхід дає змогу ефективно використовувати паливо та зменшувати втрати енергії під час транспортування.

Інтеграція розподілених джерел генерації змінює сам принцип роботи електричної мережі: із пасивної односпрямованої структури вона перетворюється на активну двосторонню систему. Основними наслідками такого переходу є:

зміна профілю напруги в лініях;

поява перехідних процесів під час вмикання чи вимкнення джерел;

зростання струмів короткого замикання;

перерозподіл втрат потужності залежно від співвідношення генерації та споживання;

ймовірність перевантаження окремих ділянок мережі.

Постійне зростання вимог до надійності, безперервності та якості електропостачання потребує нових методів планування й управління мережами. Підключення великої кількості розподілених джерел ставить питання не лише про технічну сумісність, але й про стабільність системи, баланс потужностей, ефективність захистів та стійкість при аварійних відмовах.

Важливою характеристикою відновлюваних джерел є їх мінливість. Зміни швидкості вітру, сонячної радіації або рівня води у водоймах визначають амплітуду коливань потужності та складність її прогнозування. На рисунку 2.1 показано приклад річного розподілу виробництва електроенергії вітровими станціями України, порівняно з графіком попиту. Як видно, генерація та споживання мають різну сезонну динаміку, що потребує додаткових балансуєчих потужностей.

На рисунку 2.2 наведено приклад поєднання сонячної та вітрової генерації, де видно взаємне компенсування їх добових коливань. Таке поєднання дозволяє більш рівномірно забезпечувати навантаження, особливо в умовах змінної погоди.

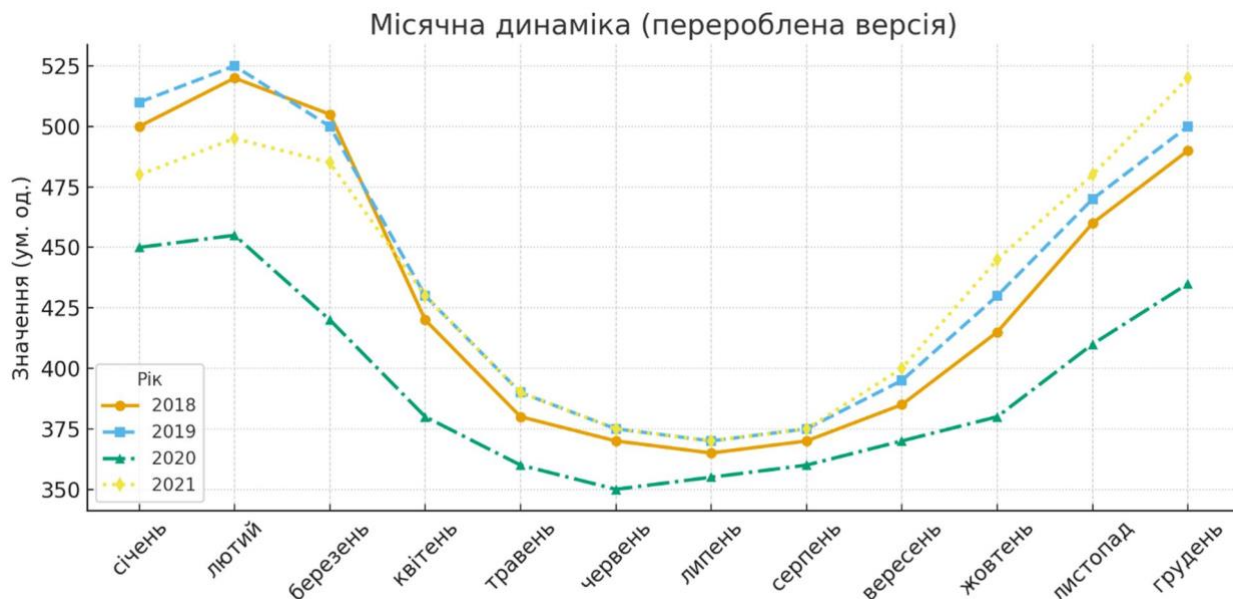


Рис. 2.1. – Співвідношення між часткою місячного виробництва вітрової електроенергії (у відсотках від річного обсягу) та нормалізованим місячним розподілом попиту на електроенергію в Україні.

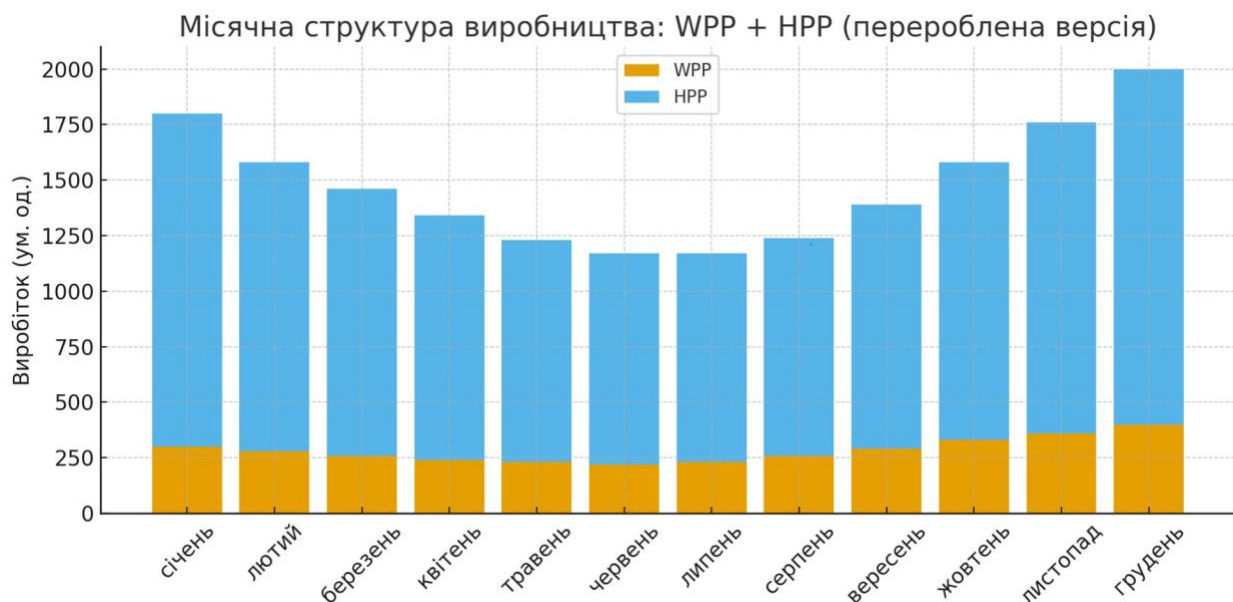


Рис. 2.2. – Графік сумарної генерації СЕС та ВЕС, що ілюструє періоди надлишку для акумулювання енергії шляхом відкачування.

Залежно від гнучкості енергосистеми, вплив варіабельних джерел може бути пом'якшений. Чим більша здатність системи швидко реагувати на зміни генерації

— через резервні потужності, гнучке управління попитом чи міжсистемні зв'язки  
 — тим стабільніше працює мережа.

Характеристики роботи вітрових турбін показано на рисунку 2.3. Потужність, яку виробляє турбіна, залежить від швидкості вітру. Висока мінливість вітрової енергії вимагає підтримки резервів генерації традиційними джерелами для забезпечення стабільності частоти й напруги.

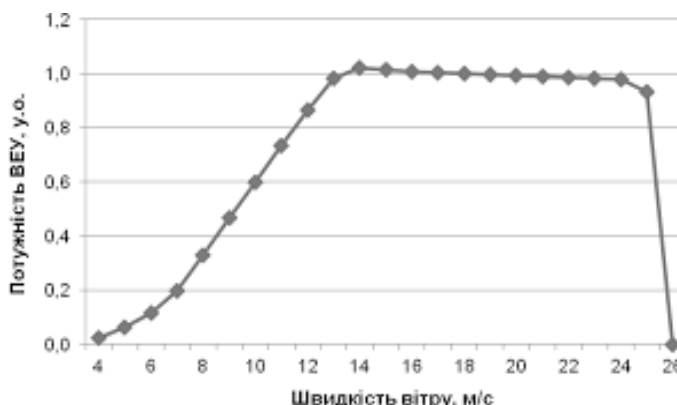


Рис. 2.3 – Вихідна характеристика вітрової турбіни, що відображає її електричну потужність у робочому діапазоні швидкостей вітру.

У великих енергетичних системах балансування відбувається за рахунок декількох механізмів:

інерційних властивостей турбогенераторів,

частотно-залежного регулювання,

резервних гідро- та теплових станцій,

а також регулювання напруги шляхом зміни генерації.

Зростання частки ВДЕ призводить до необхідності збільшення обсягу резервних потужностей, адже сумарна встановлена потужність системи завжди має перевищувати піковий попит. Це забезпечує довготривалу надійність і безпеку електропостачання.

## **2.2 Умови та технічні аспекти приєднання об'єктів ВДЕ, що визначають особливості їх взаємодії з розподільною електромережею та впливають на її нормальне функціонування**

Підключення розподілених (малу потужність) електростанцій до розподільчих мереж може здійснюватися як на рівні низької напруги (0,4 кВ), так і на середній (10, 20, 30 або 35 кВ). Рівень підключення залежить від встановленої потужності електростанції, номінальної потужності генераторів, технічного стану розподільної мережі, умов її експлуатації та ряду інших факторів.

Можливі варіанти підключення:

1. До мереж низької напруги: електростанції потужністю до 500 кВт підключаються до шин низької напруги трансформаторної підстанції 10(20)/0,4 кВ або до низьковольтної лінії; електростанції потужністю до 100 кВт – безпосередньо до лінії низької напруги.

2. До мереж середньої напруги (10–35 кВ): електростанції потужністю до 1000 кВт під'єднуються безпосередньо до лінії середньої напруги; при потужності понад 1000 кВт застосовується схема приєднання типу «ввід-вивід» у мережі середньої напруги.

Вибір способу підключення електростанції до мережі визначається за результатами техніко-економічного аналізу, який дозволяє знайти оптимальний варіант з урахуванням вартості приєднання та впливу на роботу розподільної системи.

Остаточне рішення щодо можливості та схеми підключення приймається після оцінки стану мережі, прогнозу її розвитку та проведення розрахунків струмів короткого замикання, падіння напруги, потоків навантаження, а також рівня гармонічних спотворень.

Встановлення технічних умов приєднання гарантує надійність роботи електричної системи та безпечну взаємодію між мережею і користувачем, запобігаючи негативному впливу генерації на якість електроенергії.

Технічні вимоги до підключення генеруючих установок до розподільчої мережі визначаються оператором системи розподілу. Правила мережевої системи

встановлюють основні параметри точки приєднання та загальні норми, яким мають відповідати всі генератори, що працюють паралельно з мережею навіть за несприятливих режимів експлуатації.

До основних технічних параметрів, що визначає оператор системи, належать:

- доступна потужність приєднання;
- вимоги до ізоляції та узгодження напруги;
- концепція захисту (включно з часом ліквідації аварійних режимів та координацією основного й резервного захисту);
- граничні значення потужності короткого замикання;
- умови паралельної роботи з мережею;
- допустимі рівні гармонік і флікерів;
- вимоги до комутаційної здатності обладнання при номінальній напрузі;
- система заземлення;
- межі допустимих коливань напруги (мінімальна, максимальна, тривалість відхилення);
- типові графіки навантаження;
- умови щодо виробництва та компенсації реактивної потужності, у тому числі допустимі діапазони  $\cos \varphi$  (від 0,85 індуктивного до 1,0).

### **2.3 Вплив ВДЕ на показники якості електроенергії та операційну стійкість розподільних мереж.**

Якість електричної енергії є узагальненою характеристикою параметрів напруги та частоти в певній точці електричної мережі. Вона визначає, наскільки електроенергія відповідає вимогам щодо стабільності живлення та допустимих коливань параметрів. Основними складовими якості електроенергії вважають безперервність постачання та сталість параметрів напруги.

Аналіз впливу відновлюваних джерел енергії на параметри якості електроенергії та забезпечення стійкості функціонування електричних розподільних мереж

Відповідальність за підтримання належного рівня якості електроенергії покладається як на оператора системи розподілу, так і на споживачів та виробників, що підключені до мережі. Оператор системи контролює рівень впливу обладнання користувачів на параметри мережі, тоді як користувачі зобов'язані обмежувати негативні наслідки роботи своїх установок — наприклад, впорскування гармонік, споживання реактивної потужності чи створення асиметрії навантаження. Для цього оператор заздалегідь визначає допустимі межі таких впливів.

Основні параметри, що характеризують якість електроенергії в точках розподільчої мережі, включають:

- частоту напруги;
- середній рівень напруги у сталому режимі (як правило, 10-хвилинне середнє значення RMS);
- гармонічні спотворення сигналу напруги, які виникають через роботу обладнання з нелінійними вольт-амперними характеристиками (силові перетворювачі, електричні машини, магнітні елементи тощо);
- гармоніки напруги;
- динамічні коливання та мерехтіння напруги, спричинені зміною інтенсивності генерації, наприклад, у вітроенергетиці;
- асиметрію напруги між фазами;
- перепади та перенапруги;
- відхилення частоти.

Все обладнання, що приєднується до мережі, проєктується для роботи при номінальній напрузі  $V_n$  синусоїдальної форми та частоті 50 Гц, проте має витримувати певний рівень електромагнітних перешкод, які постійно присутні у системі. Такий допустимий рівень називається рівнем стійкості (імунітету) обладнання — тобто максимальною величиною відхилення параметрів, за якої пристрій зберігає працездатність без пошкоджень або деградації характеристик.

Водночас, кожен елемент мережі сам створює певний вплив — генерує гармоніки, коливання чи реактивну потужність. Тому вводиться поняття рівня сумісності, який описує граничне значення спотворень, при якому сумісна робота

обладнання різних користувачів не порушується. Як правило, цей рівень не повинен перевищувати межу стійкості обладнання.

Вплив різних типів відновлюваних джерел енергії

Гідроелектростанції.

Гідроелектростанції мають найменший вплив на якість електроенергії, оскільки гідротурбіни характеризуються стабільним обертовим моментом. Установки із синхронними генераторами можуть змінювати напругу в усталеному режимі залежно від потужності генерації, що іноді призводить до коливань частоти при роботі в ізолюваному режимі. ГЕС з асинхронними генераторами, навпаки, можуть створювати додаткові гармонічні спотворення, короточасні перенапруги та впливати на сигнали телемеханіки через комутацію батарей конденсаторів.

Сонячні електростанції (фотоелектричні установки).

Фотоелектричні модулі перетворюють сонячне випромінювання безпосередньо у постійний струм, тому для їх інтеграції в мережу необхідне використання інверторів. Робота таких перетворювачів може впливати на напругу в точці підключення, зумовлювати спотворення форми напруги, а також створювати високочастотні перешкоди. Проте сучасні інвертори оснащені системами активної фільтрації, що мінімізують негативний вплив на мережу.

Паливні елементи.

За своїм впливом на якість електроенергії паливні елементи подібні до фотоелектричних установок. Їх живлення здійснюється постійним струмом, утвореним у результаті електрохімічної реакції, тому для роботи в мережі вони також потребують інверторів. Основні джерела спотворень — це перетворювачі постійного струму в змінний.

Вітрові електростанції.

Робота ВЕС має найбільший динамічний характер через стохастичну природу вітрових потоків. Внаслідок цього коливається вихідна потужність, що призводить до зміни напруги в точці приєднання. Вплив залежить від типу турбіни:

- установки з асинхронними генераторами приєднаними безпосередньо до мережі можуть створювати перепади напруги, гармонічні складові та короточасні перенапруги при вмиканні конденсаторів;
- турбіни з повністю керованими перетворювачами здатні автоматично регулювати напругу та коефіцієнт потужності, що значно знижує їхній вплив на мережу.

Мерехтіння напруги у вітрових установках виникає через турбулентність повітряних потоків і може сприйматися як зміна яскравості освітлення. У системах із змінною швидкістю обертання такі коливання компенсуються електронними регуляторами, тоді як у турбінах із фіксованою швидкістю вони передаються безпосередньо до мережі.

Робота перетворювачів у ВЕС також є джерелом гармонічних струмів, що спричиняють додаткові спотворення у системі, особливо при великій кількості вітрових агрегатів у одному енерговузлі.

#### **2.4 Аналіз способів керування рівнем напруги в розподільній мережі за умов інтеграції відновлюваних джерел енергії**

З переходом до стійких енергетичних систем і активним впровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) — таких як сонячні фотоелектричні установки, малі вітрові електростанції, накопичувачі енергії — розподільна мережа стає не просто пасивною інфраструктурою, а активною системою. Це створює нові виклики для підтримання належного рівня напруги на шинах, оскільки зміни генерації, зворотні потоки і динаміка навантаження можуть суттєво впливати на профіль напруги. Наприклад, при значному підключенні фотоелектричних систем на рівні низької й середньої напруги можуть виникати ситуації підвищеної напруги (overvoltage) або коливань напруги, які виходять за межі допустимих. [14].

У зв'язку з цим регулювання напруги в розподільній мережі з ВДЕ набуває першочергового значення для забезпечення якості електропостачання, стабільності роботи обладнання та надійності системи.

## Механізми виникнення проблем із напругою

Поява ВДЕ в мережі змінює традиційні умови, за яких мережі проектувалися — коли переважно існувала односпрямована передача енергії від підстанції до навантаження. При великій частці ВДЕ та невеликому навантаженні може виникати зворотній потік потужності (reverse power flow), що призводить до підвищення напруги в кінці магістралей.

Крім того, швидкі зміни потужності ВДЕ (наприклад, при хмарності чи зміні вітру) викликають коливання активної та реактивної складових струму, що впливає на падіння напруги уздовж ліній та на баланс реактивної потужності. [14].

Традиційні регулювальні засоби — наприклад, регульований трансформатор з відбором (on-load tap changer, OLTC) або банківські конденсатори — були розраховані переважно на повільні зміни навантаження. У мережах з ВДЕ їхня швидкість реагування, інерційність та обмеженість іноді не дозволяють ефективно контролювати напругу.

Внаслідок цього виникає необхідність впроваджувати нові підходи до регулювання напруги, враховуючи особливості сучасних розподільчих систем з високою часткою ВДЕ.

### Основні засоби регулювання напруги

#### 1. Регулювання за допомогою традиційного обладнання

До класичних засобів належать:

- трансформатори з OLTC, які змінюють співвідношення обмоток під навантаженням;
- банківські конденсатори або реактори для компенсації реактивної потужності;
- статичні компенсатори (SVC/STATCOM) або шунтові реактори.

Ці засоби забезпечують підтримання напруги в заданих межах та регулювання реактивної навантаженості. Проте їхній недолік у контексті високої долі ВДЕ — невелика швидкість реагування, обмежена кількість перемикань (у випадку механічних OLTC), а також неможливість ефективно працювати із змінними і

швидкоплинними процесами. [13].

Наприклад: у статті про мережі з фотоелектричними системами зазначено, що банківські конденсатори та OLTC мають обмежену точність регулювання та досить високу вартість у випадку частого застосування. [13].

## 2. Використання можливостей генерації та накопичення (вбудовані засоби)

Сучасні ВДЕ, особливо фотоелектричні інвертори або системи накопичення енергії (ESS— energy storage systems), можуть залучатись як активні учасники регулювання напруги.

Наприклад:

- інвертори PV можуть працювати не лише в режимі видачі активної потужності, але й надають/абсорбують реактивну потужність (функція Volt-VAR / Volt-Watt), що дозволяє впливати на напругу місцево. [13].

- системи накопичення енергії можуть заряджатися або розряджатися для згладжування піків потужності, зокрема зменшуючи перевищення генерації ВДЕ, що призводить до підвищення напруги, або компенсувати дефіцит навантаження. [13].

- координація генерації, накопичення та навантаження (в т.ч. електромобілі, зарядні станції) на вузлах мережі дає змогу більш гнучко підтримувати напругу. Наприклад, в дослідженні запропоновано стратегію реал-време кооперативного регулювання напруги з використанням груп EV-зарядок та OLTC.

Ці підходи значно підвищують оперативність реагування та дозволяють мережам адаптуватись до динаміки ВДЕ.

## 3. Координоване та ієрархічне регулювання

Оскільки мережі стають «розумнішими» (smart grids), з'являються підходи, які передбачають координацію багатьох засобів: OLTC, інверторів, банків конденсаторів, систем накопичення, а також алгоритмів управління. Наприклад:

- централізоване управління, коли диспетчер або система верхнього рівня визначає команди для всього фідера;

- розподілене/децентралізоване управління, коли контролери на вузлах (інвертори, ESS) самостійно реагують на локальні умови, або в кооперації з суміжними вузлами; [14].

- багаторівневе управління з різними часовими шкалами: наприклад, довгострокове планування добового режиму, середньочасове управління накопиченням, миттєве управління інверторами чи OLTC.

Такі підходи дозволяють враховувати як швидкі коливання генерації/навантаження, так і повільніші зміни режиму. Прикладом є кластерний підхід для поділу мережі на «групи» (clusters) для локального регулювання, що підвищує ефективність реагування.

#### Особливості для мереж з ВДЕ

У мережах із високим проникненням ВДЕ має бути враховано низку специфічних факторів:

- Велика варіабельність генерації: Наприклад, сонячна генерація може змінюватись за хвилини/хвилини залежно від хмарності чи тіні, що призводить до швидких змін напруги. [13].

- Місцеве інжекція генерованої активної потужності: При недостатньому навантаженні або при сприятливих умовах генерація може перевищити споживання, що призводить до підвищення напруги. [14].

- Зворотні струми та змінена профіль напруги: Довгі фідери з великою кількістю підключених ВДЕ можуть мати напругу, що зростає вздовж фідера замість звичного падіння. Це порушує роботу традиційних систем регулювання

- Ко-взаємодія між навантаженням, накопиченням та генерацією: Наприклад, зарядні станції електромобілів, термічні накопичувачі можуть бути використані як гнучкі ресурси для балансування та регулювання напруги.

- Необхідність швидкої реакції: Через швидкі зміни генерації традиційні засоби регулювання можуть не впоратися, тому потрібна більша гнучкість і цифрове/інтелектуальне управління.

#### Виклики та обмеження

Хоча сучасні засоби мають великий потенціал, існують значні виклики:

- Вартість впровадження: Багато рішень (наприклад, STATCOM, накопичення) мають високі капітальні витрати. [14].
- Складність координації: Коли залучено багато пристроїв різних типів, потрібна складна система управління, комунікацій та керування. [13].
- Надійність та швидкість реагування: Механічні OLTC чи конденсаторні банки мають обмеження по кількості операцій, часу перемикачів тощо. [13].
- Потреба в даних і сигналізації: Для ефективного регулювання необхідні дані з великої кількості вузлів, швидкий обмін інформацією, сучасні алгоритми.
- Обмеження обладнання: Наприклад, інвертори можуть мати обмеження на максимальну підтримку реактивної потужності або швидкість реагування; накопичувачі мають обмежену кількість циклів роботи, витрати на обслуговування.
- Нормативні та організаційні бар'єри: Наприклад, інтеграція ВДЕ в системи регулювання напруги може вимагати зміни правил та стандартів.

#### Практичні аспекти для України та перспективи

Для країни, зокрема для регіонів, таких як Рівненська область, де може плануватись підключення сонячної електростанції 30 кВт, важливо враховувати такі практичні моменти:

- Оцінка місцевої мережі: необхідно вивчити профіль напруги, довжини фідерів, існуюче обладнання регулювання (трансформатори, OLTC тощо).
- Врахування впливу ВДЕ: навіть 30 кВт генерації може створити локальний вплив на напругу в залежності від кількох факторів (навантаження, інші підключення, стан мережі).
- Вибір засобів регулювання: Якщо генерація значна і/або мережа «слабка» (довгі фідери, мале навантаження), може бути доцільним залучати інвертор з функцією реактивної потужності або накопичення енергії.
- Координація з оператором: Потрібно узгодити з оператором розподільчої мережі (генератором чи підрядником) питання підключення, умов роботи, вимог до регулювання напруги.

- Планування гнучкості: Передбачити, як у майбутньому може змінюватись генерація, навантаження, чи з'являться інші пристрої (наприклад, зарядні станції) — і закласти можливості коригування.

- Перспективні технології: У майбутньому все більшої популярності набувають алгоритми на основі штучного інтелекту, багаторівневе управління, розподілені підходи до регулювання. Наприклад, останні огляди відзначають, що підходи регулювання зміщуються від централізованих до розподілених методів з використанням реального часу та контролем на вузлах.

### **Висновок**

У другому розділі було проаналізовано умови підключення, особливості роботи та вплив відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на розподільчі мережі, а також розглянуто сучасні засоби регулювання напруги.

Показано, що інтеграція розподіленої генерації змінює технічні параметри мережі, зокрема рівні напруги, гармонічні спотворення, асиметрію та динамічні коливання. Особливо це стосується вітрових і сонячних електростанцій, генерація яких є нерівномірною та потребує застосування засобів стабілізації напруги й компенсації реактивної потужності.

Визначено, що традиційні засоби регулювання (OLTC, конденсаторні батареї, реактори) не завжди забезпечують необхідну швидкодію в умовах високої частки ВДЕ. Ефективними стають інтелектуальні інвертори, системи накопичення енергії та гнучкі компенсаційні пристрої (STATCOM, SVC). Технології «розумних мереж» дозволяють координувати роботу цих елементів та забезпечити стабільність режимів.

Також підкреслено важливість узгодження роботи ВДЕ з релейним захистом та автоматикою для забезпечення селективності та уникнення помилкових спрацювань.

Отже, для забезпечення надійної роботи мереж з високою часткою ВДЕ доцільно:

- виконувати техніко-економічний аналіз підключення;
- дотримуватись вимог щодо якості електроенергії;

- застосовувати сучасні засоби керування реактивною потужністю й фільтрації гармонік;
- впроваджувати автоматизовані системи регулювання напруги;
- підвищувати гнучкість мереж за рахунок накопичувачів та інтелектуальних інверторів.

Раціональна інтеграція ВДЕ забезпечує стабільність електропостачання та формує основу для створення сучасної, гнучкої й стійкої енергетичної інфраструктури.

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ЗА НАПРУГОЮ В ХАРАКТЕРНИХ ТОЧКАХ ПРИЄДНАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

#### **3.1 Розробка моделі розподільної електричної мережі для аналізу інтеграції відновлюваних джерел енергії**

##### **3.1.1. Огляд та застосування програмного забезпечення PowerFactory як інструменту аналізу розподільних систем**

Сучасний розвиток енергетичних систем вимагає високоточного інструментарію для аналізу, моделювання та оптимізації електричних мереж. Одним із найпоширеніших програмних продуктів для цих цілей є DIgSILENT PowerFactory 2024 — провідна платформа для комплексного аналізу енергосистем, яка охоплює весь цикл роботи енергомереж — від генерації до розподілу.

PowerFactory об'єднує функції математичного моделювання, обчислення режимів, дослідження стійкості, коротких замикань, оптимізації потоків потужності та оцінки надійності. Програмний комплекс використовується операторами систем передачі (TSO), розподільчих компаній (DSO), промисловими підприємствами, проектними інститутами та навчальними закладами.

Основою PowerFactory є унікальна концепція бази даних, яка дозволяє ефективно управляти різними версіями проектів, зберігати конфігурації систем і проводити порівняльний аналіз сценаріїв розвитку енергосистеми. Завдяки цьому забезпечується цілісність та відтворюваність результатів розрахунків, що є особливо важливим у контексті технічного аудиту та моделювання складних енергетичних процесів.

##### **Архітектура та функціональні можливості PowerFactory**

PowerFactory реалізує модульну структуру, що включає базовий набір інструментів та численні спеціалізовані модулі для окремих задач — від аналізу

потоків навантаження до моделювання електромагнітних перехідних процесів (ЕМТ).

У базовий пакет входять:

- аналіз усталених режимів (load flow);
- розрахунок коротких замикань;
- аналіз чутливості та факторів розподілу;
- управління моделлю мережі та її перебоями;
- формування звітів і графічне відображення результатів.

Для розширеного аналізу доступні додаткові функції: імовірнісне моделювання, квазідинамічні розрахунки, моделювання дугових спалахів, гармонічний аналіз, оптимізація потоків потужності (OPF) і функції штучного інтелекту для швидкого аналізу мереж.

Алгоритмічна база програми поєднує класичні методи аналізу з сучасними підходами машинного навчання, зокрема використанням нейронних мереж для прискорення моделювання великих систем.

### **Застосування PowerFactory у системах передачі та розподілу**

Енергосистеми передачі зазнають постійних змін у зв'язку з інтеграцією відновлюваних джерел енергії та необхідністю підтримки стабільності при змінних потоках потужності. PowerFactory пропонує широкий спектр інструментів для моделювання систем змінного та постійного струму, включно з технологіями HVDC, FACTS, VSC, MW/MVar контролерами та віртуальними електростанціями.

Інтегровані сценарії роботи дозволяють моделювати процеси розвитку мережі у часі, включаючи введення або виведення обладнання, планування відключень та оцінку безпеки системи. Це дає змогу аналізувати поведінку мережі за стандартами ENTSO-E (D2CF, DACF, IDCF) та забезпечує повну сумісність із форматами обміну даними CGMES.

Для систем розподілу PowerFactory надає функціонал для аналізу впливу децентралізованої генерації, електромобільності та систем накопичення енергії. Модель дозволяє враховувати реверсні потоки потужності, коливання напруги та вплив фотоелектричних установок на мережевий профіль.

Вбудовані інструменти підтримують моделювання в географічному форматі з використанням картографічних сервісів, що дозволяє інженерам оцінювати пропускну здатність мережі, оптимізувати профіль напруги, баланс фаз і розміщення елементів обладнання.

### **Використання PowerFactory у промислових енергетичних системах**

У промислових енергосистемах PowerFactory використовується для проектування електричних мереж заводів, підприємств і об'єктів інфраструктури. Програмний комплекс дозволяє розраховувати струми коротких замикань, дугові спалахи, аналізувати гармоніки, втрати потужності, а також координувати системи захисту.

PowerFactory підтримує стандарти IEC 60909, ANSI, IEEE, що забезпечує точність і відповідність міжнародним вимогам. Серед типових задач: аналіз пускових режимів двигунів, дослідження електромеханічної стійкості, оцінка надійності та оптимізація системи за критерієм безпеки живлення.

Однією з ключових переваг PowerFactory є розвинуті інтерфейси для системної інтеграції:

- GIS – для використання просторових даних мережі;
- SCADA – для інтеграції в реальному часі з системами управління;
- API / Python / DPL – для автоматизації розрахунків і обміну даними;
- OPC, CIM, UCTE-DEF – для сумісності з промисловими протоколами.

Завдяки цим можливостям PowerFactory може виступати ядром цифрової енергосистеми, забезпечуючи зв'язок між проєктними, диспетчерськими та аналітичними рівнями управління.

### **3.1.2. Моделювання складових розподільної електричної мережі**

В даній роботі проводилось моделювання підстанції 10/0,4кВ з силовим трансформатором 160 кВА. Проведемо моделювання трансформаторів, навантаження, вузлів та ліній електропередач, та побачим як впливають ВДЕ на електромережу.

## Модель трансформатора

Г-подібна схема заміщення (рис.3.1) використовується для представлення двообмоткового трансформатора

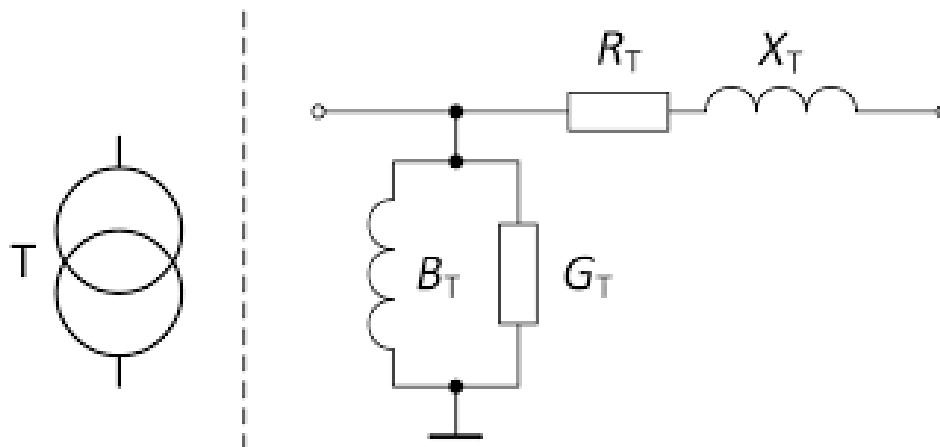


Рис. 3.1 – Схеми заміщення трансформатора.

Параметри схеми заміщення двообмоткових трансформаторів визначаються за наступними формулами (3.1 – 3.4).

Активний опір:

$$R_T = \Delta P_{K3} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}^2} * 10^{-3} \quad (3.1)$$

Реактивний опір:

$$X_T = \frac{\mu_k}{100} * \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} \quad (3.2)$$

Активна провідність:

$$g_T = \frac{\Delta P_{xx}}{U_{НОМ}^2} * 10^{-3} \quad (3.3)$$

Реактивна провідність:

$$X_T = \frac{i_{xx}}{100} * \frac{S_{НОМ}}{U_{НОМ}^2} \quad (3.4)$$

де:  $U_{ном}$  представляє номінальну лінійну напругу трансформатора у кіловольтах;  $S_{ном}$  вказує номінальну потужність трифазного трансформатора або трифазної групи однофазних трансформаторів у мегавольта-амперах;  $u_k$  представляє складову напруги короткого замикання трансформатора у відсотках відносно номінальної напруги;  $\Delta P_{кз}$  вказує втрати активної потужності короткого замикання, що виникають від втрат у міді, у кіловаттах;  $\Delta P_{хх}$  представляє втрати активної потужності холостого ходу, що виникають від втрат у сталі, у кіловаттах;  $i_{хх}$  представляє струм холостого ходу трансформатора.

Наповнення налаштувань типів моделі трансформаторів на підстанції 10/0,4кВт в програмному забезпеченні PowerFactory береться з бібліотки моделей.

Наповнення трансформатора у вікні зображене на Рис. 3.3 , де ми можемо обрати верхню чи нижню сторону, перейти до вкладки Type і тд, далі переходимо до вікон де перед нами відкриваються вікна для створення, вибору, зміни типу, або обрати інший.

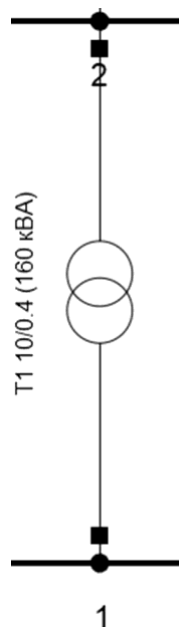


Рис. 3.2 – Трансформатор T1-10/0,4 кВт 160кВа в програмному забезпеченні PowerFactory

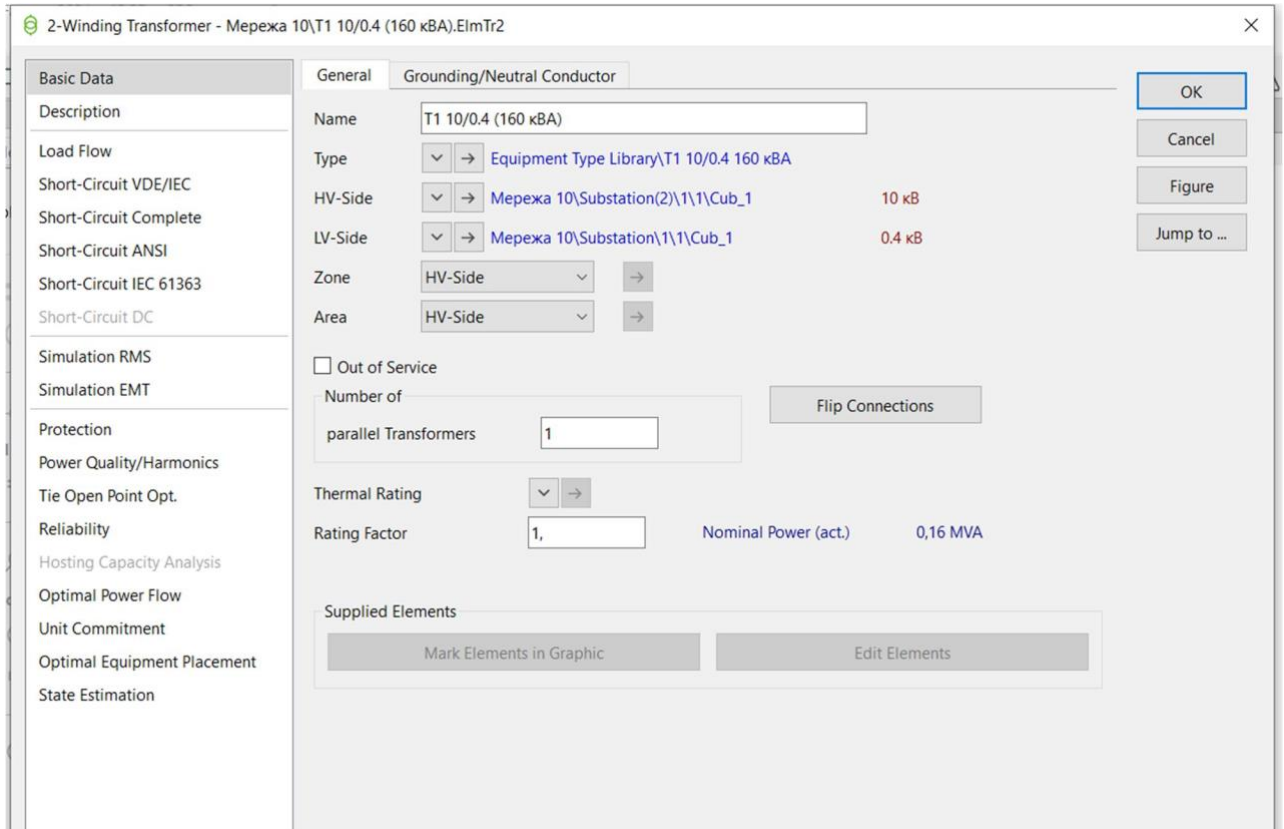


Рис. 3.3 – Загальна характеристика моделі трансформатора T1

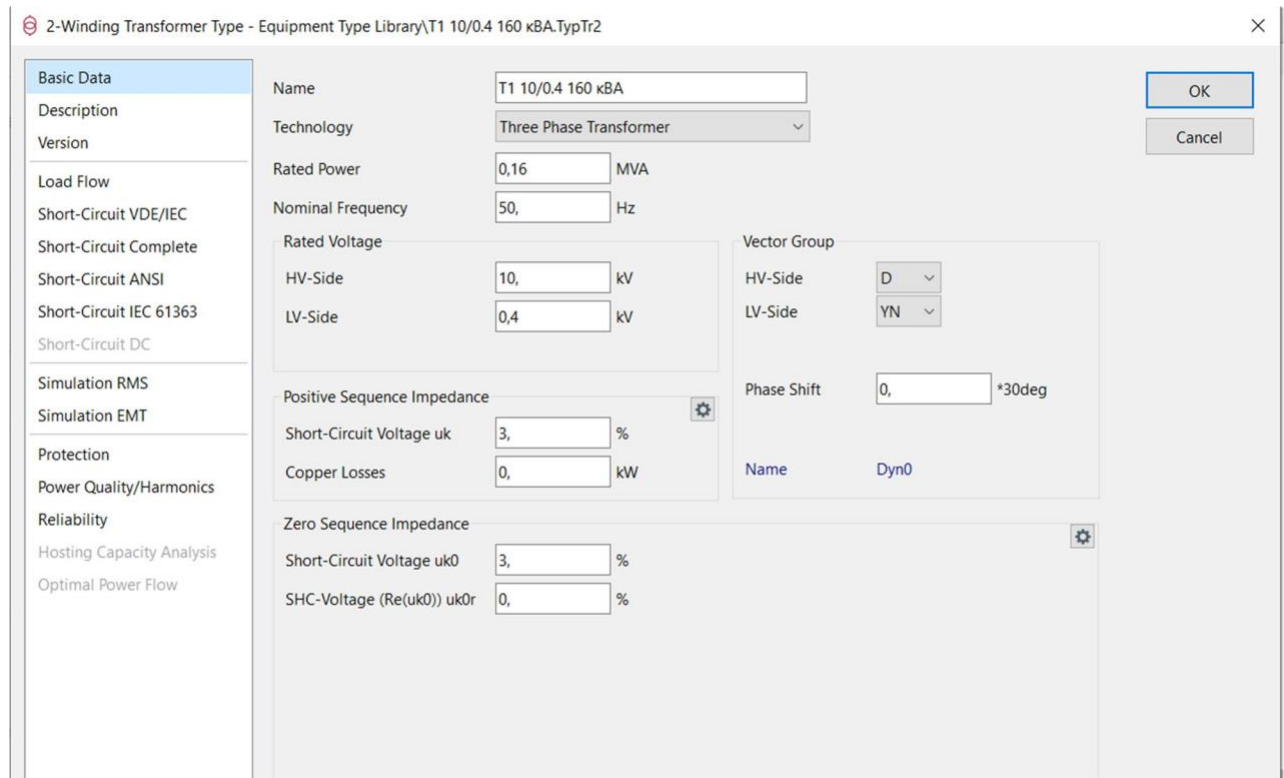


Рис. 3.4 – Основні налаштування типу трансформатора T1

## Модель лінії електропередач

Для моделювання лінії електропередачі (ЛЕП) використовуються Т- подібна або П-подібна схеми заміщення. Проведений аналіз досліджень показав, що зазвичай ЛЕП можна представити П-подібною схемою заміщення (рис. 3.5), в якій враховуються як її активні  $R_{\text{л}}$  і реактивні  $x_{\text{л}}$  опори, так і активна  $g_{\text{л}}$  та  $b_{\text{л}}$  реактивна провідності.

Поздовжній повний опір схеми заміщення ЛЕП визначається за формулою, Ом:

$$Z_{\text{л}} = (r_0 + jx_0)l \quad (3.5)$$

де:  $Z_{\text{л}}$  - повний опір ЛЕП;  $r_0$  – погонний активний опір ЛЕП, Ом/км;  $jx_0$  – погонний індуктивний опір ЛЕП, Ом/км;  $l$  – довжина лінії, км.

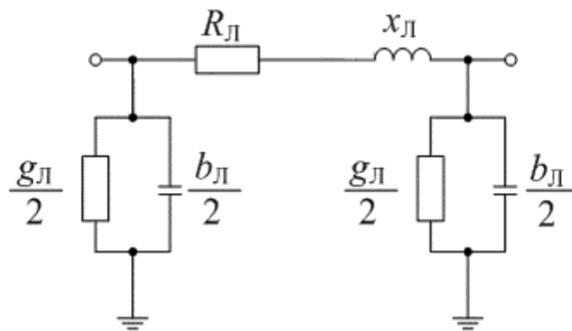


Рис. 3.5 – П-подібна схема заміщення ЛЕП

Повна провідність ЛЕП визначається за виразом, См:

$$Y_{\text{л}} = (g_0 + jb_0)l \quad (3.6)$$

де:  $g_0$  – погонна активна провідність ЛЕП, См/км;  $b_0$  – погонна ємнісна провідність ЛЕП, См/км.

В цьому підрозділі з використанням тих самих типових блоків проводилося ЛЕП. В стандартних провідів що є в бібліотеці PowerFactory бралися наступні параметри: напруга, струм, тип лінії (лінія електропередач), опір прямої та зворотної послідовності, активний опір, реактивний опір, матеріал лінії (алюміній-сталь), температуру.

В нашому випадку є 2 лінії Л-1 (рис. 3.6) та Л-2 (рис. 3.10). Л-1 проходить від секції шин 0,4кВ до споживача. Л-2 також від секції шин до споживача тільки з підключеними в різних місцях ВДЕ.

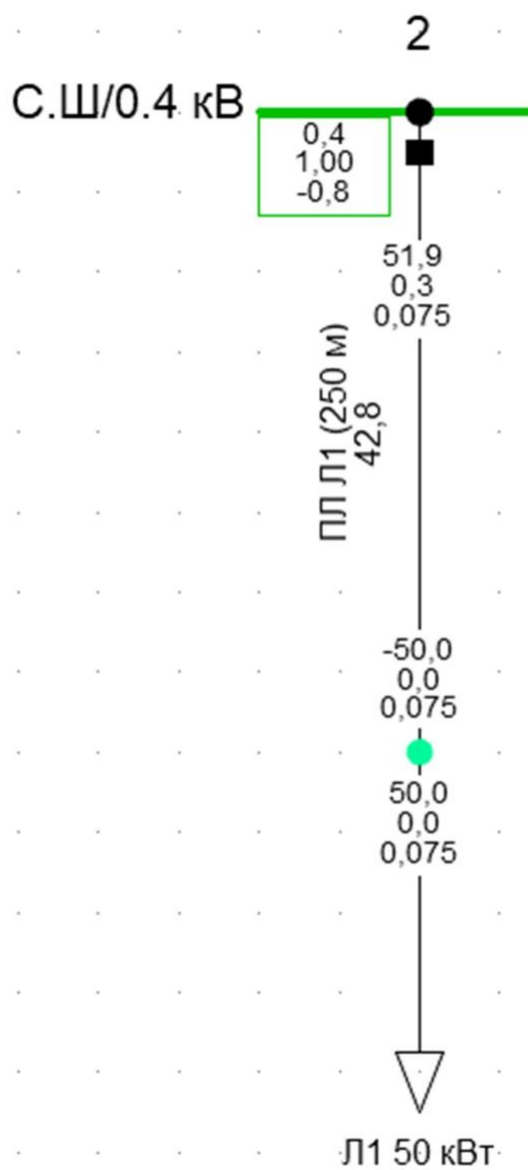


Рис. 3.6 –Модель лінії Л-1 в програмному забезпеченні PowerFactor

Line - Мережа 10\ПЛ Л1 (250 м).ElmLne

**Basic Data**

Name: ПЛ Л1 (250 м)

Type: ...es\Cables\IEC\1kV\AI\PVC\NAYBY 4x70sm 0.6/1kV

Terminal i: Мережа 10\C.Ш\2\Cub\_1 (0.4 кВ)

Terminal j: Мережа 10\Terminal\Cub\_1 (Terminal)

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters:

Thermal Rating: [dropdown]

Length of Line: 0,25 km

Derating Factor: 1,

Laying: Ground

Type of Line: Cable

Line Model:

Lumped Parameter (PI)

Distributed Parameter

Sections/Line Loads

Resulting Values:

Nominal Current (act.)	0,175 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0,1126384 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	9,63353 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0,11105 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0,01884956 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0,444175 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0,07539822 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0,02000258 A
Earth Factor, Magnitude	0,999927
Earth Factor, Angle	0,00070953 deg

Buttons: OK, Cancel, Figure, Jump to ...

Рис. 3.7 – Загальна характеристика ПЛ-0,4кВ, Л-1.

Line Type - \DlgSILENT Library\Equipment Types\Cables\IEC\1kV\AI\PVC\AsXSn 4x70sm 0.6/1kV.TypeLne\*

**Basic Data**

Name: AsXSn 4x70sm 0.6/1kV (Read Only)

Rated Voltage: 1, kV

Rated Current: 0,175 kA (in ground) | Rated Current (in air): 0,16 kA

Cable / OHL: Cable

System Type: AC | Phases: 3 | Number of Neutrals: 0

Nominal Frequency: 50, Hz

Parameters per Length 1,2-Sequence:

AC-Resistance R'(20°C): 0,4442 Ohm/km

Reactance X': 0,075398 Ohm/km

Parameters per Length Zero Sequence:

AC-Resistance R0': 1,7767 Ohm/km

Reactance X0': 0,301592 Ohm/km

Buttons: Cancel

Рис. 3.8 – Налаштування типу ПЛ-0,4кВ, Л-1.

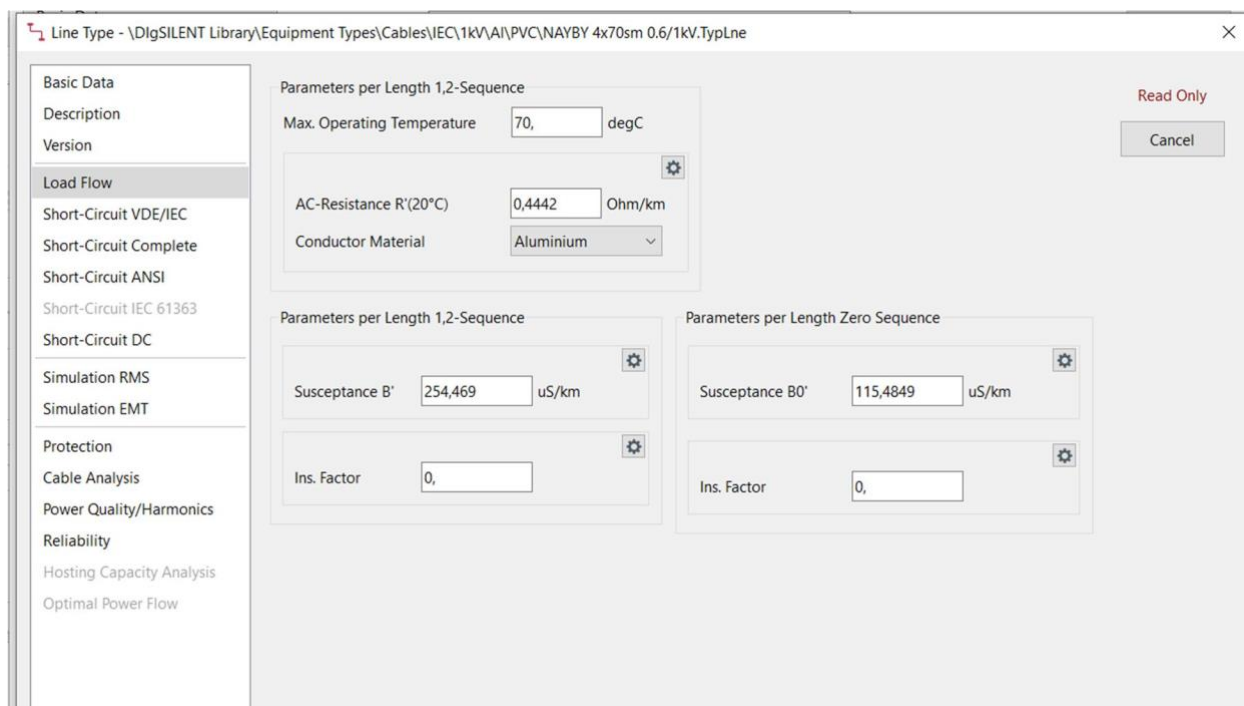


Рис. 3.9 – Додаткові налаштування типу ПЛ-0,4кВ, Л-1.

У випадку з Л-2 (рис. 3.10). ПЛ проходить від секції шин 0,4кВ до першого вузла де підключена ВЕС (рис. 3.11), далі іде вузол з споживачем (рис. 3.12), і на таку ж відстань як від ВЕС до споживача підключена СЕС (рис. 3.13).

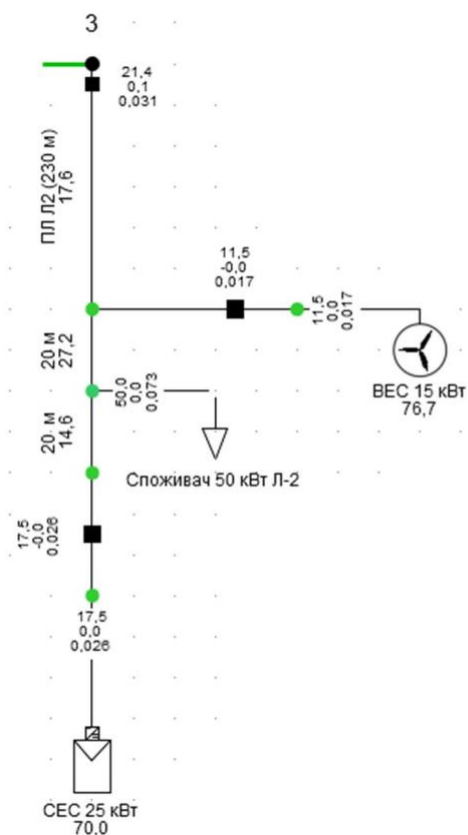


Рис. 3.10 – Модель лінії Л-2 в програмному забезпеченні PowerFactor.

Line - Мережа 10\ПЛ Л2 (230 м).ElmLne

**Basic Data**

Name: ПЛ Л2 (230 м)

Type: ...es\Cables\IEC\1kV\AI\PVC\NAYBY 4x70sm 0.6/1kV

Terminal i: Мережа 10\Ш\3\3\Cub\_1 (0.4 кВ)

Terminal j: Мережа 10\Terminal(3)\Cub\_1 (Terminal(3))

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters:

Thermal Rating: [dropdown]

Length of Line: 0,23 km

Derating Factor: 1

Laying: Ground

Type of Line: Cable

Line Model:

Lumped Parameter (PI)

Distributed Parameter

Sections/Line Loads

Resulting Values:

Nominal Current (act.)	0,175 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0,1036273 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	9,633531 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0,102166 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0,01734159 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0,408641 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0,06936637 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0,01840237 A
Earth Factor, Magnitude	0,999927
Earth Factor, Angle	0,00070964 deg

Buttons: OK, Cancel, Figure, Jump to ...

Рис. 3.11 – Загальна характеристика ПЛ-0,4кВ, Л-2, 230м.

Line - Мережа 10\Л2 20 м.Elmlne\*

**Basic Data**

Name: Л2 20 м

Type: ...es\Cables\IEC\1kV\AI\PVC\NAYBY 4x70sm 0.6/1kV

Terminal i: Мережа 10\Terminal(2)\Cub\_0 (Terminal(2))

Terminal j: Мережа 10\Terminal(1)\Cub\_1 (Terminal(1))

Zone: Terminal i

Area: Terminal i

Out of Service

Number of parallel Lines: 1

Parameters:

Thermal Rating: [dropdown]

Length of Line: 0,02 km

Derating Factor: 1

Laying: Ground

Type of Line: Cable

Line Model:

Lumped Parameter (PI)

Distributed Parameter

Sections/Line Loads

Resulting Values:

Nominal Current (act.)	0,175 kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0,00901107 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	9,633531 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0,008884 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0,00150796 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0,035534 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0,00603186 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	0,00160021 A
Earth Factor, Magnitude	0,999927
Earth Factor, Angle	0,00070959 deg

Buttons: OK, Cancel, Figure, Jump to ...

Рис. 3.12 – Загальна характеристика ПЛ-0,4кВ, Л-2, 20м.

Рис. 3.13 – Загальна характеристика ПЛ-0,4кВ, Л-2, 20м

### Модель навантаження (споживач)

Дослідження характеру споживання електроенергії в типових розподільних електричних мережах показало, що переважають комунально- побутові навантаження. Зміна цього навантаження протягом доби [41, 42] відображена на (рис. 3.14)

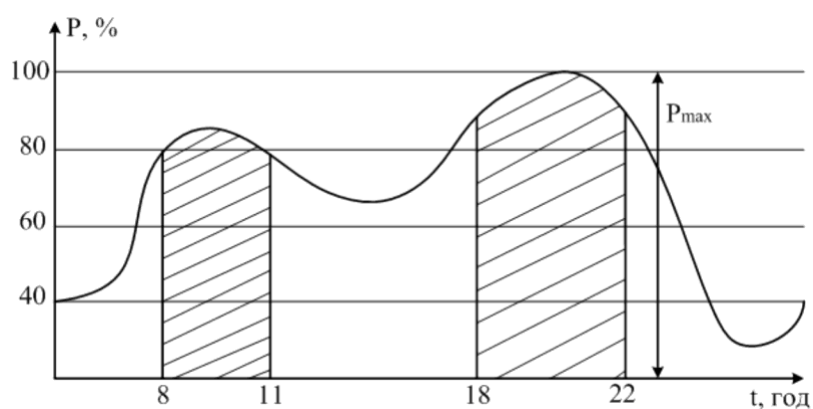


Рис. 3.14 – Зміна навантаження протягом доби

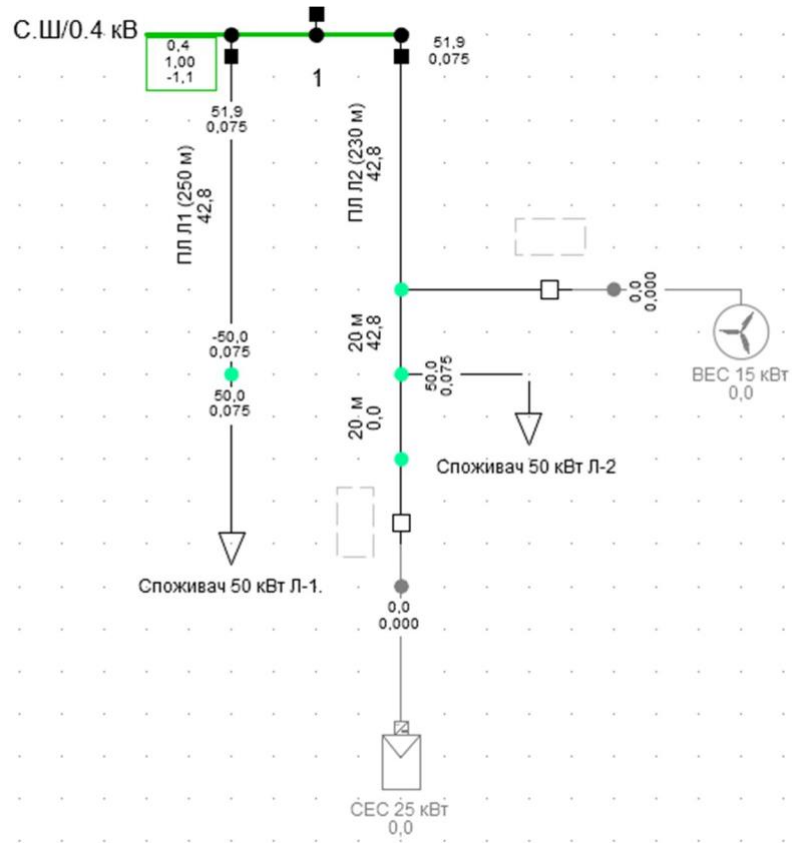


Рис. 3.15 – Модель навантаження без підключених вузлів ГЕС та ВЕС в програмному забезпеченні PowerFactory

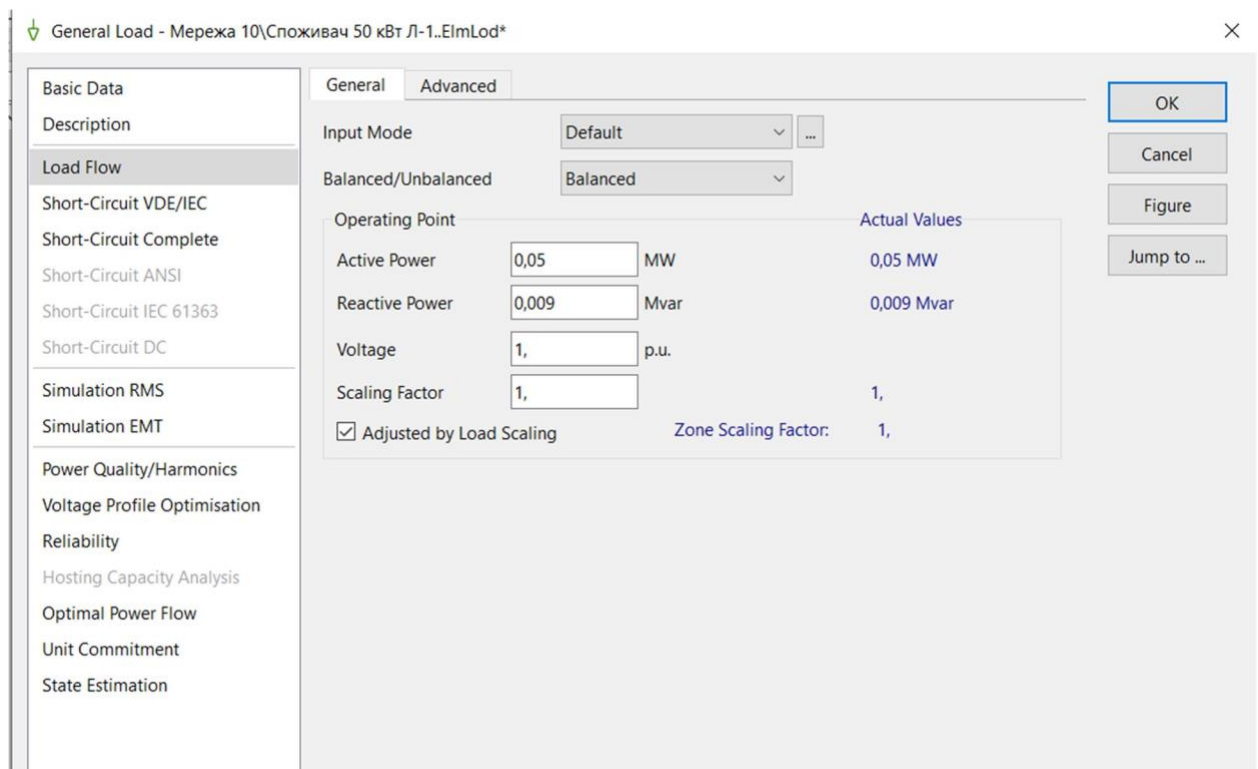


Рис. 3.16 – Налаштування навантаження споживача 50кВт Л-1.

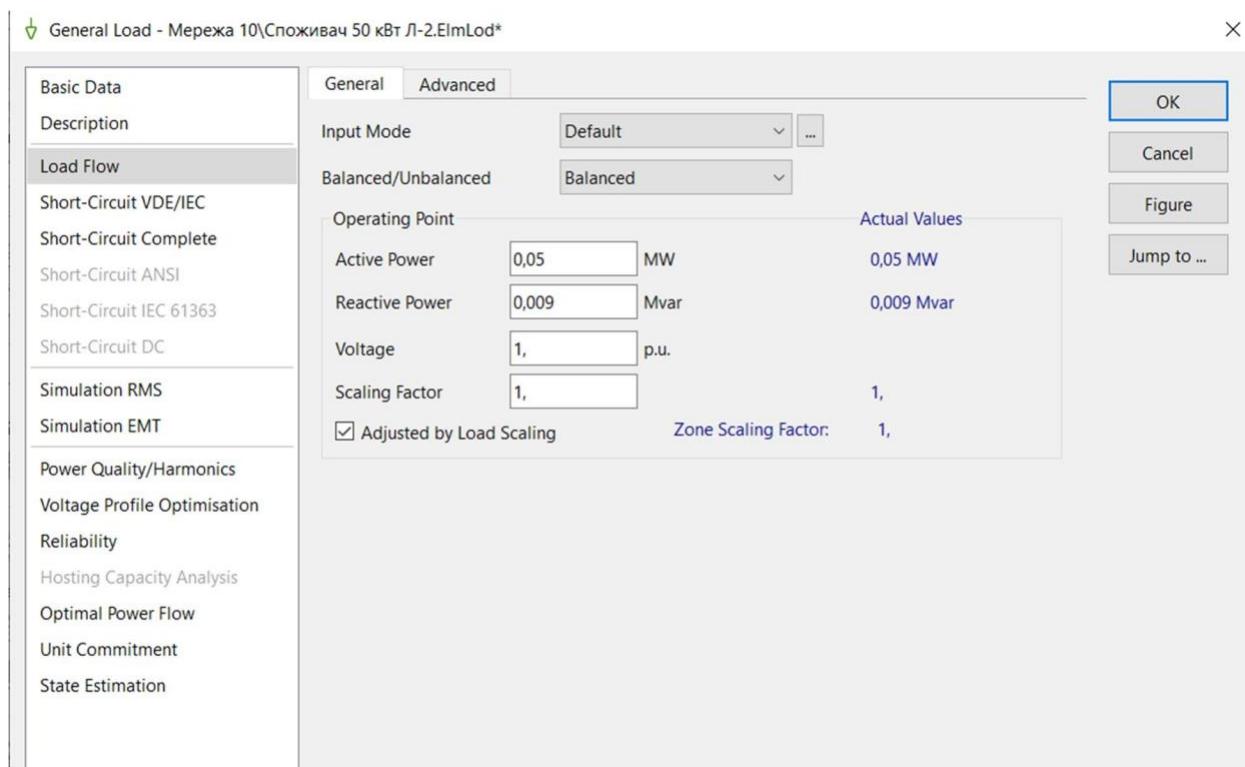


Рис. 3.17 – Налаштування навантаження споживача 50кВт Л-2.

### Модель сонячної електростанції

В даній роботі для досліджень впливу ВДЕ на напругу в вузлах приєднання, якості першого джерела було обрано СЕС.

У програмному середовищі PowerFactory доступна велика кількість моделей сонячних електростанцій (СЕС). У даній роботі використано варіант моделювання СЕС у вигляді статичного генератора з обраним режимом роботи «фотоелектрична станція» (рис. 3.18). Така модель враховує наявність вбудованого інвертора та забезпечує можливість генерування електричної потужності безпосередньо на потрібному рівні напруги.



Рис. 3.18 – Модель СЕС 25кВт в програмі PowerFactory

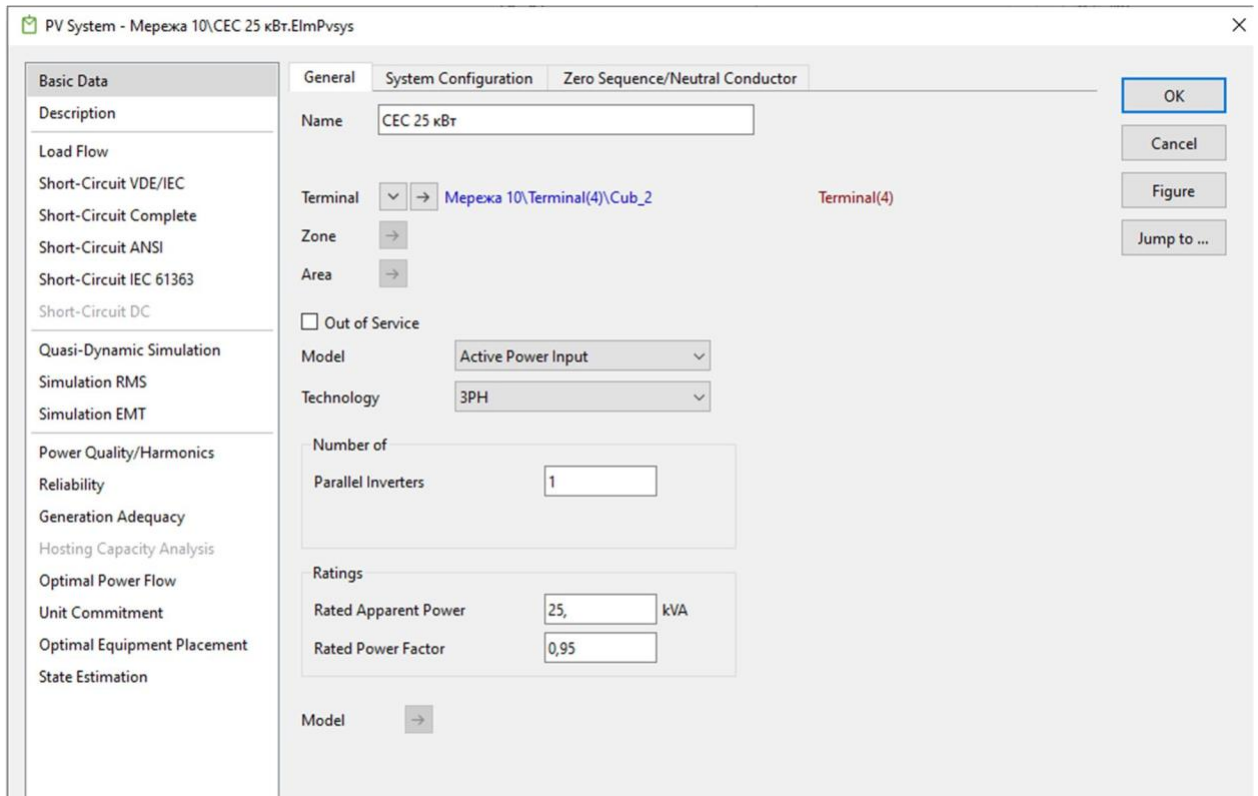


Рис. 3.19 – Загальна характеристика сонячної електростанції.

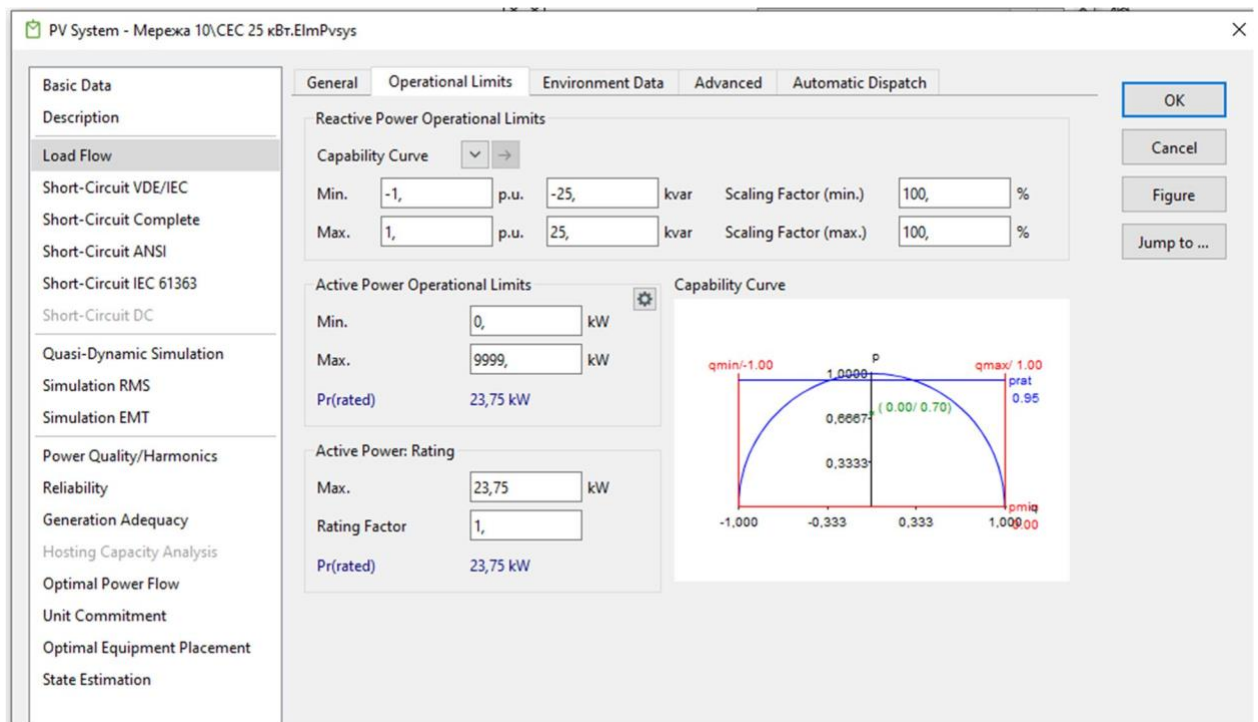


Рис. 3.20 – Налаштування СЕС

## Модель вітрової електростанції

В якості другого джерела для досліджень впливу ВДЕ на напругу було обрано ВЕС. У середовищі DIgSILENT PowerFactory вітроенергетична установка (ВЕС) моделюється як електрогенеруючий вузол, що складається з декількох взаємопов'язаних елементів: генератора, перетворювача (якщо передбачено конструкцією турбіни), системи регулювання та вузла приєднання до мережі. На однолінійній схемі така установка позначається спеціальним значком «turbine» та приєднується до шини з урахуванням її номінальних параметрів. У даному проєкті використовується ВЕС потужністю 15 кВт. (рис. 3.21).

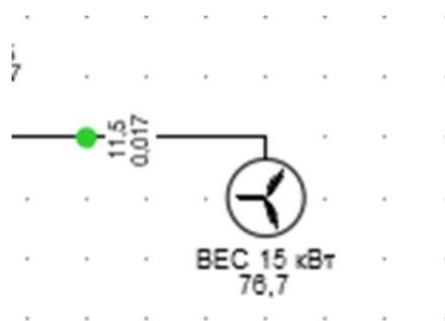


Рис. 3.21 – Модель ВЕС 15кВт в програмі PowerFactory

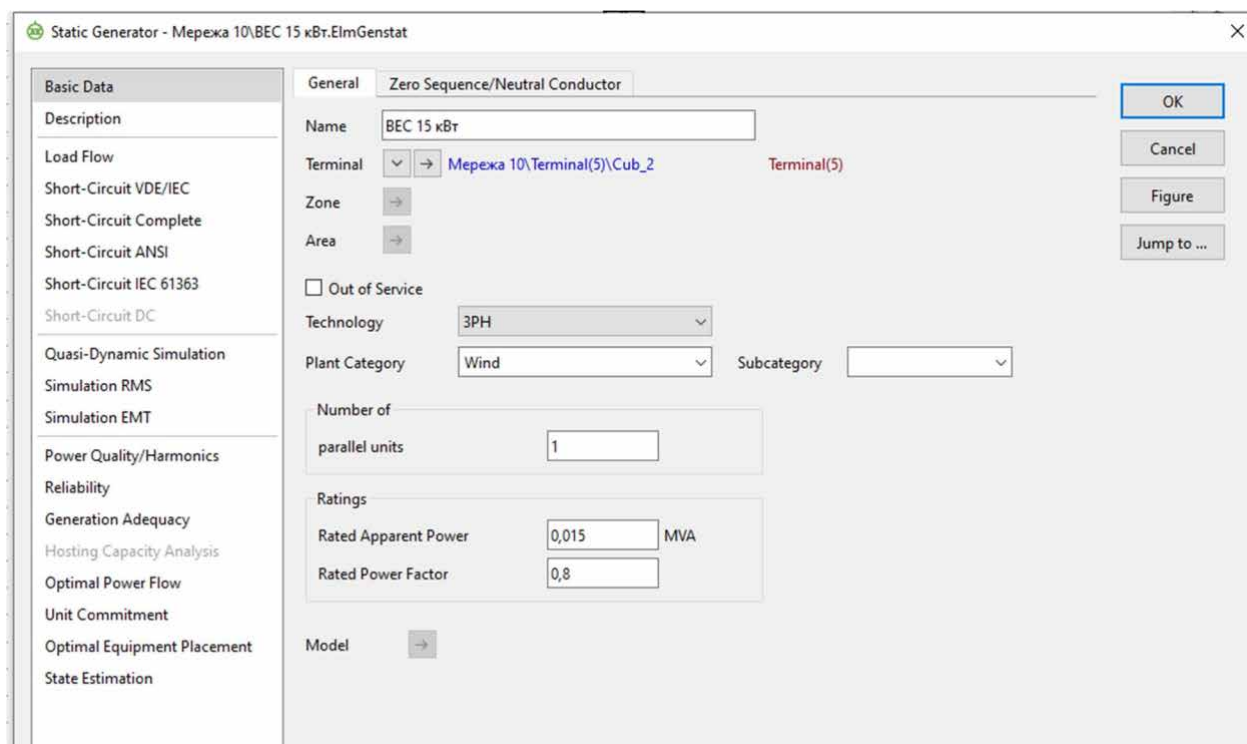


Рис.3.22 – Загальна характеристика вітрової електростанції

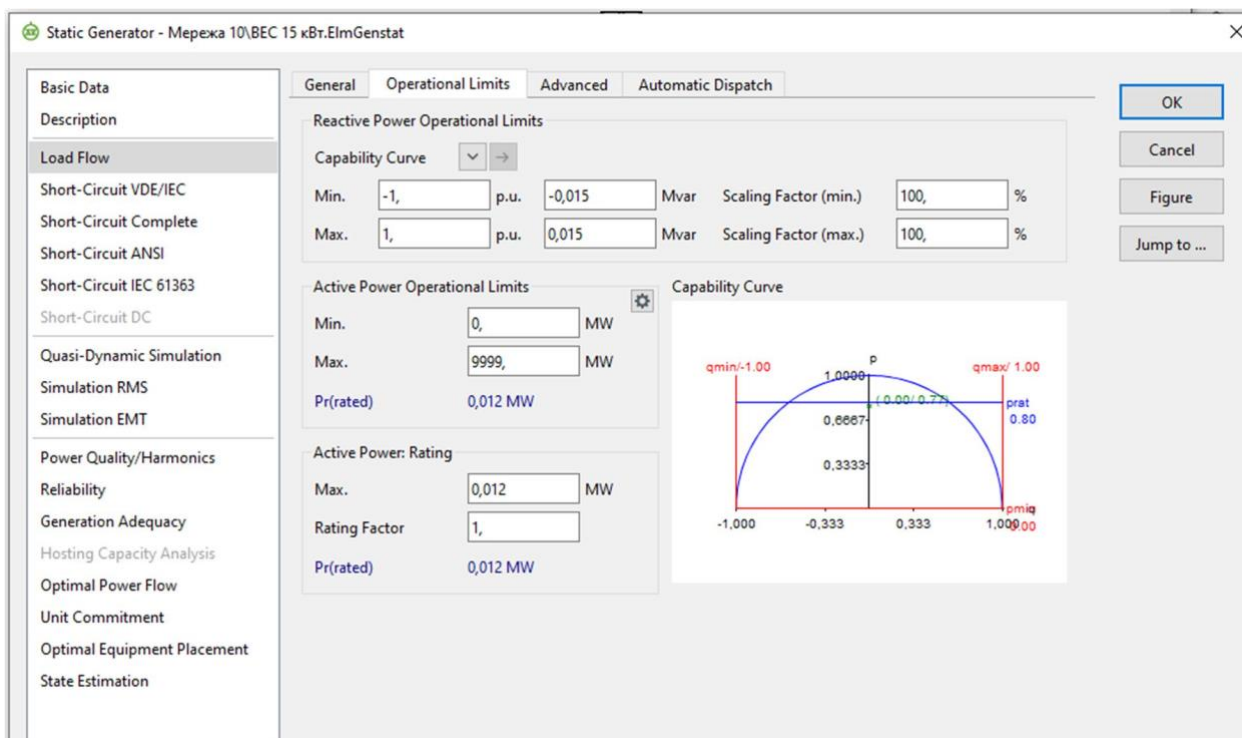


Рис. 3.23 – Налаштування ВЕС

### 3.2. Дослідження роботи розподільної мережі за напругою в характерних точках приєднання ВДЕ

На основі трьох схем PowerFactory розглянуто режими роботи розподільчої мережі 0,4 кВ із двома споживачами (по 50 кВт кожен) та джерелами розподіленої генерації – сонячною електростанцією (СЕС 25 кВт) і вітроустановкою (ВЕС 15 кВт).

Споживачі розташовані по 2 фідерах на однаковій відстані, а саме 250м від РП-0,4кВ. СЕС розташували на фідери Л-2 за 20 метрів від споживача. Потужність всієї СЕС 25кВт в 100% загруженості. Але для розрахунків вибрали 17,5кВт це 70% загруженості. ВЕС розмістили за 20 метрів до споживача. Потужність ВЕС 15кВт в 100% загруженості. Для моделювання використали 11,5кВт це становить 76,7 % загруженості.

Дослід 1 (рис. 3.24). – робота мережі тільки з навантаженнями (без генерації):

- до шин 0,4 кВ під'єднано два споживачі потужністю 50 кВт (Пл-1, Пл-2);
- СЕС і ВЕС вимкнені (0 % від номінальної потужності);
- усю потужність споживачів забезпечує трансформатор Т1.

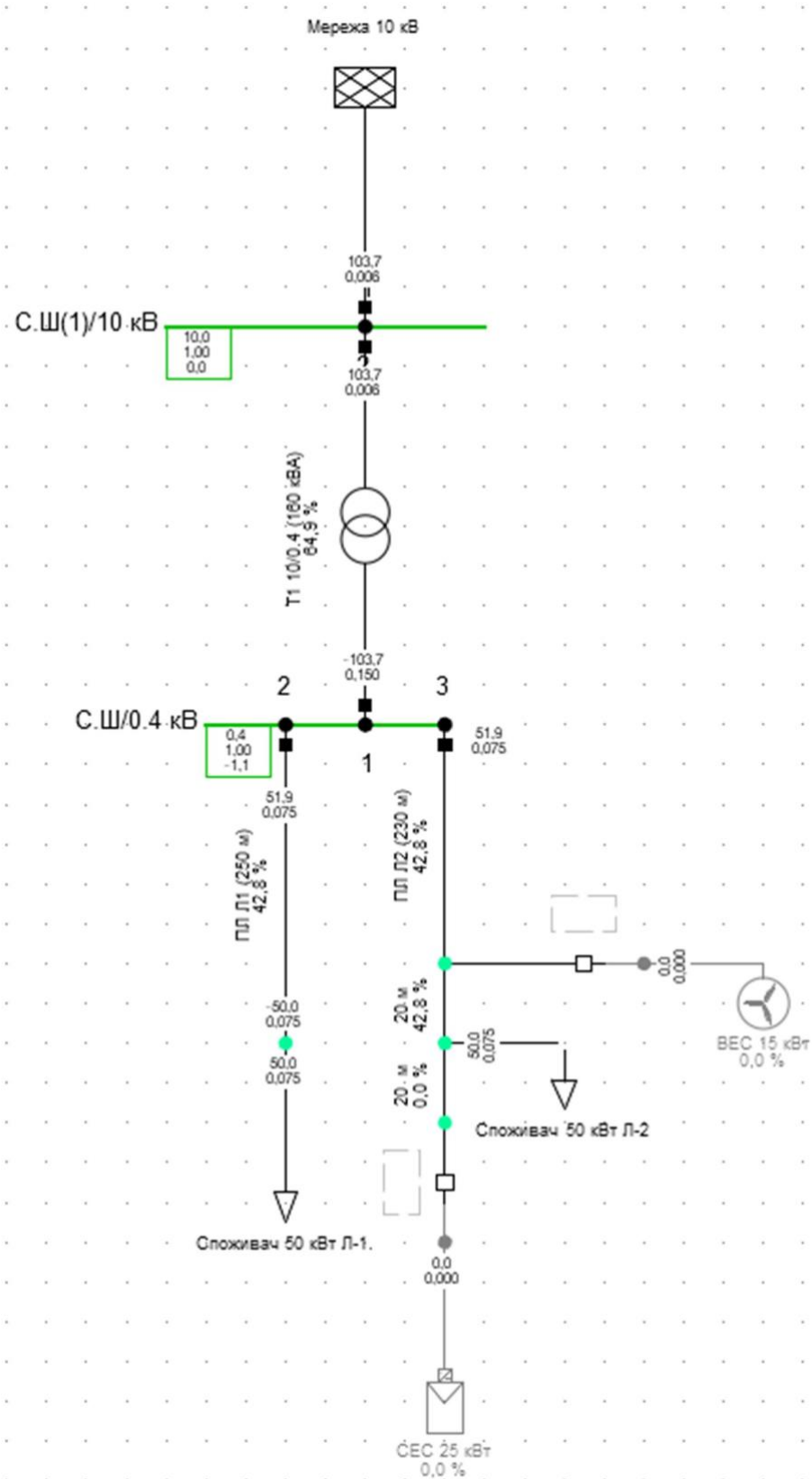


Рис. 3.24 – Схема досліду1

Дослід 2 (рис. 3.25). – робота мережі з навантаженнями та СЕС:

- споживачі Пл-1 і Пл-2 працюють з тією ж активною потужністю (по 50 кВт);
- СЕС генерує близько 70 % від своєї номінальної потужності (приблизно 17,5 кВт);
- ВЕС вимкнена (0 %);
- частину навантаження покриває СЕС, тому потужність через Т1 зменшується.

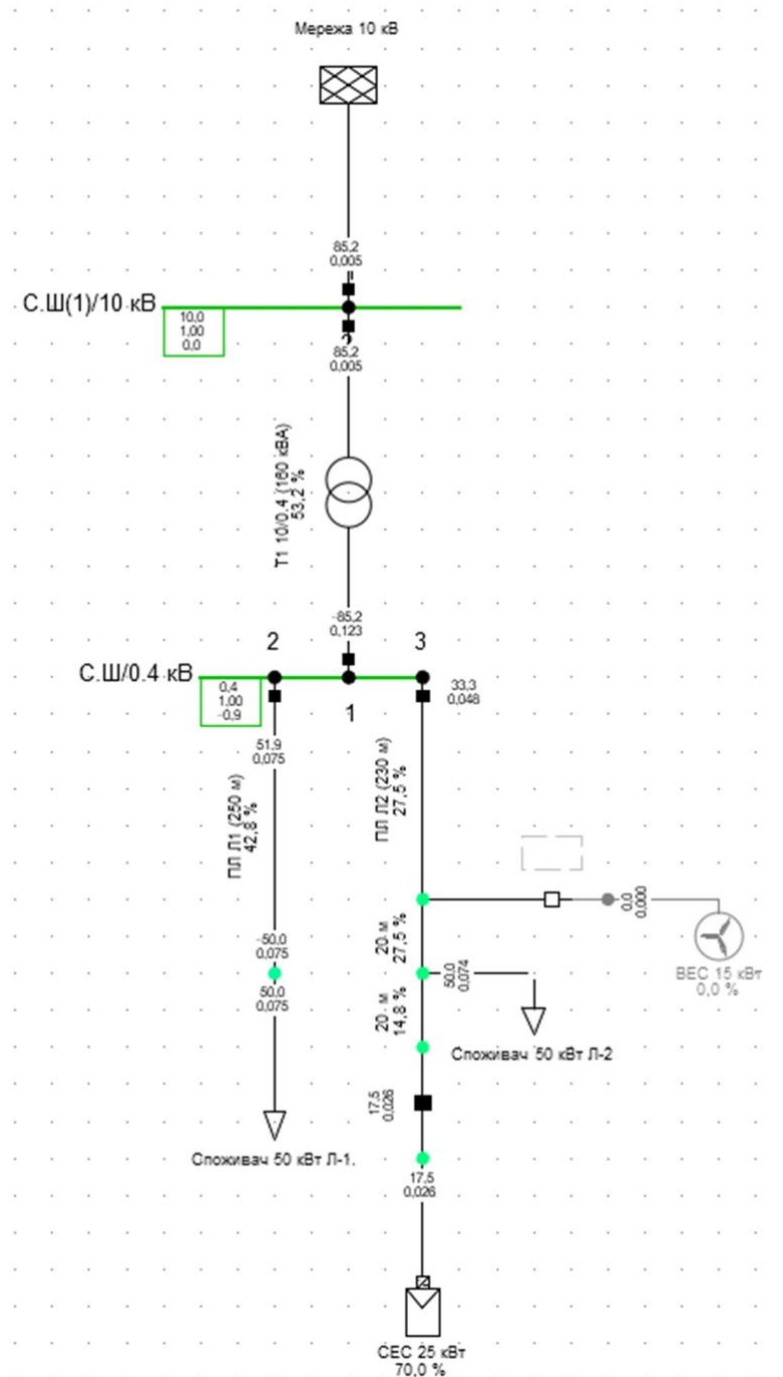


Рис. 3.25 – Схема досліду 2

Дослід 3 (рис. 3.26). – робота мережі з навантаженнями, СЕС і ВЕС:

- споживачі Пл-1 і Пл-2 залишаються по 50 кВт;
- СЕС, як і в попередньому режимі, працює приблизно на 70 % номіналу (~17,5 кВт);
- ВЕС генерує близько 76,7 % від 15 кВт (~11,5 кВт);
- завдяки роботі обох джерел розподіленої генерації навантаження Т1 ще більше зменшується.

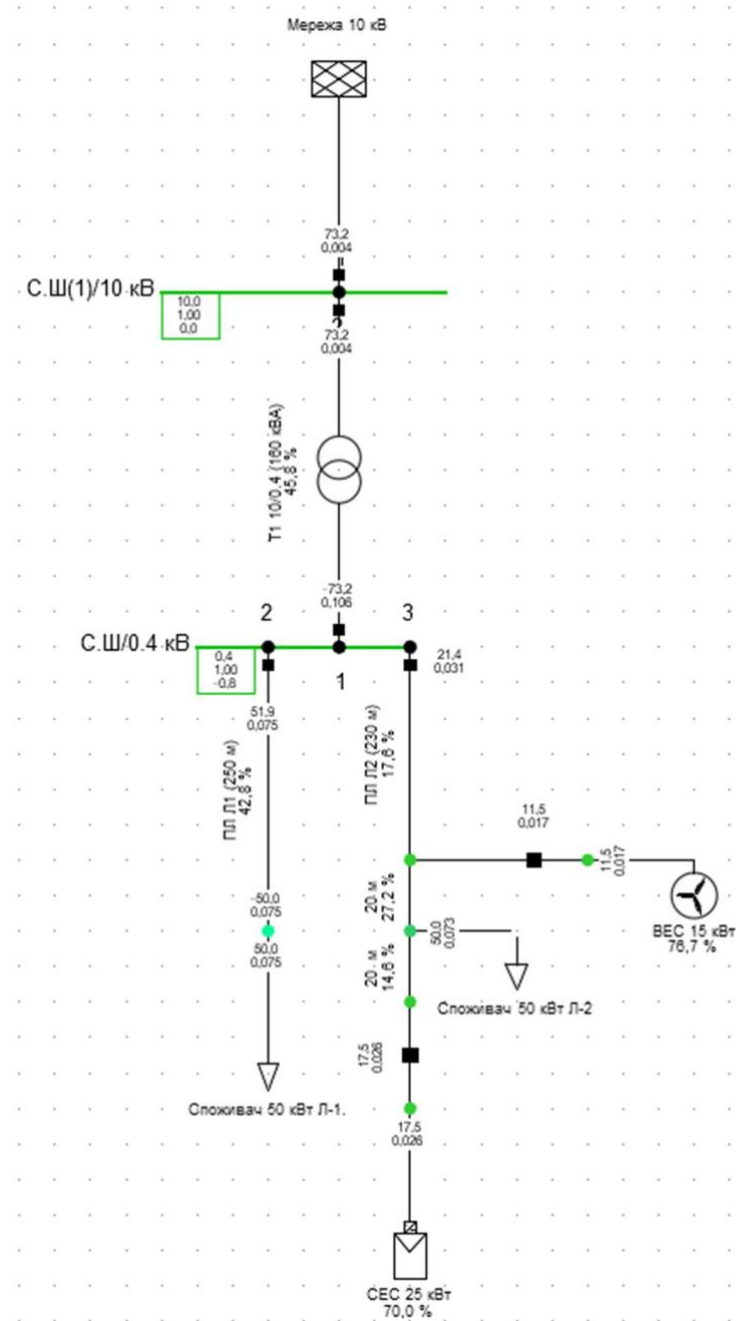


Рис. 3.26 – Схема досліду 3

Результати розрахунків напруг в мережі наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Дослід	Режим	Р ПЛ-1, кВт	Р ПЛ-2, кВт	Р СЕС, кВт	Р ВЕС, кВт	Завант Т1, %	Завант. фідера ПЛ Л1, Спож-РП, %	Завант. фідера ПЛ Л2, СЕС-спож., %	Завант. фідера ПЛ Л2, спож-ВЕС, %	Завант. фідера ПЛ Л2, ВЕС – РП, %
1	Навантаження без генерації	50	50	0	0	64,9	42,8	0	42,8	42,8
2	Навантаження + СЕС	50	50	17,5	0	53,2	42,8	14,8	27,5	27,5
3	Навантаження + СЕС + ВЕС	50	50	17,5	11,5	45,8	42,8	14,6	27,2	17,6

Аналіз результатів дослідження показав три ключові тенденції

1) Зменшення навантаження трансформатора Т1 при введенні генерації

У режимі без генерації Т1 працює з 64,9 % завантаження. При роботі СЕС завантаженість падає до 53,2 %. При одночасній роботі СЕС і ВЕС – до 45,8 %. Це демонструє очікуваний ефект: розподілена генерація частково забезпечує локальне навантаження споживачів, знижуючи перетоки потужності з боку Т1.

2) Перерозподіл струмів по фідерах при появі генерації

Фідери показують такі закономірності: Лінія ПЛ-1 (споживач → РП) має стабільну завантаженість 42,8 % у всіх режимах → бо її робота не залежить від генерації (споживач підключений окремою лінією без джерел). Лінія ПЛ Л2 має змінну завантаженість, та її режим визначається взаємним положенням СЕС і ВЕС:

- "СЕС → спож." — близько 14–15 % (в обох режимах 2 і 3).
- "спож. → ВЕС" — зменшується від 27,5 % до 27,2 % при появі ВЕС.
- "ВЕС → РП" — помітно падає від 27,5 % (якщо тільки СЕС) до

17,6 % (коли є ВЕС) → бо частина потужності ВЕС покриває місцеве навантаження.

Загальний висновок: розподілена генерація розвантажує фідер і змінює напрямки потоків потужності, наближаючи режим до локального самозабезпечення )

### 3) Формування локальних зон генерації

При появі СЕС і ВЕС частина споживання закривається без участі трансформатора. У Досліді 3 локальна генерація становить: СЕС  $\approx$  17,5 кВт ВЕС  $\approx$  11,5 кВт Разом  $\approx$  29 кВт При загальному споживанні 100 кВт локальне покриття складає  $\approx$  29 %. 2. Детальний аналіз кожного досліду

#### Дослід 1 — Мережа тільки з навантаженням

Потужність  $2 \times 50$  кВт повністю надходить через трансформатор. Завантаження Т1: 64,9 % Усі фідери працюють у напрямку "споживач  $\rightarrow$  РП  $\rightarrow$  Т1" Це базовий режим, який служить контрольним для порівняння.

#### Дослід 2 — Робота навантаження з СЕС

СЕС видає  $\approx$  17,5 кВт ( $\approx$  70 % номіналу). Частина цієї потужності покриває навантаження, тому: Навантаження Т1 знижується до 53,2 %. Фідер між СЕС та споживачем завантажується на 14,8 % у напрямку споживача. Струм по лінії до ВЕС залишається таким, як у Досліді 1 (бо ВЕС вимкнена). Поява однієї СЕС уже дозволяє зменшити завантаження трансформатора на  $\approx$  12 %.

#### Дослід 3 — Робота навантаження з СЕС і ВЕС

СЕС генерує  $\approx$  17,5 кВт. ВЕС генерує  $\approx$  11,5 кВт. Завантаження Т1 падає до 45,8 %, що є найменшим значенням серед усіх режимів. Зміни у фідерах: "СЕС  $\rightarrow$  споживач" мало відрізняється: 14,6 %. Потік "споживач  $\rightarrow$  ВЕС" зменшується: 27,2 %. Потік "ВЕС  $\rightarrow$  РП" зменшується до 17,6 %, бо частина енергії йде на споживачів.

Режим з двома джерелами демонструє оптимальний розподіл потоків потужності і мінімальну залежність від трансформатора.

### Висновки

Ефекти від введення СЕС та ВЕС в мережу 0,4 кВ: Суттєве зниження завантаження трансформатора Т1 від 64,9 %  $\rightarrow$  до 45,8 % Це підвищує довговічність та надійність роботи обладнання. Зменшення потоків потужності у фідерах та втрат у мережі. Більш рівномірний розподіл навантаження між лініями. Формування локального балансу енергії (до 30 % навантаження покривається місцевою генерацією). Зменшення потенційної кількості аварійних режимів, менші

струми → менші ризики перевантаження. Покращення енергетичної ефективності роботи мережі

## ВИСНОВКИ

У виконаній роботі проаналізовано принципи впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в енергосистему України, а також розглянуто загальносвітові тенденції розвитку відновлюваної енергетики, зокрема сонячних і вітрових електростанцій. Показано, що інтеграція мережевих ВДЕ здатна як зменшувати, так і збільшувати втрати потужності в електричних мережах, впливати на рівень і стабільність напруги, викликати коливання напруги, флікер, змінювати умови роботи релейного захисту й позначатися на надійності та тривалості експлуатації елементів мережі.

Окрему увагу приділено впливу ВДЕ на регулювання напруги. Встановлено, що такі установки (у тому числі малопотужні, які відносять до джерел розподіленої генерації — ДРГ) можуть призводити до виходу напруги за допустимі межі в окремих вузлах мережі через додатковий внесок активної потужності. Невідповідність графіка генерації ДРГ локальному навантаженню також спричиняє збільшення амплітуди коливань напруги.

Для забезпечення стабільності напруги у мережі застосовують різні технічні рішення, кожне з яких має власні переваги та обмеження. До найпоширеніших засобів належать: статичні компенсатори реактивної потужності, батареї статичних конденсаторів, синхронні компенсатори та тиристорні статичні регулятори.

У ході роботи було виконано моделювання трансформаторної підстанції з двома фідерами, один з яких містить значну кількість підключених ВДЕ. Дослідження режимів відбувалося у програмному середовищі PowerFactory, зокрема проведено розрахунки навантаження вузлів лінії електропередачі. Створено математичні моделі СЕС та ВЕС і досліджено особливості їх впливу на розподільну мережу: зміни напруги у вузлах, перерозподіл навантаження та характер зміни завантаженості трансформатора за різних сценаріїв роботи ВЕС.

Аналіз зміни рівня напруги у фідерах здійснювався для трьох випадків:

- вихідний стан без підключення ВДЕ;
- підключення сонячної електростанції потужністю 25 кВт;

– одночасне підключення СЕС (25 кВт) і вітрової електростанції потужністю 15 кВт.

Отримані результати дозволили оцінити основні наслідки інтеграції СЕС і ВЕС у мережу 0,4 кВ. Зафіксовано суттєве зниження завантаження трансформатора Т1 — з 64,9 % до 45,8 %, що сприяє підвищенню його ресурсу та надійності. Виявлено зменшення потоків потужності у фідерах і, відповідно, зниження втрат електроенергії в мережі. Завдяки перерозподілу навантаження між лініями покращуються режимні параметри розподільної мережі. До 30 % споживання покривається місцевою генерацією, що формує позитивний локальний енергетичний баланс. Також зменшується кількість можливих аварійних режимів через зниження робочих струмів, що знижує ризики перевантажень. Загалом інтеграція ВДЕ сприяє підвищенню енергетичної ефективності та покращенню технічного стану мережі. Переваги та доцільність використання PowerFactory у дослідженні

У роботі використано програмне середовище DIgSILENT PowerFactory, яке є провідним інструментом для моделювання, аналізу та оптимізації електроенергетичних систем. Застосування PowerFactory забезпечило такі ключові переваги:

Точність математичних моделей

PowerFactory містить детальні моделі елементів електромережі — трансформаторів, ліній, навантажень, інверторів СЕС та ВЕС. Це дозволяє коректно відтворювати поведінку розподільної мережі під час зміни режимів.

Можливість моделювання ВДЕ з урахуванням їх реальних характеристик

Інструмент дає змогу задавати параметри фотоелектричних інверторів, криві генерації, режими роботи ВЕС, а також моделювати їх вплив на напругу, втрати та потоки потужності.

Висока гнучкість у створенні сценаріїв роботи мережі

Програма дозволяє легко змінювати конфігурацію мережі, підключати нові джерела генерації, задавати різні варіанти навантаження та миттєво аналізувати отримані результати.

## Розрахунок режимів та аналіз якості електроенергії

PowerFactory виконує як статичні (Load Flow), так і динамічні розрахунки. Це робить його ефективним інструментом для оцінки впливу ВДЕ на стабільність напруги, флікер та роботу релейного захисту.

## Надійність і відповідність міжнародним стандартам

Розрахункові алгоритми PowerFactory широко застосовуються операторами систем розподілу та передавання у багатьох країнах. Це підвищує достовірність і практичну цінність результатів.

## Візуалізація мережевих режимів

Завдяки зручному графічному інтерфейсу можна наочно відстежувати зміни напруги, завантаження обладнання, потоки потужності та локальні проблемні зони мережі.

Таким чином, застосування PowerFactory забезпечило глибоке й достовірне дослідження процесів, що відбуваються в розподільній мережі під час підключення СЕС і ВЕС, а також дозволило отримати результати, максимально наближені до реальних умов експлуатації.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гальчак В. П., Боярчук В. М. Альтернативні джерела енергії. Енергія Сонця. Львів: Вид-во ЛНАУ, 2008. 135 с.
2. Гальчак В. П., Дмитрів Г. М. Розрахунок енергетичних параметрів гібридної системи теплопостачання фермерського будинку. Метод. вказівки до виконання курсового проекту. Львів, ЛДАУ, 2005. 36 с.
3. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С., Гнатишин Я. М. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб. Львів: "Магнолія 2006", 2008. 188 с.
4. Жуковський С. С., Лабай В. Й. Системи енергопостачання і забезпечення мікроклімату будинків та споруд: Навч. пос. для ВЗО. Львів: Астрономо-геодезичне товариство, 2000. 259 с.
5. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. Тернопіль: Підручники і посібники, 2001. 984 с.
6. Кудря С. О., Головка В. М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: навч. посіб. К.: НТУУ "КПІ", 2011. 184 с.
7. Малярєнко В. А. Основи теплофізики будівель та енергозбереження. Підручник. 2-е видання. Х.: Видавництво САГА, 2010. 484 с.
8. Малярєнко В.А. Енергетичні установки. Загальний курс. Х.: В-во САГША, 2008. 320 с.
9. Саницький М. А., Позняк О. Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології в будівництві: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 236 с.

10. Нова енергетична стратегія України до 2035 року: «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 р. № 605. С. 66.

11. Марченко А.А., Труніна Г.О., Тимохіна А.О. Моделювання регулятора напруги розподільної електричної мережі. Вісник Чернігівського державного Технологічного Університету. Технічні науки. Чернігів, 2013.

12. Яндульський О.С., Труніна Г.О. Підхід до оптимального регулювання напруги в розподільній електричній мережі з джерелом розосередженої генерації з урахуванням їх належності одному або різним власникам. Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. Маріуполь, 2015. №30 (Т.2). С. 121-129

13. статті Voltage Regulation in Distribution Grids: A Survey (Srivastava P., Haider R., Nair V., Venkataramanan V., Annaswamy A., Srivastava A.; 2023)

14. Dong Q., Song X., Gong C., Hu C., Rui J., Wang T., Xia Z., Wang Zh. Voltage Regulation Strategies in Photovoltaic-Energy Storage System Distribution Network: A Review. Energies. 2025; 18(11): 2740. DOI:10.3390/en18112740.

15. Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 1 жовт. 2014 р.

16. №902-р. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014-%D1%80> (20.01.2018).

17. Кудря С.О. Стан та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Вісник НАН України. Київ, 2015. № 12. С. 19-26.

18. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах. Технічна електродинаміка. Київ, 2011. №1. С. 46-53.

19. Кириленко О.В., Павловський В. В., Лук'яненко Л.М., Трач І.В. Проблеми інтеграції відновлювальних джерел електроенергії в "слабкі" електричні мережі. Технічна електродинаміка. Київ, 2012. № 3. С. 25-26.

20. Sumeet Trivedi, Chattopadhyay D. Voltage Sag Mitigation in the Distributed Generation System with STATCOM. International Journal of Emerging

Technology and Advanced Engineering. 2013. Vol.3, No 10. P.153-159.

21. Mahmud M.M.A., Pota H.R., Hossain M.J. Partial Feedback Linearizing Controller Design for a DSTATCOM to Enhance Voltage Stability of Distribution Network with Distributed Generation. 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), 30 Oct.-2 Nov. 2012. Auckland, New Zealand, 2012. P.1-6.

22. Hossain M.J., Pota H.R., Mahmud M.A. Decentralized STATCOM/ESS Control for Wind Generators. Smart Power Grids. Heidelberg, 2012. P. 401–437

23. Лежнюк П.Д., Нікіторович О.В., Жан-П'єр Нгома. Компенсація реактивної потужності асинхронних генераторів на малих гідроелектростаціях. Наукові праці ВНТУ. Вінниця, 2008. № 2. С.1-6.

24. Mohamed Shawky El Moursi, Zeineldin H.H., James L. Kirtley, Khaled Alobeidli. A Dynamic Master/Slave Reactive Power Management Scheme for Smart Grids With Distributed Generation. IEEE Transactions on Power Delivery. 2014. Vol.29, No 3. P. 1157–1167.

25. Casavola A., Franze G., Menniti D., Sorrentino N. Voltage regulation in distribution networks in the presence of distributed generation: A voltage set-point reconfiguration approach. Electric Power Systems Research. 2011. Vol.81. P.25–34.