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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
магістра
на тему
МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕГРАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В РОЗПОДІЛЬЧУ МЕРЕЖУ 10 кВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ SICAD ТА АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМИ
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕС-24 мг
Спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
_____/Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)
Керівник _____/ Павло БУДАНОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)
Рецензент _____/Світлана АРТЮХ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

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

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

_____
(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

«___» _____2025 р.

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

здобувачу вищої освіти Юлії ОЛІЙНИК

1. Тема «Моделювання інтеграції сонячної електростанції в розподільчу мережу 10 кВ із використанням SICAD та аналіз режимів роботи системи» затверджена наказом по університету № 4801-5/3664 від «06» жовтня 2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «15» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Карта місцевості, тип мережі, рівень напруги, споживачі, потужність кожного споживача, кількість СЕС, потужність кожної СЕС.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬЧІ МЕРЕЖІ; РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ТА МОЖЛИВОСТІ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ SICAD; РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ІНТЕГРАЦІЇ ВДЕ У СЕРЕДОВИЩІ SICAD; ВИСНОВКИ

5.Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):

Слайди презентації

6. Консультант:

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

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2025 р.

Керівник _____ Павло БУДАНОВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання _____ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК
виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	12.10.25 – 15.10.25	
2	Проведення аналізу наукової літератури	16.10.25 – 23.10.25	
3	Виконання першого розділу магістерської кваліфікаційної роботи	24.10.25– 01.11.25	
4	Виконання другого та третього розділу магістерської кваліфікаційної роботи	02.11.25 – 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.25 – 07.12.25	
6	Підготовка доповіді, презентації до захисту	08.12.25- 15.12.25	

Студент (ка) _____ Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи на тему

«Моделювання інтеграції сонячної електростанції в розподільчу мережу 10 кВ із використанням SICAD та аналіз режимів роботи системи»

ОЛІЙНИК ЮЛІЇ

Магістерська робота виконана на 91 сторінок, містить 21 таблиць, 8 рисунків, що характеризують результати дослідження, використано 27 літературних джерел.

Актуальність дослідження зумовлена активним розвитком відновлюваних джерел енергії в Україні, зокрема сонячної енергетики, а також необхідністю забезпечення надійної та безпечної роботи розподільчих мереж при зростанні частки децентралізованої генерації. Інтеграція СЕС у мережі середньої напруги може призводити до зміни режимів напруги, перевантаження елементів мережі, зростання рівнів струмів короткого замикання, що потребує детального аналізу на етапі проєктування та експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в роботі розглянуто теоретичні основи інтеграції відновлюваних джерел енергії у розподільчі мережі, проаналізовано нормативні вимоги до приєднання СЕС та можливі технічні обмеження.

Досліджено функціональні можливості програмного комплексу SICAD для моделювання електричних мереж, аналізу навантажень, рівнів напруги, втрат потужності та струмів короткого замикання. Обґрунтовано доцільність використання даного програмного середовища для задач інтеграції ВДЕ.

Виконано побудову топології розподільчої мережі 10 кВ, змодельовано схему приєднання сонячної електростанції та проведено розрахунки режимів роботи системи для характерних сценаріїв: літнього максимуму генерації СЕС, зимового максимуму споживання, а також нормальних і аварійних режимів.

За результатами моделювання встановлено, що інтеграція СЕС за умови дотримання нормативних вимог не призводить до порушення допустимих рівнів напруги та перевантаження елементів мережі.

ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, РОЗПОДІЛЬНІ МЕРЕЖІ, ІНТЕГРАЦІЯ МЕРЕЖ, ПРОГРАМНІ КОМПЛЕКСИ

ABSTRACT

to a master's thesis on

«Simulation of the integration of a solar power plant into a 10 kV distribution network using SICAD and analysis of system operating modes»

OLIINYK YULIIA

The master's work is executed on 91 pages, contains 21 tables, 8 drawings, which characterize the results of research, additions, used 27 literary sources.

The relevance of the study is due to the active development of renewable energy sources in Ukraine, in particular solar energy, as well as the need to ensure reliable and safe operation of distribution networks with an increasing share of decentralized generation. Integration of SPPs in the medium voltage network can lead to changes in voltage modes, overloading of network elements, and an increase in short-circuit current levels, which requires detailed analysis at the design and operation stage.

In order to achieve the set goal, the paper examines the theoretical foundations of the integration of renewable energy sources into distribution networks, analyzes the regulatory requirements for joining SPPs and possible technical limitations.

The functionality of the SICAD software complex for modeling electrical networks, analyzing loads, voltage levels, power losses and short-circuit currents was studied. The expediency of using this software environment for RES integration tasks is substantiated.

The construction of the topology of the 10 kV distribution network was carried out, the solar power plant connection scheme was simulated, and the system operating modes were calculated for characteristic scenarios: the summer maximum of SPP generation, the winter maximum of consumption, as well as normal and emergency modes.

According to the results of the modeling, it was established that the integration of the SES, subject to compliance with regulatory requirements, does not lead to a violation of permissible voltage levels and overloading of network elements.

RENEWABLE SOURCES OF ELECTRICITY, SOLAR POWER PLANT, DISTRIBUTION NETWORKS, NETWORK INTEGRATION, SOFTWARE COMPLEXES

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 7
ВСТУП 8
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬЧІ МЕРЕЖІ 11
1.1. Сучасний стан та тенденції розвитку ВДЕ в Україні та світі 11
1.2. Вплив відновлюваних джерел на режими роботи електричних мереж 16
1.3. Проблеми та виклики при приєднанні ВДЕ до розподільчих систем 18
1.4. Програмні засоби моделювання та проектування енергетичних систем 22
1.4.1. Класифікація програмних засобів для моделювання енергосистем 22
1.4.2. Програмне середовище SICAD 23
1.4.3. Порівняльний аналіз програмних засобів 24
1.4.4. Значення моделювання для проєктування ВДЕ 25
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 27
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ТА МОЖЛИВОСТІ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ SICAD 30
2.1. Інструменти для проектування електричних мереж 30
2.2. Призначення та архітектура SICAD 32
2.3. Можливості інтеграції SICAD з розрахунковими програмними комплексами 34
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 37
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ІНТЕГРАЦІЇ ВДЕ У СЕРЕДОВИЩІ SICAD 39

3.1. Вихідні дані для моделювання (тип мережі, напруга, потужність ВДЕ, точки приєднання) 39
3.2. Створення топології електричної мережі в SICAD 41
3.3. Побудова схеми приєднання відновлюваних джерел (сонячна електростанція) 43
3.4. Результати розрахунку електричних параметрів в програмному середовищі SICAD 60
3.5. Моделювання інтеграції СЕС 80
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 87
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ 89
СПИСОК ПОСИЛАНЬ 92

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ - відновлювані джерела енергії

СЕС - сонячна електростанція

ЕС - електрична станція

ЕМ - електрична мережа

РМ - розподільча мережа

ЛЕП - лінія електропередачі

КЛ - кабельна лінія

ПЛ - повітряна лінія

КТП - комплектна трансформаторна підстанція

ТМ - трансформаторна підстанція

РП - розподільчий пункт

ПС - підстанція

НН - низька напруга

СН - середня напруга

ВН - висока напруга

КЗ - коротке замикання

SICAD - програмний комплекс моделювання та аналізу електричних мереж

ВСТУП

Сучасний розвиток енергетичної галузі характеризується активним впровадженням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), серед яких провідне місце посідають сонячні електростанції (СЕС). Зростання їхньої частки у структурі енергетичного балансу сприяє зниженню викидів парникових газів, диверсифікації джерел електропостачання та підвищенню енергетичної незалежності України. Разом із тим, інтеграція СЕС у розподільчі електричні мережі створює низку технічних і організаційних викликів, пов'язаних із впливом генерації на режими роботи системи електропостачання.

Збільшення кількості децентралізованих генераторів у мережах середньої напруги (6–35 кВ) призводить до змін потоків потужності, коливань напруги, виникнення проблем із релейним захистом, регулюванням напруги та частоти. Особливо актуальним є забезпечення стійкої, безпечної та економічно ефективної роботи розподільчих мереж при змінних умовах інсоляції та навантаження. У зв'язку з цим виникає потреба у моделюванні процесів інтеграції сонячних електростанцій у мережу 10 кВ з урахуванням технічних характеристик обладнання, профілів навантаження та генерації.

Одним із ефективних інструментів для такого аналізу є програмне середовище SICAD, яке дозволяє здійснювати комп'ютерне моделювання електричних систем, досліджувати режими роботи, аналізувати потоки потужності, втрати енергії, вплив генерації ВДЕ на параметри напруги та частоти, а також оцінювати стійкість системи. Використання SICAD забезпечує можливість побудови детальних цифрових моделей енергетичних об'єктів, симуляції роботи електромереж різних рівнів напруги та дослідження впливу відновлюваних джерел енергії на якість і надійність електропостачання.

Мета дослідження

Метою магістерської роботи є моделювання процесу інтеграції сонячної електростанції в розподільчу мережу 10 кВ із використанням програмного комплексу SICAD та аналіз електричних режимів роботи системи.

Об'єктом дослідження є розподільча електрична мережа 10 кВ із підключеною сонячною електростанцією, у якій відбуваються процеси перетікання активної та реактивної потужності, зміни напруги та розподілу струмів.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми інтеграції сонячної генерації в систему електропостачання, а також вплив параметрів СЕС на режими роботи розподільчої мережі 10 кВ, включно з показниками якості, стабільності та енергоефективності.

Завдання дослідження

- Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:
- Проаналізувати сучасний стан розвитку сонячної енергетики в Україні та у світі, а також тенденції інтеграції ВДЕ у мережі середньої напруги.
- Розробити математичну та структурну модель розподільчої мережі 10 кВ із підключеною сонячною електростанцією.
- Виконати моделювання системи в програмному середовищі SICAD, створивши цифровий двосторонній енергетичний потік між генерацією та споживачами.
- Провести аналіз електричних режимів при різних сценаріях роботи - зміні інсоляції, навантаження та реактивної потужності.
- Оцінити вплив інтеграції СЕС на показники напруги, втрати потужності, коефіцієнт потужності, рівень гармонік та якість електроенергії.
- Визначити оптимальні параметри підключення СЕС до мережі для забезпечення стійкої роботи та мінімізації втрат.
- Розробити рекомендації щодо впровадження систем керування режимами роботи (Smart Control) для підвищення стабільності та енергоефективності.

Робота містить елементи наукової новизни, що полягають у створенні моделі інтеграції СЕС у мережу 10 кВ із можливістю адаптивного

регулювання параметрів генерації та споживання в реальному часі, а також у використанні інтелектуальних алгоритмів аналізу режимів роботи системи у середовищі SICAD.

Результати роботи можуть бути використані для:

- проектування схем підключення сонячних електростанцій до мереж 10 кВ;
- оцінки впливу ВДЕ на електричні режими розподільчих систем;
- удосконалення систем керування режимами Smart Grid;
- розроблення методичних рекомендацій для м.

Таким чином, дослідження спрямоване на створення технічно та економічно обґрунтованих рішень для інтеграції сонячних електростанцій у розподільчі мережі середньої напруги. Реалізація поставлених завдань забезпечить підвищення надійності, стабільності та ефективності роботи електроенергетичних систем у контексті розвитку інтелектуальних мереж (Smart Grid) та декарбонізації енергетики.

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Моделювання інтеграції сонячної електростанції в розподільчу мережу 10 кВ із використанням SICAD та аналіз режимів роботи системи» складається з таких частин: перелік умовних позначень, вступ, три розділи, висновки, список посилань.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕГРАЦІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ У РОЗПОДІЛЬЧІ МЕРЕЖІ

1.1. Сучасний стан та тенденції розвитку ВДЕ в Україні та світі

1. Світовий контекст і ключові тренди

За останні роки світовий розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) продемонстрував прискорений ріст: 2024 рік став рекордним за додаванням потужностей - було встановлено кількасот гігават нових сонячних та вітрових потужностей, причому найбільший внесок забезпечила сонячна генерація. Попри історичні темпи зростання, світові темпи приросту треба ще значно підвищити, щоб досягти цілей щодо розширення ВДЕ до 2030 року (треба «триплінг» встановлених потужностей). Цей глобальний бум підсилює конкуренцію за компоненти ланцюжків постачання, водночас акцентуючи потребу в модернізації мереж і систем зберігання енергії [1].

Основні світові тренди можна стисло охарактеризувати так:

- ✓ домінування сонячної фотогальваніки як найшвидшого джерела росту;
- ✓ акумуляція (СЕС + батареї) та цифрові системи керування — ключ до інтеграції ВДЕ у мережі;
- ✓ географічна концентрація великих приростів (особливо Китай, США, Європа) - зростає роль державної політики у прискоренні ринку [1].

2. Європейський напрямок і регуляторні ініціативи

Європа й у 2020-х роках прискорює перехід до ВДЕ через пакет законодавчих ініціатив (EPBD, директиви з енергоефективності та екодизайну). До 2030 р. ЄС ставить амбітні цілі з декарбонізації, інтеграції розумних мереж і підвищення частки ВДЕ у кінцевому енергоспоживанні. Це супроводжується розвитком правил підключення, стимулюванням управління попитом і фінансових механізмів для інвестицій у накопичувачі. (Детальний огляд політик - див. звіти ЄС та IEA) [2].

3. Стан та динаміка ВДЕ в Україні

Україна демонструє стійку активність у впровадженні ВДЕ, незважаючи на складні умови (військова агресія, пошкодження інфраструктури). За офіційними й аналітичними джерелами, загальна встановлена потужність ВДЕ в Україні до початку масштабного вторгнення сягала близько 9–10 ГВт (з переважанням сонячної фотогальваніки). Після 2022 року ринок зазнав коливань, проте в 2023–2024 роках спостерігалося відновлення підключень: за окремими оцінками, у 2024 році додано ~800–850 МВт сонячних потужностей (переважно розподілена генерація - приватні й комерційні PV-проєкти). Загалом станом на початок 2024–2025 рр. встановлена потужність ВДЕ в Україні оцінюється близько 8–9 ГВт, причому сонце - більша частка [3].

Найважливіші особливості українського ринку:

- ✓ швидкий розвиток розподіленої PV-генерації (домашні системи, СЕС на дахах та невеликі парки);
- ✓ обмежені ресурси для масштабного розгортання великих вітро- або гідропроєктів у короткостроковій перспективі;
- ✓ значна роль приватного і корпоративного інвестування у PV-ринок навіть в умовах невизначеності;
- ✓ критична потреба у розвитку накопичувачів енергії, цифрових платформ моніторингу та адаптації правил підключення [3].

4. Технічні виклики інтеграції ВДЕ у мережі

Інтеграція великої кількості нерегульованої генерації підвищує вимоги до розподільчих мереж: забезпечення якості напруги, уникнення зворотних потоків, адаптація систем захисту, координоване регулювання реактивної потужності та обмеження коливань частоти при високих частках ВДЕ. Для пом’якшення ефектів потрібні: модернізація трансформаторів, розгортання систем автоматичного регулювання напруги на ПС/РЗ, впровадження систем управління попитом (demand response) та накопичувачів енергії (BESS). Також важливе застосування цифрових інструментів (SCADA/EMS) для реального часу [1].

5. Економічні та інституційні тенденції

Глобальні інвестиції в сектор ВДЕ зростають; водночас економічна привабливість PV і вітру підтримується низькою вартістю обладнання (особливо фотопанелей) та доступом до фінансування. У країнах з політичною та регуляторною визначеністю швидші інвестиції, у регіонах з ризиками — уповільнення та зміщення в бік дрібніших, швидко окупних проєктів (розподілених систем). Для України критично важливе створення сприятливого регуляторного середовища, захисту інвесторів і відновлення та посилення мережевої інфраструктури [2].

6. Перспективи та рекомендації

Серед ключових напрямів, що визначатимуть подальший розвиток ВДЕ, - масова цифровізація енергосистем, масштабування накопичувачів енергії, просування гнучких механізмів ринку (включно з послугами з балансування) та адаптація правил підключення малих і середніх генераторів. Для України доцільно концентруватися на: прискоренні підключень безпечним способом, розвитку BESS і систем управління, а також інтеграції ВДЕ у відновлення інфраструктури й програму енергетичної стійкості.

Протягом останнього десятиліття відновлювана енергетика стала ключовим напрямом розвитку світової енергосистеми. За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики (IRENA), у 2024 році сумарна встановлена потужність ВДЕ у світі перевищила 3 500 ГВт, з яких понад 1400 ГВт припадає на сонячну енергетику, а 1 000 ГВт - на вітрову.

Це означає, що ВДЕ забезпечують понад 30 % світового виробництва електроенергії. Основний приріст у 2023–2024 рр. забезпечили Китай, США, Індія та Європейський Союз.

До основних трендів розвитку світового ринку ВДЕ належать:

- зниження вартості будівництва сонячних і вітрових електростанцій;
- зростання частки розподіленої генерації (домашні та комерційні СЕС);
- впровадження систем накопичення енергії (BESS) і Smart Grid;

- цифровізація енергомереж та інтеграція мікрогенерації;
- орієнтація політик на декарбонізацію та енергетичну незалежність.

Україна, як член Енергетичного співтовариства, активно впроваджує європейські стандарти у сфері ВДЕ. Станом на початок 2025 року встановлена потужність відновлюваних джерел енергії становить близько 8,7 ГВт, з яких:

- сонячні електростанції - ≈ 6,0 ГВт (70 %);
- вітрові електростанції - ≈ 1,3 ГВт;
- біоенергетика - ≈ 0,8 ГВт;
- малі ГЕС - ≈ 0,6 ГВт.

Незважаючи на військові виклики, спостерігається тенденція до розвитку розподіленої генерації (домашні СЕС до 50–200 кВт, комунальні енергетичні проєкти).

Водночас ключовими проблемами залишаються обмеження пропускної здатності мереж, нестача систем накопичення енергії, регулювання реактивної потужності та нестабільність зеленого тарифу.

Таблиця 1.1. - Порівняльна динаміка розвитку ВДЕ у світі та в Україні (2018–2024 рр.)

Рік	**Світова потужність ВДЕ, ГВт**	**у т.ч. Сонячна енергетика, ГВт**	**Україна - загальна потужність ВДЕ, ГВт**	**у т.ч. Сонячна енергетика, ГВт**
2018	2 350	480	2,1	1,2
2019	2 588	580	4,6	3,4
2020	2 799	710	7,0	5,4
2021	3 064	820	7,6	5,9
2022	3 255	940	7,9	6,0
2023	3 340	1 120	8,3	6,1
2024	**3 520**	**1 400**	**8,7**	**6,0**

Джерела: IRENA Renewable Capacity Statistics 2025, IEA World Energy Outlook 2024, Energy Community Ukraine Energy Market Report 2024.

Зі зростанням частки ВДЕ у балансі електроенергетики виникає потреба у:

- регулюванні напруги у мережах середньої напруги (6–35 кВ);
- впровадженні технологій акумулювання енергії;
- гнучких системах Smart Grid;
- адаптації релейного захисту та алгоритмів керування потужністю;
- балансуванні частоти при різкій зміні інсоляції.

У таких умовах важливим напрямом є моделювання інтеграції ВДЕ у мережі 10 кВ із використанням програмних засобів (SICAD, DIgSILENT, Power Factory, MATLAB Simulink), що дає змогу оцінити вплив ВДЕ на стабільність та надійність розподільчих систем.

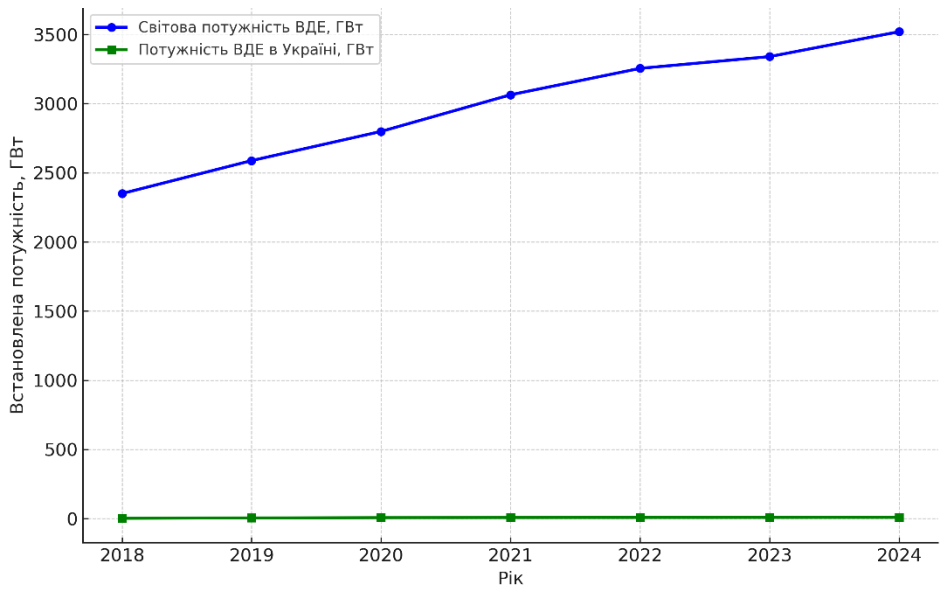


Рисунок 1.1. - Динаміка зростання встановлених потужностей ВДЕ у світі та в Україні (2018–2024 рр.)

На рисунку 1.1. представлено порівняльну динаміку росту встановлених потужностей ВДЕ. Світова генерація зросла майже на 1,2 ТВт за 6 років, тоді як в Україні приріст становив близько 6,6 ГВт. Пік розвитку ВДЕ в Україні припав на 2019–2020 рр., після чого темпи знизилися, але відновилися у 2023–2024 рр. переважно за рахунок розподілених сонячних систем.

1.2. Вплив відновлюваних джерел на режими роботи електричних мереж

Впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні електростанції, вітрові установки, малі гідроелектростанції та біогазові установки, суттєво змінює традиційні режими роботи електричних мереж. На відміну від конвенційних джерел енергії, ВДЕ характеризуються значною змінністю та непередбачуваністю вироблення електроенергії, що накладає особливі вимоги на експлуатацію та балансування енергосистеми.

Вітрові та сонячні електростанції мають змінну потужність залежно від погодних умов, часу доби та сезону. Це призводить до:

- коливань напруги в мережі;
- необхідності динамічного регулювання частоти;
- збільшення вимог до систем балансування та резервування потужності.

Наявність високого відсотка ВДЕ у структурі генерації підвищує ймовірність різких змін навантаження на трансформатори та лінії передач, що може призводити до перевантажень або нестабільності локальних мереж.

Зміна режимів роботи енергосистеми при інтеграції ВДЕ проявляється у вигляді:

- зростання амплітуди коливань частоти електромережі через нерегулярне надходження потужності;
- необхідності використання акумулюючих систем або регулюючих резервів для стабілізації режимів;
- підвищених вимог до автоматизованих систем управління (SCADA, EMS) для прогнозування вироблення та балансування споживання.

Висока інтеграція ВДЕ в розподільчі мережі може спричиняти:

- зворотний потік потужності від споживачів до підстанцій, що потребує модернізації релейного захисту;
- коливання напруги понад допустимі межі, особливо в малих або ізольованих мережах;

підвищене навантаження на кабельні та повітряні лінії через нерівномірний розподіл генерації.

Для забезпечення стабільної роботи мереж при високому відсотку ВДЕ застосовуються такі підходи:

- інтеграція систем накопичення енергії (ESS) для вирівнювання пікових навантажень;
- впровадження гнучких схем управління потужністю та реактивними компонентами;
- прогнозування вироблення ВДЕ з використанням математичних моделей та штучного інтелекту;
- розвиток смарт-мереж для автоматичного реагування на зміни навантаження та генерації.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії у структуру електричних мереж підвищує екологічну стійкість енергосистеми, але водночас ускладнює управління режимами роботи через непостійність генерації та коливання напруги і частоти. Для забезпечення надійності та ефективності роботи мереж необхідно застосовувати комплексні підходи: адаптацію систем керування, використання накопичувачів енергії та прогнозування вироблення ВДЕ.

Рисунок 1.2. – Вплив ВДЕ на енергосистему

1.3. Проблеми та виклики при приєднанні ВДЕ до розподільчих систем

Активне впровадження відновлюваних джерел енергії - насамперед сонячних і вітрових електростанцій - суттєво змінює структуру електроенергетичних систем. Традиційно розподільчі мережі 6–35 кВ проектувалися для одностороннього потоку потужності - від електростанцій до споживачів, тоді як у разі приєднання ВДЕ з'являються зворотні потоки енергії та коливання напруги, що створює нові технічні виклики для операторів систем розподілу.

У цьому контексті можна виділити три групи проблем: технічні, системні та нормативно-організаційні.

1. Технічні проблеми інтеграції ВДЕ у розподільчі мережі

1.1. Коливання напруги та зворотні потоки потужності

При роботі сонячних електростанцій у денні години, коли навантаження низьке, виникають зворотні потоки активної потужності від генерації до підстанцій. Це призводить до підвищення напруги у лініях 10–35 кВ, порушення допустимих меж ±10 % та можливого автоматичного відключення споживачів.

Особливо чутливими до таких відхилень є сільські або периферійні ділянки мереж із малим споживанням, де інтегровано великі СЕС.

1.2. Реактивна потужність і регулювання коефіцієнта потужності

Інвертори СЕС можуть генерувати або споживати реактивну потужність залежно від режиму роботи, що ускладнює регулювання напруги та баланс реактивної потужності в системі. Без належного керування це може призвести до перевантаження трансформаторів і кабельних ліній.

1.3. Вплив на релейний захист і автоматику

Класичні схеми струмового та напрямного захисту не розраховані на двосторонній потік потужності. При наявності генерації ВДЕ можливе некоректне спрацювання захисту або затримка відключення пошкодженої ділянки.

Також ускладнюється координація АПВ (автоматичного повторного вмикання) та АПВ з контролем синхронізму, оскільки джерела ВДЕ можуть підтримувати напругу навіть після аварії.

1.4. Гармоніки та якість електроенергії

Інвертори сонячних і вітрових установок генерують вищі гармоніки струму (до 25–35 порядку), що спричиняє спотворення синусоїди напруги, додаткові втрати, перегрів трансформаторів і зниження ефективності електроприводів.

Проблема ускладнюється при великій кількості малих джерел, підключених через низьковольтні лінії.

1.5. Нестабільність та коливання генерації

Зміна сонячної інсоляції або швидкості вітру призводить до різких коливань генерованої потужності. Це негативно впливає на частоту, напругу і потребує гнучких систем балансування, які в розподільчих мережах часто відсутні.

2. Системні виклики

2.1. Обмежена пропускна здатність мереж

Більшість українських розподільчих мереж проєктувалися у 1970–1990-х роках для стабільного централізованого постачання. Через це провідники, трансформатори та комутаційне обладнання не розраховані на великі обсяги генерації.

Збільшення кількості ВДЕ призводить до перевантажень і зростання втрат потужності.

2.2. Відсутність систем накопичення енергії (BESS)

Без буферних накопичувачів енергії надлишкова генерація не може бути використана ефективно. Це обмежує можливості приєднання нових ВДЕ та призводить до вимушених обмежень генерації (curtailment) у пікові години.

2.3. Недостатній рівень цифровізації та автоматизації

Багато мереж 10 кВ досі функціонують із мінімальним рівнем моніторингу. Відсутність систем SCADA, AMS або Smart Grid унеможливлює

оперативне керування генерацією, діагностику відхилень напруги та виявлення аварійних режимів.

2.4. Відсутність двостороннього енергетичного обліку

Традиційні системи обліку електроенергії не дозволяють точно фіксувати перетоки енергії між генерацією та споживачами. Для ефективної роботи з ВДЕ необхідні «розумні лічильники» (smart meters) з передачею даних у реальному часі.

3. Нормативно-правові та організаційні бар'єри

3.1. Складність процедур приєднання

Процес технічного приєднання ВДЕ до мереж в Україні залишається бюрократично складним, особливо для малих і середніх виробників. Наявні норми не завжди враховують специфіку децентралізованої генерації.

3.2. Недостатня гнучкість тарифної політики

Чинна система тарифів і механізмів підтримки (зокрема «зелений тариф») не стимулює балансування виробництва і споживання в режимі реального часу. Це гальмує розвиток ринку гнучких потужностей і впровадження енергетичних сервісів.

3.3. Відсутність стандартів Smart Grid інтеграції

На рівні державних стандартів ще недостатньо регламентовано вимоги до комунікаційних протоколів, обміну даними та інтероперабельності обладнання різних виробників при побудові «розумних мереж».

Для подолання зазначених проблем пропонується реалізувати такі напрямки:

- Модернізація інфраструктури розподільчих мереж — заміна застарілих трансформаторів, збільшення пропускної здатності ліній, реконструкція підстанцій.
- Впровадження систем автоматичного регулювання напруги та частоти на основі мікропроцесорних пристроїв.
- Використання Smart Grid-рішень - цифрові підстанції, SCADA, системи моніторингу SICAD/DIgSILENT.

➢ Інтеграція систем накопичення енергії (BESS) для згладжування коливань генерації.

➢ Розроблення нових методик приєднання ВДЕ, що враховують гнучкість, дистанційне керування та прогнозування генерації.

➢ Удосконалення нормативної бази - адаптація національних стандартів до вимог ENTSO-E, IEC та IEEE 1547.

Проблеми приєднання ВДЕ до розподільчих систем мають комплексний характер - вони охоплюють технічні, регуляторні й інформаційні аспекти. Найважливішими викликами є керування напругою, забезпечення стабільності мережі та балансування потужностей при змінних умовах генерації.

Оптимальним шляхом розвитку є перехід до цифрових систем Smart Grid, які забезпечують моніторинг, регулювання та прогнозування роботи ВДЕ, а також створення нормативного середовища для їх безпечної інтеграції в енергосистему.

Рисунок 1.3. – Проблеми та шляхи вирішення при приєднанні ВДЕ до розподільчих мереж

1.4. Програмні засоби моделювання та проектування енергетичних систем

В сучасних умовах розвитку електроенергетики моделювання стає ключовим інструментом для аналізу, проєктування, оптимізації та управління складними енергетичними системами. Під впливом переходу до децентралізованої генерації, широкого впровадження відновлюваних джерел енергії та технологій Smart Grid, традиційні методи аналітичних розрахунків поступаються місцем комп'ютерному моделюванню з використанням спеціалізованих програмних засобів.

Моделювання дозволяє:

- відтворити поведінку енергосистеми в динаміці;
- досліджувати стійкість і режими роботи при різних параметрах навантаження та генерації;
- оцінювати ефективність схем підключення джерел ВДЕ;
- проводити оптимізацію потужностей, втрат енергії та показників якості електроенергії;
- перевіряти функціонування систем керування, автоматики й релейного захисту.

1.4.1. Класифікація програмних засобів для моделювання енергосистем

Таблиця 1.2. – Класифікація програмних комплексів для моделювання електроенергетичних систем

Тип програмного забезпечення	Основне призначення	Приклади
Системи аналізу електричних режимів	Розрахунок потоків потужності, напруг, втрат, стабільності	SICAD, DIgSILENT PowerFactory, ETAP, PSS®E, NEPLAN
Системи динамічного моделювання та дослідження стійкості	Аналіз перехідних процесів, коротких замикань, коливань частоти	PSCAD/EMTDC, MATLAB Simulink, RTDS, PowerWorld Simulator

Тип програмного забезпечення	Основне призначення	Приклади
Системи проєктування та CAD для електричних мереж	Схемотехнічне та просторове проєктування підстанцій, ліній, кабельних мереж	AutoCAD Electrical, EPLAN Electric P8, Bentley Substation, SICAD Design
Програмні засоби для Smart Grid та EMS	Управління навантаженнями, облік, SCADA, енергоменеджмент	SICAD, SCADA/EMS ABB, Siemens Spectrum, OpenDSS, DNV Synergi Electric

1.4.2. Програмне середовище SICAD

Одним із найсучасніших комплексів для моделювання електричних систем є SICAD (Smart Integrated Computer-Aided Design) - програмна платформа, призначена для аналізу, візуалізації та управління електроенергетичними системами різних рівнів напруги.

Основні можливості SICAD:

- Моделювання електричних мереж будь-якої топології - від локальних розподільчих систем (0,4–35 кВ) до регіональних підстанцій.
- Розрахунок потоків потужності та балансів енергії, у тому числі з урахуванням джерел ВДЕ.
- Дослідження перехідних процесів - коротких замикань, коливань напруги, запуску двигунів тощо.
- Визначення втрат електроенергії у кабельних і повітряних лініях, трансформаторах і вимірювальних колах.
- Оцінка якості електроенергії - спотворення напруги, гармоніки, флікери.
- Інтеграція з GIS та SCADA - створення цифрових двійників енергетичних об’єктів.
- Інтерактивна візуалізація схем, графіків і профілів навантаження у реальному часі.
- Автоматизація процесів проєктування (створення однолінійних схем, вибір обладнання, формування звітів).

Архітектура SICAD.

Система складається з таких основних модулів:

- SICAD Network – для побудови топології електричних мереж;
- SICAD LoadFlow – для розрахунків усталених режимів;
- SICAD Transient – для аналізу перехідних процесів;
- SICAD Design – для графічного проєктування схем і оформлення документації;
- SICAD DataCenter – для обробки, збереження та візуалізації даних.

Програмне середовище підтримує імпорт даних у форматах DWG, DXF, XML, CSV, а також обмін даними з MATLAB, ETAP, SCADA/EMS. Це дозволяє створювати інтегровану модель енергетичної системи з високим рівнем точності та деталізації.

1.4.3. Порівняльний аналіз програмних засобів

Таблиця 1.3. - Порівняльний аналіз програмних засобів

Параметр / ПЗ	**SICAD**	**DIgSILENT PowerFactory**	**ETAP**	**PSCAD/EMTDC**
Призначення	Аналіз, проєктування, моделювання ВДЕ, Smart Grid	Аналіз режимів, стійкість, захист	Промислове проєктування, енергоменеджмент	Динамічні процеси, транзисторні моделі
Інтерфейс	Інтерактивний, 3D/2D візуалізація	Інженерний, таблиці/графіки	Класичний, зручний GUI	Орієнтований на електромагнітні процеси
Моделювання ВДЕ	✅ повна підтримка PV, вітру, BESS	✅ PV, вітро, гібриди	✅ PV, BESS	✅ PV, вітро
Динамічні моделі	✅ (перехідні процеси)	✅ (динамічні симуляції)	⚙ обмежено	✅ детально
SCADA / GIS інтеграція	✅ повна	⚙ частково	✅	❌
Ліцензування	Комерційне (інженерні ліцензії)	Комерційне	Комерційне	Академічне / комерційне
Переваги	Простота інтерфейсу, інтеграція Smart Grid, швидкість розрахунків	Висока точність, промисловий стандарт	Зручність звітів, графічність	Детальне динамічне моделювання

Параметр / ПЗ	SICAD	DIgSILENT PowerFactory	ETAP	PSCAD/EMTDC
Недоліки	Вища вартість, потребує навчання користувачів	Складність освоєння	Високі вимоги до ПК	Обмежена інтеграція з іншими ПЗ

1.4.4. Значення моделювання для проєктування ВДЕ

Моделювання процесів у системах з відновлюваними джерелами енергії дає змогу:

- дослідити вплив генерації ВДЕ на навантаження мережі, напругу та втрати потужності;
- оцінити якість електроенергії та можливі гармонічні спотворення;
- виявити вузькі місця у топології мережі (перевантаження, слабкі вузли);
- визначити оптимальні місця приєднання СЕС до мережі 10 кВ;
- протестувати різні сценарії роботи системи (зміна інсоляції, навантаження, реактивної потужності);
- забезпечити енергетичну безпеку і стійкість системи до аварійних ситуацій.

У середовищі SICAD результати моделювання можуть бути представлені у вигляді:

- однолінійних схем;
- теплових і навантажувальних діаграм;
- графіків потоків потужності, напруг і струмів;
- енергетичних балансів і звітів у табличній формі.

Програмні засоби моделювання відіграють вирішальну роль у дослідженні режимів роботи енергетичних систем із ВДЕ.

Серед них SICAD виділяється як інтегроване інженерне середовище, що поєднує інструменти проєктування, аналізу режимів, моніторингу та оптимізації.

Застосування такого ПЗ дозволяє:

- скоротити час проєктування енергетичних систем;
- підвищити точність розрахунків;
- забезпечити наочність результатів і можливість інтеграції з цифровими платформами управління енергією.

У майбутньому розвиток систем моделювання буде спрямовано на створення цифрових двійників енергетичних об’єктів, інтеграцію з реальними системами SCADA/EMS, використання штучного інтелекту для прогнозування та керування режимами енергосистем.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

В першому розділі магістерської роботи виконано теоретичне обґрунтування процесів інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у розподільчі електричні мережі середньої напруги, визначено основні проблеми, тенденції розвитку та сучасні підходи до їх моделювання.

Проаналізовано сучасний стан і тенденції розвитку ВДЕ в Україні та у світі.

Встановлено, що частка відновлюваних джерел у світовій генерації перевищує 30 %, а основними драйверами зростання є сонячна та вітрова енергетика. В Україні станом на 2025 рік встановлена потужність ВДЕ становить близько 8,7 ГВт, з яких понад 70 % припадає на сонячні електростанції. Основними трендами розвитку є децентралізація, цифровізація та підвищення гнучкості електричних мереж.

Визначено вплив генерації з ВДЕ на режими роботи електричних мереж.

Зростання частки децентралізованих джерел призводить до змін у потоках потужності, можливих перенапруг, коливань напруги, а також до появи двосторонніх перетоків енергії. Ці фактори впливають на стабільність частоти, роботу релейного захисту, втрати потужності та якість електроенергії. Необхідним стає перехід до активних розподільчих мереж із можливістю керування напругою та реактивною потужністю.

Сформульовано основні технічні та системні проблеми приєднання ВДЕ до розподільчих мереж.

До найважливіших належать: коливання напруги, обмеження пропускної здатності ліній, нестабільність генерації, складність керування реактивною потужністю, а також невідповідність традиційних схем релейного захисту умовам двосторонніх потоків енергії. Додатковими чинниками є відсутність систем накопичення енергії, недостатній рівень автоматизації (SCADA, Smart Grid) і застаріла нормативна база.

Запропоновано напрями вирішення: впровадження інтелектуальних інверторів, систем BESS, цифрових підстанцій та технологій Smart Grid.

Розглянуто сучасні програмні засоби моделювання та проектування енергосистем.

Наведено класифікацію програмних комплексів за призначенням: аналітичні системи аналізу режимів (DIgSILENT, ETAP, SICAD), системи динамічного моделювання (PSCAD, Simulink), CAD-пакети для проєктування та програмні платформи Smart Grid. Показано, що комп'ютерне моделювання дає змогу дослідити електричні режими, оптимізувати потоки потужності, перевірити стабільність роботи системи при змінних умовах генерації.

Детально проаналізовано функціональні можливості середовища SICAD.

Встановлено, що SICAD забезпечує повний цикл інженерного аналізу - від побудови топології мережі до динамічного моделювання режимів роботи та візуалізації результатів. Програмний комплекс підтримує моделювання інтеграції ВДЕ у мережі 6–35 кВ, розрахунок балансів потужності, оцінку якості електроенергії та інтеграцію з SCADA/EMS системами. Його застосування дозволяє створити цифровий двійник енергосистеми, що підвищує точність розрахунків і ефективність управління.

Виконано порівняльний аналіз поширених програмних засобів. SICAD, DIgSILENT PowerFactory, ETAP і PSCAD мають різний рівень функціональності та спрямування. SICAD відзначається найкращою інтеграцією з системами енергоменеджменту та Smart Grid, DIgSILENT — високою точністю розрахунків режимів, а PSCAD — детальним відтворенням динамічних процесів.

Підкреслено значення моделювання для проєктування систем із ВДЕ.

Математичне та комп'ютерне моделювання є основою для визначення оптимальних параметрів роботи системи, вибору місця підключення ВДЕ до мережі, аналізу впливу інсоляції, навантаження, реактивної потужності та прогнозування аварійних режимів. Застосування моделювання на етапі проєктування дозволяє мінімізувати ризики, скоротити витрати на пусконалагоджувальні роботи та підвищити ефективність експлуатації.

Теоретичні дослідження довели, що ефективна інтеграція ВДЕ у розподільчі мережі потребує комплексного підходу, який включає:

удосконалення технічних рішень мереж (регулювання напруги, балансування потужностей, накопичення енергії);

застосування цифрових систем керування та моніторингу;

використання сучасних програмних засобів моделювання (зокрема SICAD) для прогнозування режимів і оцінки стійкості системи.

Отримані результати створюють теоретичну базу для подальших розрахункових і моделювальних досліджень у другому розділі, присвяченому практичній інтеграції сонячної електростанції в розподільчу мережу 10 кВ.

РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД ТА МОЖЛИВОСТІ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ SICAD

2.1. Інструменти для проектування електричних мереж

Сучасне проєктування електроенергетичних систем базується на використанні спеціалізованого програмного забезпечення, яке забезпечує побудову моделей мереж, виконання інженерних розрахунків, візуалізацію результатів і проведення аналізу режимів роботи. Такі інструменти дозволяють підвищити точність розрахунків, скоротити час проєктування та забезпечити можливість перевірки різних сценаріїв експлуатації електричних мереж.

До основних програмних засобів, що застосовуються для аналізу та проєктування електричних мереж, належать:

- ✓ ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) - потужний комплекс для моделювання та аналізу електроенергетичних систем, який підтримує розрахунки усталених і перехідних процесів, потокорозподілу, коротких замикань, гармонічного аналізу, а також оптимізацію параметрів системи.
- ✓ DIgSILENT PowerFactory - універсальна система для проєктування, аналізу та управління електричними мережами, що дозволяє моделювати інтеграцію відновлюваних джерел енергії, досліджувати режими стабільності та оцінювати вплив змін у топології мережі.
- ✓ MATLAB/Simulink із відповідними енергетичними бібліотеками — середовище моделювання, яке забезпечує побудову динамічних моделей енергетичних систем і детальне дослідження перехідних процесів.
- ✓ PSS®E (Power System Simulator for Engineering) - програмний пакет, розроблений для розрахунку потоків потужності, аналізу стабільності, оптимізації режимів та дослідження аварійних станів у великих електроенергетичних системах.

✓ NEPLAN - інструмент для техніко-економічного аналізу електричних мереж, який поєднує моделювання, планування розвитку мережі та управління її параметрами.

Застосування перелічених програмних засобів дозволяє проводити повний цикл проєктування - від створення схеми мережі до аналізу її режимів і формування технічної документації. Однак для дослідження окремих ділянок розподільчих мереж із інтегрованими сонячними електростанціями доцільно використовувати інструменти, що забезпечують гнучке налаштування параметрів елементів, зручну візуалізацію та можливість інтеграції з іншими системами аналізу даних.

Одним із таких сучасних програмних рішень є SICAD, який забезпечує моделювання електричних мереж, розрахунок режимів роботи та аналітичну обробку отриманих результатів. Його функціональні можливості, архітектура та роль у процесі дослідження розглянуті у наступному підрозділі.

Таблиця 2.1. – Порівняльна характеристика програмних засобів для проєктування електричних мереж

№	Програмний комплекс	Основні функції	Переваги	Недоліки	Сфера застосування
1	**ETAP**	Моделювання потокорозподілу, коротких замикань, динамічних процесів, гармонічного аналізу	Висока точність, інтуїтивний інтерфейс, інтеграція з SCADA	Комерційна ліцензія, значні вимоги до ресурсів ПК	Аналіз промислових і розподільчих мереж
2	**DIgSILENT PowerFactory**	Розрахунок режимів, аналіз стабільності, інтеграція ВДЕ, планування розвитку мереж	Потужний аналітичний апарат, гнучке налаштування моделей	Висока вартість, складність освоєння	Проєктування систем передачі та розподілу
3	**MATLAB/Simulink**	Моделювання динамічних процесів, перехідних	Гнучкість, можливість створення	Вимагає глибоких знань програмування, висока ціна	Дослідження процесів у системах

№	Програмний комплекс	Основні функції	Переваги	Недоліки	Сфера застосування
		режимів, керування та регулювання	власних моделей		керування й автоматики
4	**PSS®E**	Потокорозподіл, аналіз стабільності, аварійні режими, оптимізація	Висока швидкодія, точність розрахунків, надійність	Орієнтація на великі мережі, складна інтерфейсна частина	Планування енергосистем і великих мереж
5	**NEPLAN**	Техніко-економічний аналіз, моделювання, планування, оптимізація	Підтримка різних типів енергосистем, зручні звіти	Обмежена підтримка складних динамічних моделей	Аналіз розподільчих мереж, планування розвитку інфраструктури

2.2. Призначення та архітектура SICAD

Призначення системи.

Система SICAD використовується для моделювання, аналізу та оптимізації режимів роботи електроенергетичних систем, зокрема під час інтеграції відновлюваних джерел енергії до розподільчих мереж. Основне призначення SICAD у межах даної роботи полягає у створенні математичної та інформаційної моделі ділянки мережі 10 кВ із підключенням сонячної електростанції, а також у проведенні розрахунків стаціонарних та динамічних режимів з урахуванням параметрів генерації, навантаження та топології мережі.

Застосування SICAD дозволяє виконувати такі основні завдання:

- ✓ побудову структурної схеми електричної мережі та параметризацію її елементів;
- ✓ моделювання режимів роботи при різних умовах генерації та навантаження;
- ✓ аналіз впливу інтеграції сонячної електростанції на напругу, потоки потужності та втрати в мережі;
- ✓ оцінку ефективності та надійності роботи системи електропостачання;

✓ розроблення рекомендацій щодо оптимізації режимів і підвищення якості електроенергії.

Таким чином, SICAD виступає інструментом для інженерного аналізу електричних систем, який поєднує функції моделювання, візуалізації та аналітичного опрацювання даних, що є особливо важливим при дослідженні інтеграції відновлюваних джерел енергії у розподільчі мережі.

Архітектура системи.

Архітектура SICAD має модульну будову, що забезпечує можливість адаптації системи до різних типів електричних мереж і сценаріїв моделювання. В загальному вигляді система складається з таких основних рівнів:

Інтерфейс користувача - забезпечує графічне відображення електричної мережі, введення параметрів елементів, керування моделлю та візуалізацію результатів розрахунків.

Обчислювальний модуль реалізує математичні алгоритми аналізу режимів електричних мереж (розрахунок потокорозподілу, втрат потужності, напруг, струмів, показників якості електроенергії тощо).

База даних елементів системи містить параметри електричного обладнання, елементів ліній, трансформаторів, джерел генерації та навантаження, а також результати проведених моделювань.

Аналітичний модуль - виконує статистичний аналіз, порівняння режимів роботи та формує узагальнені звіти й графічні залежності.

Інтеграційний рівень забезпечує обмін даними з іншими програмними продуктами, системами моніторингу чи SCADA, що дозволяє застосовувати SICAD у комплексних енергетичних дослідженнях.

Завдяки такій архітектурі система SICAD забезпечує високу гнучкість і точність розрахунків, а також можливість поетапного розширення функціоналу - від моделювання окремих ділянок мережі до комплексного аналізу великих енергосистем.

2.3. Можливості інтеграції SICAD з розрахунковими програмними комплексами

Система SICAD є сучасною CAD/CAE-платформою, призначеною для графічного проєктування, моделювання та підготовки технічної документації в галузі електроенергетики. Вона забезпечує створення структурних та принципових схем електричних мереж, розроблення креслень, специфікацій обладнання та автоматизоване формування звітних документів.

Завдяки своїй відкритій архітектурі SICAD може не лише виконувати функції системи автоматизованого проєктування (CAD), але й інтегруватися з аналітичними та розрахунковими програмними комплексами (CAE), що значно розширює її можливості при вирішенні складних інженерних задач.

Інтеграційні можливості SICAD реалізуються через підтримку стандартних форматів обміну даними (наприклад, DXF, XML, CSV, IFC, а також внутрішні API-інтерфейси), що дозволяє ефективно взаємодіяти з різними системами для виконання розрахунків, аналізу режимів роботи або техніко-економічного оцінювання проєктних рішень.

Основні напрями інтеграції SICAD із розрахунковими програмними засобами включають:

Інтеграція з електротехнічними розрахунковими комплексами. SICAD може передавати параметри мережі (топологію, опори ліній, номінальні дані трансформаторів, навантаження, режими генерації) у програми, призначені для аналітичних розрахунків, таких як ETAP, DIgSILENT PowerFactory, PSS®E або NEPLAN. Це дає змогу виконувати розрахунки потокорозподілу, коротких замикань, втрат потужності та аналізу стабільності без повторного введення даних.

У зворотному напрямі результати розрахунків можуть бути імпортовані назад у SICAD для подальшої візуалізації у вигляді схем, таблиць або звітів.

Взаємодія з системами математичного моделювання.

SICAD може експортувати дані моделей до середовищ MATLAB/Simulink або Modelica, де здійснюється динамічне моделювання

процесів у електричних мережах. Це дозволяє поєднати графічне середовище проєктування SICAD з потужними обчислювальними можливостями математичних пакетів, що особливо важливо при дослідженні перехідних процесів, оптимізації регулювання напруги та аналізі впливу відновлюваних джерел енергії.

Інтеграція з системами керування та моніторингу (SCADA/EMS).

SICAD може бути використана як платформа для візуального відображення топології мережі, що інтегрується з системами моніторингу енергетичних об’єктів. Передача даних у реальному часі з SCADA-систем (наприклад, через OPC-протоколи) дозволяє створювати в SICAD динамічні схеми з актуальними параметрами напруг, струмів і станів вимикачів. Це відкриває можливості для спільного використання SICAD як інженерного інструменту в системах диспетчерського керування.

Інтеграція з базами даних та ERP-системами.

SICAD підтримує взаємодію з базами даних обладнання (SQL, Access, XML), що дає змогу автоматично формувати специфікації, кабельні журнали, таблиці з’єднань і звітні форми відповідно до стандартів підприємства. Також можливе підключення до ERP-систем (наприклад, SAP), що дозволяє забезпечити єдиний інформаційний простір для проєктування, постачання та обліку обладнання.

Використання API та макромов.

Завдяки наявності відкритих інтерфейсів програмування (API) SICAD може бути розширена користувацькими модулями або скриптами для автоматизації обмінних процесів із зовнішніми програмами. Це дозволяє створювати індивідуальні інструменти, наприклад, для експорту даних у форматах, що безпосередньо підтримуються певними розрахунковими пакетами.

У контексті даної роботи можливості інтеграції SICAD використовуються для поєднання графічного моделювання електричної мережі 10 кВ із розрахунковими функціями аналізу режимів, що дозволяє комплексно

дослідити вплив інтеграції сонячної електростанції на параметри розподільчої системи.

Таким чином, SICAD виступає не лише засобом графічного проєктування, а й центральною ланкою інформаційного обміну між інженерними, розрахунковими та аналітичними системами, забезпечуючи повний цикл роботи - від створення схеми до підготовки технічної документації та звітів.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

В цьому розділі було проведено огляд сучасних інструментів для проєктування та аналізу електричних мереж, а також досліджено функціональні можливості програмного комплексу SICAD і його взаємодію з розрахунковими системами.

В результаті аналізу існуючих програмних засобів, таких як ETAP, DIgSILENT PowerFactory, MATLAB/Simulink, PSS®E та NEPLAN, встановлено, що вони мають широкі можливості для моделювання електричних систем, проте здебільшого орієнтовані на виконання аналітичних розрахунків і вимагають окремих засобів для графічного оформлення проєктної документації. Це обґрунтовує доцільність використання систем, які поєднують графічне моделювання та аналітичну обробку даних у єдиному середовищі.

Система SICAD розглянута як сучасна CAD/CAE-платформа, призначена для автоматизації процесів проєктування електричних мереж, формування схем і підготовки технічної документації. Її архітектура має модульну структуру, що включає інтерфейс користувача, обчислювальний модуль, базу даних елементів, аналітичний і інтеграційний рівні. Такий підхід забезпечує гнучкість системи, можливість масштабування та подальшого розширення функціоналу.

Особливу увагу приділено інтеграційним можливостям SICAD, які дозволяють поєднувати графічне середовище проєктування з аналітичними комплексами для розрахунку електричних режимів. Система підтримує обмін даними з такими програмами, як ETAP, DIgSILENT PowerFactory, MATLAB/Simulink, PSS®E, а також з базами даних і системами керування типу SCADA/ERP. Це забезпечує єдиний інформаційний простір для проєктування, моделювання та аналізу електричних систем.

В підсумку можна зробити висновок, що SICAD є ефективним інженерним інструментом для побудови моделей електричних мереж, аналізу їхніх режимів роботи та підготовки технічної документації. Завдяки

можливості інтеграції з розрахунковими програмними комплексами SICAD може бути використана як центральна платформа в процесі моделювання інтеграції сонячної електростанції в розподільчу мережу 10 кВ, що є ключовим завданням даної магістерської роботи.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ІНТЕГРАЦІЇ ВДЕ У СЕРЕДОВИЩІ SICAD

3.1. Вихідні дані для моделювання (тип мережі, напруга, потужність ВДЕ, точки приєднання)

Для проведення моделювання процесів інтеграції сонячної електростанції в розподільчу електричну мережу 10/0,4 кВ за допомогою програмного комплексу SICAD було сформовано вихідні дані, які відображають реальні параметри ділянки електричної системи, вибраної для дослідження.

Тип досліджуваної мережі

Моделювання виконується для радіальної трифазної розподільчої мережі середньої напруги 0,4 кВ, яка живиться від головної підстанції 10/0,4 кВ через силовий трансформатор потужністю 63 МВА. Мережа включає кілька відгалужень до споживачів та дві точки підключення сонячної електростанції. Такий тип мережі є типовим для систем розподілу електроенергії в сільських і приміських районах.

Рівень напруги та топологія мережі

Номінальна напруга мережі: 0,4 кВ.

Кількість магістралей - 1

Кількість абонентських відгалужень – 14, із середньою довжиною прогону між одноколовими опорами 28 м.

Лінії виконані повітряними проводами типу А-120, із питомим активним опором 0,25 Ом/км і реактивним опором 0,27 Ом/км.

У кінцевих точках мережі розташовані споживачі з переважно активним навантаженням.

Параметри відновлюваного джерела енергії

Досліджувана сонячна електростанція має такі основні технічні характеристики:

Тип генерації: фотоелектрична станція на основі кремнієвих панелей.

Установлена потужність: 5,0 МВт.

Номінальна напруга інверторів: 0,4 кВ.

Вихід інверторів синхронізується з мережею за частотою та фазою, забезпечуючи подачу активної потужності в мережу при коефіцієнті потужності $cos\ \varphi\ =\ 0{,}98$.

Точка приєднання СЕС

Сонячна електростанція приєднується до фідера №13 у точці, розташованій на відстані приблизно 1,67 км від шин підстанції 10/0,4 кВ. Такий вибір зумовлений технічними умовами мережі - мінімальним рівнем втрат потужності, допустимими відхиленнями напруги та можливістю забезпечення релейного захисту і вимірювання параметрів.

Параметри навантаження

В моделі враховано сумарне навантаження мережі в обсязі 36 кВт, розподілене 14 фідерами. Навантаження має переважно активний характер, із середнім коефіцієнтом потужності $cos\ \varphi\ =\ 0{,}95$.

Режими моделювання

Для оцінки впливу підключення СЕС передбачено розрахунок двох основних режимів роботи мережі:

Базовий режим - без підключення сонячної електростанції (традиційне живлення споживачів від підстанції 10/0,4 кВ).

Режим із інтегрованою СЕС - з урахуванням генерації 1,0 МВт у точці приєднання та впливу на розподіл навантаження, напруги й втрати потужності.

Усі зазначені дані використовуються як вихідна інформація для побудови топологічної моделі мережі в SICAD, розрахунку електричних режимів та подальшого аналізу результатів моделювання інтеграції сонячної електростанції в розподільчу систему.

Для проведення моделювання процесів інтеграції сонячної електростанції (СЕС) у розподільчу електричну мережу 10/0,4 кВ за допомогою програмного комплексу SICAD було сформовано вихідні дані, які відображають реальні параметри ділянки електричної системи, вибраної для дослідження.

Тип досліджуваної мережі

Моделювання виконується для радіальної трифазної розподільчої мережі середньої напруги 0,4 кВ, яка живиться від головної підстанції 10/0,4 кВ через силовий трансформатор потужністю 63 кВА. Мережа включає 14 фідерів, що живлять споживачів, і дві точки підключення сонячних електростанціїй (одна – напругою 10 кВ, друга – у споживача напругою 0,30 кВ). Такий тип мережі є типовим для систем розподілу електроенергії в сільських та приміських районах.

Отримані параметри використані як вихідні дані для побудови топологічної моделі мережі у середовищі SICAD, виконання розрахунків потокорозподілу, аналізу напруг та втрат потужності у базовому й післяінтеграційному режимах роботи системи.

3.2. Створення топології електричної мережі в SICAD

Після формування вихідних даних для моделювання виконано побудову топології розподільчої мережі 10 кВ у середовищі програмного комплексу SICAD. Основною метою цього етапу є створення цифрової моделі електричної системи, яка відображає її структуру, взаємозв’язки між елементами та параметри, необхідні для подальшого аналізу режимів роботи.

Загальні принципи побудови моделі

У SICAD топологія електричної мережі формується у вигляді структурної схеми, що містить вузли (електричні з’єднання) і гілки (лінії, трансформатори, джерела, навантаження). Для кожного елемента задаються електричні параметри, тип з’єднання та номінальні значення напруги й потужності.

SICAD підтримує ієрархічну структуру проєкту, що дозволяє розділяти модель на окремі підсхеми – підстанції, фідери, вузли навантаження та генеруючі установки.

Етапи побудови топології

Процес створення топології електричної мережі в SICAD виконувався у кілька послідовних етапів:

Створення нового проєкту.

В головному меню обрано новий проєкт. Далі було реалізовано створення електричних вузлів. На схемі розміщено основні вузли:

- ✓ шини підстанції 10/0,4 кВ;
- ✓ відгалуження трьох фідерів (L1–L14);
- ✓ точки підключення навантаження;
- ✓ вузол приєднання сонячної електростанції (СЕС-1 – на стороні 10 кВ, СЕС-2 - в абонента №32).

Для кожного вузла задано координати, номінальну напругу, тип з'єднання (трифазне), а також логічні зв'язки з іншими елементами.

Додавання елементів мережі.

До створених вузлів під'єднано такі елементи:

Лінії електропередачі 0,4 кВ – модулі типу «повітряна лінія» з провідником А-120, із зазначенням довжини, опору та реактивного опору.

Трансформатор 10/0,4 кВ – джерело живлення мережі, що моделює підстанцію.

Навантаження L1–L14 – активні споживачі, прив'язані до кінцевих вузлів фідерів.

Трансформатор зв'язку 0,4/10 кВ – елемент приєднання сонячної електростанції.

СЕС-1 – модель фотоелектричної станції, що задається як генератор із можливістю регулювання активної потужності та коефіцієнта потужності.

Результат побудови моделі

В результаті створено повну топологічну схему розподільчої мережі 0,4 кВ з інтегрованими сонячними електростанціями (на стороні 10 кВ і на стороні 0,4 кВ). Модель відображає взаємозв'язки між джерелами, лініями, трансформаторами й навантаженнями та дозволяє виконувати подальші розрахунки режимів роботи системи у SICAD або в суміжних аналітичних середовищах.

Отримана топологія стала базою для проведення енергетичного аналізу, розрахунку потокорозподілу потужності, напруг, втрат електроенергії та оцінки впливу генерації СЕС на роботу розподільчої мережі.

3.3. Побудова схеми приєднання відновлюваних джерел (сонячна електростанція)

В цьому пункті буде зроблено опис та реалізація в SiCAD (онлайн-інструмент для проектування розподільних мереж 0.4–35 кВ) однолінійної схеми та моделі приєднання СЕС до розподільчої мережі 10 кВ (зі сторони підстанції) та мережі 0, 4 кВ (зі сторони одного з побутових споживачів).

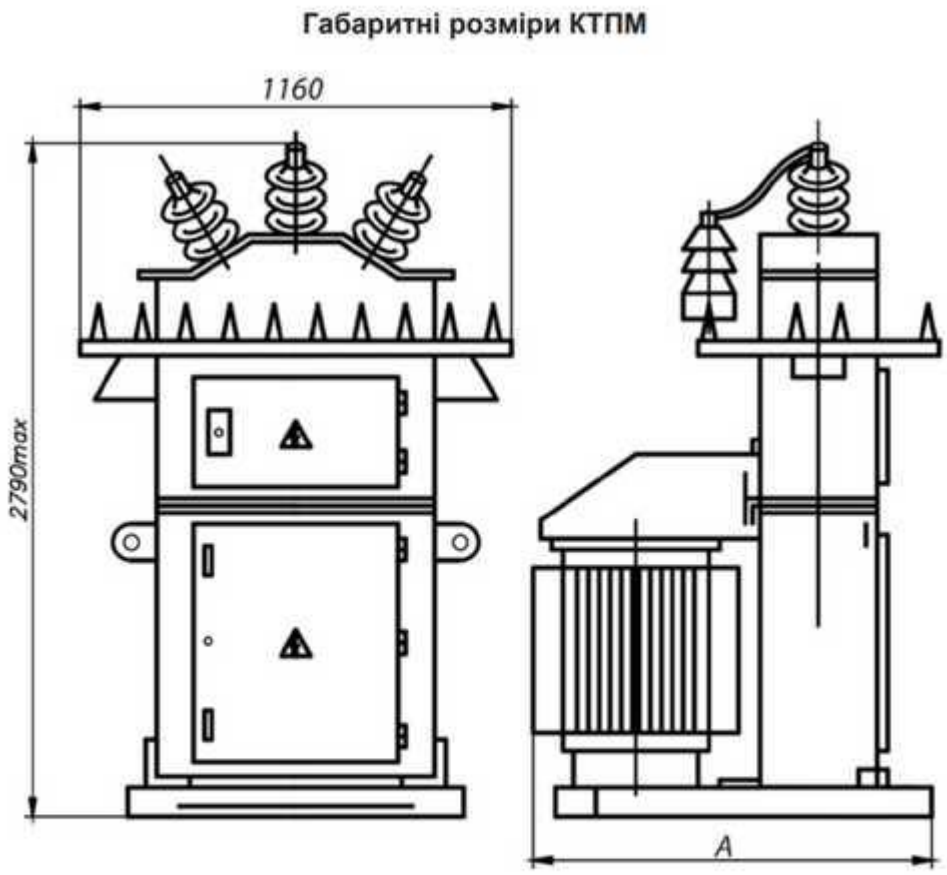
Вхідні дані для проєктування

Напруга шини розподільчої мережі: 10/0,4 кВ.

Потужність СЕС: задана (30 кВт зі сторони живлячої підстанції та 15 кВт зі сторони одного зі споживачів (№32 на схемі).

Форма підключення: однофазне приєднання через затискач/РЗ (однолінійна схема).

Трансформаторна підстанція ТП 10/,4 кВ (позначено на схемі) - з трансформатором ТМ-63 кВА.



Розмір А

КТПМ-25…160	980
КТПМ-250	1045

Рисунок 3.1. – Габаритні розмірі КТПМ 63/10/0,4 кВ У1

Від живлячого трансформатору відходить лінія, які кріпиться на анкерній одноколовій опорі А1(2хСВ95-2)-1с, яка представлена на рисунку 3.2.

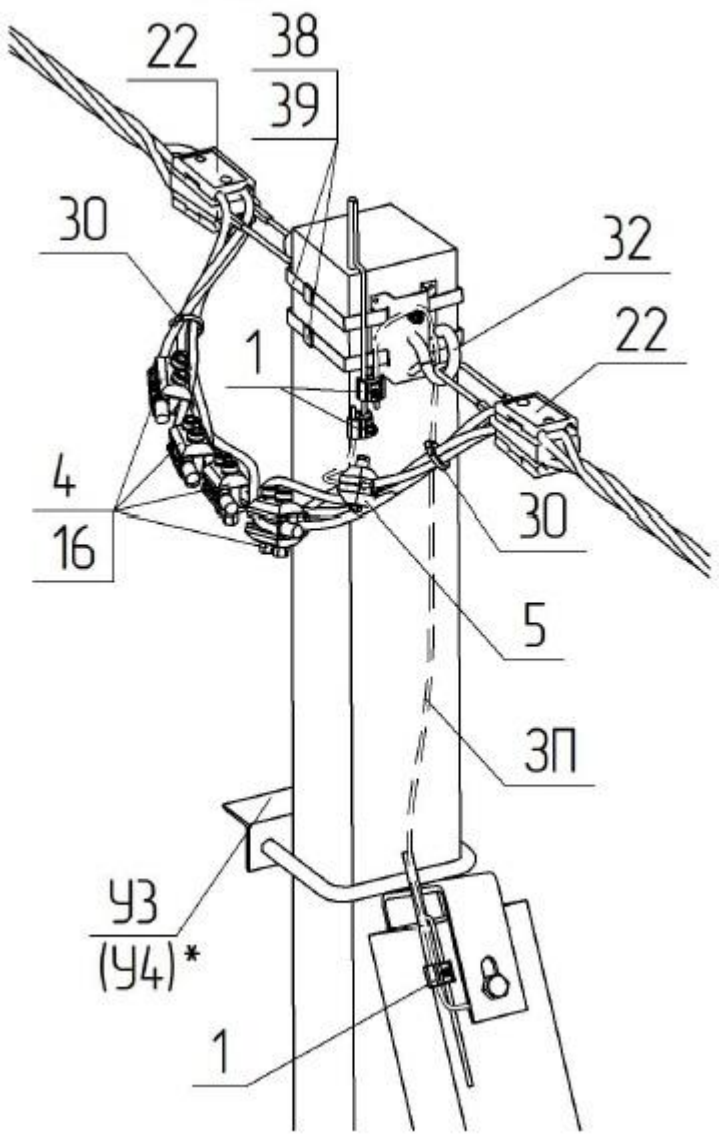


Рисунок 3.2. – Анкерна одноколова опора А1(2хСВ95-2)-1с

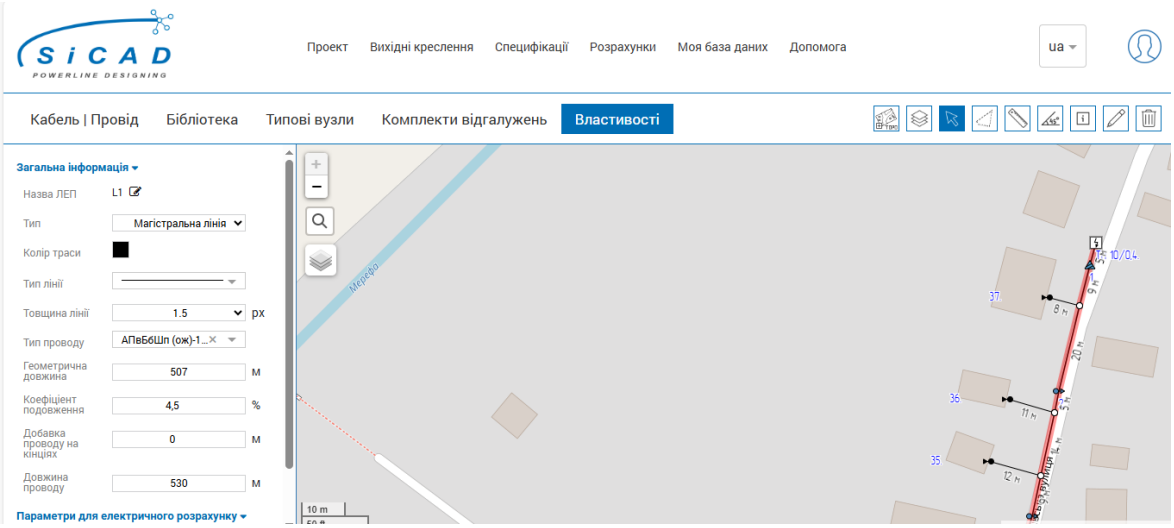


Рисунок 3.3. – Використання проводу на ЛЕП 0,4 кВ

В проєкті використано провід марки АПвБбШп (ож)-1 4х185.

Зведена специфікація всіх конструктивних елементів, які було використано в проєкті, показано в таблиці 3.1.

Обладнання магістралі представлено в таблиці 3.2.

Позиція	Найменування та технічна характеристика	Тип, марка, позначення документа, опитувального листа	Код обладнання, виробу, матеріалу	Завод-виготовлювач	Одиниця виміру	Кількість	Маса одиниці, кг	Примітка
1	2	3	4	5	6	7	8	9
З'єднувачі								
12	Затискач плашковий відгалужувальний для неізольованих дротів	PGA 101 G	120210	SICAME GROUP	шт	29	0,06	
13	Затискач відгалужувальний магістральний з двостороннім проколюванням ізоляції (з низьким перехідним опором)	TTD 401 neo	110140	SICAME GROUP	шт	12	0,38	
14	Затискач відгалужувальний проколюючий з незалежним підключенням двох відгалужень	TT2D 83 F3	110410	SICAME GROUP	шт	4	0,26	
15	Затискач плашковий	ПС-1-1	000000	-	шт	2	0,15	

16	Затискач відгалужувальний для приєднання до СІП неізольованих проводів (повторних заземлень)	TND 151	110510	SICAME GROUP	шт	1	0,1	
Електротехнічне обладнання								
17	Хомут стяжний	CCD 9-62	170120	SICAME GROUP	шт	7	0,005	
Закріплююча арматура								
18	Затискач підтримуючий для магістральних ліній	PSP 120	160120	SICAME GROUP	шт	16	0,2	
19	Затискач натяжний для відгалужень	GUKp4	150150	SICAME GROUP	шт	2	0,2	
Пристрої заземлення								
20	Модуль для тимчасових підключень і заземлень	FCC 1	140110	SICAME GROUP	шт	4	0,08	
Захисне устаткування								
21	ОПН з індикатором пробою	Protect 50	140220	SICAME GROUP	шт	3	0,115	
Обладнання кабельних ліній низької напруги до 1 кВ								
Кабельні лінії низької напруги								

22	Кабель до 1 кВ з алюмінієвими струмоведучими жилами	АПвБбШп (ож)-1 4х185	000000	ПАТ "ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ"	м	529	3,49	

Таблиця 3.2. – Обладнання магістралі

Обладнання магістралі

× ☑ З поділом на розділи

№	Найменування та технічна характеристика	Тип, марка позначення документа, опитувального листа	Код обладнання, виробу, матеріалу	Завод-виготовлювач	Одиниця виміру	Кількість	Маса одиниці	Примітка
				Обладнання підстанцій				
	Трансформатор							
1.	Трифазний маслонаповнений трансформатор	ТМ 63/10	ТМ 63/10	ТОВ "Укрелектроапарат"	шт	1	479 кг	-
				Обладнання повітряних ліній низької напруги до 1 кВ				
	Металеві конструкції							
2.	Гак універсальний посилений	CSC 16uz	180250	SICAME GROUP	шт	23	0.73 кг	-
3.	Бандажна стрічка	IF 207	180510	SICAME GROUP	м	43	0.116 кг	-
4.	Скріпа для бандажної стрічки	CF 20	180520	SICAME GROUP	шт	40	0.005 кг	-
5.	Кронштейн для стояків СВ95 (202.2н/9-1)	У3	000000	-	шт	5	5.3 кг	-
6.	Гак-болт прохідний GHW 16/250 для ст	GHW 16/250	180320	SICAME GROUP	шт	1	0.79 кг	-

7 декабря 202
воскресенье

продовження таблиці 3.2

	Опори							
7.	Стояк	СВ95-2	000000	ПАТ "БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ ЗАВОД ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ"	шт	24	750 кг	-
8.	Стояк	СВ105-3.6	000000	ПАТ "БІЛОЦЕРКІВСЬКИЙ ЗАВОД ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КОНСТРУКЦІЙ"	шт	1	1180 кг	-
	ПЛ низької напруги - провід							
9.	Провід неізольований ГОСТ 839-80	А16	000000	-	м	27	0.043 кг	-
10.	Провід неізольований ГОСТ 839-80	А 16 (дві жили)	000000	ПАТ «Одеський кабельний завод «Одескабель»	м	318	0.043 кг	-
	З'єднувачі							
11.	Затискач плашковий відгалужувальний для неізольованих дротів	PGA 101 G	120210	SICAME GROUP	шт	29	0.06 кг	-
12.	Затискач відгалужувальний магістральний з двостороннім проколюванням ізоляції (з низьким перехідним опором)	TTD 401 neo	110140	SICAME GROUP	шт	12	0.38 кг	-

продовження таблиці 3.2

13.	Затискач відгалужувальний проколюючий з незалежним підключенням двох відгалужень	TT2D 83 F3	110410	SICAME GROUP	шт	4	0.26 кг	-
14.	Затискач плашковий	ПС-1-1	000000	-	шт	2	0.15 кг	-
15.	Затискач відгалужувальний для приєднання до СІП неізольованих проводів (повторних заземлень)	TND 151	110510	SICAME GROUP	шт	1	0.1 кг	-
	Електротехнічне обладнання							
16.	Хомут стяжний	CCD 9-62	170120	SICAME GROUP	шт	7	0.005 кг	-
	Закріплююча арматура							
17.	Затискач підтримуючий для магістральних ліній	PSP 120	160120	SICAME GROUP	шт	16	0.2 кг	-
18.	Затискач натяжний для відгалужень чотирьохжильним проводом	GUKp4	150150	SICAME GROUP	шт	2	0.2 кг	-

	Пристрої заземлення							
19.	Модуль для тимчасових підключень і заземлень	FCC 1	140110	SICAME GROUP	шт	4	0.08 кг	-
	Захисне устаткування							
20.	ОПН з індикатором пробою	Protect 50	140220	SICAME GROUP	шт	3	0.115 кг	-
	Обладнання кабельних ліній низької напруги до 1 кВ							
	Кабельні лінії низької напруги							
21.	Кабель до 1 кВ з алюмінієвими струмоведучими жилами	АПвБбШп (ож)-1 4х185	000000	ПАТ "ЗАВОД ПІВДЕНКАБЕЛЬ"	м	529	3.49 кг	-

Таблиця 3.3. – Обладнання абонентських відгалужень

Обладнання абонентських відгалужень

☑ З поділом на розділи

№	Найменування та технічна характеристика	Тип, марка позначення документа, опитувального листа	Код обладнання, виробу, матеріалу	Завод-виготовлювач	Одиниця виміру	Кількість	Маса одиниці	Примітка
	Обладнання повітряних ліній низької напруги до 1 кВ							
	ПЛ низької напруги - провід							
1.	Провід самонесучий ізольований перерізом 4х25 мм2	AsXSn 4x25	000000	ПАТ «Одеський кабельний завод «Одескабель»	м	11	0.392 кг	-
2.	Провід неізольований ГОСТ 839-80	А 16 (дві жили)	000000	ПАТ «Одеський кабельний завод «Одескабель»	м	62	0.043 кг	-

Таблиця 3.4. – Поопорна специфікація

https://app.sicad.org/ua/bill-of-materiels-by-pole

№	Тип, марка	Одиниця виміру	Кількість	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	Споживач	ТП 10/0,4
	Обладнання повітряних ліній низької напруги до 1 кВ																																									
	Пристрої заземлення																																									
1.	FCC 1	шт	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	ПЛ низької напруги - провід																																									
2.	A16	м	27	2	1	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
	Закріплююча арматура																																									
3.	GUKp4	шт	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
4.	PSP 120	шт	16	-	1	1	1	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Металеві конструкції																																									
5.	У3	шт	5	1	-	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6.	CF 20	шт	40	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	-	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
7.	CSC 16uz	шт	23	2	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
8.	GHW 16/250	шт	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9.	IF 207	м	43	3	2	2	2	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	-	2	2	2	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-
	Захисне устаткування																																									
10.	Protect 50	шт	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Опори																																									
11.	CB105-3.6	шт	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12.	CB95-2	шт	24	2	1	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	З'єднувачі																																									
13.	ПС-1-1	шт	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
14.	PGA 101 G	шт	29	3	1	1	1	5	5	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15.	TND 151	шт	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16.	TT2D 83 F3	шт	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-
17.	TTD 401 neo	шт	12	4	-	-	-	4	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Електротехнічне обладнання																																									
18.	CCD 9-62	шт	7	2	-	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Обладнання підстанцій																																									
	Трансформатор																																									
19.	TM 63/10	шт	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Таблиця 3.5. – Поопорна розширена специфікація

Поопорна розширена специфікація

☑ З поділом на розділи

Назва траси магістралі	L1	-	L1
Типовий проект	-	-	-
Номер опори	ТП 10/0,4	Споживач	1
Тип опори	КТПМ-63/10/0,4 У1	АБ1Т-3 + АВ2Т-3	А1(2хСВ95-2)-1(
Тип проводу магістралі	АПвБбШп (ож)-1 4х185	-	АПвБбШп (ож)-
Тип проводу відгалуження	-	AsXSn 4x25	-
Відгалуження до абонента, шт	-	-	-
Ввід в будівлю, шт	-	1	-
1-ф.	-	1	-
3-ф.	-	-	-

№	Найменування та технічна характеристика	Тип, марка позначення документа, опитувального листа	Одиниця виміру	Кількість			
	Трансформатор						
1.	Трифазний маслонаповнений трансформатор	ТМ 63/10	шт	1	1	-	-
	Металеві конструкції						
2.	Гак універсальний посилений	CSC 16uz	шт	23	-	1	2

продовження таблиці 3.5

3.	Бандажна стрічка	IF 207	м	43	-	2	3
4.	Скріпа для бандажної с трічки	CF 20	шт	40	-	2	2
5.	Кронштейн для стояків СВ95 (202.2н/9-1)	У3	шт	5	-	-	1
6.	Гак-болт прохідний GH W 16/250 для стояків	GHW 16/250	шт	1	-	-	-
	Опори						
7.	Стояк	СВ95-2	шт	24	-	-	2
8.	Стояк	СВ105-3.6	шт	1	-	-	-
	ПЛ низької напруги - провід						
9.	Провід неізольований ГОСТ 839-80	А16	м	27	-	1	2
	З'єднувачі						
10.	Затискач плашковий ві дгалужувальний для не ізольованих дротів	PGA 101 G	шт	29	-	-	3
11.	Затискач відгалужувал ьний магістральний з д восторонній проколюв анням ізоляції (з низьк им перехідним опоро м)	TTD 401 neo	шт	12	-	-	4
12.	Затискач відгалужувал ьний проколюючий з н езалежним підключенн ям двох відгалужень	TT2D 83 F3	шт	4	-	4	-
13.	Затискач плашковий	ПС-1-1	шт	2	-	1	-
14.	Затискач відгалужувал ьний для приєднання д о СІП неізольованих пр оводів (повторних зазе млень)	TND 151	шт	1	-	-	-

продовження таблиці 3.5

	Електротехнічне обладнання						
15.	Хомут стяжний	CCD 9-62	шт	7	-	-	2
	Закріплююча арматура						
16.	Затискач підтримуючий для магістральних ліній	PSP 120	шт	16	-	-	-
17.	Затискач натяжний для відгалужень чотирьохжильним проводом	GUKp4	шт	2	-	2	-
	Пристрої заземлення						
18.	Модуль для тимчасових підключень і заземлень	FCC 1	шт	4	-	-	-
	Захисне устаткування						
19.	ОПН з індикатором пробою	Protect 50	шт	3	-	-	-

Таблиця 3.6. – Кабельний журнал

№	Назва траси ЛЕП	Тип проводу	Довжина проводу
1.	L1	АПвБбШп (ож)-1 4х185	529 м
2.	L2	AsXSn 4x25	11 м
3.	L3	А 16 (дві жили)	33 м
4.	L4	А 16 (дві жили)	29 м
5.	L5	А 16 (дві жили)	32 м
6.	L6	А 16 (дві жили)	19 м
7.	L7	А 16 (дві жили)	21 м
8.	L8	А 16 (дві жили)	19 м
9.	L9	А 16 (дві жили)	20 м
10.	L10	А 16 (дві жили)	19 м
11.	L11	А 16 (дві жили)	14 м
12.	L12	А 16 (дві жили)	23 м
13.	L13	А 16 (дві жили)	26 м
14.	L14	А 16 (дві жили)	23 м
15.	L15	А 16 (дві жили)	16 м
16.	L16	А 16 (дві жили)	25 м
17.	L17	А 16 (дві жили)	21 м
18.	L18	А 16 (дві жили)	19 м
19.	L19	А 16 (дві жили)	21 м

Таблиця 3.7. – Відомості опор

Відомість опор

☐ Відобразити тільки групи зі стійками

Тип опори	Позначення	Найменування	Креслення	Тип закріплення у грунті	Номер вузла	Кількість вузлів	Загальна кількість по типах
Типовий вузол магістральної лінії	КТПМ-63/10/0,4 У1	Комплектна трансформаторна підстанція мачтова			ТП 10/0,4	1	1
Проміжна опора	П1(1хСВ95-2)-1с	Проміжна одноколова опора	П1_202.3н_9-01		2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 19, 20	16	16
Анкерна опора	А1(2хСВ95-2)-1с	Анкерна одноколова опора	А1_202.3н_9-22		1	1	3
	КА1(3хСВ95-2)-1с	Кутова анкерна одноколова опора	КА1_202.3н_9-31		5, 6	2	
Кінцева опора	К1(1хСВ105-3.6)-1	Кінцева одноколова опора	К1_202.2н_3-20		21	1	1
Однофазний ввід до абонента	АБ1Т-3	Трифазний ввід у будівлю	АБ1Т_202.2н_8-28		15, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37	17	18
	АБ1Т-3 + АВ2Т-3	Трифазний ввід у будівлю + Відгалуження до вводу в будівлю	АБ1Т_202.2н_8-28 + АВ2Т_202.2н_8-19		Споживач	1	

3.4. Результати розрахунку електричних параметрів в програмному середовищі SICAD

Програмний комплекс SICAD використовується для моделювання та аналізу режимів роботи електричних мереж, оцінки їх параметрів у нормальних та аварійних режимах, перевірки відповідності нормативам та вибору оптимальних рішень щодо конфігурації мережі. В рамках дослідження були виконані розрахунки основних електротехнічних параметрів, що визначають працездатність і надійність мережі: втрат напруги, розрахункового струму, струму короткого замикання та навантаження джерела живлення.

1. Втрати напруги, визначені в SICAD

Втрати напруги (падіння напруги) є одним із ключових показників якості електропостачання. У SICAD розрахунок виконується автоматично на основі електричної схеми, що включає характеристики проводів (довжину, переріз, матеріал), реактивні та активні опори, а також параметри навантажень.

В програмі використовується математична модель трифазної мережі, де втрати визначаються врахуванням активної та реактивної складових:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R \cdot cos\ \varphi + X \cdot sin\ \varphi) \tag{3.1}$$

SICAD формує результати у вигляді:

- ✓ падіння напруги в абсолютному значенні (В);
- ✓ відносні втрати, % від номінальної напруги;
- ✓ візуалізацію на схематичному плані мережі з можливістю локалізації проблемних ділянок.

Це дозволяє оцінити, чи забезпечується необхідний рівень напруги на шинах споживача та чи відповідають втрати нормативам ДСТУ EN 50160 та вимогам експлуатації.

2. Розрахунковий струм навантаження в SICAD

Розрахунковий струм - це величина, яка визначає реальне навантаження на ділянки мережі, трансформатори та джерела живлення. SICAD виконує його на основі заданих споживачів та джерел потужності, враховуючи коефіцієнт потужності, графіки навантаження та режим роботи мережі.

Базова формула, що лежить в основі обчислення:

$$I_{\text{розр}} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}}, \text{ А} \qquad (3.2)$$

де повна потужність S формується на основі заданих активних і реактивних складових.

Програма автоматично:

- ✓ визначає струм на кожній ділянці,
- ✓ порівнює значення з допустимими для кабелю чи проводу,
- ✓ сигналізує про перевантаження,
- ✓ дозволяє оцінювати струми для різних конфігурацій мережі (перемикання, резервування).

3. Струм короткого замикання, розрахований в SICAD

Розрахунок струму короткого замикання є критично важливим для проектування захисту і вибору комутаційного обладнання. SICAD визначає струми КЗ відповідно до місця замикання у мережі, параметрів трансформаторів, джерел та опорів ліній.

Програма моделює:

- ✓ трьохфазне симетричне КЗ (максимальні значення),
- ✓ однофазне замикання на землю,
- ✓ двофазні пошкодження.

Загальна формула, покладена в основу:

$$I_k = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{екв}}}, \text{ А} \qquad (3.3)$$

SICAD в автоматичному режимі визначає $Z_{\text{екв}}$ на основі паспортних даних об'єктів схеми.

Отримані результати дозволяють:

- ✓ перевірити відключаючу здатність вимикачів,

- ✓ визначити час спрацювання релейного захисту,
- ✓ оцінити термічний вплив струмів КЗ на обладнання.

4. Навантаження джерела живлення у SICAD

У контексті аналізу режимів живлення, SICAD виконує розрахунок завантаженості трансформаторів та інших джерел енергії. Програма визначає співвідношення між активною/реактивною/повною потужністю навантаження та номінальною потужністю джерела:

$$k_{load} = \frac{S_{load}}{S_{rated}} \tag{3.4}$$

Система формує:

- ✓ відсоток завантаження джерела,
- ✓ попередження про перевантаження,
- ✓ підбір оптимального режиму роботи трансформатора,
- ✓ оцінку втрат у трансформаторі при поточному навантаженні.

Це особливо важливо при інтеграції відновлюваних джерел, таких як сонячні електростанції, де розподіл потужності змінний і залежить від генерації.

Виконані в програмі SICAD розрахунки дозволяють комплексно оцінити технічний стан та перспективи розвитку електричної мережі. Аналіз напруги, струмів навантаження, струмів короткого замикання та рівня завантаженості джерел живлення забезпечує можливість прийняття обґрунтованих рішень щодо:

- ✓ вибору параметрів обладнання,
- ✓ структури схеми мережі,
- ✓ підвищення надійності,
- ✓ впровадження генерації на ВДЕ.

Таблиця 3.8. – Втрати напруги в мережі (режим зимового вечірнього максимуму споживання)

Коефіцієнт перспективного збільшення потужності 1

Режим зимового вечірнього максимуму споживання

Втрати напруги dU

№	Назва траси	№ опори найбільш віддаленого приєднання	Втрати напруги dU, %	Втрати напруги dU, В	Рівень напруги U, В	Відхилення від номінального значення напруги, %
1	L18	37	0.49	1.08	218.31	-0.77
2	L17	36	0.88	1.93	217.46	-1.15
3	L16	35	1.07	2.35	217.04	-1.35
4	L15	34	1.21	2.65	216.74	-1.48
5	L14	33	2.06	4.52	214.87	-2.33
6	L13	32	2.51	5.51	213.88	-2.78
7	L12	31	2.62	5.75	213.64	-2.89
8	L11	30	2.79	6.12	213.27	-3.06
9	L9	28	3.07	6.74	212.65	-3.34
10	L8	27	3.44	7.55	211.84	-3.71
11	L7	26	3.51	7.7	211.69	-3.78
12	L5	15	3.68	8.07	211.32	-3.95
13	L4	25	3.54	7.77	211.62	-3.81
14	L3	24	3.52	7.72	211.67	-3.79

Таблиця 3.9. – Втрати напруги в мережі (режим літнього максимуму генерації енергії електростанціями СЕС)

Коефіцієнт перспективного збільшення потужності 1

Режим літнього максимуму генерації енергії електростанціями

Втрати напруги dU

№	Назва траси	№ опори найбільш віддаленого приєднання	Втрати напруги dU, %	Втрати напруги dU, В	Рівень напруги U, В	Відхилення від номінального значення напруги, %
1	L18	37	0.1	0.22	219.17	-0.38
2	L17	36	0.12	0.26	219.13	-0.4
3	L16	35	0.12	0.26	219.13	-0.4
4	L15	34	0.07	0.15	219.24	-0.35
5	L14	33	-0.25	-0.55	219.94	-0.03
6	L13	32	-1.6	-3.51	222.9	1.32
7	L12	31	-0.25	-0.55	219.94	-0.03
8	L11	30	-0.19	-0.42	219.81	-0.09
9	L9	28	-0.09	-0.2	219.59	-0.19
10	L8	27	0.04	0.09	219.3	-0.32
11	L7	26	0.06	0.13	219.26	-0.34
12	L5	15	0.12	0.26	219.13	-0.4
13	L4	25	0.07	0.15	219.24	-0.35
14	L3	24	0.06	0.13	219.26	-0.34

Таблиця 3.10 – Розрахунок струму (режим зимового вечірнього максимуму споживання)

Коефіцієнт перспективного збільшення потужності 1

Режим зимового вечірнього максимуму споживання

Розрахунковий струм Ір

№	Назва траси	Ділянка (№ опори - № опори)	Розрахунковий струм Ір, А	Тип проводу	Номінальний струм проводу, А
1	L1	ТП 10/0,4 - 1	54.72	А 120 (чотири жили)	375
2	L1	1 - L1вузол2	54.72	А 120 (чотири жили)	375
3	L1	L1вузол2 - 2	52.83	А 120 (чотири жили)	375
4	L1	2 - L1вузол4	52.83	А 120 (чотири жили)	375
5	L1	L1вузол4 - L1вузол5	50.62	А 120 (чотири жили)	375
6	L1	L1вузол5 - 3	48.76	А 120 (чотири жили)	375
7	L1	3 - L1вузол7	48.76	А 120 (чотири жили)	375
8	L1	L1вузол7 - 4	46.47	А 120 (чотири жили)	375
9	L1	4 - 5	46.47	А 120 (чотири жили)	375
10	L1	5 - 7	46.47	А 120 (чотири жили)	375
11	L1	7 - 8	46.47	А 120 (чотири жили)	375
12	L1	8 - 9	46.47	А 120 (чотири жили)	375
13	L1	9 - L1вузол13	46.47	А 120 (чотири жили)	375

продовження таблиці 3.10

14	L1	L1вузол13 - 6	43.76	А 120 (чотири жили)	375
15	L1	6 - L1вузол15	43.76	А 120 (чотири жили)	375
16	L1	L1вузол15 - 10	41.33	А 120 (чотири жили)	375
17	L1	10 - L1вузол17	41.33	А 120 (чотири жили)	375
18	L1	L1вузол17 - 11	38.29	А 120 (чотири жили)	375
19	L1	11 - L1вузол19	38.29	А 120 (чотири жили)	375
20	L1	L1вузол19 - 12	34.64	А 120 (чотири жили)	375
21	L1	12 - L1вузол21	34.64	А 120 (чотири жили)	375
22	L1	L1вузол21 - 13	30.71	А 120 (чотири жили)	375
23	L1	13 - L1вузол23	30.71	А 120 (чотири жили)	375
24	L1	L1вузол23 - 14	26.05	А 120 (чотири жили)	375
25	L1	14 - L1вузол25	26.05	А 120 (чотири жили)	375
26	L1	L1вузол25 - L1вузол26	20.65	А 120 (чотири жили)	375
27	L1	L1вузол26 - L1вузол27	15.82	А 120 (чотири жили)	375
28	L1	L1вузол27 - 17	15.82	А 120 (чотири жили)	375
29	L1	17 - L1вузол29	15.82	А 120 (чотири жили)	375
30	L1	L1вузол29 - L1вузол30	8.94	А 120 (чотири жили)	375
31	L1	L1вузол30 - L1вузол31	8.94	А 120 (чотири жили)	375
32	L18	L18вузол1 - 37	26.74	А 16 (дві жили)	105

продовження таблиці 3.10

33	L17	L17вузол0 - 36	26.74	А 16 (дві жили)	105
34	L16	L16вузол1 - 35	26.74	А 16 (дві жили)	105
35	L15	L15вузол1 - 34	26.74	А 16 (дві жили)	105
36	L14	L14вузол1 - 33	26.74	А 16 (дві жили)	105
37	L13	L13вузол1 - 32	26.74	А 16 (дві жили)	105
38	L12	L12вузол1 - 31	26.74	А 16 (дві жили)	105
39	L11	L11вузол1 - 30	26.74	А 16 (дві жили)	105
40	L9	L9вузол1 - 28	26.74	А 16 (дві жили)	105
41	L8	L8вузол0 - 27	26.74	А 16 (дві жили)	105
42	L7	L7вузол1 - 26	26.74	А 16 (дві жили)	105
43	L5	L5вузол1 - 15	26.74	А 16 (дві жили)	105
44	L4	L4вузол1 - 25	26.74	А 16 (дві жили)	105
45	L3	L3вузол1 - 24	26.74	А 16 (дві жили)	105

Таблиця 3.11 - Розрахунок струму (режим літнього максимуму генерації енергії електростанціями СЕС)

Коефіцієнт перспективного збільшення потужності 1

Режим літнього максимуму генерації енергії електростанціями

Розрахунковий струм Ір

№	Назва траси	Ділянка (№ опори - № опори)	Розрахунковий струм Ір, А	Тип проводу	Номінальний струм проводу, А
1	L1	ТП 10/0,4 - 1	-7.66	А 120 (чотири жили)	375
2	L1	1 - L1вузол2	-7.66	А 120 (чотири жили)	375
3	L1	L1вузол2 - 2	-8.32	А 120 (чотири жили)	375
4	L1	2 - L1вузол4	-8.32	А 120 (чотири жили)	375
5	L1	L1вузол4 - L1вузол5	-9.09	А 120 (чотири жили)	375
6	L1	L1вузол5 - 3	-9.75	А 120 (чотири жили)	375
7	L1	3 - L1вузол7	-9.75	А 120 (чотири жили)	375
8	L1	L1вузол7 - 4	-10.55	А 120 (чотири жили)	375
9	L1	4 - 5	-10.55	А 120 (чотири жили)	375
10	L1	5 - 7	-10.55	А 120 (чотири жили)	375
11	L1	7 - 8	-10.55	А 120 (чотири жили)	375
12	L1	8 - 9	-10.55	А 120 (чотири жили)	375
13	L1	9 - L1вузол13	-10.55	А 120 (чотири жили)	375
14	L1	L1вузол13 - 6	-11.5	А 120 (чотири жили)	375
15	L1	6 - L1вузол15	-11.5	А 120 (чотири жили)	375

16	L1	L1вузол15 - 10	14.46	А 120 (чотири жили)	375
17	L1	10 - L1вузол17	14.46	А 120 (чотири жили)	375
18	L1	L1вузол17 - 11	13.4	А 120 (чотири жили)	375
19	L1	11 - L1вузол19	13.4	А 120 (чотири жили)	375
20	L1	L1вузол19 - 12	12.12	А 120 (чотири жили)	375
21	L1	12 - L1вузол21	12.12	А 120 (чотири жили)	375
22	L1	L1вузол21 - 13	10.75	А 120 (чотири жили)	375
23	L1	13 - L1вузол23	10.75	А 120 (чотири жили)	375
24	L1	L1вузол23 - 14	9.12	А 120 (чотири жили)	375
25	L1	14 - L1вузол25	9.12	А 120 (чотири жили)	375
26	L1	L1вузол25 - L1вузол26	7.23	А 120 (чотири жили)	375
27	L1	L1вузол26 - L1вузол27	5.54	А 120 (чотири жили)	375
28	L1	L1вузол27 - 17	5.54	А 120 (чотири жили)	375
29	L1	17 - L1вузол29	5.54	А 120 (чотири жили)	375
30	L1	L1вузол29 - L1вузол30	3.13	А 120 (чотири жили)	375
31	L1	L1вузол30 - L1вузол31	3.13	А 120 (чотири жили)	375
32	L18	L18вузол1 - 37	9.36	А 16 (дві жили)	105
33	L17	L17вузол0 - 36	9.36	А 16 (дві жили)	105
34	L16	L16вузол1 - 35	9.36	А 16 (дві жили)	105

35	L15	L15вузол1 - 34	9.36	А 16 (дві жили)	105
36	L14	L14вузол1 - 33	9.36	А 16 (дві жили)	105
37	L13	L13вузол1 - 32	-70.86	А 16 (дві жили)	105
38	L12	L12вузол1 - 31	9.36	А 16 (дві жили)	105
39	L11	L11вузол1 - 30	9.36	А 16 (дві жили)	105
40	L9	L9вузол1 - 28	9.36	А 16 (дві жили)	105
41	L8	L8вузол0 - 27	9.36	А 16 (дві жили)	105
42	L7	L7вузол1 - 26	9.36	А 16 (дві жили)	105
43	L5	L5вузол1 - 15	9.36	А 16 (дві жили)	105
44	L4	L4вузол1 - 25	9.36	А 16 (дві жили)	105
45	L3	L3вузол1 - 24	9.36	А 16 (дві жили)	105

Таблиця 3.12 – Розрахунок струму короткого замикання (режим зимового вечірнього максимуму споживання)

Коефіцієнт перспективного збільшення потужності 1

Режим зимового вечірнього максимуму споживання

Струм короткого замикання Ікз

№	Назва траси	№ опори найбільш віддаленого приєднання	Струм однофазного короткого замикання, Ікз, А
1	L18	37	483.33
2	L17	36	452.06
3	L16	35	437.82
4	L15	34	427.07
5	L14	33	364.95
6	L13	32	340.66
7	L12	31	333.7
8	L11	30	323.74
9	L9	28	307.29
10	L8	27	293.32
11	L7	26	286.07
12	L5	15	278.31
13	L4	25	272.02
14	L3	24	269.43

Таблиця 3.13 - Розрахунок струму короткого замикання (режим літнього максимуму генерації енергії електростанціями СЕС)

Коефіцієнт перспективного збільшення потужності 1

Режим літнього максимуму генерації енергії електростанціями

Струм короткого замикання Ікз

№	Назва траси	№ опори найбільш віддаленого приєднання	Струм однофазного короткого замикання, Ікз, А
1	L18	37	483.33
2	L17	36	452.06
3	L16	35	437.82
4	L15	34	427.07
5	L14	33	364.95
6	L13	32	340.66
7	L12	31	333.7
8	L11	30	323.74
9	L9	28	307.29
10	L8	27	293.32
11	L7	26	286.07
12	L5	15	278.31
13	L4	25	272.02
14	L3	24	269.43

Таблиця 3.14 – Навантаження джерела живлення (режим зимового вечірнього максимуму споживання)

Коефіцієнт перспективного збільшення потужності 1

Режим зимового вечірнього максимуму споживання

Навантаження джерела живлення

Диспетчерське найменування:			T1	
Тип трансформатора			TM 63/10	
Номінальна потужність трансформатора, кВА			63	
Розрахункова потужність на трансформаторі, кВт			30.61	
cosφ:			0.85	
Повна розрахункова потужність на трансформаторі, кВА			36.01	
Коефіцієнт завантаження трансформатора			0.57	
Перелік споживачів у мережі				
№	Найменування	Кількість, шт	Потужність одиниці, кВт	в тому числі ел. опалення, кВт
1	1.1 I рівня електрифікації - в будинках з плитами на природному газі (5 кВт)	14	5	-
Розрахункові дані лінії L1, ТП 10/0,4 - 1				
Розрахункова потужність споживачів, кВт			30.61	
Розрахунковий струм лінії, А			54.72	
cosφ лінії			0.85	
Кількість споживачів у лінії, шт			14	

Таблиця 3.15 - Навантаження джерела живлення (режим літнього максимуму генерації енергії електростанціями СЕС)

Коефіцієнт перспективного збільшення потужності 1

Режим літнього максимуму генерації енергії електростанціями

Навантаження джерела живлення

Диспетчерське найменування:			T1	
Тип трансформатора			ТМ 63/10	
Номінальна потужність трансформатора, кВА			63	
Розрахункова потужність на трансформаторі, кВт			-34.29	
cosφ:			0.85	
Повна розрахункова потужність на трансформаторі, кВА			-40.34	
Коефіцієнт завантаження трансформатора			-0.64	
Перелік споживачів у мережі				
№	Найменування	Кількість, шт	Потужність одиниці, кВт	в тому числі ел. опалення, кВт
1	1.1 І рівня електрифікації - в будинках з плитами на природному газі (5 кВт)	14	5	-
Перелік електростанцій (СЕС, ВЕС) у мережі				
№	Найменування	Кількість, шт	Потужність одиниці, кВт	в тому числі ел. опалення, кВт
1	Електростанція (потужність 15 кВт)	1	15	-
2	Електростанція (потужність 30 кВт)	1	30	-

продовження таблиці 3.15

Розрахункові дані лінії L1, ТП 10/0,4 - 1	
Розрахункова потужність споживачів, кВт	-4.29
Розрахунковий струм лінії, А	-7.66
cosφ лінії	0.85
Кількість споживачів у лінії, шт	14

Таблиця 3.16 – Розгорнутий розрахунок (режим зимового вечірнього максимуму споживання)

Коефіцієнт перспективного збільшення потужності 1

Режим зимового вечірнього максимуму споживання

Розгорнутий розрахунок

№	Назва траси	Ділянка (№ опори - № опори)	Марка проводу	Довжина прольоту L, м	Питомий активний опір проводу r, Ом/км	Реактивний питомий опір проводу x, Ом/км	Кількість споживачів, шт	Активна потужність P, кВт	Реактивна потужність Q, кВАр	Втрати напруги dU, %	Втрати напруги dU, В	Сумарні втрати напруги від джерела живлення, ΣdU, %	Розрахунковий струм Ip, А	Втрати потужності dP, кВт
1	L1	ТП 10/0,4 - L1вузол2	А 120 (чотири жили)	15	0.253	0.3016	14	30.61	18.97	0.14	0.53	0.14	54.72	0.01144
2	L1	L1вузол2 - L1вузол4	А 120 (чотири жили)	25	0.253	0.3016	13	29.55	18.32	0.23	0.87	0.37	52.83	0.01806
3	L1	L1вузол4 - L1вузол5	А 120 (чотири жили)	15	0.253	0.3016	12	28.32	17.55	0.13	0.49	0.5	50.62	0.00974
4	L1	L1вузол5 - L1вузол7	А 120 (чотири жили)	22	0.253	0.3016	11	27.28	16.91	0.18	0.68	0.68	48.76	0.0132
5	L1	L1вузол7 - L1вузол13	А 120 (чотири жили)	134	0.253	0.3016	10	26	16.11	1.06	4.03	1.75	46.47	0.07301
6	L1	L1вузол13 - L1вузол15	А 120 (чотири жили)	43	0.253	0.3016	9	24.48	15.17	0.32	1.22	2.07	43.76	0.02071
7	L1	L1вузол15 - L1вузол17	А 120 (чотири жили)	17	0.253	0.3016	8	23.12	14.33	0.12	0.46	2.19	41.33	0.00775
8	L1	L1вузол17 - L1вузол19	А 120 (чотири жили)	27	0.253	0.3016	7	21.42	13.27	0.17	0.64	2.37	38.29	0.00998

продовження таблиці 3.16

9	L1	L1вузол19 - L1вузол21	А 120 (чотири жили)	46	0.253	0.3016	6	19.38	12.01	0.27	1.02	2.64	34.64	0.01396
10	L1	L1вузол21 - L1вузол23	А 120 (чотири жили)	17	0.253	0.3016	5	17.18	10.65	0.09	0.34	2.73	30.71	0.00411
11	L1	L1вузол23 - L1вузол25	А 120 (чотири жили)	30	0.253	0.3016	4	14.57	9.03	0.14	0.53	2.87	26.05	0.00518
12	L1	L1вузол25 - L1вузол26	А 120 (чотири жили)	17	0.253	0.3016	3	11.55	7.16	0.06	0.23	2.93	20.65	0.00188
13	L1	L1вузол26 - L1вузол29	А 120 (чотири жили)	48	0.253	0.3016	2	8.85	5.48	0.13	0.49	3.06	15.82	0.00308
14	L1	L1вузол29 - L1вузол31	А 120 (чотири жили)	14	0.253	0.3016	1	5	3.1	0.02	0.08	3.08	8.94	0.00027
15	L18	L18вузол1 - 24	А 16 (дві жили)	157	1.91	0.3672	1	5	3.1	6.98	15.34	3.52	26.74	0.21372

Таблиця 3.17 – Розгорнутий розрахунок (режим літнього максимуму генерації енергії електростанціями СЕС)

Коефіцієнт перспективного збільшення потужності 1

Режим літнього максимуму генерації енергії електростанціями

Розгорнутий розрахунок

№	Назва траси	Ділянка (№ опори - № опори)	Марка проводу	Довжина прольоту L, м	Питомий активний опір проводу r, Ом/км	Реактивний питомий опір проводу x, Ом/км	Кількість споживачів, шт	Активна потужність P, кВт	Реактивна потужність Q, кВАр	Втрати напруги dU, %	Втрати напруги dU, В	Сумарні втрати напруги від джерела живлення, ΣdU, %	Розрахунковий струм Ip, А	Втрати потужності dP, кВт
1	L1	ТП 10/0,4 - L1вузол2	А 120 (чотири жили)	15	0.253	0.3016	14	-4.29	-2.66	-0.02	-0.08	-0.02	-7.66	0.00023
2	L1	L1вузол2 - L1вузол4	А 120 (чотири жили)	25	0.253	0.3016	13	-4.66	-2.89	-0.04	-0.15	-0.06	-8.32	0.00045
3	L1	L1вузол4 - L1вузол5	А 120 (чотири жили)	15	0.253	0.3016	12	-5.09	-3.15	-0.02	-0.08	-0.08	-9.09	0.00031
4	L1	L1вузол5 - L1вузол7	А 120 (чотири жили)	22	0.253	0.3016	11	-5.45	-3.38	-0.04	-0.16	-0.12	-9.75	0.00053
5	L1	L1вузол7 - L1вузол13	А 120 (чотири жили)	134	0.253	0.3016	10	-5.9	-3.66	-0.24	-0.91	-0.36	-10.55	0.00377
6	L1	L1вузол13 - L1вузол15	А 120 (чотири жили)	43	0.253	0.3016	9	-6.43	-3.99	-0.09	-0.34	-0.44	-11.5	0.00143
7	L1	L1вузол15 - L1вузол17	А 120 (чотири жили)	17	0.253	0.3016	8	8.09	5.01	0.05	0.19	-0.4	14.46	0.00094
8	L1	L1вузол17 - L1вузол19	А 120 (чотири	27	0.253	0.3016	7	7.5	4.65	0.07	0.27	-0.33	13.4	0.00122

продовження таблиці 3.17

9	L1	L1вузол19 - L1вузол21	А 120 (чотири жили)	46	0.253	0.3016	6	6.78	4.2	0.1	0.38	-0.24	12.12	0.00171
10	L1	L1вузол21 - L1вузол23	А 120 (чотири жили)	17	0.253	0.3016	5	6.01	3.73	0.03	0.12	-0.21	10.75	0.00051
11	L1	L1вузол23 - L1вузол25	А 120 (чотири жили)	30	0.253	0.3016	4	5.1	3.16	0.04	0.15	-0.16	9.12	0.00063
12	L1	L1вузол25 - L1вузол26	А 120 (чотири жили)	17	0.253	0.3016	3	4.04	2.51	0.02	0.08	-0.14	7.23	0.00023
13	L1	L1вузол26 - L1вузол29	А 120 (чотири жили)	48	0.253	0.3016	2	3.1	1.92	0.05	0.19	-0.09	5.54	0.00038
14	L1	L1вузол29 - L1вузол31	А 120 (чотири жили)	14	0.253	0.3016	1	1.75	1.08	0	0	-0.09	3.13	0.00003
15	L18	L18вузол1 - 24	А 16 (дві жили)	157	1.91	0.3672	1	1.75	1.08	1.12	2.46	0.06	9.36	0.11909

3.5. Моделювання інтеграції СЕС

Для оцінювання впливу сонячної електростанції (СЕС) на режими роботи розподільчої мережі 10 кВ виконано комп'ютерне моделювання з використанням програмного комплексу SICAD. Моделювання проводилось з метою аналізу змін напруги, потоків потужності, втрат електроенергії та завантаження елементів мережі після підключення СЕС.

На першому етапі в середовищі SICAD була створена модель досліджуваної ділянки розподільчої мережі 10 кВ, що включає джерело живлення, повітряні та кабельні лінії, трансформаторні підстанції 10/0,4 кВ та споживачів. Параметри елементів мережі (довжина ліній, переріз провідників, номінальні напруги та потужності трансформаторів) задавалися відповідно до технічної документації та нормативних даних.

На другому етапі до моделі була інтегрована сонячна електростанція, підключена до мережі 10 кВ через підвищувальний трансформатор та інверторне обладнання. У моделі враховувалися номінальна встановлена потужність СЕС, коефіцієнт потужності інверторів, а також можливість роботи в режимах генерації активної та реактивної потужності відповідно до вимог Кодексу систем розподілу.

Для аналізу режимів роботи системи було розглянуто декілька характерних сценаріїв:

- ✓ базовий режим без підключення СЕС;
- ✓ денний режим максимальної генерації СЕС при середньому навантаженні;
- ✓ режим мінімального навантаження мережі за умов високої сонячної генерації;
- ✓ вечірній режим зі зниженою генерацією СЕС та підвищеним навантаженням споживачів.

В результаті моделювання визначено зміну рівнів напруги в контрольних вузлах мережі, перерозподіл потоків активної та реактивної потужності, а також вплив СЕС на величину технічних втрат електроенергії. Встановлено,

що при раціональному виборі точки приєднання та налаштуванні інверторів робота СЕС сприяє зменшенню навантаження на живильні фідери та зниженню втрат електроенергії в лініях.

Разом з тим, у режимах мінімального навантаження зафіксовано тенденцію до підвищення напруги в окремих вузлах мережі, що підтверджує необхідність застосування засобів регулювання напруги та реактивної потужності. Отримані результати моделювання підтверджують доцільність використання програмного комплексу SICAD для аналізу інтеграції відновлюваних джерел енергії та дозволяють сформувати обґрунтовані рекомендації щодо підвищення надійності та ефективності роботи розподільчих мереж із СЕС.

Результати моделювання режимів роботи розподільчої мережі 10 кВ з інтегрованою сонячною електростанцією наочно подані у вигляді графічних матеріалів, отриманих у середовищі MatLab.

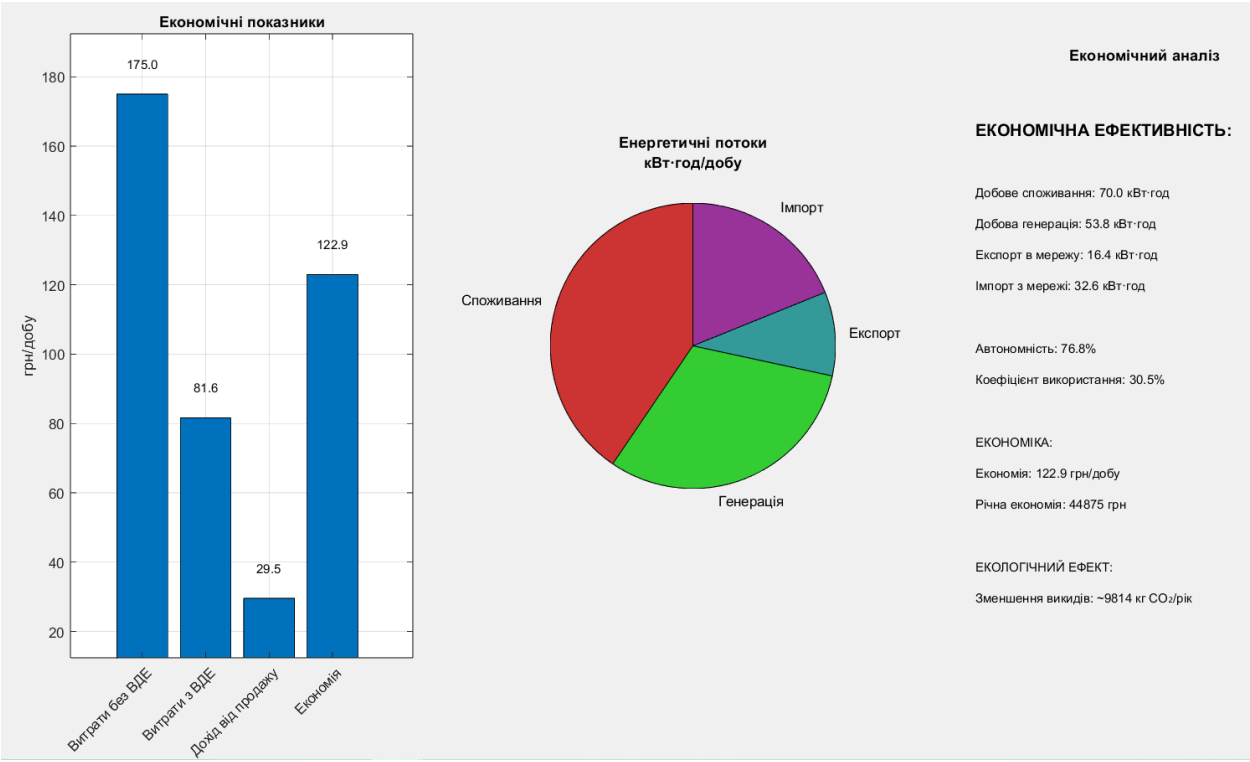


Рисунок 3.1. - Навантаження ДЖ - літній максимум генерації СЕС

На рисунку 3.1. показано, що в період максимальної сонячної активності відбувається суттєве зменшення активного навантаження на головне джерело живлення мережі. Це свідчить про часткове покриття потреб споживачів локальною генерацією та зниження перетоків потужності по живильних фідерах.

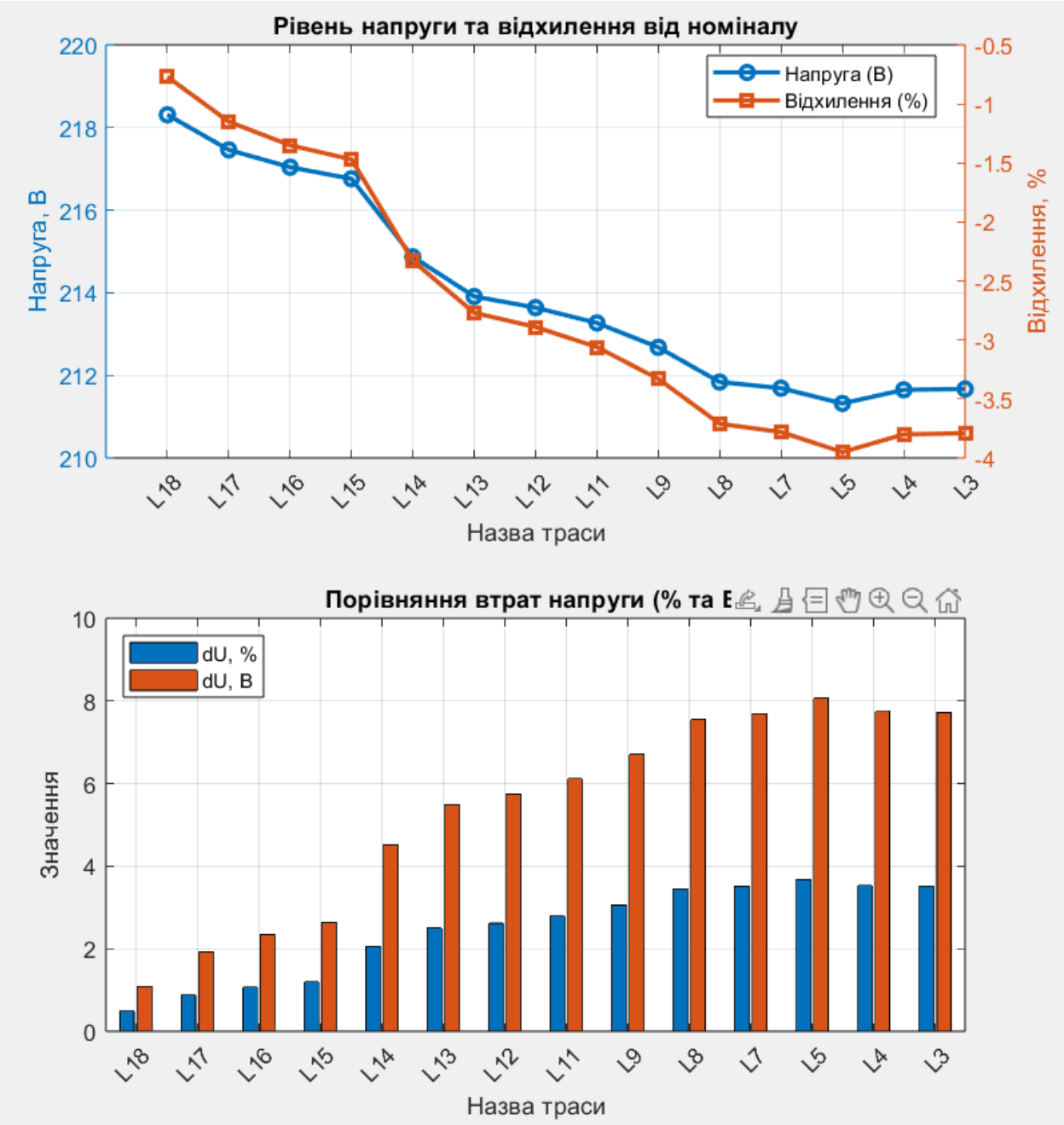


Рисунок 3.2. - Втрати напруги-зимовий максимум споживання

Рисунок 3.2 ілюструє найбільш напружений режим роботи мережі, за якого рівень напруги знижується через підвищене навантаження. Аналіз показує, що за відсутності генерації СЕС втрати напруги зростають, однак у перехідних режимах та за часткової генерації СЕС рівні напруги залишаються в межах допустимих значень згідно з чинними нормативами.

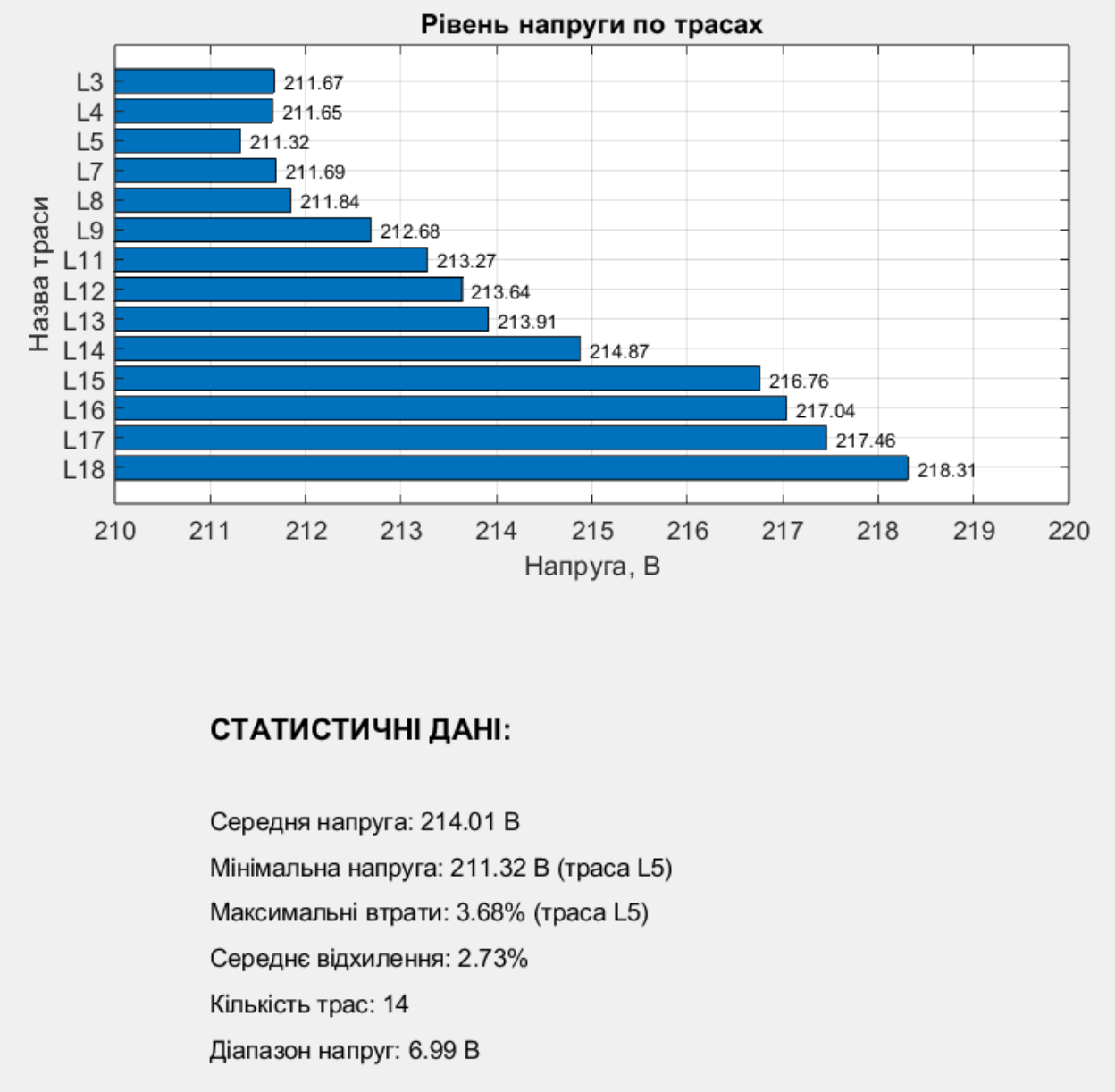


Рисунок 3.3. – Моделювання рівнів напруги по трасах

Моделювання рівнів напруги по трасах мережі дозволило оцінити розподіл напруги вздовж ліній електропередачі. Встановлено, що інтеграція

СЕС сприяє вирівнюванню профілю напруги, особливо у віддалених вузлах мережі, та зменшенню падінь напруги на кінцевих ділянках фідерів.

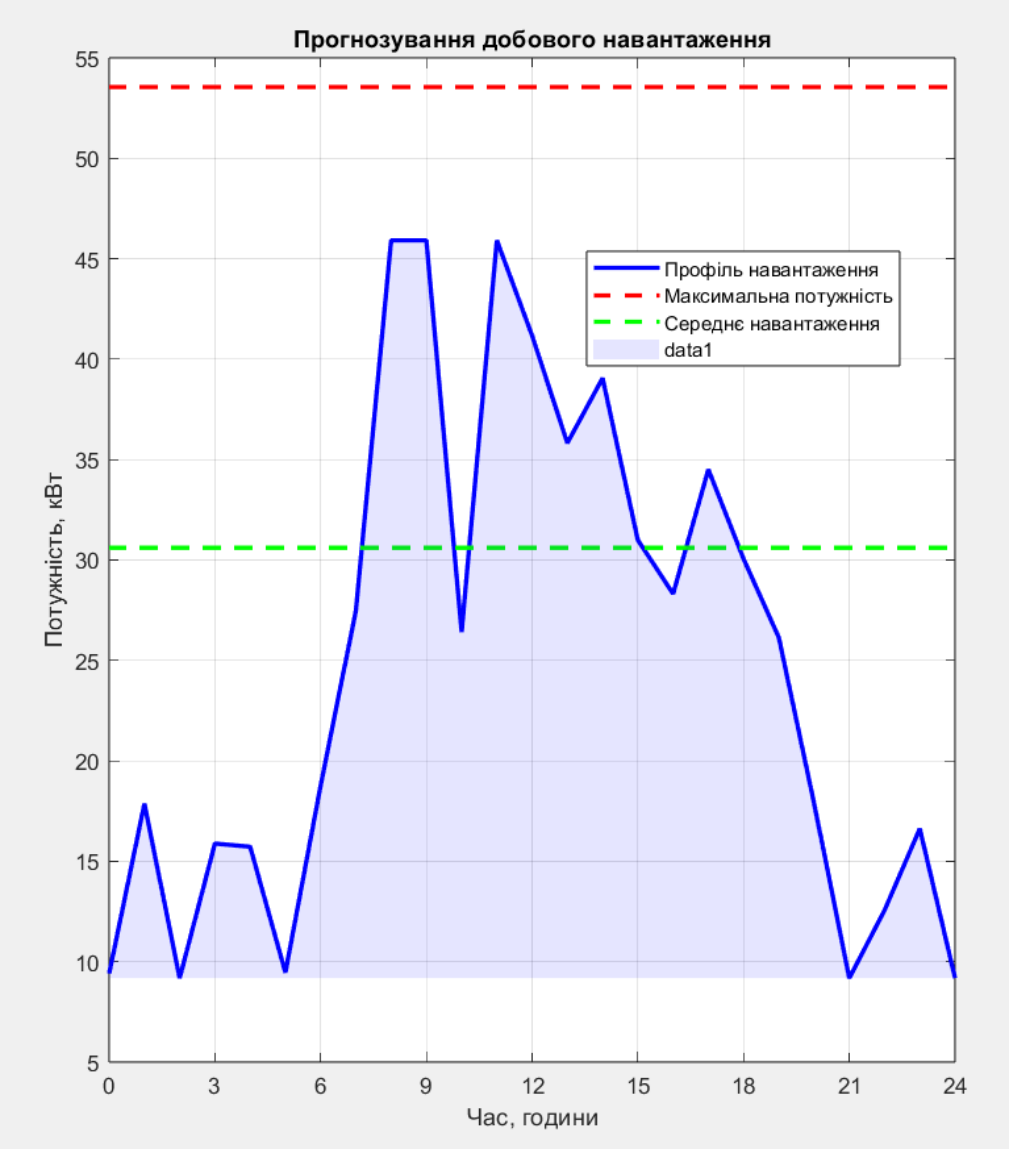


Рисунок 3.4. - Навантаження ДЖ - зимовий максимум споживання

Особливу увагу приділено аналізу струмів короткого замикання, результати якого подано на рисунку 3.5. Отримані дані показують, що підключення СЕС не призводить до критичного зростання струмів КЗ у мережі 10 кВ, а їх значення залишаються в межах допустимих параметрів комутаційної апаратури та захисних пристроїв. Це підтверджує можливість безпечної інтеграції СЕС за умови правильного вибору точки приєднання та налаштування релейного захисту.

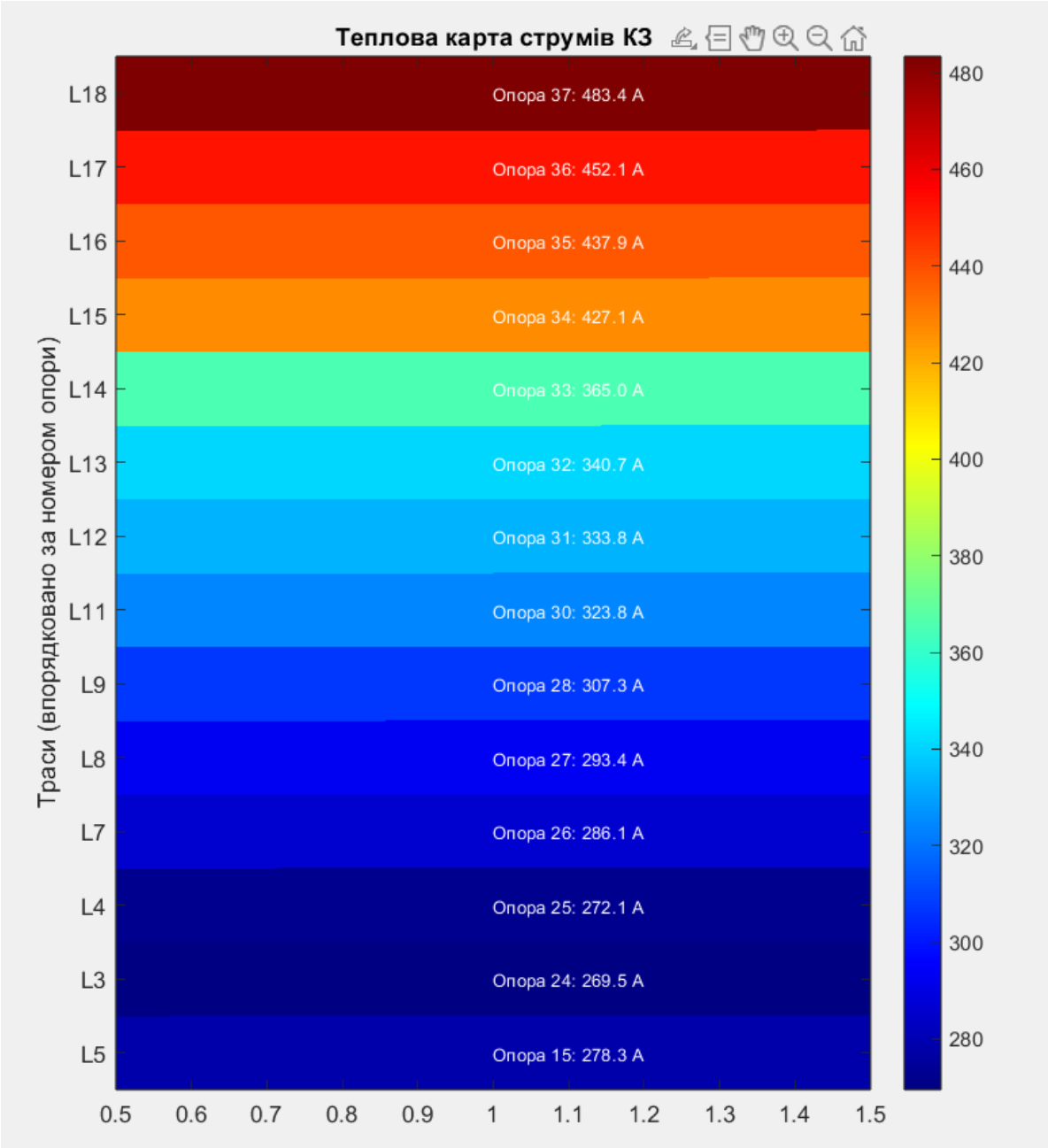


Рисунок 3.5. – Теплова карта струмів короткого замикання

За результатами моделювання інтеграції сонячної електростанції в розподільчу мережу 10 кВ з використанням програмного комплексу SICAD можна зробити такі висновки:

✓ Інтеграція СЕС у літній період призводить до зменшення навантаження на джерело живлення та зниження перетоків активної потужності по основних фідерах мережі.

- ✓ В режимі зимового максимуму споживання найбільші втрати напруги спостерігаються у віддалених вузлах, проте за наявності генерації СЕС рівні напруги не перевищують допустимих меж.
- ✓ Моделювання рівнів напруги по трасах показало позитивний вплив СЕС на вирівнювання напруги та підвищення якості електричної енергії у мережі.
- ✓ Аналіз струмів короткого замикання підтвердив, що підключення СЕС не створює перевищення допустимих значень струмів КЗ та не потребує заміни основного комутаційного обладнання.

Отримані результати свідчать про доцільність інтеграції сонячних електростанцій у розподільчі мережі 10 кВ за умови виконання попереднього розрахунку режимів роботи та належного налаштування систем захисту і регулювання напруги.

Таким чином, проведене моделювання підтверджує ефективність використання програмного комплексу SICAD для аналізу режимів роботи мереж із відновлюваними джерелами енергії та може бути використане як практичний інструмент при проєктуванні і модернізації розподільчих електричних мереж.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

В третьому розділі магістерської роботи «Розробка моделі інтеграції ВДЕ у середовищі SICAD» виконано розробку та аналіз моделі інтеграції відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячної електростанції, у розподільчу електричну мережу напругою 10 кВ із використанням програмного комплексу SICAD.

На етапі формування вихідних даних визначено тип електричної мережі, рівень напруги, встановлену потужність сонячної електростанції та точки її приєднання. Обрані параметри відповідають реальним умовам експлуатації розподільчих мереж середньої напруги та забезпечують коректність подальшого моделювання режимів роботи системи.

В середовищі SICAD побудовано топологію електричної мережі з урахуванням конфігурації ліній електропередачі, трансформаторних підстанцій та споживачів. Реалізована модель дозволяє виконувати розрахунки усталених режимів, аналізувати розподіл навантажень і оцінювати вплив локальної генерації на роботу мережі.

У підрозділі, присвяченому побудові схеми приєднання СЕС, розглянуто варіант підключення відновлюваного джерела до мережі 10 кВ з урахуванням технічних вимог щодо рівнів напруги, пропускної здатності ліній та забезпечення надійності електропостачання. Запропонована схема приєднання не потребує суттєвої реконструкції мережі та відповідає чинним нормативним вимогам.

За результатами розрахунків електричних параметрів встановлено, що інтеграція сонячної електростанції позитивно впливає на режим роботи мережі, зокрема сприяє зменшенню навантаження на джерело живлення, покращенню профілю напруги по трасах ліній та зниженню втрат електричної енергії в окремих режимах роботи. Аналіз режимів літнього максимуму генерації та зимового максимуму споживання показав, що рівні напруги та струми в елементах мережі не перевищують допустимих значень.

Моделювання струмів короткого замикання підтвердило, що підключення СЕС не призводить до критичного зростання аварійних струмів і не потребує заміни основного комутаційного обладнання за умови коректного вибору точки приєднання та налаштування захистів.

Таким чином, результати третього розділу підтверджують доцільність використання програмного комплексу SICAD для моделювання інтеграції відновлюваних джерел енергії в розподільчі мережі та доводять технічну можливість і ефективність впровадження сонячних електростанцій у мережі напругою 10 кВ без порушення нормативних режимів їх роботи.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ:

В магістерській роботі «Моделювання інтеграції сонячної електростанції в розподільчу мережу 10 кВ із використанням SICAD та аналіз режимів роботи системи» виконано комплексне дослідження процесів інтеграції сонячної електростанції у розподільчу електричну мережу напругою 10 кВ із використанням програмного комплексу SICAD та здійснено детальний аналіз режимів роботи системи в різних експлуатаційних умовах. Робота спрямована на вирішення актуальних завдань сучасної електроенергетики, пов’язаних із зростанням частки відновлюваних джерел енергії та необхідністю забезпечення надійної й якісної роботи розподільчих мереж.

В розділі 1 «Теоретичні основи інтеграції відновлюваних джерел енергії у розподільчі мережі» досліджено теоретичні основи інтеграції відновлюваних джерел енергії у розподільчі електричні мережі. Проаналізовано основні принципи роботи сонячних електростанцій, особливості їх взаємодії з мережею та вплив децентралізованої генерації на електричні режими. Встановлено, що впровадження СЕС у мережі середньої напруги може сприяти зменшенню втрат електроенергії та покращенню енергетичних показників, водночас створюючи потенційні ризики перевищення допустимих рівнів напруги, нерівномірності навантаження та зміни параметрів короткого замикання. Обґрунтовано необхідність застосування попереднього комп’ютерного моделювання для оцінки технічної можливості приєднання ВДЕ.

В розділі 2 «Огляд та можливості програмного комплексу SICAD» виконано огляд програмного комплексу SICAD та проаналізовано його функціональні можливості щодо моделювання електричних мереж з інтегрованими джерелами генерації. Показано, що SICAD дозволяє створювати детальні топологічні моделі розподільчих мереж, виконувати розрахунки усталених режимів, аналізувати втрати напруги, потоки потужності, струми короткого замикання та оцінювати роботу мережі за різних сценаріїв навантаження і генерації. Доведено доцільність використання

даного програмного середовища як ефективного інструменту для інженерних розрахунків і прийняття проєктних рішень.

В розділі 3 «Розробка моделі інтеграції ВДЕ у середовищі SICAD» розроблено модель розподільчої мережі 10 кВ у середовищі SICAD з урахуванням реальних технічних параметрів елементів мережі та приєднання сонячної електростанції. Побудовано топологію мережі, реалізовано схему приєднання СЕС та виконано моделювання режимів роботи для характерних експлуатаційних станів, зокрема:

- ✓ літнього максимуму генерації сонячної електростанції;
- ✓ зимового максимуму електроспоживання;
- ✓ аналізу рівнів напруги по трасах;
- ✓ оцінки навантаження ліній та трансформаторів;
- ✓ аналізу струмів короткого замикання.

Результати розрахунків показали, що інтеграція сонячної електростанції за обраною схемою приєднання не призводить до перевищення допустимих рівнів напруги в мережі 10 кВ, а також сприяє вирівнюванню напруги на віддалених ділянках ліній. Виявлено зменшення навантаження на джерело живлення у години максимальної генерації СЕС та зниження втрат електроенергії у розподільчій мережі.

Аналіз струмів короткого замикання засвідчив, що приєднання СЕС не створює критичного зростання аварійних струмів і не потребує заміни основного комутаційного обладнання за умови дотримання вимог чинних нормативних документів. Отримані результати підтверджують технічну можливість та доцільність інтеграції сонячної генерації у розподільчі мережі середньої напруги.

В цілому виконана магістерська робота має практичне значення, оскільки запропонований підхід до моделювання та аналізу режимів роботи мережі може бути використаний:

- ✓ при проєктуванні нових сонячних електростанцій;
- ✓ під час реконструкції існуючих розподільчих мереж;

- ✓ для оцінки впливу ВДЕ на якість та надійність електропостачання;
- ✓ при обґрунтуванні технічних умов приєднання об’єктів відновлюваної енергетики.

Результати дослідження відповідають сучасним вимогам енергетичного сектору та можуть бути використані в подальших наукових і прикладних роботах, спрямованих на розвиток розподіленої генерації та підвищення енергоефективності електричних мереж.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. IRENA - Renewable Energy Statistics / Renewable Capacity Statistics (2024–2025). irena.org+1

2. IEA - аналітичні матеріали щодо стану енергетики України та світових трендів (country analysis, Renewables reports). IEA+1

3. Energy Community / Ukraine Energy Market Observatory - квартальні/регіональні звіти щодо енергоринку України (2024–2025). energy-community.org

4. Solar Energy Association of Ukraine / галузеві повідомлення щодо зростання PV у 2024 році (оцінка +800–850 МВт).

5. ДБН В.2.5-23:2010. Проектування електрообладнання об’єктів цивільного призначення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – Чинний.

6. ДБН В.2.5-27:2006.

7. Інженерне обладнання будинків і споруд. Електропостачання. – Київ: Держбуд України, 2006. – Чинний.

8. ДБН В.2.2-3:2018. Будинки і споруди. Заклади освіти. Основні положення (у частині вимог до електропостачання). – Київ : Мінрегіон України, 2018. – Чинний.

9. ДБН В.1.2-14:2018. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. – Київ: Мінрегіон України, 2018. – Чинний.

10. ДБН В.2.5-74:2013. Енергозбереження. – Київ: Мінрегіон України, 2013. – Чинний.

11. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва (у частині електроустановок). – Київ: Мінрегіон України, 2016. – Чинний.

12. ДБН А.2.2-3:2014. Склад та зміст проектної документації на будівництво. – Київ: Мінрегіон України, 2014. – Чинний.

13. Ackermann T. Wind Power in Power Systems. – 2nd ed. – Chichester: John Wiley & Sons, 2012. – 1070 p.

14. Guzman-Henao J., Franco J. F., Rider M. J. Optimal integration of photovoltaic systems into distribution networks // Energies. – 2023. – Vol. 16, No. 4. – P. 1–18.

15. Rajendran G., Kasinathan P., Kaliannan P. A comprehensive review of solar photovoltaic integration into power systems // Energies. – 2025. – Vol. 18, No. 2. – P. 1–25.

16. Chen S., Zhang Y., Li Q. Integration of distributed photovoltaic systems into smart grids: challenges and solutions // Renewable Energy. – 2024. – Vol. 221. – P. 115–128.

17. Belbachir N., Zellagui M., Settoul S. Optimal integration of photovoltaic distributed generation and battery energy storage system in distribution networks // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – Vol. 125. – P. 1–11.

18. Worku M. Y., Abido M. A. Recent advances in energy storage systems for grid integration of renewable energy sources // Energies. – 2022. – Vol. 15, No. 4. – P. 1–20.

19. Gandhi O., Rodríguez-Gallegos C. D., Sengupta M. Levelised cost of photovoltaic integration into distribution networks // Solar Energy. – 2022. – Vol. 234. – P. 350–361.

20. International Energy Agency. Policy options to accelerate distributed solar PV in Ukraine. – Paris : IEA, 2023. – 54 p.

21. IEEE. IEEE 14-Bus Test System: Power System Test Case Archive. – IEEE Power & Energy Society, 2020.

22. EN 50549-2:2019. Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks – Part 2: Connection to a MV distribution network. – Brussels : CENELEC, 2019.

23. EN 50549-1:2019. Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks – Part 1: Connection to a LV distribution network. – Brussels : CENELEC, 2019.

24. Кодекс систем розподілу: затв. постановою НКРЕКП № 310 від 14.03.2018 р. – Київ: НКРЕКП, 2018.

25. Правила приєднання електроустановок до електричних мереж : затв. постановою НКРЕКП. – Київ: НКРЕКП, 2021.

26. Siemens AG. SICAD Electrical User Manual. – Munich : Siemens, 2022. – 312 p.

27. Stetz T., Marten F., Braun M. Improved low voltage grid-integration of photovoltaic systems in Germany // IEEE Transactions on Sustainable Energy. – 2013. – Vol. 4, No. 2. – P. 534–542.