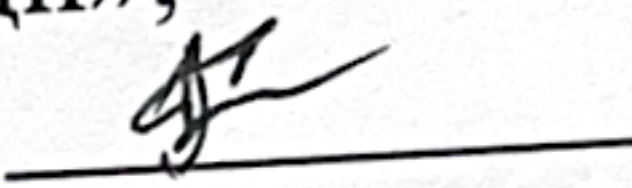


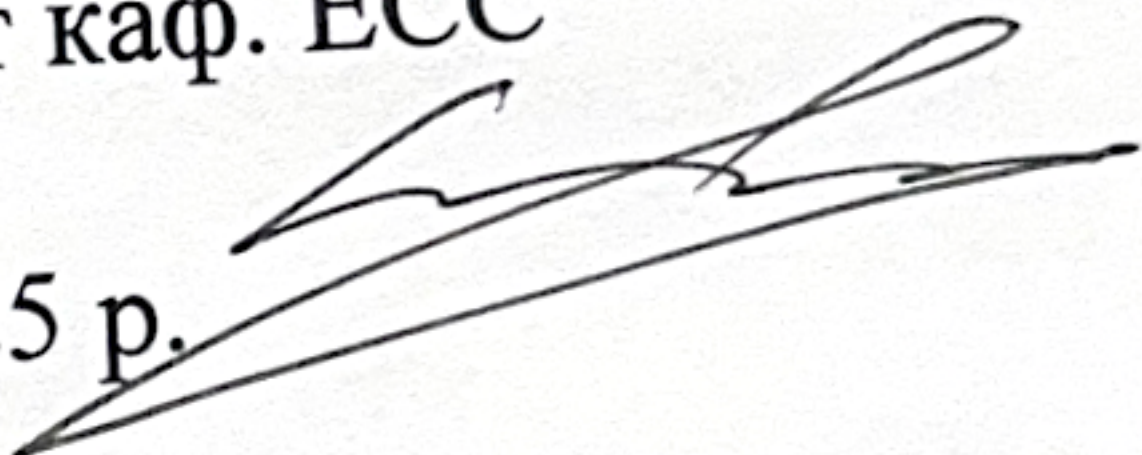
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

**АНАЛІЗ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМ**

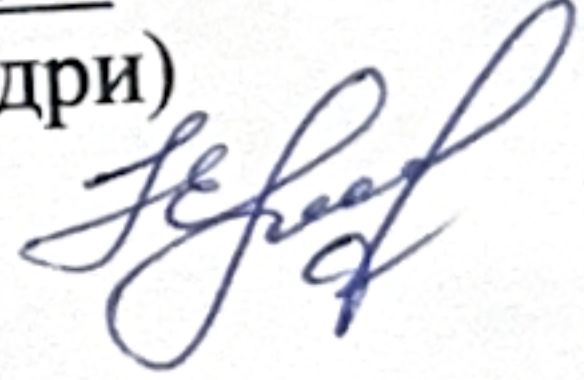
Виконав: студент 4 курсу, групи ЕС-216
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електричні станції»,
Кочура В.С. 

Керівник: к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС
Вишневський С. Я.

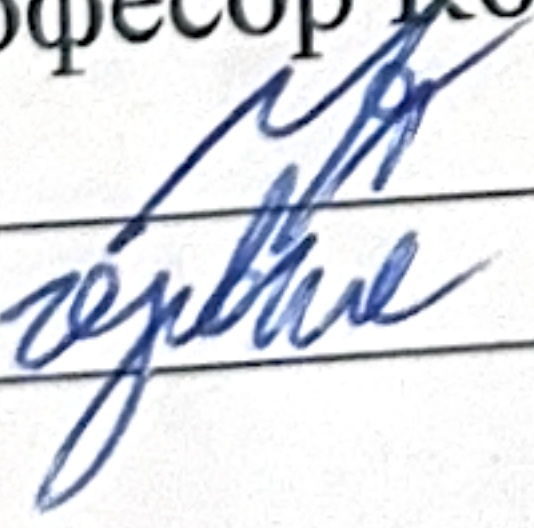
« 03 » 06 2025 р. 

Рецензент: к.т.н., доц., доц. каф. ЕСС
(наук.ступінь, вч.звання, назва кафедри)

Накака О.М.

« 09 » 06 2025 р. 

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.

« 06 » 07 2025 р. 

Вінниця ВНТУ 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перш ий (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електричні станції

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

«20» квітня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кочурі Владиславу Сергійовичу.

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Аналіз систем діагностування електрообладнання для підвищення ефективності роботи енергосистем»

Керівник роботи к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС Вишневський С.Я.

затверджена наказом вищого навчального закладу від 20.03.2025 №97

2. Термін подання студентом роботи 03 червня 2025 року

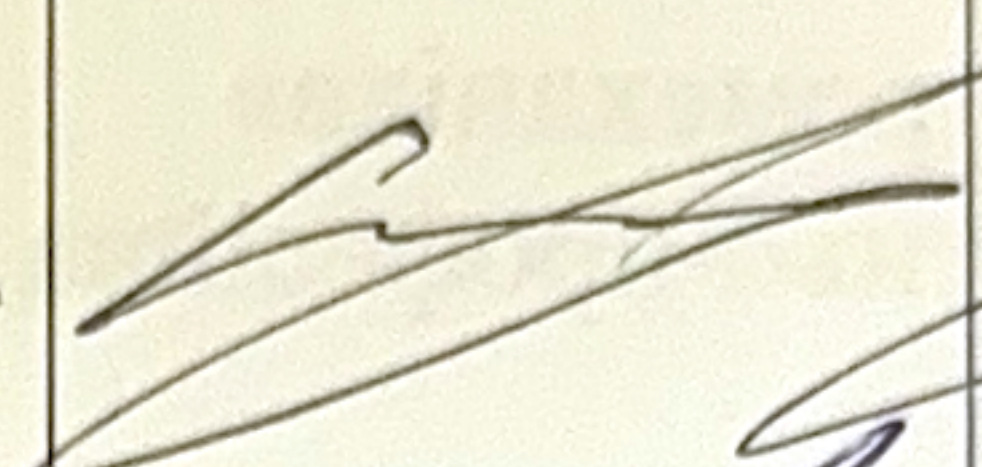
3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи:

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х. : Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
Rubanenko O. E. Determination of optimal transformation ratios of EES transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters / O.E. Rubanenko, O. Kazmiruk, V. Bandura, V. Matvijchuk O. Rubanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technology. – 2017. Кутін В. М. Рубаненко О. Є. Мисенко С. В. Методи та засоби діагностування елегазових вимикачів: монографія / В.М. Кутін, О.Є. Рубаненко, С.В. Мисенко – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 124 с.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ 2. ЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГОСИСТЕМИ 3. ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

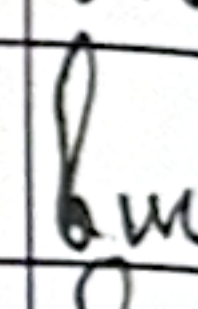
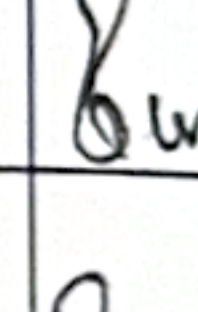
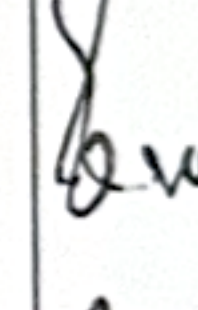
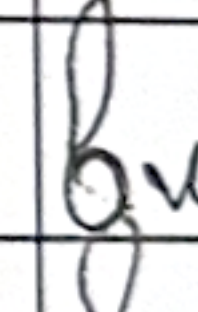
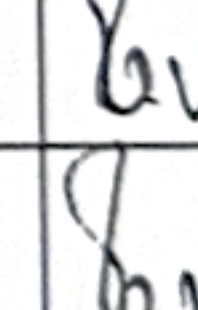
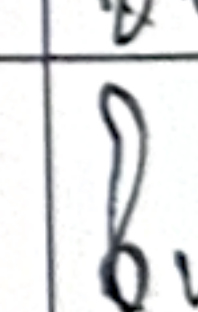
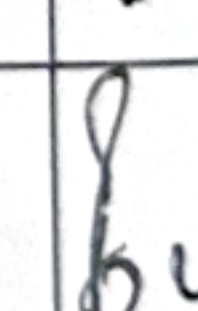
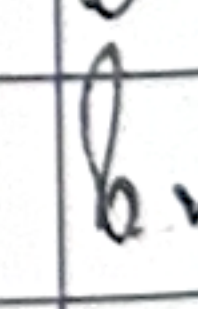
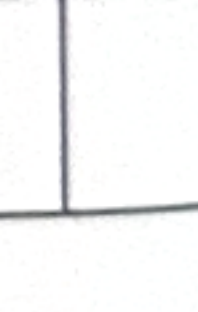
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Сучасні підходи 2. Безперервний моніторинг 3. Періодичне діагностування 4. Переваги та недоліки 5. Іноземний досвід 6. Економічний ефект 7. Огляд пристроїв. 8. Омикрон СРС100 8. Аналоги пристрою 9. Рекомендації.

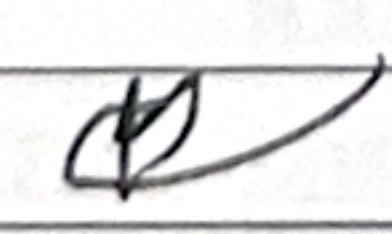
6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Вишневський С.Я. к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О.В. д. пед. н., проф., завідувач каф.		

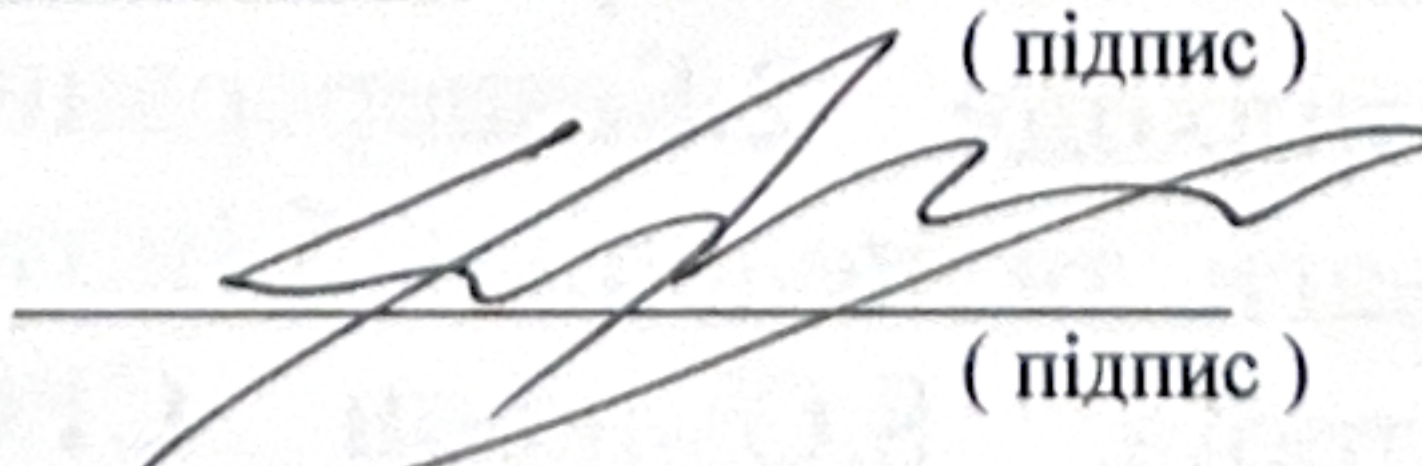
7. Дата видачі завдання 20 березня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Підпис
		початок	кінець	
1	Формування та затвердження теми БКР	16.03.2025	17.03.2025	
2	Вступ. Огляд літературних джерел	18.03.2025	20.03.2025	
4	Діагностування електрообладнання	01.04.2025	06.04.2025	
5	Діагностування елементів енергосистеми та сучасне діагностичне обладнання	19.04.2025	25.04.2025	
6	Виконання розділу охорони праці	26.04.2025	30.04.2025	
7	Формування висновків по роботі	01.05.2025	09.05.2025	
8	Оформлення пояснювальної записки	15.05.2025	20.05.2025	
9	Виконання графічної частини та оформлення презентації	21.05.2025	30.05.2025	
10	Перевірка БКР на плагіат. Попередній захист БКР	04.06.2025	05.06.2025	
11	Рецензування БКР	07.06.2025	09.06.2025	
	Захист БКР	10.06.2025	13.06.2025	

Студент Кочура В.С.

Керівник роботи


(підпис)Вишневський С.Я

АНОТАЦІЯ

УДК 621.311

Кочура Владислав Сергійович. «Аналіз систем діагностування електрообладнання для підвищення ефективності роботи енергосистем». Бакалаврська кваліфікаційна робота. – Вінниця: ВНТУ. – 2025. – 80 с. Бібліогр.: 28. Рис. : 30. Табл. : 11.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі представлено комплексне дослідження сучасних систем діагностування електрообладнання, спрямоване на підвищення ефективності функціонування енергосистем. У роботі проаналізовано теоретичні засади, класифікацію та сучасні підходи до діагностування — зокрема безперервні та періодичні методи. Розкрито технічні особливості реалізації обох підходів, виявлено їх переваги, недоліки та сфери доцільного застосування з урахуванням специфіки енергетичної галузі.

Особливу увагу приділено ролі діагностики у забезпеченні надійності експлуатації електрообладнання, зокрема трансформаторів, високовольтих вимикачів та заземлювальних пристроїв. Розглянуто приклади модернізації обслуговування та експлуатації, в яких впровадження систем технічного контролю дозволило суттєво знизити аварійність і зменшити витрати на ремонт. Проведено оцінку економічної ефективності таких систем в умовах енергетичного сектора України.

У технічній частині представлено огляд сучасного діагностичного обладнання, зокрема засобів контролю стану трансформаторного, комутаційного та заземлювального обладнання. Розглянуто принципи збору, передачі, зберігання та обробки діагностичних даних, що використовуються у сучасних контрольно-вимірювальних системах, з наведенням прикладів нормування контрольованих параметрів на реальних об'єктах. Окремо

проаналізовано порівняльні характеристики пристроїв провідних світових виробників.

Результати роботи можуть бути використані для оптимізації експлуатації електрообладнання на об'єктах генерації, передачі та розподілу електроенергії, а також у процесі впровадження інтелектуальних систем моніторингу та діагностики в українській енергетиці.

Ключові слова: діагностування, електрообладнання, трансформатор, високовольний вимикач, системи контролю, енергосистема, надійність, економічна ефективність.

ANNOTATION

UDC 621.311

Kochura Vladyslav Serhiiovych. "Analysis of Diagnostic Systems for Electrical Equipment to Improve the Efficiency of Power Systems". Bachelor's qualification thesis. – Vinnytsia: VNTU. – 2025. – 80 p. Bibliogr.: 28. Fig.: 30. Tab.: 11.

This bachelor's thesis presents a comprehensive study of modern diagnostic systems for electrical equipment aimed at improving the efficiency of power systems. The work analyzes the theoretical foundations, classification, and modern approaches to diagnostics—specifically continuous and periodic methods. The technical features of implementing both approaches are disclosed, with their advantages, disadvantages, and areas of appropriate application outlined, considering the specific characteristics of the energy sector.

Special attention is given to the role of diagnostics in ensuring the reliable operation of electrical equipment, particularly transformers, high-voltage circuit breakers, and grounding devices. Examples are provided of maintenance and operational modernization, where the implementation of technical control systems significantly reduced failure rates and repair costs. The economic effectiveness of such systems is evaluated in the context of Ukraine's energy sector.

The technical section includes an overview of modern diagnostic equipment, particularly tools for monitoring the condition of transformer, switching, and grounding equipment. The principles of data collection, transmission, storage, and processing within modern measurement and control systems are discussed, with examples of standardized diagnostic parameters at real facilities. Comparative characteristics of devices from leading global manufacturers are also analyzed.

The results of this study can be used to optimize the operation of electrical equipment at power generation, transmission, and distribution facilities, as well as

in the implementation of intelligent monitoring and diagnostic systems in Ukraine's power sector.

Keywords: diagnostics, electrical equipment, transformer, high-voltage circuit breaker, control systems, power system, reliability, economic efficiency.

ЗМІСТ

ВСТУП	
1 ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	
1.1 Аналіз сучасних підходів до діагностування електрообладнання.....	
1.2 Безперервний підхід в діагностуванні.....	
1.3 Періодичний підхід в діагностуванні.....	
1.4 Переваги та недоліки підходів.....	
2 ЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	
2.1 Приклади змін в експлуатації з впровадженням сучасних підходів в діагностуванні електрообладнання.....	
2.2 Можливий економічний ефект від впровадження діагностування в енергетичному секторі України.....	
3 ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГОСИСТЕМИ.....	
3.1 Діагностування трансформаторів.....	
3.2 Діагностування високовольних вимикачів.....	
3.3 Діагностування заземлювальних пристроїв.....	
4 СУЧАСНЕ ДІАГНОСТИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ	
4.1 Діагностичні пристрої контролю стану трансформаторного обладнання.....	
4.2 Діагностичні пристрої контролю стану аземлюючих пристроїв та вимірювання опору	
4.3 Діагностичні пристрої контролю стану комутаційного високовольного обладнання.....	
5 Охорона праці	
5.1 Технічні рішення з безпечної організації робіт	
5.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць.....	
5.1.2 Електробезпека.....	

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	
5.2.1 Мікроклімат.....	
5.2.2 Склад повітря робочої зони.....	
5.2.3 Виробниче освітлення.....	
5.2.4 Виробничий шум.....	
5. Пожежна безпека	
ВИСНОВКИ.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	
ДОДАТОК А Протокол перевірки навчальної роботи.....	
ДОДАТОК Б.....	

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку енергетичної галузі зростають вимоги до надійності, безпеки та ефективності функціонування електрообладнання. Високий рівень автоматизації, цифровізації та ускладнення топології енергосистем потребує своєчасного виявлення і прогнозування відмов обладнання ще до того, як вони переростуть у критичні ситуації. У цьому контексті особливого значення набувають системи діагностування, які дозволяють не лише оперативно виявляти дефекти, а й управляти технічним станом об'єктів на основі аналітичних та прогностичних даних.

Діагностування електрообладнання перетворюється з допоміжної функції на стратегічний елемент забезпечення надійної роботи енергосистем. Традиційні підходи, орієнтовані переважно на регламентне технічне обслуговування, поступово поступаються місцем гнучким, інтелектуальним методикам технічного контролю. Сучасні технології — зокрема системи безперервного моніторингу, цифрові платформи аналізу даних, методи штучного інтелекту — створюють умови для переходу до принципово нового рівня експлуатації електроенергетичного обладнання.

Особливої актуальності ця тема набуває для України, де в умовах нестабільної роботи енергосистеми через техногенні, економічні й воєнні фактори зростає потреба в ранньому виявленні технічних загроз. Значна частина електрообладнання експлуатується понад нормативний термін служби, що зумовлює високі ризики аварій та незапланованих простоїв. Впровадження сучасних систем діагностування в українських реаліях є не лише технічно доцільним, а й стратегічно необхідним кроком до зміцнення енергетичної безпеки держави.

Мета роботи полягає у дослідженні сучасних систем і методів діагностування електрообладнання, їх впливу на ефективність

функціонування енергосистеми, а також у виявленні переваг, недоліків та потенціалу впровадження таких систем в Україні.

Основні завдання дослідження:

- провести аналіз сучасних підходів до діагностування електрообладнання;
- дослідити принципи безперервного та періодичного контролю технічного стану;
- оцінити роль діагностики у підвищенні надійності експлуатації обладнання;
- надати приклади сучасних діагностичних пристроїв та методів;
- обґрунтувати економічну доцільність впровадження діагностики в енергетичному секторі України.

Об’єкт дослідження — системи діагностування електрообладнання, що використовується в енергетичних мережах.

Предмет дослідження — технології, методи та засоби контролю технічного стану елементів енергосистем з метою підвищення їх ефективності та надійності.

Практичне значення роботи полягає у формуванні рекомендацій щодо впровадження сучасних систем діагностування в експлуатаційній практиці підприємств електроенергетики України. Результати можуть бути використані під час модернізації існуючих об’єктів, проєктування нових підстанцій, а також для оптимізації технічного обслуговування критичного обладнання в умовах обмежених ресурсів.

1 ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

1.1 Аналіз сучасних підходів до діагностування електрообладнання

В умовах активного розвитку електроенергетики як в Україні, так і в усьому світі, значно зростають вимоги до надійності та ефективності роботи електрообладнання. Однією з ключових умов забезпечення високої надійності є своєчасне та якісне діагностування технічного стану обладнання. Сучасні підходи до діагностування електрообладнання орієнтовані на оперативне виявлення можливих дефектів і несправностей, що дозволяє уникнути серйозних пошкоджень та зменшити витрати на обслуговування і ремонти. Для повноцінного аналізу існуючих методів і технологій важливо розглянути не тільки світові практики, але й особливості, притаманні українській електроенергетичній галузі.

Основні підходи до діагностування електрообладнання

На сьогодні виділяються два базових підходи до діагностики електрообладнання: безперервний (або онлайн-моніторинг) та періодичний (офлайн-моніторинг). Кожен з цих підходів має свої особливості, переваги та недоліки, що визначають область його ефективного застосування.

Безперервний підхід передбачає постійний моніторинг стану обладнання за допомогою спеціалізованих діагностичних систем і датчиків, які дозволяють оперативно отримувати інформацію про поточний стан електроустановок. Такий підхід дає змогу швидко реагувати на будь-які зміни в параметрах роботи обладнання, що дозволяє мінімізувати ризики виникнення аварійних ситуацій.

Прикладом ефективного застосування онлайн-моніторингу є сучасні силові трансформатори, обладнані системами моніторингу температури обмоток і масла, часткових розрядів, газового складу масла та інших параметрів. Такі системи набули широкого поширення в енергетичних компаніях США, Німеччини, Японії та інших країн з високими стандартами надійності. В Україні цей підхід активно впроваджується на великих

підстанціях та трансформаторних установках НЕК «Укренерго» та інших великих підприємств енергетики.

Іншим ключовим напрямом безперервного підходу є застосування сучасних технологій «Інтернету речей» (Internet of Things, IoT), які дозволяють створювати розподілені мережі датчиків для контролю стану енергетичних об'єктів. Наприклад, у країнах ЄС активно впроваджуються проєкти, що передбачають обладнання електрооб'єктів «розумними» датчиками з можливістю передачі інформації в реальному часі на централізовані системи моніторингу та управління. В Україні поки що такі системи мають обмежене поширення, проте поступово стають більш актуальними на тлі впровадження європейських стандартів у сфері енергетики.

Періодичний підхід до діагностики передбачає виконання перевірок і вимірювань у встановлені терміни, наприклад раз на рік або після певного періоду експлуатації. Цей підхід традиційно широко застосовується в Україні та інших країнах пострадянського простору. Він полягає у регулярному проведенні технічних оглядів, вимірювань параметрів ізоляції, електричних характеристик обладнання, діагностики трансформаторного масла, перевірки роботи комутаційних апаратів та заземлювальних пристроїв.

Періодичний підхід менш витратний на етапі впровадження порівняно з безперервним, але має низку обмежень, пов'язаних із затримками у виявленні дефектів та меншою точністю оцінки поточного технічного стану обладнання. Тому, незважаючи на його економічну привабливість, цей підхід поступово поступається місцем більш сучасним та ефективним онлайн-системам.

Порівняння досвіду України та зарубіжних країн

Аналіз сучасних тенденцій у діагностуванні електрообладнання свідчить, що країни Західної Європи, США та Японії вже досить давно перейшли на переважне застосування онлайн-систем моніторингу стану обладнання. Це пояснюється високими вимогами до надійності енергопостачання, жорсткими регуляторними вимогами та значними економічними втратами у разі аварійних ситуацій.

В Україні впровадження онлайн-моніторингу проходить значно повільніше через фінансові обмеження та наявність значної кількості застарілого обладнання. Водночас, у країні відзначається позитивна динаміка у цій сфері завдяки модернізації електричних мереж, інтеграції у європейську енергетичну систему та підвищенню вимог до надійності енергопостачання.

Отже, сучасні підходи до діагностування електрообладнання включають дві основні концепції: безперервний (онлайн) та періодичний (офлайн) моніторинг. У світовій практиці онлайн-підхід має явні переваги, хоча він і потребує значних початкових інвестицій. В Україні наразі співіснують обидва підходи, але спостерігається поступовий перехід до більш ефективних онлайн-систем.

1.2 Безперервний підхід в діагностуванні електрообладнання

Безперервний підхід у діагностуванні електрообладнання передбачає постійний автоматизований моніторинг стану обладнання за допомогою інтегрованих систем датчиків і вимірювальних пристроїв. Він набуває дедалі більшого поширення у світі завдяки здатності забезпечувати своєчасне виявлення дефектів, зменшувати кількість аварійних ситуацій, підвищувати ефективність та безпеку експлуатації електроенергетичних об'єктів.

Концепція безперервного моніторингу

Безперервний моніторинг – це система постійного збору інформації, яка дозволяє в режимі реального часу оцінювати технічний стан обладнання. Впровадження таких систем стає стандартом для високовольтних електромереж та генеруючих об'єктів в розвинених країнах.

Системи безперервного моніторингу побудовані на основі сучасних цифрових технологій, таких як Інтернет речей (IoT), Big Data, хмарні сервіси та штучний інтелект (AI). Це дозволяє забезпечити інтеграцію великої кількості різних датчиків, аналізувати значні обсяги даних, проводити прогнозування стану обладнання та надавати оперативні рекомендації для обслуговуючого персоналу.

Основні технології безперервного діагностування

Наразі в Україні і в світовій практиці поширені такі технології безперервного діагностування електрообладнання:

Системи онлайн-діагностики трансформаторів. Включають в себе постійний контроль температури, рівня часткових розрядів, стану ізоляції за допомогою газового аналізу масла (DGA – Dissolved Gas Analysis). Прикладом є системи виробництва Siemens (SITRAM TDCM), ABB (TXpert Ecosystem) та на потужних трансформаторах підстанцій 750 і 330 кВ, які мають критичне значення для енергосистеми.

Системи безперервного моніторингу високовольтних вимикачів. Дозволяють в режимі реального часу контролювати стан контактних з'єднань, час спрацювання, електромеханічні характеристики вимикача, рівень нагрівання та вібрації. Відомі рішення від ABB (AssetShield), Siemens (SIPROTEC Compact) та Schneider Electric (EcoStruxure Power Monitoring Expert).

Безперервний моніторинг ізоляції кабельних ліній. Системи моніторингу кабельних ліній дозволяють оперативно ідентифікувати місця погіршення ізоляції та часткові розряди, що є критичним для високовольтних кабельних мереж у великих містах. Такі системи впроваджені у Франції активно розвиваються в міських електромережах Києва та Одеси.

Інтегровані IoT-системи для управління активами (Asset методи та додатково враховують зовнішні фактори (навантаження, погода, режими роботи), що дозволяє реалізувати ефективне управління життєвим циклом обладнання. Прикладом такого рішення є система ABB Ability,

Переваги впровадження безперервного діагностування

Застосування безперервного моніторингу дозволяє суттєво підвищити надійність експлуатації електрообладнання завдяки таким перевагам:

- Зменшення ризиків аварійних ситуацій. Безперервний моніторинг дозволяє виявляти дефекти на початкових етапах, зменшуючи ймовірність серйозних аварій.
- Підвищення оперативності реагування. Отримання інформації в реальному часі дозволяє оперативно реагувати на зміну технічного стану обладнання, що скорочує час простоїв та мінімізує економічні втрати.
- Зниження витрат на обслуговування. Безперервний моніторинг забезпечує перехід від планово-попереджувального до технічного обслуговування за станом (condition-based maintenance), що дозволяє оптимізувати фінансові витрати.
- Покращення точності діагностики. Завдяки накопиченню та аналізу даних за тривалий період з використанням AI-технологій точність діагностичних висновків значно зростає.

Зарубіжний досвід і можливості для України

Світовий досвід використання безперервного моніторингу електрообладнання демонструє високі економічні показники. Наприклад, у США та Німеччині внаслідок впровадження безперервного моніторингу середній час простою обладнання зменшився на 25–30%, а загальні витрати на обслуговування скоротилися приблизно на 20–40%.

Для України важливим є системне впровадження безперервних систем діагностики на ключових енергооб'єктах. Першочерговим кроком може бути створення національних пілотних проєктів на об'єктах Укренерго, атомних електростанціях, великих ТЕС та ГЕС із застосуванням сучасних цифрових рішень. Також доцільним є розвиток вітчизняного виробництва та сервісних центрів, які б забезпечували впровадження та обслуговування таких систем.

Безперервний підхід в діагностуванні електрообладнання є високоефективним інструментом забезпечення надійності роботи енергетичних систем, що підтверджується практикою розвинених країн. Активне впровадження таких систем в Україні дозволить знизити витрати на технічне обслуговування, підвищити надійність роботи енергосистеми та забезпечити сталий розвиток національної енергетичної інфраструктури.

1.3 Періодичний підхід у діагностуванні електрообладнання

Періодичний підхід до діагностування електрообладнання передбачає регулярну оцінку технічного стану пристроїв та агрегатів з фіксованою періодичністю, яка визначається нормами та правилами експлуатації обладнання. Незважаючи на зростаючу популярність безперервного моніторингу, періодичний підхід залишається основним методом діагностики для багатьох електроенергетичних об'єктів України та інших країн світу. Цей метод дозволяє ефективно контролювати технічний стан обладнання та своєчасно визначати необхідні профілактичні заходи, що забезпечує надійність експлуатації електроенергетичних систем.

Основні принципи періодичного діагностування

Періодичний підхід базується на плановому, систематичному проведенні вимірювань, випробувань та аналізу стану електрообладнання. Ключовими складовими цього підходу є:

Регламентовані періоди проведення діагностики. Зазвичай періоди визначаються нормативними документами (ПУЕ, СОУ НЕК Укренерго, нормативами НКРЕКП тощо) та враховують тип обладнання, його експлуатаційні умови та ризики можливих пошкоджень.

Планово-попереджувальні випробування. Включають в себе вимірювання основних параметрів роботи обладнання, таких як опір ізоляції, характеристики контактних з'єднань, втрати в обмотках трансформаторів, параметри комутації вимикачів, рівень часткових розрядів та інші.

Застосування спеціалізованих переносних діагностичних пристроїв. Для періодичного контролю використовуються переносні діагностичні комплекси, такі як мікроомметри, мегомметри, пристрої для вимірювання часткових розрядів, аналізатори трансформаторного масла, пристрої для тестування високовольтних вимикачів та інше.

Сучасні методи та технології періодичного діагностування

Сучасний періодичний підхід значно розширився завдяки розвитку цифрових технологій та портативних діагностичних приладів, які дозволяють підвищити точність та оперативність діагностики. Серед найпоширеніших технологій та методів можна виокремити:

Термографічний контроль. Інфрачервона термографія дозволяє безконтактно і ефективно визначати перегрівання електрообладнання, що може свідчити про погіршення контактних з'єднань, дефекти ізоляції або перевантаження.

Діагностика ізоляції методом часткових розрядів (ЧР). Використовується для виявлення дефектів ізоляції, що виникають у високовольтних трансформаторах, кабельних лініях та вимикачах. Приклади обладнання: пристрої ICMsystem (Австрія), PD-Scout (Omicron), PDS Insight

Газохроматографічний аналіз трансформаторного масла (DGA). Періодичний аналіз масла дозволяє визначати стан ізоляції трансформаторів і вчасно виявляти дефекти, що розвиваються. Цей метод активно застосовується в Україні на підстанціях 110–750 кВ.

Вимірювання часу спрацювання високовольтних вимикачів. Використовується спеціальне обладнання для визначення часових характеристик вимикачів (наприклад, МІКО-7 від SKB EP, ТМ-1800 від погіршення технічних характеристик вимикачів.

Переваги періодичного підходу

Незважаючи на впровадження безперервних систем моніторингу, періодичний підхід зберігає свою актуальність завдяки таким перевагам:

- Доступність та простота впровадження. Періодична діагностика не потребує значних капітальних витрат на встановлення стаціонарних датчиків і обладнання.
- Перевіреність та надійність методик. Методи періодичного контролю чітко стандартизовані та перевірені багаторічною практикою експлуатації електроенергетичного обладнання.
- Економічна доцільність. Для багатьох невеликих підприємств та електричних мереж періодичний підхід залишається більш економічно вигідним, особливо у випадку невеликої кількості обладнання.

Зарубіжний досвід застосування періодичного підходу

Досвід країн Європи (Німеччина, Франція, Великобританія), США та Японії свідчить, що періодичний підхід широко використовується для обладнання, яке не є критичним або для якого установка безперервного моніторингу є економічно недоцільною. У розвинених країнах періодичний підхід найчастіше інтегрують у комбіновані стратегії обслуговування, які включають як безперервний моніторинг, так і періодичні контрольні вимірювання.

Періодичний підхід у діагностуванні електрообладнання продовжує відігравати важливу роль завдяки простоті впровадження, економічній доцільності та перевірності методик. Водночас для підвищення ефективності діагностики і забезпечення надійності роботи енергосистем рекомендується використовувати періодичний підхід у поєднанні з безперервним моніторингом, що дозволяє досягнути оптимального балансу між витратами та ефективністю.

1.4 Переваги та недоліки підходів до діагностування електрообладнання

У практиці експлуатації енергетичного обладнання використовують переважно два підходи до діагностики: безперервний (онлайн-моніторинг) та періодичний (регламентний). Обидва методи мають свою область

застосування, специфічні технічні особливості та економічну доцільність. Вибір того чи іншого підходу залежить від важливості обладнання, ступеня його зносу, умов експлуатації, вартості відмови та можливостей інфраструктури.

Порівняльна характеристика підходів

Критерій	Безперервний моніторинг	Періодичний контроль
Частота збору даних	Постійна	З фіксованим інтервалом (дні, тижні, місяці)
Оперативність реагування	Висока (в реальному часі)	Обмежена затримкою до чергової перевірки
Точність прогнозування	Висока, особливо при використанні аналітики	Низька або середня
Вартість впровадження	Висока (встановлення сенсорів, каналів зв'язку, обробка даних)	Середня або низька
Обсяг даних для аналізу	Великий, потребує інфраструктури	ІТ- Обмежений, не вимагає складних систем
Необхідність персоналу	Менша після налаштування	Вимагає регулярної участі персоналу
Застосування	Критичні об'єкти, підстанції 330–750 кВ, великі трансформатори, пріоритету, розподільчі високовольтні вимикачі	Об'єкти нижчого мережі 35–110 кВ

Переваги безперервного підходу

- Виявлення дефектів на ранній стадії: дозволяє запобігти аваріям ще до появи помітних ознак пошкодження.
- Прогнозування ресурсу обладнання: на основі динамічних змін параметрів можливе оцінювання залишкового ресурсу.

- Можливість реалізації автоматизованої системи управління технічним станом: зменшує навантаження на персонал.
- Забезпечення роботи без зупинки: діагностика проводиться без необхідності виведення обладнання з експлуатації.

Недоліки безперервного підходу

- Висока вартість: встановлення та обслуговування систем потребують значних інвестицій.
- Необхідність кваліфікованих кадрів: для аналізу та інтерпретації великих обсягів даних.
- Потреба в ІТ-забезпеченні: сервіси збору, зберігання, аналізу даних, кіберзахисту.
- Чутливість до зовнішніх факторів: помилки датчиків, перебої зв'язку, хибні спрацювання.

Переваги періодичного підходу

- Простота організації: не потребує спеціального ІТ-інфраструктурного забезпечення.
- Відносна дешевизна: основні витрати зводяться до оплати праці персоналу та обслуговування вимірювального обладнання.
- Зрозумілість та сталість методик: регламентовані державними та галузевими стандартами.
- Універсальність: підходить для більшості типів обладнання незалежно від складності.

Недоліки періодичного підходу

- Інформаційна інертність: дані про стан обладнання оновлюються лише у встановлені терміни.
- Ризик несподіваних відмов: дефекти можуть виникнути між плановими перевірками.
- Трудомісткість: потреба у виїзді бригади, оформленні протоколів, інтерпретації результатів вручну.

- Обмеження застосування: недостатня ефективність для критично важливих об'єктів (особливо при роботі в пікових режимах).

Комбіновані підходи та сучасна практика

У сучасній практиці найефективнішою вважається комбінована стратегія, яка передбачає поєднання обох методів. Найчастіше безперервному моніторингу підлягають:

- трансформатори з напругою 220 кВ і вище;
- вимикачі 330–750 кВ;
- системи з великим економічним або стратегічним значенням.

Для решти елементів мережі (вторинні кола, обладнання РУ 35 кВ, кабельні лінії) перевагу надають періодичним перевіркам. Окрім того, в Україні активно впроваджується концепція умовно-орієнтованого обслуговування прийняття рішень про періодичні втручання.

Рекомендації щодо впровадження в умовах України

Враховуючи економічні реалії, стан енергетичної інфраструктури та обмеженість ресурсів, доцільно:

- впроваджувати безперервний моніторинг для високовольтного та критичного обладнання;
- зберігати періодичний підхід для розподільчих мереж нижчих класів напруги;
- використовувати комбіновану систему в умовах промислових центрів та ЛЕС (локальних енергосистем);
- поступово переходити до умовно-орієнтованого обслуговування за рахунок поетапної цифровізації.

ЗНАЧЕННЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

2.1 Приклади змін в експлуатації з впровадженням сучасних підходів в діагностуванні електрообладнання

Упровадження сучасних систем діагностування електрообладнання суттєво трансформувало підходи до експлуатації в енергетиці. У традиційній моделі обслуговування основним підходом були регламентні огляди за встановленим графіком, незалежно від реального технічного стану обладнання. Це часто призводило або до недооцінки пошкоджень, або до надмірного сервісного втручання. Перехід до умовно-орієнтованого технічного обслуговування, що ґрунтується на постійній або частій діагностиці, дозволив більш гнучко реагувати на дійсний стан техніки та економити ресурси.

Зміни в експлуатації при впровадженні онлайн-моніторингу

1. Приклад: впровадження моніторингу трансформаторного обладнання на підстанціях 330–750 кВ

Раніше трансформатори підлягали перевіркам раз на рік або при виникненні підозрілих ознак. Після встановлення систем онлайн-контролю (наприклад, Siemens Sensformer або українські системи контролю часткових розрядів) змінилося:

- Час виявлення дефекту скоротився з тижнів до лічених годин.
- Зменшено кількість аварійних ситуацій на 30–50% на об'єктах, що були обладнані системами моніторингу.
- Скорочено витрати на ремонт завдяки вчасному усуненню дрібних дефектів до того, як вони переросли в серйозні пошкодження.

2. Приклад: моніторинг високовольтних вимикачів

Високовольтні вимикачі 330 кВ та вище, особливо в мережах Укренерго, отримали цифрове обладнання, здатне фіксувати напрацювання механізмів, тиск в камерах, вологість тощо. Після впровадження:

- Інтервал між регламентними оглядами було збільшено майже вдвічі.
- Тривалість аварійних зупинок зменшилась завдяки підготовленості ремонтних бригад, які заздалегідь знали про ймовірну несправність.

Вплив діагностики на організацію експлуатації

Внаслідок впровадження діагностики:

- Персонал зменшив кількість планових виїздів, зосередившись на цільових втручаннях.
- Зросла роль віддаленого моніторингу — за останні 5 років в Україні впроваджено понад 200 цифрових підстанцій або їхніх елементів з можливістю віддаленого контролю.
- Створено аналітичні центри при Укренерго, Центренерго, ДТЕК, які акумулюють дані з діагностики та формують профілактичні програми.

Приклад іноземного досвіду

Німеччина: У TenneT з 2017 року повністю перейшли на систему предиктивної діагностики для трансформаторів і вимикачів на основі big data-аналітики. Внаслідок цього:

- На 70% зменшено кількість аварій на обладнанні понад 30 років експлуатації.
- Скорочено середній час реакції на інцидент з 4 год до 30 хв.
- Впроваджено обов'язкову оцінку ризику перед кожною плановою зупинкою, базуючись на даних з онлайн-систем.

Польща: У рамках проєкту Smart Grid в регіонах Silesia та Mazovia реалізовано повну цифровізацію обліку та моніторингу підстанцій 110/35 кВ, що призвело до:

- Підвищення надійності електропостачання для понад 1 млн споживачів.
- Скорочення втрат електроенергії на 2,5% лише за рахунок оптимізації роботи обладнання на основі результатів діагностики.

Узагальнення змін

Показник	До впровадження діагностики	Після впровадження
Виявлення дефектів	Переважно за зовнішніми ознаками	На ранній стадії, в реальному часі
Частота обслуговування	Регламентована, незалежно від стану	Орієнтована на реальний технічний стан
Витрати на ремонт	Високі через серйозні пошкодження	Знижені завдяки профілактиці
Надійність обладнання	Залежала від плановості	Забезпечується адаптивно
Оперативність реагування	Обмежена	Майже миттєва

Таким чином, впровадження систем діагностики електрообладнання значною мірою змінило філософію експлуатації — від жорстко регламентованого до інтелектуально керованого технічного обслуговування.

Можливий економічний ефект від впровадження діагностування в енергетичному секторі України

Впровадження сучасних систем діагностування в енергетиці України є не лише технічно обґрунтованим, а й економічно доцільним кроком. На тлі значного зносу основних фондів, складної фінансової ситуації у багатьох енергетичних підприємствах та потреби в оптимізації витрат, актуальним є пошук рішень, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації обладнання без значних інвестицій у його повну заміну. Саме діагностування забезпечує такий ефект.

Зменшення витрат на аварійні простої та ремонти

Згідно з даними Укренерго та Міненерго України, щороку понад 30% витрат на обслуговування електрообладнання припадає на аварійні ремонти, які є прямим наслідком несвоєчасного виявлення дефектів. У середньому,

один аварійний вихід з ладу силового трансформатора 110–330 кВ в Україні призводить до:

- Прямих витрат на ремонт: від 3 до 15 млн грн.
- Втрат електроенергії та недоотриманої виручки через вимушене відключення споживачів: до 5 млн грн за добу.
- Зниження репутаційних показників оператора системи передачі.

Впровадження онлайн-систем діагностики дозволяє виявляти дефекти на ранніх стадіях, що дає змогу:

- Зменшити кількість аварійних виходів з ладу на 40–60%.
- Скоротити витрати на ремонти обладнання на 20–25%.

Збільшення міжремонтних інтервалів

Завдяки переходу до обслуговування за фактичним станом обладнання, підприємства можуть:

- Скоротити кількість непотрібних планових зупинок, які не виправдані з точки зору технічного стану.
- Оптимізувати графіки обслуговування, що зменшує навантаження на персонал і дає змогу краще планувати ремонтні бюджети.

Приклад: У разі впровадження системи діагностики в трансформаторному парку Укргідроенерго очікуване скорочення витрат на планове обслуговування становить близько 12 млн грн/рік.

Зниження втрат електроенергії

Системи діагностики дозволяють виявляти такі дефекти, як:

- Погані контакти у з'єднаннях;
- Підвищений опір у заземлювальних пристроях;
- Часткові розряди та міжвиткові пробойи у трансформаторах.

Усунення цих дефектів сприяє зниженню втрат активної енергії, які в Україні у 2023 році становили близько **8,3%** від загального виробництва. За оцінками Інституту електродинаміки НАН України, **1% зниження втрат у магістральних мережах дає економічний ефект понад 400 млн грн/рік.**

Приклад прогнозного економічного ефекту

Сфера впливу		Річна економія (умовна оцінка для середнього оператора системи розподілу)
Зменшення зупинок	аварійних	30–60 млн грн
Зниження ремонти	витрат на	15–25 млн грн
Економія електроенергії	на втрати	20–40 млн грн
Зменшення на персонал	навантаження	5–10 млн грн
Покращення планування	фінансового	Неможливо безпосередньо оцінити, але критично важливо
Сумарний ефект		70–130 млн грн/рік

Застосування систем діагностування дозволяє досягти комплексного економічного ефекту:

- Зниження прямих і непрямих витрат;
- Підвищення ефективності та надійності роботи обладнання;
- Поліпшення управління активами та фінансового планування;
- Прискорення модернізації енергетичного сектору без надмірних інвестицій.

У контексті України, де кожна гривня витрат у енергетиці має стратегічне значення, діагностика є не лише технічним, а й економічним інструментом підвищення стійкості енергосистеми.

ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

3.1 Діагностування трансформаторів

Силові трансформатори є одними з ключових елементів у структурі енергосистем. Їхній стан безпосередньо впливає на надійність, ефективність і безперебійність передачі електроенергії. Зважаючи на високу вартість обладнання та складність його заміни або ремонту, діагностування трансформаторів набуває критичного значення як з точки зору технічної безпеки, так і економічної доцільності.

Основні принципи діагностування трансформаторів

Діагностування трансформаторів передбачає виявлення потенційних дефектів на ранній стадії для запобігання аварійним ситуаціям. Цей процес включає комплексну оцінку стану активної частини (обмотки, магнітопровід), ізоляційної системи, системи охолодження та конструктивних з'єднань.

До основних напрямів діагностування належать:

- Електричні випробування (опір обмоток, ізоляція, тангенс кута діелектричних втрат);
- Аналіз розчинених газів (DGA) у трансформаторній оливі;
- Тепловізійна діагностика;
- Вібраційний моніторинг;
- Моніторинг часткових розрядів (ЧР);
- Механічні випробування та оцінка деградації твердих ізоляторів.

Ключові методи діагностування трансформаторів

1. Аналіз розчинених газів в ізоляційній оливі (DGA)

DGA є найпоширенішим методом оцінки стану трансформатора. При деградації ізоляції або виникненні локальних перегрівів у трансформаторній

оливі утворюються характерні гази: водень (H_2), метан (CH_4), ацетилен (C_2H_2), етан (C_2H_6), монооксид вуглецю (CO), вуглекислий газ (CO_2).

Зміна концентрацій цих газів та їхніх співвідношень дозволяє визначити тип дефекту:

Тип дефекту	Характерний газ
Часткові розряди	Водень (H_2)
Локальний перегрів	Метан (CH_4), Етан (C_2H_6)
Іскрові розряди	Ацетилен (C_2H_2)

Деградація целюлозної ізоляції CO , CO_2

2. Вимірювання ізоляційних характеристик

- Тангенс кута діелектричних втрат ($\tan \delta$) — зростання значення свідчить про погіршення стану ізоляції;
- Опір ізоляції — падіння нижче допустимих меж є сигналом деградації.

3. Часткові розряди

Метод дозволяє ідентифікувати початок пробоя ізоляції або наявність дефектів у твердій або рідинній діелектриці. Моніторинг ЧР є надзвичайно важливим для запобігання миттєвим пробоям трансформаторів високої напруги (220–750 кВ).

4. Тепловізійне обстеження

Застосовується для виявлення перегрівів контактних з'єднань, розвантаження обмоток, блокування охолоджувачів, що не виявляються традиційними методами.

5. Вібраційна діагностика

Метод дозволяє виявити механічні зміщення в обмотках або порушення цілісності кріплень магнітопроводу.

Онлайн- vs офлайн-діагностика

Параметр	Офлайн-діагностика	Онлайн-діагностика
Періодичність	Раз на рік/кілька років	Постійний моніторинг
Необхідність виведення з експлуатації	Так	Ні
Повнота даних	Обмежена за часом і умовами	Постійний запис параметрів
Витрати	Менші разово, більші сумарно	Більші одноразово, менші у тривалій перспективі

Онлайн-моніторинг дає змогу реалізувати концепцію **обслуговування за фактичним станом (Condition-Based Maintenance, CBM)**, що відповідає сучасним принципам цифрової трансформації енергетики.

Приклад: впровадження діагностики DGA в Укренерго

На трансформаторах 750/330 кВ у Західному РУ впроваджено систему автоматичного контролю газів у оливі. За перший рік експлуатації вдалося попередити дві потенційні аварії (підвищення концентрації ацетилену та водню), що дозволило уникнути збитків на понад **15 млн грн**.

- Діагностування трансформаторів є базовим інструментом забезпечення безпеки енергосистеми.

- Найефективнішими є комбінації методів: DGA, $\tan \delta$, тепловізійна та вібраційна діагностика.
- Перехід до постійного онлайн-моніторингу дозволяє не лише знизити ризики, а й економити кошти через оптимізацію ремонтних графіків.
- Для України, де більшість трансформаторного обладнання вже перевищила нормативні строки служби, такі системи є критично важливими для забезпечення стабільності енергетики.

3.2 Діагностування високовольтних вимикачів

Високовольтні вимикачі є критично важливими елементами комутаційної апаратури, які виконують функції вмикання, вимикання і захисту елементів енергосистеми при нормальних і аварійних режимах роботи. Надійність та справність вимикачів безпосередньо впливають на безпеку мережі, тривалість простоїв, ефективність дій релейного захисту та аварійного відновлення живлення. Саме тому системне діагностування високовольтних вимикачів має бути невід’ємною складовою експлуатаційної стратегії енергокомпаній.

Особливості конструкції, що визначають підхід до діагностування

У сучасній практиці використовуються три основні типи високовольтних вимикачів, кожен із яких має специфічні особливості діагностики:

- Елегазові вимикачі (SF_6) – використовують шістифтористу сірку як середовище гасіння дуги.
- Вакуумні вимикачі – гасіння дуги відбувається у вакуумі, переважно використовуються до 110 кВ.
- Повітряні вимикачі – морально застарілі, але ще трапляються на об’єктах старої інфраструктури.

Найбільш поширеними на сьогодні в Україні та Європі є елегазові вимикачі, з огляду на їхню надійність, компактність і стабільну роботу при високих напругах (110–750 кВ).

Основні діагностичні параметри високовольтних вимикачів

Діагностування високовольтних вимикачів передбачає моніторинг таких груп параметрів:

1. Кінематичні характеристики переміщення:

- Час увімкнення/вимкнення;
- Швидкість руху контактів;
- Симетричність фаз;
- Віб्राції при перемиканні.

2. Електричні параметри:

- Опір головного електричного кола;
- Величина контактного зносу;

перевірка роботи магнітних приводів або пневматичних систем.

елегазові та ізоляційні параметри (для SF₆):

- Тиск газу;
- Концентрація продуктів розкладу;
- Температура навколишнього середовища.

Моніторинг електромагнітних збурень та часткових розрядів — особливо для визначення внутрішніх пошкоджень або мікротріщин в ізоляції.

Методи діагностування

Метод	Опис
Тайм-аналіз (Time-Travel)	Визначення часу увімкнення та вимкнення контактів по кожній фазі
Осцилографування контактного руху	Аналіз кривих переміщення для виявлення деформацій, перекосів, підclinювання
Мікроомметрія	Вимірювання опору головного кола для виявлення контактного зносу або окислення
Акустична діагностика	Фіксація звукових аномалій, пов'язаних з внутрішніми дефектами
Аналіз газу SF ₆	Визначення домішок, зокрема H ₂ S або HF, які вказують на деградацію контактної системи
Тепловізійна діагностика	Виявлення локального перегріву контактних з'єднань, втрат струму

Онлайн-моніторинг високовольтних вимикачів

Онлайн-системи, встановлені безпосередньо в приводах і камерах вимикачів, дозволяють:

- Аналізувати тисячі циклів увімкнення/вимкнення;
- Розпізнавати тренди деградації;
- Прогнозувати залишковий ресурс контактів;
- Ініціювати попереджувальні сигнали до SCADA чи диспетчерського пункту.

Наприклад, система **ABB Circuit Breaker Sentinel** здійснює аналіз понад 20 параметрів у режимі реального часу, передаючи дані на центральний сервер діагностики.

Приклад із практики: ВП "Південноукраїнська АЕС"

На ПУАЕС впроваджено систему контролю приводів елегазових вимикачів типу LTB145, яка дозволила зафіксувати уповільнення механізму вимкнення у фазі "С" на 15 мс. Вчасна заміна напрямного вала запобігла можливому пошкодженню трансформатора струму.

Порівняння профілактичного та діагностичного підходів

Критерій	Профілактичне обслуговування	Обслуговування за станом (CBM)
Частота	Фіксована (1–2 рази на рік)	Залежить від реального стану вимикача
Витрати	Регулярні, незалежно від стану	Оптимізовані: втручання лише при потребі
Надійність	Середня	Вища, оскільки дефекти виявляються раніше
Ризик аварій	Вище	Значно нижчий

- Діагностування високовольтних вимикачів є запорукою ефективної роботи системи релейного захисту та автоматики.
- Найефективнішою є інтеграція осцилографування, тайм-аналізу, SF₆-аналізу та термографії.

- Онлайн-моніторинг дозволяє уникнути несподіваних аварій та запровадити обслуговування за станом.
- В умовах українських енергосистем, де значна частина вимикачів експлуатується понад нормативний строк, діагностика повинна стати обов'язковою складовою операційного процесу.

3.3 Діагностування заземлювальних пристроїв

Заземлювальні пристрої відіграють ключову роль у забезпеченні електробезпеки, стійкості функціонування енергетичного обладнання та зниженні рівня електромагнітних завад. Їхній технічний стан має прямий вплив на захист персоналу від ураження струмом, ефективність роботи релейного захисту та грозозахисних систем. Відповідно, регулярне діагностування цих елементів є обов'язковим для підприємств енергетичної галузі, особливо в умовах старіння інфраструктури.

Класифікація та призначення заземлювальних пристроїв

Заземлювальні пристрої поділяються на:

- Робоче заземлення — забезпечує замикання нейтралі трансформаторів, генераторів та іншого обладнання на землю.
- Захисне заземлення — призначене для захисту персоналу від ураження при пошкодженні ізоляції.
- Грозозахисне (блискавковідвідне) — відводить імпульсні струми блискавки або комутаційні перенапруги.
- Функціональне заземлення — забезпечує стабільну роботу пристроїв автоматики, телеметрії, засобів зв'язку.

Конструктивно заземлення може бути:

- Контурне (глибоке або поверхневе);

- Променеве (у вигляді системи горизонтальних провідників);
- Комбіноване (з вертикальними електродами та горизонтальними шинами).

Основні параметри діагностування

У процесі обстеження заземлювальних пристроїв аналізуються:

Опір заземлювального пристрою (R_z):

Залежить від типу ґрунту, глибини залягання, вологості, корозійного зносу електродів;

Не повинен перевищувати нормативні значення, визначені ПУЕ, ДСТУ EN

Контактні з'єднання (механічна та електрична цілісність):

Перевірка якості зварних, болтових і пресових з'єднань;

Виявлення окислення, механічних пошкоджень.

Наявність електрохімічної корозії та механічного руйнування:

Особливо актуально для старих заземлень зі сталевими електродами.

Імпульсна провідність (для грозозахисних заземлень):

Оцінка ефективності відведення блискавкових струмів;

Перевірка за допомогою імітаційних імпульсних генераторів.

Методи діагностики заземлювальних пристроїв

Метод	Опис
Метод падіння напруги	Вимірювання опору заземлення методом потенціаломіра за триелектродною схемою

Метод	Опис
Метод змінного струму 50 Гц	Імітація реальних умов роботи пристрою при номінальній частоті
Імпульсний метод	Застосовується для вимірювання опору блискавковідвідного заземлення
Метод вимірювання перехідного опору	Дозволяє оцінити стан контактних з'єднань у системі заземлення
Інфрачервона термографія	Виявлення нагрівів у місцях підвищеного контактного опору

Сучасні прилади для діагностики

- Мегаомметри з функцією 3-полюсного вимірювання (наприклад, Metrel MI 3290 Earth Analyser);
- Цифрові тестери заземлення (Fluke 1625, Chauvin Arnoux CA 6472);
- Імпульсні аналізатори блискавкозахисту;
- Георадарні системи — для виявлення корозії електродів під землею без розкопування.

Вимоги до опору заземлення

Згідно з ДСТУ EN 50522 та ПУЕ:

- Для підстанцій 35–750 кВ — опір не повинен перевищувати 0,5–4 Ом (в залежності від рівня напруги та кліматичної зони).
- Для житлових і адміністративних будівель — до 30 Ом.
- Для грозозахисних заземлень — допускається підвищений опір до 10–15 Ом, але з обов'язковою перевіркою імпульсної провідності.

Практичний приклад

На одній із підстанцій Західного РУ виявлено перевищення опору заземлення (7,2 Ом замість нормативних 1,0 Ом). Було виконано діагностику методом 62%-падіння напруги, виявлено часткову корозію електродів. Після санації та встановлення додаткових мідних електродів опір було знижено до 0,8 Ом, що відповідає нормативам.

Ефекти впровадження діагностування

- Підвищення рівня безпеки персоналу;
- Зниження кількості відмов захисних пристроїв;
- Зменшення ризику ураження блискавкою;
- Можливість обґрунтованого прогнозування термінів заміни або санації системи.

Висновки

- Діагностика заземлювальних пристроїв має базуватись на комбінації електричних, імпульсних і структурних методів.
- Основним критерієм є опір заземлення, який має відповідати нормативним межах.
- Впровадження періодичного та безперервного моніторингу особливо актуальне для вузлових підстанцій та об'єктів критичної інфраструктури.
- Інвестиції у сучасні діагностичні комплекси дозволяють значно зменшити ризики відмов і аварій у складних кліматичних та геологічних умовах.

4 СУЧАСНЕ ДІАГНОСТИЧНЕ ОБЛАДНАННЯ

4.1 Діагностичні пристрої контролю стану трансформаторного обладнання

Стан трансформаторного обладнання має вирішальне значення для стабільної та ефективної роботи енергосистем. Трансформатори — це вузлові елементи в ланцюгу передачі електроенергії, які забезпечують зміну рівня напруги відповідно до вимог передавання, розподілу та споживання. Їхня відмова призводить до суттєвих наслідків — від фінансових втрат до масових відключень споживачів. Саме тому зростає значення впровадження діагностичних систем, здатних оперативно виявляти дефекти, оцінювати залишковий ресурс і визначати необхідність обслуговування.

Технічний розвиток у сфері моніторингу дозволив створити цілу низку пристроїв для безперервного або періодичного контролю параметрів трансформаторів. Однією з основних діагностичних задач є аналіз стану ізоляції, яка відіграє ключову роль у забезпеченні електричної міцності та надійності роботи. Для цього використовуються системи моніторингу розчинених газів в ізоляційній оливі (DGA), які дозволяють виявляти появу газів-індикаторів розкладу ізоляції, таких як водень, метан, ацетилен чи оксид вуглецю. Сучасні пристрої можуть проводити як точковий аналіз, так і безперервний онлайн-контроль, забезпечуючи високу чутливість і оперативність реагування.

Крім хімічного аналізу оливи, важливе місце займає моніторинг часткових розрядів. Виявлення та локалізація часткових розрядів дозволяє оцінити ступінь деградації твердих і рідких діелектриків. У багатьох трансформаторах високої напруги впроваджуються сенсори ультразвукового та електромагнітного випромінювання, а також імпульсні датчики струму, які дозволяють визначати місце виникнення дефектів з високою просторовою

точністю. Інтерпретація сигналів з таких пристроїв виконується за допомогою вбудованих алгоритмів або виносних систем обробки даних.

Не менш значущим є контроль температурного режиму, який здійснюється через інтегровані температурні датчики в обмотках та оливі. Рівень нагріву є прямим індикатором навантаження трансформатора та потенційної наявності дефектів в системі охолодження. У разі виявлення перегріву або його динаміки, що відхиляється від нормального профілю, система попереджає персонал про потребу у вжитті технічних заходів. Найновіші системи на основі IoT дозволяють виводити інформацію про температурні криві в реальному часі на диспетчерські пункти, інтегруючись із загальною системою SCADA.

Крім зазначених параметрів, здійснюється моніторинг напруги на вводах, струмів навантаження, положення перемикача відпаювань під навантаженням, рівня оливи, тиску газу в розширювачі, стану вентиляційної системи та герметичності. Також набувають поширення пристрої аналізу вібрацій, які дозволяють виявити механічні ослаблення, резонансні явища або дефекти кріплення. Ці дані, за умови аналітичної обробки, можуть сигналізувати про початок зниження механічної стійкості активної частини трансформатора.

Завдяки цифровій трансформації енергетики, зростає значення систем комплексної діагностики, які об'єднують кілька видів сенсорів та модулів обробки даних, формуючи узагальнену оцінку технічного стану трансформатора. Такі системи підтримують адаптивну логіку оцінювання ризику виходу обладнання з ладу, використовуючи методи штучного інтелекту, зокрема нейронні мережі та експертні системи. Інтеграція з диспетчерськими платформами дозволяє оперативно вживати заходів у разі виявлення критичних тенденцій, а також формувати довгострокові плани обслуговування, що мінімізує аварійність та витрати на експлуатацію.

У світовій практиці найбільшого поширення набули інтелектуальні системи моніторингу трансформаторів від провідних виробників, таких як (Австрія), Qualitrol (США) та Megger (Велика Британія). Ці компанії пропонують широкий спектр пристроїв, які охоплюють різні аспекти діагностики — від аналізу оливи до виявлення часткових розрядів і моніторингу температури.

1. Моніторинг розчинених газів (DGA):

- один із найвідоміших пристроїв для безперервного онлайн-моніторингу розчинених газів. Підтримує аналіз до 9 ключових газів, має вбудовану аналітику за алгоритмами Duval Triangle і IEC 60599.
- портативний прилад для польового аналізу DGA. Забезпечує точні результати та зручність для експлуатаційного персоналу.
- система, що вбудовується безпосередньо в трансформатор та забезпечує високу чутливість до початкових етапів розкладу ізоляції.

2. Контроль часткових розрядів (PD monitoring):

- мобільна система для вимірювання часткових розрядів онлайн та офлайн. Має високу роздільну здатність та може працювати на трансформаторах, вимикачах і кабелях.
- портативний детектор УЗ-сигналів часткових розрядів у високовольтному обладнанні.

3. Системи комплексного моніторингу:

- ABB CoreSense™ – інтелектуальна система моніторингу, яка об'єднує DGA, температуру, вологість та часткові розряди в єдину платформу. Підтримує інтеграцію з SCADA/EMS.

- GE Perception Fleet – хмарна платформа аналізу стану всього парку трансформаторів підприємства з прогновною аналітикою.

4. Контроль температури та навантаження:

- Qualitrol 509 – багатоканальна система вимірювання температури обмоток і оливи з можливістю аварійної сигналізації.
- ABB Fiber Optic Temperature Sensors – точні волоконно-оптичні датчики, що встановлюються безпосередньо в обмотках трансформатора.

Вимірювання вібрації:

- універсальний діагностичний прилад для вимірювання широкого спектра параметрів трансформатора, включаючи вібраційні характеристики та імпеданс.

Порівняльна характеристика

	OMICRON	GE		
Параметр	MONTESTO 200	Qualitrol TM8	ABB CoreSense	TRANSPORT X ²
Тип контролю	Часткові розряди (PD)	DGA, онлайн	Комплексний моніторинг	DGA, портативний
Спосіб встановлення	Переносний	Вбудований	Вбудований	Переносний
Кількість газів для аналізу	–	до 9	до 7	до 6
Інтерфейс	USB, Ethernet	Modbus, 4-20 mA	Modbus, Ethernet, SCADA	USB, Bluetooth

	OMICRON	GE		
Параметр	MONTESTO 200	Qualitrol TM8	ABB CoreSense	TRANSPORT X ²
Додаткові функції	Аналіз PD у різних елементах	Прогноз ресурсу ізоляції	Прогноз на базі ШІ	Автоматична калібровка

Найсучасніші рішення передбачають не окремі модулі моніторингу, а інтегровані багатофункціональні системи, які можуть адаптуватися до специфіки експлуатації трансформаторів, забезпечуючи в режимі реального часу повну картину їх технічного стану. Українські енергетичні компанії вже мають позитивний досвід впровадження пристроїв OMICRON та GE на об'єктах «Укренерго» та «ДТЕК».

Універсальний комплект для первинного інжекційного тестування, призначений для діагностики та обслуговування обладнання підстанцій

Використовується для тестування трансформаторів струму та напруги — він подає контрольний струм або напругу, щоб перевірити точність і правильність роботи цих трансформаторів, виявляючи можливі внутрішні дефекти або зміщення.

- Пристрій дозволяє діагностувати силові трансформатори, тестуючи їх обмотки на пошкодження, вимірюючи імпеданс і перевіряючи загальний стан для запобігання аваріям.
- СРС 100 використовується для перевірки вимикачів і автоматичних роз'єднувачів, контролюючи їх спрацьовування, пускові струми та час відключення, що допомагає запобігти несподіваним відмовам.
- Пристрій дозволяє тестувати кабельні лінії та лінії передачі, вимірюючи опір ізоляції і виявляючи пошкодження.

- Допомагає оцінити стан систем заземлення, визначаючи імпеданс і цілісність ліній заземлення, що критично для безпеки обладнання і персоналу.
- Він використовується для тестування обертових машин — генераторів і двигунів, перевіряючи обмотки на короткі замикання, опір і індуктивність, що дає змогу вчасно виявити проблеми.
- CPC 100 вимірює коефіцієнт потужності і тангенс кута діелектричних втрат ($\tan \delta$), що допомагає оцінити стан ізоляції і передбачити можливі відмови ізоляційних матеріалів.
- З допомогою синхронізації кількох CPC 100 (CPC Sync) можна проводити комплексні тести великих трансформаторів і складних електричних схем, які потребують одночасної інжекції струмів у кілька точок.
- Управління і автоматизація тестування здійснюється через програмне забезпечення Primary Test Manager (PTM), яке спрощує збір даних, аналіз результатів і формування звітів, що особливо важливо при регулярному технічному обслуговуванні.



Рисунок 4.1 - OMICRON CPC 100

Порти та інтерфейси

- RJ45 Ethernet порт — для підключення до ПК або мережевого хабу.
- RS-232 порт (Serial interface) — для підключення зовнішніх пристроїв, зокрема CP TD1.
- USB порт — для підключення USB-накопичувачів.
- Інтерфейс для зовнішніх засобів безпеки — дозволяє підключити:
 - зовнішню кнопку аварійної зупинки (Emergency Stop),
 - кнопку “Start/Stop”,
 - зовнішні індикатори стану (I/O warning lights),
 - пристрій CP CR500.
- AC Вихід:
 - 130V / 6A AC (запобіжник 3.15A або 6.3A),
 - 800A AC (високий струм, роз’єм з фіксацією),
 - 2kV AC (високовольтний вихід).
- DC Вихід:
 - 6A DC (запобіжник 6A),
 - 400A DC (високий струм, роз’єм з фіксацією).
- Вимірювальні входи:
 - V1 AC – до 300V AC,
 - V2 AC – 3V AC (точні вимірювання),
 - VDC Input – до 10V DC або для 2-провідного вимірювання опору,
 - I AC/DC Input – струмовий вхід з запобіжником на 10A,
 - BIN IN (Binary input) – сухий/вологий контакт, тригерне керування.

Будова

CPS 100 працює як універсальне джерело змінного/постійного струму та напруги, яке також забезпечує вимірювання реакції об’єкта (наприклад, трансформатора, вимикача або трансформатора струму/напруги) на ці сигнали. Його основна функція — інжекція тестових сигналів та аналіз результату у цифровій формі з високою точністю.

CPC 100 Block Diagram

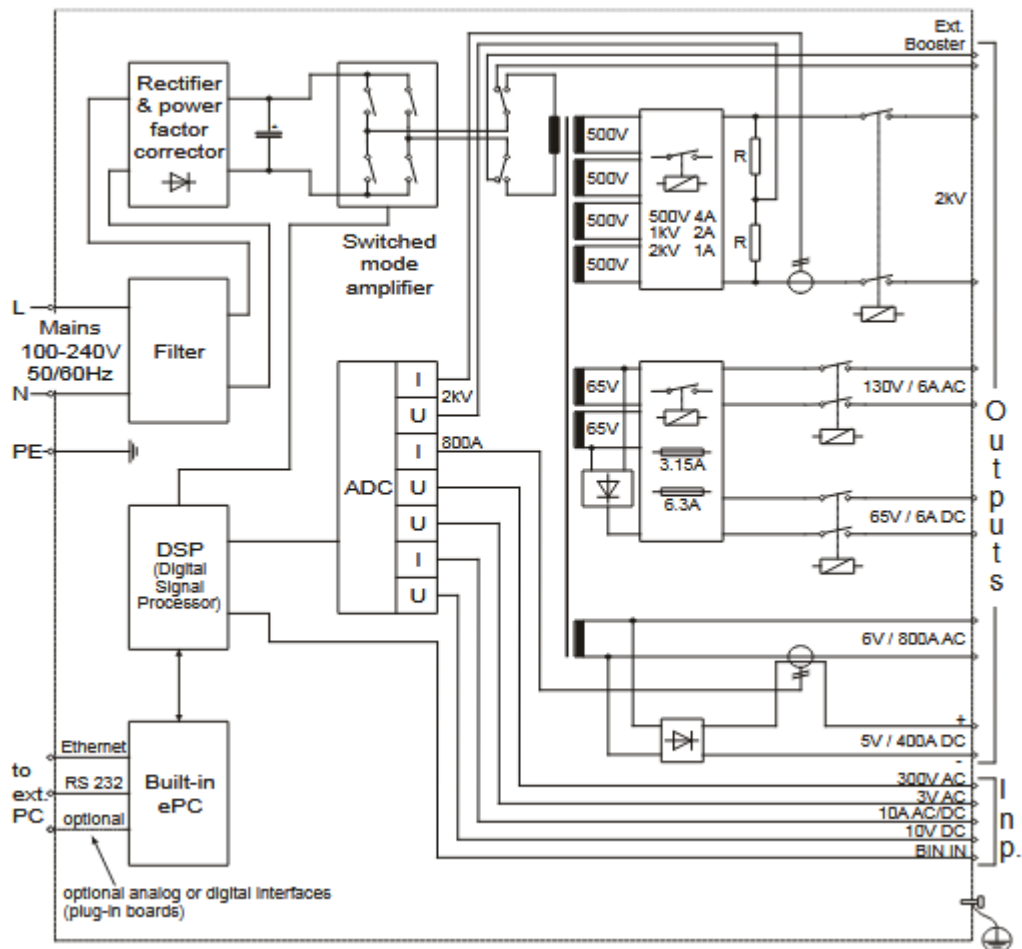


Рисунок 4.2 - Структурна схема пристрою

Система складається з таких основних модулів:

1. Випрямляч і коректор коефіцієнта потужності - перетворює змінний струм з мережі на постійний і стабілізує енергоживлення для внутрішніх модулів.
2. Фільтр - згладжує пульсації та забезпечує стабільне живлення для наступних етапів.
3. Імпульсний підсилювач (Switched Mode Amplifier)
4. Головний елемент, який генерує тестові сигнали. Забезпечує:
 - 500 В / 4 А
 - 1 кВ / 2 А
 - 2 кВ / 1 А

- 800 А / 6 В (через окремий вихід). Це дозволяє створити широкий діапазон тестових режимів.
5. Цифровий сигнальний процесор (DSP) - обробляє вимірювані дані, виконує FFT, фільтрацію (наприклад, вікно Ханна) та частотний аналіз. Саме тут відбувається цифрова обробка результатів вимірювань.
 6. Аналого-цифрові перетворювачі (ADC) - перетворюють аналогові сигнали вимірювань (напруги та струму) у цифрову форму для обробки DSP.
 7. Вбудований комп'ютер (ePC) - контролює весь процес тестування, зберігає процедури, виконує скрипти тестування, формує звіти. Може бути під'єднаний до ПК або мережі.

Загальний принцип дії

Пристрій OMICRON CPC 100 працює за принципом генерації контрольованих електричних сигналів і подальшого аналізу реакції електрообладнання на ці сигнали. Основою роботи є внутрішнє формування змінної або постійної напруги та струму, які подаються на об'єкт випробування, наприклад, трансформатор або вимикач. Електричний сигнал формується у високопродуктивному імпульсному підсилювачі, який живиться від мережі через фільтр і випрямляч з корекцією коефіцієнта потужності. Отримане стабілізоване постійне живлення використовується для живлення ключових компонентів системи, зокрема підсилювача, який може генерувати напруги до 2 кВ або струми до 800 А змінного струму та 400 А постійного.

Користувач задає тип тесту через інтерфейс пристрою або попередньо створену тест-карту. Відповідно до обраного тесту система формує потрібний рівень напруги чи струму, подає його на об'єкт, а паралельно через вимірювальні входи фіксує параметри відповіді об'єкта. Це можуть бути напруга, струм, фаза, гармоніки, активна/реактивна потужність, опір, імпеданс тощо. Всі сигнали, що знімаються з об'єкта, перетворюються в цифрову форму

за допомогою АЦП (аналогово-цифрових перетворювачів), після чого обробляються за допомогою DSP — цифрового сигнального процесора. DSP виконує математичну обробку, включаючи перетворення Фур'є, фільтрацію шумів, обчислення амплітуди, кута зсуву фаз, розрахунок коефіцієнтів трансформації або втрат.

Всі розрахунки, керування логікою роботи, збереження результатів та формування звітів виконує вбудований комп'ютер — ePC. Він взаємодіє з користувачем через дисплей або мережу Ethernet, а також дозволяє використовувати зовнішні інтерфейси — USB, RS-232. Оброблені результати можна переглянути на екрані, зберегти у звітах або експортувати для подальшої аналітики. За потреби CPC 100 може підключатися до зовнішнього підсилювача (Ext Booster), що дозволяє отримувати ще вищі струми до 2000 А для специфічних тестів.

Приклад використання

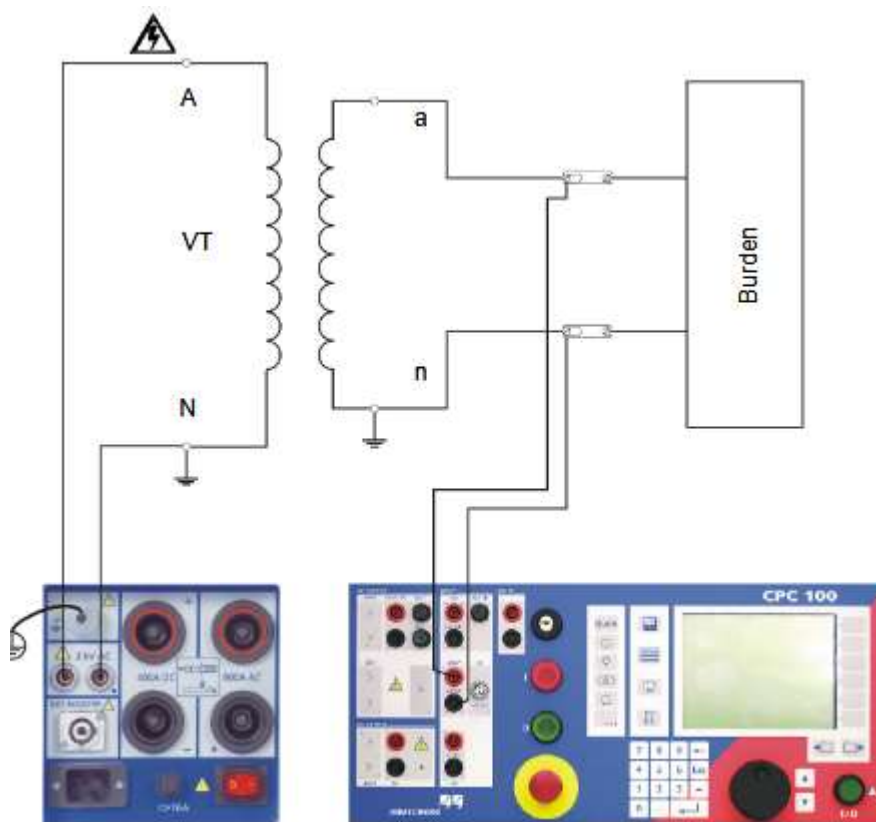


Рисунок 4.3 - Схема підключення приладу до трансформатора напруги для проведення тесту на співвідношення трансформації

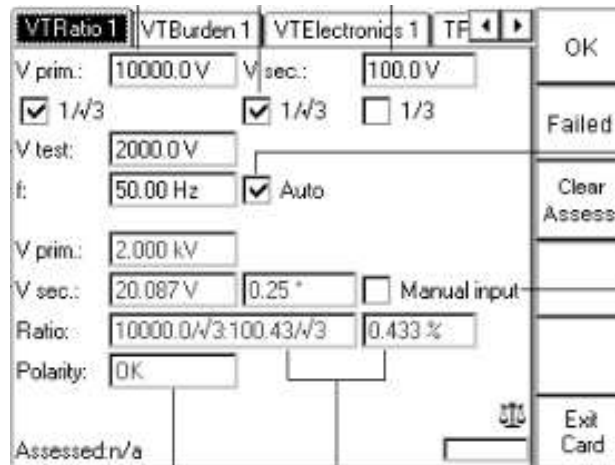


Рисунок 4.4 - Меню налаштування тесту

CPC 100 інжектує змінну напругу до 2 кВ у первинну обмотку трансформатора. При цьому на вторинну обмотку підключається вимірювальний вхід V1 AC, який фіксує напругу, що виникає у відповідь. Уся система замкнена через заземлення. На схемі чітко показано підключення первинної обмотки до високовольтного виходу CPC 100, а вторинної — до вимірювального входу.

На екрані інтерфейсу користувача видно параметри тесту: номінальні напруги на первинній та вторинній сторонах, фактична напруга інжекції, частота тесту та виміряна вторинна напруга. На основі цих значень пристрій розраховує фактичне співвідношення трансформації та порівнює його з очікуваним, виводячи відсоткове відхилення. Також аналізується полярність — порівнюється фазовий зсув між первинною та вторинною напругою, що дозволяє виявити помилки в підключенні або пошкодження.

Аналоги діагностичного приладу CPC-100

CPC-100 — це український багатоканальний пристрій для діагностики електричних мереж, але на ринку існує низка зарубіжних і вітчизняних аналогів зі схожими функціональними можливостями. Нижче наведено кілька найпоширеніших:

1. Fluke 1738 (США)

Цифровий трифазний енергетичний аналізатор, який забезпечує вимірювання напруги, струму, потужності, гармонік і якості електроенергії. Має зручне ПЗ для аналізу та кольоровий дисплей.

DPQ Visa (США)

Професійний прилад для моніторингу параметрів енергомереж, включаючи сплески, просадки напруги, гармоніки, перехідні процеси. Відзначається високою точністю і надійністю.

3. Kyoritsu KEW 6315 (Японія)

Компактний аналізатор потужності та енергоспоживання. Підтримує роботу з датчиками струму типу Rogowski, має зручний інтерфейс для польового використання.

4. Metrel MI 2892 (Словенія)

Прилад для оцінки якості електроенергії згідно з ІЕС 61000-4-30. Оснащений сенсорним екраном та має функції запису та аналізу подій.

5. ПKE-M7 (Україна)

Вітчизняний прилад, близький за функціоналом до СРС-100, але з меншим обсягом пам'яті. Часто використовується для діагностики трансформаторів і силових ліній.

Порівняльно, СРС-100 вирізняється простотою використання, добрим співвідношенням ціни і функціоналу, а також адаптованістю до українських умов експлуатації. У порівнянні з імпортними аналогами, він поступається хіба що інтерфейсами або рівнем автоматизації, але переважає за ремонтпридатністю та ціною.

4.2 Діагностичні пристрої контролю стану заземлюючих пристроїв та вимірювання опору

Заземлювальні пристрої відіграють критично важливу роль у забезпеченні електробезпеки енергетичних об'єктів та захисту обладнання від перенапруг. Вони формують замкнену провідну систему, яка забезпечує відведення струмів замикання на землю, грозових імпульсів та статичних зарядів у ґрунт. Ефективне функціонування цієї системи безпосередньо залежить від її електричного опору та цілісності елементів. Тому завдання діагностування заземлювачів включає як вимірювання параметрів (насамперед питомого та перехідного опору), так і перевірку стану з'єднань, матеріалу електродів та їх захисних покриттів.

Контроль стану заземлювальних пристроїв здійснюється за допомогою як традиційних приладів, так і сучасного високоточного обладнання, яке дозволяє проводити вимірювання без відключення живлення (методи безконтактного контролю), зберігати історію вимірів, а також використовувати дистанційний моніторинг. Основними параметрами, які підлягають контролю, є загальний опір заземлення, опір електродів, стан з'єднань і наявність корозії, а також стабільність параметрів у динаміці.

Серед традиційних приладів, що широко застосовуються у вітчизняній енергетиці, слід зазначити:

- МС-08 (Україна): переносний вимірювач опору заземлення та питомого опору ґрунту з похибкою не більше $\pm 5\%$; працює за трьохелектродною схемою;
- Е7-8 (Україна): універсальний мегаомметр із додатковими функціями вимірювання опору заземлювача.

Натомість на світовому ринку переважають пристрої із розширеним функціоналом і вбудованими алгоритмами аналізу:

(США): дозволяє проводити вимірювання чотирьох та

трьохелектродними методами, реалізує методику вимірювання без додаткових заземлювальних штанг (метод селективного вимірювання), має пам'ять результатів і USB-інтерфейс;

(Велика Британія): портативний тестер з ізоляцією IP54, передбачає тестування опору заземлення та перехідного опору ґрунту, підтримує використання струмового кліща;

(Франція): багатофункціональний аналізатор, що забезпечує комплексне вимірювання опору заземлення, здатний працювати з модулем СА6474 для аналізу опору розподілених систем заземлення.

Порівняльний аналіз показує, що обладнання іноземного виробництва суттєво переважає вітчизняні аналоги за точністю, функціональністю, можливістю інтеграції в SCADA-системи та адаптованістю до безконтактного контролю. Особливо актуальною є функція збереження історичних даних, яка дає змогу проводити динамічний аналіз деградації заземлення.

З погляду вибору обладнання для українських енергетичних підприємств, важливо враховувати як технічні вимоги до точності вимірювань (наприклад, відповідність вимогам ДСТУ EN 50522:2017), так і економічну доцільність. У зв'язку з цим доцільним є комбіноване використання пристроїв – базове вимірювання можна здійснювати за допомогою традиційного устаткування, а поглиблений аналіз, аудит або введення в експлуатацію нових об'єктів — із застосуванням багатофункціональних цифрових тестерів з інтерфейсами для передачі даних.

Таким чином, ефективна діагностика заземлювальних систем є одним із ключових аспектів безпечної та надійної роботи електрообладнання. Подальше впровадження високоточних вимірювальних пристроїв та аналіз їх динаміки дозволяє не лише своєчасно виявляти несправності, але й проводити превентивне технічне обслуговування, тим самим знижуючи ризик виникнення аварій.

В умовах сучасної енергетичної інфраструктури процес контролю параметрів заземлюючих пристроїв дедалі більше інтегрується в автоматизовані системи контрольно-вимірювального обладнання. Типовий цикл діагностики охоплює вимірювання перехідного опору між елементами системи заземлення та навколишнім середовищем, із подальшим аналізом стану електричних з'єднань та оцінкою здатності заземлюючого контуру ефективно відводити струми короткого замикання або атмосферного перенапруження.

Вимірювання здійснюється шляхом інжекції контрольного змінного струму низької або середньої частоти через вимірювальні електроди, що розміщуються на визначеній відстані від заземлювача. В той же час у зворотному колі реєструється падіння напруги, з якого розраховується опір. У складних інженерних системах такі заміри проводяться за допомогою фазочутливих методів, що дає змогу мінімізувати вплив електромагнітних завад і досягти стабільної точності навіть у промислових умовах.

Дані, отримані в результаті вимірювання, автоматично обробляються вбудованими мікропроцесорними блоками пристроїв, які виконують фільтрацію шумів, корекцію похибок за температурою та вологою, а також компенсацію фазового зсуву. Після обробки результати зберігаються у внутрішній енергонезалежній пам'яті пристрою. Пристрої, що мають можливість підключення до SCADA або локальних АСКТП, можуть у реальному часі передавати значення параметрів через інтерфейси RS-485, моделях, зокрема виробництва OMICRON, Chauvin Arnoux та Sonel, реалізовано зручне експортування даних у стандартизованих форматах (CSV, XML), що значно спрощує інтеграцію з програмним забезпеченням для подальшого аналізу та формування технічних звітів.

На підприємствах критичної інфраструктури, таких як підстанції класу напруги 330 кВ і вище, передбачено регулярне архівування результатів

вимірювань, зберігання їх у централізованих базах даних і автоматичне формування попереджень у разі виявлення відхилень від встановлених нормативів. Зокрема, для об'єктів Південноукраїнської АЕС або ЗАЛК (Запорізького алюмінієвого комбінату), критичним є дотримання значень опору заземлення не вище 0,5 Ом відповідно до внутрішніх технічних регламентів та стандартів EN 50522:2014. На промислових підстанціях класу 110/35/10 кВ, як-от у Харківському чи Львівському енергетичних вузлах, нормативи допускають дещо більші значення — до 1,0–2,0 Ом залежно від конфігурації заземлювальної системи, типу ґрунтів та сезонної вологості.

Дані, зібрані з польових пристроїв, використовуються операторами не лише для визначення відповідності параметрів нормам, але й для виявлення тенденцій деградації заземлюючого контуру. Зниження ефективності, наприклад, через електрохімічну корозію з'єднань, проявляється у поступовому зростанні опору. Така тенденція є підставою для запланованих ремонтів, заміни секцій або корекції режимів експлуатації. В окремих випадках, якщо зниження провідності заземлення спостерігається в умовах підвищеної небезпеки (наприклад, у вибухонебезпечних середовищах), системи діагностики здатні ініціювати аварійне сповіщення або відключення обладнання через вбудовані реле контролю.

У підсумку, сучасні підходи до контролю стану заземлюючих пристроїв передбачають не лише точне вимірювання, але й автоматизоване опрацювання, передачу та використання даних у складі енергетичних моніторингових систем. Це дозволяє суттєво підвищити оперативність обслуговування, забезпечити дотримання нормативів безпеки та знизити ризик аварій, пов'язаних з порушенням умов ефективного заземлення.

Розрахунок пристрою заземлення для ВРУ напругою 110/10 кВ. Площа ВРУ 15×25 м². Задано $\rho_1=400$ Ом×м; $\rho_2=80$ Ом×м; $h_1=2$ м; $t=0,7$ м; $t_{p3}=0,1$; $t_{BB}=0,1$ с; струм замикання на землю при однофазному короткому замиканні на підстанції, яка розглядається, $I_3=2$ кА. Природних заземлювачів немає.

Нейтраль обмотки 110 кВ трансформатора заземлена безпосередньо, нейтраль обмотки 10 кВ – ізольована від землі.

Для $t_{\epsilon} = t_{pz} + t_{BB} = 0,1 + 0,1 = 0,2$ с допустима напруга дотику $U_{\text{дон.дон}} = 400$ В. Для визначення напруги на заземлювачі U_3 необхідно знайти коефіцієнт напруги дотику:

$$K_{\text{доп}} = \frac{M\beta}{\left(\frac{l_B L_r}{a\sqrt{S}}\right)^{0,45}} = \frac{0,75 \cdot 0,625}{\left(\frac{5 \cdot 190}{6\sqrt{15 \cdot 25}}\right)^{0,45}} = 0,1678 \quad (4.1)$$

де $M = 0,75$ при $\rho_1/\rho_2 = 400/80 = 5$,

$$\beta = \frac{R_L}{R_L + R_C} = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 400} = 0,625;$$

$$L_r = 190 \text{ (м)}$$

$$U_3 = \frac{U_{\text{дот.доп}}}{K_{\text{дот}}} \quad (4.2)$$

$$U_3 = \frac{400}{0,1678} = 2382,8 \text{ (В)}$$

Напруга на заземлювачі (11.2) знаходиться в межах допустимої напруги (менша 10 кВ).

Допустимий опір заземлючого пристрою:

$$R_{3,\text{доп}} = \frac{U_3}{I_3} \quad (4.3)$$

$$R_{3,\text{доп}} = \frac{U_3}{I_3} = \frac{2383,8}{2000} = 1,19 \text{ (Ом)}$$

Дійсний план пристрою заземлення перетворюємо в розрахункову модель із стороною:

$$\sqrt{S} = \sqrt{15 \cdot 25} = 19,36 \text{ м}$$

Кількість комірок по стороні квадрата:

$$m = \frac{L_r}{2\sqrt{S}} - 1 \quad (4.4)$$

$$m = \frac{190}{2 \cdot 19,36} - 1 = 3,9$$

Приймаємо $m=4$

Довжина штаби у розрахунковій моделі:

$$L_r' = 2\sqrt{S}(m+1) = 2 \cdot 19,36 \cdot (4+1) = 193,6 \text{ (м)} \quad (4.5)$$

$$L_r' = 2 \cdot 19,36 \cdot (4+1) = 193,6 \text{ (м)}$$

Довжина сторін комірки

$$b = \frac{19,36}{4} = 4,84$$

Кількість вертикальних заземлювачів по периметру контуру за умови $a/\ell_B=1$:

$$n = \frac{4\sqrt{S}}{l_B} \quad (4.6)$$

$$n = \frac{19,36 \cdot 4}{5} = 15,49 \text{ (м)}$$

Приймаємо $n_B=16$.

Загальна довжина вертикальних заземлювачів:

$$L_B = l_B \cdot n_B$$

$$L_B = 5 \cdot 16 = 80 \text{ (м)}$$

Відносна глибина:

$$\frac{l_B + t}{\sqrt{S}} = \frac{5 + 0,7}{19,36} = 0,244 > 0,1$$

Тоді:

$$A = \left(0,385 - 0,25 \frac{l_B + t}{\sqrt{S}} \right)$$

$$A = 0,385 - 0,25 \cdot 0,244 = 0,324$$

Для $\rho_1/\rho_2=5$; $a/\ell_B=1$ знаходимо:

При

$$\frac{h_1 - t}{l_B} = \frac{2 - 0,7}{5} = 0,26$$

$$\rho_\ell/\rho_2 = 1,256,$$

тоді

$$\rho_\ell = 1,256 \cdot 80 = 100,48 \text{ (Ом} \cdot \text{м)}$$

Знаходимо опір заземлювача

$$R_3 = A \frac{\rho_{\text{екв}}}{\sqrt{S}} + \frac{\rho_{\text{екв}}}{L_\Gamma + L_B} \quad (4.7)$$

$$R_3 = 0,324 \frac{100,48}{19,36} + \frac{100,48}{19,36 + 80} = 2,048 \text{ (Ом)}$$

що більше за $R_{3,\text{дон}} = 1,19 \text{ Ом}$.

Визначаємо напругу дотику

$$U_{\text{дот}} = K_{\text{дот}} R_3 I_3 \quad (4.8)$$

$$U_{\text{дот}} = 1,1678 \cdot 2,048 \cdot 2000 = 687,7 \text{ (В)}$$

що більше допустимого значення 400 В.

Необхідно зменшити напругу дотику. Припускаємо, що на підстанції можуть бути застосовані природні заземлюючі системи «трос – опора» лінії 110 кВ з загальним опором $R_{\text{пр}} = 2 \text{ Ом}$. Тоді необхідний опір штучного заземлювача

$$R_{\text{шт}} = \frac{R_{\text{пр}} \cdot R_{\text{з.доп}}}{R_{\text{пр}} - R_{\text{з.доп}}}$$

$$R_{шт} = \frac{2 \cdot 1,19}{2 - 1,19} = 2,938 \text{ (Ом)}$$

Отже, опір заземлюючого пристрою підстанції з урахуванням природних заземлювачів:

$$R'_3 = \frac{R_3 \cdot R_{пр}}{R_3 + R_{пр}} \quad (4.9)$$

$$R'_3 = \frac{R_3 \cdot R_{пр}}{R_3 + R_{пр}} = \frac{2 \cdot 2,048}{2 + 2,048} = 1,012 \text{ (Ом)}$$

тоді напруга дотику:

$$U_{дот} = K_{дот} R'_3 I_3 \quad (4.10)$$

$$U_{дот} = 0,1678 \cdot 1,012 \cdot 2000 = 339,6 \text{ (В)}$$

що менше допустимої напруги 400 В.

Напругу дотику $U_{дот}$ можна зменшити іншим способом. Наприклад, зробимо підсипку гравієм по всій поверхні підстанції. Шар гравію 0,2 м. Питомий опір шару гравію у цьому випадку буде $\rho_{в.ш} = 3000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, тоді

$$\beta = \frac{1000}{1000 + 1,5 \cdot 3000} = 0,18$$

$$K_{доп} = \frac{0,75 \cdot 0,18}{\left(\frac{5 \cdot 190}{5 \sqrt{15 \cdot 25}} \right)^{0,45}} = \frac{0,135}{2,794} = 0,048$$

Підсипка гравію не впливає на розтікання струму з пристрою заземлення, оскільки глибина закладання заземлювачів на 0,7 м більше товщини шару гравію, тому співвідношення ρ_1/ρ_2 та величина залишаються незмінними.

Отже,

$$U_3 = \frac{400}{0,048} \text{ (В)}$$

Допустимий опір заземлення

$$R_{3,\text{доп}} = \frac{8333,3}{2000} = 4,166 \text{ (Ом)}$$

що більше $R_3 = 2,048 \text{ Ом}$.

Напругу дотику:

$$U_{\text{дот}} = K_{\text{дот}} R_3 I_3 \quad (4.11)$$

$$U_{\text{дот}} = 0,048 \cdot 2,048 \cdot 2000 = 196,6 \text{ (В)}$$

що менше допустимої напруги дотику.

Отже, підсіпка шару ґравію є ефективним засобом для зменшення напруги дотику.

Визначаємо також максимальний допустимий струм однофазного короткого замикання на даній підстанції:

$$I_{3,\text{max}} = \frac{U_{\text{дот,доп}}}{K_{\text{дот}} \cdot R_3} \quad (4.12)$$

$$I_{3,\text{max}} = \frac{400}{0,048 \cdot 2,048} = 4069,17 \text{ (А)}$$

4.3. Діагностичні пристрої контролю стану комутаційного високовольтного обладнання

Стан комутаційного високовольтного обладнання (КВО), зокрема елегазових, вакуумних та масляних вимикачів, є критично важливим для забезпечення безперебійної та безпечної роботи енергосистем. Діагностування таких пристроїв потребує як апаратної, так і програмної складової, орієнтованої на безперервний або періодичний контроль параметрів, що вказують на технічний стан вузлів перемикавання, приводу, ізоляції та дугогасних камер.

Контроль здійснюється за допомогою багатоканальних вимірювальних систем, які фіксують такі показники, як час спрацювання та затримки контактів, швидкість руху рухомих частин, механічний знос, величина дугогасного опору, а також тиск та якість елегазу (у відповідних типах вимикачів). Дані параметри порівнюються з нормативними межами, які регламентовані виробником або галузевими стандартами. Наприклад, для елегазових вимикачів типу HPL (Hitachi Energy), час повного циклу ввімкнення/вимкнення має бути в межах 35–50 мс, а швидкість замикання — не менше 2,5 м/с. Відхилення від норми вказує на знос механізмів або порушення в системі приводу.

Вимірювання параметрів КВО проводиться безпосередньо за допомогою сенсорів та виконавчих модулів, підключених до контролера або портативної діагностичної платформи. Дані зчитуються в цифровому форматі, обробляються та архівуються. Зазвичай пристрої мають вбудовану пам'ять та інтерфейс зв'язку (Ethernet, Modbus, IEC 61850), що дозволяє інтегрувати їх у SCADA- або EMS-системи. Сучасні діагностичні прилади можуть синхронізувати зчитування параметрів з подіями, що відбуваються у мережі, дозволяючи оперативно виявляти нештатні режими роботи.

Серед найбільш поширених пристроїв для діагностики КВО можна виокремити платформу **OMICRON CIBANO 500**, яка дозволяє проводити як вимірювання часу, так і аналіз швидкісних характеристик приводу, з можливістю підключення до стандарту IEC 61850. Також використовуються рішення компанії **Megger**, наприклад, **TM1700**, яка дозволяє тестувати перемикальні характеристики вимикачів різних типів у широкому діапазоні струмів і напруг. Високоточні датчики руху, які комплектуються до систем аналізу приводу, забезпечують точність до 0,1 мм і тим самим дозволяють ідентифікувати відхилення, які ще не призвели до виходу обладнання з ладу, але сигналізують про необхідність сервісного обслуговування.

Інформація, що накопичується у діагностичних системах, зберігається у централізованих базах даних або на локальних серверах підприємств, а її аналіз здійснюється за допомогою ПЗ, яке може автоматично порівнювати фактичні значення параметрів із нормативними та формувати графіки трендів. Таким чином, забезпечується перехід від реактивного до проактивного обслуговування, коли рішення про втручання ухвалюється на основі об'єктивних змін у характеристиках, а не за фактом виникнення несправності.

Ці системи здатні формувати звіти відповідно до міжнародних стандартів, таких як **ІЕС 62271-100**, **ІЕС 60694** та національних нормативів, що регламентують діагностику високовольтного обладнання. У випадку серйозних відхилень результати передаються автоматично до відповідального інженера або чергового персоналу для оперативного прийняття рішень. Завдяки впровадженню подібних систем підвищується як технічна, так і економічна ефективність функціонування електроенергетичних об'єктів.

У сучасних контрольно-вимірювальних системах, які використовуються для діагностики стану комутаційного високовольтного обладнання, вимірювання ключових параметрів виконується із залученням високоточних сенсорів, здатних фіксувати часові, швидкісні, температурні, тискові та струмові характеристики з мілісекундною роздільною здатністю. Такі вимірювання здійснюються безпосередньо під час роботи обладнання або у процесі планових випробувань без зняття його з робочого режиму, що особливо важливо для забезпечення безперервності електропостачання.

Інформація з датчиків надходить на інтелектуальні модулі збору даних, які обладнані попередньою фільтрацією шумів та цифровою обробкою сигналу. Ці модулі здійснюють локальну обробку, після чого дані передаються через промислові інтерфейси

Зберігання даних реалізується у вигляді баз даних, що структуровані за принципом об'єктно-орієнтованої адресації: кожному елементу мережі

(наприклад, вимикачу) відповідає окрема логічна сутність, що накопичує історію вимірювань. Такі історичні масиви формують часові ряди, які дозволяють виявляти тенденції деградації обладнання та проводити прогнозування залишкового ресурсу. Програмне забезпечення для візуалізації і обробки цієї інформації зазвичай інтегрує алгоритми тренд-аналізу, кластеризації відхилень, а також базу стандартів для порівняння з еталонними параметрами.

На практиці, наприклад, для вакуумних вимикачів Schneider Electric типу HVX або елегазових ABB типу ELK-04, критичними вважаються відхилення часу включення понад 5 мс від паспортного значення, або ж зниження тиску елегазу нижче 5,0 бар. Якщо система реєструє таку подію, вона формує діагностичне повідомлення із зазначенням типу дефекту, що автоматично фіксується у журналі технічного стану та передається відповідальному за обслуговування персоналу через мережеву інфраструктуру підприємства або мобільні інтерфейси.

Завдяки цьому технічний персонал отримує не лише цифрові значення параметрів, а й їхнє трактування з урахуванням допустимих меж, установлених виробником, наприклад відповідно до стандартів для вимикачів змінного струму високої напруги. Це дозволяє не лише оперативно реагувати на відхилення, але й обґрунтовано планувати сервісне обслуговування у режимі, що не порушує енергопостачання. Таким чином, реалізується концепція предиктивного обслуговування, яка сьогодні є базовим елементом цифрової трансформації електроенергетичних систем.

ОХОРОНА ПРАЦІ

Розділ з охорони праці бакалаврської роботи присвячений дослідженню умов праці електротехнічного персоналу, що виконує аналіз стану електричних мереж. Наразі зі зростанням темпів розвитку сучасного виробництва значно зростає роль і значення охорони праці на підприємстві. Про це йдеться, зокрема в Законі України «Про охорону праці». Законодавством України установлені соціальні гарантії у сфері охорони праці найманих працівників, які потрібно виконувати в обов'язковому порядку.

Під час аналізування та проєктування, згідно [1, 2], на працівників впливають такі шкідливі виробничі фактори: фізичні, хімічні та трудового процесу:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації обладнання

5.1.1 Вимоги електробезпеки до приміщень з комп'ютерами

Площа, виділена для одного робочого місця повинна складати не менше 6 кв. м, а об'єм – не менше 20 куб м.

Під час проектування СЕС, систем електропостачання тощо ПВЕ, ПТЕ, ПБЕ ЕЕС, НАОП, а також розділів ДБН, що стосуються штучного освітлення та електротехнічних пристроїв, та вимог нормативно-технічної і експлуатаційної документації заводів виробників комп'ютерів. Комп'ютери та устаткування для обслуговування, ремонту та їх налагодження, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники, тощо) електропроводи та кабелі за виконанням та ступенем захисту мають відповідати класу зони за ПВЕ, мати апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів.

Під час монтажу та експлуатації приміщень з ПК необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, перейти на негорючу ізоляцію. Під час ремонту ліній електромережі шляхом зварювання, паяння та з використанням відкритого вогню необхідно дотримуватися Правил пожежної безпеки в Україні. Лінія електромережі для живлення комп'ютерів, їх периферійних пристроїв та устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження виконується як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазового, нульового робочого та нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення (занулення) електроприймачів. Використання нульового робочого провідника як нульового захисного провідника забороняється.

Нульовий захисний провід прокладається від стійки групового розподільчого щита, розподільчого пункту до розеток живлення. Не допускається підключення на щиті до одного контактного затискача нульового робочого та нульового захисного провідників. Площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідника в груповій трипровідній мережі повинна бути не менше площі перерізу фазового провідника. Усі провідники

повинні відповідати номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту, вимогам ПВЕ. У приміщені, де одночасно експлуатується або обслуговується більше п'яти персональних комп'ютерів, на помітному та доступному місці встановлюється аварійний резервний вимикач, який може повністю вимкнути електричне живлення приміщення, крім освітлення.

Комп'ютери та устаткування для їх обслуговування, ремонту та налагодження повинні підключатися до електромережі тільки з допомогою справних штепсельних з'єднань і електророзеток заводського виготовлення. Штепсельні з'єднання та електророзетки крім контактів фазового та нульового робочого провідників повинні мати спеціальні контакти для підключення нульового захисного провідника. Конструкція їх має бути такою, щоб приєднання нульового захисного провідника відбувалося раніше ніж приєднання фазового та нульового робочого провідників. Порядок роз'єднання при відключенні має бути зворотним. Необхідно унеможливити з'єднання контактів фазових провідників з контактами нульового захисного провідника.

Неприпустимим є підключення комп'ютерів та їх устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження до звичайної двопровідної електромережі, в тому числі – з використанням перехідних пристроїв. Електромережі штепсельних з'єднань та електророзеток для живлення комп'ютерів та устаткування для їх обслуговування, ремонту та налагодження слід виконувати за магістральною схемою, по 3 - 6 з'єднань або електророзеток в одному колі. Штепсельні з'єднання та електророзетки для напруги 12 В та 36 В за своєю конструкцією повинні відрізнятися від штепсельних з'єднань для напруги 127В та 220В. Штепсельні з'єднання та електророзетки, розраховані на напругу 12 В та 36 В, мають бути пофарбовані в колір, який візуально значно відрізняється від кольору штепсельних з'єднань, розрахованих на напругу 127 В та 220 В.

Індивідуальні та групові штепсельні з'єднання та електророзетки необхідно монтувати на негорючих або важкогорючих пластинах з урахуванням вимог ПВЕ та Правил пожежної безпеки в Україні. Електромережу штепсельних розеток для живлення комп'ютерів та їх устаткування для обслуговування, ремонту та налагодження при розташуванні їх уздовж стін приміщення прокладають по підлозі поряд зі стінами приміщення, як правило, в металевих трубах і гнучких металевих рукавах з відводами відповідно до затвердженого плану розміщення обладнання та технічних характеристик обладнання. При розташуванні в приміщенні за його периметром до 5 комп'ютерів, використанні трипровідникового захищеного проводу або кабелю в оболонці з негорючого або важкогорючого матеріалу дозволяється прокладання їх без металевих труб та гнучких металевих рукавів.

Металеві труби та гнучкі металеві рукави повинні бути заземлені. Заземлення повинно відповідати вимогам ДНАОП 0.00-1.21-98 "Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів". Для підключення переносної електроапаратури застосовують гнучкі проводи в надійній ізоляції. Тимчасова електропроводка від переносних приладів до джерел живлення виконується найкоротшим шляхом без заплутування проводів у конструкціях машин, приладів та меблях. Доточувати проводи можна тільки шляхом паяння з наступним старанним ізолюванням місць з'єднання.

Є неприпустимими:

- експлуатація кабелів та проводів з пошкодженою або такою, що втратила захисні властивості за час експлуатації, ізоляцією; залишення під напругою кабелів та проводів з неізольованими провідниками;
- застосування саморобних подовжувачів, які не відповідають вимогам до переносних електропроводок;
- застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального обладнання або ламп розжарювання;

- користування пошкодженими розетками, розгалужувальними та з'єднувальними коробками, вимикачами та іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або випинання.

- підвішування світильників безпосередньо на струмопровідних проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною та іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами);

- використання електроапаратури та приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

Х.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В).

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам: для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмовідними елементами електроустаткування, необхідно: розмішувати неізольовані струмовідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

- при живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі. Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

- електрозахисні засоби захисту. Електротехнічний персонал повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність

зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Забороняється користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; показчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат приміщення – це сукупність фізичних параметрів повітря в виробничому приміщенні, які діють на людину в процесі праці на її робочому місці, в робочій зоні.

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Робота проєктувальників відноситься до легкої фізичної роботи категорія Іа, бо вони практично весь свій робочий день проводить сидячи. Параметри мікроклімату в приміщенні наведено в таблиці

Таблиця 5.1 – Нормування параметрів мікроклімату

Період року	Категорія робіт	Температура, а,	Відносна вологість	Швидкість руху
Теплий	Ia	22-28	55 при 28°C	0,1-0,2
Холодний	Ia	21-25	75 при 25°C	Не більше 0,1

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці оператора крану передбачається:

холодну пору року – використання калорифера;

літню пору – застосування кондиціонерів та вентиляторів обдуву, провітрювання приміщень.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Вуглецю оксид (CO)	3	1	4
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено:

Провітрювання приміщень;

Цілісність конструкції кабіни та вікон для перешкоджання попадання пилу в приміщення кабіни під час роботи установки;

Встановлення пиловловлюючих засобів.

5.2.3 Виробниче освітлення

Раціональне освітлення – один з основних факторів створення сприятливих робочих умов праці. Недостатнє освітлення викликає передчасне стомлення працюючих, знижує продуктивність праці, може стати причиною нещасного випадку.

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормують мінімальну освітленість на найбільш темній ділянці робочої поверхні. Рівень аварійного освітлення складає 15% освітленості основної роботи. Приміщення забезпечене природним освітленням в денний проміжок часу, але вечері постає проблема в штучному освітленні.

Для забезпечення найбільш сприятливих умов зорової праці нормуємо освітлення на робочому місці працівника.

Характеристика зорових робіт - середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Норми при штучному, природньому та суміщеному освітленні наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменш ий або еквівалент-и	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього о	у т. ч. від загально го		

	ний розмір об'єкта розрізнен ня, мм								
Середн ьої точност і	Від 0,5 до 1,0 включн о	IV	в	малий середн ій велики й	світли й середн ій темни й	400	200	4	2,4

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп [E27 LED 15W NW A60 "SG"](#). Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні. Для забезпечення нормативних значень освітлення передбачено:

- використання додаткового штучного освітлення, а саме світлодіодних ламп;

необхідна кількість природного світла (великі вікна);

для підтримки постійної освітленості повинно бути організовано систематичне, не рідше двох разів на місяць, очищення арматури світильників і ламп від пилу та бруду, а в приміщеннях із значним виділенням пилу, диму та кіптяви - не рідше чотирьох разів на місяць згідно з графіком.

5.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки».

Норми звукового тиску на постійних робочих місцях в промислових приміщеннях наведено в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах								
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні. Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі. Для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [11, 12]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [13], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [14].

Отже, до складу системи електропостачання, яка проєктується, входять підстанції, приміщення яких за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відносяться до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В з зонами П-Іа, де є тверді горючі речовини чи матеріали.

Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів – сукупність властивостей, що характеризують їхню здатність до виникнення і поширення горіння. Наслідком горіння, залежно від його швидкості та умов протікання, можуть бути пожежа або вибух. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначають показниками, вибір яких залежить від агрегатного стану речовини (матеріалу), та умов їхнього застосування.

Будівля, в якій розташовані ці приміщення, характеризується II ступенем вогнестійкості. До II ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону із застосуванням листових і плитних негорючих матеріалів. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Сст у- пін ь вог- не- стій - кос ті бу- дин -ків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло- ни	сходові площад- ки, костури, сходи, балки, марші сходови х кліток	пере- криття між по- верхові (у т.ч. горищн і та над підва- лами	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходо- вих кліток	само- несучі	зов- ніш- ні не- несу- чі	внут- рішні не- несуч і (пере- - город -ки				пли- ти, наст и-ли, прог о-ни	балки, ферми , арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [15] наведено в таблиці 5.7.

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 5.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 5.8.

Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 5.8 (знаменник) [15].

Таблиця 5.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Таблиця 5.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II		IIIа, IIIб, IV, IVа,
I, II	6/9	8/9	10/12

На території підстацій встановлено 18 порошкових вогнегасників ВВП-8 (ВП-5) і 12 газових вогнегасників ВВК-7 [16].

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи на тему «Аналіз систем діагностування електрообладнання для підвищення ефективності роботи енергосистем» було всебічно досліджено не лише сучасні технічні засоби контролю, але й концептуальні основи, які формують стратегії діагностування в енергетичному секторі. Особлива увага була приділена порівнянню підходів — періодичного та безперервного — з урахуванням їхніх технологічних, економічних та експлуатаційних особливостей.

Дослідження розкрило сутність діагностування як одного з ключових інструментів підтримки надійного функціонування електрообладнання. Встановлено, що безперервний моніторинг дає змогу не лише своєчасно виявляти потенційні дефекти, але й прогнозувати їх розвиток, завдяки чому забезпечується принципова зміна парадигми обслуговування — від реактивної до проактивної. Водночас періодичне діагностування, незважаючи на обмежену частоту збору інформації, все ще залишається актуальним в умовах обмежених ресурсів, а також у випадках, коли обладнання працює в стабільних режимах з мінімальним рівнем навантаження.

Розкрито значення систем діагностування для підвищення надійності електроенергетичних систем у цілому. Було детально проаналізовано, як впровадження сучасних методів контролю змінює стратегії експлуатації — зокрема шляхом оптимізації планових ремонтів, зменшення тривалості простоїв та зниження аварійності. Наведено приклади використання діагностування у великих енергокомпаніях, де впровадження навіть обмежених рішень дозволило суттєво підвищити коефіцієнт готовності обладнання та зменшити технічні втрати. У роботі також представлено попередню оцінку економічного ефекту від застосування діагностичних систем в українському енергетичному секторі. Показано, що за рахунок зниження позапланових простоїв і аварій можливе збереження десятків мільйонів гривень щороку.

У сучасних контрольно-вимірювальних системах, які використовуються для діагностики стану комутаційного високовольтного обладнання, вимірювання ключових параметрів виконується із залученням високоточних сенсорів, здатних фіксувати часові, швидкісні, температурні, тискові та струмові характеристики з мілісекундною роздільною здатністю. Такі вимірювання здійснюються безпосередньо під час роботи обладнання або у процесі планових випробувань без зняття його з робочого режиму, що особливо важливо для забезпечення безперервності електропостачання.

Інформація з датчиків надходить на інтелектуальні модулі збору даних, які обладнані попередньою фільтрацією шумів та цифровою обробкою сигналу. Ці модулі здійснюють локальну обробку, після чого дані передаються через промислові інтерфейси (наприклад, Ethernet або оптоволоконні канали з використанням протоколу IEC 61850) до центральних систем диспетчерського контролю або серверів енергооб'єкта. У розподілених SCADA- або DMS-системах ця інформація інтегрується в режимі реального часу, що дозволяє аналітичному модулю оперативно виявляти аномальні стани.

На практиці, наприклад, для вакуумних вимикачів Schneider Electric типу HVX або елегазових ABB типу ELK-04, критичними вважаються відхилення часу включення понад 5 мс від паспортного значення, або ж зниження тиску елегазу нижче 5,0 бар. Якщо система реєструє таку подію, вона формує діагностичне повідомлення із зазначенням типу дефекту, що автоматично фіксується у журналі технічного стану та передається відповідальному за обслуговування персоналу через мережеву інфраструктуру підприємства або мобільні інтерфейси.

Таким чином, робота комплексно охопила питання від концепції до практичного застосування діагностування в електроенергетиці, сформувавши цілісне уявлення про сучасний стан, тенденції розвитку та необхідність впровадження технологій технічного контролю в умовах цифровізації енергетики та зростання вимог до безпеки і ефективності її функціонування.

Отримані результати можуть бути використані як у процесі модернізації існуючих систем, так і при проектуванні нових енергетичних об'єктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кутін В. М. Рубаненко О. Є. Мисенко С. В. Методи та засоби діагностування елегазових вимикачів: монографія / В.М. Кутін, О.Є. Рубаненко, С.В. Мисенко – Вінниця: ВНТУ, 2018. – 124 с.
2. Рубаненко О. Є. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів / О. Є. Рубаненко, М. П. Лабзун, М. О. Грищук // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ "ХПІ", 2017. – № 23 (1245). – С. 41-46.
3. Грищук М.О. Дослідження пошкодження силового трансформатора на фотовольтаїчній електростанції / М.О. Грищук, О.Є. Рубаненко, І.О. Гунько // Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. – Х.; Видавництво ХНУ, 2019. – С. 178-183.
4. Rubanenko O. E. Determination of optimal transformation ratios of EES transformers in conditions of incomplete information regarding the values of diagnostic parameters / O.E. Rubanenko, O. Kazmiruk, V. Bandura, V. Matvijchuk O. Rubanenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technology. – 2017. – №4. – P. 66 – 79.
5. _Матвійчук В.А. Технології наукових досліджень: навчальний посібник / В.А. Матвійчук В.А., П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко – Вінниця: ВНАУ, 2015. – 190 с.
6. Бойко В.М., Іванов П.С. Діагностичні методи в електроенергетиці. – Київ: Енергоатом, 2019. – 256 с.
7. Коваленко О.В. Методи контролю якості електроенергії та вимірювальні прилади. – Харків: Вид-во ХНУ, 2020. – 312 с.
8. Ткаченко І.П. Основи електроенергетичних вимірювань. – Львів: ЛНУ, 2018. – 198 с.

9. Пасічник С.В. Сучасні системи моніторингу та діагностики енергетичного обладнання // Журнал “Енергетика України”. – 2021. – №3. – С. 45–52.
10. Офіційна документація СРС-100. Інструкція з експлуатації та технічного обслуговування. – ВАТ “Енерготехніка”, 2017. – 88 с.
11. ДСТУ EN 50160:2016. Електроенергія. Характеристики напруги в публічних електричних мережах. – Київ: Мінрегіон, 2016.
12. Омикрон 100 <https://www.omicronenergy.com/en/products/cps-100/>
13. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.
14. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об’єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.
15. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.
16. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.
17. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.
18. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
19. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

20. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
21. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
22. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
23. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
24. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.
25. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.
26. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.
27. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.
28. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ НАВЧАЛЬНОЇ (КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ) РОБОТИ

Назва роботи: «Аналіз систем діагностування електрообладнання для підвищення ефективності роботи енергосистем»

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

(кваліфікаційна робота, курсовий проект (робота), реферат, аналітичний огляд, інше (зазначити))

Підрозділ: Кафедра електричних станцій та систем

(кафедра, факультет (інститут), навчальна група)

Керівник: к.т.н., доцент кафедри ЕСС Вишневський С.Я.

(прізвище, ініціали, посада)

Показники звіту подібності

Показники звіту подібності	
StrikePlagiarism	
Оригінальність	99%
Загальна схожість	1%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи

Автор 
(підпис)

_____Кочура В.С._____

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Робота допущена до захисту

Особа, відповідальна за перевірку _____ Вишневський С.Я.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Експерт
(за потреби)

(підпис)

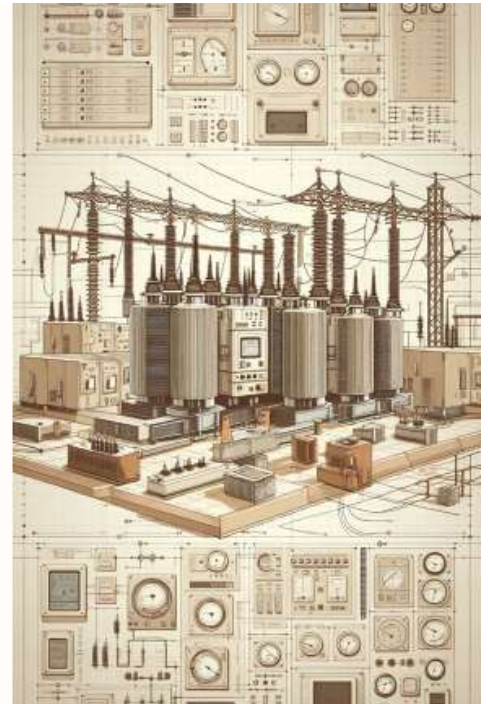
(прізвище, ініціали, посада)
(підпис)

(прізвище, ініціали)

Бакалаврська кваліфікаційна робота

АНАЛІЗ СИСТЕМ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Виконав: ст.гр. ЕС-216 Кочура В.С.



Аналіз сучасних підходів до діагностування електрообладнання

В умовах активного розвитку електроенергетики як в Україні, так і в усьому світі, значно зростають вимоги до надійності та ефективності роботи електрообладнання. Однією з ключових умов забезпечення високої надійності є своєчасне та якісне діагностування технічного стану обладнання. Сучасні підходи до діагностування електрообладнання орієнтовані на оперативне виявлення можливих дефектів і несправностей, що дозволяє уникнути серйозних пошкоджень та зменшити витрати на обслуговування і ремонт. Для повноцінного аналізу існуючих методів і технологій важливо розглянути не тільки світові практики, але й особливості, притаманні українській електроенергетичній галузі.

Основні підходи до діагностування електрообладнання

На сьогодні виділяються два базових підходи до діагностики електрообладнання: безперервний (або онлайн-моніторинг) та періодичний (офлайн-моніторинг). Кожен з цих підходів має свої особливості, переваги та недоліки, що визначають область його ефективного застосування.

Безперервний моніторинг

Система постійного збору інформації в режимі реального часу

Періодичний моніторинг

Планове проведення вимірювань та випробувань через визначені інтервали



Безперервний моніторинг електрообладнання

Безперервний моніторинг – це система постійного збору інформації, яка дозволяє в режимі реального часу оцінювати технічний стан обладнання. Впровадження таких систем стає стандартом для високовольтних електромереж та генеруючих об'єктів в розвинених країнах.

Системи безперервного моніторингу побудовані на основі сучасних цифрових технологій, таких як Big Data, хмарні сервіси та штучний інтелект (AI). Це дозволяє забезпечити інтеграцію великої кількості різних датчиків, аналізувати значні обсяги даних, проводити прогнозування стану обладнання та надавати оперативні рекомендації для обслуговуючого персоналу.



Хмарні сервіси

Зберігання та обробка великих обсягів даних



Інтернет пристрої

Інтеграція різноманітних датчиків



Штучний інтелект

Аналіз даних та прогнозування стану



Big Data

Обробка значних масивів інформації

Основні технології безперервного діагностування

Наразі в Україні і в світовій практиці поширені такі технології безперервного діагностування електрообладнання:

Системи онлайн-діагностики трансформаторів

Включають в себе постійний контроль температури, рівня часткових розрядів, стану ізоляції за допомогою газового аналізу масла (DGA – Dissolved Gas Analysis). Прикладом є системи виробництва Siemens (SITRAM TDCM), ABB (TXpert Ecosystem) та General Electric (Kelman Taplabx). В Україні онлайн-діагностика впроваджена на потужних трансформаторах підстанцій 750 і 330 кВ, які мають критичне значення для енергосистеми.

Безперервний моніторинг ізоляції кабельних ліній

Системи моніторингу кабельних ліній дозволяють оперативно ідентифікувати місця погіршення ізоляції та часткові розряди, що є критичним для високовольтних кабельних мереж у великих містах. Такі системи впроваджені у Франції (ENEDIS), Німеччині (Netze BW GmbH) та США (Con Edison), а в Україні активно розвиваються в міських електромережах Києва та Одеси.



Системи безперервного моніторингу високовольтних вимикачів

Дозволяють в режимі реального часу контролювати стійкості контактних з'єднань, час спрацювання, електромеханічні характеристики вимикача, рівень нагрівання та вібрації. Відомі рішення від ABB (AssetShield), Siemens (SIPROTEC Compact) та Schneider Electric (EcoStruxure Power Monitoring Expert).



Інтегровані IoT-системи для управління активами

Такі системи поєднують в собі всі перераховані вище методи та додатково враховують зовнішні фактори (навантаження, погода, режим роботи), що дозволяє реалізувати ефективне управління життєвим циклом обладнання. Прикладом такого рішення є система ABB Ability, Siemens MindSphere, та Honeywell Forge.

Зарубіжний досвід і можливості для України

Світовий досвід використання безперервного моніторингу електрообладнання демонструє високі економічні показники. Наприклад, у США та Німеччині внаслідок впровадження безперервного моніторингу середній час простою обладнання зменшився на 25–30%, а загальні витрати на обслуговування скоротилися приблизно на 20–40%.

Для України важливим є системне впровадження безперервних систем діагностики на ключових енергооб'єктах. Першочерговим кроком може бути створення національних пілотних проєктів на об'єктах Укренерго, атомних електростанціях, великих ТЕС та ГЕС із застосуванням сучасних цифрових рішень. Також доцільним є розвиток вітчизняного виробництва та сервісних центрів, які б забезпечували впровадження та обслуговування таких систем.

25-30%

Зменшення простою

У США та Німеччині

20-40%

Скорочення витрат

На обслуговування обладнання



Основні принципи періодичного діагностування

Періодичний підхід базується на плановому, систематичному проведенні вимірювань, випробувань та аналізу стану електрообладнання. Ключовими складовими цього підходу є:



Регламентовані періоди проведення діагностики

Зазвичай періоди визначаються нормативними документами (ПУЕ, СОУ НЕК Укренерго, нормативами НКРЕКП тощо) та враховують тип обладнання, його експлуатаційні умови та ризики можливих пошкоджень.



Планово-попереджувальні випробування

Включають в себе вимірювання основних параметрів роботи обладнання, таких як опір ізоляції, характеристики контактних з'єднань, витрати в обмотках трансформаторів, параметри комутації вимикачів, рівень часткових розрядів та інші.



Застосування спеціалізованих переносних діагностичних пристроїв

Для періодичного контролю використовуються переносні діагностичні комплекси, такі як мікроомметри, мегомметри, пристрої для вимірювання часткових розрядів, аналізатори трансформаторного масла, пристрої для тестування високовольтних вимикачів та інші.

Сучасні методи та технології періодичного діагностування

Сучасний періодичний підхід значно розширився завдяки розвитку цифрових технологій та портативних діагностичних приладів, які дозволяють підвищити точність та оперативність діагностики. Серед найпоширеніших технологій та методів можна виокремити:

Термографічний контроль

Інфрачервона термографія дозволяє безконтактно і ефективно визначати перегрівання електрообладнання, що може свідчити про погіршення контактних з'єднань, дефекти ізоляції або перевантаження.

Вимірювання часу спрацювання високовольтних вимикачів

Використовується спеціальне обладнання для визначення часових характеристик вимикачів (наприклад, MIKO-7 від SKB EP, TM-1800 від Megger, CIBANO 500 від Omicron), що дозволяє своєчасно виявити погіршення технічних характеристик вимикачів.



Діагностика ізоляції методом часткових розрядів

Використовується для виявлення дефектів ізоляції, що виникають у високовольтних трансформаторах, кабельних лініях та вимикачах. Приклади обладнання: пристрої ICMsystem (Австрія), PD-Scout (Omicron), PDS Insight (EA Technology).

Газохроматографічний аналіз трансформаторного масла

Періодичний аналіз масла дозволяє визначати стан ізоляції трансформаторів і вчасно виявляти дефекти, що розвиваються. Цей метод активно застосовується в Україні на підстанціях 110–750 кВ.

Зарубіжний досвід застосування періодичного підходу

Досвід країн Європи (Німеччина, Франція, Великобританія), США та Японії свідчить, що періодичний підхід широко використовується для обладнання, яке не є критичним або для якого установка безперервного моніторингу є економічно нецільовою. У розвинених країнах періодичний підхід найчастіше інтегрують у комбіновані стратегії обслуговування, які включають як безперервний моніторинг, так і періодичні контрольні вимірювання.

Періодичний підхід у діагностуванні електрообладнання продовжує відігравати важливу роль завдяки простоті впровадження, економічній доцільності та перевірності методик. Водночас для підвищення ефективності діагностики і забезпечення надійності роботи енергосистем рекомендується використовувати періодичний підхід у поєднанні з безперервним моніторингом, що дозволяє досягнути оптимального балансу між витратами та ефективністю.

Японія

Використання періодичного підходу для некритичного обладнання

Німеччина

Інтеграція періодичного підходу в комбіновані стратегії обслуговування

США

Поєднання періодичного та безперервного моніторингу для оптимального балансу



Переваги та недоліки підходів до діагностування

Переваги безперервного підходу

- Виявлення дефектів на ранній стадії: дозволяє запобігти аваріям ще до появи помітних ознак пошкодження.
- Прогнозування ресурсу обладнання: на основі динамічних змін параметрів можливе опізовання залишкового ресурсу.
- Можливість реалізації автоматизованої системи управління технічним станом: зменшує навантаження на персонал.
- Забезпечення роботи без зупинки: діагностика проводиться без необхідності виведення обладнання з експлуатації.

Недоліки безперервного підходу

- Висока вартість: встановлення та обслуговування систем потребує значних інвестицій.
- Необхідність кваліфікованих кадрів: для аналізу та інтерпретації великих обсягів даних.
- Потреба в IT-забезпеченні: сервіси збору, зберігання, аналізу даних, кіберзахисту.
- Чутливість до зовнішніх факторів: помилки датчиків, перебої зв'язку, збійн спрацювання.

Переваги періодичного підходу

- Простота організації: не потребує спеціального IT-інфраструктурного забезпечення.
- Відносна дешевизна: основні витрати зводяться до оплати праці персоналу та обслуговування вимірювального обладнання.
- Прозорість та стабільність методик: регламентовані державними та галузевими стандартами.
- Універсальність: підходить для більшості типів обладнання незалежно від складності.

Недоліки періодичного підходу

- Інформаційна інертність: дані про стан обладнання оновлюються лише у встановлені терміни.
- Ризик несподіваних відмов: дефекти можуть виникнути між плановими перевірками.
- Трудомісткість: потреба у вивіді бригади, оформленні протоколів, інтерпретації результатів вручну.
- Обмеження застосування: недостатня ефективність для критично важливих об'єктів (особливо при роботі в пікових режимах).

У сучасній практиці найефективнішою виявляється комбінована стратегія, яка передбачає поєднання обох методів. Найчастіше безперервному моніторингу підлягають:

- трансформатори з напругою 220 кВ і вище;
- вимикачі 330–750 кВ;
- системи з великим економічним або стратегічним значенням.

Для решти елементів мережі (вторинні кола, обладнання РУ 35 кВ, кабельні лінії) перевагу надають періодичним перевіркам. Окрім того, в Україні активно впроваджується концепція умовно-орієнтованого обслуговування (Condition-Based Maintenance), яка використовує безперервні дані для прийняття рішень про періодичні втручання.

Переваги та недоліки підходів до діагностування електрообладнання

У практиці експлуатації енергетичного обладнання використовують переважно два підходи до діагностики: безперервний (онлайн-моніторинг) та періодичний (регламентний). Обидва методи мають свою область застосування, специфічні технічні особливості та економічну доцільність. Вибір того чи іншого підходу залежить від важливості обладнання, ступеня його зносу, умов експлуатації, вартості відмови та можливостей інфраструктури.

Порівняльна характеристика підходів

Критерій	Безперервний моніторинг	Періодичний контроль
Частота збору даних	Постійна	З фіксованим інтервалом (дні, тижні, місяці)
Оперативність реагування	Висока (в реальному часі)	Обмежена затримкою до чергової перевірки
Точність прогнозування	Висока, особливо при використанні аналітики	Низька або середня
Вартість впровадження	Висока (встановлення сенсорів, каналів зв'язку, обробка даних)	Середня або низька
Обсяг даних для аналізу	Великий, потребує IT-інфраструктури	Обмежений, не вимагає складних систем
Необхідність персоналу	Менша після налаштування	Вимагає регулярної участі персоналу
Застосування	Критичні об'єкти, підстанції 330–750 кВ, великі трансформатори, високовольтні вимикачі	Об'єкти нижчого пріоритету, розподільчі мережі 35–110 кВ

Приклад: впровадження моніторингу обладнання



Моніторинг трансформаторного обладнання

Раніше трансформатори підлягали перевіркам раз на рік або при виникненні підозрілих ознак. Після встановлення систем онлайн-контролю (наприклад, Siemens Sensformer або українські системи контролю часткових розрядів) змінилося:

- Час виявлення дефекту скоротився з тижнів до лічених годин.
- Зменшено кількість аварійних ситуацій на 30–50% на об'єктах, що були обладнані системами моніторингу.
- Скорочено витрати на ремонт завдяки вчасному усуненню дрібних дефектів до того, як вони переросли в серйозні пошкодження.



Моніторинг високовольтних вимикачів

Високовольтні вимикачі 330 кВ та вище, особливо в мережах Укренерго, отримали цифрове обладнання, здатне фіксувати напрацювання механізмів, тиск в камерах, вологість тощо. Після впровадження:

- Інтервал між регламентними оглядами було збільшено майже вдвічі.
- Тривалість аварійних зупинок зменшилась завдяки підготовленості ремонтних бригад, які заздалегідь знали про ймовірну несправність.

Приклад іноземного досвіду

Німеччина

У TenneT з 2017 року повністю перейшли на систему предиктивної діагностики для трансформаторів і вимикачів на основі big data-аналітики. Внаслідок цього:

- На 70% зменшено кількість аварій на обладнанні понад 30 років експлуатації.
- Скорочено середній час реакції на інцидент з 4 год до 30 хв.
- Впроваджено обов'язкову оцінку ризику перед кожною плановою зупинкою, базуючись на даних з онлайн-систем.

Польща

У рамках проекту Smart Grid в регіонах Silesia та Mazovia реалізовано повну цифровізацію обліку та моніторингу підстанцій 110/35 кВ, що призвело до:

- Підвищення надійності електропостачання для понад 1 млн споживачів.
- Скорочення втрат електроенергії на 2,5% лише за рахунок оптимізації роботи обладнання на основі результатів діагностики.

Узагальнення змін в експлуатації

Показник	До впровадження діагностики	Після впровадження
Виявлення дефектів	Переважно за зовнішніми ознаками	На ранній стадії, в реальному часі
Частота обслуговування	Регламентована, незалежно від стану	Орієнтована на реальний технічний стан
Витрати на ремонт	Високі через серйозні пошкодження	Знижені завдяки профілактиці
Надійність обладнання	Залежала від плановості	Забезпечується адаптивно
Оперативність реагування	Обмежена	Майже миттєва

Таким чином, впровадження систем діагностики електрообладнання значною мірою змінило філософію експлуатації — від жорстко регламентованого до інтелектуально керованого технічного обслуговування.



Можливий економічний ефект від впровадження діагностування в енергетичному секторі України



Впровадження сучасних систем діагностування в енергетиці України є не лише технічно обґрунтованим, а й економічно доцільним кроком. На тлі значного зносу основних фондів, складної фінансової ситуації у багатьох енергетичних підприємствах та потреби в оптимізації витрат, актуальним є пошук рішень, які дозволяють підвищити ефективність експлуатації обладнання без значних інвестицій у його повну заміну. Саме діагностування забезпечує такий ефект.

Згідно з даними Укренерго та Міненерго України, щороку понад 30% витрат на обслуговування електрообладнання припадає на аварійні ремонти, які є прямим наслідком несвочасного виявлення дефектів. У середньому, один аварійний вихід з ладу силового трансформатора 110–330 кВ в Україні призводить до:

- Прямих витрат на ремонт: від 3 до 15 млн грн.
- Втрат електроенергії та недоотриманої виручки через вимушене відключення споживачів: до 5 млн грн за добу.
- Зниження репутаційних показників оператора системи передачі.



Переваги впровадження онлайн-систем діагностики



Виявлення дефектів на ранніх стадіях

- Зменшення кількості аварійних виходів з ладу на 40-60%
- Скорочення витрат на ремонт обладнання на 20-25%



Збільшення міжремонтних інтервалів

- Скорочення непотрібних планових зупинок
- Оптимізація графіків обслуговування



Зниження втрат електроенергії

- Виявлення поганих контактів у з'єднаннях
- Виявлення підвищеного опору у заземлювальних пристроях
- Виявлення часткових розрядів та міжвиткових пробів у трансформаторах

Приклад: У разі впровадження системи діагностики в трансформаторному парку Укргідроенерго очікуване скорочення витрат на планове обслуговування становить близько 12 млн грн/рік.

Усунення цих дефектів сприяє зниженню втрат активної енергії, які в Україні у 2023 році становили близько 12,3% від загального виробництва. За оцінками Інституту електродинаміки НАН України, 1% зниження втрат у магістральних мережах дає економічний ефект понад 400 млн грн/рік.

Приклад прогнозованого економічного ефекту

30-60 млн.грн.

Зменшення аварійних зупинок

Річна економія в гривнях для середнього оператора системи розподілу

15-25 млн.грн.

Зниження витрат на ремонт

Річна економія в гривнях

20-40 млн.грн.

Економія на втрати електроенергії

Річна економія в гривнях

70-130 млн.грн.

Сумарний ефект

Річна економія в гривнях

Застосування систем діагностування дозволяє досягти комплексного економічного ефекту:

- Зниження прямих і непрямих витрат;
- Підвищення ефективності та надійності роботи обладнання;
- Поліпшення управління активами та фінансового планування;
- Прискорення модернізації енергетичного сектору без надмірних інвестицій.

У контексті України, де кожна гривня витрат у енергетиці має стратегічне значення, діагностика є не лише технічним, а й економічним інструментом підвищення стійкості енергосистеми.

Огляд діагностичних пристроїв

Параметр	OMICRON MONTESTO 200	Qualitrol TMS	ABB CoreSense	GE TRANSPORT X [®]
Тип контролю	Частковий розряди (PD)	DGA, онлайн	Комплексний моніторинг	DGA, портативний
Спосіб встановлення	Переносний	Вбудований	Вбудований	Переносний
Кількість газів для аналізу	-	до 9	до 7	до 6
Інтерфейс	USB, Ethernet	Modbus, 4-20 mA	Modbus, Ethernet, SCADA	USB, Bluetooth
Додаткові функції	Аналіз PD у різних сегментах	Прогноз ресурсу ізоляції	Прогноз на базі ШІ	Автоматична калібровка



Моніторинг розчинених газів (DGA)

• Qualitrol TMS – один із найкращих пристроїв для безперервного онлайн-моніторингу розчинених газів. Підтримує аналіз до 9 елементів газів, має вбудований аналізатор за алгоритмом Duta's Triangle і IEC 60398. • GE Kelman TRANSPORT X[®] – портативний пристрій для польового аналізу DGA. Забезпечує точні результати та зручність для експлуатаційного персоналу. • Siemens DGA 150 – система, що вбудовується безпосередньо в трансформатор та забезпечує високу чутливість до початкових етапів розвитку ізоляції.



Контроль часткових розрядів (PD monitoring)

• OMICRON MONTESTO 200 – мобільна система для вимірювання часткових розрядів онлайн та офлайн. Має високу роздільну здатність та може працювати на трансформаторах, випилових і кабелів. • Siemens PD Scan – портативний детектор УЗ-сигналів часткових розрядів у високовольтному обладнанні.



Системи комплексного моніторингу

• ABB CoreSense[™] – спеціалізована система моніторингу, яка об'єднує DGA, температуру, вологість та частковий розряд в одну платформу. Підтримує інтеграцію з SCADA/EMS. • GE PowerVision Fleet – хмарна платформа аналізу стану всього парку трансформаторів підприємства з прогнозовою аналітикою.



Контроль температури та навантаження

• Qualitrol 500 – багатоканальна система вимірювання температури обмоток і олії з можливістю аварійної сигналізації. • ABB Fiber Optic Temperature Sensing – точні волоконно-оптичні датчики, що встановлюються безпосередньо в обмотках трансформатора.



Вимірювання вібрації

• Megger TRAX – універсальний діагностичний пристрій для вимірювання широкотактного спектра параметрів трансформатора, включаючи вібраційні характеристики та імпульси.

Найсучасніші рішення передбачають не окремі модулі моніторингу, а інтегровані багифункційні системи, які можуть адаптуватися до специфіки експлуатації трансформатора, забезпечуючи в режимі реального часу повну картину їх технічного стану. Українські енергетичні компанії вже мають позитивний досвід керування пристроями OMICRON та GE на об'єктах «Укренерго» та «ДТЕК».

Універсальний комплект OMICRON CPC 100

OMICRON CPC 100 - це універсальний комплект, призначений для діагностики та обслуговування обладнання підстанцій. Він використовується для тестування трансформаторів, подаючи контрольний струм або напругу для перевірки точності та правильності їх роботи.

Пристрій дозволяє виявляти можливі внутрішні дефекти або зміщення в обладнанні, діагностувати силові трансформатори, тестувати їх обмотки на пошкодження, вимірювати імпеданс і перевіряти загальний стан для запобігання аваріям.



Функції та можливості



Тестування трансформаторів

Діагностика силових трансформаторів, тестування обмоток на пошкодження, вимірювання імпедансу та перевірка загального стану



Тестування ліній

Вимірювання опору ізоляції та виявлення пошкоджень у кабельних лініях та лініях передачі



Перевірка вимикачів

Контроль спрацювання, пускових струмів та часу відключення вимикачів і автоматичних роз'єднувачів



Оцінка систем заземлення

Визначення імпедансу і цілісності ліній заземлення для безпеки обладнання і персоналу

Тестування обертових машин

Перевірка генераторів і двигунів, виявлення коротких замикань в обмотках, вимірювання опору та індуктивності для вчасного виявлення проблем

Вимірювання діелектричних втрат

Вимірювання коефіцієнта потужності і тангенса кута діелектричних втрат (tan δ) для оцінки стану ізоляції та передбачення можливих відмов ізоляційних матеріалів

Порти та інтерфейси



Мережеві порти

RJ45 Ethernet порт для підключення до ПК або мережевого хабу, RS-232 порт для підключення зовнішніх пристроїв, зокрема CP TD1, USB порт для підключення USB-накопичувачів



Інтерфейси безпеки

Інтерфейс для зовнішніх засобів безпеки: зовнішня кнопка аварійної зупинки, кнопка "Start/Stop", зовнішні індикатори стану, пристрій CP CR500



Виходи змінного струму

130V / 6A AC (запобіжник 3.15A або 6.3A), 800A AC (високий струм, роз'єм з фіксацією), 2kV AC (високовольтний вихід)



Виходи постійного струму

6A DC (запобіжник 6A), 400A DC (високий струм, роз'єм з фіксацією)

