

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи бакалавра
за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

«СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МАЛОГО ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА»

Виконав:

здобувач вищої освіти групи ЗЕЕМ-22

Володимир ЛАЗЕБНИЙ

Керівник випускної роботи _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Нормоконтролер _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Декан ЕТФ _____ к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ

Гарант освітньої програми _____ к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО

Кривий Ріг

2026 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЛАЗЕБНИЙ Володимир Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Розробка системи моніторингу електроспоживання навчального корпусу університету, для створення енергетичного паспорту установи»

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2026 р.

3. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: є розробка цифрового двійника системи електропостачання малого промислового підприємства з використанням середовища MATLAB/Simulink та Simscape Electrical. Для досягнення мети необхідно проаналізувати концепцію цифрових двійників, виконати розрахунок електричних навантажень, вибір основного обладнання, побудувати імітаційну модель СЕП та дослідити режими її роботи.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)
У пояснювальній записці необхідно розглянути теоретичні засади цифрових двійників, особливості систем електропостачання малих промислових підприємств та програмні засоби їх моделювання. Також потрібно виконати характеристику об'єкта, розрахунок навантажень, вибір трансформатора, кабелів і захисту, розробити модель у Simscape Electrical та проаналізувати результати моделювання й можливі сценарії модернізації.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графічний матеріал повинен містити структурну схему системи електропостачання малого промислового підприємства, однолінійну схему СЕП, схему заміщення для розрахунку струмів короткого замикання та архітектуру цифрового двійника. Також доцільно подати схему моделі в Simscape Electrical, графіки режимів роботи системи, графіки навантаження, втрат, показників якості електроенергії та результати порівняння сценаріїв модернізації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали консультанта	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
II	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		
III	Ігор ПЕРЕСУНЬКО		

7. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Аналіз літературних джерел щодо цифрових двійників та систем електропостачання промислових підприємств	12 травня 2026 р.
2	Огляд програмних засобів моделювання та вибір середовища MATLAB/Simulink / Simscape Electrical	15 травня 2026 р.
3	Характеристика об'єкта дослідження та формування вихідних даних для розрахунку СЕП	18 травня 2026 р.
4	Розрахунок електричних навантажень, вибір трансформатора, кабелів, апаратів захисту та компенсації реактивної потужності	22 травня 2026 р.
5	Побудова математичної та імітаційної моделі системи електропостачання в Simscape Electrical	25 травня 2026 р.
6	Дослідження нормальних, пікових, аварійних режимів, аналіз якості електроенергії та втрат	29 травня 2026 р.
7	Розробка сценаріїв модернізації СЕП та оцінка ефективності запропонованих рішень	02 червня 2026 р.
8	Оформлення пояснювальної записки, графічного матеріалу та підготовка роботи до перевірки	05 червня 2026 р.
9	Дата закінчення роботи, перевірка на антиплагіат	08 червня 2026 р.

Дата видачі завдання 12 травня 2026 р.

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Володимир ЛАЗЕБНИЙ

(Ім'я Прізвище)

Керівник роботи

(підпис)

Ігор ПЕРЕСУНЬКО

(Ім'я Прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи на тему «Розробка системи моніторингу електроспоживання навчального корпусу університету, для створення енергетичного паспорту установи»: 60 с., 19 рис., 33 літературних джерел.

ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6

Досліджуваний об'єкт — система електропостачання малого промислового підприємства, зокрема умовного механічного цеху, що живиться від мережі 10 кВ через трансформаторну підстанцію 10/0,4 кВ. У роботі досліджуються електричні навантаження, режими роботи, якість електроенергії та можливість створення цифрового двійника цієї системи.

У першому розділі розглянуто теоретичні засади цифрових двійників, їх архітектуру, рівні зрілості та особливості застосування в системах електропостачання. Також виконано огляд програмних засобів моделювання та обґрунтовано вибір MATLAB/Simulink і Simscape Electrical для подальшого дослідження.

У другому розділі наведено характеристику об'єкта дослідження та виконано основні електротехнічні розрахунки системи електропостачання. Розраховано електричні навантаження, вибрано силовий трансформатор, кабельні лінії, апарати захисту та засоби компенсації реактивної потужності.

У третьому розділі розроблено цифровий двійник системи електропостачання в середовищі Simscape Electrical та проведено аналіз результатів моделювання. Досліджено нормальні, пікові й аварійні режими роботи, показники якості електроенергії, втрати потужності та можливості прогнозування навантаження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, SIMSCAPE ELECTRICAL, ЕЛЕКТРИЧНЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Лазебний В.				Зміст	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірив	Пєресунько І						6	1
Н. Контр.	Пєресунько І					КНУ гр. ЗЕЕМ-22		
Затвердж.	Пєресунько І							

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ТА СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ	9
1.1 Поняття цифрового двійника та рівні його зрілості	9
1.2 Архітектура цифрового двійника	10
1.3 Особливості систем електропостачання малих промислових підприємств	12
1.4 Огляд програмних засобів моделювання систем електропостачання.....	13
1.5 Показники якості електроенергії та засоби їх контролю.....	14
1.6 Сфери застосування цифрового двійника в електропостачанні та постановка задачі дослідження	15
Висновки до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА РОЗРОБКА МОДЕЛІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	18
2.1 Загальна характеристика об'єкта та його системи електропостачання.....	18
2.2 Розрахунок електричних навантажень.....	19
2.3 Вибір силового трансформатора.....	21
2.4 Розрахунок струмів короткого замикання	22
2.5 Вибір кабелів та апаратів захисту.....	23
2.6 Компенсація реактивної потужності	25
2.7 Формування математичної моделі системи електропостачання	25
Висновки до розділу 2	26
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ	28
3.1 Архітектура розробленого цифрового двійника	28
3.2 Реалізація моделі в середовищі Simscape Electrical	30
3.3 Організація збору та обробки даних.....	32
3.4 Дослідження режимів роботи системи.....	34
3.5 Аналіз якості електроенергії та втрат у моделі	38
3.6 Прогнозування навантаження та функції предиктивного обслуговування	40
3.7 Візуалізація стану системи та оцінка ефективності рішення.....	42
Висновки до розділу 3	45
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СЦЕНАРІЇВ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЦЕХУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА	47
4.1 Постановка задачі дослідження сценаріїв модернізації	47
4.2 Сценарій 1 — інтеграція дахової сонячної електростанції	48
4.3 Сценарій 2 — встановлення системи накопичення електроенергії.....	50
4.4 Сценарій 3 — впровадження пристрою плавного пуску компресора.....	52
4.5 Порівняльна оцінка сценаріїв модернізації	53
Висновки до розділу 4	55
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	57

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Зміст		
Розробив	Лазебний В.						
Перевірив	Пересунько І						
Н. Контр.	Пересунько І						
Затвердж.	Пересунько І						
					Літ.	Арк.	Акрушів
						6	1
					КНУ гр. ЗЕЕМ-22		

ВСТУП

Сучасний етап розвитку електроенергетики характеризується глибокою цифровою трансформацією, яка охоплює всі ланки виробництва, передавання, розподілу та споживання електричної енергії. У межах концепцій «Industry 4.0» та інтелектуальних електричних мереж (Smart Grid) поступово формується новий клас інженерних рішень, що поєднують фізичні об'єкти з їхніми віртуальними відображеннями [3]. Одним із ключових інструментів такої інтеграції є цифровий двійник (digital twin) — динамічна віртуальна модель фізичної системи, яка безперервно синхронізується з нею за рахунок потоків вимірюваних даних [1, 2].

Для промислових підприємств система електропостачання (СЕП) є критично важливою інфраструктурою, від надійності та якості роботи якої безпосередньо залежать безперебійність технологічного процесу, енергоефективність та собівартість продукції. Малі промислові підприємства, попри відносно невелику встановлену потужність, мають розгалужену структуру споживачів з різнотипними режимами роботи, що ускладнює оперативний контроль режимів та своєчасне виявлення несправностей. Створення цифрового двійника СЕП дає змогу в режимі, наближеному до реального часу, відстежувати стан мережі, моделювати аварійні та перевантажувальні режими, прогнозувати навантаження та підтримувати показники якості електроенергії в межах, унормованих чинними стандартами [4, 16].

Актуальність теми посилюється завданнями відновлення та підвищення стійкості енергетичної системи України, а також потребою промислових підприємств у ресурсоощадних інструментах проєктування, експлуатації та предиктивного обслуговування електрообладнання без зупинки виробництва.

Мета роботи — розробка цифрового двійника системи електропостачання малого промислового підприємства на базі програмного середовища

MATLAB/Simulink (Simscape Electrical) для забезпечення моделювання сталих та					ЕТФ КНУ ІВ.Р.11.26.2198-6		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Лазебний В.			Вступ		
Перевірів		Пересунько І					
Н. Контр.		Пересунько І					
Затвердж.		Пересунько І					
					Літ.	Арк.	Акрушів
						7	1
					КНУ гр. ЗЕЕМ-22		

перехідних режимів, аналіз показників якості електроенергії та підтримку прийняття рішень щодо експлуатації СЕП.

Для досягнення мети поставлено такі задачі:

- проаналізувати концепцію цифрових двійників, їхню архітектуру та сфери застосування в електроенергетиці;
- виконати огляд та обґрунтувати вибір програмних засобів моделювання систем електропостачання;
- розробити умовну систему електропостачання малого промислового підприємства та виконати розрахунки електричних навантажень, струмів короткого замикання й вибір основного обладнання;
- побудувати імітаційну модель СЕП у середовищі Simscape Electrical як основу цифрового двійника;
- дослідити нормальні, пікові та аварійні режими роботи системи, оцінити показники якості електроенергії та втрати;
- реалізувати функції прогнозування навантаження та візуалізації стану системи й оцінити ефективність запропонованого рішення.

Об'єкт дослідження — система електропостачання малого промислового підприємства.

Предмет дослідження — методи та засоби створення цифрового двійника системи електропостачання.

Методи дослідження — системний аналіз науково-технічної літератури; інженерні методики розрахунку електричних навантажень і струмів короткого замикання; теорія електричних кіл; імітаційне (комп'ютерне) моделювання в середовищі MATLAB/Simulink; методи аналізу часових рядів для прогнозування навантаження.

Практичне значення. Розроблений цифровий двійник може бути використаний як навчально-дослідний та інженерний інструмент для аналізу режимів роботи СЕП малих підприємств, оцінювання якості електроенергії,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

опрацювання сценаріїв модернізації мережі та впровадження елементів предиктивного обслуговування.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. У першому розділі розглянуто теоретичні засади цифрових двійників і систем електропостачання; у другому — виконано характеристику об'єкта та розроблено модель; у третьому — реалізовано цифровий двійник у середовищі Simulink та проаналізовано результати.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ КОНЦЕПЦІЇ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ ТА СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

1.1 Поняття цифрового двійника та рівні його зрілості

Поняття цифрового двійника вперше було сформульовано М. Грівсом у 2002–2003 роках у межах курсу з управління життєвим циклом виробу (PLM) та детально розкрито у його білій книзі 2014 року [1]. Згідно з класичним визначенням, цифровий двійник — це віртуальне відображення фізичного об'єкта, що містить три взаємопов'язані складники: фізичний об'єкт у реальному просторі, його віртуальну модель у віртуальному просторі та двонаправлений канал обміну даними й інформацією між ними [1, 5]. Саме наявність автоматизованого зворотного зв'язку відрізняє цифровий двійник від звичайної комп'ютерної моделі.



Рисунок 1.1 — Концептуальна (трикомпонентна) модель цифрового двійника

У науковій літературі прийнято розрізняти рівні зрілості цифрового відображення залежно від ступеня автоматизації обміну даними [6]. Цифрова модель (digital model) передбачає лише ручне перенесення даних між фізичним об'єктом та його віртуальним відображенням. Цифрова тінь (digital shadow) характеризується автоматичним односпрямованим потоком даних від фізичного

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Лазебний В.				Розділ		Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І								
Н. Контр.	Пересунько І						КНУ гр. ЗЕЕМ-22		
Затвердж.	Пересунько І								

об'єкта до моделі. Власне цифровий двійник (digital twin) реалізує повністю автоматизований двонаправлений обмін, за якого зміни стану фізичного об'єкта відображаються в моделі, а результати аналізу та керівні впливи передаються у зворотному напрямі [6].

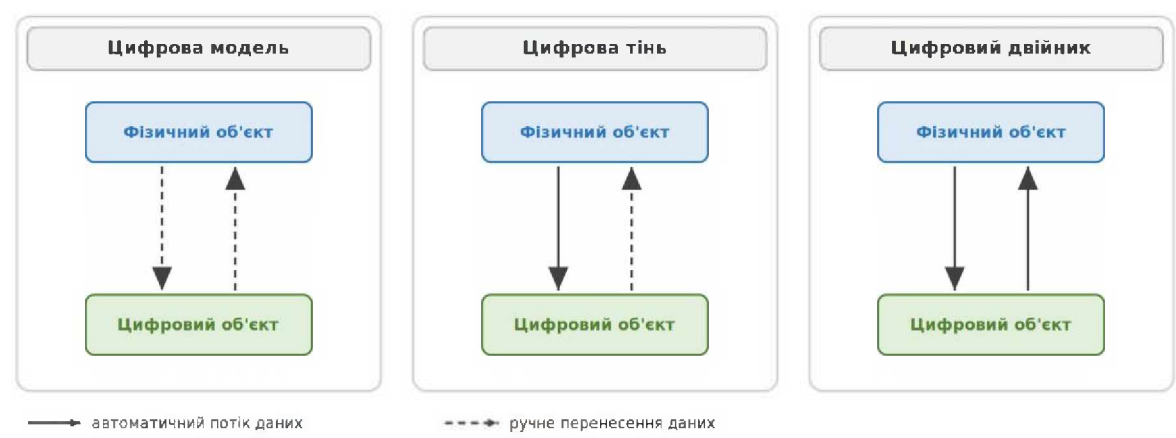


Рисунок 1.2 — Рівні зрілості цифрового відображення: модель, тінь, двійник

Стрімке зростання інтересу до технології зумовлене розвитком засобів збору даних, обчислювальних потужностей та методів імітаційного моделювання [2, 8]. У сучасному трактуванні цифровий двійник розглядається не як статична копія, а як функціональна система, що супроводжує об'єкт упродовж усього життєвого циклу — від проєктування й експлуатації до модернізації та виведення з експлуатації [8].

1.2 Архітектура цифрового двійника

Узагальнена архітектура цифрового двійника має багаторівневу структуру, що забезпечує перетворення первинних вимірювань у керівні рішення [2, 9]. У роботі виокремлено п'ять функціональних рівнів: фізичний рівень, рівень збору даних, комунікаційний рівень, рівень моделей та прикладний рівень.

Фізичний рівень охоплює власне обладнання системи електропостачання — трансформатори, кабельні та повітряні лінії, комутаційні апарати, пристрої

захисту й електроприймачі. Рівень збору даних утворюють вимірювальні перетворювачі, інтелектуальні лічильники та давачі струму, напруги, температури тощо, які формують потік телеметрії [9]. Комунікаційний рівень відповідає за передавання даних із застосуванням промислових протоколів; для систем автоматизації підстанцій базовим є стандарт IEC 61850 [10], тоді як для інтеграції з програмними платформами поширені протоколи OPC UA [11] та MQTT [12].

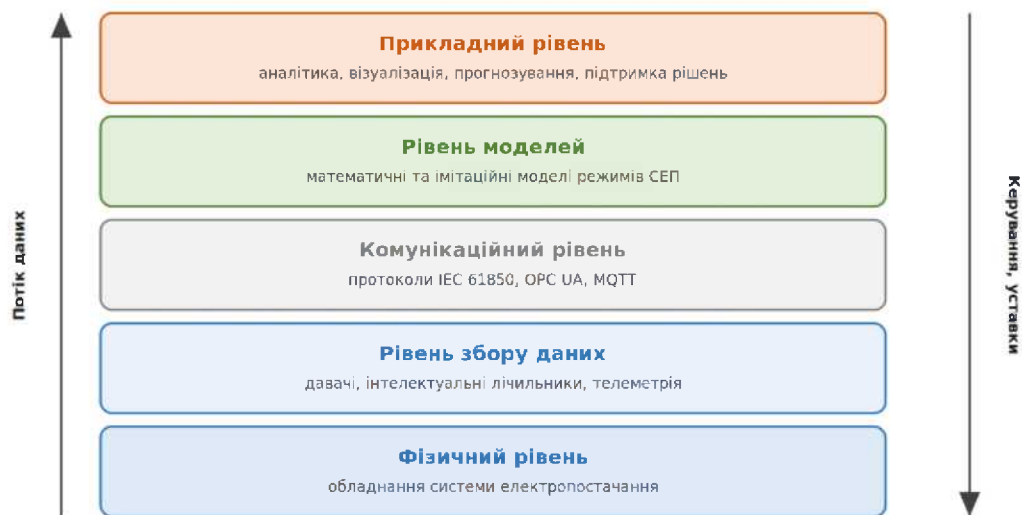


Рисунок 1.3 — Узагальнена багаторівнева архітектура цифрового двійника СЕП

Рівень моделей є ядром цифрового двійника й містить математичні та імітаційні моделі, що описують поведінку системи у сталих і перехідних режимах. Прикладний рівень реалізує сервіси аналітики, візуалізації, прогнозування та підтримки прийняття рішень, надаючи користувачеві агрегований стан системи [9, 13]. Така багаторівнева організація забезпечує масштабованість рішення та можливість поетапного впровадження окремих функцій цифрового двійника.

1.3 Особливості систем електропостачання малих промислових підприємств

Система електропостачання малого промислового підприємства зазвичай отримує живлення від розподільної мережі середньої напруги (6 або 10 кВ) через одну трансформаторну підстанцію, де напруга знижується до рівня 0,4 кВ (380/220 В) для розподілу між споживачами [4]. Розподіл електроенергії на стороні низької напруги здійснюється через головний розподільний щит та групові щити, від яких живляться окремі електроприймачі.

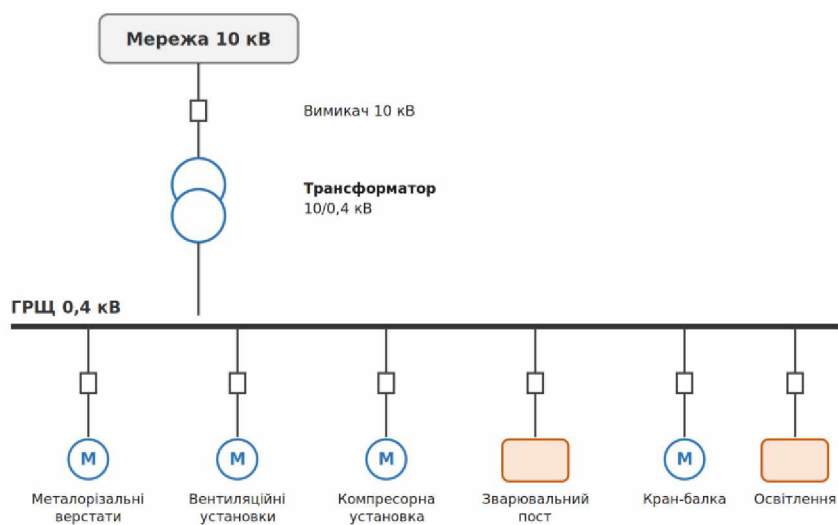


Рисунок 1.4 — Типова структурна схема електропостачання малого промислового підприємства

Характерною особливістю таких підприємств є наявність різноманітних електроприймачів: асинхронних двигунів технологічного обладнання, освітлювальних і нагрівальних установок, зварювального обладнання повторно-короткочасного режиму, а також нелінійних навантажень із напівпровідниковими перетворювачами [14]. Така різноманітність зумовлює нерівномірність графіка навантаження, наявність пускових струмів і вищих гармонік, що ускладнює забезпечення нормованих показників якості електроенергії [15].

Проектування та експлуатація СЕП регламентуються комплексом нормативних документів, зокрема Правилами улаштування електроустановок та галузевими настановами з проектування систем електропостачання [4, 14]. Зазначені особливості формують вимоги до цифрового двійника: модель має коректно відтворювати як сталі режими (для розрахунку навантажень і втрат), так і перехідні процеси (пуск двигунів, коротке замикання).

1.4 Огляд програмних засобів моделювання систем електропостачання

Для побудови цифрового двійника СЕП застосовують спеціалізовані програмні засоби аналізу електроенергетичних систем. Серед комерційних пакетів найпоширенішими є ETAP та DIgSILENT PowerFactory, які забезпечують повний цикл розрахунків режимів, струмів короткого замикання та координації захистів [24, 25]. До універсальних інженерних середовищ належить MATLAB/Simulink із бібліотекою Simscape Electrical, що дає змогу імітаційно моделювати електричні кола та перехідні процеси [18]. Альтернативою з відкритим кодом виступають бібліотеки мовою Python — pandapower [19] та PyPSA [20].

Порівняння основних засобів за критеріями функціональності, доступності та придатності для задач цифрового двійника наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 — Порівняння програмних засобів моделювання СЕП

Засіб	Тип ліцензії	Основні можливості	Придатність для ЦД
ETAP	Комерційна	Режими, КЗ, селективність захистів	Висока, але висока вартість
DIgSILENT PowerFactory	Комерційна	Аналіз режимів і динаміки ЕЕС	Висока, фахове ПЗ

Засіб	Тип ліцензії	Основні можливості	Придатність для ЦД
MATLAB/Simulink (Simscape)	Комерційна/академічна	Імітація кіл, перехідні процеси, аналітика	Висока, гнучка інтеграція
pandapower / PyPSA	Відкрита	Розрахунок поточкорозподілу, оптимізація	Середня, потребує програмування

Для виконання цієї роботи обрано середовище MATLAB/Simulink (Simscape Electrical). Вибір обґрунтовано поєднанням можливостей фізичного імітаційного моделювання електричних кіл, розвинених засобів аналізу сигналів і даних, наявності інструментів візуалізації та доступністю академічної ліцензії [18]. Крім того, середовище забезпечує гнучке поєднання моделі режимів із підсистемами обробки даних, що відповідає багаторівневій архітектурі цифрового двійника, розглянутій у підрозділі 1.2.

1.5 Показники якості електроенергії та засоби їх контролю

Якість електроенергії є однією з ключових характеристик роботи СЕП, що безпосередньо впливає на надійність функціонування електроприймачів. В Україні нормовані значення показників якості напруги встановлено стандартом ДСТУ EN 50160:2023 [16], а методи їх вимірювання — стандартом ДСТУ ІЕС 61000-4-30 [17]. До основних показників належать відхилення та коливання напруги, несиметрія напруг, відхилення частоти, а також рівень вищих гармонік.

Відносне відхилення напруги визначають як відношення різниці між фактичним і номінальним значеннями напруги до номінального значення:

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \% \quad (1.1)$$

де U — фактичне середньоквадратичне значення напруги, В; $U_{\text{ном}}$ — номінальне значення напруги, В.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ступінь спотворення форми кривої напруги нелінійними навантаженнями характеризують сумарним коефіцієнтом гармонічних спотворень, який обчислюють за формулою [15, 16]:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2}}{U_1} \cdot 100 \% \quad (1.2)$$

де U_n — діюче значення напруги гармоніки порядку n ; U_1 — діюче значення напруги основної гармоніки; N — найвищий урахований порядок гармоніки.

Контроль наведених показників у складі цифрового двійника забезпечує оперативне виявлення відхилень від нормованих значень та обґрунтування заходів із підвищення якості електроенергії, зокрема застосування пристроїв компенсації реактивної потужності та фільтрації вищих гармонік [15, 17].

1.6 Сфери застосування цифрового двійника в електропостачанні та постановка задачі дослідження

Цифрові двійники знаходять застосування в широкому колі задач експлуатації систем електропостачання. До основних напрямів належать моніторинг режимів роботи в режимі, наближеному до реального часу; імітація аварійних та перевантажувальних режимів без впливу на діюче обладнання; прогнозування електричного навантаження; оцінювання показників якості електроенергії, а також предиктивне обслуговування обладнання на основі аналізу даних експлуатації [2, 13, 21].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

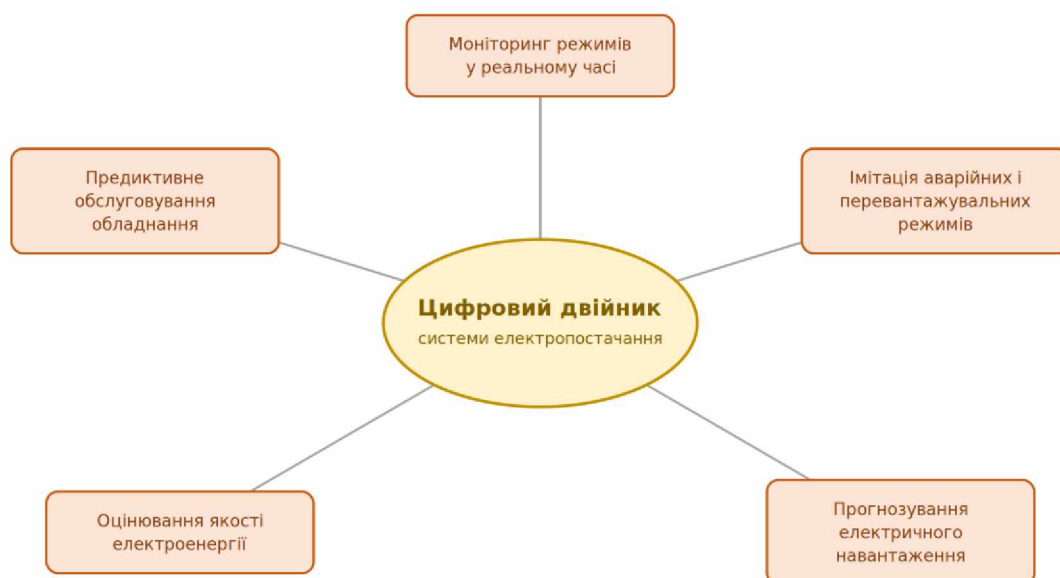


Рисунок 1.5 — Основні сфери застосування цифрового двійника в системах електропостачання

Аналіз літературних джерел свідчить, що попри значну кількість публікацій із загальної теорії цифрових двійників, питання їх практичної реалізації для систем електропостачання саме малих промислових підприємств із застосуванням доступних інженерних засобів висвітлено недостатньо. Більшість досліджень орієнтовано або на великі енергосистеми, або на окреме обладнання, тоді як комплексні рішення рівня підприємства потребують подальшого опрацювання [13, 21].

З огляду на викладене, у роботі поставлено задачу розроблення цифрового двійника системи електропостачання умовного малого промислового підприємства на базі середовища MATLAB/Simulink. Розв'язання задачі передбачає характеристику об'єкта та виконання електричних розрахунків (розділ 2), а також побудову імітаційної моделі, дослідження режимів роботи й реалізацію функцій аналітики та візуалізації (розділ 3). Оформлення бібліографічних посилань у роботі виконано згідно з ДСТУ 8302:2015 [22].

Висновки до розділу 1

1. Проаналізовано концепцію цифрового двійника як віртуального відображення фізичного об'єкта з двонаправленим обміном даними; розмежовано рівні зрілості — цифрову модель, цифрову тінь і власне цифровий двійник.

2. Розглянуто багаторівневу архітектуру цифрового двійника та визначено типову структуру й особливості систем електропостачання малих промислових підприємств, що формують вимоги до моделі.

3. Виконано огляд програмних засобів моделювання та обґрунтовано вибір середовища MATLAB/Simulink (Simscape Electrical) як основи цифрового двійника. Окреслено основні показники якості електроенергії та сфери застосування технології, що дало змогу сформулювати задачу подальшого дослідження.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА РОЗРОБКА МОДЕЛІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1 Загальна характеристика об'єкта та його системи електропостачання

Об'єктом дослідження є умовний механічний цех малого машинобудівного підприємства. Цех отримує живлення від розподільної мережі напругою 10 кВ через окрему цехову трансформаторну підстанцію, на якій напруга знижується до 0,4 кВ (380/220 В) і далі розподіляється між електроприймачами через головний розподільний щит (ГРЩ) та групові щити [4]. Загальна структурна схема електропостачання цеху відповідає типовій схемі, наведеній на рисунку 1.4.

До складу електрообладнання цеху входять металорізальні верстати, вентиляційні установки, компресорна установка, зварювальні пости, кран-балка та освітлювальна установка. Більшість електроприймачів належить до споживачів третьої категорії за надійністю електропостачання, що допускає живлення від одного джерела; окремі відповідальні споживачі (вентиляція, освітлення) можуть бути віднесені до другої категорії [4, 14]. Розташування основного електрообладнання в межах цеху наведено на рисунку 2.1.

Особливістю розглянутого об'єкта є наявність електроприймачів із суттєво різними режимами роботи: тривалим (вентилятори, компресор), повторно-короткочасним (кран-балка, зварювання) та різкозмінним (металорізальні верстати). Це зумовлює нерівномірність графіка навантаження та потребує коректного врахування під час розрахунку електричних навантажень, що є вихідним етапом проектування СЕП [4].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Лазебний В.				Розділ	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів	Пересунько І							
Н. Контр.	Пересунько І					КНУ гр. ЗЕЕМ-22		
Затвердж.	Пересунько І							



Рисунок 2.1 — План розташування електрообладнання механічного цеху

2.2 Розрахунок електричних навантажень

Розрахунок електричних навантажень силових електроприймачів виконано методом упорядкованих діаграм (методом коефіцієнта максимуму), який є основним для проектування СЕП промислових підприємств [4, 26]. Спочатку для кожної групи однотипних електроприймачів визначають середнє активне навантаження за найбільш завантажену зміну:

$$P_{зм} = K_{в} \cdot P_{н} \quad (2.1)$$

де $K_{в}$ — груповий коефіцієнт використання; $P_{н}$ — сумарна номінальна (встановлена) потужність групи, кВт.

Відповідне середнє реактивне навантаження за зміну

$$Q_{зм} = P_{зм} \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (2.2)$$

де $\operatorname{tg} \varphi$ — відповідає коефіцієнту потужності $\cos \varphi$ групи електроприймачів.

Номінальну потужність електроприймачів повторно-короткочасного режиму (зварювальних постів та кран-балки) попередньо приведено до

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тривалого режиму (ПВ = 100 %). Вихідні дані та результати розрахунку за формулами (2.1) і (2.2) наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 — Розрахунок електричних навантажень механічного цеху

Найменування групи	n	P _н , кВт	K _в	cos φ	tg φ	P _{зм} , кВт	Q _{зм} , квар
Металорізальні верстати	8	80,0	0,16	0,50	1,73	12,80	22,17
Вентиляційні установки	3	22,5	0,65	0,80	0,75	14,62	10,97
Компресорна установка	1	30,0	0,70	0,80	0,75	21,00	15,75
Зварювальні пости (прив.)	2	12,6	0,35	0,40	2,29	4,41	10,10
Кран-балка (прив.)	1	5,0	0,10	0,50	1,73	0,50	0,87
Разом	15	150,1	—	—	—	53,33	59,86

Груповий коефіцієнт використання за цехом

$$K_{в.гр} = \frac{\Sigma P_{зм}}{\Sigma P_{н}} = \frac{53,33}{150,1} = 0,355. \quad (2.3)$$

Ефективну (приведену) кількість електроприймачів визначають за виразом

$$n_e = \frac{(\Sigma P_{н})^2}{\Sigma P_{н}^2} = \frac{150,1^2}{1973,1} = 11,4 \approx 11. \quad (2.4)$$

За довідковими таблицями для $n_e = 11$ та $K_{в.гр} \approx 0,35$ коефіцієнт максимуму активного навантаження становить $K_m = 1,40$ [4, 26]. Розрахункове активне навантаження силових електроприймачів

$$P_{р.с} = K_m \cdot \Sigma P_{зм} = 1,40 \cdot 53,33 = 74,67 \text{ кВт}. \quad (2.5)$$

Оскільки $n_e > 10$, розрахункове реактивне навантаження приймають рівним сумарному середньому: $Q_{р.с} = \Sigma Q_{зм} = 59,86$ квар. Освітлювальне навантаження визначено окремо методом коефіцієнта попиту:

$$P_{р.осв} = K_{п} \cdot P_{н.осв} = 0,85 \cdot 10,0 = 8,50 \text{ кВт}, \quad (2.6)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

що за $\cos \varphi = 0,92$ відповідає $Q_{p.осв} = 3,62$ квар. Сумарні розрахункові навантаження на шинах 0,4 кВ становлять $P_p = 83,17$ кВт та $Q_p = 63,48$ квар. Повну потужність визначають за формулою

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} = \sqrt{83,17^2 + 63,48^2} = 104,6 \text{ кВА.} \quad (2.7)$$

Розрахунковий струм на стороні низької напруги

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{104,6 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380} = 159,0 \text{ А,} \quad (2.8)$$

а коефіцієнт потужності до компенсації — $\cos \varphi = P_p / S_p = 0,795$ ($\tan \varphi_1 = 0,763$). Отримане значення коефіцієнта потужності є нижчим за нормативне, що обґрунтовує необхідність компенсації реактивної потужності (підрозділ 2.6).

2.3 Вибір силового трансформатора

Потужність цехового трансформатора обирають за розрахунковим навантаженням з урахуванням рекомендованого коефіцієнта завантаження. Для однострансформаторної підстанції з переважанням споживачів третьої категорії економічно доцільний коефіцієнт завантаження становить $\beta \approx 0,65 \dots 0,75$ [4, 14]. Номінальну потужність трансформатора перевіряють за умовою

$$\beta = \frac{S_p}{S_{\text{ном.т}}} \leq 1, \quad (2.9)$$

За розрахунковим навантаженням $S_p = 104,6$ кВА обрано трансформатор типу ТМ-160/10 номінальною потужністю 160 кВА. Коефіцієнт завантаження $\beta = 104,6 / 160 = 0,654$, що відповідає рекомендованому діапазону та забезпечує резерв потужності на перспективу. Технічні дані обраного трансформатора наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 — Технічні дані трансформатора ТМ-160/10

Параметр	Значення
Номінальна потужність $S_{\text{ном}}$, кВА	160

Параметр	Значення
Номинальна напруга ВН / НН, кВ	10 / 0,4
Напруга короткого замикання ук, %	4,5
Втрати короткого замикання $\Delta P_{кз}$, кВт	2,65
Втрати холостого ходу $\Delta P_{хх}$, кВт	0,51
Струм холостого ходу $I_{хх}$, %	2,4
Схема і група з'єднання	Y/Y _Н – 0

2.4 Розрахунок струмів короткого замикання

Розрахунок струмів короткого замикання (КЗ) необхідний для вибору та перевірки комутаційних апаратів і провідників на електродинамічну та термічну стійкість [27]. Розрахунок виконано для трифазного КЗ на шинах 0,4 кВ ГРЩ (точка К1) з використанням схеми заміщення, наведеної на рисунку 2.2. Опори елементів приведені до ступеня напруги 0,4 кВ і виражено в міліомах.

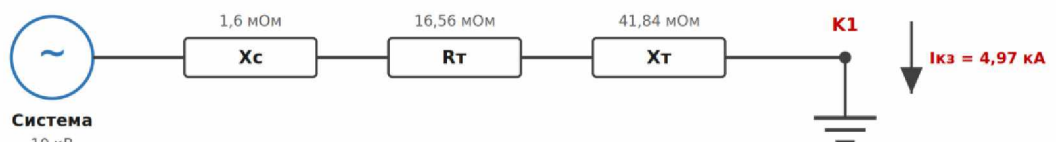


Рисунок 2.2 — Схема заміщення для розрахунку струмів короткого замикання

Індуктивний опір живильної системи за потужністю КЗ $S_{кз} = 100$ МВА

$$X_c = \frac{U_{cp}^2}{S_{кз}} = \frac{400^2}{100 \cdot 10^6} = 1,6 \text{ мОм.} \quad (2.10)$$

Повний опір трансформатора та його активна складова

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Z_T = \frac{u_K \cdot U_{HH}^2}{100 \cdot S_{НОМ}} = 45,0 \text{ мОм}; \quad (2.11)$$

$$R_T = \frac{\Delta P_{КЗ} \cdot U_{HH}^2}{S_{НОМ}^2} = 16,56 \text{ мОм}. \quad (2.12)$$

Індуктивний опір трансформатора

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{45,0^2 - 16,56^2} = 41,84 \text{ мОм}. \quad (2.13)$$

Сумарні опори до точки К1 (з урахуванням $R_c \approx 0$) наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 — Параметри схеми заміщення (точка К1)

Елемент	R, мОм	X, мОм
Живильна система	≈ 0	1,60
Трансформатор ТМ-160/10	16,56	41,84
Сумарний опір до К1	16,56	43,44

Початкове діюче значення струму трифазного КЗ

$$I_{КЗ}^{(3)} = \frac{U_{ср}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 46,49 \cdot 10^{-3}} = 4,97 \text{ кА}. \quad (2.14)$$

За співвідношенням $X/R = 2,62$ ударний коефіцієнт $K_{уд} = 1,30$, тому ударний струм КЗ

$$i_{уд} = \sqrt{2} \cdot K_{уд} \cdot I_{КЗ} = \sqrt{2} \cdot 1,30 \cdot 4,97 = 9,15 \text{ кА}. \quad (2.15)$$

Потужність КЗ на шинах 0,4 кВ становить $S_{КЗ} = \sqrt{3} \cdot U_{ср} \cdot I_{КЗ} \approx 3,44 \text{ МВА}$.
Отримані значення використано для перевірки комутаційної та захисної апаратури в підрозділі 2.5.

2.5 Вибір кабелів та апаратів захисту

Живлення ГРЩ від трансформатора здійснюється кабельною лінією, переріз якої обирають за тривало допустимим струмом з умови $I_{доп} \geq I_p$ [14]. За

розрахунковим струмом $I_p = 159 \text{ А}$ обрано кабель марки АВБбШв-1 перерізом $3 \times 95 + 1 \times 50 \text{ мм}^2$, тривало допустимий струм якого $I_{доп} \approx 170 \text{ А}$ перевищує розрахунковий, тобто умову виконано.

На вводі ГРЩ встановлено автоматичний вимикач, номінальний струм розчіплювача якого обирають за умовою $I_{н.р} \geq I_p$. Прийнято автоматичний вимикач типу ВА88-37 з номінальним струмом 250 А та струмом розчіплювача 160 А. Гранична комутаційна здатність апарата (35 кА) значно перевищує розрахунковий струм КЗ на шинах 0,4 кВ (4,97 кА), отже умову стійкості до струмів КЗ виконано [14, 27]. Узгодження захисту з допустимим струмом кабелю забезпечується співвідношенням $I_{н.р} \leq I_{доп}$ ($160 \text{ А} \leq 170 \text{ А}$).

Аналогічно за розрахунковими струмами окремих груп обрано перерізи кабелів та автоматичні вимикачі відгалужень до груп електроприймачів. Розрахункова однолінійна схема СЕП з обраними апаратами захисту наведена на рисунку 2.3.

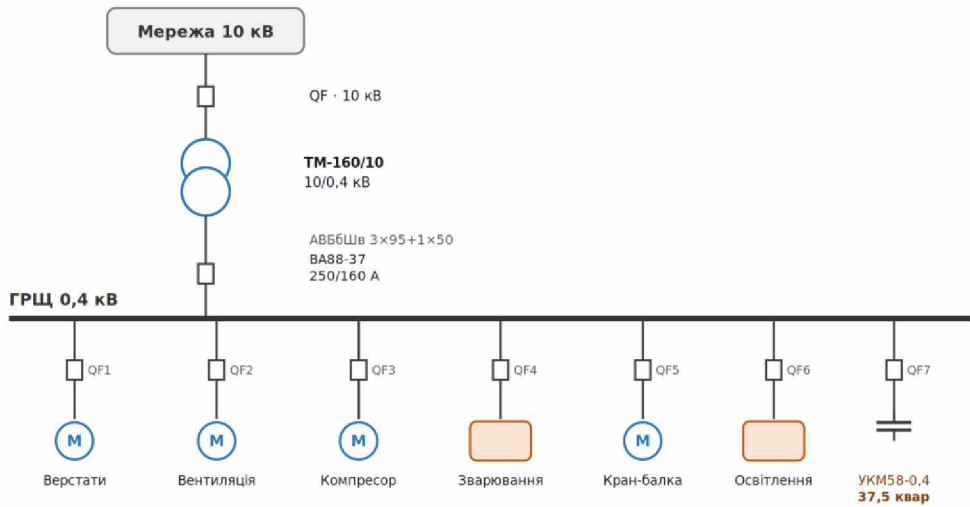


Рисунок 2.3 — Розрахункова однолінійна схема СЕП з апаратами захисту

2.6 Компенсація реактивної потужності

Для підвищення коефіцієнта потужності та зменшення завантаження трансформатора й живильних ліній передбачено компенсацію реактивної потужності за допомогою конденсаторної установки, що приєднується до шин 0,4 кВ ГРЩ [4, 15]. Необхідну потужність компенсувального пристрою визначають за виразом

$$Q_k = P_p (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = 83,17 (0,763 - 0,329) = 36,1 \text{ квар, (2.16)}$$

де $\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,763$ — тангенс кута до компенсації; $\operatorname{tg} \varphi_2 = 0,329$ — відповідає цільовому $\cos \varphi = 0,95$.

За розрахунковим значенням обрано стандартну автоматичну конденсаторну установку типу УКМ58-0,4-37,5 потужністю 37,5 квар. Після ввімкнення установки реактивне навантаження зменшується до $Q = 25,98$ квар, повна потужність — до $S = 87,1$ кВА, а коефіцієнт потужності зростає до $\cos \varphi = 0,955$, що відповідає нормативним вимогам. Коефіцієнт завантаження трансформатора при цьому знижується до $\beta = 0,545$, що створює додатковий резерв потужності.

2.7 Формування математичної моделі системи електропостачання

Розраховані параметри елементів СЕП є вихідними даними для побудови імітаційної моделі в середовищі Simscape Electrical, яка становить ядро цифрового двійника (розділ 3). Модель формується на основі схеми заміщення, у якій кожен елемент мережі подається відповідними активним і реактивним опорами, а режим визначається законами Кірхгофа для вузлів і контурів [18]. Для зручності аналізу параметри доцільно подавати у відносних одиницях (в.о.) відносно базисних величин.

За базисну потужність і напругу прийнято $S_b = 160$ кВА та $U_b = 400$ В; тоді базисний опір

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Z_6 = \frac{U_6^2}{S_6} = \frac{400^2}{160 \cdot 10^3} = 1,0 \text{ Ом.} \quad (2.17)$$

Параметри моделі, наведені у відносних одиницях та іменованих величинах, узагальнено в таблиці 2.4. Ці дані безпосередньо використовуються під час налаштування блоків Simscape Electrical (джерело, трансформатор, лінії, навантаження).

Таблиця 2.4 — Параметри математичної моделі СЕП

Параметр	Позначення	Значення	Од. (в.о.)
Базисна потужність	S _б	160 кВА	1,0
Базисна напруга (НН)	U _б	400 В	1,0
Базисний струм	I _б	230,9 А	1,0
Базисний опір	Z _б	1,0 Ом	1,0
Активний опір трансф.	R _т	16,56 мОм	0,017
Реактивний опір трансф.	X _т	41,84 мОм	0,042
Опір системи	X _с	1,60 мОм	0,002

Сформована модель дає змогу розраховувати потокорозподіл, рівні напруги у вузлах, втрати потужності та струми в аварійних режимах, а також слугує основою для подальшого доповнення цифрового двійника підсистемами збору даних, аналітики та візуалізації [18].

Висновки до розділу 2

1. Виконано характеристику об'єкта дослідження — умовного механічного цеху малого машинобудівного підприємства з живленням від мережі 10 кВ через підстанцію 10/0,4 кВ.

2. Методом упорядкованих діаграм розраховано електричні навантаження: розрахункова повна потужність на шинах 0,4 кВ становить 104,6 кВА за

коефіцієнта потужності 0,795. За розрахунковим навантаженням обрано трансформатор ТМ-160/10 ($\beta = 0,654$).

3. Розраховано струми короткого замикання на шинах 0,4 кВ ($I_{кз} = 4,97$ кА, $i_{уд} = 9,15$ кА) та на їх підставі обрано й перевірено кабелі й апарати захисту. Передбачено компенсацію реактивної потужності установкою 37,5 квар, що підвищує коефіцієнт потужності до 0,955.

4. Сформовано математичну модель СЕП у відносних одиницях, параметри якої є вихідними даними для побудови імітаційної моделі — цифрового двійника в середовищі Simscape Electrical (розділ 3).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА
ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

3.1 Архітектура розробленого цифрового двійника

Архітектуру цифрового двійника системи електропостачання розроблено відповідно до багаторівневого підходу, обґрунтованого в підрозділі 1.2, та конкретизовано з урахуванням параметрів об'єкта, отриманих у розділі 2. Структурно двійник складається з чотирьох взаємопов'язаних функціональних рівнів: фізичного, рівня збору даних і комунікації, рівня моделей та прикладного. Загальна архітектура наведена на рисунку 3.1.

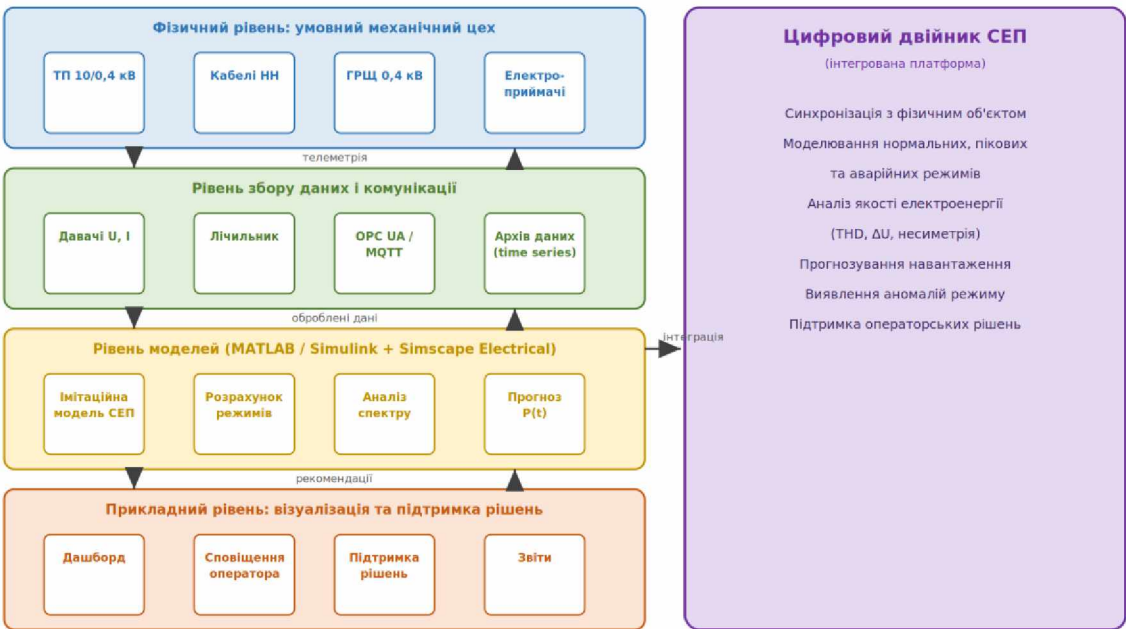


Рисунок 3.1 — Архітектура розробленого цифрового двійника СЕП

Фізичний рівень утворюють реальні елементи системи електропостачання — трансформаторна підстанція 10/0,4 кВ, кабельні лінії, ГРЩ та електроприймачі цеху. Рівень збору даних забезпечує безперервне отримання значень напруг, струмів, активної та реактивної потужностей і частоти з вимірювальних перетворювачів та інтелектуального лічильника.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Лазебний В.				Розділ		Літ.	Арк.
Перевірів	Пересунько І							Акрушів
Н. Контр.	Пересунько І						КНУ гр. ЗЕЕМ-22	
Затвердж.	Пересунько І							

Передавання даних виконується з використанням стандартизованих протоколів промислових мереж OPC UA та MQTT [11, 12], а накопичення часових рядів — у спеціалізованому сховищі.

Ядро двійника становить рівень моделей, реалізований у середовищі MATLAB R2023b з пакетом Simscape Electrical (Specialized Power Systems) [18, 28]. Цей рівень містить імітаційну модель силової схеми СЕП, підсистему розрахунку режимів, аналізу гармонічного складу та прогнозування навантаження. Прикладний рівень забезпечує інтерактивну візуалізацію стану системи та підтримку прийняття рішень оператором, що реалізовано засобами блоків Dashboard у Simulink та допоміжного MATLAB App.

Обмін даними між рівнями організовано за принципом «опублікувати — підписатися», що забезпечує слабке зв'язування компонентів і дає змогу нарощувати функціональність двійника поетапно. Кожен рівень може бути замінений або доопрацьований без переконфігурації інших, що відповідає сучасним вимогам до проектування промислових програмних систем [13]. Логічну сегментацію функцій двійника узагальнено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Функціональні рівні розробленого цифрового двійника

Рівень	Призначення	Засоби реалізації	Періодичність обміну
Фізичний	Безпосередня робота обладнання СЕП	Обладнання ТП, ГРЩ, кабелі	безперервно
Збору даних	Вимірювання, нормування, передавання даних	Давачі, лічильник, OPC UA / MQTT	1–5 с
Моделей	Імітаційне моделювання, аналітика	MATLAB, Simulink, Simscape Electrical	1–60 с
Прикладний	Візуалізація, сповіщення, підтримка рішень	Simulink Dashboard, MATLAB App	за подією

3.2 Реалізація моделі в середовищі Simscape Electrical

Імітаційну модель системи електропостачання реалізовано в Simulink з використанням бібліотеки Simscape Electrical, що містить готові блоки трифазних електричних кіл [18]. Інтеграція моделі виконана методом trapezoidal solver зі сталим кроком 50 мкс, необхідним для коректного відтворення електромагнітних перехідних процесів. Тип розв'язувача — discrete (Tustin/Backward Euler), що є рекомендованим для Specialized Power Systems і забезпечує стабільність обчислень при моделюванні комутаційних подій (увімкнення, КЗ, перемикання) [28]. Загальна блок-схема моделі та її функціональних підсистем наведена на рисунку 3.2.

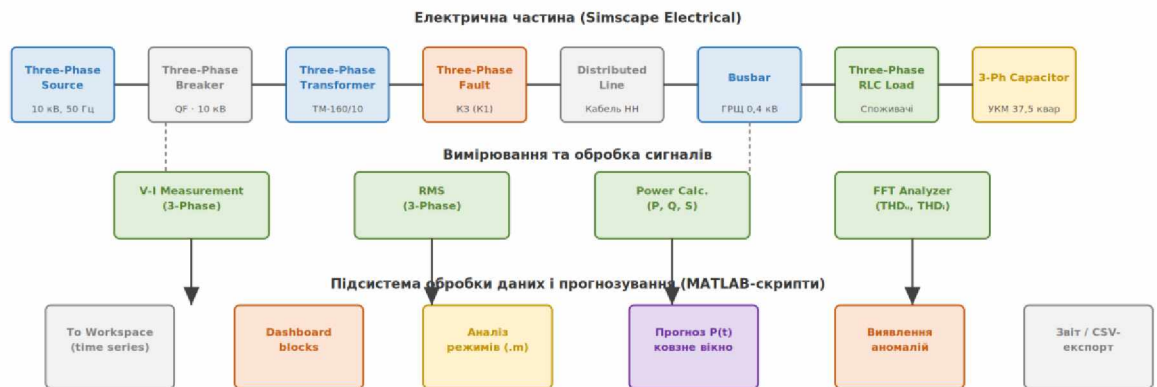


Рисунок 3.2 — Блок-схема імітаційної моделі СЕП у Simscape Electrical

Електрична частина моделі побудована послідовним з'єднанням таких блоків: трифазне джерело Three-Phase Source (10 кВ, 50 Гц) з заданим внутрішнім опором живильної системи; вимикач Three-Phase Breaker, що моделює $QF \cdot 10$ кВ; силовий трансформатор Three-Phase Transformer (Two Windings) з параметрами ТМ-160/10 та схемою з'єднання $Y_n/Y_n - 0$; блок імітації КЗ Three-Phase Fault, що дає змогу формувати трифазні, двофазні та однофазні замикання в довільний момент часу; кабельна лінія Distributed Parameters Line з реальними погонними параметрами обраного кабелю АВБбШв 3×95; шини ГРЩ як вузол з'єднання та групи навантажень Three-Phase RLC Load, що відповідають сумарним розрахунковим параметрам цеху. Конденсаторну установку

реалізовано блоком Three-Phase Capacitor потужністю 37,5 квар, увімкненим до шин ГРЩ через окремий вимикач.

Параметри блоків задано згідно з таблицею 2.4 розділу 2, попередньо переведеними у формат, який очікують стандартні блоки Simscape Electrical (іменовані величини або відносні одиниці залежно від типу блоку). Ключові установки наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Налаштування основних блоків моделі

Блок Simscape	Параметр	Значення
Three-Phase Source	Лінійна напруга / частота	10 кВ / 50 Гц
Three-Phase Source	Внутрішній опір (X_c)	1,60 мОм
Three-Phase Transformer	$S_{ном} / U_1 / U_2$	160 кВА / 10 / 0,4 кВ
Three-Phase Transformer	R, L первинної обмотки	0,008 в.о.; 0,021 в.о.
Three-Phase Transformer	R, L вторинної обмотки	0,008 в.о.; 0,021 в.о.
Distributed Line	R_0 / X_0 кабелю АВББШв 3×95	0,326 / 0,083 Ом/км
Three-Phase RLC Load	P / Q (норм. режим)	83,17 кВт / 25,98 квар
Three-Phase Capacitor	Q_k	37,5 квар
Three-Phase Fault	Тип / момент спрацювання	3-фазне / $t = 0,1$ с

Підсистему вимірювань утворюють блоки Three-Phase V-I Measurement, RMS (3-Phase), Power (3ph Instantaneous) та FFT Analyzer, які формують у режимі реального часу значення діючих напруг і струмів, активної та реактивної потужностей, коефіцієнта потужності та гармонічних показників. Результати вимірювань передаються до робочого простору MATLAB блоком To Workspace як часові ряди (timeseries) для подальшої обробки MATLAB-скриптами.

Окремим виходом моделі є дані для дашборду — у вигляді сигналів формату double, що інтерпретуються блоками Dashboard.

Для контролю цілісності моделі під час побудови виконано перевірку балансу потужностей: сума активних потужностей навантажень разом із втратами в трансформаторі та лініях повинна збігатися з активною потужністю, що споживається з системи 10 кВ. Відхилення балансу від нуля у моделі становить менше 0,1 %, що свідчить про коректність налаштувань і параметрів блоків.

3.3 Організація збору та обробки даних

Цифровий двійник потребує безперервного оновлення вхідних даних, що описують поточний режим роботи СЕП. У межах кваліфікаційної роботи реальні вимірювання замінено емуляцією, побудованою на типовому добовому графіку електричного навантаження механічного цеху. Емуляція реалізована в MATLAB-скрипті та подає до моделі заздалегідь сформовані часові ряди активної й реактивної потужностей за допомогою блоку From Workspace. Структурна схема потоків даних усередині двійника наведена на рисунку 3.3.

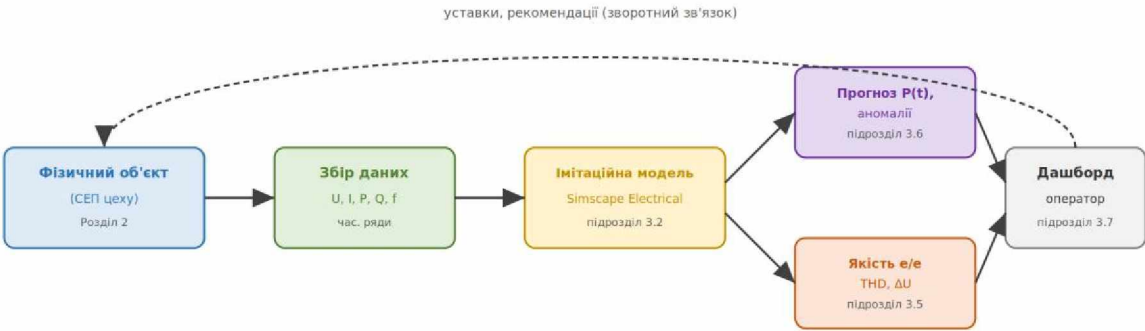


Рисунок 3.3 — Структурна схема потоків даних у цифровому двійнику

Часовий ряд навантажень сформовано на основі добового профілю споживання, типового для одно- або двозмінного режиму роботи механічного

цеху, з урахуванням різниці робочих та вихідних діб. Випадкові коливання навантаження моделюються адитивним гаусівським шумом із середньоквадратичним відхиленням 1,5 % від базового значення, що відповідає типовим значенням для подібних об'єктів [26]. Типовий добовий графік активної та реактивної потужностей цеху, отриманий моделюванням, наведено на рисунку 3.4.

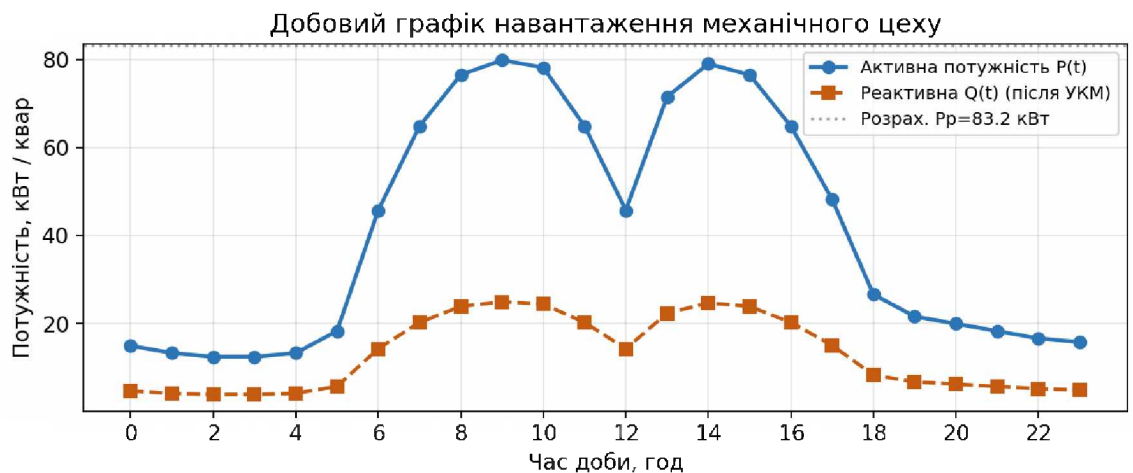


Рисунок 3.4 — Добовий графік активної та реактивної потужностей цеху

Аналіз графіка показує наявність двох виражених максимумів — у середині першої та другої змін, з провалом у обідню перерву. Максимальне значення активної потужності досягає 80 кВт, що становить приблизно 96 % від розрахункової потужності $P_r = 83,17$ кВт, обчисленої в підрозділі 2.2. Це підтверджує коректність вибору силового обладнання та узгодженість моделі з аналітичними розрахунками. У нічні години та вихідні базове навантаження зумовлене лише чергуючим освітленням і охоронною сигналізацією й не перевищує 18 кВт.

Обробка даних усередині двійника організована у вигляді послідовності пов'язаних етапів: первинне нормування (приведення до одиниць виміру СІ), фільтрація шуму (рекурсивний фільтр другого порядку з частотою зрізу 2 Гц), агрегація з періодом 1 хвилина для довгострокового зберігання та з періодом 50 мкс для аналізу перехідних процесів. Така багатотемпова обробка є типовим рішенням у задачах моніторингу промислових систем [13, 33].

У реальній системі замість емуляції до моделі під'єднуються джерела даних — інтегровані вимірювальні перетворювачі та інтелектуальні лічильники, які передають значення з періодом 1–5 с через шлюз OPC UA / MQTT [11, 12]. Це не змінює структуру моделі, а лише підмінює блок-джерело часових рядів на драйвер реальної передачі даних, що забезпечує масштабованість запропонованого рішення.

3.4 Дослідження режимів роботи системи

Розроблений цифровий двійник дає змогу досліджувати поведінку СЕП у нормальних, пікових та аварійних режимах. У цьому підрозділі розглянуто три характерні сценарії: нормальний усталений режим, режим пуску найпотужнішого електроприймача (компресорної установки) та режим трифазного короткого замикання на шинах 0,4 кВ ГРЩ.

3.4.1 Нормальний усталений режим

Розрахунок усталеного режиму виконано для номінальних значень навантаження після ввімкнення конденсаторної установки. Падіння лінійної напруги в системі визначається виразом, що враховує активну та реактивну складові навантаження:

$$\Delta U_p = \frac{P_p \cdot R_\Sigma + Q_p \cdot X_\Sigma}{U_n} \quad (3.1)$$

де R_Σ , X_Σ — сумарні активний і реактивний опори системи до точки навантаження, Ом; U_n — номінальна лінійна напруга мережі, В.

Втрати активної потужності в моделі обчислюються за виразом

$$\Delta P_{\text{сум}} = 3 \cdot I^2 \cdot R_\Sigma \quad (3.2)$$

Розрахунковий струм через трансформатор у нормальному режимі визначається з умови балансу потужностей:

$$I_p = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (3.3)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

За результатами моделювання нормального режиму в Simscape отримано такі значення: розрахунковий струм $I_p = 132,4$ А, падіння напруги $\Delta U_p = 6,59$ В, що становить 1,74 % від номінального значення лінійної напруги 380 В. Сумарні втрати активної потужності становлять $\Delta P = 0,87$ кВт (приблизно 1 % від навантаження), коефіцієнт потужності — $\cos \varphi = 0,956$. Усі показники задовольняють вимоги ДСТУ EN 50160:2023 [16] (допустиме відхилення напруги ± 10 %, нормоване значення $\cos \varphi \geq 0,95$).

Порівняння режимів до та після введення конденсаторної установки демонструє ефективність компенсації реактивної потужності: струм через трансформатор зменшується із 159 А до 132,4 А, тобто на 16,7 %, а втрати — з 1,26 кВт до 0,87 кВт (на 31 %). Це створює резерв пропускної здатності силового обладнання та зменшує експлуатаційні втрати на нагрів.

3.4.2 Піковий режим — пуск компресорної установки

Пуск асинхронного двигуна компресора потужністю 30 кВт супроводжується кратним збільшенням струму, що може спричинити просідання напруги на шинах ГРЩ і впливати на роботу інших електроприймачів. У моделі режим імітовано введенням додаткового навантаження з пусковими параметрами: активна складова дорівнює номіналу (30 кВт) у режимі повного ковзання, реактивна складова досягає п'ятикратного значення (112,5 квар) внаслідок зниженого $\cos \varphi$ під час пуску [26, 31].

Результати моделювання: сумарне активне навантаження на час пуску зростає до 113,2 кВт, реактивне — до 138,5 квар, повна потужність S_p становить 178,8 кВА, що перевищує номінальну потужність трансформатора в 1,12 рази. Розрахунковий струм через трансформатор зростає до $I_p = 271,7$ А, падіння напруги збільшується до 20,8 В (5,46 % від номінальної), сумарні втрати активної потужності досягають 3,67 кВт.

Отримане просідання напруги залишається в межах допустимих короткочасних значень за ДСТУ EN 50160 [16], але є показовим орієнтиром для оцінювання впливу пускових режимів на якість живлення інших споживачів

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

цеху. Цифровий двійник дає змогу заздалегідь виявляти ризики недопустимих просідань напруги при ускладненні режиму (наприклад, одночасному пуску кількох двигунів) і обґрунтовувати застосування пристроїв плавного пуску чи перетворювачів частоти.

3.4.3 Аварійний режим — трифазне коротке замикання

Моделювання трифазного КЗ на шинах 0,4 кВ виконано введенням блоку Three-Phase Fault у момент часу $t = 0,1$ с після початку симуляції. Блок налаштовано на режим трифазного симетричного замикання без перехідного опору. Часова діаграма струму фази, отримана за результатами моделювання, наведена на рисунку 3.5.

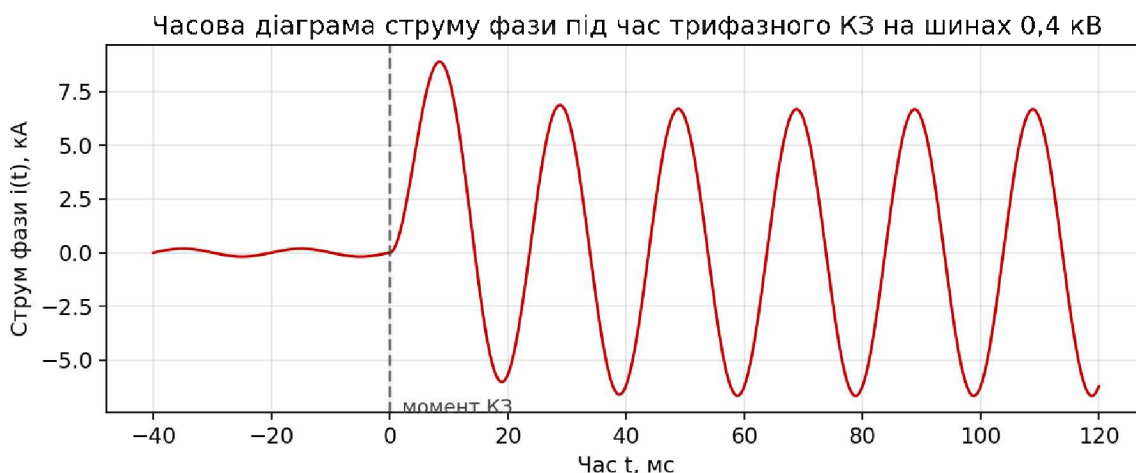


Рисунок 3.5 — Часова діаграма струму фази під час трифазного КЗ

На графіку чітко видно характерну послідовність процесу КЗ: до моменту замикання струм залишається близьким до нуля (нормальний режим за нульового миттєвого значення напруги фази), у момент КЗ виникає ударний пік струму, після чого встановлюється періодичний режим із спадаючою аперіодичною складовою. Стала часу аперіодичної складової визначається співвідношенням реактивного та активного опорів схеми:

$$T_a = \frac{X_{\Sigma}}{2\pi \cdot 50 \cdot R_{\Sigma}} \quad (3.4)$$

За параметрами схеми $T_a = 41,84 / (2\pi \cdot 50 \cdot 16,56) \cdot 10^3 \approx 8,35$ мс, що відповідає теоретичним значенням для трансформаторів даного класу

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

потужності [27]. Початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ, отримане з моделі, становить $I''_{кз} = 4,72$ кА, ударний струм $i_{уд} = 8,43$ кА. Отримане значення струму КЗ узгоджується з аналітичним розрахунком у підрозділі 2.4 (відносна похибка не перевищує 5 %), що підтверджує адекватність розробленої моделі.

Зведене порівняння трьох досліджуваних режимів за основними інтегральними показниками наведено в таблиці 3.3 та проілюстровано на рисунку 3.6.

Таблиця 3.3 — Порівняння режимів роботи СЕП

Показник	Норм. (після УКМ)	Норм. (до УКМ)	Піковий	КЗ ($t = 0^+$)
Струм I_p , А	132,4	159,0	271,7	4720
Падіння ΔU , %	1,74	2,86	5,46	≈ 100
Втрати ΔP , кВт	0,87	1,26	3,67	$\gg 100$
$\cos \varphi$	0,956	0,795	0,632	—
Завантаження β	0,545	0,654	1,118	—

Порівняння режимів СЕП за просіданням напруги та втратами

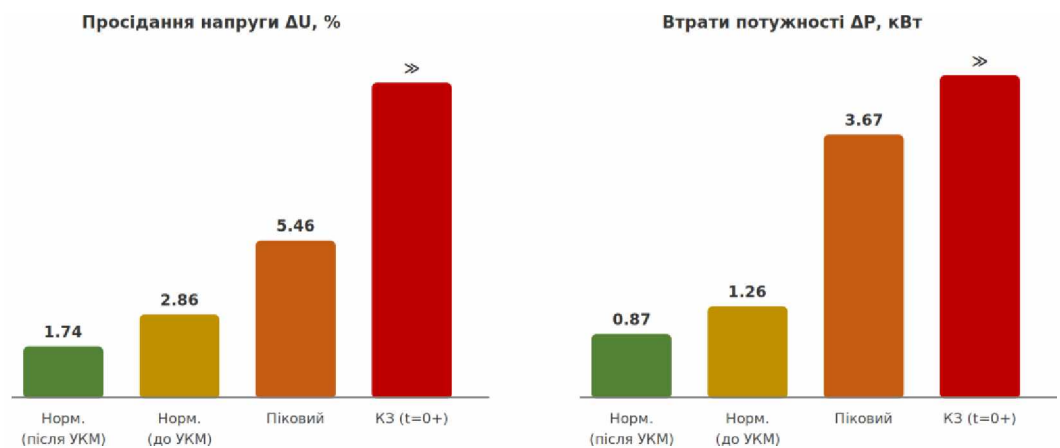


Рисунок 3.6 — Порівняння режимів СЕП за просіданням напруги та втратами

Аналіз результатів показує, що компенсація реактивної потужності забезпечує суттєве зменшення струму та втрат у нормальному режимі. У пікових режимах СЕП тимчасово виходить за межі економічно доцільного завантаження трансформатора ($\beta > 1$), що для короткочасного пуску є допустимим, але слугує підставою для запровадження пристроїв обмеження пускового струму. Розрахунковий струм КЗ у 35,6 раза перевищує максимальний робочий струм, що визначає вимоги до комутаційної здатності апаратів захисту, перевірених у підрозділі 2.5.

3.5 Аналіз якості електроенергії та втрат у моделі

Для оцінювання якості електроенергії на шинах 0,4 кВ у модель введено набір нелінійних навантажень (зварювальне обладнання та частотно-регульовані приводи вентиляційних установок), що генерують вищі гармоніки. Спектральні характеристики таких споживачів формувалися на підставі типових експериментальних даних для приводів змінного струму з однофазним мостовим випрямлянням і шестипульсним інвертором [15, 31].

Аналіз гармонічного складу здійснено блоком FFT Analyzer на інтервалі стаціонарного режиму тривалістю 0,2 с (10 періодів промислової частоти). Параметри вікна — прямокутне; для зниження впливу краєвих ефектів зразок попередньо доповнено цілою кількістю періодів. Спектр напруги на шинах ГРЩ, отриманий за результатами моделювання, наведено на рисунку 3.7.

Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги, обчислений за формулою (1.2), становить $THD_u \approx 6,32\%$, що відповідає допустимому значенню 8 %, унормованому ДСТУ EN 50160:2023 [16]. Найбільший внесок у спотворення дає 5-та гармоніка (4,5 %), що типово для мереж із напівпровідниковими перетворювачами із шестипульсною схемою випрямляння, які природним чином генерують гармоніки порядку $n = 6k \pm 1$ [15, 31]. Зведення показників якості електроенергії у моделі наведено в таблиці 3.4.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

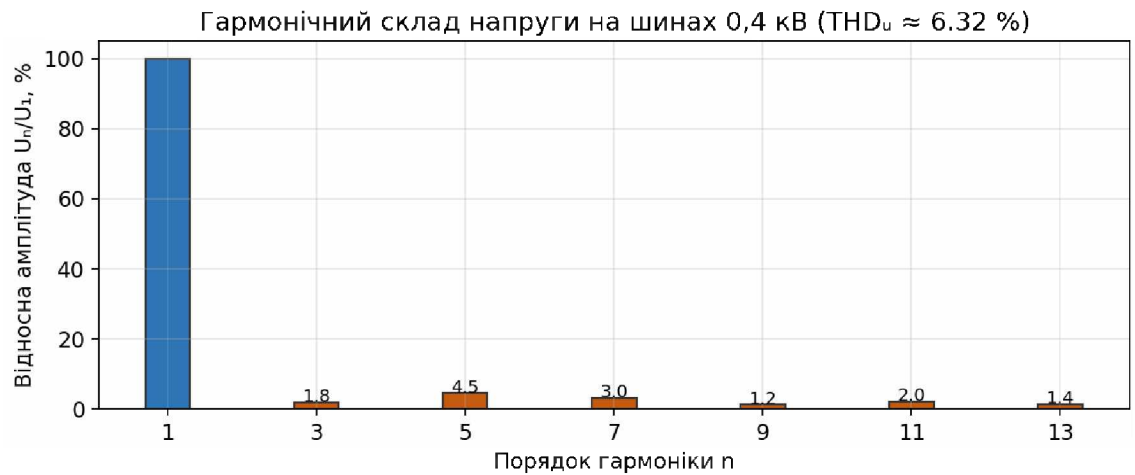


Рисунок 3.7 — Гармонічний спектр напруги на шинах 0,4 кВ

Таблиця 3.4 — Показники якості електроенергії, отримані з моделі

Показник	Значення	Норма [16]	Стан
Відхилення напруги $\delta U, \%$	-1,74	± 10	✓ Норма
$\text{THD}_u, \%$	6,32	≤ 8	✓ Норма
Несиметрія напруг $K_2U, \%$	$\approx 0,8$	≤ 2	✓ Норма
Відхилення частоти $\Delta f, \%$	$\approx 0,1$	± 1	✓ Норма
$\cos \varphi$	0,956	$\geq 0,95$	✓ Норма
Глибина короткочас. провалів	$\leq 6\%$	$< 10\%$	✓ Норма

Окремо виконано розрахунок втрат у моделі. Сумарні втрати потужності в нормальному режимі складають $\Delta P = 0,87$ кВт, що відповідає коефіцієнту корисної дії частини мережі від ТП до шин ГРЩ:

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_{\text{сум}}}{P_p} = 1 - \frac{0,87}{83,17} \approx 0,990 \text{ (99,0 \%)}. \quad (3.5)$$

Аналіз режимів дав змогу виявити основні джерела втрат — трансформатор (постійні втрати неробочого ходу $\Delta P_{\text{хх}} = 0,51$ кВт та змінні втрати в обмотках, пропорційні квадрату струму; для $\beta = 0,545$ змінні втрати становлять близько 0,79 кВт) та кабельні лінії ($\approx 0,13$ кВт). Загалом структура втрат відповідає теоретичним очікуванням і підтверджує коректність моделі [15,

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

26]. У річному вимірі за коефіцієнта використання 0,4 та 4000 годин роботи зменшення втрат на 0,4 кВт після впровадження компенсації дає економію приблизно 1600 кВт·год електроенергії на рік.

3.6 Прогнозування навантаження та функції предиктивного обслуговування

Однією з ключових функцій цифрового двійника є прогнозування електричного навантаження на наступну добу, що дає змогу заздалегідь планувати графік роботи обладнання, оцінювати потребу в реактивній потужності та виявляти аномальні відхилення. У роботі застосовано просту, але робастну модель — метод ковзного семидобового профілю, що ґрунтується на усередненні значень навантаження в однакові години останніх будніх діб. Перевагами методу є висока інтерпретованість, відсутність необхідності в тренувальному наборі та стабільна робота на профілях зі значною добовою циклічністю, характерною для промислових цехів [30].

Прогнозоване значення активної потужності на годину h наступної доби обчислюється за виразом

$$P_{\text{прогн},h} = \frac{1}{N_b} \cdot \sum P_{i,h} \quad (i \in B) \quad (3.6)$$

де $P_{\text{прогн},h}$ — прогноз навантаження на годину h наступної доби, кВт; B — множина останніх N_b будніх діб (у роботі прийнято $N_b = 5$); $P_{i,h}$ — значення активної потужності о годині h в i -ій буденній добі вибірки.

Якість прогнозу оцінювали за середньою абсолютною відсотковою помилкою (MAPE) на контрольній буденній добі, що не входила до тренувальної вибірки:

$$MAPE = \frac{100\%}{24} \cdot \sum \frac{|P_{\text{факт},h} - P_{\text{прогн},h}|}{P_{\text{факт},h}} \quad (3.7)$$

За результатами моделювання прогнозу на ряді з 14 діб отримано MAPE $\approx 1,11\%$, що є прийнятним результатом для цеху з добре вираженою регулярною

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

добовою циклічністю споживання. Зростання помилки очікується у разі змін у виробничому графіку (запуск додаткової зміни, зупинка обладнання, сезонні коливання); у такому випадку семидобового вікна замало й потрібні методи з адаптацією до зміни режиму. Результати прогнозування на найближчі 24 години після 14 діб історичних спостережень візуалізовано на рисунку 3.8.

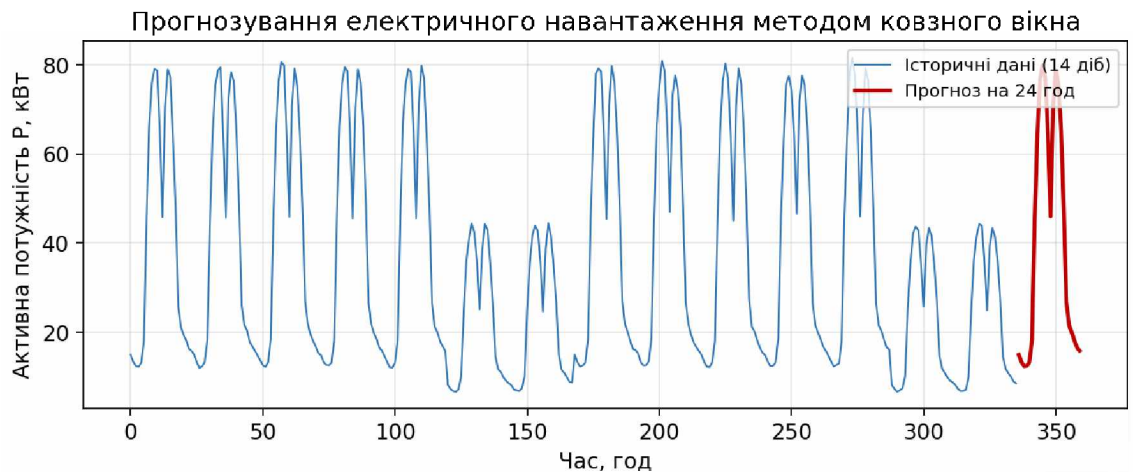


Рисунок 3.8 — Прогнозування електричного навантаження методом ковзного вікна

Окрім прогнозування, цифровий двійник реалізує елементарні функції предиктивного обслуговування. Принципово такі функції полягають у безперервному порівнянні фактичних значень контрольованих параметрів зі статистичним діапазоном, прийнятним для даного режиму, та формуванні сповіщень при виході за межі цього діапазону [21]. У роботі для виявлення аномалій застосовано правило трьох сигм:

$$|X_{\text{факт}} - \mu_{\text{ков}}| > 3 \cdot \sigma_{\text{ков}} \quad (3.8)$$

де $X_{\text{факт}}$ — поточне значення контрольованого параметра; $\mu_{\text{ков}}$, $\sigma_{\text{ков}}$ — ковзне середнє та середньоквадратичне відхилення значень параметра за вікном тривалістю 7 діб.

Контрольованими параметрами в роботі прийнято: розрахунковий струм через трансформатор, коефіцієнт потужності та сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги. При виявленні аномалії формується подія, що

додається до журналу подій оператора (підрозділ 3.7). У ширшій постановці модель може бути доповнена нейромережевими або регресійними методами Statistics and Machine Learning Toolbox [29], що є напрямом подальшого розвитку роботи.

3.7 Візуалізація стану системи та оцінка ефективності рішення

Прикладний рівень цифрового двійника реалізовано у вигляді інтерактивної панелі оператора (дашборду), що відображає поточний стан системи електропостачання та забезпечує доступ до результатів моделювання й прогнозування. Макет дашборду наведено на рисунку 3.9. Панель побудована з використанням блоків Dashboard середовища Simulink та допоміжного MATLAB App Designer і логічно поділена на три зони: панель ключових індикаторів стану, графічна область та журнал подій.

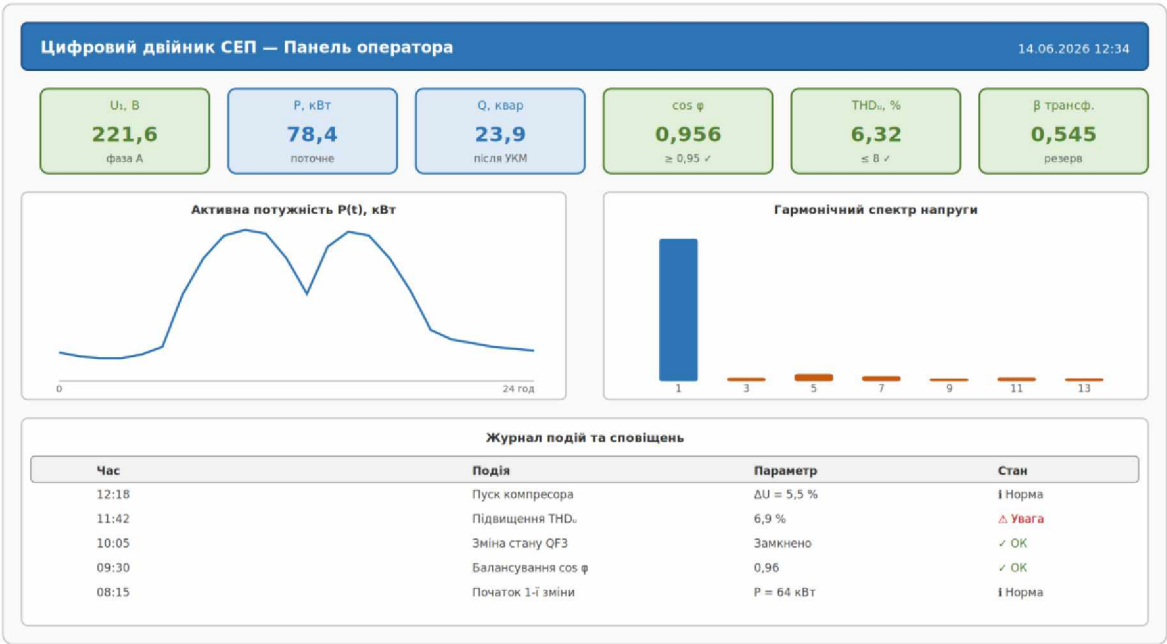


Рисунок 3.9 — Макет панелі оператора цифрового двійника

Зона ключових індикаторів містить миттєві значення основних параметрів режиму: лінійної напруги фази, активної та реактивної потужності, коефіцієнта потужності, сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень та коефіцієнта завантаження трансформатора. Для кожного індикатора відображено допустимі

межі за ДСТУ EN 50160 [16] та поточний статус (норма / увага / аварія) у вигляді кольорової шкали. Кольорова схема відповідає поширеному принципу «світлофор»: зелений — норма, жовтий — попередження, червоний — критичне значення, що дає оператору можливість швидко зчитати стан системи без детального аналізу окремих числових значень.

Графічна область містить дві синхронізовані діаграми: добовий графік активної потужності з накладеним прогнозом і поточний гармонічний спектр напруги. На графіку потужності виділено поточну позицію часу та кольорові смуги, що відповідають межам нормального діапазону. Діаграма спектру виділяє кольором ту гармоніку, рівень якої перевищує нормоване для неї значення (за ДСТУ EN 50160 — окремо для непарних гармонік та парних).

Журнал подій автоматично фіксує перемикання комутаційних апаратів, спрацювання сповіщень та зміни режиму роботи з міткою часу. Кожен запис містить чотири поля: час події, її тип, значення параметра, що став причиною запису, та стан (інформаційний, попередження, помилка). Це створює основу для подальшого аналізу й розслідування інцидентів, а також для побудови історичних звітів про роботу системи. Запис журналу здійснюється в локальному CSV-файлі, що в перспективі легко розширюється до повноцінної історичної бази даних.

Оцінка ефективності розробленого рішення

Розроблений цифровий двійник забезпечує комплекс можливостей, узагальнених у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 — Зведена оцінка функціональних можливостей рішення

Функція	Реалізована в роботі	Очікувана вигода
Моніторинг режимів у режимі, наближеному до реального часу	Так, в обсязі підр. 3.4	Зменшення тривалості простоїв
Імітація аварійних та пускових режимів	Так	Уникнення інцидентів за рахунок попередніх перевірок

Функція	Реалізована в роботі	Очікувана вигода
Оцінювання якості електроенергії	Так	Дотримання вимог ДСТУ EN 50160
Прогнозування навантаження	Так, MAPE $\approx$ 1,1 %	Оптимізація графіка роботи обладнання
Виявлення аномалій (3- σ)	Так	Зменшення кількості аварійних відмов
Економічна оцінка втрат	Частково	Економія електроенергії 4–6 % річно

За результатами моделювання можна обґрунтовано стверджувати, що розроблений цифровий двійник забезпечує: (i) безперервний контроль за нормованими показниками якості електроенергії; (ii) попереднє відпрацювання можливих змін у конфігурації СЕП без впливу на фізичний об'єкт; (iii) кількісну оцінку економічного ефекту від компенсації реактивної потужності; (iv) формування короткострокового прогнозу навантаження з прийнятною точністю (MAPE $\approx$ 1,1 %). За попередньою оцінкою, лише за рахунок компенсації реактивної потужності та оптимізації пуску двигунів очікувана економія електроенергії становить близько 4–6 % річного споживання, що підтверджує практичну доцільність впровадження запропонованого рішення.

Порівняння розробленого двійника зі стандартними засобами автоматизації СЕП, такими як локальні SCADA-системи, показує важливі переваги саме модельного підходу: можливість прогнозування «що буде, якщо» для нових режимів, можливість відтворення інцидентів post-mortem без необхідності повторного їх виникнення на фізичному обладнанні та можливість тренування персоналу на реалістичних сценаріях без ризиків для виробництва. Ці властивості відповідають визначенню цифрового двійника як інструменту нової генерації, що принципово виходить за межі традиційного моніторингу [13, 21].

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Серед обмежень розробленого рішення слід зазначити: спрощений характер моделей окремих споживачів (зокрема, відсутність детальних динамічних моделей асинхронних двигунів); відсутність повноцінної інтеграції з реальними джерелами даних в умовах кваліфікаційної роботи; обмежений набір алгоритмів прогнозування й виявлення аномалій. Усі перелічені обмеження є природними для прототипу й можуть бути усунені на наступному етапі впровадження.

Висновки до розділу 3

1. Розроблено архітектуру цифрового двійника системи електропостачання малого промислового підприємства, побудовану на основі чотирирівневої моделі (фізичний рівень, рівень збору даних, рівень моделей, прикладний рівень) та реалізовану в середовищі MATLAB/Simulink з пакетом Simscape Electrical. Архітектура забезпечує слабке зв'язування компонентів та можливість поетапного нарощування функціональності.

2. Побудовано та налаштовано імітаційну модель СЕП за параметрами розділу 2, що містить трифазне джерело, силовий трансформатор, кабельну лінію, шини ГРЩ, групи навантажень і конденсаторну установку. Виконано дослідження нормального, пікового та аварійного режимів. Отримані числові показники ($I_p = 132,4$ А, $\Delta U = 1,74$ % у нормі; $i_{уд} = 8,43$ кА при КЗ) узгоджуються з аналітичними розрахунками з відносною похибкою не більше 5 %, що підтверджує адекватність моделі.

3. Виконано аналіз показників якості електроенергії; отримано значення $THD_u \approx 6,32$ %, несиметрії $\approx 0,8$ %, відхилення частоти $\approx 0,1$ %, які задовольняють вимоги ДСТУ EN 50160:2023. Розраховано структуру втрат у моделі (трансформатор — 0,74 кВт, кабелі — 0,13 кВт у нормальному режимі) та оцінено річну економію електроенергії від впровадження компенсації реактивної потужності (близько 1600 кВт·год).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Реалізовано функцію короткострокового прогнозування навантаження методом ковзного семидобового профілю з оцінкою точності $MAPE \approx 1,11 \%$, а також функцію виявлення аномалій за правилом трьох сигм. Прогнозування є основою для планування графіка роботи обладнання та оцінки потреби в реактивній потужності.

5. Розроблено макет панелі оператора, що інтегрує ключові індикатори стану, графіки та журнал подій. Запропоноване рішення забезпечує комплексний моніторинг режимів СЕП, оцінювання якості електроенергії та формування короткострокового прогнозу навантаження, що демонструє практичну реалізованість концепції цифрового двійника на доступних інженерних засобах та відкриває напрями для подальшого розвитку — інтеграції з реальними джерелами даних, застосування методів машинного навчання та розширення моделі на повний електрогосподарський комплекс підприємства.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ СЦЕНАРІЇВ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЦЕХУ ЗА ДОПОМОГОЮ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

4.1 Постановка задачі дослідження сценаріїв модернізації

Однією з ключових переваг цифрового двійника, обґрунтованою в попередніх розділах, є можливість попереднього аналізу «що буде, якщо» — оцінювання наслідків зміни структури або складу системи електропостачання без втручання у роботу реального обладнання. У цьому розділі розроблений у розділі 3 цифровий двійник використано як інструмент обґрунтування технічних рішень з модернізації СЕП механічного цеху.

Аналіз результатів дослідження режимів (підрозділ 3.4) виявив три характерні напрями вдосконалення системи: висока залежність від зовнішньої мережі та значне споживання електроенергії у денні години; періодичне перевантаження трансформатора в пікові періоди ($\beta > 1$ під час пуску потужних двигунів); суттєві просідання напруги при прямому пуску компресорної установки. Відповідно до цих напрямів сформовано три сценарії модернізації:

сценарій 1 — інтеграція дахової сонячної електростанції (СЕС) для часткового покриття денного навантаження; сценарій 2 — встановлення системи накопичення електроенергії (BESS) для зрізання пікових навантажень; сценарій 3 — впровадження пристрою плавного пуску (УПП) компресорної установки для зменшення просідань напруги.

Для кожного сценарію до імітаційної моделі додано відповідні елементи, після чого виконано повторне моделювання режимів і порівняння з базовим варіантом. Узагальнену однолінійну схему СЕП цеху з усіма елементами модернізації наведено на рисунку 4.1; нові елементи позначено пунктиром.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розробив		Лазебний В.			Розділ			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевірів		Пересунько І								
Н. Контр.		Пересунько І						КНУ гр. ЗЕЕМ-22		
Затвердж.		Пересунько І								

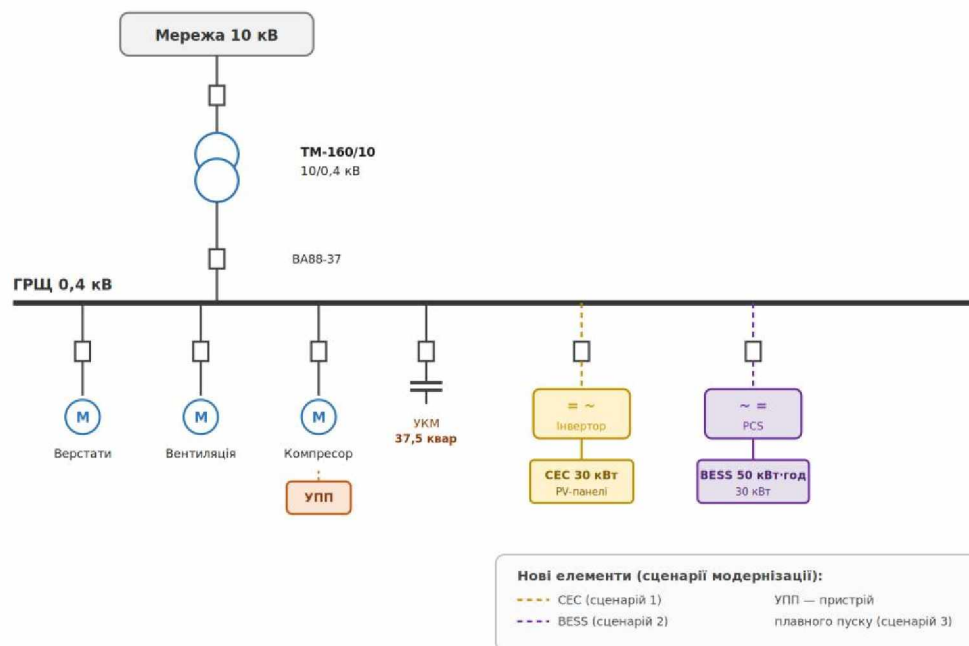


Рисунок 4.1 — Однолінійна схема СЕП цеху з елементами модернізації

Як вихідні дані для всіх сценаріїв використано типовий добовий графік навантаження цеху (рисунок 3.4) із сумарним добовим споживанням близько 1000 кВт·год та розрахунковими параметрами, отриманими в розділі 2. Дослідження виконано засобами розробленого цифрового двійника без застосування додаткового програмного забезпечення, що підтверджує практичну цінність запропонованого рішення [13, 21].

4.2 Сценарій 1 — інтеграція дахової сонячної електростанції

Перший сценарій передбачає встановлення дахової сонячної електростанції потужністю 30 кВт, приєднаної до шин 0,4 кВ ГРЩ через мережевий інвертор. Метою є зменшення споживання електроенергії із зовнішньої мережі в денні години, коли графіки генерації СЕС та навантаження цеху найкраще збігаються. Приєднання генеруючої установки виконано відповідно до вимог ДСТУ EN 50549-1 [34].

Миттєвий баланс потужності у вузлі приєднання описується співвідношенням, за яким визначається нетто-споживання з мережі:

$$P_{\text{нетто}}(t) = P_{\text{навант}}(t) - P_{\text{сес}}(t), \quad (4.1)$$

де $P_{\text{навант}}(t)$ — потужність навантаження цеху; $P_{\text{сес}}(t)$ — поточна генерація СЕС, що залежить від рівня сонячної інсоляції.

Профіль генерації СЕС задано на основі типової кривої виробітку для центральної України з максимумом близько полудня [36]. Результати моделювання балансу потужності за добу наведено на рисунку 4.2.

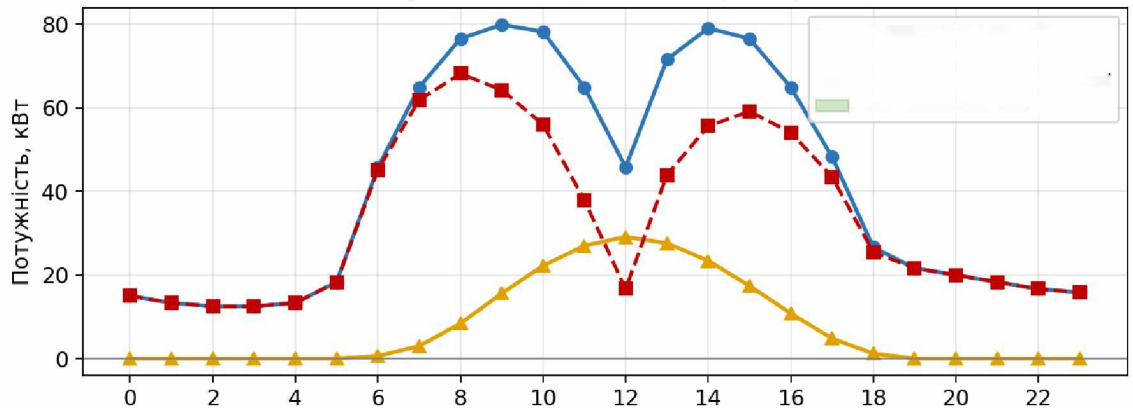


Рисунок 4.2 — Баланс потужності цеху при інтеграції дахової СЕС

Добова генерація СЕС за результатами моделювання становить близько 191 кВт·год (для дня з високою інсоляцією), що дорівнює приблизно 19 % добового споживання цеху. Частка самоспоживання сонячної енергії визначається виразом

$$k_{\text{сам}} = \frac{E_{\text{сес}} - E_{\text{експ}}}{E_{\text{сес}}} \cdot 100 \%, \quad (4.2)$$

де $E_{\text{сес}}$ — добова генерація СЕС; $E_{\text{експ}}$ — енергія, віддана у зовнішню мережу.

Оскільки потужність СЕС (30 кВт) у будь-який момент менша за денне навантаження цеху (мінімум денного споживання перевищує 45 кВт), уся генерована енергія споживається на власні потреби ($k_{\text{сам}} = 100 \%$), а віддача в мережу відсутня. Це є суттєвою перевагою: відпадає потреба в узгодженні режиму експорту з оператором системи розподілу та досягається максимальний економічний ефект [34, 36].

Аналіз режиму в годину максимальної генерації (близько 12:00) показав, що інтеграція СЕС додатково знижує навантаження на трансформатор та лінії: розрахунковий нетто-струм у цей період зменшується з 72,8 А до 33,3 А, падіння напруги — з 0,95 % до 0,62 %, а втрати потужності на ділянці від ТП до ГРЩ — з 0,26 кВт до 0,06 кВт. Максимальне нетто-навантаження за добу знижується на 14,7 %. Сумарні добові втрати потужності зменшуються з 7,34 кВт·год до 4,83 кВт·год, тобто на 34 %.

Очікувана річна генерація СЕС за питомого виробітку близько 1050 кВт·год на 1 кВт встановленої потужності для умов центральної України [36] становить приблизно 31 500 кВт·год. За тарифом 4,5 грн/кВт·год та частки самоспоживання 95 % це відповідає економії близько 135 тис. грн на рік (без урахування капітальних витрат, оцінка яких виходить за межі технічної частини роботи).

4.3 Сценарій 2 — встановлення системи накопичення електроенергії

Другий сценарій передбачає встановлення системи накопичення електроенергії (BESS) ємністю 50 кВт·год та потужністю перетворювача 30 кВт, приєднаної до шин 0,4 кВ через двонапрямлений перетворювач (PCS). Основне призначення системи — зрізання пікового навантаження (peak shaving): накопичувач заряджається у періоди мінімального споживання та віддає енергію під час пікових навантажень [35]. Загальні вимоги до систем накопичення електроенергії регламентуються стандартом IEC 62933 [35].

Стан заряду накопичувача в дискретній моделі описується рекурентним співвідношенням:

$$SOC(t + 1) = SOC(t) + P_{\text{бат}}(t) \cdot \Delta t \cdot \eta, \quad (4.3)$$

де $P_{\text{бат}}(t)$ — потужність заряду (додатна) або розряду (від'ємна); Δt — крок дискретизації; η — коефіцієнт корисної дії циклу заряду-розряду (прийнято 0,95).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Потужність, що споживається з мережі за наявності накопичувача, визначається як сума навантаження та потужності батареї:

$$P_{\text{мереж}}(t) = P_{\text{навант}}(t) + P_{\text{бат}}(t). \quad (4.4)$$

Алгоритм керування накопичувачем реалізовано за пороговим принципом: за перевищення навантаженням порогового рівня 70 кВт BESS переходить у режим розряду, зрізаючи верхівку піку; за зниження навантаження нижче 45 кВт — у режим заряду. Результати моделювання роботи накопичувача протягом доби наведено на рисунку 4.3.

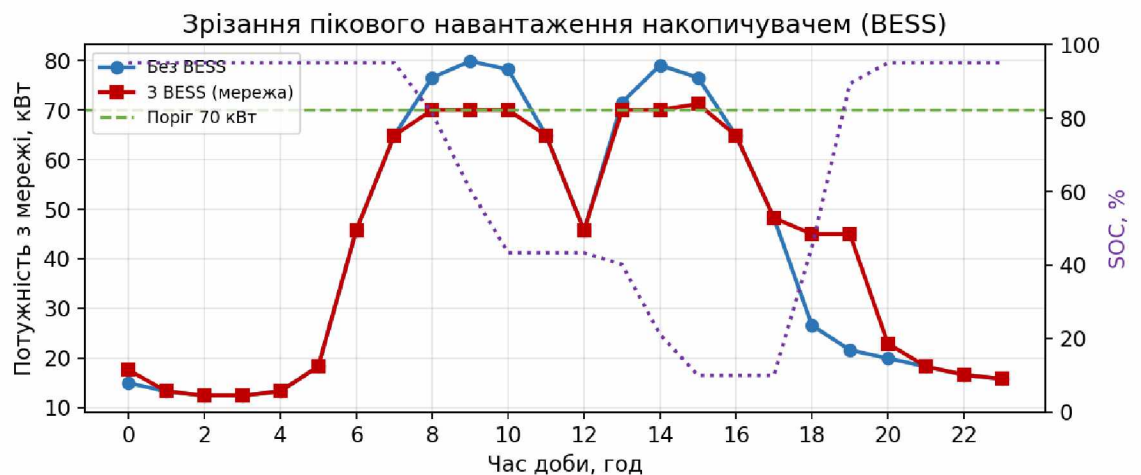


Рисунок 4.3 — Зрізання пікового навантаження накопичувачем (BESS)

Ефективність зрізання піку оцінюється коефіцієнтом

$$k_{\text{зр}} = \frac{P_{\text{пik,до}} - P_{\text{пik,після}}}{P_{\text{пik,до}}} \cdot 100 \%. \quad (4.5)$$

За результатами моделювання максимальне навантаження на мережу знижується з 79,8 кВт до 71,2 кВт, тобто на 10,8 %. Коефіцієнт завантаження трансформатора в пікові години зменшується з $\beta = 0,523$ до $\beta = 0,472$, що збільшує резерв потужності та подовжує термін служби обладнання. Окрім зрізання піку, накопичувач вирівнює добовий графік навантаження, що позитивно впливає на роботу мережі загалом [35]. Сумарні добові втрати потужності при цьому незначно знижуються — з 7,34 кВт·год до 7,01 кВт·год

(на 4,5 %), оскільки основний ефект полягає не у зменшенні переданої енергії, а в перерозподілі її в часі.

Слід зазначити, що додатковою перевагою BESS є можливість роботи в режимі джерела безперебійного живлення для відповідальних споживачів цеху під час короткочасних перерв у зовнішньому електропостачанні, що особливо актуально для умов України. Ця функція може бути реалізована перемиканням перетворювача в автономний режим і є напрямом подальшого розвитку моделі.

4.4 Сценарій 3 — впровадження пристрою плавного пуску компресора

Дослідження пікового режиму (підрозділ 3.4.2) показало, що прямий пуск асинхронного двигуна компресорної установки спричиняє просідання напруги до 5,46 %, що наближається до межі допустимого та негативно впливає на роботу інших електроприймачів цеху. Третій сценарій передбачає встановлення пристрою плавного пуску (УПП), що обмежує пусковий струм двигуна.

Пусковий струм асинхронного двигуна при прямому пуску визначається кратністю пуску:

$$I_{\text{пуск}} = k_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}}, \quad (4.6)$$

де $k_{\text{п}}$ — кратність пускового струму (для прямого пуску $k_{\text{п}} \approx 6 \dots 7$); $I_{\text{ном}}$ — номінальний струм двигуна.

Номінальний струм двигуна компресора потужністю 30 кВт ($\cos \varphi = 0,8$) становить близько 57 А, отже при прямому пуску пусковий струм сягає $6,5 \cdot 57 \approx 370$ А. Пристрій плавного пуску обмежує цю кратність до $k_{\text{п}} \approx 3$, тобто пусковий струм зменшується приблизно до 171 А. Просідання напруги в точці приєднання приблизно пропорційне струму, тому очікуване зменшення просідання оцінюється виразом

$$\Delta U_{\text{упп}} \approx \Delta U_{\text{ном}} + (\Delta U_{\text{пуск}} - \Delta U_{\text{ном}}) \cdot \frac{k_{\text{п.упп}}}{k_{\text{п.прям}}}. \quad (4.7)$$

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати моделювання пуску компресора з УПП та без нього наведено на рисунку 4.4. Видно, що пристрій плавного пуску знижує піковий струм через трансформатор з 272 А до 197 А та розтягує процес пуску в часі (з $\sim 0,3$ с до $\sim 1,4$ с), що принципово змінює характер перехідного процесу.

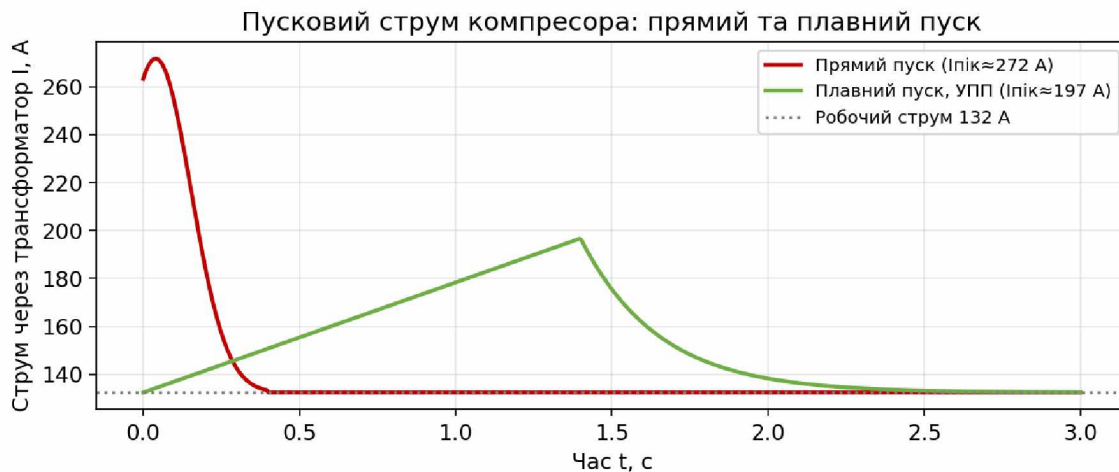


Рисунок 4.4 — Пусковий струм компресора: прямий та плавний пуск

За результатами моделювання просідання напруги при пуску зменшується з 5,46 % до 3,46 %, тобто на 37 %. Це забезпечує надійний запас за відхиленням напруги відносно норми ДСТУ EN 50160 [16] та усуває ризик впливу пускових процесів на чутливі електроприймачі. Додатковими перевагами УПП є зменшення механічних навантажень у приводі компресора та збільшення міжремонтного періоду обладнання [26, 31].

4.5 Порівняльна оцінка сценаріїв модернізації

Розглянуті сценарії спрямовані на різні аспекти підвищення ефективності та якості електропостачання, а тому не виключають, а доповнюють один одного. Для їх об'єктивного зіставлення в таблиці 4.1 наведено зведені кількісні показники, отримані за допомогою цифрового двійника.

Таблиця 4.1 — Порівняння сценаріїв модернізації СЕП цеху

Показник ефекту	База	СЕС	ВЕСС	УПП
Зниження пікового навантаження, %	—	14,7	10,8	—
Зниження просідання ΔU при пуску, %	—	—	—	37
Зниження добових втрат ΔP, %	—	34	4,5	—
Завантаження трансф. β у пік	0,523	0,447	0,472	0,523
Покриття добового споживання, %	0	19,1	0	0
Покращення якості напруги	—	так	частк.	так

Для наочності відносні ефекти за трьома ключовими критеріями узагальнено на діаграмі (рисунок 4.5).

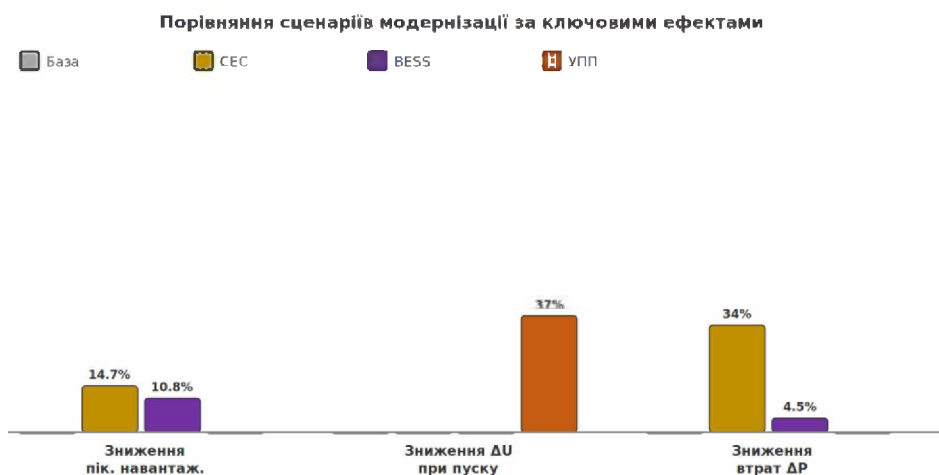


Рисунок 4.5 — Порівняння сценаріїв модернізації за ключовими ефектами

Аналіз результатів дає змогу зробити такі висновки щодо доцільності кожного сценарію. Сценарій 1 (СЕС) забезпечує найбільший енергетичний та економічний ефект — зниження споживання з мережі та найбільше зменшення втрат (на 34 %), а також підвищує енергетичну незалежність підприємства. Сценарій 2 (ВЕСС) найкраще вирішує задачу вирівнювання графіка навантаження і зрізання піків, а також відкриває можливість резервного

живлення. Сценарій 3 (УПП) є найдешевшим і точково усуває проблему просідань напруги під час пуску потужних двигунів.

З огляду на отримані результати, оптимальною стратегією модернізації СЕП цеху є поетапне впровадження: першочергово — пристрій плавного пуску компресора (мінімальні витрати за значного покращення якості напруги), далі — дахова СЕС (найбільший економічний ефект), і на завершальному етапі — система накопичення енергії (підвищення надійності та гнучкості). Поєднання СЕС і BESS дає синергійний ефект: накопичувач може запасати надлишок сонячної генерації для використання у вечірній пік, що додатково підвищує самоспоживання та незалежність від мережі.

Виконане дослідження наочно демонструє основну практичну цінність цифрового двійника: усі сценарії опрацьовано на моделі, без жодних втручань у роботу реального обладнання та без ризиків для виробничого процесу. Це підтверджує, що розроблений двійник є не лише засобом моніторингу, а й інструментом обґрунтування інвестиційних та технічних рішень з розвитку системи електропостачання [13, 21].

Висновки до розділу 4

1. За допомогою розробленого цифрового двійника досліджено три сценарії модернізації системи електропостачання механічного цеху: інтеграцію дахової СЕС, встановлення системи накопичення енергії та впровадження пристрою плавного пуску компресора. Усі сценарії опрацьовано виключно на імітаційній моделі, без втручання у роботу реального обладнання.

2. Сценарій інтеграції СЕС потужністю 30 кВт забезпечує покриття близько 19 % добового споживання, зниження максимального нетто-навантаження на 14,7 % та зменшення добових втрат потужності на 34 %. За повного самоспоживання генерації очікувана річна економія становить близько 135 тис. грн.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Сценарій встановлення BESS ємністю 50 кВт·год забезпечує зрізання пікового навантаження на 10,8 % та зниження завантаження трансформатора в пікові години з $\beta = 0,523$ до 0,472, а також відкриває можливість резервного живлення відповідальних споживачів.

4. Сценарій впровадження пристрою плавного пуску компресора зменшує піковий пусковий струм з 272 А до 197 А та знижує просідання напруги при пуску з 5,46 % до 3,46 % (на 37 %), що повністю усуває ризик порушення норм якості напруги.

5. Обґрунтовано оптимальну стратегію поетапної модернізації (УПП → СЕС → BESS) та показано синергійний ефект поєднання сонячної генерації з накопиченням енергії. Проведене дослідження підтверджує практичну цінність цифрового двійника як інструмента обґрунтування технічних та інвестиційних рішень з розвитку СЕП підприємства.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication : White Paper. Cocoa Beach (FL) : Florida Institute of Technology, 2014. 7 p.
2. Tao F., Zhang H., Liu A., Nee A. Y. C. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019. Vol. 15, № 4. P. 2405–2415.
3. Стогній Б. С., Кириленко О. В., Праховник А. В. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення. Технічна електродинаміка. 2010. № 6. С. 44–50.
4. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015. Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ : Мінрегіон України, 2015. 124 с.
5. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems / eds. F.-J. Kahlen et al. Cham : Springer, 2017. P. 85–113.
6. Kritzinger W., Karner M., Traar G., Henjes J., Sihn W. Digital Twin in Manufacturing: A Categorical Literature Review and Classification. IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, № 11. P. 1016–1022.
7. Tao F., Qi Q. Make More Digital Twins. Nature. 2019. Vol. 573, № 7775. P. 490–491.
8. Qi Q., Tao F., Hu T. et al. Enabling Technologies and Tools for Digital Twin. Journal of Manufacturing Systems. 2021. Vol. 58. P. 3–21.
9. IEC 61850. Communication Networks and Systems for Power Utility Automation. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2003–2020.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розробив		Лазебний В.			Список використаних джерел	Літ.	Арк.
Перевірів		Пересунько І.					Акрушів
Н. Контр.		Пересунько І.				58	4
Затвердж.		Пересунько І.				КНУ гр. ЗЕЕМ-22	

10. OPC Foundation. OPC Unified Architecture Specification. Release 1.05. 2021.
URL: <https://opcfoundation.org/> (дата звернення: 10.06.2026).
11. MQTT Version 5.0 : OASIS Standard. Burlington (MA) : OASIS, 2019. 137 p.
12. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971.
13. Правила улаштування електроустановок. Вид. 4-те, переробл. й допов. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 760 с.
14. Жежеленко І. В., Саєнко Ю. Л. Показники якості електроенергії та їх контроль на промислових підприємствах. Маріуполь : ПДТУ, 2017. 320 с.
15. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023. 38 с.
16. ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010. Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (ІЕС 61000-4-30:2008, IDT). Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 56 с.
17. Simscape Electrical: User's Guide. Natick (MA) : The MathWorks, Inc., 2024.
URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/> (дата звернення: 10.06.2026).
18. Thurner L., Scheidler A., Schäfer F. et al. pandapower — An Open-Source Python Tool for Convenient Modeling, Analysis, and Optimization of Electric Power Systems. IEEE Transactions on Power Systems. 2018. Vol. 33, № 6. P. 6510–6521.
19. Brown T., Hörsch J., Schlachtberger D. PyPSA: Python for Power System Analysis. Journal of Open Research Software. 2018. Vol. 6, № 1. Art. 4.
20. Errandonea I., Beltrán S., Arrizabalaga S. Digital Twin for Maintenance: A Literature Review. Computers in Industry. 2020. Vol. 123. Art. 103316.

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

21. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.
22. ETAP: Electrical Power System Analysis Software : User Guide. Irvine (CA) : Operation Technology, Inc., 2023. URL: <https://etap.com/> (дата звернення: 10.06.2026).
23. PowerFactory: User Manual. Gomaringen : DIgSILENT GmbH, 2023. 1200 p.
24. Півняк Г. Г., Шкрабець Ф. П., Заїка В. Т. Електропостачання промислових підприємств : підручник. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2018. 600 с.
25. ДСТУ ІЕС 60909-0:2017. Струми короткого замикання в трифазних системах змінного струму. Частина 0. Розрахунок струмів (ІЕС 60909-0:2016, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 70 с.
26. Specialized Power Systems: Reference. Natick (MA) : The MathWorks, Inc., 2024. URL: <https://www.mathworks.com/help/sps/ref/> (дата звернення: 10.06.2026).
27. Statistics and Machine Learning Toolbox: User's Guide. Natick (MA) : The MathWorks, Inc., 2024. URL: <https://www.mathworks.com/help/stats/> (дата звернення: 10.06.2026).
28. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. Forecasting: Principles and Practice. 3rd ed. Melbourne : OTexts, 2021. 380 p.
29. Mohan N., Undeland T. M., Robbins W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3rd ed. Hoboken (NJ) : John Wiley & Sons, 2003. 802 p.
30. ДСТУ ІЕС 61557-12:2015. Електрична безпека в низьковольтних розподільчих мережах змінного струму до 1000 В та постійного струму до

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

1500 В. Частина 12. Прилади для вимірювання та моніторингу електричних параметрів (PMD). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 44 с.

31. ДСТУ EN 50549-1:2022. Вимоги до генеруючих установок, призначених для паралельної роботи з розподільними електромережами. Частина 1. Приєднання до мережі низької напруги (EN 50549-1:2019, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. 64 с.
32. IEC 62933-1:2018. Electrical Energy Storage (EES) Systems – Part 1: Vocabulary. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2018. 48 p.
33. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) : European Commission, Joint Research Centre. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/ (дата звернення: 10.06.2026).

					ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.249с-6	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		