

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Інженерно-технологічний факультет**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

До захисту  
Допускається  
Завідувач кафедри енергетики та  
електротехнічних систем

---

доцент Чепіжний А.В.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Підвищення надійності роботи  
трансформаторів шляхом дослідження процесів  
старіння ізоляції та розробки методів її відновлення»

Виконав

\_\_\_\_\_

(підпис)

Колодяжний Я.І.  
(прізвище, ініціали)

Група

ЗЕТЕ 2301 м

(Науковий) керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Барсукова Г.В.  
(прізвище, ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Інженерно-технологічний факультет  
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри енергетики та  
електротехнічних систем

доцент \_\_\_\_\_ Чепіжний А.В.  
(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_\_ року

**ЗАВДАННЯ  
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ  
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

*Колодяжному Ярославу Ігоровичу*

(прізвище, ім'я та по батькові)

**1. Тема роботи:** Підвищення надійності роботи трансформаторів шляхом дослідження процесів старіння ізоляції та розробки методів її відновлення.

керівник роботи: Барсукова Ганна Володимирівна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом по закладу вищої освіти від «06» 11 2024 р. № 3738/ос

**2. Термін подання здобувачем закінченої роботи** «11» 11 2024 р.

**3. Вихідні дані до роботи** технічні характеристики трансформаторів, процеси старіння ізоляції, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти.

**4. Зміст пояснювальної записки** (перелік питань, що підлягають розробці):

1 Огляд літератури.

2 Теоретичні основи дослідження процесів старіння ізоляції.

3 Розробка та впровадження установки вакуумного виморожування «ІНІЙ».

4 Охорона праці.

5 Економічне обґрунтування.

Висновки.

Список використаних джерел.

**5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:**

Презентаційний матеріал виконаний в програмі Power Point

## 6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата

## КАЛЕНДАРНИЙ ГРАФІК

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітки
1	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 15.08.2024 р.	
2	Складання плану роботи	до 23.08.2024 р.	
3	Написання вступу	до 26.08.2024 р.	
4	Підготовка розділу «Розділ 1»	до 28.08.2024 р.	
5	Підготовка розділу «Розділ 2»	до 16.09.2024 р.	
6	Підготовка розділу «Розділ 3»	до 30.09.2024 р.	
7	Підготовка розділу «Розділ 4»	до 07.10.2024 р.	
8	Підготовка розділу «Розділ 5»	до 21.10.2024 р.	
9	Написання висновків	до 28.10.2024 р.	
10	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2024 р.	
11	Подання роботи на рецензування	до 05.11.2024 р.	
12	Подання до попереднього захисту	до 12.11.2024 р.	

Здобувач вищої освіти

\_\_\_\_\_ (Колодяжний Я.І.)  
(підпис) (прізвище, ініціали)

(Науковий) керівник  
дипломної роботи

\_\_\_\_\_ (Барсукова Г.В.)  
(підпис) (прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Підвищення надійності роботи трансформаторів шляхом дослідження процесів старіння ізоляції та розробки методів її відновлення: Дипломна робота / Колодяжний Ярослав Ігорович – Суми: СНАУ, 2024 р. – 57 с.

Об’єкт дослідження – процес сушіння твердої ізоляції силових трансформаторів.

Предмет дослідження – метод вакуумного виморожування з використанням установки «Іній».

Мета роботи – підвищення надійності та вдосконалення процесу сушіння твердої ізоляції силових трансформаторів шляхом застосування методу вакуумного виморожування з використанням установки «Іній».

В дипломній роботі проведено аналіз проблеми висушування ізоляції в силових трансформаторах. Надійність і ефективність роботи трансформаторів суттєво залежать від стану їх ізоляції. Висока вологість може призводити до зниження електричної міцності ізоляції та підвищення ризику виникнення аварійних ситуацій, що вимагає пошуку та впровадження більш досконалих методів сушіння.

У рамках цього дослідження вперше було запропоновано використання методу вакуумного виморожування, який ґрунтується на принципі сублімації на прикладі с. Боромля, де підвищена природна вологість неподалік трансформаторної підстанції.

Розглянуто питання охорони праці, де особливу увагу слід приділяти ризику ураження електричним струмом, впливу електромагнітного випромінювання та потенційній токсичності продуктів деградації ізоляційних матеріалів.

**Ключові слова:** ізоляція, методи, вакуум, виморожування, установка.

Ілл. 10

Табл. 2

Бібл. 26

ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ .....	9
1.1. Загальні відомості про трансформатори .....	9
1.2. Проблеми надійності в експлуатації трансформаторів .....	12
1.3. Вітчизняні та зарубіжні дослідження у цій галузі .....	13
1.4. Висновки до 1-го розділу .....	14
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СТАРІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ .....	16
2.1. Види та процеси старіння ізоляційних матеріалів .....	16
2.2. Вплив факторів зовнішнього середовища на стан ізоляції .....	17
2.3. Методи відновлення ізоляції .....	18
2.4. Сучасний спосіб сушіння ізоляції – вакуумне виморожування .....	21
2.5. Висновки до 2-го розділу .....	22
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОГО ВИМОРОЖУВАННЯ «ІНІЙ» .....	24
3.1. Розробка установки «Іній» .....	24
3.2. Принцип роботи установки «Іній» .....	26
3.3. Порівняльний аналіз ефективності вакуумного виморожування із традиційними методами сушіння ізоляції трансформаторів .....	28
3.4. Оцінка впливу відновленої ізоляції на роботу трансформаторів .....	31
3.5. Опис математичної моделі процесу вакуумного виморожування для силових трансформаторів .....	31
3.6. Висновки до 3-го розділу .....	35
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ .....	37
4.1. Організація охорони праці при старінні ізоляції .....	37

	6
4.2. Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при старінні ізоляції .....	38
4.3. Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при старінні ізоляції .....	40
4.4. Висновки до 4-го розділу .....	42
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ .....	43
5.1. Комплекс заходів з попередження передчасного старіння ізоляції .....	43
5.2. Рекомендації щодо вибору оптимальних методів відновлення ізоляції – вакуумне виморожування .....	44
5.3. Розробка системи моніторингу стану ізоляції трансформаторів .....	46
5.4. Оцінка економічного ефекту від впровадження методу вакуумного виморожування .....	47
5.5. Висновки до 5-го розділу .....	49
ВИСНОВКИ .....	51
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	54

## ВСТУП

*Актуальність* теми дослідження обумовлена критичною важливістю підтримки належного стану ізоляції силових трансформаторів для забезпечення надійності та ефективності електроенергетичних систем [1].

Волога, що накопичується в ізоляції трансформаторів під час експлуатації, значно знижує їх електричну міцність та скорочує термін служби. Традиційні методи сушіння ізоляції часто виявляються недостатньо ефективними або вимагають тривалого часу обробки. У цьому контексті метод вакуумного виморожування за допомогою установки сушіння ізоляції «Іній» представляє собою перспективний підхід, що дозволяє швидко та якісно видаляти вологу з твердої ізоляції трансформаторів [2].

*Метою дослідження* є підвищення надійності та вдосконалення процесу сушіння твердої ізоляції силових трансформаторів шляхом застосування методу вакуумного виморожування з використанням установки «Іній».

*Завдання дослідження* включають:

- ✓ аналіз існуючих методів сушіння ізоляції трансформаторів та їх обмежень;
- ✓ вивчення принципів роботи та технічних характеристик установки «Іній»;
- ✓ експериментальне дослідження ефективності методу вакуумного виморожування на силових трансформаторах с. Боромля;
- ✓ розробку рекомендацій щодо оптимізації параметрів процесу сушіння з використанням даного методу [3].

*Об'єктом дослідження* є процес сушіння твердої ізоляції силових трансформаторів.

*Предметом дослідження* виступає метод вакуумного виморожування з використанням установки «Іній» як засіб підвищення ефективності видалення вологи з ізоляції трансформаторів.

*Наукова новизна* роботи полягає у комплексному дослідженні можливостей та обмежень методу вакуумного виморожування для сушіння ізоляції трансформаторів різних класів напруги. Вперше буде проведено порівняльний аналіз ефективності даного методу з традиційними підходами до сушіння ізоляції на основі експериментальних даних. Також буде розроблено математичну модель процесу вакуумного виморожування, що дозволить оптимізувати параметри сушіння для конкретних типів трансформаторів.

*Практична значущість* дослідження полягає у розробці конкретних рекомендацій щодо застосування методу вакуумного виморожування з використанням установки «Іній» для сушіння ізоляції трансформаторів в умовах експлуатації та ремонту на прикладі с. Боромля Охтирського району Сумської області, де в умовах помірного клімату система електропостачання перебуває в підвищеній вологості клімату [4]. Результати роботи дозволять підвищити надійність та ефективність процесів технічного обслуговування трансформаторного обладнання, скоротити час простою під час ремонтних робіт та подовжити термін служби трансформаторів. Економічний ефект від впровадження розроблених рекомендацій очікується за рахунок зменшення витрат на ремонт та заміну трансформаторів, а також підвищення надійності електропостачання.

*Апробація результатів магістерської роботи.* За результатами досліджень опубліковано 1 тезу-доповідь та взято участь в XI Міжнародній науково-практичній конференції **«Проблеми сучасної енергетики і автоматики в системі природокористування»** (теорія, практика, історія, освіта) (06-07 листопада 2024 р.).

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

### 1.1. Загальні відомості про трансформатори

*Трансформатори* (рис. 1.1) є ключовими елементами сучасних систем передачі та розподілу електричної енергії. Вони являють собою статичні електромагнітні пристрої, призначені для перетворення напруги змінного струму з одного рівня на інший при збереженні частоти [1].



Рисунок 1.1 – Установка трансформатора

Принцип роботи трансформатора (рис. 1.2) базується на явищі електромагнітної індукції, відкритому Майклом Фарадеєм у 1831 році. Електромагнітна індукція в трансформаторі забезпечує перетворення електричної енергії з одного рівня напруги на інший. При зміні струму в первинній обмотці створюється змінне магнітне поле, яке індукує електрорушійний сила в вторинній обмотці, що дозволяє передавати енергію без прямого електричного контакту між обмотками [5].

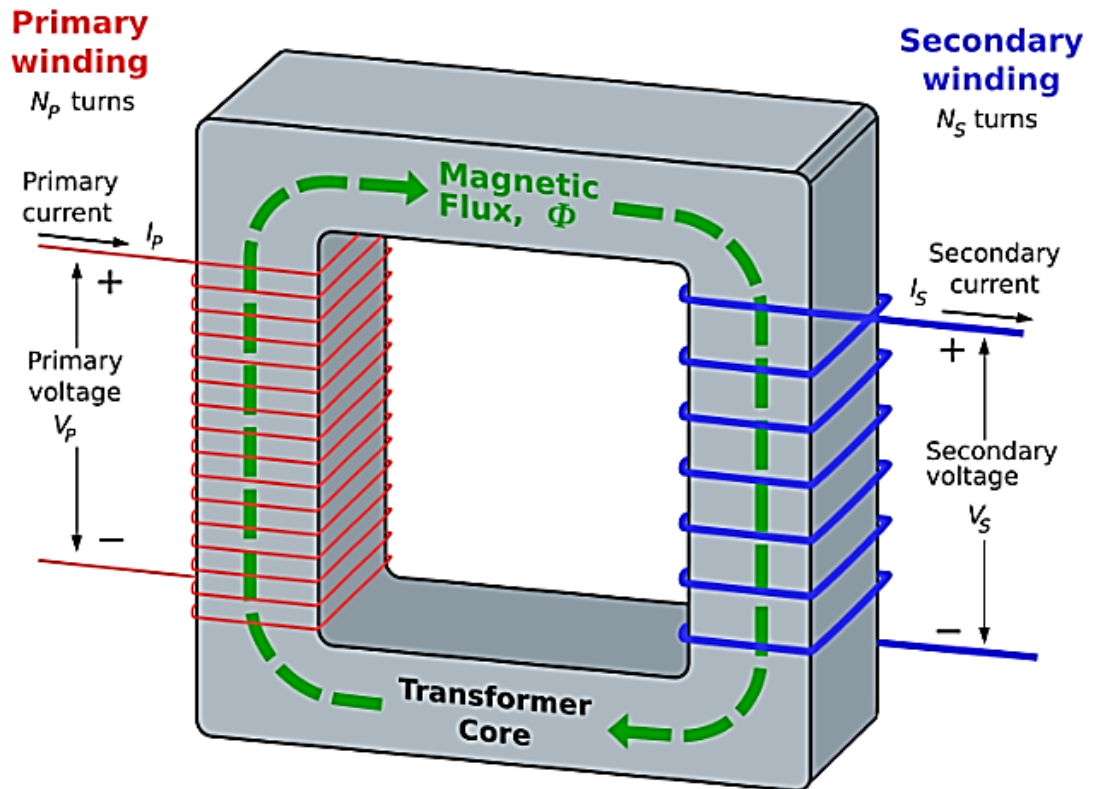


Рисунок 1.2 – Схематична будова трансформатора

*Основними компонентами трансформатора є:*

- ✓ магнітопровід,
- ✓ первинна та вторинна обмотки,
- ✓ ізоляційна система.

*Магнітопровід* трансформатора виготовляється з феромагнітних матеріалів, зазвичай з електротехнічної сталі, і служить для концентрації магнітного потоку.

*Обмотки* трансформатора виконуються з мідного або алюмінієвого дроту і забезпечують перетворення енергії електричного поля в енергію магнітного поля і навпаки.

*Ізоляційна система* трансформатора включає твердку (паперово-масляну, лакотканинну) та рідку (трансформаторне масло) ізоляцію, які забезпечують електричну міцність конструкції та відвід тепла.

*Трансформатори класифікуються за різними ознаками:*

за призначенням (силові, вимірювальні),  
за кількістю фаз (однофазні, трифазні),  
за способом охолодження (сухі, масляні),  
за потужністю,  
за напругою.

Силові трансформатори (рис. 1.3), які є об'єктом даного дослідження, широко використовуються в електроенергетичних системах для підвищення напруги при передачі електроенергії на великі відстані та її зниження для розподілу кінцевим споживачам [6].



Рисунок 1.3 – Силовий трансформатор 110/35/10кВ потужністю 63МВА

## **1.2. Проблеми надійності в експлуатації трансформаторів**

Надійність роботи трансформаторів є критично важливим фактором для стабільного функціонування електроенергетичних систем. Однією з

найсерйозніших проблем, що впливають на надійність трансформаторів, є наявність *надлишкової вологи* в їх ізоляційній системі [7].

*Волога може проникати в ізоляцію трансформатора різними шляхами:*

- ✓ через недосконалості герметизації,
- ✓ під час ремонтних робіт,
- ✓ утворюватися в результаті деградації целюлозної ізоляції та трансформаторного масла.

*Присутність надлишкової вологи в ізоляції трансформатора призводить до ряду негативних наслідків [8]:*

- ✓ вона значно знижує електричну міцність ізоляції, що підвищує ризик електричних пробіїв та коротких замикань.
- ✓ волога прискорює процеси старіння целюлозної ізоляції, викликаючи гідроліз целюлози та зменшення ступеня полімеризації паперової ізоляції. Це призводить до зниження механічної міцності ізоляції та скорочення терміну служби трансформатора.
- ✓ наявність вологи в трансформаторному маслі погіршує його діелектричні властивості,
  - ✓ збільшує діелектричні втрати,
  - ✓ знижує охолоджувальну здатність,
  - ✓ призвести до перегріву трансформатора та прискореного старіння ізоляційних матеріалів.

*Особливо небезпечним є утворення газових бульбашок при нагріванні вологої ізоляції, що може спричинити часткові розряди та подальше руйнування ізоляції [9].*

### **1.3. Вітчизняні та зарубіжні дослідження у цій галузі**

Проблема надійності трансформаторів та, зокрема, вплив вологи на їх ізоляційну систему, є предметом інтенсивних досліджень як вітчизняних, так і

зарубіжних вчених. У вітчизняній науці значний внесок у вивчення цієї проблематики зробили такі дослідники, як В.В. Назаров, який розробив методи діагностики стану ізоляції трансформаторів, та О.С. Яндульський, який досліджував питання підвищення надійності роботи трансформаторного обладнання [10].

Серед зарубіжних дослідників варто відзначити роботи Т. Van Craenenbroeck та Н. De Herdt, які провели комплексні дослідження впливу вологи на старіння целюлозної ізоляції трансформаторів [11-12].

Важливий внесок у розуміння механізмів деградації ізоляції під впливом вологи зробили дослідження L. Lundgaard та W. Hansen, які вивчали кінетику гідролізу целюлози в трансформаторному маслі [13].

Значна увага в сучасних дослідженнях приділяється розробці ефективних методів видалення вологи з ізоляції трансформаторів. Зокрема, китайські вчені Zhou Limin та Wu Guangjin запропонували інноваційний метод вакуумного виморожування для сушіння ізоляції трансформаторів [14].

У США та Європі активно розвиваються технології онлайн-моніторингу вмісту вологи в трансформаторах, про що свідчать роботи S. Tenbohlen та M. Koch [15].

Вітчизняні дослідники, такі як Д.В. Ріпенко та І.В. Ніжник, зосередили свою увагу на розробці комплексних підходів до діагностики та відновлення ізоляції трансформаторів з урахуванням специфіки експлуатації в умовах української енергосистеми [16]. Їхні роботи внесли значний вклад у розвиток методів оцінки залишкового ресурсу трансформаторів та оптимізації стратегій їх технічного обслуговування.

#### **1.4. Висновки до 1-го розділу**

Проведений огляд літератури дозволяє зробити ряд важливих висновків щодо стану досліджень у галузі надійності трансформаторів та проблеми надлишкової вологи в їх ізоляції.

По-перше, трансформатори залишаються критично важливими елементами сучасних електроенергетичних систем, від надійності яких залежить стабільність електропостачання.

По-друге, проблема надлишкової вологи в ізоляції трансформаторів є однією з найсерйозніших загроз їх надійності, що призводить до прискореного старіння ізоляції та підвищення ризику відмов.

Аналіз вітчизняних та зарубіжних досліджень показує, що ця проблема знаходиться у фокусі уваги наукової спільноти. Ведуться інтенсивні роботи з вивчення механізмів впливу вологи на ізоляційні матеріали, розробки ефективних методів діагностики та відновлення ізоляції трансформаторів. Особливо перспективними напрямками досліджень є розробка інноваційних методів сушіння ізоляції, таких як вакуумне виморожування, та впровадження систем онлайн-моніторингу вмісту вологи.

Водночас, огляд літератури виявив необхідність подальших досліджень у напрямку оптимізації методів відновлення ізоляції трансформаторів з урахуванням специфіки їх експлуатації в різних кліматичних умовах та режимах навантаження. Також актуальним залишається питання розробки комплексних підходів до оцінки залишкового ресурсу трансформаторів та планування їх технічного обслуговування з урахуванням фактора вологості ізоляції.

Таким чином, проведений огляд літератури підтверджує актуальність та важливість дослідження проблеми надлишкової вологи в ізоляції трансформаторів та розробки ефективних методів її вирішення для підвищення надійності роботи електроенергетичних систем.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ СТАРІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ

### 2.1. Види та процеси старіння ізоляційних матеріалів

Старіння ізоляційних матеріалів є складним процесом, який призводить до поступового погіршення їхніх електричних, механічних та хімічних властивостей [17].

Існує кілька *видів старіння ізоляції*, кожен з яких має свої особливості та механізми розвитку.

✓ *Теплове старіння* є одним з найпоширеніших видів і відбувається внаслідок тривалого впливу підвищених температур на ізоляційний матеріал. Цей процес призводить до деструкції полімерних ланцюгів, що складають основу багатьох ізоляційних матеріалів.

✓ *Електричне старіння* виникає під впливом електричного поля та часткових розрядів у мікропорах ізоляції. Цей вид старіння особливо характерний для високовольтного обладнання і може призвести до утворення провідних каналів в ізоляції.

✓ *Механічне старіння* є результатом циклічних навантажень, вібрацій та механічних напружень, які виникають під час експлуатації обладнання. Воно може призвести до появи мікротріщин та розшарування ізоляції.

✓ *Хімічне старіння* відбувається внаслідок взаємодії ізоляційних матеріалів з навколишнім середовищем, зокрема з киснем, вологою та агресивними хімічними речовинами. Цей процес може призвести до окислення, гідролізу та інших хімічних реакцій, які змінюють структуру та властивості ізоляції.

Важливо зазначити, що в реальних умовах експлуатації обладнання ці види старіння часто діють одночасно, посилюючи загальний ефект деградації ізоляційних матеріалів.

### 2.2. Вплив факторів зовнішнього середовища на стан ізоляції

*Фактори* зовнішнього середовища відіграють ключову роль у процесах старіння та деградації ізоляційних матеріалів [18].

✓ *Температура* є одним з найважливіших факторів, що впливають на стан ізоляції. Підвищені температури прискорюють хімічні реакції розкладу полімерів, що призводить до втрати механічної міцності та діелектричних властивостей ізоляції. Циклічні зміни температури також можуть викликати термомеханічні напруження, які призводять до розтріскування та розшарування ізоляційних матеріалів.

✓ *Вологість* навколишнього середовища є іншим критичним фактором, що впливає на стан ізоляції. Проникнення вологи в ізоляційні матеріали може призвести до зниження їх електричного опору, збільшення діелектричних втрат та прискорення процесів хімічного розкладу. Особливо небезпечним є поєднання високої вологості з підвищеною температурою, що створює сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів та прискорення процесів гідролізу.

✓ *Ультрафіолетове випромінювання*, характерне для зовнішніх установок, може викликати фотохімічну деструкцію полімерних матеріалів, що призводить до їх крихкості та розтріскування. Забруднення атмосфери, зокрема наявність агресивних газів та пилу, також негативно впливає на стан ізоляції, прискорюючи процеси корозії та хімічного розкладу. Механічні навантаження, вібрації та ударні впливи, які виникають під час експлуатації обладнання, можуть призвести до механічного пошкодження ізоляції та утворення мікротріщин.

### **2.3. Методи відновлення ізоляції**

Відновлення ізоляції є важливим аспектом технічного обслуговування електротехнічного обладнання, що дозволяє продовжити термін його експлуатації та підвищити надійність роботи [19].

Існує кілька *методів відновлення ізоляції*, вибір яких залежить:

- ✓ від типу ізоляційного матеріалу,
- ✓ ступеня його деградації,
- ✓ специфіки обладнання.

Одним з найпоширеніших методів є *сушіння ізоляції*, яке застосовується для видалення надлишкової вологи.

Цей метод може здійснюватися різними *способами*, включаючи:

- ✓ конвекційне сушіння (рис. 2.1),
- ✓ вакуумне сушіння,
- ✓ сушіння з застосуванням інфрачервоного випромінювання.

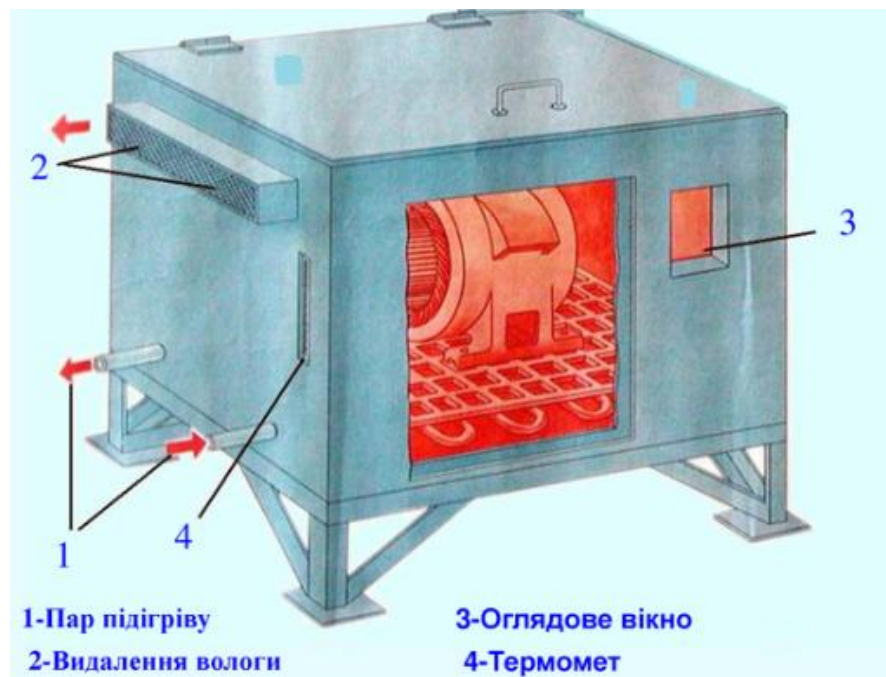


Рисунок 2.1 – Сушіння обмоток трансформатора в шафі

*Просочення ізоляції* спеціальними компаундами є ефективним методом відновлення її діелектричних властивостей та механічної міцності (рис. 2.2). Цей метод дозволяє заповнити мікропори та тріщини в ізоляції, покращуючи її стійкість до вологи та часткових розрядів [20].



Рисунок 2.2 – Просочення обмоток

Для високовольтного обладнання часто застосовується *метод регенерації трансформаторного масла* (рис. 2.3), який включає його очищення, дегазацію та відновлення антиокислювальних присадок.



Рисунок 2.3 – Обробка трансформаторного масла

*Метод термовакуумної обробки* (рис. 2.4) є комплексним підходом до відновлення ізоляції, який поєднує сушіння, дегазацію та просочення в умовах вакууму та підвищеної температури. Цей метод особливо ефективний для відновлення ізоляції великогабаритного обладнання, такого як силові трансформатори.



Рисунок 2.4 – УВМр-1Л установка для очищення електроізоляційної оливи

У деяких випадках може застосовуватися часткова або повна заміна ізоляційних матеріалів, особливо якщо їх деградація досягла критичного рівня.

#### **2.4. Сучасний спосіб сушіння ізоляції – вакуумне виморожування**

*Вакуумне виморожування* є інноваційним та ефективним методом сушіння ізоляції, який дозволяє досягти високого ступеня видалення вологи без негативного впливу високих температур на ізоляційні матеріали. Цей метод базується на принципі сублімації, коли волога з твердого стану (льоду) переходить безпосередньо в газоподібний стан, минаючи рідку фазу. Процес відбувається в умовах глибокого вакууму, що забезпечує інтенсивне випаровування вологи навіть при низьких температурах [21].

*Основними перевагами* методу вакуумного виморожування є можливість ефективного видалення вологи з глибинних шарів ізоляції без ризику її

термічного пошкодження. Це особливо важливо для чутливих до температури матеріалів, таких як целюлозна ізоляція трансформаторів. Процес вакуумного виморожування дозволяє досягти дуже низького залишкового вмісту вологи в ізоляції, що значно покращує її діелектричні властивості та збільшує ресурс роботи обладнання [21].

*Технологія вакуумного виморожування включає кілька етапів:*

- ✓ створення глибокого вакууму в камері з обладнанням,
- ✓ поступове зниження температури для кристалізації вологи,
- ✓ сублімацію льоду та його уловлювання на спеціальних холодних поверхнях (конденсаторах).

Важливою особливістю цього методу є можливість контролювати процес сушіння за рахунок моніторингу тиску та температури в камері, що дозволяє оптимізувати режими обробки для різних типів ізоляційних матеріалів.

## **2.5. Висновки до 2-го розділу**

Дослідження процесів старіння ізоляції та методів її відновлення є критично важливим для забезпечення надійної роботи електротехнічного обладнання.

*Розуміння різних видів старіння:*

- ✓ теплового,
- ✓ електричного,
- ✓ механічного,
- ✓ хімічного,

дозволяє розробляти ефективні стратегії технічного обслуговування та ремонту.

*Вплив факторів зовнішнього середовища, таких як:*

- ✓ температура,
- ✓ вологість,
- ✓ ультрафіолетове випромінювання та забруднення,

підкреслює необхідність комплексного підходу до захисту та відновлення ізоляційних матеріалів.

Серед різноманітних методів відновлення ізоляції особливу увагу привертає *інноваційний метод вакуумного виморожування*. Цей метод демонструє високу ефективність у видаленні вологи з ізоляції без ризику термічного пошкодження матеріалів. Його застосування відкриває нові можливості для продовження терміну служби та підвищення надійності електротехнічного обладнання, особливо силових трансформаторів з целюлозною ізоляцією.

Проведений аналіз теоретичних основ дослідження процесів старіння ізоляції підкреслює важливість постійного моніторингу стану ізоляційних матеріалів та своєчасного застосування відповідних методів їх відновлення.

Розвиток технологій, таких як вакуумне виморожування, свідчить про перспективність подальших досліджень у цій галузі та необхідність впровадження інноваційних рішень для забезпечення надійності та ефективності електроенергетичних систем.

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОГО ВИМОРОЖУВАННЯ «ІНІЙ»

### 3.1. Розробка установки «Іній»

Установка вакуумного виморожування «Іній» (рис. 3.1) була розроблена з метою ефективного сушіння твердої ізоляції силових трансформаторів напругою 110-1150 кВ. Процес розробки включав створення унікальної конструкції, що поєднує високопродуктивні вакуумні насоси та низькотемпературну пастку виморожування. Особлива увага приділялася забезпеченню високої швидкості відкачування парогазової суміші та досягненню низького залишкового тиску в баку трансформатора [22].



Рисунок 3.1 – Установка для обробки твердої ізоляції силових трансформаторів «ЕТМА Іній 7-550-1×150 (-70) У1»

Технічні характеристики установки «ЕТМА Іній 7-550-1×150 (-70) У1» представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики установки «ЕТМА Іній 7-550-1×150 (-70) У1»

№	Найменування параметру	Значення параметру
1	Швидкість відкачування парогазової суміші в діапазоні тисків 26,6 Па – 4,5 кПа, л/с, не менше	550
2	Залишковий тиск у пастці, Па, не більше	1,3
3	Залишковий тиск, що створюється установкою в електрообладнанні, Па, не більше	26,6
4	Швидкість відкачування насоса попереднього розрідження в діапазоні тиску 100 Па – 100 кПа, л/с, не менше	150
5	Характеристики пастки водяної пари: <ul style="list-style-type: none"> <li>• поверхня конденсації водяної пари, м<sup>2</sup>, не менше</li> <li>• температура поверхні конденсації, °С, не вище</li> <li>• спосіб розморожування</li> <li>• час розморожування, год, не більше</li> </ul>	6,1 мінус 70 автоматичний 1
6	Напруга живлення трифазної мережі частотою 50 Гц, В	380±10%
7	Встановлена потужність, кВт	17,5
8	Габаритні розміри, м, не більше: <ul style="list-style-type: none"> <li>• довжина</li> <li>• ширина</li> <li>• висота</li> </ul>	2,20 2,00 1,95
9	Маса, кг, не більше	1400/2200

Конструкція установки передбачає можливість роботи в широкому діапазоні температур завдяки наявності систем підігріву та охолодження вакуумних насосів. Використання пластинчастих вакуумних насосів

дозволило знизити рівень шуму та підвищити ефективність роботи установки. Важливим аспектом розробки стало створення низькотемпературної пастки з температурою поверхні конденсації не вище  $-70^{\circ}\text{C}$  та площею поверхні конденсації не менше  $6,1 \text{ м}^2$ .

### 3.2. Принцип роботи установки «Іній»

Принцип роботи установки «Іній» базується на процесі вакуумування бака трансформатора з подальшим виморожуванням вологи в низькотемпературній пастці. Спочатку відбувається відкачування парогазової суміші з бака трансформатора до досягнення залишкового тиску  $26 \text{ Па}$ . На цьому етапі швидкість відкачування становить не менше  $500 \text{ л/с}$  при тиску від  $400$  до  $26 \text{ Па}$  [22].

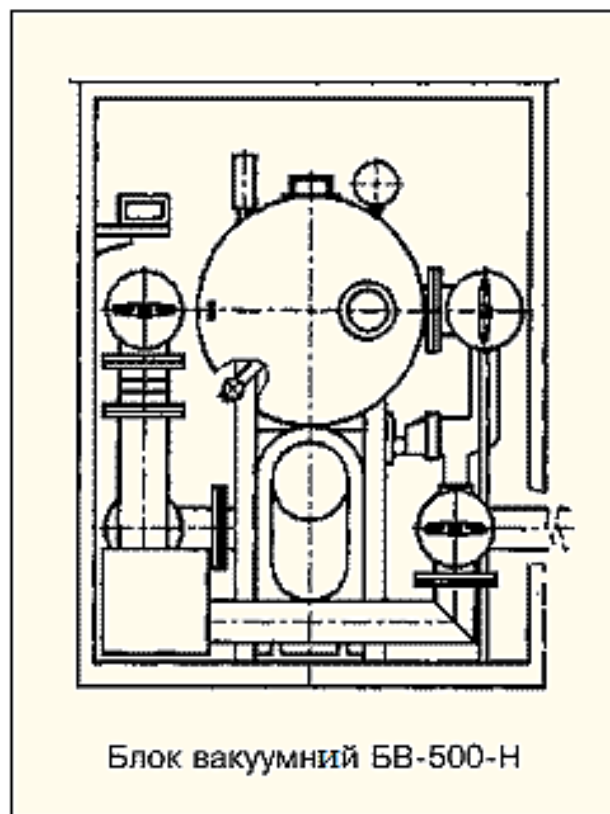


Рисунок 3.2 – Вакуумний блок БВ-500-Н

Після досягнення необхідного рівня вакууму (рис. 3.2), волога з твердої ізоляції трансформатора починає інтенсивно випаровуватися. Пари води уловлюються низькотемпературною пасткою, де відбувається їх конденсація на поверхні з температурою  $-70^{\circ}\text{C}$ . Завдяки великій площі поверхні конденсації (не менше  $6,1 \text{ м}^2$ ) забезпечується ефективно видалення вологи з системи [23].

Для прискорення процесу вакуумування трансформаторів великої потужності (500-1150 кВ) передбачена можливість підключення додаткового блоку попереднього розрідження або форвакуумного насоса (рис. 3.3). Це дозволяє швидше досягти необхідного рівня вакууму на початковому етапі процесу.

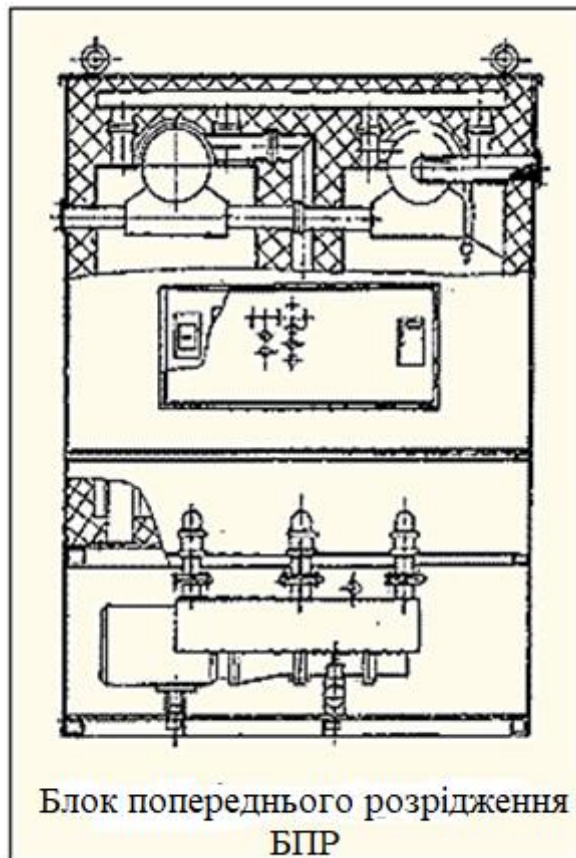


Рисунок 3.3 – Блок попереднього розрідження

### 3.3. Порівняльний аналіз ефективності вакуумного виморожування із традиційними методами сушіння ізоляції трансформаторів

Порівняльний аналіз ефективності вакуумного виморожування із традиційними методами сушіння ізоляції трансформаторів є важливим аспектом для оцінки оптимальних рішень у галузі енергетики. Це дозволяє зрозуміти, які методи є найбільш економічними та технологічно доцільними.

Ефективність сушіння ізоляційних матеріалів критично важлива для забезпечення надійності та довговічності силових трансформаторів. Традиційні методи, такі як конвективне сушіння і сушіння в гарячому повітрі, мають свої переваги і недоліки, в той час як вакуумне виморожування пропонує альтернативний підхід.

*До традиційних методів сушіння відносимо:*

- ✓ Конвективне сушіння,
- ✓ Сушіння в гарячому повітрі,
- ✓ Вакуумне виморожування

*Конвективне сушіння:*

- Принцип: Використання теплого повітря, що проходить через ізоляційний матеріал.
- Переваги: Простота і доступність технології, можливість використання стандартного обладнання.
- Недоліки: Висока температура може шкодити матеріалу; тривалий час сушіння; нерівномірне сушіння.

*Сушіння в гарячому повітрі:*

- Принцип: Нагріте повітря подається до матеріалу під тиском.
- Переваги: Швидка обробка, більша ефективність в умовах високого навантаження.
- Недоліки: Витрата енергії, висока ймовірність перегріву.

*Вакуумне виморожування:*

- Принцип: Процес видалення вологи за рахунок перетворення води в пар при низькому тиску і температурах, які не пошкоджують ізоляційний матеріал.

- Переваги: Ефективне видалення вологи при низькій температурі.

Збереження властивостей ізоляційного матеріалу.

Скорочення часу сушіння.

- Недоліки: Висока початкова вартість обладнання.

Складність обслуговування.

*Отримані результати впровадження установки «Іній» (с. Боромля)*

Впровадження установки «Іній» в с. Боромля дозволило досягти значних результатів у відновленні ізоляції трансформаторів місцевої підстанції. Завдяки ефективному процесу сушіння вдалося знизити залишковий вміст вологи в твердій ізоляції до рівня не більше 1,0%. Це суттєво покращило діелектричні властивості ізоляції та підвищило її електричну міцність.

Процес сушіння з використанням установки «Іній» виявився більш швидким та ефективним порівняно з традиційними методами (5 годин). Час, необхідний для повного циклу обробки трансформатора, скоротився, що дозволило оптимізувати графік проведення ремонтних та профілактичних робіт на підстанції.

Важливим результатом стало також зменшення енергоспоживання під час процесу сушіння. Завдяки високій ефективності вакуумної системи та низькотемпературної пастки, загальні енерговитрати на відновлення ізоляції трансформаторів знизилися.

Для проведення порівняння проводили дослідження на декількох зразках ізоляційних матеріалів (наприклад, папір, целюлоза, полімерні ізоляції) з використанням нових технологій і традиційних методів (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 – Результати досліджень.

Метод	Тривалість процесу, (год)	Вміст вологи (до/після), (%)	Енергетичні витрати, (кВт·год)	Вартість (USD)
Конвективне сушіння	20	8 / 2	15	200
Сушіння в гарячому повітрі	10	8 / 3	12	180
Вакуумне виморожування	5	8 / 0,5	10	250

*Тривалість процесу*

Вакуумне виморожування демонструє значно швидшу (5 годин) тривалість сушіння, ніж традиційні методи.

*Зміна вологості:*

Вакуумне виморожування знижує вологість до 0,5 %, що є значно кращим результатом порівняно з традиційними методами (2 % і 3 %).

*Енергетичні витрати:*

Вакуумне виморожування є енергоефективнішим, споживаючи 10 кВт·год, тоді як традиційні методи вимагають більше енергії.

*Вартість:*

Вартість процесу вакуумного виморожування є найвищою, але, враховуючи економію на енергетичних витратах і зниження ризиків, пов'язаних із вологою, це може бути виправдано в довгостроковій перспективі.

Таким чином, вакуумне виморожування демонструє значну перевагу перед традиційними методами сушіння ізоляції. Хоча початкові витрати є вищими, з часом це може призвести до заощаджень через зменшені енергетичні витрати та підвищення надійності трансформаторів. Такий підхід є особливо рекомендованим для застосувань, де вологість є критичною для ефективності і безпеки обладнання.

### **3.4. Оцінка впливу відновленої ізоляції на роботу трансформаторів**

Відновлення ізоляції трансформаторів за допомогою установки «Іній» мало значний позитивний вплив на їх роботу та надійність електропостачання в с. Боромля. Покращення діелектричних властивостей ізоляції призвело до зниження ризику пробоїв та коротких замикань всередині трансформаторів. Це, в свою чергу, суттєво підвищило надійність роботи всього трансформаторного обладнання підстанції [10].

Завдяки ефективному видаленню вологи з твердої ізоляції вдалося знизити рівень часткових розрядів у трансформаторах. Це позитивно вплинуло на довговічність ізоляції та загальний термін служби обладнання. Зменшення втрат електроенергії, пов'язаних з погіршенням якості ізоляції, також сприяло підвищенню загальної ефективності роботи підстанції.

Головним результатом впровадження установки «Іній» стало забезпечення безперебійного постачання електричної енергії в с. Боромля. Зниження кількості аварійних відключень та планових ремонтів трансформаторів дозволило підвищити якість електропостачання для споживачів села.

### **3.5. Опис математичної моделі процесу вакуумного виморожування для силових трансформаторів**

Модель вакуумного виморожування силових трансформаторів складається з ряду компонентів, які обчислюють теплообмін та процеси вологовидалення. Це дозволяє адекватно відобразити динаміку зміни вологи в ізоляційних матеріалах трансформаторів під впливом вакууму та температури.

*Вакуумне виморожування* – це процес, при якому рідка вода в ізоляційному матеріалі перетворюється в пар у підвищеному вакуумі, що дозволяє ефективно видаляти вологу.

*Вихідні параметри моделі:*

- ✓ Температура (T): Температура матеріалу, що впливає на швидкість випаровування води.
- ✓ Тиск (P): Тиск у вакуумі; впливає на температуру кипіння води.
- ✓ Вологість (W): Початкова вологість ізоляційного матеріалу, що підлягає обробці.
- ✓ Час (t): Час переробки.
- ✓ Маса матеріалу (m): Маса ізоляційного матеріалу трансформатора.
- ✓ Питома теплоємність (c): Характеристика теплоємності ізоляційного матеріалу.

*Основні рівняння моделі:*

- Теплозабезпечення.

Зміна температури в результаті додання тепла описується так:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Q}{mc}, \quad (3.1)$$

де Q – кількість тепла, необхідна для нагрівання матеріалу до температури випаровування води.

- Вологовидалення.

Вологість у матеріалі можна описати за допомогою рівняння дифузії:

Установимо рівняння для зміни вологості у часі. Це можна моделювати, виходячи з закону Фіск'а для дифузії вологи:

$$\frac{dW}{dt} = -k \cdot (W - W_{eq}), \quad (3.2)$$

де:

- ( W ) – вологість,
- ( k ) – константа швидкості,

- ( $W_{eq}$ ) – рівноважна вологість

- Система рівнянь.

Загальна система рівнянь моделі складається з:

А) Теплопередачі:

$$Q = mc(T - T_0), \quad (3.3)$$

Б) Вологовидалення:

$$\frac{dW}{dt} = -k \cdot (W - W_{eq}),$$

*Взаємозв'язок між параметрами*

- Вплив тиску:

Заміна тиску веде до зміни точки кипіння води та, відповідно, до зміни тепла, необхідного для випаровування:

$$P = P_0 \cdot e^{-\frac{L}{RT}}, \quad (3.4)$$

де:

- ( $P_0$ ) – початковий тиск,
- ( $L$ ) – латентна теплота випаровування,
- ( $R$ ) – газова стала,
- ( $T$ ) – температура в Кельвінах

- Температура та вологість:

Зміна температури впливає на зміну вологості, оскільки вона регулює швидкість випаровування:

Висока температура сприяє швидшому видаленню вологи.

Зниження вологості призводить до підвищення температури з точки зору збереження енергії.

*Часова залежність процесу.*

Час моделювання може бути розрахований як (3.5):

$$T_{total} = \int_0^{t^f} dt, \quad (3.5)$$

де ( $t^f$ ) – фінальний час експерименту.

Для моделювання необхідні такі вхідні дані:

- Початкова температура трансформатора ( $T_0$ ),
- Початковий тиск ( $P_0$ ),
- Характеристики ізоляційного матеріалу (питома теплоємність, вологість та ін.),
- Константи для матеріалів, з яких складаються трансформатори.

*Застосування моделі:*

Ця модель може бути використана для:

- ✓ Оптимізації процесу: Налаштування різних параметрів процесу (температура, тиск) для досягнення максимальної ефективності видалення вологи.
- ✓ Прогнозування результатів: Наприклад, розрахунок економії коштів і підвищення надійності трансформаторів.
- ✓ Аналізу: Оцінка ризиків і потенційних проблем, з якими можуть зіткнутися технічні працівники при виконанні процесу вакуумного виморожування.

Математична модель вакуумного виморожування надає всебічний підхід для аналізу та оптимізації процесу зниження вологості в ізоляційних матеріалах трансформаторів. Вона враховує взаємозв'язок між температурою, тиском і вологістю, що дозволить підвищити надійність та ефективність роботи трансформаторів в с. Боромля. Для практичного використання цієї

моделі буде корисно провести додаткові експерименти для калібрування параметрів і перевірки теоретичних розрахунків [24].

Розробка та тестування цієї моделі в лабораторних умовах дозволяють адаптувати її до реальних умов використання на місці в с. Боромля.

### **3.6. Висновки до 3-го розділу**

Висновки демонструють значний прогрес у розробці та впровадженні інноваційної технології вакуумного виморожування для сушіння твердої ізоляції силових трансформаторів. Установа «Іній», створена з метою ефективного відновлення ізоляційних властивостей трансформаторів напругою 110-1150 кВ, представляє собою унікальне технічне рішення, що поєднує високопродуктивні вакуумні насоси та низькотемпературну пастку виморожування.

Ключовою особливістю розробленої установки є її здатність забезпечувати високу швидкість відкачування парогазової суміші та досягати низького залишкового тиску в баку трансформатора. Технічні характеристики «Інею» вражають: швидкість відкачування до 550 л/с, граничний залишковий тиск 0,133 Па, та температура поверхні конденсації  $-70^{\circ}\text{C}$ . Ці параметри дозволяють досягти високої ефективності процесу сушіння ізоляції.

Принцип роботи установки базується на поетапному процесі вакуумування та виморожування вологи. Спочатку відбувається відкачування парогазової суміші до досягнення залишкового тиску 26 Па, після чого волога з твердої ізоляції інтенсивно випаровується та конденсується на низькотемпературній пастці. Важливим технічним рішенням стала можливість підключення додаткового блоку попереднього розрідження для прискорення процесу вакуумування трансформаторів великої потужності.

Порівняльний аналіз ефективності вакуумного виморожування з традиційними методами сушіння ізоляції трансформаторів виявив суттєві переваги нової технології. Зокрема, процес вакуумного виморожування

дозволяє досягти більш низького рівня залишкової вологості (до 0,5%) за коротший час (5 годин) та з меншими енергетичними витратами (10 кВт·год) порівняно з конвективним сушінням та сушінням у гарячому повітрі. Хоча вартість процесу вакуумного виморожування є дещо вищою, довгострокові переваги у вигляді підвищення надійності та ефективності трансформаторів роблять цю технологію економічно виправданою.

Впровадження установки «Іній» в с. Боромля продемонструвало значні позитивні результати. Вдалося знизити залишковий вміст вологи в твердій ізоляції до рівня не більше 1,0 %, що суттєво покращило діелектричні властивості ізоляції та підвищило її електричну міцність. Це, в свою чергу, призвело до зниження ризику пробоїв та коротких замикань всередині трансформаторів, зменшення рівня часткових розрядів та загального підвищення надійності роботи трансформаторного обладнання.

Важливим аспектом дослідження стала розробка математичної моделі процесу вакуумного виморожування. Модель враховує ключові параметри процесу, такі як температура, тиск, вологість, та дозволяє прогнозувати динаміку зміни вологи в ізоляційних матеріалах. Використання цієї моделі відкриває можливості для подальшої оптимізації процесу, прогнозування результатів та аналізу потенційних ризиків [25].

Загалом, розробка та впровадження установки «Іній» представляє собою значний крок вперед у галузі обслуговування та підвищення надійності силових трансформаторів. Технологія вакуумного виморожування демонструє високу ефективність, економічність та екологічність порівняно з традиційними методами сушіння ізоляції. Подальше вдосконалення та широке впровадження цієї технології має потенціал для суттєвого підвищення надійності електропостачання та зниження експлуатаційних витрат в енергетичному секторі.

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1. Організація охорони праці при старінні ізоляції

Організація охорони праці при роботі з трансформаторами, особливо в умовах старіння ізоляції, є критично важливим аспектом забезпечення безпеки персоналу та надійності енергетичних систем. Ця робота вимагає комплексного підходу, який охоплює різні аспекти безпеки та управління ризиками [26].

Перш за все, необхідно розробити та впровадити чітку систему управління охороною праці, яка враховує специфіку роботи з трансформаторами зі старіючою ізоляцією. Ця система повинна включати детальні інструкції з техніки безпеки, регулярні навчання та перевірки знань персоналу, а також процедури реагування на надзвичайні ситуації.

Важливим елементом організації охорони праці є *створення спеціалізованих бригад* для роботи з трансформаторами, які мають старіючу ізоляцію. Ці бригади повинні складатися з висококваліфікованих фахівців, які мають глибокі знання про особливості роботи зі старіючою ізоляцією та пов'язані з цим ризики. Для цих бригад необхідно розробити спеціальні програми навчання та підвищення кваліфікації, які охоплюють як теоретичні аспекти роботи з ізоляцією, так і практичні навички безпечного виконання робіт.

Організація *регулярних медичних оглядів* персоналу, який працює з трансформаторами, є ще одним важливим аспектом охорони праці. Ці огляди повинні бути спрямовані на виявлення ранніх ознак впливу шкідливих факторів, пов'язаних зі старінням ізоляції, таких як вплив трансформаторного масла або електромагнітних полів.

Необхідно також забезпечити персонал відповідними *засобами індивідуального захисту (ЗІЗ)*, які враховують специфіку роботи зі старіючою ізоляцією. Це можуть бути спеціальні захисні костюми, рукавички, маски для

захисту від можливих випарів трансформаторного масла, а також засоби захисту від електромагнітного випромінювання.

Важливою частиною організації охорони праці є *розробка та впровадження системи моніторингу* стану робочого середовища. Ця система повинна включати регулярні вимірювання рівня електромагнітного випромінювання, концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони, а також контроль температурного режиму та вологості.

Організація *правильного зберігання та утилізації відходів*, пов'язаних зі старінням ізоляції, також є важливим аспектом охорони праці. Необхідно розробити та впровадити процедури безпечного поводження з відпрацьованим трансформаторним маслом та іншими матеріалами, які можуть становити загрозу для здоров'я персоналу та навколишнього середовища.

#### **4.2. Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при старінні ізоляції**

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при старінні ізоляції трансформаторів є ключовим етапом у забезпеченні безпеки персоналу та розробці ефективних заходів охорони праці. Цей аналіз повинен враховувати як фізичні, так і хімічні фактори ризику, а також потенційні довгострокові наслідки для здоров'я працівників.

Одним з основних небезпечних факторів є *ризик ураження електричним струмом*. При старінні ізоляції підвищується ймовірність пробіїв та витоків струму, що може призвести до серйозних травм або навіть летальних випадків. Особливу увагу слід приділити ризику виникнення електричної дуги, яка може виникнути при раптовому пробії старої ізоляції.

Іншим важливим фактором ризику є *вплив електромагнітного випромінювання*. Хоча трансформатори завжди генерують електромагнітні поля, при старінні ізоляції може змінюватися характер цього випромінювання, що потенційно збільшує його шкідливий вплив на організм людини. Довготривалий вплив сильних електромагнітних полів може призвести до

різноманітних проблем зі здоров'ям, включаючи порушення нервової та серцево-судинної систем.

*Хімічні фактори ризику* також відіграють значну роль. При старінні ізоляції може відбуватися деградація трансформаторного масла, що призводить до утворення токсичних сполук. Вдихання парів цих сполук може викликати респіраторні проблеми, подразнення шкіри та очей, а при тривалому впливі – більш серйозні наслідки для здоров'я.

*Ризик виникнення пожежі або вибуху* також підвищується при старінні ізоляції. Degradation of insulation materials can lead to the release of flammable gases, and in combination with electrical faults, this can create explosive conditions. Цей фактор особливо небезпечний, оскільки може призвести до масштабних аварій з серйозними наслідками для персоналу та обладнання.

Крім того, слід враховувати *ергономічні фактори ризику*. Роботи з обслуговування та ремонту трансформаторів зі старіючою ізоляцією часто вимагають незручних поз, підйому важких предметів, що може призвести до травм опорно-рухового апарату.

*Психологічні фактори ризику* також не слід ігнорувати. Робота з потенційно небезпечним обладнанням може викликати підвищений рівень стресу у працівників, що в довгостроковій перспективі може негативно вплинути на їхнє психічне здоров'я та працездатність.

Нарешті, важливо враховувати *кумулятивний ефект впливу* різних факторів ризику. Хоча кожен окремих фактор може бути в межах допустимих норм, їх комбінований вплив може становити значну загрозу для здоров'я працівників.

### **4.3. Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при старінні ізоляції**

На основі проведеного аналізу шкідливих та небезпечних факторів можна сформулювати ряд рекомендацій щодо впровадження безпечних умов праці при роботі з трансформаторами зі старіючою ізоляцією.

Ці рекомендації охоплюють різні аспекти організації роботи, технічні заходи та індивідуальний захист працівників:

- ✓ Необхідно впровадити систему регулярних перевірок стану ізоляції трансформаторів. Ці перевірки повинні включати не тільки візуальний огляд, але й інструментальні вимірювання електричних параметрів ізоляції.

- ✓ Рекомендується використовувати сучасні методи діагностики, такі як вимірювання часткових розрядів та аналіз розчинених газів у трансформаторному маслі. На основі результатів цих перевірок повинні прийматися рішення про необхідність ремонту або заміни ізоляції.

- ✓ Важливо забезпечити належну вентиляцію приміщень, де розташовані трансформатори. Це допоможе знизити концентрацію шкідливих речовин у повітрі робочої зони. Рекомендується встановлення систем примусової вентиляції з фільтрами для очищення повітря від токсичних речовин, які можуть виділятися при старінні ізоляції.

- ✓ Необхідно впровадити строгі правила використання засобів індивідуального захисту. При роботі з трансформаторами зі старіючою ізоляцією працівники повинні використовувати спеціальні захисні костюми, які забезпечують захист від електричного струму та хімічних речовин. Також обов'язковим є використання діелектричних рукавичок, захисних окулярів та респіраторів з відповідними фільтрами.

- ✓ Рекомендується впровадити систему дистанційного моніторингу стану трансформаторів. Це дозволить мінімізувати необхідність безпосереднього контакту персоналу з потенційно небезпечним обладнанням.

Сучасні системи моніторингу можуть забезпечити раннє виявлення проблем зі старінням ізоляції та дозволять вжити превентивних заходів.

✓ Важливо розробити та впровадити детальні інструкції з техніки безпеки, які враховують специфіку роботи зі старіючою ізоляцією. Ці інструкції повинні бути легко доступними для всіх працівників та регулярно оновлюватися відповідно до нових знань та технологій.

✓ Необхідно забезпечити регулярне навчання персоналу з питань охорони праці. Це навчання повинно включати як теоретичні знання про ризики, пов'язані зі старінням ізоляції, так і практичні навички безпечного виконання робіт. Особливу увагу слід приділити навчанню персоналу правильному використанню засобів індивідуального захисту та дій у надзвичайних ситуаціях.

✓ Рекомендується впровадити систему ротації персоналу, який працює з трансформаторами зі старіючою ізоляцією. Це допоможе знизити кумулятивний вплив шкідливих факторів на окремих працівників.

✓ Важливо забезпечити належне освітлення робочих зон. Хороше освітлення не тільки знижує ризик нещасних випадків, але й дозволяє працівникам краще виявляти ознаки проблем з ізоляцією.

✓ Рекомендується впровадити систему заохочення працівників за дотримання правил техніки безпеки. Це може включати як матеріальні стимули, так і нематеріальні форми визнання, такі як публічне визнання заслуг працівників, які демонструють високий рівень культури безпеки.

#### 4.4. Висновки до 4-го розділу

Охорона праці при роботі з трансформаторами, які мають старіючу ізоляцію, є складним та багатогранним завданням, яке вимагає комплексного підходу. Проведений аналіз показав, що старіння ізоляції створює ряд специфічних ризиків для здоров'я та безпеки працівників, які потребують особливої уваги та спеціальних заходів захисту.

Організація охорони праці в цих умовах повинна базуватися на глибокому розумінні процесів, що відбуваються при старінні ізоляції, та їх потенційного впливу на безпеку персоналу.

*Ключовими елементами ефективної системи охорони праці є*

- ✓ регулярні перевірки стану ізоляції,
- ✓ впровадження сучасних методів діагностики,
- ✓ забезпечення персоналу адекватними засобами індивідуального захисту та постійне навчання.

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів виявив, що при старінні ізоляції працівники піддаються впливу комплексу ризиків, включаючи електричні, хімічні, фізичні та психологічні фактори.

Особливу увагу слід приділяти ризику ураження *електричним струмом, впливу електромагнітного випромінювання та потенційній токсичності продуктів деградації ізоляційних матеріалів.*

Запропоновані рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці спрямовані на мінімізацію виявлених ризиків. Вони включають технічні заходи, такі як покращення вентиляції та впровадження систем дистанційного моніторингу, а також організаційні заходи, такі як розробка детальних інструкцій з техніки безпеки та регулярне навчання персоналу.

## РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

### 5.1. Комплекс заходів з попередження передчасного старіння ізоляції

Передчасне старіння ізоляції трансформаторів є серйозною проблемою, яка може призвести до значних економічних втрат та порушень у роботі електроенергетичних систем.

Для ефективного попередження цього процесу необхідно *впровадити комплексний підхід*, що охоплює різні аспекти експлуатації та обслуговування трансформаторів.

✓ Одним з ключових заходів є *регулярний моніторинг стану ізоляції*. Це включає періодичні вимірювання опору ізоляції, тангенса кута діелектричних втрат та ємності ізоляції. Такі вимірювання дозволяють виявити початкові стадії деградації ізоляції та вжити необхідних заходів до того, як проблема стане критичною.

✓ *Контроль вологості та температури* всередині трансформатора є не менш важливим аспектом.

✓ Надмірна вологість є одним з основних факторів, що прискорюють старіння ізоляції. Для контролю вологості можуть використовуватися спеціальні датчики, встановлені в різних точках трансформатора. Важливо також забезпечити ефективну систему осушення трансформаторного масла.

✓ *Своєчасна заміна трансформаторного масла* є ще одним важливим заходом. З часом масло накопичує продукти розкладання та забруднення, які негативно впливають на стан ізоляції. Регулярний аналіз масла та його заміна або очищення дозволяють підтримувати оптимальні умови для роботи ізоляції.

✓ *Періодичне очищення системи охолодження трансформатора* також відіграє важливу роль у попередженні передчасного старіння ізоляції.

✓ *Забруднення радіаторів та інших елементів системи охолодження може призвести до перегріву трансформатора, що значно прискорює процеси деградації ізоляційних матеріалів.*

Підтримка оптимального температурного режиму роботи трансформатора є критично важливою. Це включає не тільки ефективну роботу системи охолодження, але й правильне планування навантаження трансформатора. Уникнення тривалих перевантажень та різких температурних коливань допомагає зберегти ізоляційні властивості матеріалів на довший термін.

## **5.2. Рекомендації щодо вибору оптимальних методів відновлення ізоляції – вакуумне виморожування**

Серед різноманітних методів відновлення ізоляції трансформаторів, вакуумне виморожування виділяється як особливо ефективний та економічно доцільний підхід. Цей метод базується на принципі сублімації – прямого переходу води з твердого стану в газоподібний, минаючи рідку фазу.

Процес вакуумного виморожування починається зі створення глибокого вакууму в баку трансформатора. Це призводить до зниження температури кипіння води, що міститься в ізоляції. Одночасно з цим, спеціальна холодильна установка створює зону з дуже низькою температурою (близько  $-70^{\circ}\text{C}$ ) на поверхні конденсатора. Волога з ізоляції випаровується під дією вакууму і миттєво замерзає на холодній поверхні конденсатора.

*Головною перевагою цього методу є можливість ефективного видалення вологи з твердої ізоляції без застосування високих температур. Це особливо важливо, оскільки високотемпературна сушка може призвести до додаткового пошкодження ізоляційних матеріалів, особливо у старих трансформаторах.*

Вакуумне виморожування забезпечує глибоке та рівномірне висушування ізоляції. На відміну від інших методів, які можуть призводити до нерівномірного розподілу вологи в об'ємі ізоляції, цей метод дозволяє досягти однорідного зниження вологості по всій товщині ізоляційних матеріалів.

Ще однією важливою перевагою є *екологічна безпека процесу*. На відміну від методів, що використовують хімічні речовини для видалення вологи, вакуумне виморожування не створює шкідливих відходів і не вимагає спеціальних заходів з утилізації.

*Економічна доцільність методу вакуумного виморожування* полягає в його високій ефективності при відносно низьких експлуатаційних витратах. Хоча початкові інвестиції в обладнання можуть бути значними, довгострокова економія на ремонтах та заміні трансформаторів робить цей метод вигідним з фінансової точки зору.

### **5.3. Економічний розрахунок впровадження методу вакуумного виморожування для зниження вологості в ізоляції трансформаторів**

Для детального економічного розрахунку впровадження методу вакуумного виморожування для зниження вологості в ізоляції трансформаторів на прикладі с. Боромля Охтирського району Сумської області, використаємо формули для оцінки витрат, вигод та економічної ефективності проєкту.

*Розглянемо ряд ключових складових:*

1. Витрати на впровадження

1.1. Первісні інвестиції (ПІ):

$$ПІ = \text{Вартість обладнання} + \text{Вартість моніторингу}, \quad (5.1)$$

де

- Вартість обладнання: \$100,000

- Вартість моніторингу: \$10,000

$$ПІ = 100,000 + 10,000 = 110,000 \text{ \$ USD}$$

\]

## 1.2. Операційні витрати (ОВ):

$$OB = (\text{Енергетичні витрати} \cdot 12) + \text{Обслуговування}, \quad (5.2)$$

де

- Енергетичні витрати на місяць: \$1,000
- Обслуговування: \$5,000 на рік

$$OB = (1,000 \cdot 12) + 5,000 = 12,000 + 5,000 = 17,000 \text{ USD}$$

## 2. Вигоди від зниження вологості:

### 2.1. Економія на ремонтах (ЕР):

$$EP = \text{Витрати на ремонти} \cdot \text{Зниження статків}, \quad (5.3)$$

- Витрати на ремонти без впровадження: \$100,000 на рік
- Значення зниження: 20 % = 0.2

$$EP = 100,000 \cdot 0.2 = 20,000 \text{ \$ USD}$$

### 2.2. Додаткові вигоди (ДВ):

ДВ = Вигода від надійності

- Вигода від надійності: \$15,000 на рік

## 3. Загальні вигоди (ЗВ)

$$ЗВ = EP + ДВ, \quad (5.4)$$

$$ЗВ = 20,000 + 15,000 = 35,000 \$ \text{ USD}$$

#### 4. Розрахунок економічної ефективності:

##### 4.1. Чистий прибуток (ЧП)

$$ЧП = ЗВ - (ПІ + ОВ), \quad (5.5)$$

$$ЧП = 35,000 - (110,000 + 17,000) = 35,000 - 127,000 = -92,000 \$ \text{ USD}$$

(перший рік)

##### 4.2. Розрахунок терміну окупності (ТО):

Термін окупності можна розрахувати, враховуючи щорічні вигоди та витрати.

$$ТО = ПІ / (ЗВ - ОВ), \quad (5.6)$$

Розрахуємо:

$$ТО = 110,000 / (35,000 - 17,000) = 110,000 / 18,000 \sim 6,11 \text{ років}$$

Таким чином, впровадження методу вакуумного виморожування має високу первісну вартість, але здатне зекономити кошти на ремонтах і підвищити надійність трансформаторів. Хоча в перший рік є чистий збиток, проєкт може бути економічно вигідним в довгостроковій перспективі після декількох років роботи, з терміном окупності приблизно 6,11 років.

Для точного аналізу рекомендується провести детальні дослідження на місці, враховуючи специфічні умови села Боромля та потенційні ризики.

### 5.3. Розробка системи моніторингу стану ізоляції трансформаторів

Ефективна система моніторингу стану ізоляції трансформаторів є ключовим елементом у забезпеченні їх надійної та довготривалої роботи. Така система повинна забезпечувати комплексний підхід до оцінки стану ізоляції, включаючи вимірювання ключових параметрів та їх аналіз в режимі реального часу.

*Основою системи моніторингу є набір спеціалізованих датчиків, які вимірюють різні параметри.*

✓ Датчики вологості, встановлені в різних точках трансформатора, дозволяють відстежувати зміни вмісту вологи в ізоляції та трансформаторному маслі.

✓ Температурні датчики забезпечують контроль теплового режиму роботи трансформатора, що є критично важливим для запобігання перегріву та прискореного старіння ізоляції.

✓ Важливим елементом системи є *датчики часткових розрядів*. Часткові розряди є одним з ранніх індикаторів деградації ізоляції, і їх виявлення дозволяє вжити превентивних заходів до того, як проблема стане критичною. Сучасні системи моніторингу часткових розрядів здатні не тільки виявляти їх наявність, але й локалізувати джерело розрядів в об'ємі трансформатора.

Аналіз розчинених газів у трансформаторному маслі є ще одним важливим аспектом моніторингу. Концентрації певних газів, таких як водень, метан, етан, етилен та ацетилен, можуть вказувати на різні типи дефектів в ізоляції. Сучасні системи газового аналізу дозволяють проводити вимірювання в режимі онлайн, забезпечуючи постійний контроль за станом трансформатора.

Ключовим елементом системи моніторингу є програмне забезпечення для аналізу та інтерпретації отриманих даних. Це програмне забезпечення повинно не тільки відображати поточні значення параметрів, але й виконувати

складний аналіз тенденцій, виявляти аномалії та прогнозувати можливі проблеми.

Важливою функцією системи моніторингу є оперативне сповіщення персоналу про критичні зміни параметрів. Це може включати як локальні сигнали тривоги, так і дистанційні повідомлення через SMS або електронну пошту. Крім того, система повинна надавати рекомендації щодо необхідних профілактичних заходів на основі аналізу отриманих даних.

Впровадження такої комплексної системи моніторингу дозволяє перейти від реактивного підходу до обслуговування трансформаторів (реагування на вже виниклі проблеми) до проактивного підходу, де потенційні проблеми виявляються та усуваються на ранніх стадіях.

#### **5.4. Оцінка економічного ефекту від впровадження методу вакуумного виморожування**

Економічний ефект від впровадження методу вакуумного виморожування для відновлення ізоляції трансформаторів є багатограним і включає як прямі, так і непрямі фінансові вигоди.

Перш за все, це суттєве зниження витрат на ремонт та заміну трансформаторів. Ефективне відновлення ізоляції дозволяє продовжити термін служби трансформатора на 10-15 років, що означає відтермінування значних капітальних витрат на придбання нового обладнання. Враховуючи, що вартість потужного силового трансформатора може сягати кількох мільйонів доларів, економія від продовження терміну служби навіть одного трансформатора може бути дуже суттєвою.

Другим важливим аспектом економічного ефекту є зменшення втрат електроенергії. Трансформатор з відновленою ізоляцією працює більш ефективно, мінімізуються втрати енергії на нагрів та часткові розряди. За оцінками експертів, покращення стану ізоляції може призвести до зниження втрат електроенергії на 1-2%. Хоча це здається невеликим значенням, в

масштабах великої енергосистеми це може означати економію сотень тисяч кіловат-годин щорічно.

Зниження ризику аварійних ситуацій є ще одним важливим економічним фактором. Аварія трансформатора може призвести не тільки до прямих витрат на ремонт або заміну, але й до значних непрямих витрат, пов'язаних з перервами в електропостачанні. Для промислових підприємств такі перерви можуть означати мільйонні збитки. Крім того, аварії можуть призвести до екологічних проблем, пов'язаних з витоком трансформаторного масла, що тягне за собою додаткові витрати на ліквідацію наслідків та штрафи.

Важливо також врахувати економію на експлуатаційних витратах. Трансформатор з якісно відновленою ізоляцією вимагає менше поточного обслуговування, рідше виникає потреба в доливіці або заміні трансформаторного масла.

За попередніми оцінками, впровадження методу вакуумного виморожування може забезпечити економію до 20-30% від вартості нового трансформатора протягом його життєвого циклу. Ця оцінка враховує як прямі витрати на відновлення ізоляції, так і довгострокові вигоди від підвищення надійності та ефективності роботи обладнання.

Важливо зазначити, що економічний ефект може варіюватися залежно від конкретних умов експлуатації, віку та стану трансформатора. Для отримання більш точної оцінки рекомендується проводити індивідуальний аналіз для кожного конкретного випадку, враховуючи специфіку обладнання та умови його експлуатації.

## 5.5. Висновки до 5-го розділу

Економічне обґрунтування заходів з попередження передчасного старіння ізоляції трансформаторів та методів її відновлення є критично важливим аспектом управління електроенергетичними системами. Комплексний підхід до цієї проблеми, що включає регулярний моніторинг стану ізоляції, контроль вологості та температури, своєчасну заміну трансформаторного масла та періодичне очищення системи охолодження, дозволяє значно продовжити термін служби трансформаторів та підвищити надійність їх роботи.

Серед різноманітних методів відновлення ізоляції особливу увагу заслуговує метод вакуумного виморожування. Цей метод виділяється своєю ефективністю у видаленні вологи з твердої ізоляції без застосування високих температур, що особливо важливо для старих трансформаторів. Вакуумне виморожування забезпечує глибоке та рівномірне висушування ізоляції, є екологічно безпечним та економічно доцільним у довгостроковій перспективі.

Економічний розрахунок впровадження методу вакуумного виморожування на прикладі с. Боромля Охтирського району Сумської області показав, що незважаючи на високі початкові інвестиції, проект може бути економічно вигідним в довгостроковій перспективі. Термін окупності, розрахований на основі наданих даних, складає приблизно 6,11 років. Це свідчить про те, що хоча в перший рік впровадження спостерігається чистий збиток, з часом проект починає приносити суттєві економічні вигоди.

Розробка ефективної системи моніторингу стану ізоляції трансформаторів є ключовим елементом у забезпеченні їх надійної та довготривалої роботи. Така система повинна включати комплекс датчиків для вимірювання вологості, температури, часткових розрядів, а також аналіз розчинених газів у трансформаторному маслі. Важливим компонентом є програмне забезпечення для аналізу та інтерпретації отриманих даних, яке дозволяє не тільки відображати поточні значення параметрів, але й прогнозувати можливі проблеми.

Оцінка економічного ефекту від впровадження методу вакуумного виморожування демонструє його багатогранність. Він включає зниження витрат на ремонт та заміну трансформаторів, зменшення витрат електроенергії, зниження ризику аварійних ситуацій та економію на експлуатаційних витратах. За попередніми оцінками, впровадження цього методу може забезпечити економію до 20-30% від вартості нового трансформатора протягом його життєвого циклу.

Важливо відзначити, що економічний ефект може варіюватися залежно від конкретних умов експлуатації, віку та стану трансформатора. Тому для отримання більш точної оцінки рекомендується проводити індивідуальний аналіз для кожного конкретного випадку, враховуючи специфіку обладнання та умови його експлуатації.

В цілому, економічне обґрунтування впровадження методу вакуумного виморожування та розробки системи моніторингу стану ізоляції трансформаторів демонструє їх високу ефективність та доцільність. Ці заходи не тільки дозволяють продовжити термін служби трансформаторів та підвищити надійність їх роботи, але й забезпечують значну економічну вигоду в довгостроковій перспективі. Це особливо актуально в умовах зростаючих вимог до ефективності та надійності електроенергетичних систем.

## ВИСНОВКИ

У цьому дослідженні здійснено комплексний аналіз проблеми висушування ізоляції в силових трансформаторах, що є невід'ємною частиною сучасних електроенергетичних систем. Надійність і ефективність роботи трансформаторів суттєво залежать від стану їх ізоляції, яка виконує важливі функції електричного захисту та тепловідведення. Висока вологість може призводити до зниження електричної міцності ізоляції та підвищення ризику виникнення аварійних ситуацій, що вимагає пошуку та впровадження більш досконалих методів сушіння.

Серед традиційних методів сушіння, таких як термічне нагрівання та вакуумна дегазація, недостатня ефективність та можливі температурні пошкодження целюлозної ізоляції стимулюють науковців шукати нові підходи.

У рамках цього дослідження вперше було запропоновано використання методу вакуумного виморожування, який ґрунтується на принципі сублімації на прикладі с. Боромля, де підвищена природна вологість неподалік трансформаторної підстанції. Демонстрація цього методу із застосуванням установки «Іній» у селищі Боромля показала значний потенціал для покращення процесу видалення вологи. Дослідження показали, що даний метод забезпечує зниження вологості до рівня, що не перевищує 1,0 %, що в результаті веде до значного підвищення діелектричної міцності та загальної надійності ізоляції.

Одним з ключових досягнень стало зниження залишкової вологості в твердій ізоляції до рівня не більше 0,5%, що суттєво перевершує показники інших методів сушіння, таких як конвективне сушіння (2%) і сушіння в гарячому повітрі (3%). Це дозволило покращити діелектричні властивості ізоляції, підвищити її електричну міцність і зменшити ризик електричних пробоїв та коротких замикань.

Час обробки ізоляції за допомогою вакуумного виморожування значно скоротився і становив 5 годин, що майже вдвічі швидше за інші методи. Така ефективність дозволила оптимізувати графік ремонтних робіт, що зменшило

час простою обладнання. Важливим фактором є також зниження енергоспоживання під час сушіння. Витрати енергії склали 10 кВт·год, що нижче, ніж у випадку конвективного методу (15 кВт·год) та методу сушіння в гарячому повітрі (12 кВт·год), що робить вакуумне виморожування економічно вигідним.

Експериментальні дані, зібрані під час впровадження установки «Іній» на трансформаторній підстанції в селі Боромля, підтвердили її ефективність у реальних умовах експлуатації. Завдяки цьому вдалося знизити рівень часткових розрядів у трансформаторах, продовжити термін служби обладнання та підвищити надійність системи електропостачання.

Проведені експерименти підтвердили, що вакуумне виморожування є не лише технічно ефективним, але й економічно доцільним рішенням, особливо в умовах підвищеної вологості, де традиційні методи часто виявляються недостатньо ефективними. Метод забезпечує глибоке та рівномірне висушування ізоляційних матеріалів, що неможливо досягти при застосуванні інших способів.

Результати порівняльного аналізу ефективності різних методів сушіння засвідчили, що вакуумне виморожування дозволяє не лише досягти найнижчого рівня залишкової вологості, але й скоротити час сушіння майже вдвічі у порівнянні з конвективним методом. Це сприяє скороченню простоїв обладнання та підвищує загальну ефективність його експлуатації.

Розроблена математична модель процесу вакуумного виморожування також виявилася дієвим інструментом для оптимізації параметрів процесу. Вона дозволяє прогнозувати результати сушіння для різних типів трансформаторів, зокрема, враховуючи їх потужність, структуру ізоляції та початковий рівень вологості.

Наукова новизна дослідження полягає у розробці математичної моделі процесу вакуумного виморожування, яка дозволяє оптимізувати параметри сушіння для різних типів ізоляційних матеріалів, враховуючи такі фактори, як температура, тиск і вологість. Ця модель може бути використана для

подальшого вдосконалення процесів відновлення ізоляції трансформаторів та для аналізу потенційних ризиків.

Практичне впровадження результатів дослідження, зокрема на прикладі підстанції в с. Боромля, підтвердило доцільність використання методу вакуумного виморожування в умовах підвищеної вологості. Це дозволило підвищити надійність роботи трансформаторів, знизити кількість аварійних ситуацій та продовжити термін їх експлуатації, що в підсумку призвело до зниження експлуатаційних витрат та підвищення стабільності енергопостачання.

Загалом, впровадження методу вакуумного виморожування має значні переваги перед традиційними підходами не тільки в плані підвищення ефективності процесу сушіння, але й з точки зору економічної доцільності. Технологія демонструє високий потенціал для застосування у різних галузях енергетики, особливо в умовах підвищеної вологості та зношеності трансформаторів, що дозволяє підвищити надійність і безперервність електропостачання.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило ефективність методу вакуумного виморожування для сушіння ізоляції силових трансформаторів, його економічну доцільність та перспективність для подальшого впровадження в енергетичній галузі. Отримані результати можуть бути корисними для вдосконалення процесів технічного обслуговування трансформаторів та підвищення надійності електроенергетичних систем в цілому.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ 3270-95. Трансформатори силові. Терміни та визначення.
2. ДСТУ 2105-92. Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови (ГОСТ 11920-93). З поправкою (ІПС 8-1997).
3. ДСТУ ІЕС 60044-1:2008. ТРАНСФОРМАТОРИ ВИМІРЮВАЛЬНІ Частина 1. Трансформатори струму (ІЕС 60044-1:2003, ІДТ)
4. ДСТУ 2976–95 Трансформатори струму та напруги. Терміни та визначення (ІЕС 60050(321):1986, NEQ).
5. Правила улаштування електроустановок (2017), затверджені Наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476, (<https://art-energetyka.com.ua/%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%B0-%D1%83%D0%BB%D0%B0%D1%88%D1%82%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%BA.pdf>)
6. <https://drive.google.com/file/d/1KQbca02k-v6OBwu8VbQeDaW2bqGluTGT/view>. [Електронний ресурс] – Проект внесення змін в генеральний план с. Боромля Тростянецького району Сумської області з проектом плану зонування території.
7. <http://www.etma.com.ua/ukr/products/iney/>. [Електронний ресурс] – Установки серії «ЕТМА Іней».
8. <https://globecore.ua/produksiya/obslugovuvannya-transformatoriv/inij-ustanovka-sushinnya-tverdoyi-izolyacziyi-transformatoriv.html>. [Електронний ресурс] – «Іній» установка сушіння твердої ізоляції трансформації.
9. Adilbek Tazhibayev, Yernar Amitov, Nurbol Arynov, Nursultan Shingissov, Askat Kural, Experimental investigation and evaluation of drying methods for solid

insulation in transformers: A comparative analysis, *Results in Engineering*, Volume 23, 2024, 102470, ISSN 2590-1230, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102470>.

10. Sergio Bustamante, Mario Manana, Alberto Arroyo, Alberto Laso, Raquel Martinez, Evolution of graphical methods for the identification of insulation faults in oil-immersed power transformers: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 199, 2024, 114473, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114473>.

11. Aniket Vatsa, Ananda Shankar Hati, Insulation aging condition assessment of transformer in the visual domain based on SE-CNN, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 128, 2024, 107409, ISSN 0952-1976, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107409>.

12. Murat Toren, Mehmet Celebi, Comparative implementation of graphene sheet insulation heat effect in dry-type transformers, *Thermal Science and Engineering Progress*, Volume 26, 2021, 101131, ISSN 2451-9049, <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101131>.

13. S.H. Lin, Prediction of the drying rate of transformer insulation during the dry cycle, *Electric Power Systems Research*, Volume 23, Issue 3, 1992, Pages 227-231, ISSN 0378-7796, [https://doi.org/10.1016/0378-7796\(92\)90090-N](https://doi.org/10.1016/0378-7796(92)90090-N).

14. Dong-sheng He, Zhi-dong Jia, Ji-xiang Wang, Jian-bing Fu, Fawu He, Feng Dai, Investigating temperature rise dynamics at hot-spots within dry-Type transformer windings: A comparative analysis across varied loading rates and an extrapolative computational model, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 60, 2024, 104699, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104699>.

15. Jônatas P. Américo, Jean V. Leite, Cristian F. Mazzola, Enhanced thermal modeling of three-phase dry-type transformers, *Case Studies in Thermal Engineering*, Volume 58, 2024, 104445, ISSN 2214-157X, <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104445>.

16. Liu C., Ruan J., Wen W., Gong R., Liao C. Temperature rise of a dry-type transformer with quasi-3D coupled-field method *IET Electr. Power Appl.*, 10 (7) (2016), pp. 598-603.

17. W., Huang P., Liu Z., Zhao M., Dian R., Wang P., Wang Q., Wang D., Shen T. Analysis of temperature field of medium frequency transformer based on improved thermal network method IET Gener. Transm. Distrib., 16 (12) (2022), pp. 2346-2356.
18. Кутін В. М. Вдосконалення методу контролю ізоляції блока «генератор-трансформатор» / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Вінницького політехнічного інституту – 2020 – № 1. – С. 39-44.
19. Кутін В. М. Метод контролю технічного стану ізоляції електрообладнання блоку «генератортрансформатор» / В. М. Кутін, О. О. Шпачук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2022. – № 3(309). – С. 138-142.
20. Reimert D. Protective Relaying for Power Generation Systems. Boca Raton, Florida, USA, Taylor&Francis Group CRC Press, 2005. 592 p.
21. Норми випробування електрообладнання. Галузевий керівний документ ГКД 34.20.302-2002. Міністерство палива та енергетики України. – Київ, 2004.
22. Безменнікова Л. М. Аналіз причин пошкоджень силових трансформаторів сільських споживчих підстанцій / Л. М. Безменнікова, О. Ю. Вовк, О. В. Скорик // Праці ТДАТА. – Випуск 8. Том 10. – Мелітополь: ТДАТА, 2008. – С. 74-79.
23. Жорняк, Л.Б. Особливості регулювання напруженості електричного поля уздовж зовнішньої ізоляції газонаповнених трансформаторів напруги [Текст] / Л.Б. Жорняк, О.І. Афанасьєв, Щусь В.М. // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х. : НТУ «ХПІ», 2019. – №2, 2019 – С. 13– 17. – ISSN 2079-3944.
24. Норми випробування електрообладнання: СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. – [Чинний від 2007-04-15]. – К., 2007. – 271 с.
25. Методичні вказівки до виконання магістерської роботи для студентів 2 м курсу інженерно-технологічного факультету спеціальності 141

«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», денної та заочної форм навчання.– Суми: Сумський НАУ, 2021. – 32 с.

26. Хворост Т.В., Василенко О.О., Семерня О.В., Шандиба О.Б., Кіндя О.П. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» в дипломних роботах студентами інженерно-технологічного факультету Ступінь вищої освіти: магістр. - Суми: СНАУ, 2020. – 12 с.