

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів**

«На правах рукопису»
УДК 621.314

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Сергій Бойченко
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг інтелектуальних
електротехнічних та мехатронних комплексів»**

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

на тему: «Модернізація трансформаторної підстанції»

Виконав:

студент VI курсу, групи ГА-31мп
Босенко В.Е.

Науковий керівник:

к.т.н., доцент, Мейта О.В.

Консультант з «Стартап-проект»:

к.е.н., доцент, Шевчук Н.А.

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2024 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій Бойченко

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Босенку Владиславу Едуардовичу

1. Тема дисертації «Модернізація трансформаторної підстанції», науковий керівник дисертації к.т.н., доцент Мейта Олександр Вячеславович затверджені наказом по університету від «08» листопада 2024 р. № 5008-с
2. Термін подання студентом дисертації
3. Об'єкт дослідження: Теплові процеси в силових трансформаторах.
4. Предмет дослідження: Трансформаторна підстанція нафтовидобувного підприємства з системою масляного охолодження.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 - а) Провести аналіз існуючих конструкцій і характеристик ТП та визначити перспективні шляхи модернізації. Визначити чинники, що впливають на надійність роботи трансформаторної підстанції.
 - б) Розрахувати та вибрати обладнання трансформаторної підстанції з урахуванням обраного шляху модернізації
 - в) Обґрунтувати та розрахувати параметри системи охолодження трансформаторної підстанції.

- d) Розробити систему автоматичного керування насосом в залежності від температур трансформатора
- e) Розробити стартап-проект.
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу: схема Артюхівського нафтогазового родовища, схема автоматизації насосу, трансформатор ТМН 4000/35.
7. Орієнтовний перелік публікацій: «Модернізація трансформаторної підстанції» VII науково-технічна конференція магістрантів ім. професора В.М. Винославського. «Модернізація трансформаторної підстанції», XIV інтернет конференція «Проблеми та перспективи розвитку сучасної науки в країнах Євразії»
8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Стартап-проект	к.т.н., доцент, Шевчук Н.А.	26.11.2024	

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ	28.10.2024	
2.	Розділ 1. Інформаційні дослідження за темою роботи.	04.11.2024	
3.	Розділ 2. Розробка системи електропостачання нафтовидобувного підприємства	11.11.2024	
4.	Розділ 3. Тепловий розрахунок трансформатора	18.11.2024	
5.	Розділ 3. Розробка системи автоматизації насоса системи охолодження	22.11.2024	
6.	Розділ 4. Стартап-проект	28.11.2024	
7.	Оформлення роботи	02.12.2024	

Студент

Босенко В.Е.

Науковий керівник дисертації

Мейта О.В.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація містить: 73 сторінки, 19 рисунків, 11 таблиць та 24 посилання.

Трансформаторні підстанції відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного енергопостачання. Охолодження трансформаторів є критичним фактором їхньої надійності, адже перегрів призводить до деградації ізоляції, зниження експлуатаційного ресурсу та підвищення ризику аварій.

В основі роботи лежить дослідження впливу теплових умов на ефективність роботи трансформаторів та вдосконалення систем охолодження. У магістерській дисертації було розроблено модернізовану систему охолодження для трансформаторної підстанції з використанням автоматизованих засобів контролю.

Розроблено схему з насосом і температурними датчиками, які забезпечують автоматичне регулювання температури. Застосування цієї системи дозволяє покращити тепловий режим трансформатора, підвищити його енергоефективність і надійність у складних експлуатаційних умовах.

Мета: Підвищення надійності та енергетичної ефективності трансформаторної підстанції шляхом впровадження автоматизованої системи керування охолодженням.

Об'єкт дослідження: Теплові процеси в силових трансформаторах.

Предмет дослідження: Трансформаторна підстанція нафтовидобувного підприємства з системою масляного охолодження.

Ключові слова: ТРАНСФОРМАТОРНА ПІДСТАНЦІЯ, СИСТЕМА ОХОЛОДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА, КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРИ.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 73 pages, 19 figures, 11 tables, and 24 references.

Transformer substations play a key role in ensuring stable power supply. Transformer cooling is a critical factor for their reliability, as overheating leads to insulation degradation, reduced service life, and increased risk of failures.

The thesis is based on a study of the impact of thermal conditions on transformer performance and the improvement of cooling systems. The master's thesis developed a modernized cooling system for a transformer substation using automated control tools.

A design was proposed featuring a pump and temperature sensors that provide automatic temperature regulation. The application of this system improves the thermal conditions of the transformer, enhances its energy efficiency, and ensures reliability under challenging operating conditions.

Objective: To enhance the reliability and energy efficiency of a transformer substation by implementing an automated cooling control system.

Object of study: Thermal processes in power transformers.

Subject of study: Transformer substation of an oil extraction enterprise with an oil cooling system.

Keywords: TRANSFORMER SUBSTATION, TRANSFORMER COOLING SYSTEM, TEMPERATURE CONTROL.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ІНФОРМАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ ...	11
1.1 Огляд умов роботи трансформаторних підстанцій	11
1.1.1 Аналіз несправностей, які виникають при роботі ТП.....	11
1.1.2 Вплив охолодження на роботу трансформаторних підстанцій	12
1.1.3 Особливості роботи трансформаторних підстанцій на об'єктах з високими температурами	13
1.2 Системи охолодження трансформаторів.....	14
1.2.1 Масляне охолодження трансформатора.....	14
1.2.2 Водяне охолодження трансформатора	16
1.2.3 Повітряне охолодження	18
1.2.4. Сухе охолодження трансформаторів	19
1.3 Патентний пошук.....	21
1.4 Аналіз чинників, що визначають енергоефективність трансформаторної підстанції	23
Висновки до першого розділу	27
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НАФТОВИДОБУВНОГО ПІДПРИЄМСТВА	28
2.1 Розрахунок та вибір обладнання ГПП Артюхівського нафтового родовища.....	28
2.2. Розрахунок релейного захисту трансформатора ТМН-4000/35.....	32
2.2.1. Розрахунок струмів КЗ	33
2.2.2 Розрахунок параметрів струмової відсічки.....	36
2.2.3 Розрахунок параметрів МСЗ.....	37
2.2.4. Розрахунок параметрів захисту від перевантаження	39
2.2.5 Газовий захист.....	40
Висновки до другого розділу	41
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА	42
3.1 Тепловий розрахунок трансформатора.....	42

3.1.2 Розрахунок геометричних розмірів поверхні тепловідводу бака трансформатора.....	43
3.1.3 Розрахунок необхідного перепаду температури між баком та повітрям:	45
3.1.4 Розрахунок необхідної площі поверхні конвекції :.....	45
3.1.5 Розрахунок поверхні охолодження	46
3.2 Розрахунок та вибір насоса для системи охолодження	48
3.3 Розробка системи керування охолодженням трансформатора	49
3.4 Алгоритм роботи системи.....	51
3.5 Розробка математичної моделі системи в середовищі MatLab.....	54
Висновки до третього розділу	57
Розділ 4. СТАРТАП ПРОЄКТ	58
4.1 Опис ідеї проєкту.....	58
4.2 Аналіз конкурентного середовища	59
4.3 Аналіз цільової аудиторії	61
4.4 Аналіз ринкових можливостей.....	62
4.5 Фінансове обґрунтування проєкту	63
4.6 Розроблення бізнес моделі та маркетингового плану стартап проєкту	65
4.7 Бізнес-модель проєкту.....	66
Висновки до четвертого розділу	68
ВИСНОВКИ	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
Додаток А.....	73

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ТП – трансформаторна підстанція

КЗ – коротке замикання

ВН – висока напруга

НН – низька напруга

АВ – автоматичний вимикач

ПЛК – програмований логічний контролер

ГПП – головна понижувальна підстанція

ДТ – датчик температури

МСЗ – максимальний струмовий захист

ONAN– Oil Natural Air Natural

OFAF – Oil Forced Air Forced

ТЕС – теплова електростанція

СЕС – сонячна електростанція

ВСТУП

Ефективність роботи трансформаторних підстанцій визначається рівнем робочого навантаження та тепловими умовами експлуатації. Надійна та тривала робота трансформатора залежить від ефективності його охолодження. Перегрів трансформатора спричиняє деградацію ізоляційного матеріалу обмоток, що скорочує термін його служби та збільшує ризик аварій. Одним із напрямів модернізації є впровадження вдосконаленої системи охолодження, заснованої на автоматичних системах моніторингу та контролю. Особливу увагу слід приділяти охолодженню в умовах високих температур навколишнього середовища. У даній роботі запропоновано вирішення цієї проблеми шляхом встановлення насоса та температурних датчиків, які забезпечуватимуть автоматичне регулювання температурного режиму трансформатора.

Актуальність: Надійна робота трансформаторних підстанцій є важливою для стабільного функціонування енергосистеми. Підвищення температури навколишнього середовища ускладнює тепловий режим, вимагаючи впровадження сучасних рішень.

Використання автоматизованих систем моніторингу та регулювання температури з застосуванням масних циркуляційних насосів й температурних датчиків сприяє підвищенню енергоефективності й надійності обладнання. У зв'язку з цим удосконалення систем охолодження трансформаторів є актуальним завданням для забезпечення стабільності енергетичної інфраструктури.

Мета роботи. Підвищення надійності та енергетичної ефективності трансформаторної підстанції шляхом впровадження автоматизованої системи керування охолодженням.

Задачі.

1. Провести аналіз існуючих конструкцій і характеристик ТП та визначити перспективні шляхи модернізації. Визначити чинники, що впливають на надійність роботи трансформаторної підстанції.
2. Розрахувати та вибрати обладнання трансформаторної підстанції з урахуванням обраного шляху модернізації
3. Розрахувати та обґрунтувати параметри системи охолодження трансформаторної підстанції, вибрати насос для системи охолодження.
4. Розробити систему автоматичного керування насосом в залежності від температури трансформатора
5. Розробити стартап-проект.

Об'єкт дослідження: Теплові процеси в силових трансформаторах.

Предмет дослідження: Трансформаторна підстанція нафтовидобувного підприємства з системою масляного охолодження.

РОЗДІЛ 1. ІНФОРМАЦІЙНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

1.1 Огляд умов роботи трансформаторних підстанцій

Трансформаторні підстанції є одними із ключових елементів в енергетичній системі, що забезпечують перетворення електричної напруги для ефективної передачі та розподілу енергії. Головною їх метою є підвищення, або зниження напруги для мінімальних втрат під час передачі електричної енергії на великі відстані.

Трансформаторні підстанції відіграють важливу роль на різних етапах, а саме:

- Етап генерації : Після вироблення електроенергії на електростанціях ТП підвищують напругу для зменшення втрат під час передачі.

- Етап транспортування : У магістральних мережах високовольтні ТП забезпечують ефективну передачу електроенергії між регіонами та країнами.

- Етап розподілу : ТП знижують напругу до рівня, придатного для кінцевих споживачів (промисловість, комерційні об'єкти, побутові споживачі)[1].

1.1.1 Аналіз несправностей, які виникають при роботі ТП

Трансформаторні підстанції є критично важливими для енергетичної системи, але під час експлуатації можуть виникнути різноманітні проблеми, які впливають на стабільність електропостачання, ефективність обладнання і безпеку системи.

Найпоширенішою проблемою є перегрів, а саме, перегрів обмоток трансформатора. Ця проблема може призвести до зниження ефективності та скорочення строку служби обладнання. Проблема з перегрівом виникає в наслідок перевантаження, недостатньої вентиляції, високої температури навколишнього середовища, або не ефективної системи охолодження.[2]

Також виникають такі проблеми, як деградація ізоляційних матеріалів. Ізоляційні матеріали, такі як папір і масло, з часом можуть втрачати свої властивості через високі температури та механічний знос. Це призводить до втрати електричної міцності та підвищує ризик короткого замикання.

Механічні пошкодження трансформаторів можуть виникати через вібрації, які супроводжують роботу обладнання, що призводить до зношення обмоток, корпусу або з'єднувальних елементів. Додаткову загрозу становлять корозійні процеси, особливо в умовах високої вологості або агресивного середовища, які пошкоджують металеві частини трансформатора, знижуючи їхню надійність. Невідповідна робота релейного захисту та автоматики також може спричинити аварійні ситуації або пошкодження, особливо якщо захисні системи виходять з ладу або спрацьовують помилково. Крім того, витoki охолоджувальної рідини через старіння або пошкодження ущільнювачів можуть призвести до перегріву трансформатора та погіршення ізоляційних властивостей.

1.1.2 Вплив охолодження на роботу трансформаторних підстанцій

Особлива увага приділяється системам охолодження, адже вони мають вирішальне значення для безпечної і ефективної роботи трансформатора. Недостатнє охолодження призводить до таких наслідків як перегрів і вихід з ладу обладнання.

Проблеми які пов'язані з охолодженням ТП[3] :

1) Неефективне охолодження через недостатню вентиляцію. Трансформатори, які охолоджуються за допомогою природної вентиляції, можуть бути схильні до перегріву, якщо навколишнє середовище має високі температури або якщо місцева циркуляція повітря обмежена. Особливо це актуально для підстанцій, розташованих у промислових зонах або регіонах з екстремальними кліматичними умовами.

2) Зношеність і деградація охолоджувальних рідин.

У трансформаторах, які використовують оливу для охолодження, з часом ці рідини можуть втрачати свої охолоджувальні властивості через окислення, забруднення або вбирання вологи. Це призводить до зниження ефективності теплообміну і, як наслідок, до підвищення температури трансформатора.

3) Витоки охолоджувальних рідин. Витік оливи або іншої охолоджувальної рідини може спричинити падіння рівня охолоджувальної речовини, що призведе до перегріву трансформатора. Також це може спричинити зниження електричної ізоляції, що підвищує ризик короткого замикання.

4) Перевантаження системи охолодження. У разі збільшеного навантаження на трансформатор або екстремальних температур, система охолодження може не впоратися з ефективним відведенням тепла. Це може призвести до прискореної деградації ізоляційних матеріалів, що в результаті підвищує ризик аварії.

5) Неправильне або несвоєчасне обслуговування охолоджувальних систем. Регулярне технічне обслуговування є важливим для підтримки належної роботи охолоджувальних систем. Несвоєчасна заміна охолоджувальних рідин, очищення радіаторів або ремонт охолоджувальних контурів може призвести до погіршення ефективності охолодження.

1.1.3 Особливості роботи трансформаторних підстанцій на об'єктах з високими температурами

На багатьох енергетичних об'єктах трансформатори піддаються впливу високих температур, що вимагає ефективних систем охолодження для підтримки стабільної роботи обладнання. В умовах підвищеного теплового навантаження охолодження трансформаторів стає критично важливим завданням, оскільки надмірне нагрівання може призвести до перегріву обмоток, деградації ізоляційних матеріалів і скорочення терміну служби

трансформатора. Це підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій та потребує спеціалізованих рішень для підтримки оптимальної температури роботи обладнання.

Трансформаторні підстанції (ТП) особливо важливі на об'єктах, де генерується або передається велика кількість тепла, а також у регіонах з екстремально високими температурами. Наприклад, на теплових електростанціях (ТЕС) генерація електроенергії супроводжується значним тепловим навантаженням, що вимагає від трансформаторів ефективної системи охолодження для запобігання перегріву. Також на сонячних електростанціях (СЕС) трансформатори працюють в умовах підвищених температур через інтенсивне сонячне випромінювання, що потребує інноваційних підходів до охолодження. На нафто та газопереробних заводах через високу температуру промислових процесів стабільна система охолодження трансформаторів є ключовою для уникнення аварій. Крім того, в жарких регіонах, таких як пустелі чи тропіки, трансформаторні підстанції функціонують в екстремальних умовах, де ефективність охолодження стає вирішальним фактором для забезпечення надійної роботи обладнання.

Для забезпечення стабільної роботи ТП в умовах підвищених температур використовуються різні системи охолодження, як пасивні, так і активні. Останні можуть включати інноваційні технології, такі як рідини з підвищеною термічною стійкістю або застосування фазових переходів для ефективного відведення тепла. Це дозволяє забезпечити довготривалу стабільну роботу обладнання та запобігти можливим аварійним ситуаціям.

1.2 Системи охолодження трансформаторів

1.2.1 Масляне охолодження трансформатора

Масляне охолодження є одним з найпоширеніших методів охолодження трансформаторів, особливо у випадку потужних установок. Воно забезпечує ефективний відвід тепла від активної частини трансформатора за допомогою

спеціального трансформаторного масла, яке виконує функції як ізоляції, так і охолодження. Принцип дії масляного охолодження полягає в тому, що тепло, яке виділяється в процесі роботи обмоток і магнітопроводу, передається до масла, яке циркулює в баку трансформатора, а потім відводиться до навколишнього середовища через стінки бака або радіатори.

Масляне охолодження може бути реалізовано різними способами залежно від способу циркуляції масла і повітря. Найбільш поширені варіанти включають ONAN (Oil Natural Air Natural) та OFAF (Oil Forced Air Forced). У першому випадку циркуляція масла відбувається природним шляхом: гаряче масло піднімається до верхньої частини бака, де воно охолоджується, і потім опускається вниз. Охолодження повітрям також відбувається природним шляхом. Цей метод є простим і надійним, проте його ефективність може бути обмежена в умовах високих температур навколишнього середовища або великих навантажень.

Метод OFAF передбачає примусову циркуляцію масла за допомогою насосів і охолодження повітрям за допомогою вентиляторів. Це дозволяє значно підвищити ефективність охолодження та збільшити потужність трансформатора. Примусова циркуляція масла дозволяє більш рівномірно розподілити тепло по всій поверхні радіаторів, що знижує ризик перегріву і забезпечує стабільну роботу трансформатора навіть при підвищених навантаженнях. Проте цей метод є складнішим і вимагає додаткових витрат на обслуговування насосів і вентиляторів [4].

Масляне охолодження також забезпечує високу діелектричну міцність між обмотками та іншими частинами трансформатора, що сприяє підвищенню загальної надійності обладнання. Використання трансформаторного масла як ізоляційного матеріалу допомагає знизити ймовірність виникнення електричних розрядів між обмотками.

Важливо також враховувати, що масляне охолодження потребує ретельного контролю стану масла, оскільки з часом воно може втрачати свої властивості через забруднення і старіння. Регулярна заміна або регенерація

масла, а також контроль за герметичністю системи є ключовими факторами для забезпечення тривалої та безперебійної роботи трансформатора. Основні вимоги до експлуатації трансформаторів з масляним охолодженням, включаючи контроль стану масла[5].

Таким чином, масляне охолодження залишається популярним вибором для трансформаторів завдяки високій ефективності теплообміну та додатковій діелектричній ізоляції. Воно забезпечує надійну роботу обладнання навіть у важких умовах експлуатації, проте потребує відповідного обслуговування та контролю за станом масла для збереження своїх характеристик.



Рис 1.1 – Трансформатор із масляним охолодженням

1.2.2 Водяне охолодження трансформатора

Водяне охолодження трансформаторів є одним із найбільш ефективних способів відведення тепла, особливо для трансформаторів великої потужності, що працюють у складних умовах. Ця система використовує воду як теплоносієм для охолодження трансформаторного масла через спеціальні теплообмінники. Трансформаторне масло відводить тепло від активної частини трансформатора та циркулює через теплообмінник, де охолоджується водою. Після цього масло повертається до трансформатора, а охолоджена вода виводить надлишкове тепло з системи.

Основна перевага водяного охолодження полягає в здатності води поглинати та відводити значну кількість тепла завдяки її високій теплоємності. Це дозволяє підтримувати стабільну температуру трансформатора навіть при великих навантаженнях. В результаті, водяне охолодження є ідеальним для використання у випадках, коли трансформатори працюють на межі своїх потужностей або в умовах високих температур зовнішнього середовища.

Для функціонування системи водяного охолодження потрібна циркуляція води за допомогою насосів, що забезпечують її постійний потік через теплообмінники. Така система дозволяє забезпечити більш рівномірний розподіл тепла та уникнути локальних перегрівів. Водяне охолодження часто використовується на великих промислових підприємствах і електростанціях, де особливо важливими є стабільність роботи та ефективність теплообміну.

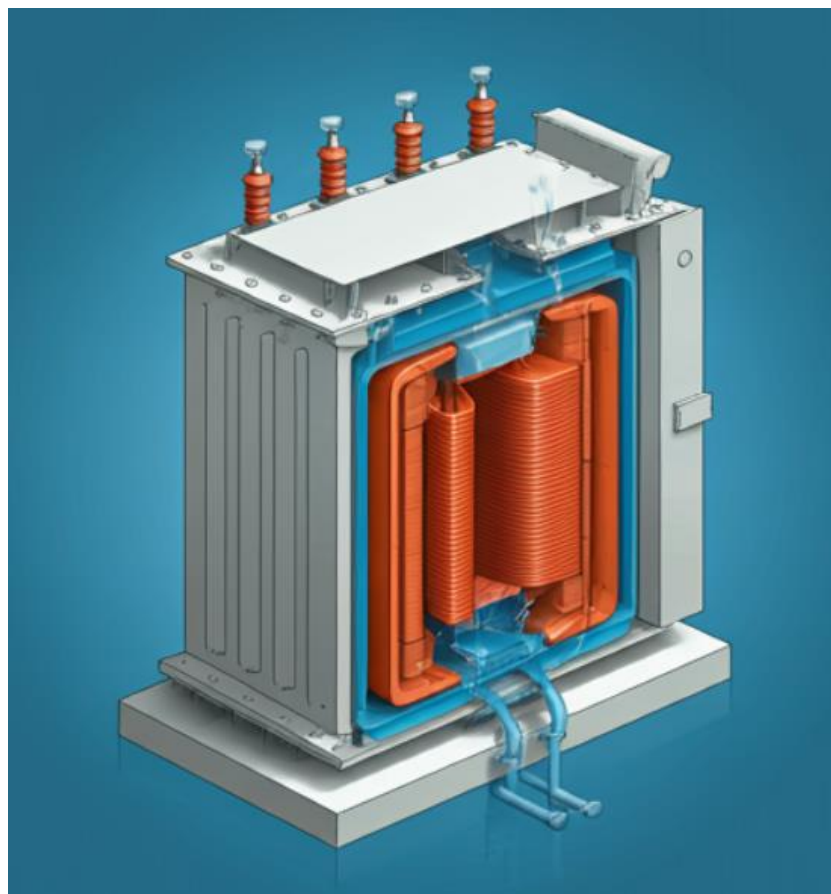


Рис. 1.2 – Трансформатор із водяним охолодженням

Однак, водяне охолодження має свої обмеження. Наприклад, воно вимагає постійного джерела чистої води, що може бути проблемою у регіонах з обмеженими водними ресурсами. Крім того, якість води повинна бути високою, щоб запобігти утворенню відкладень і корозії в системі, що може знизити ефективність теплообмінників. Складність такої системи зростає через необхідність обслуговування насосів, перевірки теплообмінників та контролю за герметичністю.

Незважаючи на ці виклики, водяне охолодження залишається одним із найпопулярніших виборів для потужних трансформаторів, оскільки забезпечує високий рівень охолодження та довготривалу стабільну роботу обладнання навіть у важких умовах. Це робить водяне охолодження оптимальним вибором для великих трансформаторних підстанцій, де потрібно зберігати надійність і стабільність роботи трансформаторів при високих навантаженнях.

1.2.3 Повітряне охолодження

Повітряне охолодження є одним із найпоширеніших методів відведення тепла від трансформаторів, особливо у випадках меншої потужності. Його принцип роботи базується на передачі тепла, яке виділяється всередині трансформатора під час роботи, до навколишнього повітря. Тепло, що виділяється внаслідок втрат у магнітному осерді та обмотках, передається до корпусу трансформатора та зовнішньої поверхні, звідки його відводить повітря.

Залежно від способу охолодження, розрізняють два основні типи повітряного охолодження: природне і примусове. Природне повітряне охолодження (АН) є найпростішим методом, при якому тепло відводиться за рахунок природної конвекції повітря. Нагріте повітря піднімається вгору, поступаючи місцем більш холодному, що дозволяє підтримувати температуру трансформатора в допустимих межах. Природне охолодження зазвичай використовується для трансформаторів невеликої потужності, але

його ефективність залежить від температури і вологості повітря, що обмежує застосування в умовах високих температур.

Примусове повітряне охолодження (AF) використовує вентилятори для посилення повітряного потоку навколо трансформатора. Це збільшує швидкість теплообміну, що дозволяє ефективніше відводити тепло та забезпечує кращу роботу трансформатора за високих навантажень. Примусове охолодження підвищує потужність трансформатора та дозволяє зменшити його габарити, порівняно з системами, що використовують лише природне охолодження.

Основними перевагами повітряного охолодження є простота конструкції та експлуатації, відсутність необхідності у додаткових рідинах, що знижує ризик витоків і забруднення навколишнього середовища, а також підвищена пожежна безпека, адже повітря не є горючим. Однак, такі системи мають обмежену ефективність при великих потужностях трансформатора та залежать від умов навколишнього середовища. Примусове охолодження може створювати додатковий шум через роботу вентиляторів.

Повітряне охолодження широко застосовується в трансформаторах невеликої та середньої потужності, які встановлюються як у приміщеннях, так і на відкритих майданчиках з достатньою вентиляцією. Воно також може бути додатковим методом охолодження для трансформаторів з масляним охолодженням. Вибір типу охолодження залежить від потужності трансформатора, умов навколишнього середовища, вимог до надійності та безпеки, а також економічних показників.

1.2.4. Сухе охолодження трансформаторів

Сухе охолодження трансформаторів є сучасним і ефективним методом відведення тепла, в якому замість традиційного трансформаторного масла використовується ізоляційна система, що не потребує рідких діелектриків. Це робить сухі трансформатори привабливими для багатьох сфер застосування, де важлива пожежна безпека та екологічність.

Принцип роботи таких трансформаторів включає три основні етапи. Під час роботи трансформатора в його обмотках та магнітному осердді виникають втрати, які призводять до виділення тепла. Це тепло передається від нагрітих елементів до корпусу трансформатора, а далі відводиться в навколишнє середовище за допомогою природної або примусової конвекції повітря. У деяких моделях для прискорення процесу охолодження використовуються вентилятори, що дозволяє забезпечити більш інтенсивний теплообмін.

Для забезпечення ізоляції в сухих трансформаторах застосовують різні матеріали. Епоксидні та силіконові смоли забезпечують надійну ізоляцію та механічну міцність, а папір, просочений лаком, використовується у менших за потужністю моделях. Ці матеріали створюють надійний бар'єр між струмопровідними частинами, захищаючи їх від впливу вологи та інших зовнішніх факторів.

Сухе охолодження має багато переваг, зокрема високу пожежну безпеку, оскільки відсутність горючого масла знижує ризик займання. Це робить такі трансформатори придатними для встановлення у закритих приміщеннях без потреби у спеціальних резервуарах чи системах охолодження масла. Вони також відрізняються екологічністю, оскільки не використовують рідин, які можуть забруднювати довкілля, та мають довший термін служби завдяки відсутності процесу старіння масла.

Попри переваги, сухі трансформатори мають і певні недоліки. Їхня вартість зазвичай вища, ніж у масляних аналогів, що може впливати на вибір у бюджетних проектах. Вони також мають більші габарити через потребу в товстішій ізоляції для забезпечення безпеки. Крім того, ефективність відведення тепла у них обмежена при великих потужностях, що робить масляне охолодження більш придатним для дуже потужних трансформаторів.

Сухі трансформатори активно використовуються в промислових об'єктах, де висуваються високі вимоги до пожежної безпеки, у житлових і комерційних будівлях, а також в енергетиці на підстанціях і розподільних

пунктах. Вони знаходять застосування і в транспорті, наприклад, на електричних локомотивах і судах, де важливими є компактність і безпека.

Вибір між сухим та масляним охолодженням залежить від конкретних умов, таких як потужність трансформатора, напруга, умови експлуатації та вимоги до безпеки. Сухі трансформатори стають все більш популярними завдяки своїм перевагам і тенденціям до підвищення вимог до екологічності та безпеки. Це робить їх перспективним напрямком розвитку у трансформаторобудуванні, що забезпечує їхнє зростаюче використання на ринку.

1.3 Патентний пошук

В патенті EP 3593076 B1 розглядається вдосконалена конструкція трансформатора з ефективнішою системою охолодження. В розробці системи охолодження для трансформаторів було представлено новий підхід, який значно підвищує ефективність відведення тепла [6]. Ця система використовує вдосконалену конструкцію, що дозволяє оптимізувати циркуляцію трансформаторного масла, яке виконує функцію охолодження.

Однією з ключових особливостей є наявність мережі трубок, що забезпечують рівномірний розподіл тепла по всій поверхні трансформатора. Це допомагає зменшити ризик перегріву, що, в свою чергу, сприяє зниженню енергетичних витрат. Завдяки такій системі охолодження також підвищується надійність роботи трансформатора та продовжується термін його служби.

Крім того, система обладнана датчиками, які стежать за температурою в реальному часі. Це дозволяє автоматично регулювати потік охолоджувальної рідини залежно від умов експлуатації. Такий підхід робить цю технологію особливо привабливою для використання в різних сферах, включаючи енергетичні станції та промислові установки.

Загалом, нова система охолодження трансформаторів обіцяє суттєві переваги, включаючи підвищення енергоефективності та надійності.

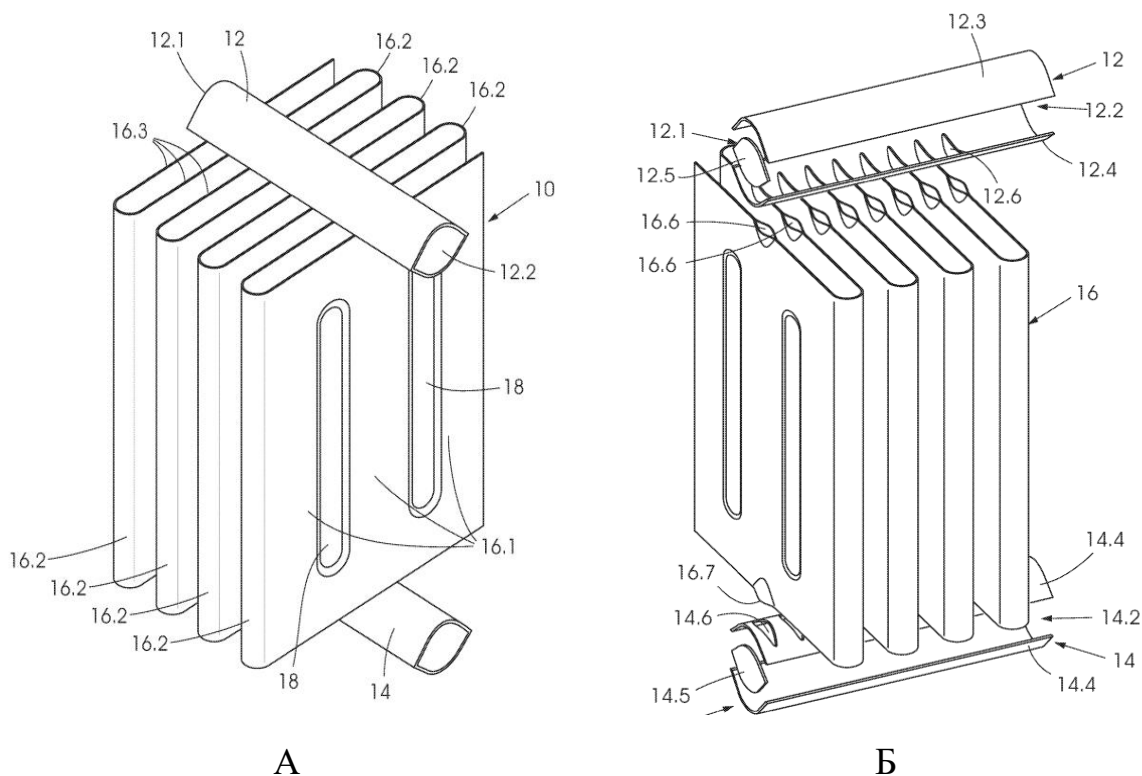


Рис. 1.3 – Система охолодження, що показана в патенті EP 3593076 B1

В Патенті EP 3888105 B1. Описується система охолодження для сухих трансформаторів. Вона включає в себе охолоджуючий канал, розташований між обмотками трансформатора, що забезпечує ефективне відведення тепла[7]. Також передбачено використання вентиляційного пристрою для створення охолоджувального потоку. Це рішення покращує ефективність охолодження та зменшує розміри установки трансформатора

1.4.3 Патент EP 4006925 A1 представляє нову систему охолодження для трансформаторів, що розроблена з метою підвищення ефективності відведення тепла[8]. Ця конструкція включає в себе корпус трансформатора, який складається з чотирьох стінок, що формують внутрішній простір, де розміщуються обмотки та магнітне осердя. Кожна з цих стінок має охолоджувальні канали, які дозволяють циркулювати охолоджуючій рідині або повітрю, що значно покращує відведення тепла.

Завдяки такій конструкції система охолодження дозволяє знизити робочу температуру трансформатора, зменшуючи ризик перегріву та продовжуючи термін служби обладнання. Це особливо важливо в умовах високих навантажень, де традиційні методи охолодження можуть бути недостатніми.

Інноваційний підхід до охолодження, описаний у патенті, робить можливим використання як природного, так і примусового охолодження, що дозволяє адаптувати трансформатор під різні умови експлуатації. Таким чином, ця система не лише підвищує надійність та ефективність трансформаторів, а й сприяє зменшенню ризиків, пов'язаних з їх перегрівом.

Патент **EP 3718385 A1** описує систему охолодження трансформатора, яка включає в себе використання сенсорів для контролю температури та характеристик ізоляційної рідини [9]. Система має бак з ізоляційною рідиною, що охолоджується радіатором, і сенсори, розміщені у місцях зниженої температури, що допомагають визначати температуру та стан рідини. Інформація від сенсорів використовується для регулювання роботи охолоджувального контуру, зокрема для активації або коригування роботи вентиляторів, що дозволяє уникнути перегріву і підвищити ефективність охолодження трансформатора

1.4 Аналіз чинників, що визначають енергоефективність трансформаторної підстанції

Підвищення енергоефективності трансформаторної підстанції можливо за рахунок впливу на чинники, які представлені у вигляді діаграмі (Рис. 1.4). Ці чинники формують три групи: 1 група чинників матеріалів, 2 група чинників впливу на охолодження та 3 група систем керування та автоматизації.

До першої групи факторів відносяться фактори, що пов'язані з використання нових технологій теплопередачі. Сучасні системи охолодження можуть включати спеціальні матеріали або конструкції, такі як теплові труби

або наноматеріали, які ефективно передають тепло від трансформатора до зовнішнього середовища. Це дозволяє підвищити ефективність охолодження та запобігти перегріву обладнання навіть у складних умовах. Для охолодження трансформаторів також можуть використовуватись рідини з підвищеною термічною стабільністю, такі як синтетичні масла або ефірні рідини. Ці речовини мають високу стійкість до деградації при високих температурах, що дозволяє забезпечити надійність та тривалу ефективність систем охолодження.



Рис. 1.4 – Факторне поле впливу чинників на енергоефективність трансформаторної підстанції

В другій групі факторів розглянуто системи охолодження та їх вплив на потужність, що може передаватись трансформатором. Для забезпечення стабільної роботи трансформаторних підстанцій (ТП) та уникнення проблем з перегрівом важливо використовувати сучасні підходи до систем охолодження.

Одним із таких підходів є впровадження систем примусового охолодження, яке забезпечується за допомогою примусової циркуляції повітря або рідини через радіатори трансформатора. Це дозволяє значно покращити відведення тепла, особливо в умовах підвищених температур. Установлення вентиляторів або насосів для активної циркуляції охолоджувальної рідини є ефективним рішенням для підвищення ефективності охолодження.

Масляне охолодження є одним із найбільш поширених методів, завдяки своїй високій ефективності в теплообміні та додатковій ізоляційній функції. Було проаналізовано як природне, так і примусове масляне охолодження, що підвищує його ефективність для потужних трансформаторів.

Водяне охолодження відзначається здатністю відводити велику кількість тепла завдяки високій теплоємності води. Це робить його оптимальним вибором для трансформаторів великої потужності, що працюють у складних умовах. Проте, було зазначено, що такий метод потребує постійного джерела якісної води та регулярного обслуговування.

Повітряне охолодження підходить для трансформаторів меншої потужності, де важливими є простота конструкції, пожежна безпека та екологічність. Було розглянуто як природне, так і примусове повітряне охолодження, яке дозволяє збільшити ефективність теплообміну, але залежить від навколишніх умов.

Сухе охолодження є сучасним рішенням, яке забезпечує підвищену пожежну безпеку та екологічність завдяки відсутності рідких діелектриків. Проте, ефективність сухих трансформаторів обмежена при великих потужностях, що робить їх менш придатними для потужних установок.

Третя група описує вплив систем моніторингу і автоматизації для охолоджувальних систем. Встановлення датчиків температури та автоматизованих систем дозволяє постійно відстежувати стан трансформатора та вчасно активувати додаткові механізми охолодження або повідомляти про необхідність технічного обслуговування. Це дозволяє запобігати аварійним ситуаціям і підтримувати стабільну роботу обладнання.

Таким чином, для забезпечення ефективної роботи трансформаторних підстанцій в умовах високих температур необхідно постійно вдосконалювати системи охолодження, впроваджувати нові технології та методи теплопередачі для запобігання перегріву й забезпечення стабільної роботи обладнання.

Висновки до першого розділу

Розглянуто та проаналізовано масляні, водяні, повітряні та сухі системи охолодження трансформаторів, їхні принципи роботи, переваги та обмеження. Вибір типу охолоджуючої системи залежить від потужності трансформатора, умов експлуатації та режимів його роботи.

Проведений аналіз патентних розробок, які демонструють інноваційні підходи до охолодження трансформаторів, встановив, що перспективні напрямки модернізації полягають у оптимізації каналів охолодження, використанні сенсорів для моніторингу температури та автоматичне регулювання потоків охолоджувальної рідини, що дозволить підвищити надійність та енергоефективність трансформаторів.

Побудовано факторне поле чинників впливу на енергоефективність роботи трансформаторів яке містить в собі групу спеціальних конструкцій та матеріалів, групу чинники впливу на охолодження та групу систем керування та автоматизації, що дозволяє обрати напрям модернізації трансформаторної підстанції.

РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НАФТОВИДОБУВНОГО ПІДПРИЄМСТВА

2.1 Розрахунок та вибір обладнання ГПП Артюхівського нафтового родовища

Для Артюхівського нафтогазового родовища споживачами якого є ділянка ДНС для очищення пластових рідин (обладнана двигунами ВАО-500 потужністю 250 та 315 кВт та двигунами ВАО 400 потужністю 200 кВт), насосна станція (обладнана двигунами ВАО-710 потужністю 315 кВт) та видобувних установок свердловин (обладнані занурювальними насосами ПЕД-63) за методом коефіцієнта попиту визначається згідно таблиці 2.1 визначаємо розрахункове навантаження підприємства[10].

Щоб обрати загальний трансформатор розрахуємо $\sum S_p$ кВА.

$$S_{p.вуз.} = K_{одн} \sqrt{\left(\sum_1^n P_{p,i}\right)^2 + \left(\sum_1^n Q_{p,i}\right)^2},$$

$S_{p.вуз.}$ – повна потужність

$K_{одн}$ – коефіцієнт корекції

$P_{p,i}$ - активний опір

$Q_{p,i}$ - реактивний опір

$$\sum S_p = 1 \sqrt{(87,34 + 112,8 + 76 + 600 + 144,16 + 504 + 468 + 416)^2 + (70,1 + 89,6 + 54,8 + 480 + 112,4 + 378 + 374 + 332)^2} = 3063 \text{ кВА}$$

За розрахованою потужністю обираємо трансформатора ТМН-4000, $P_{ном}=4000\text{кВА}$ [10] з наступними характеристиками (табл. 2.2)

Таблиця 2.1 – Електричні навантаження нафтовидбувного підприємства

Вхідні дані					Результати розрахунків			
Споживач	P_n , кВт	К-ть спожива чів	$\cos\varphi$	K_{Π}	$\operatorname{tg}\varphi$	P_p , кВт	$Q_{p,}$, кВАр	S_p , кВА
Збірка № 1 ПОЗ-3								
Інгібіторне господарство	10,9	1	0,8	0,8	0,559	8,72	6,976	11,16
Компресорна	19,5	2	0,8	0,8	0,559	31,2	24,96	39,95
Котельня	23,5	2	0,8	0,82	0,559	38,54	30,832	47,05
АГРС	3,8	2	0,9	0,9	0,351	6,84	6,156	9,2
Електрозасувка	5,1	2	0,6	0,2	1,054	2,04	1,224	2,37
Усього по збірці № 1						87,34	70,148	112,02
Збірка № 2 ЦДНГ								
Інженерно-лабораторний к.	34,5	2	0,8	0,8	0,559	55,2	44,16	70,69
Насосна	18,5	2	0,7	0,8	0,782	29,6	20,72	36,13
Пожежне депо	6	2	1	1	0	12	12	16,97
Вузол зв'язку	10	2	0,8	0,8	0,559	16	12,8	20,49
Усього по збірці № 2						112,8	89,68	144,1
Збірка № 3 ПГРС								
Інгібіторне господарство	17	2	0,7	0,8	0,782	27,2	19,04	33,2
Котельня	12	2	0,8	0,8	0,559	19,2	15,36	24,58
УППГ	18,5	2	0,7	0,8	0,782	29,6	20,72	36,13
Усього по збірці № 3						76	54,82	93,7
Збірка № 4 КНС								
Відцентровий насос	250	3	0,8	0,8	0,559	600	480	768,3
Усього по збірці № 4						600	480	768,3
Збірка № 5 ДГС								
Протипожежна	75	2	0,8	0,8	0,559	120	96	153,6
Котельня	10,8	2	0,7	0,8	0,782	17,28	12,096	21,09
Артсвердловина	2,8	2	0,8	0,8	0,559	4,48	2,584	5,73
Система автоматизації	1,5	2	0,75	0,8	0,6	2,4	1,8	3
Усього по збірці № 5						144,1	112,4	182,8
Збірка № 6 Насоси ДГС								
Насос	315	2	0,75	0,8	0,6	504	378	630

Усього по збірці № 6						504	378	630
Збірка № 7 Насоси ПЕД-63 1								
ПЕД-65	65	9	0,8	0,8	0,55	468	374	599
Усього по збірці № 7								
Збірка № 8 Насоси ПЕД-63 2								
ПЕД-65	65	3	0,8	0,8	0,55	156	124	199
ПЕД-65	65	5	0,8	0,8	0,55	260	208	332
Усього по збірці № 8						416	332	531
Усього по збіркам						2408	1891	3063



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд трансформатора ТМН-4000/35

Таблиця 2.2 Основні характеристики ТМН-4000/35-У1:

Номінальна напруга ВН:	35 кВ
Максимальна потужність	4000 кВА
Кількість обмоток	3

Робоча частота	50 Гц
Рівень шуму	менше 65 дБ
Рівень захисту	IP00-IP54
Робоча температура	від -40 до +50 °С

Вибір електричних апаратів ГПП

На ГПП встановлюється вакуумний вимикач ABB VD4[11]. Вакуумний вимикач ABB VD4 розрахований на роботу в мережах з напругою до 35 кВ і здатний комутувати номінальний струм в діапазоні від 630 до 3150 А. Він має високу комутуючу здатність, що досягає 25–50 кА, і відрізняється довговічністю, витримуючи понад 30 000 механічних циклів і до 10 000 електричних. Завдяки вакуумному середовищу вимикач ефективно гасить дугу, знижуючи зношення контактів і тим самим подовжуючи термін служби. ABB VD4 також підтримує можливість віддаленого керування, що покращує рівень безпеки та забезпечує зручність у випадках, коли підстанція працює в автоматизованому або віддаленому режимі.



Рис 2.2 - Вакуумний вимикач ABB VD4

Також на ГПП потрібен роз'єднувач. Було обрано роз'єднувач РЛНД-35.[12] Він призначений для мереж із напругою 35 кВ і забезпечує надійне відключення лінії під час обслуговування, розрахований на номінальний струм до 630 А. РЛНД-35 має стійкість до коротких замикань із витримкою струму до 20 кА протягом трьох секунд, що робить його надійним компонентом в умовах можливих аварійних навантажень. Роз'єднувач розрахований на тривалий термін експлуатації, витримуючи понад 2000 циклів перемикачів. Його конструкція забезпечує видимий розрив лінії для безпеки обслуговування, а також містить захист від корозії та надійну систему фіксації у станах «включено» і «вимкнено».



Рис 2.3 - Роз'єднувач РЛНД-35

2.2. Розрахунок релейного захисту трансформатора ТМН-4000/35

Повний обсяг захисту силового трансформатора ТМН-4000/35, що забезпечує його надійну експлуатацію включає в себе струмову відсічку (СВ) для захисту від багатозначних КЗ, максимальний струмовий захист від багатозначних КЗ за трансформатором на стороні НН та газовий захист. Струмова відсічка є швидкодіючим захистом, який миттєво відключає трансформатор при виникненні великих струмів короткого замикання, що запобігає серйозним пошкодженням обладнання. Встановлений максимальний струмовий захист (МСЗ) реагує на короткі замикання та

перевантаження в мережі, спрацьовуючи при перевищенні певного порогового струму. Додатково застосовується максимальний струмовий захист з пуском по напрузі, який підвищує чутливість захисту при несправностях на стороні низької напруги, враховуючи зниження напруги під час аварійної ситуації. Також передбачено захист від перевантажень, який реагує на тривалі перевантаження та запобігає перегріву обмоток і пошкодженню ізоляції. Усі ці захисти працюють у комплексі, забезпечуючи надійну та безпечну роботу трансформатора та мінімізуючи ризик виникнення аварійних ситуацій.

2.2.1. Розрахунок струмів КЗ

Розрахунок струмів КЗ, які необхідні для визначення параметрів струмових захистів трансформатора проводимо для схеми наведеної на рис 2.4 [13]. Розрахунок проводимо у відносних базисних одиницях для трансформатора ТМН-4000/35 з номінальною потужністю : $S_{ном} = 4000$ кВА та номінальною напругою $U_{ном} = 35$ кВ

$$S_b = 100 \text{ МВА}$$

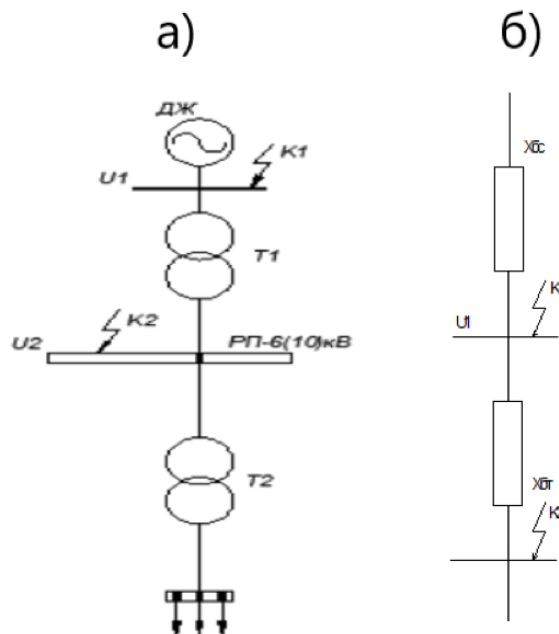


Рис 2.4 а - схема електрична принципова, б – схема заміщення

Встановлюємо величину базисної потужності

Базисна потужність S_b : 100МВА

Потужність трифазного КЗ джерела живлення $S_k^{(3)} = 200$ МВА;

Визначення базисної напруги для точки К1 (високовольтна сторона трансформатора 35 кВ)[14]:

$$U_{b1} = 1.05 * U_{ном1} = 1.05 * 35 \text{ кВ} = 36.75 \text{ кВ}$$

Визначення базисного струму для К1

$$I_b = \frac{(S_b)}{\sqrt{3} * (U_b)}$$

$$I_{b1} = \frac{100000}{\sqrt{3} * 36750} \approx 1.57 \text{ кА}$$

Еквівалентний опір для точки К1

$$X_{6c} = \frac{S_b}{S_k^{(3)}} = 0.5 \text{ в.б.о}$$

$$Z_{b1} = X_{6c} = 0.5 \text{ в.б.о}$$

Опір трансформатора :

Активний опір не враховується, тому обчислюємо тільки реактивний опір:

$$x_{6т} = \frac{S_b}{S_{ном}} * \frac{U_k\%}{100} = \frac{100000}{4000} * \frac{10.5}{100} = 2,62 \text{ в.б.о}$$

В відносних базисних одиницях:

$$Z_{62} = x_{6т} + X_{6c} = 2,62 + 0,5 = 3,12 \text{ в.б.о}$$

Еквівалентний опір для точки К2 :

$$Z_{62} = X_{6c} + Z_{62} = 0,5 + 3,12 = 3,62 \text{ в. б. о}$$

Струм трифазного короткого замикання для точки К1

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{I_{61}}{Z_{61}} = \frac{1,57}{0,5} = 3,14 \text{ кА}$$

Струм двофазного короткого замикання К1 :

$$I_{K1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{K1}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} * 3,14 = 2,71 \text{ кА}$$

Миттєвий струм ударного короткого замикання :

$$i_y = k_y * \sqrt{2} * I_{K1}^{(3)} = 1,8 * \sqrt{2} * 3,14 = 8 \text{ кА}$$

Потужність трифазного короткого замикання $S_{K1}^{(3)}$:

$$S_{K1}^{(3)} = S_6 * \frac{I_{K1}^{(3)}}{I_{61}} = 100 \frac{3,14}{1,57} = 200 \text{ МВА}$$

Струм трифазного короткого замикання для точки К2:

$$I_{b2} = \frac{100000}{\sqrt{3} * 6000} \approx 9,62 \text{ кА}$$

$$I_{K2}^{(3)} = \frac{I_{62}}{Z_{62}} = \frac{9,62}{3,62} = 2,65 \text{ кА}$$

Струм двофазного короткого замикання К2 :

$$I_{K2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} * I_{K2}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} * 2,65 = 2,29 \text{ кА}$$

Миттєвий струм ударного короткого замикання :

$$i_y = k_y * \sqrt{2} * I_{K2}^{(3)} = 1,8 * \sqrt{2} * 2,29 = 5,82 \text{ кА}$$

Діюче значення повного струму i_{yi} :

$$i_{yi} = I_{K2}^{(3)} * \sqrt{1 + 2 * (k_y - 1)^2} = 2,29 * \sqrt{1 + 2 * (1,8 - 1)^2} = 8,78 \text{ кА}$$

Потужність трифазного короткого замикання K2 :

$$S_{K2}^{(3)} = S_6 * \frac{I_{K2}^{(3)}}{I_{62}} = 100 \frac{5,82}{9,62} = 60,5 \text{ МВА}$$

Виконані розрахунки дозволили визначити основні параметри короткого замикання для точок K1 і K2 розглянутої схеми з трансформатором ТМН-4000/35.

2.2.2 Розрахунок параметрів струмової відсічки

Переведення максимального струму на високу сторону I'_{max3} [15]:

Формула для розрахунку:

$$I'_{max3} = \frac{I_{K2max}^{(2)}}{n_{t1}} = \frac{100000}{18,33} = 5455 \text{ А}$$

Розрахунок струму спрацьовування відсічки :

$$I_{co} \geq k_{отс} \cdot I'_{max} 3 = 1.4 \cdot 5455 \approx 7637$$

Розрахунок середнього струму I_{cp} для відсічки:

$$I_{cp} = \frac{I_{co} \cdot k_{cx}}{n_{та}} \cdot \frac{7637 \cdot 1}{20} = 381A$$

Вибір реле струму.

Для струму $I_{cp}=381$ А вибрано реле РТ 80/400 з уставками в діапазоні 80-400 А. Це реле відповідає вимогам для токової відсічки.

2.2.3 Розрахунок параметрів МСЗ

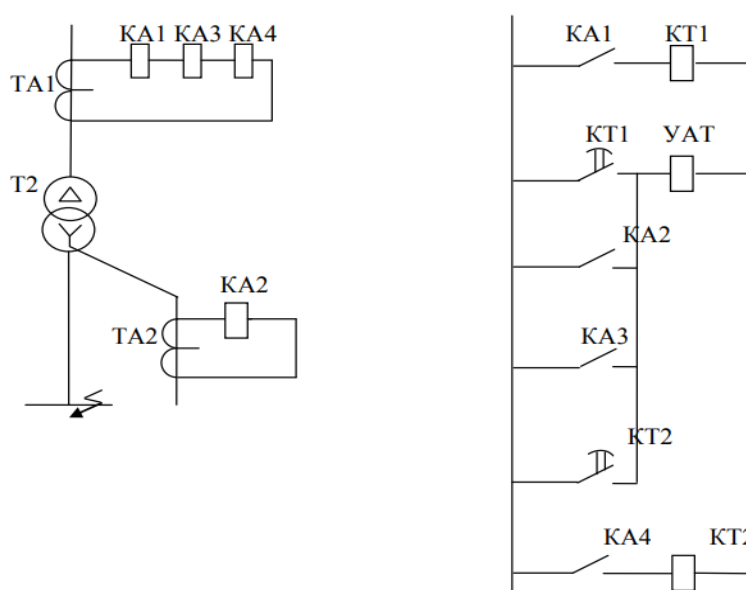


Рис 2.5 – Схема релейного захисту

Розрахунок номінального струму $I_{ном}$:

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{4000}{\sqrt{3} \cdot 35} = \frac{4000}{60.62} = 65.99A$$

Визначення струму спрацьовування захисту $I_{сз}$:

Формула для струму спрацьовування:

$$I_{сз} \geq \frac{k_{отс} \cdot k_{сзп}}{k_B} \cdot I_{ном}$$

$$I_{c3} \geq \frac{1,2 * 2,5}{0,8} * 65,99 = 247,46A$$

Розрахунок середнього струму I_{cp} :

$$I_{cp} = \frac{I_{c3} * k_{cx}}{n_{Ta}} * \frac{247,46 * 1}{20} = 12,37A$$

На основі розрахункового значення $I_{cp}=12.37$, вибираємо реле РТ 40/50 із межами уставок від 12.5 до 25 А. Це реле має послідовне з'єднання обмоток і може працювати у вказаному діапазоні струмів, що підходить для даної конфігурації захисту.

Перевірка чутливості на двофазне КЗ:

$$I_{\min K3 2} = \frac{I_{\min K3 2}}{n_{TA}} = \frac{27,8}{6/0.4} = 1.85kA$$

$$K_q = \frac{I_{\min K3 2}}{I_{c3}}$$

$$K_q = \frac{185000}{247,46} = 7,4$$

Оскільки K_q більше 1.5, захист проходить перевірку чутливості на двофазне КЗ.

Перевірка чутливості на однофазне КЗ.

Максимальний струм однофазного КЗ на стороні низької напруги:

$$I_1 = \frac{U_{\phi}}{Z_T} = \frac{230}{0,009} = 25,556$$

Коефіцієнт чутливості :

$$K_q = \frac{I_1/n_{TA}}{I_{c3}} = \frac{1703,7}{247,46} = 6,88$$

K_q більше 1.5, захист проходить перевірку чутливості на однофазне КЗ.

Таким чином, обране реле РТ 40/50 з уставкою від 12.5 до 25 А підходить для реалізації МСЗ трансформатора ТМН-4000/35 та забезпечує належний рівень чутливості захисту.

2.2.4. Розрахунок параметрів захисту від перевантаження

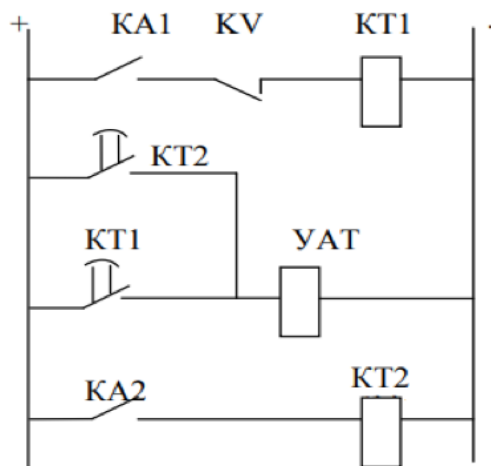


Рис 2.6 – Схема МСЗ з пуском по напрузі та МСЗ від перевантаження.

Розрахунок струму спрацьовування захисту від перевантаження I_{c3} :

Формула для розрахунку струму спрацьовування:

$$I_{c3} \geq \frac{k_{отс}}{k_B} \cdot I_{ном}$$

Підставимо значення:

$$I_{c3} \geq \frac{1,05}{0,8} \cdot 65,99 = 59,6A$$

Розрахунок струму I_{cp} :

Струм для реле обчислюється як:

$$I_{cp} = \frac{I_{c3} \cdot k_{cx}}{n_{та}} \cdot \frac{59,6 \cdot 1}{20} = 3A$$

Вибір реле струму

Для струму $I_{ср}=4.33$ А підходить реле РТ 40/10 з уставками в діапазоні 2.5–5 А. Це реле забезпечить належний захист від перевантаження.

2.2.5 Газовий захист

Газовий захист трансформатора ТМН-4000/35 забезпечує виявлення внутрішніх пошкоджень, таких як короткі замикання в обмотках, пробой ізоляції або локальний перегрів. Основний принцип роботи заснований на виявленні газів, які утворюються при розкладанні трансформаторного масла або ізоляції під впливом тепла чи електричних дуг.

Для реалізації захисту використовується газове реле типу Бухгольца, що встановлюється на трубопроводі між баком трансформатора і розширювачем. Реле реагує на накопичення газів або падіння рівня масла. У разі невеликого газовиділення реле подає сигнал тривоги, що дозволяє оперативно провести діагностику трансформатора. При серйозних аваріях, таких як розрив обмотки, реле автоматично відключає трансформатор, запобігаючи пошкодженням.

Газовий захист трансформатора відзначається високою чутливістю і надійністю, що забезпечує своєчасне виявлення несправностей та зменшує ризик серйозних аварій.

Висновки до другого розділу

В даному розділі було розраховано електричне навантаження Артюхівського нафтогазового родовища, яке становить 3063 кВА. На основі цього розрахунку було обрано трансформатор ТМН-4000/35 із номінальною потужністю 4000 кВА, який повністю відповідає потребам підприємства.

З розрахованим струмовим навантаженням в номінальних та аварійних режимах виконано вибір обладнання для головної понижувальної підстанції (ГПП). Для комутації було обрано вакуумний вимикач АВВ VD4, який відповідає всім технічним вимогам, а також роз'єднувач РЛНД-35, що забезпечує безпечне підключення та відключення обладнання в мережі з напругою 35 кВ.

Для забезпечення безпеки трансформатора було розраховано параметри релейного захисту трансформатора. Захист трансформатора виконано в обсязі струмової відсічки, максимального струмового захисту з пуском по напрузі, захисту від перевантажень та газового захисту. Струмові захисти реалізовано на електромеханічних реле РТ 80/400, РТ 40/50 та РТ 40/10, а газовий захист на газовому реле типу Бухгольца.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Тепловий розрахунок трансформатора

3.1.1 Розрахунок температурного перепаду між обмотками і маслом

Для обмоток із прямокутного проводу, °C[16] :

$$\theta_o = \frac{q \cdot \delta \cdot 10^{-5}}{\lambda_{iz}},$$

де q – дійсна густина теплового потоку на поверхні обмотки, Вт/м²

δ – одностороння товщина ізоляції проводу, $\delta = 0,25$ мм;

λ_{iz} – теплопровідність ізоляції проводу; для проводу марок ПБ і АПБ

$$\lambda_{iz} = 0,0017 \text{ Вт/(см} \cdot \text{°C)}.$$

$$\theta_{o1} = \frac{1320 \cdot 0,25 \cdot 10^{-5}}{0,0017} = 1,94 \text{ °}$$

$$\theta_{o2} = \frac{1627 \cdot 0,25 \cdot 10^{-5}}{0,0017} = 2,4 \text{ °C}$$

Визначасмо температуру найгарячішої точки обмоток за формулою

$$\theta_{ocp} = \frac{2}{3} \cdot \theta_o.$$

$$\theta_{ocp1} = \frac{2}{3} * 1,94 = 1,29 \text{ °C}$$

$$\theta_{ocp2} = \frac{2}{3} * 2,4 = 1,6 \text{ °C}$$

Перепад температури між поверхнею обмотки і маслом визначається за формулою, °C

$$\theta_{по-м} = 0,35 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot q^{0,6}$$

де $k_1 = 1,0$ – для природного масляного охолодження, $k_1 = 0,9$ – для масляного охолодження з дуттям (в трансформаторах $S_n \geq 10000$ кВА);

$k_2 = 1,0$ – для зовнішніх обмоток і $k_2 = 1,1$ – для внутрішніх обмоток;

k_3 – коефіцієнт, що враховує відношення висоти каналу між котушками до радіального розміру обмотки

$$\theta_{по-м}1 = 0,35 * 1 * 1,1 * 0,95 * 1320^{0,6} = 27,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{по-м}2 = 0,35 * 1 * 1,1 * 0,95 * 1627^{0,6} = 30,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Середнє перевищення температури обмотки над маслом , $^\circ\text{C}$:

$$\theta_{(о-м)ср} = \theta_{оср} + \theta_{по-м}.$$

$$\theta_{(о-м)ср}1 = 1,29 + 27,2 = 28,49 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\theta_{(о-м)ср}2 = 1,6 + 30,9 = 32,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.1.2 Розрахунок геометричних розмірів поверхні тепловідводу бака трансформатора

Для відведення теплоти від трансформатора ТМН-4000/35 необхідно забезпечити достатню площу охолоджувальної поверхні для контакту з повітрям. У випадку невеликої потужності охолодження забезпечується самою поверхнею бака, але при великих навантаженнях потрібна додаткова поверхня охолодження. Це досягається за допомогою труб, вварених у стінки бака, або знімних радіаторів, які можуть обдуватися вентиляторами для підвищення ефективності. Для трансформатора ТМН-4000/35 використовується природне масляне охолодження з додатковими радіаторами.

Для розрахунку системи охолодження потрібно визначити мінімальні розміри бака, см[17]:

Довжина :

$$L_6 := 2 \cdot L_c + D''_2 + 2 \cdot (S_3 + S_2 + d_2)$$

$$L_6 = 2 * 57 + 54 + 2(5 + 2 + 0,51) = 183 \text{ см}$$

Ширина:

$$B = D''_2 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + d_1 + d_2$$

$$B = 54 + 5 + 2 + 5 + 5 + 0,84 + 0,51 = 72,35 \text{ см}$$

Висота :

$$H_6 := l_{\text{сер}} + 2 \cdot H_{\text{я}} + H_{\text{яд}} + H_{\text{як}} =$$

$$H_6 = 58,3 + 2 * 32,5 + 5 + 40 = 168 \text{ см}$$

де $H_{\text{я}}$ – ширина першого пакета ярма (стержня), 32,5 см, $H_{\text{я}} = g_{lc}$;

$H_{\text{яд}}$ – товщина опорного бруса під нижнім ярмом, см, $H_{\text{яд}} = 5$ см;

$H_{\text{як}}$ – відстань від верхнього ярма до кришки бака, 40 см ;

d – Діаметри відводів обмоток ВН і НН.

S – ізоляційні відстані

$L_{\text{сер}}$ – середня висота обмоток 58,3 см;

За допомогою конвекції і випромінювання бак віддає тепло в навколишнє середовище. Розрахунок площі поверхні випромінювання бака :

$$P_{\text{вип}} = [2(L_6 - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot k_{\text{вип}} \cdot 10^{-4},$$

де $k_{\text{вип}}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення поверхні випромінювання бака з трубами і з радіаторами порівняно з гладеньким баком – 1.7;

$$\Pi_{\text{вип}} = [2 * (183 - 72,35) + 3.14 * 72.35] * 168 * 1,7 * 10^{-4} = 12.8 \text{ м}^2$$

3.1.3 Розрахунок необхідного перепаду температури між баком та повітрям:

$$\theta_{\text{мпср}} = \theta_{(\text{o-m})\text{ср}} = 32.5^\circ\text{C}$$

Перепад температури на поверхнях «масло-бак» $\theta_{\text{мп}} = 5$

Максимально допустимий температурний перепад між обмотками та навколишнім середовищем., $\theta_{\text{опдоп}} = 65^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned}\theta_{\text{бпн}} &= \theta_{\text{опдоп}} - \theta_{\text{мпср}} - \theta_{\text{мп}} \\ \theta_{\text{бпн}} &= 65 - 32,5 - 5 = 27,5\end{aligned}$$

Знайдене значення $\theta_{\text{бпн}}$ має задовольняти умові:

$$\begin{aligned}1,2 * \theta_{\text{бпн}} + \theta_{\text{мп}} &\leq 60^\circ\text{C} \\ 1,2 * 27.5 + 5 &= 38 \leq 60^\circ\text{C}\end{aligned}$$

Отже знайдене значення задовольняє умову і не перевищує максимально допустиме значення.

3.1.4 Розрахунок необхідної площі поверхні конвекції :

$$\begin{aligned}\Pi_{\text{кн}} &:= \frac{1.05 \cdot (P_0 + P_k)}{2.5 \cdot \theta_{\text{бпн}}^{1.25}} - 1.12 \cdot \Pi_{\text{вип}} \\ \Pi_{\text{кн}} &= \frac{1,05 * (5700 + 33500)}{2,5 * 27,5^{1,25}} - 1,12 * 12,8 = 247.1 \text{ м}^2\end{aligned}$$

де:

P_0 – втрати холостого ходу = 5700 Вт ;

$P_{кз}$ – втрати короткого замикання = 33500 Вт;

3.1.5 Розрахунок поверхні охолодження

Проца поверхні конвекції труб $P_{ктр} = 22.9$

Проца поверхні конвекції колекторів радіаторів $P_{кк} = 0.66$

Маса масла в одному радіаторі $G_m = 276$

Площа конвекції стінок гладкого баку визначається за формулою

$$P_{кгл} := [2 \cdot (L_6 - B_6) + \pi \cdot B_6] \cdot H_6 \cdot 10^{-4}$$

$$P_{кгл} = (2 \cdot (183 - 72,35) + 3,14 \cdot 72,35) \cdot 168 \cdot 10^{-4} = 7,53 \text{ м}^2$$

Площа конвекції кришки гладкого баку :

$$P_{кр} := [(L_6 - B_6) \cdot B_6 + 0.25 \cdot \pi \cdot B_6^2] \cdot 10^{-4}$$

$$P_{кр} = ((183 - 72,35) \cdot 72,35 + 0,25 \cdot 3,14 \cdot 72,35^2) \cdot 10^{-4} = 1,21 \text{ м}^2$$

Визначення кількості радіаторів:

$$n_{рад_} := \frac{P_{кн} - P_{кгл} \cdot k_{фгл} - P_{кр} \cdot k_{фкр}}{P_{ктр} \cdot k_{фтр} + P_{кк} \cdot k_{фк}}$$

де $k_{ф}$ – коефіцієнти, що враховують збільшення тепловіддачі відповідними елементами охолодження трансформатора в сукупності:

$k_{фгл} = k_{фкр} = k_{фк} = 1,0$; $k_{фтр} = 1,26$ – для одинарних радіаторів ;

$k_{фгл} = k_{фкр} = k_{фк} = 1,0$; $k_{фтр} = 1,4$ – для подвійних радіаторів за відсутності обдуву;

$k_{фгл} = k_{фкр} = k_{фк} = 1,6$; $k_{фтр} = 2,24$ – для подвійних радіаторів за наявності обдуву.

$$n_{рад} = \frac{247,1 - 7,53 * 1,6 - 1,21 * 1,6}{22,9 * 2,24 + 0,66 * 1,6} = 4,45$$

$$n_{рад} = 5$$

Повна площа поверхні конвекції баку з радіаторами :

$$\Pi_{кд} := \Pi_{кгл} \cdot k_{фгл} + \Pi_{кр} \cdot k_{фкр} + n_{рад} \cdot (\Pi_{ктр} \cdot k_{фтр} + \Pi_{кк} \cdot k_{фк})$$

$$\Pi_{кд} = 7,53 * 1,6 + 1,21 * 1,6 + 5 * (22,9 * 2,24 + 0,66 * 1,6) = 275,74 \text{ м}^2$$

Визначення фактичних перегрівів

Середній перегрів стінки баку над повітрям визначається за формулою :

$$\theta_{бп} := \left[\frac{1,05 \cdot (P_0 + P_k)}{2,8 \cdot \Pi_{вип} + 2,5 \cdot \Pi_{кд}} \right]^{0,8}$$

$$\theta_{бп} = \left(\frac{1,05 * (5700 + 33500)}{2,8 * 12,8 + 2,5 * 275,74} \right)^{0,8} = 22,71 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Розрахунок середнього перегріву масла над стінкою баку з радіаторами :

$$\theta_{мб_} := 0,165 \cdot k_1 \cdot \left[\frac{1,05 \cdot (P_0 + P_k)}{\Pi_{кгл} + \Pi_{кр} + (\Pi_{ктр} + \Pi_{кк}) \cdot n_{рад}} \right]^{0,6}$$

$$\theta_{мб} = 0,165 * 1 * \left(\frac{1,05 * (5700 + 33500)}{7,53 + 1,21 + (22,9 + 0,66) * 5} \right)^{0,6} = 5,69$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує зміну перепаду температури за наявності/відсутності обдуву; $k_1 = 1,0$ у разі природного охолодження, $k_1 = 0,9$ – за наявності примусового обдуву.

Перегрів верхніх шарів масла над повітрям :

$$1,2 * \theta_{\text{бп}} + \theta_{\text{мб}} \leq 60^{\circ}\text{C}$$

$$1,2 * 22,71 + 5,69 = 33 \leq 60^{\circ}\text{C}$$

Перегрів обмоток над повітрям :

$$\theta_{\text{оп1}} = \theta_{\text{омср1}} + \theta_{\text{бп}} + \theta_{\text{мб}}$$

$$\theta_{\text{оп2}} = \theta_{\text{омср2}} + \theta_{\text{бп}} + \theta_{\text{мб}}$$

$$\theta_{\text{оп1}} = 28,49 + 22,71 + 5,69 = 56,9^{\circ}\text{C}$$

$$\theta_{\text{оп2}} = 32,5 + 22,71 + 5,69 = 61^{\circ}\text{C}$$

3.2 Розрахунок та вибір насоса для системи охолодження

Розрахунок необхідного потоку масла [18]:

$$Q = \frac{P}{c * \rho * \theta_{\text{мп}}} = \frac{39200}{1800 * 890 * 5} = 4,89 \text{ м}^3/\text{год}$$

Де P – теплові втрати трансформатора

c - питома теплоємність масла

ρ – густина масла

Напір в даній системі охолодження трансформатора становить 5м

$$H = 5\text{м}$$

Обираємо насос МТТ 16/10 який задовольняє ці параметри[19].

Технічні характеристики :

Продуктивність (Q): до 16 м³/год

Напір (Н): 10 м

Матеріали: Спеціально розроблені для роботи з трансформаторними маслами, що забезпечує довговічність.

Температурний діапазон: Від -20°C до $+85^{\circ}\text{C}$

Потужність: 1.1 кВт.

Клас захисту: IP54.

Насос МТТ 16/10 іде в зборі з електродвигуном потужністю 1.1 кВт та частотой обертання 2900 об/хв.

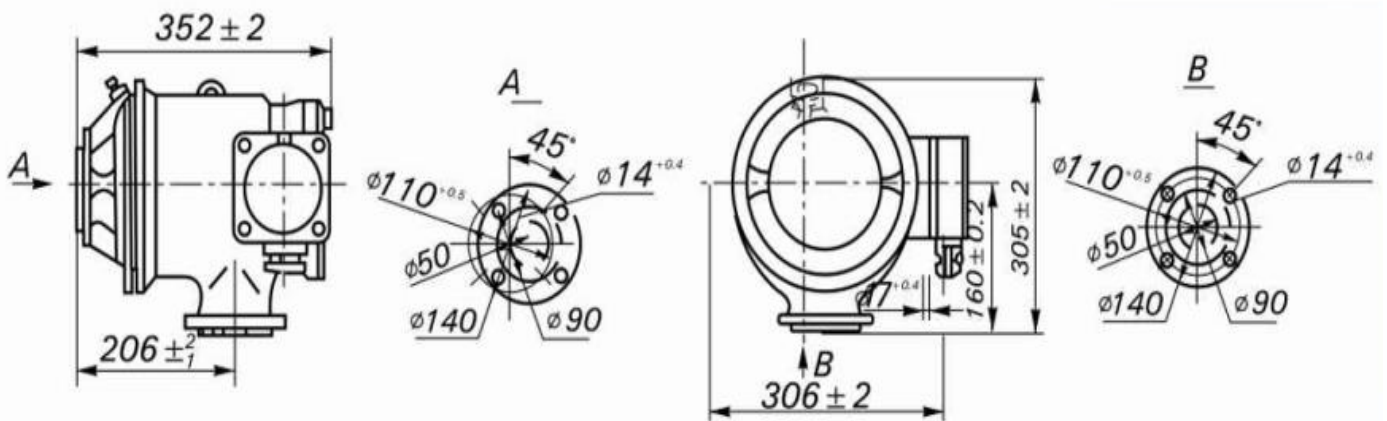


Рис 3.1 - Насос МТТ 16/10

3.3 Розробка системи керування охолодженням трансформатора

Система керування складається із електронасоса, датчиків температури, аналогово-цифрових перетворювачів, електромагнітного реле та ПЛК контроллера [20] (Рис 3.2).

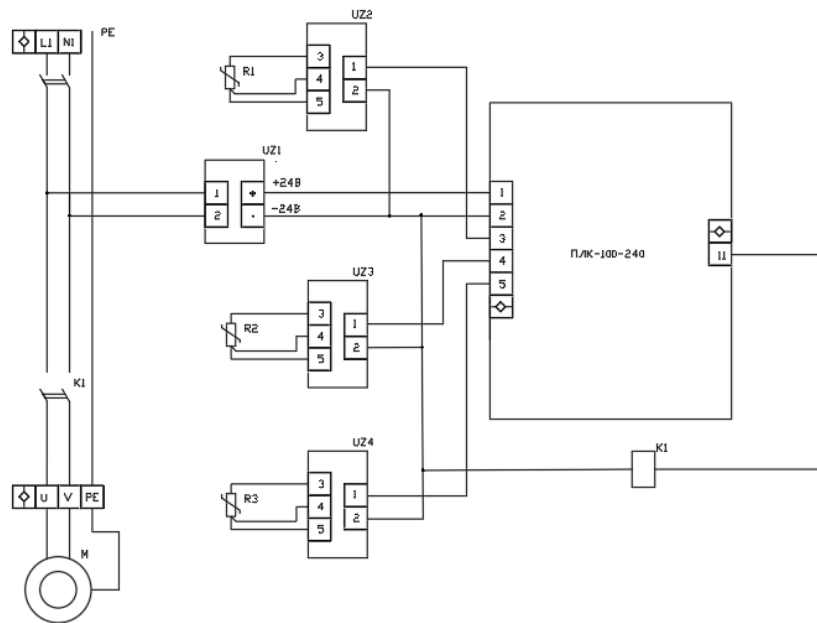


Рис 3.2 – Схема автоматизації насоса системи охолодження

Для моніторингу температурного режиму використовуються датчики температури РТ100 (Рис.3.5), встановлені у обмотці трансформатора, розширювальному бачку та у масляній системі біля обмоток трафнорматора. Ці датчики мають високу точність вимірювання і широкий діапазон роботи. Отримані від них аналогові сигнали характеризуються стабільністю та низьким рівнем шуму, що є критично важливим для роботи таких систем.

Сигнал з датчиків є аналоговим, тому його потрібно перетворить на цифровий для передачі даних до контролера. Для цього використовуються аналогово цифрові перетворювачі компанії Siemens SITRANS TH100(Рис. 3.6). Ці перетворювачі мають високу роздільну здатність (16 біт), що забезпечує точну передачу даних для обробки.

Для керування системою використовується контролер ПЛК 100-240 (Рис 3.7) [21]. Даний контролер є високопродуктивним програмованим логічним пристроєм призначеним для автоматизації технологічних процесів. Він працює від напруги 100–240 В і забезпечує точний контроль завдяки швидкому процесору, який може обробляти дані за мікросекунди. Контролер

підтримує як цифрові сигнали, що дозволяє підключати датчики температури, виконавчі механізми й інші пристрої.

Його головна перевага над звичайними температурними регуляторами — це можливість працювати зі складними алгоритмами, забезпечувати дистанційне управління через Ethernet і легко інтегруватися в великі системи, такі як SCADA. Крім того, ПЛК 100-240 забезпечує вищу точність і надійність, має захист від перевантажень і може автоматично адаптувати роботу насоса до реальних умов, що економить енергію.

Для керування насосом використовується електромагнітне реле Schneider Electric RXM2AB2BD (Рис 3.8)[22]. Даний пристрій використовується для комутації електричних ланцюгів у системах автоматизації. Воно оснащено двома перемикальними контактами (2CO), що дозволяють комутувати струми до 12 А при напрузі до 250 В змінного струму. Реле працює від котушки з напругою 24 В постійного струму і має високу надійність завдяки тривалому терміну служби: до 30 мільйонів механічних і 100 тисяч електричних циклів при номінальному навантаженні.

Компактний дизайн і модульна конструкція дозволяють легко інтегрувати реле в панель керування, а також швидко замінювати його без демонтажу всієї системи. Світлодіодний індикатор забезпечує зручну діагностику стану. Завдяки універсальності, довговічності й стабільній роботі навіть за високих струмів.

3.4 Алгоритм роботи системи

Дана алгоритм розроблений для контролера ПЛК100-240 та працює за наступним алгоритмом:

1. Контролер отримує сигнал від трьох датчиків температури, що визначають температуру в критичних точках системи.
2. Якщо температура на будь-якому з датчиків перевищує заданий верхній поріг (Threshold), контролер посилає сигнал на електромагнітне реле.

3. Електромагнітне реле включає насос, який починає циркуляцію охолоджувального масла через систему. Це забезпечує зниження температури трансформатора.

4. Коли температура знижується нижче нижнього порогу на всіх датчиках (OffThreshold), контролер посилає сигнал на реле для вимкнення насоса.

5. Насос вимикається, забезпечуючи економію енергії та зменшуючи знос обладнання, доки температура знову не перевищить встановлений верхній поріг.

Блок схема показана на Рис 3.3 :

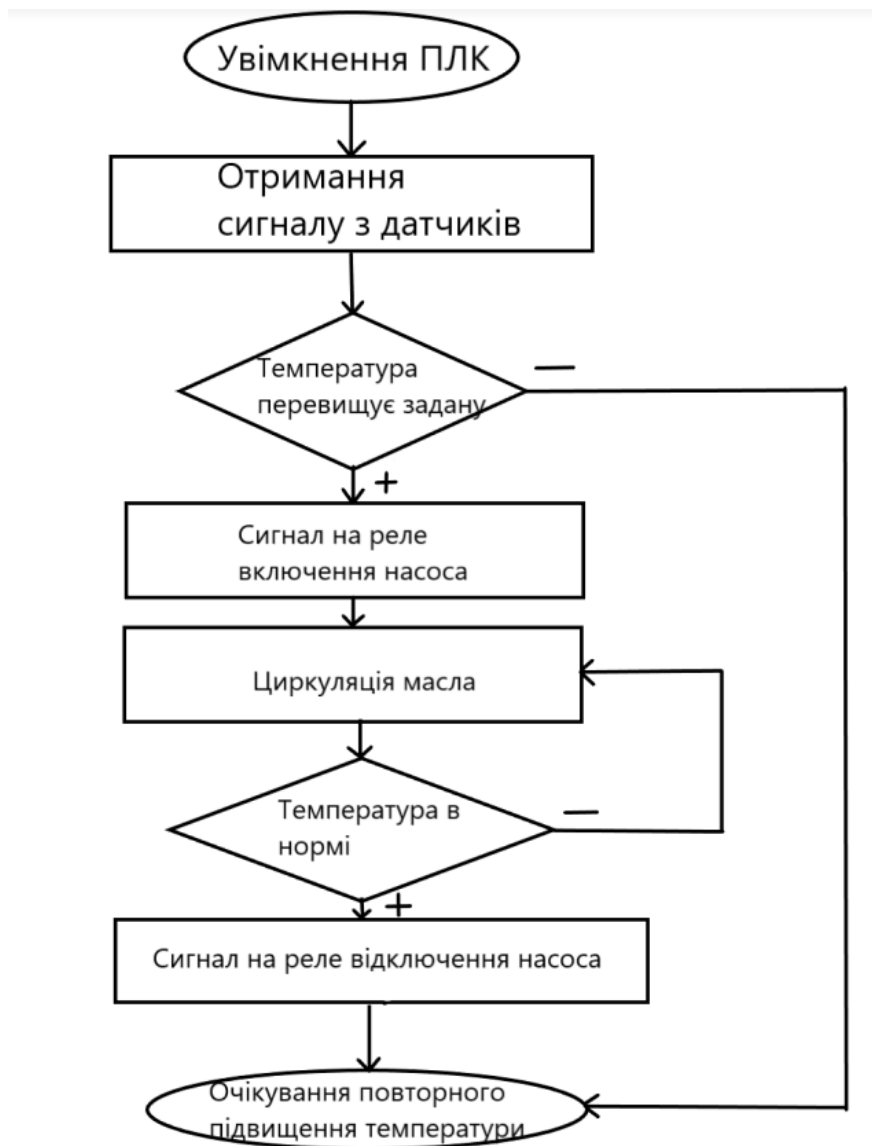


Рис 3.3 – Блок схема роботи системи

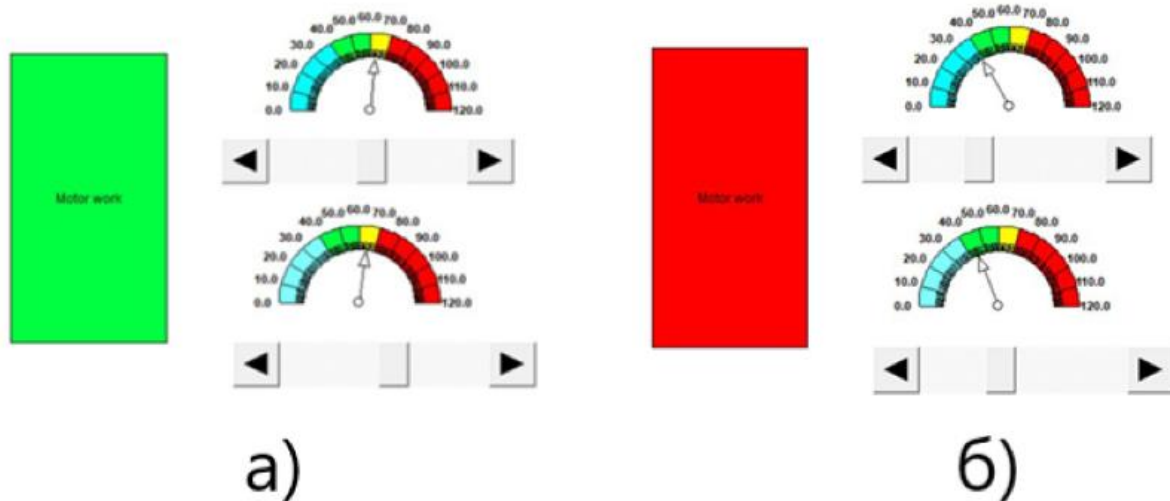


Рис 3.4 Візуалізація роботи системи. а) - система увімкнена, б) - система в режимі очікування



Рис 3.5 – температурний датчик PT-100



Рис 3.6 – аналогово-цифровий перетворювач компанії Siemens SITRANS TH100



Рис 3.7 – Контроллер ПЛК 100-240



Рис 3.8 - Электромагнитное реле Schneider Electric RXM2AB2BD

3.5 Розробка математичної моделі системи в середовищі MatLab.

У даному розділі було проведено математичне моделювання теплового процесу з використанням вибраного насосу.

$Q_{loss} = 39200$; Теплові втрати трансформатора (Вт)

$V_{flow} = 5$; Продуктивність насоса

$T_{initial} = 40$; Початкова температура ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{threshold} = 60$; Температура увімкнення насоса ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{env} = 33$; Температура навколишнього середовища ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{off} = 50$; Температура вимкнення насоса ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{critical} = 100$; Аварійна температура відключення ($^{\circ}\text{C}$)

```

c = 2100; Питома теплоємність (Дж/(кг·°C))
rho = 890; Густина (кг/м)

% Моделювання процесу
for i = 2:steps
    if temps(i-1) >= T_critical
        fprintf('Аварійне відключення при температурі %.2f°C на кроці %d\n',
            temps(i-1), i);
        break;    end
    if temps(i-1) >= T_threshold
        pump_on = true; % Вмикаємо насос
    elseif temps(i-1) <= T_off
        pump_on = false; % Вимикаємо насос
    end
    if pump_on
        % Охолодження при включеному насосі
        dT = (Q_loss - m_flow * c * (temps(i-1) - T_env)) / (c * rho) * dt;
    else
        % Нагрівання без насоса
        dT = (Q_loss / (c * rho)) * dt;
    end
    % Оновлення температури
    temps(i) = temps(i-1) + dT;
end
% Побудова графіку
figure;
time_vector = 0:dt:((i-2) * dt);
plot(time_vector, temps(1:i-1), 'LineWidth', 2);
xlabel('Час (с)');
ylabel('Температура (°C)');
title('Зміна температури трансформатора з урахуванням впливу
    навколишнього середовища');
grid on;

```

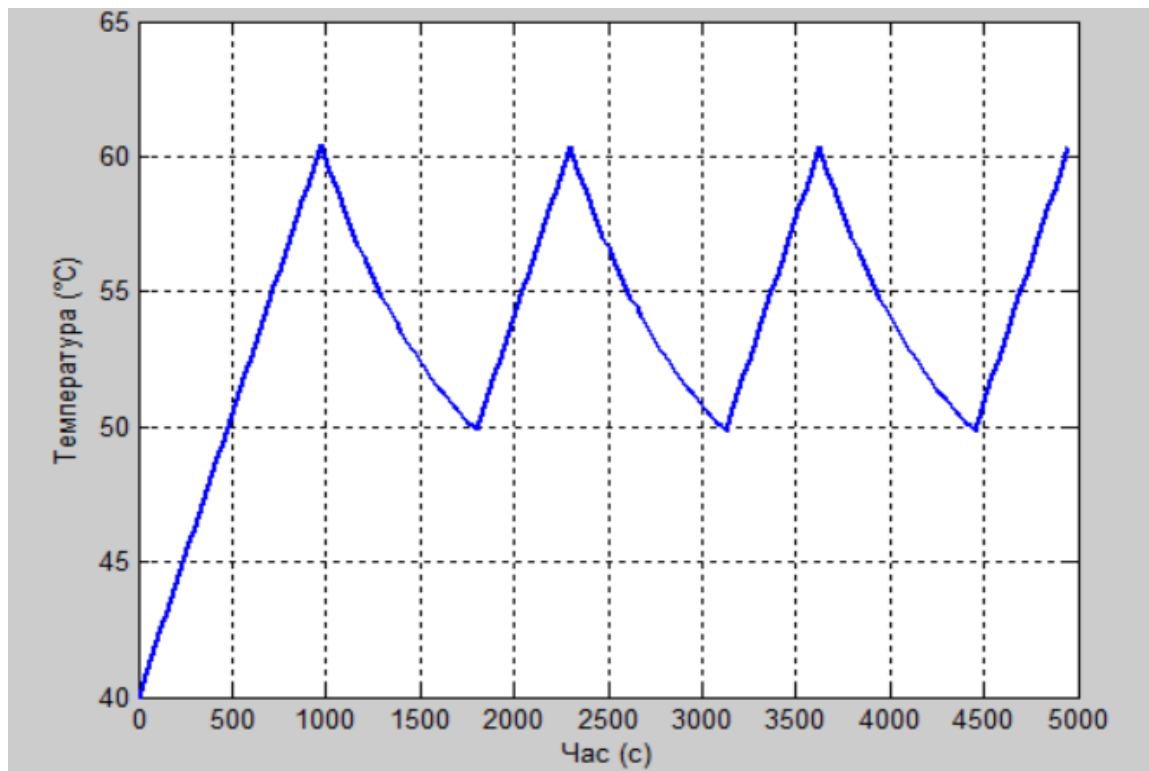


Рис 3.9 – Графік температури при максимальному навантаженні на систему

На рис 3. показано графік який описує роботу системи з використанням насоса при максимальному навантаженні. Розглядається система охолодження трансформатора в яку було додано насос для підтримки температури в допустимих межах. Під час моделювання було враховано теплові втрати трансформатора, навколишню температуру середовища, яка була задана в районі 30-35 градусів, продуктивність обраного насоса та густину і теплоємність трансформаторної оливи. Даний графік показує, що дана модернізація є ефективною, коли температура підвищується вище заданої, насос працює і йде падіння температури, завдяки циркуляції оливи. Використання насоса дозволяє знизити ризик перегріву обладнання, а також зменшити витрати енергії завдяки його вимиканню в періоди, коли це можливо.

Висновки до третього розділу

Проведено тепловий розрахунок трансформатора, за результатами якого встановлено параметри системи тепловідведення. Середній температурний перепад між обмотками й маслом становить $32,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а повна площа поверхні тепловідводу трансформатора з радіаторами склала $275,74\text{ м}^2$. Забезпечено дотримання максимально допустимого температурного перепаду між обмотками й навколишнім середовищем, що становить $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для забезпечення ефективного охолодження було обрано насос МТТ 16/10 з характеристиками: продуктивність – $16\text{ м}^3/\text{год}$, напір – 10 м , потужність – $1,1\text{ кВт}$. Цей насос забезпечує циркуляцію трансформаторного масла в системі охолодження, підтримуючи необхідний потік $4,89\text{ м}^3/\text{год}$.

Розроблено систему автоматичного регулювання охолодженням, яка базується на контролері ПЛК 100-240 і датчиках температури РТ100. Система забезпечує регулювання температури трансформатора залежно від змін умов навколишнього середовища й навантаження. Система автоматизації дозволяє знизити енергоспоживання за рахунок автоматичного вимикання насосу при зниженні температури до встановленого порогу.

Проведено математичне моделювання теплового процесу в середовищі MATLAB. Результати моделювання показали ефективність системи охолодження та підтвердили, що вона забезпечує належне відведення тепла, підтримуючи температуру обмоток, масла і бака в межах допустимих значень. Автоматизація процесу дозволяє економити енергію та забезпечує стабільну роботу трансформатора навіть у змінних умовах експлуатації. Це сприяє запобіганню перегріву та підвищенню надійності обладнання.

Автоматизована система управління системою охолодження підвищила надійність трансформатора за рахунок контролю температури обмоток та оливи і дозволила створити запасу потужності для роботи в умовах підвищених температур.

Розділ 4. СТАРТАП ПРОЄКТ

4.1 Опис ідеї проєкту.

Трансформаторна підстанція є одним із найважливіших елементів електроенергетичних систем, а трансформатор є її ключовим компонентом. Він забезпечує перетворення електричної енергії з однієї напруги в іншу, що робить його критично важливим для стабільності та ефективності системи[23]. Однак під час роботи трансформатор виділяє значну кількість тепла, що потребує ефективного відведення для забезпечення його надійної роботи.

У межах даної роботи було запропоновано модернізацію трансформаторної підстанції ТМН 4000/35 шляхом впровадження автоматизованої системи охолодження з використанням насоса та температурних датчиків. Це рішення спрямоване на зменшення втрат у трансформаторі та підвищення його енергоефективності. Теплові дослідження виявили, що перегрів обмоток трансформатора призводить до деградації ізоляції, зниження експлуатаційного ресурсу та підвищення ризику аварій.

Запропонована система охолодження дозволяє автоматично регулювати продуктивність насоса залежно від температури оливи, обмоток і зовнішнього середовища, забезпечуючи необхідний температурний баланс. Це досягається через встановлення датчиків, які моніторять стан трансформатора в реальному часі. Зокрема, система дозволяє підтримувати температурну різницю між обмотками трансформатора та навколишнім середовищем на рівні, що забезпечує довговічність ізоляційних матеріалів.

Таблиця 4.1 Основні аспекти ідеї проєкту

Зміст	Результат	Вигоди
Впровадження автоматизованої системи охолодження	Зменшення втрат у трансформаторі	1. Тривала та безперебійна робота трансформатора
	Забезпечення ефективного тепловідведення	2. Запобігання перегріву та передчасному старінню ізоляційного матеріалу

	Підвищення енергоефективності підстанції	3. Тимчасовий приріст потужності трансформатора за умов підвищеного навантаження
--	--	--

З урахуванням переорієнтації енергетичної системи України на європейські стандарти, попит на сучасні рішення для забезпечення ефективного охолодження трансформаторів стрімко зростає. Запропонована модернізація відповідає сучасним запитам і сприяє підвищенню надійності енергосистеми.

4.2 Аналіз конкурентного середовища

На ринку систем охолодження для трансформаторів існує низка готових рішень, які використовуються для забезпечення нормального температурного режиму під час експлуатації. Однак більшість з них має певні обмеження, які не повністю відповідають сучасним вимогам енергоефективності та надійності. Основними недоліками є низька адаптивність до змінних умов роботи трансформаторів, відсутність інтегрованих систем автоматичного моніторингу температури та обмежені можливості регулювання потоку охолоджуючої оливи.

Серед поширених рішень можна виділити класичні системи повітряного або масляного охолодження, які працюють за принципом постійної циркуляції середовища. Хоча вони забезпечують базовий рівень охолодження, їхня ефективність може бути недостатньою в умовах підвищених теплових навантажень або змін температури навколишнього середовища. Це призводить до нерівномірного розподілу температури в обмотках трансформатора, що скорочує його ресурс.

Таблиця 4.2 Порівняльний аналіз існуючих рішень

Тип системи охолодження	Переваги	Недоліки
Природне охолодження	Простота конструкції, низька вартість	Обмежена ефективність при високих навантаженнях
Примусове повітряне охолодження	Вища ефективність, проста експлуатація	Низька адаптація до змінних умов роботи
Масляне охолодження	Висока тепловіддача, довговічність	Складність конструкції, висока вартість

На ринку також існують окремі системи автоматичного керування охолодженням, які базуються на використанні датчиків температури та регуляторів потоку. Проте такі рішення рідко інтегруються в стандартні трансформаторні підстанції і потребують суттєвих змін конструкції для їх впровадження.

В Україні на сьогодні відсутні серійні виробники сучасних автоматизованих систем охолодження трансформаторів. Окремі компанії займаються виготовленням таких систем на замовлення, однак їх пропозиції не завжди відповідають вимогам ефективності та енергоощадності. Це створює сприятливі умови для розробки локальних рішень, адаптованих до особливостей експлуатації українських енергетичних мереж.

Переваги запропонованої системи

Модернізована система охолодження трансформатора ТМН 4000/35, що включає автоматичне керування насосами та датчиками температури, має кілька ключових переваг у порівнянні з існуючими рішеннями:

* Ефективність – забезпечення рівномірного температурного режиму завдяки регульованому потоку охолоджуючої оливи.

* Автоматизація – адаптація системи до змін температури навколишнього середовища та теплового навантаження трансформатора.

* Енергоощадність – зниження споживання енергії за рахунок оптимізації роботи насоса.

Таким чином, запропонована система має значний ринковий потенціал, особливо з огляду на дефіцит ефективних і автоматизованих рішень в Україні.

4.3 Аналіз цільової аудиторії

Трансформаторні підстанції та їх охолоджувальні системи є затребуваними серед широкого кола користувачів. Основними цільовими групами для впровадження модернізованої системи охолодження трансформаторів є:

Енергетичні компанії – зацікавлені у зниженні втрат електроенергії та підвищенні надійності обладнання.

Промислові підприємства – потребують стабільного електропостачання та мінімізації ризиків простоїв через аварії.

Інфраструктурні об'єкти – вимагають безперебійної роботи електромереж у пікові періоди.

Державні організації – прагнуть реалізувати програми енергоефективності та підтримувати критичну інфраструктуру.

Таблиця 4.3 Географічний розподіл

Географічний розподіл	Характеристика
Україна	Інтеграція в європейську енергосистему потребує модернізації обладнання, зокрема трансформаторних підстанцій.
Країни, що розвиваються	Підвищений попит на сучасні рішення через збільшення енергоспоживання.

Одним із ключових мотивів для впровадження сучасної системи охолодження є підвищення енергоефективності, довговічності трансформаторів і зниження витрат на ремонт. Однак існують певні бар'єри:

Таблиця 4.4 Мотиви та бар'єри впровадження

Мотиви впровадження	Бар'єри впровадження
Підвищення ефективності роботи	Висока початкова вартість системи.
Зниження витрат на обслуговування	Нестача кваліфікованих спеціалістів для налаштування та обслуговування нових технологій.
Підвищення надійності електропостачання	Консервативність користувачів щодо оновлення старих трансформаторних підстанцій.

Таким чином, модернізована система охолодження орієнтована на аудиторію, яка прагне зменшення експлуатаційних витрат, підвищення надійності та довговічності трансформаторів.

4.4 Аналіз ринкових можливостей

Модернізація трансформаторних підстанцій, зокрема впровадження керованої системи охолодження, відкриває значні ринкові можливості. Попит на такі рішення обумовлений зростаючими вимогами до енергоефективності та надійності електроенергетичної інфраструктури.

Основні ринкові можливості

Енергетична реформа в Україні
Інтеграція енергосистеми України з європейською ENTSO-E стимулює модернізацію електромереж. Встановлення сучасних систем охолодження трансформаторів є частиною цього процесу.

Зростання інвестицій у "зелену" енергетику
У багатьох країнах збільшується кількість відновлювальних джерел енергії, що потребують стабільної передачі електроенергії. Це створює попит на надійні трансформаторні підстанції.

Сучасні рішення повинні відповідати високим екологічним вимогам, включаючи ефективність систем охолодження, щоб зменшувати енергетичні втрати.

Індустріалізація в країнах, що розвиваються, підвищує потребу в стабільному енергопостачанні, яке залежить від ефективності трансформаторних підстанцій.

Таблиця 4.5 Вплив ринкових трендів

Ринкові тренди	Вплив на можливості
Потреба у підвищенні енергоефективності	Стимулює впровадження сучасних охолоджувальних систем, які знижують втрати енергії.
Зростання вартості енергоносіїв	Прискорює перехід на технології, що забезпечують зменшення експлуатаційних витрат.
Розвиток цифровізації	Дає змогу інтегрувати автоматизовані системи моніторингу й управління у трансформаторні підстанції.

Таблиця 4.6 Сегменти ринку, потреби та можливості

Сегмент ринку	Потреби	Можливості
Енергетичні компанії	Підвищення надійності електропостачання, зниження втрат енергії.	Впровадження сучасних систем охолодження для критичної інфраструктури.
Промислові підприємства	Зниження витрат на обслуговування та ремонт обладнання.	Використання автоматизованих систем для забезпечення стабільної роботи трансформаторів.
Інфраструктурні об'єкти	Забезпечення безперебійної роботи в пікові навантаження.	Пропозиція ефективних рішень, що адаптуються до умов високого навантаження.

4.5 Фінансове обґрунтування проєкту

Модернізація трансформаторної підстанції, що включає впровадження керованої системи охолодження, забезпечує значну економію енергії та швидко окупність інвестицій. Нижче наведено детальні розрахунки та аналіз.

Вартість модернізації (С.загальні) складається з наступних компонентів(Таблиця 4.7):

Таблиця 4.7 Ціна витрат на модернізацію

Компонент	Кількість	Ціна за одиницю, грн	Загальна вартість, грн
Насос МТТ 16/10	1	32,000	32,000
Датчики температури	3	2,500	10,000
Система автоматичного керування	1	30,000	30,000
Монтажні роботи	1	15,000	15,000
Загальні витрати			90,200

Річні втрати енергії до модернізації [24] :

$$W_{\text{втрат}} = P_{\text{втрат}} \cdot T_{\text{роботи}} = 200 \cdot 8760 = 1,752,000 \text{ кВт*год}$$

Річна вартість втрат:

$$C_{\text{втрат}} = W_{\text{втрат}} \cdot t = 1752000 \cdot 5.6 = 9811200 \text{ грн/рік}$$

Річна економія після модернізації :

$$\Delta W = W_{\text{втрат}} \cdot 0.03 = 1752000 \cdot 0.03 = 53,760 \text{ кВт*год}$$

$$C = \Delta W \cdot t = 53760 \cdot 5.6 = 300096 \text{ грн/рік}$$

$$T_{\text{окуп}} = C_{\text{загальні витрати}} / \Delta C = 90200 / 300096 \approx 0.3 \text{ року (4 місяці)}$$

$$\begin{aligned} \text{Прибуток} &= \text{Річний випуск} \cdot (\text{Ціна одиниці} - \text{Собівартість одиниці}) \\ &= 100 \cdot (131331 - 93808) = 3\,752\,000 \text{ грн} \end{aligned}$$

$$\text{Рентабельність \%} = \frac{\text{Прибуток}}{\text{Собівартість}} = \frac{3\,752\,000}{9020} = 41\%$$

Висновок фінансової ефективності.

Модернізація трансформаторної підстанції забезпечує:

Річну економію енергії в обсязі 53,760 кВт·год, що становить 300,096 грн/рік.

Термін окупності – лише 4 місяці, після чого інвестиція почне приносити прибуток.

Проект є економічно доцільним і має високий потенціал для впровадження, особливо в умовах зростаючих енергетичних витрат та вимог до надійності обладнання.

4.6 Розроблення бізнес моделі та маркетингового плану стартап проєкту

Розроблення бізнес-моделі та маркетингового плану стартап-проєкту базується на створенні інноваційної системи автоматизованого охолодження трансформаторів. Це рішення спрямоване на підвищення енергоефективності трансформаторних підстанцій, зниження експлуатаційних витрат і продовження терміну служби обладнання. Основою бізнес-моделі є задоволення нагальної потреби ринку в модернізації енергетичної інфраструктури через впровадження ефективних і доступних рішень.

Цільовими клієнтами проєкту є державні та приватні енергетичні компанії, промислові підприємства та виробники трансформаторного обладнання, які прагнуть знизити втрати енергії та забезпечити безперебійну роботу своїх систем. Продукт стартапу забезпечує автоматичний контроль температурного режиму трансформаторів, що дозволяє уникати перегріву, мінімізувати ризики аварій і значно скоротити витрати на обслуговування обладнання.

Основними каналами збуту є прямі продажі великим клієнтам, участь у тендерах, а також співпраця з виробниками трансформаторів для інтеграції системи охолодження у нові моделі. Крім того, передбачається організація сервісного обслуговування для забезпечення довгострокового партнерства з

клієнтами. Додатковим джерелом доходу може стати ліцензування технології для використання сторонніми компаніями.

Для виходу на ринок планується реалізувати низку маркетингових заходів. Основний акцент робиться на участі у виставках і конференціях енергетичної галузі, що дозволить налагодити контакти з потенційними клієнтами. Також будуть використані цифрові маркетингові інструменти, включаючи рекламу на спеціалізованих платформах і таргетовану email-розсилку для зацікавлених компаній.

Стартап має конкурентну перевагу завдяки унікальності технології, її ефективності та простоті впровадження. Потенціал ринку високий, оскільки зростає запит на модернізацію трансформаторних підстанцій в Україні та світі.

4.7 Бізнес-модель проекту

Таблиця 4.8 Структура бізнес-моделі обладнання

Ключові партнери:	Ключові види діяльності:	Цінність пропозиції:	Взаємовідносини з клієнтами:	Споживчі сегменти:
-Постачальники компонентів (датчики, приводи) -Інженерні компанії -Логістичні партнери	-Розробка системи охолодження -Технічна підтримка - Встановлення та інтеграція	-Економія енергоспоживання - Підвищення ефективності - Скорочення витрат	-Персональні консультації -Гарантійне обслуговування -Сервісна підтримка	-Промислові підприємства -Енергокомпанії -Державні установи

Продовження таблиці 4.8

	Ключові ресурси: -Технологія керованого охолодження -Матеріально-технічна база -Програмне забезпечення для моніторингу		Канали збуту: -Прямі продажі (договір з підприємствами) -Інтернет-канали (рекламні кампанії, сайт) -Участь у тендерах	
Структура собівартості 1.Витрати разові (капітальні): - Розробка технології - Закупівля обладнання 2.Витрати постійні - Зарплата персоналу - Логістика та обслуговування 3.Витрати змінні: - Витрати на матеріали - Витрати на енергоспоживання		Потоки надходження доходу - Продаж обладнання - Надання послуг технічної підтримки - Ліцензування технології		

Висновки до четвертого розділу

Проект модернізації трансформаторної підстанції ТМН 4000/35 із впровадженням автоматизованої системи охолодження є перспективним стартап-рішенням, спрямованим на підвищення енергоефективності та надійності енергетичної інфраструктури. Запропонована система зменшує втрати енергії, забезпечує оптимальний температурний режим і автоматично адаптується до змінних умов роботи трансформатора, що відповідає сучасним вимогам енергетичного сектору.

Фінансовий аналіз демонструє швидку окупність інвестицій (4 місяці) та економію енергії в розмірі 300,096 грн/рік, що підкреслює доцільність і вигідність впровадження. Попит на сучасні системи охолодження, адаптовані до локальних умов, зростає через активну модернізацію енергомереж та інтеграцію України в європейську енергосистему.

Проект орієнтований на енергетичні компанії, промислові підприємства та інфраструктурні об'єкти, яким потрібні ефективні рішення для зниження витрат і підвищення стабільності електропостачання. Стартап має високий ринковий потенціал завдяки своїй інноваційності, ефективності та швидкому впровадженню, що робить його привабливим для інвесторів та клієнтів.

Таблиця 4.9 Узагальнюючі техніко-економічні показники

Показники	Значення
Річний випуск продукції, од.	100
Капіталовкладення, тис. грн.	9020000
Ціна продукції, тис. грн.	12628000
Прибуток, тис. грн.	3752000
Рентабельність, %	41.0
Період повернення капіталовкладень, років	2.5

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації проведено комплексне дослідження та розроблено вдосконалену систему охолодження трансформаторної підстанції для підвищення її надійності та енергоефективності. В рамках роботи виконано аналіз існуючих конструкцій трансформаторних підстанцій, визначено основні проблеми, такі як перегрів, деградація ізоляційних матеріалів і недостатня ефективність охолоджувальних систем. Обґрунтовано вибір трансформатора ТМН-4000/35 із номінальною потужністю 4000 кВА, що повністю відповідає розрахованому електричному навантаженню Артюхівського нафтогазового родовища (3063 кВА).

У ході роботи виконано тепловий розрахунок трансформатора, який показав відповідність температурних режимів нормативним значенням. Розраховано геометричні параметри бака та охолоджувальної поверхні, визначено необхідний температурний перепад між маслом і навколишнім середовищем. Для забезпечення ефективної циркуляції масла обрано насос МТТ 16/10, який забезпечує продуктивність 4,89 м³/год і напір 5 м.

Розроблена автоматизована система керування охолодженням, що базується на використанні ПЛК-контролера, температурних датчиків PT100, аналогово-цифрових перетворювачів Siemens SITRANS TH100 та електромагнітного реле Schneider Electric. Така система забезпечує адаптивне регулювання температурного режиму трансформатора, знижуючи енергоспоживання і ризик аварійних ситуацій.

Розроблено стартап-проект для впровадження модернізованої системи охолодження на енергетичних об'єктах. Описано фінансову модель, проаналізовано конкурентне середовище та визначено перспективи комерціалізації. Період повернення капітальних вкладень за даним проектом складає 2,5 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Електрична частина станцій та підстанцій: курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/уклад.: О.В. Остапчук, П.Л. Денисюк, Ю.П. Матесенко/КПІ ім. Ігоря Сікорського— Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2022. – 183 с.

2. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни “Електричні машини”. Розділ “Трансформатори” для студентів освітньо-кваліфікаційного рівня “бакалавр” напряму підготовки 6.050702 “Електромеханіка”/ Уклад.: Ю.М. Васьковський, О.А. Гераскін. – К.: НТУУ “КПІ”, 2013. – 37 с.

3 Г.Г. Півняк, В.Т. Заїка, д-ра техн. наук, І.М. Луценко Проблема раціонального використання навантажувальної здатності трансформаторів шахтних вибухозахищених підстанцій. 7 с.

4. ДСТУ EN 60076-1:2016 Трансформатори силові. Частина 1. Загальні відомості

5. ГОСТ 11677-85. Трансформатори силові. Загальні технічні умови.

6. McChlery, C. R. Transformer radiator. *European Patent*, EP 3593076 B1, 28 квітня 2021.

7. European Patent Office. Cooling system for transformer substation. EP 3888105 B1, 20 вересня 2023.

8. Joshi, A., Carter, E. A., & Pal, D. Kühlsystem für einen Transformator und Verfahren zum Kühlen eines Transformators. *European Patent*, EP 4006925 A1, 1 червня 2022.

9. Loren, P., & Heim, L. System zur Sensorverwendung in einem Transformatorkühlkreislauf. *European Patent*, EP 3718385 A1, 7 жовтня 2020.

10. Рябенко, І. С., & Погрібний, В. В. Електрообладнання та електропостачання машин і установок геотехнічних виробництв: навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка». Електронний засіб навчального призначення НМУ No E9/10-378. Київ: НТУУ «КПІ», 2010. 330 с.

11. Козінський, Назарій Олександрович. "Захист електромережі від перевантаження." (2018).

12. Славгоренерго. Роз'єднувачі РДЗ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://slavgorenergo.com.ua/ua/p880898016-razediniteli-rdz.html> – Дата звернення: 03.11.2024.

13. Ананьєва, Ольга Михайлівна, Михайло Михайлович Бабаєв, and Надія Петрівна Карпенко. "Розрахунок силового масляного трансформатора: методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Електричні машини»." (2023). – 39 с.

14. Електричні мережі та системи: Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Інжиніринг інтелектуальних електротехнічних та мехатронних комплексів» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. П. Шевчук, О. В. Мейта. – Електронні текстові дані (1 файл: 4,46 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.– 167 с.

15. Махматкулов А. Розрахунок параметрів та релейного захисту високовольтної підстанції : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / наук. кер. М. В. Петровський. Суми : Сумський державний університет, 2024. 74 с.

16. А.М. Голунов, Н.С. Сещенко, Охолоджуючі пристрої масляних трансформаторів, Видавництва «Енергія», 1976. - 104 с.

17. Основи автоматизованого проектування електричних машин. Частина 1. Практичні заняття [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні машини і апарати» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.В. Чумак, С.С. Цивінський. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,04 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022 - 50 с.

18. Шевчук, Степан Прокопович, Андрій Вікторович Ворфоломеев, and Микола Павлович Осадчук. "Насосні, вентиляторні та пневматичні установки. Лабораторний практикум." (2021).- 130 с.

19. Гідромаш. Трансформаторний насос МТТ 16-10 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: ["Посилання"](#) – Дата звернення: 04.12.2024.

20. Торопов, Антон Валерійович, Алла Василівна Босак, and Лілія Володимирівна Торопова. "Комп'ютерні системи керування термохімічними та електрохімічними процесами видобутку водню. Рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи." (2023). - 22 с.

21. ОВЕН. Програмований логічний контролер ОВЕН ПЛК100 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: ["Посилання"](#). – Дата звернення: 23.11.2024.

22. Schneider Electric. Реле мініатюрне RXM2AB2BD 2CO, світлодіод, 24В [Електронний ресурс]. – Режим доступу: ["Посилання"](#). – Дата звернення: 03.11.2024.

23. П.В Круш, Н.А. Шевчук, О.І. Андрусь / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні тестові дані (1 файл: 127 КБ). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 50 с

24. Шевчук, Н. А. Впровадження та реалізація стартап проекту геомехатронного комплексу / Шевчук Н. А., Зайченко С. В., Кривда О. В. // Сучасні проблеми економіки і підприємництво : збірник наукових праць. – 2018. – Вип. 21. – С. 94–101. – Бібліогр.: 11 назв.

Додаток А

[illegible]