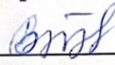


Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій і систем

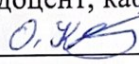
Бакалаврська дипломна робота на тему:

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ В
ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ**

Виконав: студент 4 курсу групи 2Е-206
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електроенергетика та електротехніка»

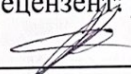
Вихристюк В.В. 

Керівник: К.т.н., доцент, каф. ЕСС

Казьмірук О. І. 

«__» _____ 2024 р.

Рецензент: К.т.н., доцент Киср. ЕССЕМ

 Воїтчук Ю. П.

«__» _____ 2024 р.

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

«__» _____ 2024 р.

Вінниця ВНТУ 2024 рік

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.

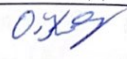
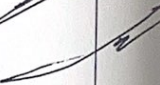
«__» _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Вихристюку Владиславу Вячеславовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Підвищення ефективності використання трансформаторів в електричних системах».
Керівник роботи К.т.н., доцент, каф. ЕСС Казьмірук О. І.
затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024 року № 80
2. Термін подання студентом роботи 06 червня 2024 року
3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи: Лежнюк П. Д., Лагутін В. М., Тептя В. В. Проектування електричної частини електричних станцій: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2009. 194 с. Посилання на періодичні видання. Вихідні дані для проведення обчислювальних експериментів: режими роботи трансформаторів та їх систем охолодження.
4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Втрати в трансформаторі 2. Навантажувальна здатність 3. Визначення перевантажувальної здатності трансформаторів з врахуванням умов охолодження 4 Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.
5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Втрати в трансформаторі 2. Навантажувальна здатність 3. Визначення перевантажувальної здатності трансформаторів з врахуванням умов охолодження Висновки.

6. Консультанти розділів роботи

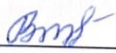
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконав
Спеціальна частина	Керівник роботи Казьмірук О. І. к.т.н., доц., кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.п.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 16 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

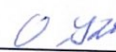
№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи	
		початок	кінець
1	Вступ. Огляд літературних джерел	21.01.24	15.02.24
2	Втрати в трансформаторі.	16.02.24	15.03.24
3	Навантажувальна здатність	16.03.24	10.04.24
4	Визначення перевантажувальної здатності трансформаторів з врахуванням умов охолодження	11.04.24	11.05.24
5	Охорона праці (розділ 5 БДР)	12.04.24	19.05.24
6	Формування висновків по роботі. Оформлення пояснювальної записки	20.05.24	24.05.24
7	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	25.05.24	04.06.24
	Перевірка БДР на плагіат. Попередній захист БДР	05.06.24	07.06.24
	Рецензування БДР	08.06.24	10.06.24
	Захист БДР	За графіком	

Студент


(підпис)

Вихристюк В.В.

Керівник роботи


(підпис)

О. І. Казьмірук

АНОТАЦІЯ

Вихристюк Владислав Вячеславович Бакалаврська дипломна робота на тему: “Підвищення ефективності використання трансформатора в електричних мережах”.

Бакалаврська робота складається з пояснювальної записки, яка виконана на 72 друкованих аркушах та складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел.

В першому розділі описуються втрати в трансформаторі, норми нагрівання, системи охолодження трансформаторів та процеси теплопередачі.

В другому розділі описується навантажувальна здатність та види навантажень, граничні значення струму і напруги, види трансформаторів.

В третьому розділі описується визначення перевантажувальної здатності трансформаторів з врахуванням умов охолодження .

Бакалаврська робота містить 15 рисунків, 18 таблиць, 20 літературних джерел.

ABSTRACT

Vykhristiuk Vladyslav Vyacheslavovich Bachelor's thesis on the topic: "Increasing the efficiency of transformer use in electrical networks".

The bachelor thesis consists of an explanatory note, which is made on 72 printed sheets and consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, a list of used literary sources.

The first chapter describes transformer losses, heating standards, transformer cooling systems, and heat transfer processes.

The second chapter describes the load capacity and types of loads, current and voltage limit values, types of transformers.

The third section describes the determination of the overload capacity of transformers taking into account cooling conditions.

The bachelor thesis contains 15 figures, 18 tables, 20 literary sources.

Зміст

Вступ	5
1 Втрати в трансформаторі	6
1.1 Складові втрат.....	6
1.2 Втрати короткого замикання	6
1.3 Втрати холостого ходу	7
1.4 Норми нагрівання.....	7
1.5 Системи охолодження трансформаторів.....	9
1.6 Процеси теплопередачі й теплові розрахунки.....	16
1.6.1 Загальне поняття про теплообмін, найпростіша модель процесів теплопередачі.....	16
1.6.2 Реальні умови теплопередачі в обмотках і магнітопроводі.....	21
1.6.3 Зовнішнє охолодження і питання вибору систем охолодження.....	24
2 Навантажувальна здатність.....	26
2.1 Загальні положення	26
2.2 Розподільний трансформатор	27
2.3 Силовий трансформатор середньої потужності	27
2.4 Великий силовий трансформатор	28
2.5 Режим циклічних навантажень	28
2.5.1 Нормальне циклічне навантаження	28
2.5.2 Тривале аварійне циклічне навантаження	28
2.6 Короткочасне аварійне навантаження	29
2.7 Основні обмеження й впливи режимів навантажень, що перевищують номінальні значення	29
2.7.1 Наслідки впливу навантаження вище номінального	29
2.7.2 Небезпека при короткочасних аварійних впливах	30
2.7.3 Небезпека тривалого перевантаження	31
2.7.4 Обмеження, викликані розмірами (потужністю) трансформатора	32
2.8 Граничні значення струму й температури	33
2.9 Спеціальні обмеження.....	34

2.9.1 Розподільчі трансформатори (потужність до 2500 кВа)	34
2.9.2 Трансформатори середньої потужності	34
2.9.3 Великі трансформатори	35
3 Визначення перевантажувальної здатності трансформаторів з врахуванням умов охолодження	38
3.1. Технічні характеристики автотрансформаторів.....	38
3.1.1 Перевантажуюча спроможність автотрансформаторів АТ-1, АТ-2 в аварійних режимах. (ПТЕ 5.3.16)	39
3.1.2. Система охолодження автотрансформаторів.....	41
3.2 Розрахунки охолодження трансформатора для сторони масла	42
3.3 Потужність двигунів насоса й вентилятора.....	53
3.4 Опис програмного забезпечення Fluent.....	54
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	59
4.1 Технічні рішення з безпечної організації будівельно-монтажних робіт.....	59
4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць.....	59
4.1.2 Електробезпека	62
4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	63
4.2.1 Мікроклімат	63
4.2.2 Склад повітря робочої зони.....	64
4.2.3 Виробниче освітлення	65
4.2.4 Виробничий шум.....	66
4.3 Пожежна безпека.....	67
Висновки	70
Перелік посилань	71
Додаток А (обов'язковий). Протокол перевірки навчальної (дипломної) роботи	80
Додаток В (обов'язковий). Ілюстративна частина.....	81

ВСТУП

Актуальність теми. В сучасних умовах збільшення споживання електроенергії та зростання вимог до енергоефективності. Зміна кліматичних умов і поглядів на екологічність виробництва стимулюють пошук нових технологій та підходів до оптимізації електропередачі. Оптимізація роботи трансформаторів може значно зменшити енерговтрати та підвищити загальну ефективність електричних мереж. Розвиток смарт-гридів та впровадження відновлюваних джерел енергії потребують адаптації традиційних трансформаторів до нових умов роботи. Впровадження сучасних технологій у виробництво трансформаторів може сприяти зменшенню експлуатаційних витрат і підвищенню довговічності обладнання. Дипломна робота у цьому напрямку має потенціал внести вагомий внесок у вдосконалення енергетичного сектора та забезпечити сталий розвиток електропостачання в майбутньому.

Мета і задачі дослідження. Мета бакалаврської роботи полягає у вивченні режимів роботи та дослідження перевантажувальної здатності трансформаторів.

Відповідно до вказаної мети в даній роботі розв'язуються такі основні завдання:

1. Дослідження втрат в трансформаторі
2. Аналіз навантажувальної здатності трансформаторів
3. Визначення перевантажувальної здатності трансформаторів з врахуванням умов охолодження

Результати проведених розрахунків в порівнянні з їх початковими даними.

Об'єктом дослідження роботи є електричні мережі, а предметом дослідження – трансформатори та їх системи охолодження

1. ВТРАТИ В ТРАНСФОРМАТОРІ

1.1 Складові втрат

Нагрівання частин трансформатора, в остаточному підсумку, визначається тепловиділенням, викликаним втратами електричної потужності в його частинах.

Загальні (сумарні) втрати в трансформаторі при навантаженні практично дорівнюють сумі втрат короткого замикання й втрат холостого ходу.

Втрати короткого замикання вимірюються в досвіді короткого замикання трансформатора при струмах в обмотках, обумовлених заданим навантаженням, наприклад, рівних номінальним струмам. Втрати холостого ходу вимірюються в досвіді холостого ходу при номінальній напрузі.

1.2 Втрати короткого замикання

Втрати короткого замикання пропорційні квадрату струму навантаження й не залежать від напруги.

Вони складаються з наступних складових:

- Основні втрати в обмотках і відводах, викликані робочим струмом у них.
- Додаткові втрати в обмотках і відводах, викликані вихровими струмами від потоків розсіювання, що пронизують обмотки й відводи.
- Втрати в стінках бака та інших конструктивних металевих вузлах трансформатора, обумовлені вихровими струмами в них.

Втрати в обмотках розподіляються усередині обмоток нерівномірно головним чином внаслідок нерівномірності розподілу поля розсіювання.

Для зниження додаткових втрат, особливо в потужних трансформаторах, вживають заходів до поліпшення картини потоків розсіювання з метою розподілу їх по шляхах, де вони викличуть менші втрати. Ця мета досягається, наприклад, шляхом установки екранів з електротехнічної сталі

на верхніх полках нижніх ярмових балок, уздовж стінок бака й екранів з немагнітних матеріалів (мідь, алюміній).

Прибігають також до застосування окремих колій, що пресують, для кожної обмотки, виготовленню їх з електроізоляційних матеріалів або з електротехнічної сталі. Зниженню втрат сприяє зменшення розмірів полиць ярмових балок і осьових розмірів торцевих катушок, підрозділ обмоток на дві частини з вертикальними охолоджуючими каналами, застосування транспонованих і підрозділених проводів.

1.3 Втрати холостого ходу

Втрати холостого ходу пропорційні індукції або напрузі в ступені 1,6-2,0. Зниження втрат холостого ходу досягається застосуванням сталі з меншими питомими втратами, зменшенням товщини аркушів, поліпшенням технологічної обробки. Для відводу тепла в магнітопроводі передбачаються охолоджуючі канали з дистанційними рейками.

1.4 Норми нагрівання

Основні принципи встановлення норм нагрівання трансформаторів

Норми нагрівання частин трансформатора встановлюються виходячи із припустимих температур ізоляційних деталей і середовищ, що стикаються із частинами трансформатора, у яких має місце тепловиділення. При цьому враховується значення так званого старіння ізоляції, що визначає термін служби трансформатора і його навантажувальну здатність.

Нормуються перевищення температури обмоток, магнітопровода й масла над навколишнім (охолоджуючим) середовищем. Припустимі перевищення температури визначаються виходячи з умов номінального навантаження й безперервної роботи в нормованих умовах навколишнього середовища.

Умови навколишнього середовища

Для трансформаторів, що працюють у нормальних умовах, установлюються наступні норми температури навколишнього середовища:

- природно, що змінюється температура, що оточує повітря в межах не більше $+40^{\circ}\text{C}$ и не менш мінус 45°C при масляно-повітряному охолодженні трансформатора,

- середньодобова температура повітря не більше $+20^{\circ}\text{C}$,

- температура охолоджуючої води при вході в охолоджувач при масляно-водяному охолодженні не більше $+20^{\circ}\text{C}$. Зазначені нормальні умови охолоджуючого середовища відносяться до трансформаторів, призначеним для висоти встановлення над рівнем моря не більше 1000 м, при напрузі менш 1150 кВ і не більше 500 м при напрузі 1150 кВ. Кліматичне виконання - для країн з помірним кліматом.

За замовленням споживача можуть виготовлятися трансформатори з умовами навколишнього середовища, що відрізняються від нормальних, наприклад:

- висота установки над рівнем моря до 3500 м;
- виконання для холодного або помірно-холодного клімату.

Температура охолоджуючої води $+25^{\circ}\text{C}$ - $+33^{\circ}\text{C}$.

Ізоляційні матеріали, застосовувані в трансформаторобудуванні і норми нагрівання трансформаторів

Електроізоляційні матеріали діляться по класах їх нагрівостійкості, причому матеріали, що належать до одного класу, володіють і однаковими властивостями відносно старіння. Під нагрівостійкістю розуміється здатність ізоляції довгостроково витримувати вплив температури без ушкодження або без погіршення важливих властивостей.

Найбільш часто застосовуються матеріали наступних класів нагрівостійкості відповідно до ГОСТ-8865.

Клас Y (температура нагрівання 90°).

Волокнисті матеріали із целюлози, бавовни або натуральний, штучний і синтетичний шовки, не просочені й не занурені в рідкий електроізоляційний матеріал.

Клас А (температура нагрівання 105°).

Волокнисті матеріали із целюлози, бавовни або натуральний, штучний і синтетичний шовки, у робочому стані просочені або занурені в рідкий електроізоляційний матеріал.

Клас Е (температура нагрівання 120°).

Синтетичні органічні матеріали (плівки, волокна, смоли, компаунди).

Значно рідше застосовуються матеріали вищих класів нагрівостійкості на основі слюди, азбесту, скловолокна (класи В - 130°C, F - 155 °C, Н - 180°C, G - понад 180°C).

Ізоляція масляних трансформаторів відноситься до класу А.

Найбільші перевищення температури окремих частин трансформатора над температурою охолоджуючого середовища відповідно до ГОСТ 11677-85 не повинні перевищувати:

а). Обмотки (клас нагрівостійкості ізоляції А).

- при природній або примусовій циркуляції з ненаправленим потоком масла через обмотки - 65°C;
- при природній або примусовій циркуляції зі спрямованим потоком масла через обмотки - 70°C;

Перевищення температури обмоток визначають методом виміру їхнього опору постійному струму (середні перевищення температури обмоток).

б). Масла у верхніх шарах.

- виконання герметичне або з розширником - 60 °C;
- виконання негерметичне без розширника - 55 °C;

в). Магнітопровід і конструктивні елементи (на поверхні) - 75 °C.

Зазначені умови встановлені стандартом з таким розрахунком, щоб гранична температура обмотки в найбільш жарку пору року не перевищувала $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ при її середньорічній температурі $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При дотриманні цих умов ізоляція трансформаторів не піддається прискореному старінню й може надійно працювати протягом 25 років.

1.5 Системи охолодження трансформаторів

Природна циркуляція масла й повітря (система М)

Схема цього способу охолодження наведена на рисунку 1.1,а. На рисунку 1.1,б наведені діаграми, що ілюструють теплофізичний процес у трансформаторі в координатах 9-Н (температура-висота). У точці *A* масло надходить в обмотку, його щільність зменшується внаслідок нагрівання, і воно піднімається нагору. У точці *B* масло виходить із обмотки. При русі масла від точки *B* до точки *C*, тобто до входу в радіатор, температура масла залежно від ряду факторів може, як трохи зростати, так і зменшуватися, однак звичайно змінюється мало. Між точками *C* і *D* (у радіаторі) масло проохолоджується й перемішається вниз. Ліва крива (9_д) на рисунку 1.1, б ілюструє хід температури повітря, що проохолоджує радіатор.

Охолоджене масло переміщається із точки *D* у точку *A*, і процес повторюється. Середнє між різницями температур масла й повітря в точці *O* і *C* обчислюється середньологарифмічним двох $\ln(a/b)$.

Таблиця 1.1 – Види систем охолодження

Таблиця 1.1	Позначення системи	
Вид системи охолодження трансформатора	За ГОСТ 11677—85	Охолодження по МЕК
Природна циркуляція повітря й масла	М	ONAN

Продовження таблиці 1.1

Примусова циркуляція повітря й природна циркуляція масла	Д	ONAF
Природна циркуляція повітря й примусова циркуляція масла з ненаправленим потоком масла	МЦ	OFAN
Природна циркуляція повітря й примусова циркуляція масла зі спрямованим потоком масла	НМД	ODAN
Примусова циркуляція повітря й масла з ненаправленим потоком масла	ДЦ	OFAF
Примусова циркуляція повітря й масла зі спрямованим потоком масла	НДЦ	ODAF
Примусова циркуляція води й масла з ненаправленим потоком масла	Ц	OFWF
Примусова циркуляція води й масла зі спрямованим потоком масла	НЦ	ODWF

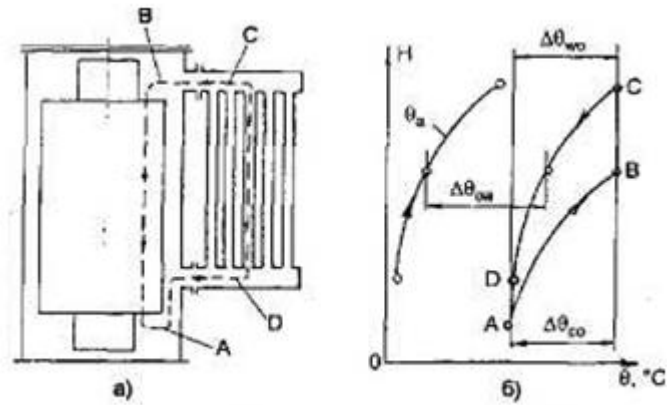


Рисунок 1.1 – Принципова схема природного масляного охолодження трансформатора

Підтримуючу циркуляцію піднімальна сила пропорційна площі, охопленої контуром ABCDA.

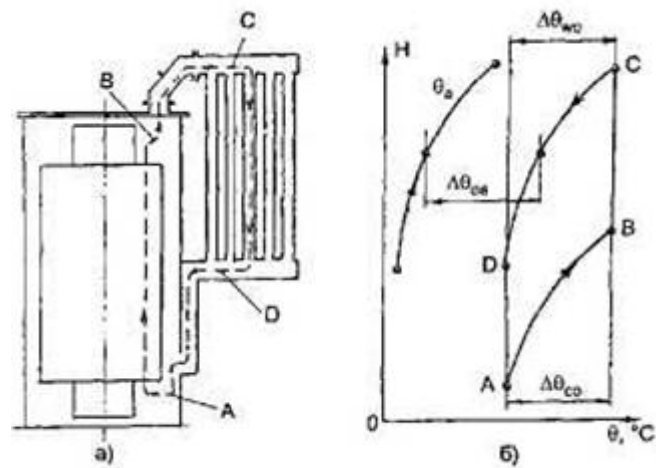


Рисунок 1.2 – Принципова схема природного масляного охолодження трансформатора при високо піднятих радіаторах

$\Delta\Theta_{30}$ — осьовий перепад температури масла в радіаторі, а $\Delta\Theta_{w0}$ — осьовий перепад температури масла в обмотці, рівний $\Delta\Theta_{t0}$

Піднімальна сила, що спричиняється рух масла, пропорційна площі контуру ABCD.

На рис. 1.2 показана принципова схема й діаграма системи охолодження М при високому розташуванні радіатора. Таке розташування при однакових

втратах збільшує піднімальну силу, а значить і швидкість руху масла. Відповідно знижується значення $\Delta\Theta_{30} = \Delta\Theta_{w0}$, а значення $\Delta\Theta_{oa}$ залишається практично незмінним.

Природна циркуляція масла й примусова циркуляція повітря (система Д)

Ця система заснована на застосуванні радіаторів, що обдуваються вентиляторами. Принципова схема й діаграма системи Д наведена на рисунку 1.3. Вентилятори створюють примусовий рух повітря зі швидкістю, значно більшою, ніж при природній циркуляції. Збільшення швидкості руху повітря збільшує коефіцієнт тепловіддачі радіатора, тому відвід тих же втрат буде відбуватися при меншій логарифмічній різниці температур. При однаковому значенні цієї різниці теплотіпання радіатора збільшується в 2,6 рази.

Примусова циркуляція масла й повітря (система ДЦ)

У цій системі замість радіаторів застосовуються значно вигідніші малогабаритні теплообмінники (охолоджувачі). Для забезпечення циркуляції масла в охолоджувачі використовуються масляні насоси.

Схема й діаграма такої системи з ненаправленою циркуляцією масла (ДЦ) наведена на рисунку 1.4.

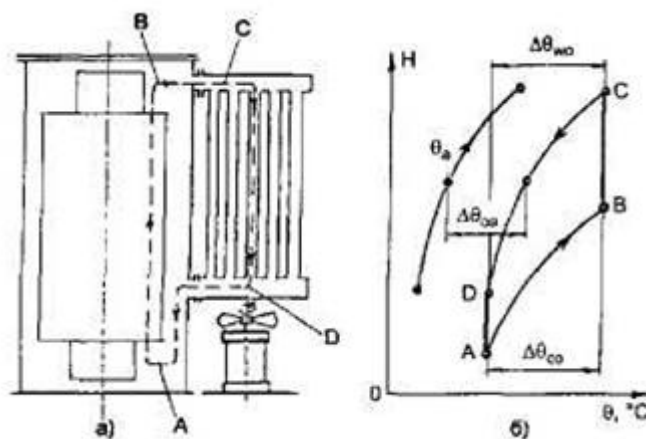


Рисунок 1.3 – Принципова схема природного масляного охолодження трансформатора при примусовій циркуляції повітря

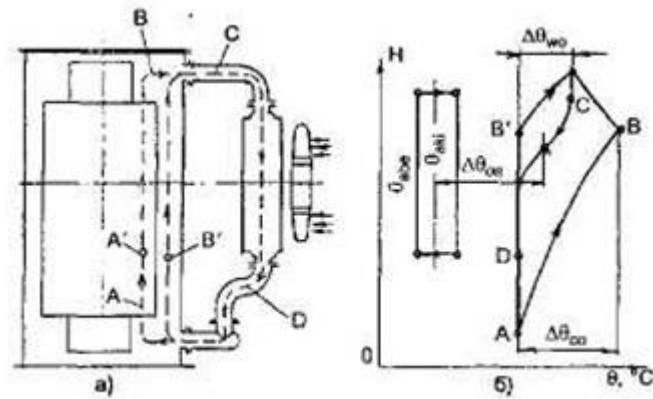


Рисунок 1.4 – Принципова схема охолодження трансформатора при примусовій циркуляції масла й повітря

Масло, нагріте в обмотці й рухається по шляху А', переміщується з маслом, що рухається по шляху В' уздовж стінки бака поза обмоткою. Через таке перемішування практично неможливий вимір температури масла, що виходить із обмотки. Фактична температура масла, що протікає по обмотці, буде вище, ніж температура, вимірювана термодатчиками, розташованими у верхній частині бака.

Система зі спрямованою циркуляцією масла в обмотці (система НДЦ)

У цій системі, схема й діаграма якої показані на рисунку 1.5, усунутий шлях В', і через активну частину трансформатора пропускається все масло, що циркулює в контурі охолодження. В охолоджувач надходить масло з температурою, майже рівній більшій температурі масла в активній частині.

Тому завдяки збільшенню логарифмічної різниці температур $\Delta\Theta_{\text{гк}}$ охолоджувачі, застосовані при спрямованій циркуляції, будуть мати менший робочий об'єм, ніж система за схемою рисунка 1.4.

Швидкість масла біля тепловіддаючих поверхонь активної частини збільшується, тому зростає коефіцієнт тепловіддачі, і зменшується перепад температури між цими поверхнями й маслом. Це дозволяє збільшити

поверхневу щільність теплового потоку, не переходячи припустимого значення перевищення середньої температури обмотки.

Ефективність спрямованої циркуляції масла проявляється не тільки в збільшенні коефіцієнта тепловіддачі обмотки, але й у зниженні осьового перепаду температури масла в обмотці. Завдяки цьому, при однаковому середньому перевищенні знижується температура найбільш нагрітої точки.

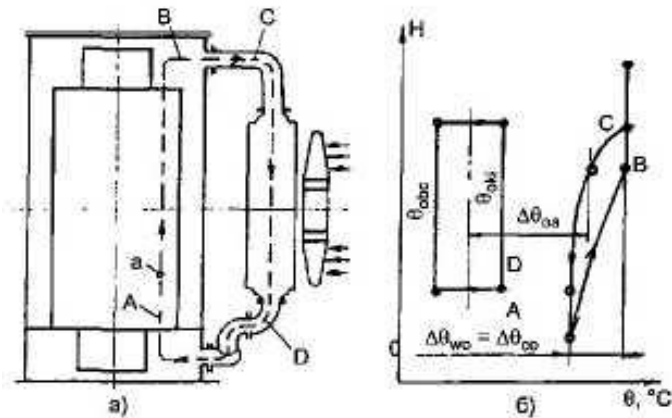


Рисунок 1.5 – Принципова схема охолодження трансформатора при спрямованій циркуляції масла

Система із примусовою циркуляцією масла й води (система Ц)

У цій системі охолодження масла в охолоджувачах здійснюється не повітрям, а водою. Інтенсивність теплообміну від масла до води вище, ніж від масла до повітря, отже, вище коефіцієнт тепловіддачі й тепловий потік охолоджувача.

Для охолодження використовується прісна чи морська вода з температурою при вході в охолоджувач не більше $+25^{\circ}\text{C}$. Циркуляція масла здійснюється герметичними електронасосами типу МТ. Застосовується також циркуляція масла й води зі спрямованим рухом масла в обмотках (система НЦ).

Масло з верхньої частини бака перекачується насосом через охолоджувач, проохолоджується в ньому й надходить у нижню частину бака.

Вхідний і вихідний патрубки мастилопроводу розташовуються «по діагоналі» уздовж довгої осі трансформатора. Завдяки цьому в циркуляцію утягується великий об'єм масла й забезпечується більше рівномірна температура по всьому об'єму бака. Насос установлюється перед охолоджувачем для забезпечення подолання гідравлічного опору обмотки й самого охолоджувача. Одночасно виключається підсмоктування повітря у випадку виникнення вакууму в охолоджувачі.

1.6 Процеси теплопередачі й теплові розрахунки

1.6.1 Загальне поняття про теплообмін, найпростіша модель процесів теплопередачі

Розглянемо сутність теплових процесів, що протікають в, що встановився тепловому режимі на найпростішій моделі (Рисунок 1.6).

У цій моделі процес теплопередачі здійснюється між наступними тілами:

- обмотка, представлена у вигляді вертикальної провідної пластини (показана косим штрихуванням),
- шари ізоляції (показані суцільним заливанням),
- масло в баку (показане горизонтальним штрихуванням),
- бак (перехресне штрихування),
- повітря.

Потік тепла завжди спрямований від більш нагрітого тіла до менш нагрітого. При протіканні струму в обмотці напрямок передачі тепла відповідає наведеному вище порядку перерахування середовищ. У тепловому режимі, що встановився, температури середовищ незмінні в часі й знижуються по напрямку передачі тепла. Поняття " тепловідділяючий елемент " можна застосувати до будь-якої послідовності середовищ, попередньої тому середовищу, тепловий процес у якій розглядається. Наприклад, для процесу теплопередачі в ізоляції таким елементом є обмотка,

а для процесу теплопередачі від бака в навколишнє повітря тепловиділяючим елементом впливає рахувати увесь трансформатор.

Кількість енергії, виділюваної в тепловиділяючому елементі в одиницю часу й передане навколишньому середовищу, тобто потужність втрат P , іменується також тепловим потоком цього елемента. Фундаментальним поняттям для розрахунків теплопередачі є питомий тепловий потік q . Він рівний потужності (загальному тепловому потоку) P , віднесеної до площі поверхні F , через яку він проходить ($q = P/F$). Знаючи питомий тепловий потік і характеристики теплопередачею середовища, можна визначити перепад температури між поверхнями, що обмежують розглянутий шар цього середовища. Саме в цьому й полягає сутність теплового розрахунків.

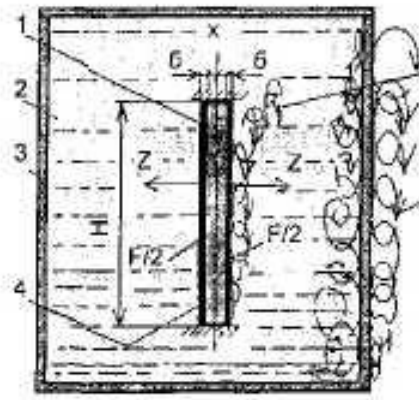


Рисунок 1.6 - Спрощена модель трансформатора з природнім масляним охолодженням: 1 - пластина, 2 - масло, 3 - бак, 4 - ізоляція

Найпростішим процесом теплопередачі є теплопровідність.

Передача тепла при цьому відбувається за рахунок безпосереднього зіткнення часток тіла. Саме таким шляхом здійснюється передача тепла у твердих тілах, наприклад в ізоляції. Перепад температури $\Delta\theta_u$ °C, що виникає між поверхнею пластини й зовнішньою поверхнею ізоляції, визначається законом Фур'є:

$$\Delta\Theta_u = \frac{\delta}{\lambda} q = R_u P \quad (1.1)$$

де δ - товщина ізоляції, м; λ - коефіцієнт теплопровідності ізоляції, Ри - тепловий опір, °C/Вт.

Помітимо, що значення теплопровідності паперової ізоляції змінюються в широких межах. Це викликане тим, що масло заповнює не тільки проміжки між шарами паперу, але й пори, витісняючи з них повітря, тому реальний коефіцієнт теплопровідності залежить від температур і тиску масла й від товщини ізоляції.

Інший механізм теплопередачі пов'язаний з рухом охолодного середовища, що переносить тепло. Таким шляхом тепло приділяється, наприклад, від поверхні обмотки в навколишнє масло (Рисунок 1.6). Рух середовища виникає внаслідок різниці щільностей нагрітих і холодних шарів масла. Щільність більш нагрітих шарів зменшується і вони під дією піднімальної сили відриваються від поверхні, несучи із собою деяка кількість теплової енергії. На їхнє місце надходять більш холодні шари масла. Такий спосіб теплопередачі називається вільною конвекцією. Хоча передача тепла теплопровідністю в маслі також має місце, головне значення в цьому випадку має саме поверхнева конвективна тепловіддача.

При вільному плинні масла уздовж нагрітої поверхні процес конвективного теплообміну відбувається в тонкому прикордонному шарі поблизу поверхні. Швидкість конвективного вихідного потоку масла уздовж поверхні обмотки велика практично тільки в межах цього шару, товщина якого по напрямку знизу нагору зростає від нуля до величини близько 3 мм і в середньому становить близько 1,5 мм. У такий же спосіб відбувається передача тепла від поверхні бака до навколишнього повітря.

На рисунку 1.7 показана якісна схематична картина розподілу температур при теплопередачі від обмотки до масла (Рисунок 1.7, а) і від масла до повітря (Рисунок 1.7, б).

Оскільки в дійсності обмотка не є монолітним металевим тілом і має внутрішню ізоляцію, температура усередині обмотки вище, чим на її поверхні. Температура найбільш нагрітої точки обмотки позначена через Θ_h , а температура на поверхні обмотки - через Θ_w . Температура масла безпосередньо в поверхні обмотки рівна тій же величині. У міру видалення від поверхні вона зменшується до значення Θ_0 . Цей спад температури відбувається в межах конвективного (прикордонного) шару, а поза зоною конвективного плин timer температура залишається практично незмінною (Рисунок 1.7, а).

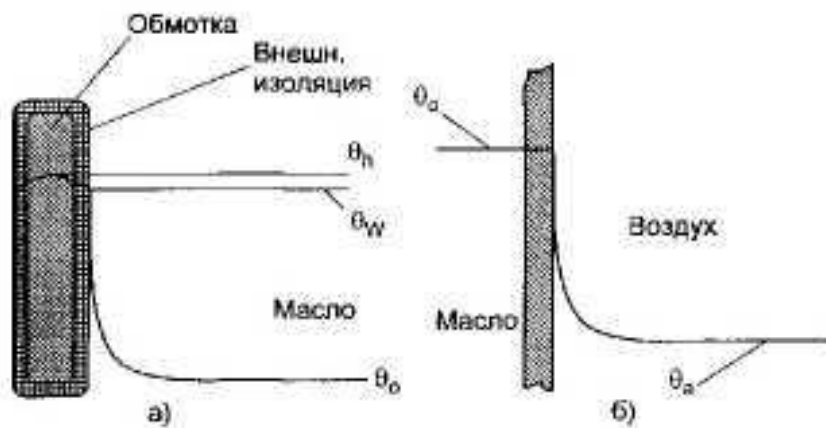


Рисунок 1.7 - Схематична картина розподілу температур: а - тепловіддача від обмотки до масла; б - тепловіддача від масла до повітря

Аналогічно розподіляється температура при тепловіддачі від масла до повітря (Рисунок 1.7, б). Оскільки коефіцієнт теплопровідності сталі на два порядки вище, чим у паперової ізоляції, перепад температури в стінці бака не перевищує 1°C , і їм звичайно зневажають. Товщина конвективної зони для повітря більше, ніж для масла. Поза конвективною зоною температура повітря $\Theta_{\text{в}}$ дорівнює навколишній температурі.

Розрахунки конвективного теплообміну проводиться на основі закону Ньютона:

$$\Delta\Theta_{so} = \frac{1}{\alpha_{so}} q \quad (1.2)$$

де α_{so} - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²×°С); $\Delta\Theta_{so}$ - перевищення температури поверхні над температурою масла, °С.

Величина $\Delta\Theta_{so}$, дорівнює різниці між температурою поверхні Θ_s і температурою масла Θ_0 (Рисунок 1.7). Характер руху масла, залежить від цієї величини. При малих значеннях $\Delta\Theta_{so}$, переважає ламінарний, при більших значеннях - турбулентний режим плин timerасла.

У дійсності коефіцієнт тепловіддачі не є постійною величиною, тому що в'язкість масла, що визначає внутрішнє тертя між частками, рухаючими з різними швидкостями, зменшується з ростом температури. У результаті при більшій температурі швидкість руху масла росте, і коефіцієнт тепловіддачі збільшується. Практично розрахунки коефіцієнта тепловіддачі звичайно роблять по експериментальних залежностях виду:

$$\alpha = M \Delta\Theta^\gamma \quad (1.3)$$

де M і γ - постійні параметри для даних умов теплообміну. Таким чином, на відміну від теплопровідності, конвективний теплообмін є нелінійним.

Тепловіддача від гладкої стінки бака в навколишнє середовище (повітря) здійснюється не тільки конвекцією, але й випромінюванням. Тому при розрахунках визначають коефіцієнт тепловіддачі конвекцією як і випромінюванням. Для теплопередачі випромінюванням можна також визначити коефіцієнт поверхневої тепловіддачі, подібно тому, як це робиться для конвективного теплообміну.

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням залежить від температури повітря, перепаду температур між поверхнею й повітрям, фарбування поверхні, умов випромінювання навколишнього середовища й т.п. Теплопередача випромінюванням визначається законом Стефана - Больцмана:

$$q_k = \varepsilon C_0 [(T_n / 100)^4 - (T_g / 100)^4] \quad (1.4)$$

де T_n і T_g - абсолютні температури поверхні й повітря, К; $C_0 = 5,77$ Вт/(м²×°С) - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; ε - ступінь чорності тіла.

Для абсолютно чорного тіла $\varepsilon = 1$, а для наступних тіл, так званих сірих, $\varepsilon < 1$. На практиці для пофарбованих баків трансформатора $\varepsilon = 0,80—0,95$ і в діапазоні температур 0—100 °С являється величиною постійною.

Тепловіддача випромінюванням, як бачимо, також нелінійна.

На конвективний теплообмін у повітрі впливають ті ж фактори, що й у маслі. Через гіршу охолодну здатність повітря, його коефіцієнт тепловіддачі в 15-20 раз менше, чим коефіцієнт тепловіддачі масла.

У розглянутій моделі розглядалося вертикальне розташування тепловіддаючої поверхні. При її горизонтальнім розташуванні рух масла має трохи інший характер і залежить від радіального розміру. Перенос тепла з поверхні, зверненої нагору, відбувається відповідно до закону теплопередачі однорідного матеріалу (масла) з товщиною шару δ . Перенос тепла з поверхні, зверненої вниз, має складний характер, тому що рух масла в тонкому шарі, що прилягає до цієї поверхні, спочатку відбувається горизонтально, а потім у краю пластини масло піднімається нагору. Коефіцієнт тепловіддачі горизонтальної поверхні нижче, чим у вертикальній.

1.6.2 Реальні умови теплопередачі в обмотках і магнітопроводі.

Процеси теплопередачі в реальних умовах трансформатора мають більш складний характер, ніж описано вище. Це обумовлене тим, що поверхні теплообміну в трансформаторі мають різноманітні конфігурації й розташування відносно один одного, частина поверхонь недоступна вільному доступу охолодного середовища. Тепловий потік, що виникає в обмотках і магнітопроводі, приділяється в навколишнє середовище по складному шляху,

що полягає з декількох ділянок. На ділянці від внутрішніх точок обмотки або магнітопроводу до їхніх зовнішніх поверхонь, омиваних маслом, передача тепла відбувається шляхом теплопровідності. Розміри внутрішніх каналів можуть бути порівнянні з розмірами конвективного шару, і плин масла усередині цих каналів уже не є вільним.

Теплопередача від обмоток і магнітопроводу до масла являє собою складний комплекс теплофізичних і гідродинамічних процесів. Теплові розрахунки трансформатора проводяться по емпіричних формулах з урахуванням критеріїв подібності.

Для визначення внутрішнього перепаду температури в обмотці ухвалюють наступні граничні умови:

- обмотка являє собою однорідне тіло плоскої форми з однакою теплопровідністю по всьому перетину;
- розмір по висоті значно більше, чим її діаметр;
- температура масла постійна;
- втрати в одиниці об'єму обмотки - постійні.

У реальній обмотці ці умови не дотримуються. Найбільш нагріта зона зрушується від середини перетину обмотки до її внутрішньої поверхні, і якщо обмотка має охолодний канал із внутрішньої сторони, то нагріта зона переміщається у бік вузького масляного каналу й перебуває від внутрішньої поверхні обмотки на відстані 0,2-0,3 радіального розміру обмотки. В осьовому напрямку розподіл температури в обмотці також нерівномірний, тому що температура масла вгорі вище, чим унизу.

Посилена ізоляція обмоток, застосовуваних на вхідних витках обмоток потужних трансформаторів, суттєво впливає на нагрівання. Тому для зменшення нагрівання вхідних витків вибирають проведення великого перетину. Таким чином, вирівнюють температурне поле по товщині ізоляції. Найбільш нагріта точка обмотки перебуває у верхній зоні, де температура на 13 °C вище середньої температури обмотки.

Враховуючи вищевикладені умови, при розрахунках необхідно користуватися дослідими даними для кожного типу обмоток. Для розрахунків охолодження обмотки необхідно визначити поверхню її охолодження. Поверхнею охолодження циліндричних обмоток вважається тільки зовнішня циліндрична поверхня по висоті. Торцеві частини обмоток, закриті опорними кільцями, і внутрішня поверхня обмотки, якщо вона прилягає до ізоляційного циліндра, у розрахунках не враховуються. Те ж саме ставиться й до поверхонь, закритих вертикальними рейками.

Передача тепла від обмоток до масла відбувається при наявності різниці температур між обмотками й маслом. Різниця температур поверхні обмотки й омиваючого її масла залежить від теплового потоку, що виділився з поверхні обмотки, а також розташування охолоджуваних маслом поверхонь обмотки, розмірів масляних каналів і в'язкості масла.

При цьому для масляних трансформаторів завжди ухвалюється, що передача тепла від кожного з тепловиділяючих елементів (обмотки, магнітопровід) відбувається незалежно.

Тепловіддача шляхом випромінювання з поверхні гладких баків досягає 50% загальної тепловіддачі. У трубчастих баків і в баків з радіаторами частка тепловіддачі випромінюванням нижче.

Теплові розрахунки трансформатора зводиться до визначення середнього перевищення температури обмотки й перевищення температури верхніх шарів масла над температурою навколишнього середовища. Ці величини є найбільш зручними характеристиками, головним чином тому, що при випробуваннях відповідно до ГОСТ 3484 визначається саме середня температура обмотки шляхом зміни електричного опору, а температура верхніх шарів масла визначається датчиками температур. Однак при теплових розрахунках обов'язково визначається також температура найбільш нагрітої точки обмотки.

1.6.3 Зовнішнє охолодження і питання вибору систем охолодження

Процеси теплопередачі усередині трансформатора й від масла в навколишнє середовище впливають один на одного тільки через температуру масла і її розподіл по висоті й розглядаються роздільно. Системи зовнішнього охолодження, розглянуті вище, засновані на дії теплообмінників, що здійснюють передачу тепла від одного теплоносія до іншого через розділові стінки. При проектуванні трансформаторів, як правило, користуються даними нормалізованих охолодних обладнань. За значенням втрат трансформатора (загальному тепловому потоку, який повинна відвести система охолодження) вибирають вид охолодження й тип охолоджувачів. Потім по тепловому потоці одного охолоджувача вибирають їхню кількість із урахуванням розміщення на баку.

У ГОСТ 11677-85 утримуються граничні перевищення температури обмоток і масла над температурою навколишнього середовища незалежно від потужності трансформаторів.

Втрати в трансформаторі пропорційні масі активних матеріалів (міді, сталі), а, отже, і їхньому обсягу або третьому ступеню лінійних розмірів. Охолоджувальна поверхня трансформаторів росте пропорційно другому ступеню лінійних розмірів. Тому з ростом потужності трансформатора поверхня охолодження зростає повільніше, ніж втрати в активних матеріалах і питоме теплове навантаження поверхні зростає. Тому для того, щоб з ростом потужності трансформатора температурний перепад залишався постійним, необхідно збільшувати поверхню бака, число охолодних труб, радіаторів, ребер або застосовувати інші способи відводу тепла. Види систем охолодження в діапазоні потужностей від 25 до 200000 кВа для класів напруг від 10 до 330 кВ зазначено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Системи охолодження, застосовувані для силових трансформаторів різних потужностей і класів напруг

Система охолодження	Номер групи	Номер габариту	Діапазон потужності, кВа	Клас напруги, кВ	Примітка
М	1	1	До 16 включ.	До 10 включ.	Природне охолодження із трубчастими й радіаторованими баками
	2		25-100	110	
	1	2	160-250	До 10 включ.	
	2		400—1000	110	
	1	3	До 1000 включ.	10—35 включ.	
	2		1600-2500	До 35 включ.	
	3		4000—6300	До 35 включ.	
Д	1	4 5	1000—32 000	До 35 включ.	Природне охолодження з радіаторними баками й дуттям
	2		Вище 32000	До 35 включ.	
	1		До 16000	110	
	2		включ 25000-322 000	110	
Д, ДЦ, Ц	1	6	40 000-63 000	110	Повітряно-масляне, водомасляное з примусовою циркуляцією масла
	2		До 63000	150	
	3		включ. До	220, 330	
	1		63000 включ.	110	
	2		80000—200000	150	
	3		80000—200000 80000-200000	220, 330	
ДЦ,Д	1	6	Вище 200000	До 330 включ.	Водомасляне с направленою циркуляцією масла
	2		Незалежно від потужності	Вище 330	

2 НАВАНТАЖУВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ

2.1 Загальні положення

Стандартами встановлені гранично припустимі температури трансформаторів. Вони засновані на тривалому досвіді експлуатації й передбачають безперервну роботу трансформатора при його номінальній потужності й запропонованих навколишніх умовах протягом установленого терміну служби 20-25 років.

У реальних умовах відбуваються сезонні й добові коливання навколишньої температури, змінюється навантаження трансформатора. Зміни навантаження можуть мати періодичний характер, наприклад, добові зміни, технологічні, пов'язані з роботою живлячого устаткування, і випадкові.

Разом зі зміною навантаження й навколишньої температури змінюється температура всіх частин трансформатора, у тому числі твердої ізоляції й масла. Улітку при граничній навколишній температурі $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ і номінальному навантаженню, температура верхніх шарів масла може бути $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а найбільш нагрітої точки ізоляції обмотки близько $115\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ГОСТ-11677-85 і МЕК 60076-2, що містять рекомендації про перевищення температури (над температурою навколишнього середовища), оперують середнім перевищенням температури обмотки, тоді як Посібник з навантажувальної здатності МЕК 60354 (1991) і ГОСТ-14209-97 (далі «стандарти») орієнтовані, головним чином, на температуру найбільш нагрітої точки обмотки.

Вона, у свою чергу, використовується для оцінки відносної швидкості теплового старіння. Стандарти містять рекомендації про граничні припустимі навантаження, засновані на розрахунках. Ці рекомендації встановлюються для різних за потужністю трансформаторів, а також до різних типів навантаження: тривалому навантаженню, нормальному циклічному спокійному навантаженню, або тимчасовому аварійному навантаженню.

Для нормального циклічного навантаження стандарти містять графічні залежності, що дозволяють визначити припустимі навантаження при даній навколишній температурі без втрати терміну служби.

Допустимість аварійного навантаження й втрата терміну служби в нормальних днях визначаються розрахунком за допомогою наведених там же таблиць, для трьох категорій трансформаторів: категорії розподільних трансформаторів, що мають потужність до 2500 кВа, категорії середніх трансформаторів до потужності 100 МВа, включно, і категорії трансформаторів більшої потужності.

Для останніх при розрахунках рекомендується використати індивідуальні характеристики, отримані при типових випробуваннях. Із причин, які зазначені в стандартах, обмеження для останніх двох категорій трансформаторів трохи розрізняються.

Всі розрахунки засновані на положенні, що підвищення навантаження понад номінальну може призвести до перевищення граничних значень температури найбільш нагрітої точки. Це призведе до прискореного старіння ізоляції.

2.2 Розподільний трансформатор

Трансформатор трифазний номінальною потужністю 2500 кВа включно або до 833 кВа на стрижень фази й з номінальною напругою до 35 кВ включно, трансформатор з роздільними обмотками, що знижує до напруги споживача, з охолодженням типу ON, і без перемикання напруги під навантаженням.

2.3 Силовий трансформатор середньої потужності

Трансформатор з роздільними обмотками, що має номінальну потужність не більше 100 МВа для трифазних трансформаторів, або 33,3 МВа на стержень із обмотками, і що має номінальний повний опір (імпеданс)

короткого замикання, Z_r , завдяки обмеженню щільності потоку розсіювання, не перевищуючу величину

$$Z_r = (25 - 0.1 \frac{3S_r}{W})\% \quad (2.1)$$

де W — число стержнів з обмотками, S_r — номінальна потужність, МВа.

2.4 Великий силовий трансформатор

Трансформатор номінальної потужності більше 100 МВа (трифазний) або імпеданс, що має, короткого замикання більше встановленого вище.

2.5 Режим циклічних навантажень

Режим навантаження із циклічними змінами (звичайно цикл дорівнює добі), що визначають із урахуванням середнього значення зношування за тривалість циклу. Режим циклічних навантажень може бути нормальним, або тривалим аварійним.

2.5.1 Нормальне циклічне навантаження

Висока навколишня температура або струм більше номінального мають місце протягом частини циклу, але з погляду теплового старіння таке навантаження еквівалентне номінальному навантаженню при нормальній навколишній температурі. Це виходить завдяки низкій навколишній температурі або низькому навантаженню протягом іншої частини циклу. Цей принцип може бути розповсюджений на більше тривалі періоду часу, коли цикли зі швидкістю старіння більше одиниці компенсуються циклами зі швидкістю менше одиниці.

2.5.2 Тривале аварійне циклічне навантаження

Це навантаження, що виникло в результаті виходу з ладу деяких елементів системи, які не будуть знову включені до досягнення сталих перевищень температури в трансформаторі. Це не є нормальним

експлуатаційним режимом і трапляється рідко, але може тривати тижнями й навіть місяцями й привести до значного старіння ізоляції. Але це не повинне бути причиною ушкодження ізоляції внаслідок теплового розкладання ізоляції або зниження її електричної міцності.

2.6 Короткочасне аварійне навантаження

Надзвичайно велика напруга внаслідок одного або більше подій, які серйозно порушують роботу системи, викликаючи навантаження, при якій найбільш нагріта точка обмотки досягає небезпечного рівня температури, і можливо тимчасове зниження електричної міцності. Однак, такі умови протягом короткого часу можуть виявитися більш прийнятними, ніж інші альтернативи.

Однак такий тип навантаження трапляється рідко й навантаження повинно бути швидко зменшено або трансформатор повинен бути відключений щоб уникнути ушкодження. Припустима тривалість такого навантаження повинна бути менше значення постійного часу трансформатора й залежить від робочої температури до збільшення навантаження, звичайно вона повинна бути менше 30 хв.

2.7 Основні обмеження й впливи режимів навантажень, що перевищують номінальні значення

2.7.1 Наслідки впливу навантаження вище номінального

Дійсний термін служби трансформатора в значній мірі залежить від виняткових впливів, таких як перенапруги, короткі замикання в мережі й аварійні перевантаження. Імовірність безвідмовної роботи при таких впливах, що виникають окремо або в сполученні, залежить в основному від:

- амплітуди й тривалості впливу;
- конструкції трансформатора;
- температури різних частин трансформатора;
- змісту кисню й інших газів в ізоляції й маслі;

- кількості, розміру й виду часток домішок;
- змісту вологи в ізоляції й маслі.

Передбачуваний нормальний термін служби - це деяка умовна величина, прийнята для безперервного постійного навантаження при нормальній температурі охолоджуючого середовища й номінальних умов експлуатації. Навантаження і/або температура охолоджуючого середовища, що перевищують номінальну, викликають прискорене зношування й створюють деякий ступінь ризику.

Метою вищевказаних стандартів є визначення ступеня ризику й установлення деяких обмежень режимів навантаження трансформаторів, що перевищують номінальні значення.

Наслідки навантаження трансформатора, вище її номінального значення можуть бути наступними:

- температура обмоток, відводів, ізоляції й масла збільшуються й можуть досягти неприйнятної рівня;
- індукція магнітного потоку розсіювання збільшується, викликаючи збільшення вихрових струмів, що нагрівають металеві частини;
- сполучення головного потоку й збільшеного потоку розсіювання накладає обмеження на можливе перезбудження магнітної системи;
- із зміною температури змінюється вміст вологи й газу в ізоляції;
- вводи, перемикачі, приєднання відводів, і трансформатори струму будуть піддаватися більш жорстким впливам, які можуть перевищити їхній проектний рівень.

Як наслідок, з'являється ризик ушкодження, пов'язаний з величиною струму й температури. Цей ризик може привести до ушкодження під час перевищення навантаження або мати кумулятивний ефект протягом багатьох років.

2.7.2 Небезпека при короткочасних аварійних впливах

- Головним ризиком під час короткочасного навантаження є зниження електричної міцності внаслідок утворення пухирців газу в області високої

напруженості, тобто в обмотках або на відводах. Ці пухирці можуть виникати в паперовій ізоляції, коли температура найбільш нагрітої точки досягає 140 - 160 °С при нормальному вмісті вологи в ізоляції. З підвищенням вологовмісту критична температура початку утворення пухирців може знизитися.

Газові пухирці можуть утворюватися на поверхні неізольованих металевих деталей, коли їхня температура внаслідок збільшення індукції потоку розсіювання підвищується вище 180°C, що призводить до розкладання масла.

- Тимчасове зменшення механічної міцності внаслідок високої температури може привести до зниження міцності обмоток при впливі струмів короткого замикання.

- Підвищення тиску у вводах може привести до витoku масла й ушкодженню вводу. У вводі також можуть утворюватися пухирці газу при температурі ізоляції вище 140°C.

- Перемикання при більших струмах можуть викликати ушкодження в перемикачі.

2.7.3 Небезпека тривалого перевантаження

- Прискорене старіння виткової ізоляції й зниження її механічної міцності. Якщо це зниження значно, знижується термін служби трансформатора, особливо якщо він підданий впливу струмів короткого замикання.

- Прискореному старінню піддаються й інші частини ізоляції.

- Внаслідок впливу високої температури й великих струмів збільшується опір контактів перемикаючих пристроїв.

- Старінню піддаються й ущільнення бака, які стають більше тендітними. Ризик ушкодження при короточасному впливі звичайно зникає при зменшенні рівня навантаження до номінальної, але для загального

рівня надійності короточасні впливи можуть мати більш серйозні наслідки, чим тривалі впливи.

Стандарти передбачають, що навантажувальна здатність може бути обмежена як для короточасних, так і тривалих впливів. Таблиці й діаграми, розраховані відповідно до традиційних методів визначення механічних властивостей паперової ізоляції під впливом часу й температури найбільш нагрітої точки обмотки, є основою розгляду ризику негайного ушкодження.

2.7.4 Обмеження, викликані розмірами (потужністю) трансформатора

Чутливість трансформаторів до навантажень вище номінальної зазвичай залежить від потужності трансформатора. Зі збільшенням потужності спостерігається наступна тенденція:

- щільність потоку розсіювання збільшується;
- зусилля при коротких замиканнях зростають ;
- збільшується обсяг електрично напруженої ізоляції;
- стає більше важким точне визначення температури гарячої точки.

Тому великі трансформатори можуть бути більш чутливі до навантаження вище номінального, ніж трансформатори меншої потужності. Крім того, наслідки ушкодження великого трансформатора більш серйозні, ніж для трансформатора меншого розміру.

Щоб установити розумний ступінь ризику, стандарти розглядають три категорії трансформаторів:

- розподільні трансформатори, для яких ураховуються тільки температура найбільш нагрітої крапки й ступінь розкладання (старіння) ізоляції;
- трансформатори середньої потужності, для яких вплив поля розсіювання не є критичним, але повинні враховуватися різні способи охолодження;
- великі силові трансформатори, у яких ефект полів розсіювання може бути значним і наслідки ушкодження дуже важкими.

2.8 Граничні значення струму й температури

У стандартах МЕК- 60354-91 і ГОСТ-14209-97 рекомендовані граничні значення струмів і температури при перевантаженні, зазначені в таблиці 2.1. Ці значення не повинні бути перевищені й при цьому повинні бути прийняті в увагу спеціальні обмеження викладені в розділі 2.9.

Таблиця 2.1 – Граничні значення температури й струму для режимів навантаження, що перевищує номінальну

Тип навантаження	Трансформатори		
	Розподільні	Середньої потужності	Великої потужності
Режим систематичних навантажень			
Струм, від. од.	1,5	1,5	1,3
Температура найбільш нагрітої точки й металевих частин, що стискаються з ізоляційним матеріалом, °C	140	140	120
Температура масла у верхніх шарах, °C	105	105	105
Режим тривалих аварійних перевантажень			
Струм, від. од.	1,8	1,5	1,3
Температура найбільш нагрітої точки й металевих частин, що стискаються з ізоляційним матеріалом, °C	150	140	130
Температура масла у верхніх шарах, °C	115	115	115
Режим короточасних аварійних перевантажень			
Струм, від. од.	2,0	1,8	1,5

Продовження таблиці 2.1

Температура найбільш нагрітої точки й металевих частин, що стикаються з ізоляційним матеріалом, °C	По 1.5. 2	160	160
Температура масла у верхніх шарах, °C	По 1.5. 2	115	115

2.9 Спеціальні обмеження

2.9.1 Розподільчі трансформатори (потужність до 2500 кВа)

Для цих трансформаторів у таблиці 2.1 не встановлені граничні значення температури найбільш нагрітої точки й верхніх шарів масла при короткочасному аварійному навантаженні. Варто пам'ятати, що при температурі сягаючої 140 - 160 °C у цих місцях може утворюватися пухирці газу, що різко знижує електричну міцність ізоляції.

Крім обмоток, інші частини трансформатора, такі як уведення, перемикачі, відводи, можуть обмежити роботу при струмі, що перевищує 1,5-кратне значення номінального. Розширення обсягу масла і його тисків можуть також створювати обмеження.

При внутрішній установці трансформатора граничне значення температури верхніх шарів масла повинне бути прийняте з урахуванням характеристик вентиляції приміщення й може бути визначено випробуванням.

При зовнішній установці вітер, дощ, сонячні промені можуть істотно впливати на охолодження розподільчих трансформаторів. Але їхній облік утруднений через їхню непередбачуваність.

2.9.2 Трансформатори середньої потужності

До них відносяться трифазні трансформатори потужністю до 100 МВа, включно, що мають обмеження відносно імпедансу відповідно до розділу 2.3.

Граничні значення струму, температури найбільш нагрітої точки, температури верхніх шарів масла й температури металевих частин поза обмоткою й відводами, але проте присутніх в контакті із твердими ізоляційними матеріалами, встановлені в таблиці 2.1 не повинні бути перевищені. Крім того слід зазначити, що коли температура найбільш нагрітої точки досягає 140 - 160 °С, пухирці газу можуть утворюватися й привести до ушкодження ізоляції. Деякими дослідженнями встановлено, що зазначений діапазон температур є граничним: у сухій ізоляції пухирці можуть виникати при температурі $>160^{\circ}\text{C}$, а у зволоженій при $> 140^{\circ}\text{C}$.

Крім обмоток, інші частини трансформатора, такі як вводи, пристрої приєднання кабелю, перемикачі, відводи можуть обмежувати роботу при навантаженні вище 1,5-кратної від номінальної. Розширення обсягу масла й тиск масла також можуть накладати обмеження. Необхідно також розглянути характеристики пов'язані із трансформатором устаткування, такого як кабелі, вимикачі, трансформатори струму й т.д.

Під час або відразу після роботи при навантаженні вище номінального трансформатор може перебувати в стані, що не відповідає вимогам міцності при струмах короткого замикання, установленим стандартами ГОСТ - 11677-85 і МЭК - 60076-5. Однак, у більшості випадків, в експлуатації тривалість струмів короткого замикання менше зазначеної в цих стандартах.

При відсутності інших обмежень для регулювання напруги зі зміною індукції, прикладена напруга не повинна перевищувати значення, рівного 1,05 номінального, як це пропонується ГОСТ - 11677-85 і МЭК - 60076-4.

2.9.3 Великі трансформатори

Для великих трансформаторів повинні бути прийняті в увагу додаткові обмеження, пов'язані головним чином з наявністю більших потоків розсіювання.

Тому рекомендується спеціально вказувати навантажувальну здатність такого трансформатора при його замовленні й у специфікації.

Що стосується зношування ізоляції, застосовуються стандартні методи розрахунку, застосовувані для інших трансформаторів.

Однак, рекомендуються розрахунки робити ґрунтуючись на фактичних теплових характеристиках даного трансформатора.

Необхідність високої надійності великих трансформаторів, у зв'язку з важкими наслідками їхнього ушкодження, диктує проведення більш консервативного й більш індивідуального розрахунку й розгляду допустимості певної величини перевантаження, ніж для трансформаторів меншої потужності. Необхідно враховувати наступні обставини:

- Комбінація потоку розсіювання й головного потоку в стержнях і ярмах магнітної системи роблять великі трансформатори більш підданими перезбудженню, ніж трансформатори меншої потужності, особливо при навантаженнях вище номінальної. Збільшений потік розсіювання може також викликати додаткові нагрівання інших металевих частин, внаслідок вихрових струмів.

- Наслідки деградації (старіння) твердої ізоляції, внаслідок високої температури й часу, включаючи зношування внаслідок теплового розширення, можуть бути більш значними для трансформаторів великої потужності.

- Температура гарячих точок поза обмотками не може бути визначена при нормальному випробуванні на нагрівання. Навіть якщо таке випробування при номінальному струмі не виявить ненормальностей, це не дозволить зробити вивід для великих струмів, тому що така екстраполяція не може бути врахована при проектуванні.

- Розрахунок перевищення температури найбільш нагрітої точки обмотки при струмі вище номінального, заснований на результатах випробувань на нагрівання при номінальному струмі, може бути для великих трансформаторів менш надійним ніж для трансформаторів меншої потужності.

Струм навантаження, температура найбільш нагрітої точки обмотки, температура верхніх шарів масла й температура металевих частин (не обмоток і відводів), що перебувають у контакті із твердими ізоляційними матеріалами, не повинні перевищувати значень, наведених у таблиці 2.1. Крім того, коли температура найбільш нагрітої точки досягає 140—160 °С, можуть утворюватися пухирці газу, що небезпечно для електричної міцності ізоляції.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРІВ З ВРАХУВАННЯМ УМОВ ОХОЛОДЖЕННЯ

3.1 Технічні характеристики автотрансформаторів

Автотрансформатори типу АТДЦТН-125000/330/110/35-77-У-1 — масляні, трифазні триобмоткові з регулюванням напруги під навантаженням на стороні СН, з примусовою циркуляцією масла і примусовим дуттям системи охолодження

Таблиця 3.1 - Технічні характеристики автотрансформаторів

№ п/п	Найменування тех. характеристик	Од. виміру	АТ-1	АТ-2
1.	Заводський номер	№	107957	119335
2.	Номінальна потужність ВН-СН	кВА	125000	125000
3.	Номінальна потужність НН	-- --	63000	63000
4.	Схема і група з'єднання обмоток	—	Y _{н.авто} /Δ 0-11	Y _{н.авто} /Δ 0-11
5.	Тип регулювання напруги	—	РПН	РПН
	Напруга короткого замикання:			
6.	ВН-СН	%	10,4	10,3
7.	ВН-НН	%	35,4	35,4
8.	СН-НН	%	24,6	24,5
9.	Струм холостого ходу	%	0,43	0,43
10.	Повна маса	т.	240	240

Продовження таблиці 3.1

11.	Маса масла	т.	77,5	77,5
12.	Маса активної частини	т.	108	108
13.	Рік випуску		1979	1983
14.	Розміри:	мм.		
	макс: довжина		11900	11900
	ширина		6500	6500
	висота		9000	9000

Обмотки ВН і СН мають між собою автотрансформаторний зв'язок.

Обмотка НН з обмотками ВН і СН – трансформаторний зв'язок.

Регулювання напруги в автотрансформаторі здійснюється на стороні СН під навантаженням, шляхом зміни коефіцієнта трансформації в діапазоні $\pm 6 \times 2\%$ від номінальної напруги СН. Перемикаючий пристрій (РПН) має місцеве і дистанційне керування. Типи РПН та їх приводи наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 4.2 - Типи РПН та їх приводи

Автотрансформатор	Тип РПН	Тип приводу
АТ-1	РНОА- 220/1000	ПДП-4У-У1
АТ-2	-- --	-- --

3.1.1 Перевантажуюча спроможність автотрансформаторів АТ-1, АТ-2 в аварійних режимах. (ПТЕ 5.3.16)

В аварійних випадках допускається тимчасове перевантаження АТ (згідно ПТЕ) при роботі всіх систем охолодження незалежно від тривалості і величини попереднього навантаження і температури оточуючого повітря в таких межах:

Таблиця 3.3 - Тимчасове перевантаження АТ

Перевантаження по струму, %	30	45	60	75	100
Струм перевантаження по обмотці 330 кВ. А	285	318	350	383	438
Тривалість перевантаження, хвилин	120	80	45	20	10

Примітка: Величина струмів аварійного перевантаження приведена для середнього положення (7, 8, 9) перемикача РПН.

Допускається перевантаження АТ зверх номінального струму на 40% загальною тривалістю не більше 6 годин на добу, на протязі 5 діб, при умові, якщо коефіцієнт початкового завантаження не більше 0,93 і температура верхніх шарів масла не перевищує 75°C.

В випадку аварійної відмови системи охолодження (відключення вентиляторів і припинення циркуляції масла) допускається підтримувати номінальне навантаження на протязі 10 хвилин. Якщо при закінченні вказаного часу температура масла в верхніх шарах не досягла +80°C, то допускається підтримувати номінальне навантаження, до досягнення температури масла 80°C, але не більше 1 години.

При регулюванні напруги АТ лінійні напруги тривало не повинні перевищувати 105% від номінальної при навантаженні не вище номінального і 110% від номінальної при навантаженні не вище 0,25 номінального короткочасно (до 6 годин на добу) на 10% при навантаженні не вище номінального. Таким чином максимально допустимі робочі напруги для обмоток ВН – 363кВ, СН – 126 кВ, НН – 40,5 кВ. при зменшенні числа охолоджувачів навантаження повинно бути зменшеним.

3.1.2. Система охолодження автотрансформаторів.

Система охолодження АТ-1, АТ-2 типу ДЦ (примусове дуття і примусова циркуляція масла). Для керування системою охолодження автотрансформатора встановлено 2 шафи автоматичного керування охолодженням трансформатора типу ШАОТ-ДЦ, які призначені для автоматичного і ручного керування електродвигунами системи охолодження.

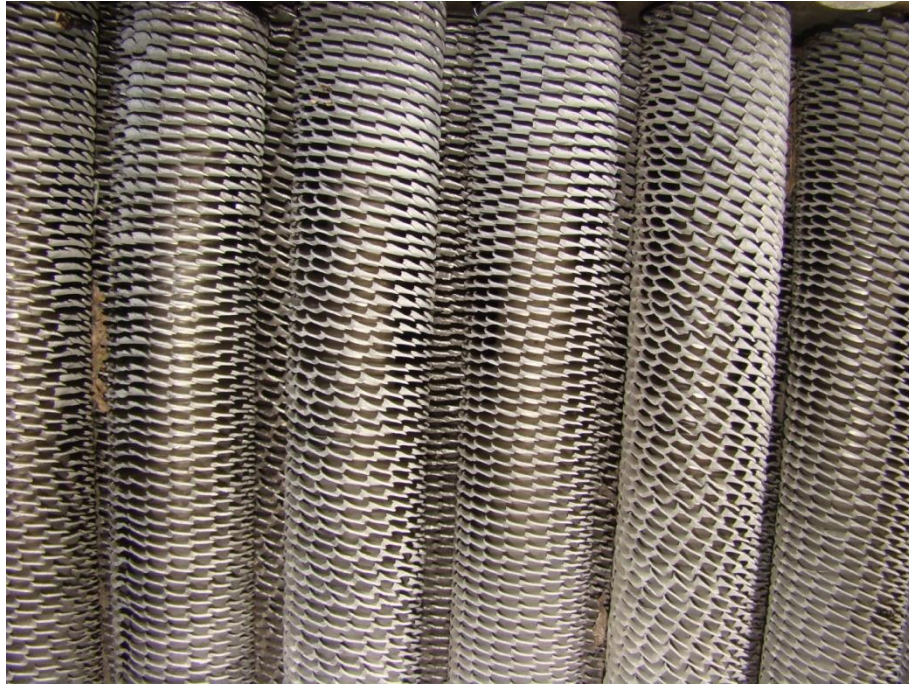


Рисунок 3.1 - Охолоджувач трансформатора

На АТ-1, АТ-2 встановлено 5 охолоджуючих пристроїв, які обладнані маслонасосом і двома вентиляторами. Тип маслонасосів 5Т-100/8У1, потужністю 3,9 кВт, частота обертання 1500 об/хв., продуктивність $100\text{ м}^3/\text{год}$. Двигуни вентилятора мають потужність 2,3 кВт, частоту обертання 700 об/хв., витрата повітря $7,5\text{ м}^3/\text{с}$.

При увімкненні АТ на холостий хід вмикаються маслонасоси охолоджувачів №1, 2, 3, 4 та вентилятори охолоджувачів №1, 3. При досягненні навантаження 40% (по стороні 330 кВ) вмикаються вентилятори охолоджувача №4. При досягненні навантаження 80% вмикаються вентилятори охолоджувача №2. Охолоджувач №5 вмикається при

аварійному відключенні будь-якого з працюючих охолоджувачів (маслонасосу або двох вентиляторів) або при досягненні температури масла $+55^{\circ}$

3.2 Розрахунки охолодження трансформатора для сторони масла

Тепловий потік охолоджувача $P = 100\,000$ Вт. Температура масла на вході в охолоджувач дорівнює 70°C , а на виході з охолоджувача – 65°C . При середній температурі масла $67,5^{\circ}\text{C}$ його питома теплоємність рівна 2050 Дж/(кг $^{\circ}\text{C}$) і щільність $\rho = 853,5$ кг/м³.

Осьовий перепад температури (під яким розуміється різниця найбільшої й найменшої температур даного теплоносія в охолоджувачі) масла в охолоджувачі

$$\Delta\vartheta = 70 - 65 = 5^{\circ}\text{C} . \quad (3.1)$$

Масова витрата масла в охолоджувачі

$$G = \frac{P}{c\Delta\vartheta} = \frac{100000}{2050 \cdot 5} = 9.75 \text{ кг/з} . \quad (3.2)$$

Об'ємна витрата масла в охолоджувачі

$$\Phi = \frac{G}{\rho} = \frac{9.75}{853.5} = 0.01142 \text{ м}^3/\text{з} . \quad (3.3)$$

Площа вільного перетину труби при внутрішньому діаметрі $d = 10 \cdot 10^{-3}$ м

$$A_1' = \frac{\pi \cdot 10^2}{4} - 0.3 \cdot 10 - 1.5 = 74 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 . \quad (3.4)$$

де перший член - площа перетину труби без оребрення; другий - площа перетину мідної стрічки й третій - площа перетину швів.

Нехай охолоджувач має два ходи по маслу й 135 паралельно з'єднаних труб у кожному ході.

Швидкість масла в трубах

$$\omega_0 = \frac{\Phi}{A_1} = \frac{0.01142}{135 \cdot 74 \cdot 10^{-6}} = 1.142 \frac{\text{м}}{\text{с}} . \quad (3.5)$$

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі з боку масла.

Гідравлічний діаметр D-образної частини (однієї половини) перетину труби

$$d_h = \frac{4f}{\pi} = \frac{2 \cdot 74}{0.5\pi \cdot 10 + 10} = 5.77 \cdot 10^{-3} \text{ м} . \quad (3.6)$$

Припустимо, що перепад температури між маслом і стінкою труби $\Delta\theta_{\text{F}} = 10^\circ\text{C}$. Тоді середня температура прикордонного шару масла

$$\theta_m = 67.5 - 0.5 \cdot 10 = 62.5^\circ\text{C} . \quad (3.7)$$

Фізичні постійні масла варто знаходити, виходячи із цієї температури.

Тому що при $\nu = 6.55 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{із}$ число Рейнольдса

$$\text{Re}_m = \frac{1.142 \cdot 5.77 \cdot 10^{-3}}{6.55 \cdot 10^{-6}} = 1008 . \quad (3.8)$$

ттобто режим потоку масла ламінарний і коефіцієнт тепловіддачі визначається рівнянням (4-4).

Число Прандтля $\text{Pr}_m = 88,3$.

Число Грасгофа

$$\text{Gr}_m = \frac{7.9 \cdot 10^{-4} \cdot (5.77 \cdot 10^{-3}) \cdot 9.81 \cdot 10}{(6.55 \cdot 10^{-6})^2} . \quad (3.9)$$

При горизонтальному розташуванні труб число Нуссельта

$$\text{Nu}_m = 0.74 \cdot 1008^{0.2} (347 \cdot 88.3)^{0.1} \cdot 88.3^{0.2} = 20.2 . \quad (3.10)$$

При $\lambda = 0.12815 \text{ Вт/(м}^0\text{С)}$

$$\alpha_1 = \text{Nu}_m \frac{\lambda}{d_k} = 20.2 \frac{0.12815}{5.77 \cdot 10^{-3}} = 477 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^0\text{С)}. \quad (3.11)$$

Розрахунки для сторони повітря

Нехай середня швидкість повітря дорівнює 3,2 м/с, температура повітря на вході в охолоджувач 32^0С , а середня температура повітря 50^0С . При цій температурі, $\rho_1 = 1.056 \text{ кг/м}^3$; $c_p = 1016 \text{ Дж/(кг }^0\text{С)}$; $\lambda_1 = 0.0272 \text{ Вт/(м}^0\text{С)}$.

Площа поперечного переріза для потоку повітря $A_2 = \frac{1.7}{2} \text{ м}^2$. (3.12)

Об'ємна витрата повітря

$$\Phi_1 = \omega_1 A_2 = 3.2 \frac{1.7}{2} = 2.72 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.13)$$

Масова витрата повітря

$$G_1 = \Phi_1 \rho_1 = 2.72 \cdot 1.056 = 2.875 \text{ кг/с}. \quad (3.14)$$

Осьовий перепад температури повітря в охолоджувачі

$$\Delta \vartheta_1 = \frac{P}{G_1 c_p} = \frac{10000}{2.875 \cdot 1016} = 34.2^0\text{С}. \quad (3.15)$$

Розрахунок Re_f : при $L = 0.27 \text{ м}$;

$$d_h = 4 \cdot 0.27 \frac{0.0157}{0.295} = 0.0575 \text{ м}; \quad (3.16)$$

$$\nu = 18.8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \omega_1 = 3.2 \text{ м/с};$$

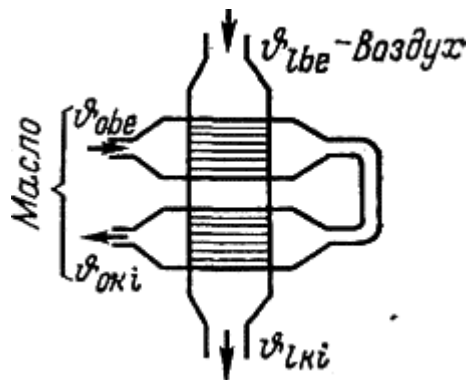
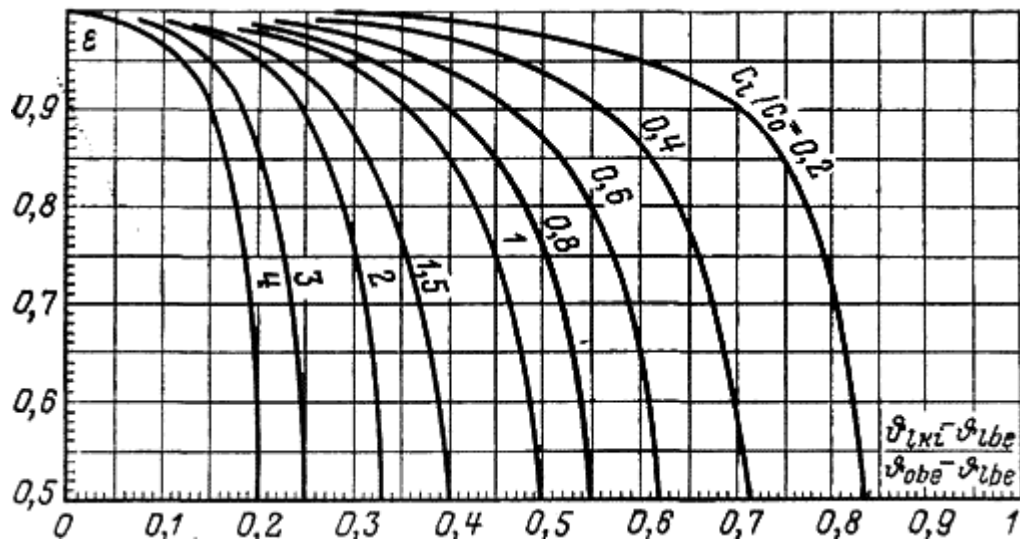


Рисунок 3.2 - Діаграма для визначення поправочного коефіцієнта ϵ при поперечному обдуві охолоджувача. Постійним параметром є відношення теплоємностей теплоносіїв $C1/C0$. Масло в камері, що з'єднує ходи, переміщується.

$$Re_f = \frac{3.2 \cdot 0.0575}{18.6 \cdot 10^{-6}} = 9900 \quad (3.17)$$

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі α_2 :

$$Pr_f = 0.722 ;$$

$$Nu_f = 1.125 \cdot 9900^{0.545} \cdot 0.722^{\frac{2}{3}} = 136 ; \quad (3.18)$$

Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_2 = \text{Nu}_f \frac{\lambda_1}{d_h} = 136 \frac{0.0272}{0.0575} = 64.3 \text{ Вт/(м}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}. \quad (3.19)$$

Коефіцієнти корисної дії ребер: з боку масла

$$m_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot 477}{391 \cdot 0.3 \cdot 10^{-3}}} = 87.3 \text{ м}^{-1}; \quad (3.20)$$

$$\eta_{b1} = \frac{\text{th}(87.3 \cdot 5 \cdot 10^{-3})}{87.3 \cdot 5 \cdot 10^{-3}} = 0.94; \quad (3.21)$$

з боку повітря

$$m_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 64.3}{391 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}}} = 30.6 \text{ м}^{-1}; \quad (3.22)$$

$$\eta_{b2} = \frac{\text{th}(30.6 \cdot 9.42 \cdot 10^{-3})}{30.6 \cdot 9.42 \cdot 10^{-3}}; \quad (3.23)$$

Коефіцієнт теплопередачі

Знайдемо коефіцієнт теплопередачі віднесений до площі внутрішньої поверхні гладкої труби F_1' . Уведемо позначення: k , – коефіцієнт теплопередачі, віднесений до площі поверхні $F_1' : F_1'$ – площа поверхні внутрішніх ребер; F_2 – площа поверхні з боку повітря; η_{b1} і η_{b2} – ККД внутрішнього й зовнішнього ребрення відповідно; α_1 і α_2 – коефіцієнти тепловіддачі з боку масла й повітря відповідно; δ – товщина стінки труби; λ – коефіцієнт теплопровідності міді. Через малу товщину стінки прийнято, що площа поверхні труби, що відповідає її середньому діаметру, $F_e = F_1^0$. Коефіцієнт теплопередачі визначається з рівняння

$$\frac{1}{k_{F_1'}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{F_1''}{F_1'} \eta_{b1}\right) \alpha_1} + \frac{1}{\frac{\lambda}{\delta}} + \frac{1}{\frac{F_2}{F_1'} \eta_{b1} \alpha_2} \quad (3.24)$$

Вхідні в це рівняння величини мають наступні значення:

$$\begin{aligned} F_1' &= \pi d \cdot 1 = 3.14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0.0314 \text{ м}^2; & F_1'' &= 2d \cdot 1 = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0.02 \text{ м}^2; \\ F_2 &= 0.295 \text{ м}^2; & \delta &= 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}; & \eta_{b1} &= 0.94 & \eta_{b2} &= 0.972; & \lambda &= 391 \text{ Вт/(м}^0\text{С)}; \\ \alpha_1 &= 447 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^0\text{С)}; & \alpha_2 &= 64.3 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^0\text{С)}. \end{aligned}$$

Визначимо при цих даних коефіцієнт теплопередачі з рівняння (3.24)

$$\frac{1}{k_{F_1'}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{0.02}{0.0314} \cdot 0.94\right) 447} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{391} + \frac{1}{\frac{0.295}{0.0314} \cdot 0.972 \cdot 64.3} = \frac{1}{714} + \frac{1}{391000} + \frac{1}{587}$$

$$k_{F_1'} = 322 \text{ Вт/(м}^2\text{ }^0\text{С)}.$$

Перепади температури

При числі труб охолоджувача, рівному 270, довжині однієї труби - 1,94 м і тепловому потоці $P = 100\,000$ Вт на 1 м довжини труби доводиться тепловий потік

$$P' = \frac{100000}{270 \cdot 1.94} = 191 \text{ Вт}. \quad (3.25)$$

Перепад температури з боку масла (між маслом і стінкою труби)

$$\Delta \vartheta_{F_1} = \frac{P'}{\left(\frac{F_1'}{F_1''} + \eta_{b1}\right) \alpha_1} = \frac{191}{(0.0314 + 0.02 \cdot 0.94) 447} = 8.48^\circ\text{С} \quad (3.26)$$

Перепад температури з боку повітря (між стінкою й повітрям)

$$\Delta\vartheta_{F_1} = \frac{P'}{F_2 \eta_{b2} \alpha_2} = \frac{191}{0.295 \cdot 0.972 \cdot 64.3} = 10.32^\circ\text{C} \quad (3.27)$$

Перепад температури по товщині стінки

$$\Delta\vartheta_{\delta_1} = \frac{P'}{\frac{\lambda}{\delta}} = \frac{191}{391000} = 0.000487^\circ\text{C} \quad (3.28)$$

Як показує розрахунок, перепадом температури по товщині стінки можна зневажити й повна різниця температур між маслом і повітрям складе:

$$\Delta\vartheta_{0-1} = 8.48 + 10.32 = 18.8^\circ\text{C} \quad (3.29)$$

Такий же результат одержимо при розрахунку через коефіцієнт теплопередачі

$$\Delta\vartheta_{0-1} = \frac{P}{k_{F_1} F_1 \cdot 270 \cdot 1.94} = \frac{100000}{322 \cdot 0.0314 \cdot 270 \cdot 1.94} = 18.8^\circ\text{C} \quad (3.30)$$

Визначимо тепер логарифмічну різницю температур між маслом і повітрям.

$$\text{Нехай } \Delta\vartheta_n = 33^\circ\text{C} \text{ і } \Delta\vartheta_k = 8.8^\circ\text{C}, \quad \frac{\Delta\vartheta_n}{\Delta\vartheta_k} = 3.75, \quad b = 0.56$$

Значення поправочного коефіцієнта ε визначається по діаграмах. Скористаємося даними для охолодження з поперечним обдувом і зустрічною циркуляцією. Приймемо, що $\varepsilon = 1$. Тоді

$$\Delta\vartheta_{0-1} = 1 \cdot b \cdot 33 \cdot 1 = 18.5^\circ\text{C} \quad (3.31)$$

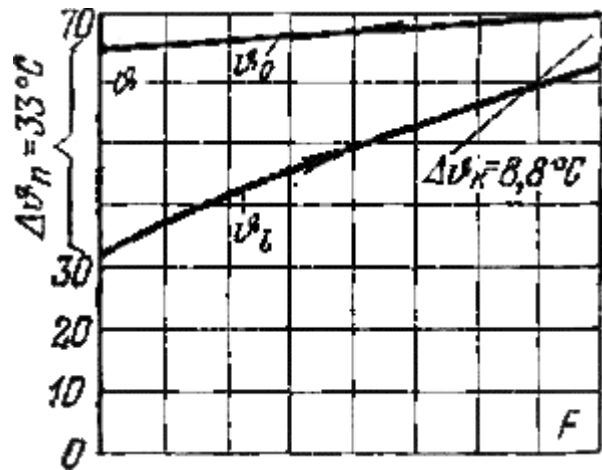


Рисунок 3.3 - Зміна температури теплоносіїв уздовж поверхні теплообміну охолоджувача при тепловому потоці 100 кВт

Це значення логарифмічної різниці температур $\Delta \vartheta_{0-l}$ ненабагато відрізняється від отриманого вище значення повного перепаду температури. Фактичне перевищення температури масла буде таким, щоб логарифмічна різниця температур і повний перепад температури, що відповідає коефіцієнту теплопередачі, були рівні один одному. При розрахунку логарифмічної різниці температур було прийнято, що $\varepsilon = 1$.

Коефіцієнт корисної дії процесу теплопередачі теплообмінника

Теплоємність із боку масла

$$C_m = G_m c_m = 9.75 \cdot 2050 = 20000 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C}; \quad (3.32)$$

теплоємність із боку повітря

$$C_h = G_h c_h = 2.875 \cdot 1015 = 2915 \text{ Вт/}^{\circ}\text{C}. \quad (3.33)$$

Теплопередаюче число охолоджувача

$$N = \frac{322 \cdot 0.0314 \cdot 270 \cdot 1.94}{2915} = 1.815. \quad (3.34)$$

Відношення теплоємностей теплоносіїв

$$K = \frac{2915}{20000} = 0.1455 \quad (3.35)$$

Визначимо повне падіння статичного тиску Δp в масляно-повітряному охолоджувачі на 100 кВт, розглянутому вище. Для цього двоходового охолоджувача площа поперечного перерізу колектора - у напрямку, перпендикулярному потоку масла, дорівнює 290x890 мм.

У зв'язку з тим, що охолоджувач двоходовий, площа перетину для циркулюючого потоку масла в колекторі дорівнює половині зазначеної вище площі перетину, тобто

$$A_k = \frac{0.29 \cdot 0.89}{2} = 0.129 \text{ м}^2 \quad (3.36)$$

Площа перетину 135 паралельно з'єднаних труб одного ходу, що мають зворотно-В-образний профіль:

$$A_1 = 135 \cdot 74 \cdot 10^{-6} = 0.01 \text{ м}^2 \quad (3.37)$$

Відношення площ перетинів труб і колектора для циркулюючого потоку масла:

$$\sigma = \frac{A_1}{A_k} = \frac{0.01}{0.129} = 0.0775 \quad (3.38)$$

При середній температурі масла в охолоджувачі $67,5^\circ\text{C}$: $\nu = 5.75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
і $\rho = 853.5 \text{ кг/м}^3$. Крім того, відомо, що $\omega = 1.142 \text{ м/с}$,
 $L = 1.94 \text{ м}$, $d_h = 5.77 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.
Тоді безрозмірна величина

$$\frac{4L}{d_h \text{Re}} = \frac{\frac{4 \cdot 1.94}{5.77 \cdot 10^{-3}}}{\frac{1.142 \cdot 5.77 \cdot 10^{-3}}{5.75 \cdot 10^{-6}}} = 1.172 \quad . \quad (3.39)$$

$\zeta_c = 1.04$ й $\zeta_e = 0.8$. Перепад статичного тиску на вході:

$$\Delta p_1 = 853.5 \frac{1.142^2}{2} (1 - 0.0775^2 + 1.04) = +1135 \text{ Па}. \quad (3.40)$$

Знак «+» вказує, що статичний тиск на цій ділянці падає. Перепад статичного тиску на виході:

$$\Delta p_2 = -853.5 \frac{1.142^2}{2} (1 - 0.0775^2 - 0.8) = -111 \text{ Па}. \quad (3.41)$$

Знак «-» вказує, що статичний тиск на цій ділянці зростає.

Тепер визначимо втрати тиску на тертя в трубах.

При середній температурі стінки, рівній $67,5 - 8,5 = 59^\circ\text{C}$, $\text{Pr}_w = 96,7$.

При середній температурі масла в охолоджувачі $67,5^\circ\text{C}$:

$$\text{Pr}_f = 73.8 \quad \nu_f = 5.75 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{з}; \quad \beta_f = 7.92 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}; \quad \Delta \vartheta_f = 8.5^\circ\text{C};$$

$$\rho_f = 853.5 \text{ кг/ м}^3.$$

Число Грасгофа:

$$\text{Gr}_f = \frac{7.92 \cdot 10^{-4} (5.77 \cdot 10^{-3})^3 9.81 \cdot 8.5}{(5.75 \cdot 10^{-6})^2} = 384 \quad . \quad (3.42)$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_f = \frac{1.142 \cdot 5.77 \cdot 10^{-3}}{5.75 \cdot 10^{-6}} = 1145 \quad . \quad (3.43)$$

Коефіцієнт опору тертя:

$$\zeta_3 = \frac{64}{1145} \left(\frac{96.7}{78.3} \right)^{\frac{1}{3}} \left[1 + 0.22 \left(\frac{384 \cdot 78.3}{1145} \right)^{0.15} \right] = 0.0816 \quad (3.44)$$

При довжині труб для обох ходів масла $l = 2 \cdot 1,94$ м втрати тиску на тертя в трубах:

$$\Delta p_3 = 0.0816 \frac{2 \cdot 1.94}{5.77 \cdot 10^{-3}} \frac{853.5 \cdot 1.142^2}{2} = 30500 \text{ Па.} \quad (3.45)$$

Повне падіння статичного тиску в охолоджувачі з боку масла:

$$\Delta p = 2(\Delta p_1 + \Delta p_2) + \Delta p_3 = 2(1135 - 111) + 30500 = 32548 \text{ Па.} \quad (3.46)$$

Для масляно-повітряного охолоджувача на 100 кВт є отримана експериментальним шляхом залежність $\Delta p = f(Re)$, що дозволяє по числу Re визначити повний перепад статичного тиску з боку повітря Δp , Па:

$$\Delta p = 136 \cdot 10^{-8} Re^2 \quad (3.47)$$

Температура повітря на вході в охолоджувач $\vartheta_1 = 32^\circ\text{C}$.

Середня температура повітря в охолоджувачі

$$\vartheta_k = 67.5 - 18.8 = 48.7^\circ\text{C} \quad (3.48)$$

При $\vartheta_k = 48.7^\circ\text{C}$: $\nu = 18.47 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Прийmemo, що $\omega_1 = 3.04 \text{ м/с}$.

Тоді середня швидкість повітря в охолоджувачі ω_k

$$\omega_k = \omega_1 \frac{T_k}{T_1} \frac{\rho_1}{\rho_1 - \frac{\rho_k}{2}} = 3.04 \frac{273 + 48.7}{273 + 32} \frac{1}{1 - \frac{18 \cdot 10^{-4}}{2}} = 3.2 \text{ м/с.} \quad (3.49)$$

Вище було визначено, що $d_h = 0.0575 \text{ м}$. Число Re :

$$Re = \frac{3.2 \cdot 0.0575}{18.47 \cdot 10^{-6}} = 10000 \quad (3.50)$$

Повний перепад статичного тиску з боку повітря:

$$\Delta p = 136 \cdot 10^{-8} \cdot 10000^2 = 136 \text{ Па.} \quad (3.51)$$

Наступним етапом проектування охолоджувача є вибір насоса й вентилятора, виходячи з умови, щоб вони забезпечували бажану витрату масла й повітря при знайдених значеннях падінь статичного тиску.

3.3 Потужність двигунів насоса й вентилятора

У номінальному режимі потужність двигуна насоса

$$P_{3z} = \frac{1}{\eta_{3z} \eta_m} \frac{\Delta p}{\rho} G_0 \quad (3.52)$$

де η_{3z} – ККД насоса; η_m ККД двигуна насоса;

Δp – падіння статичного тиску з боку масла; ρ – середня щільність масла; G_0 – масова витрата масла.

Нехай $\eta_{3z} = 0.7$; $\eta_m = 0.75$; $\Delta p = 32548 \text{ Па}$; $\rho = 853.5 \text{ кг/м}^3$; $G_0 = 9.75 \text{ кг/с}$.

Тоді згідно (4-19)

$$P_v = \frac{1}{0.7 \cdot 0.75} \frac{32548}{853.5} 9.75 = 707 \text{ Вт.} \quad (3.53)$$

Сумарна потужність двигунів двох вентиляторів

де η_v – ККД вентилятора; η_m – ККД. двигуна вентилятора; Δp – повне падіння статичного тиску з боку повітря; ρ – середня щільність повітря; G_1 – масова витрата повітря;

$$\Delta p = \Delta p' + \Delta p'' \quad (3.54)$$

$\Delta p'$ – падіння статичного тиску повітря на вході у вентилятор; $\Delta p''$ – повне падіння статичного тиску повітря в охолоджувачі. Нехай $\eta_{3z} = 0.6$; $\eta_m = 0.7$; $\Delta p' = 54 \text{ Па}$; $\Delta p'' = 136 \text{ Па}$; $\rho = 1.06 \text{ кг/м}^3$; $G_1 = 2.875$. Тоді

$$P_v = \frac{1}{0.6 \cdot 0.7} \frac{54 + 136}{1.06} 2.875 = 1220 \text{ Вт} . \quad (3.55)$$

3.4 Опис програмного забезпечення Fluent

Коли люди думають про обчислювальну гідро-газодинаміку, відразу приходить на розум назва FLUENT. Широкі фізичні здатності моделювання FLUENT були застосовані до індустріальних потреб у межах від вентиляційного струменя по крилу літака до згоряння в печі, від моделювання міхура до виробництва скла, від потоку крові до виробництва напівпровідника, від чистого проекту кімнати до заводів обробки стічних вод. Здатність цього програмного забезпечення моделювати циліндри двигунів, аероакустику, турбомашини, і багатофазні системи вражає своєю простотою. Сьогодні тисячі компаній в усьому світі користуються цим важливим технічним проектом та інструментом аналізу. Його великий діапазон здатностей мультифізики робить FLUENT самим багатогранним програмним забезпеченням доступним для співтовариства обчислювальної гідро-газодинаміки. Також дуже важлива першокласна технічна підтримка, від початкового навчання до тривалих відносин, які розвиваються між клієнтами й штатом корпорації FLUENT.

У ядрі будь-якого обчислення гідро-газодинаміки стоїть обчислювальна сітка, використовувана щоб розділити область рішення на тисячі або мільйони елементів, де шукані змінні обчислені й збережені.

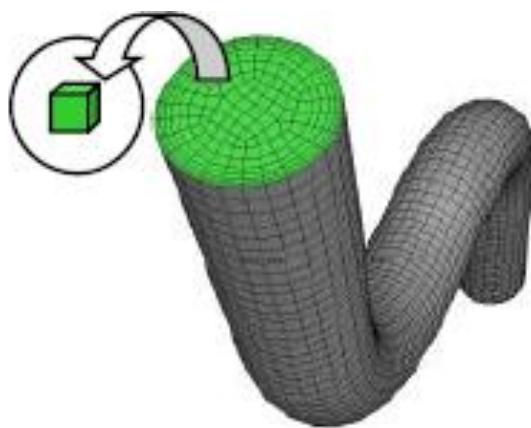


Рисунок 3.4 - Неструктурована сітка Fluent

У неструктурованій сітці FLUENT використовується технологія, що дозволяє сітці складатися з елементів у повній розмаїтості форм: чотирикутники й трикутники для двовірних моделювань, а так само призми і піраміди для тривимірних моделювань. Створення й використання цих елементів автоматизовано в засобі керування Gambit - супутньому препроцесорі FLUENT. Він дозволяє взаємозв'язати форму сітки по всьому об'ємі, де має місце аналіз потоку рідини або повітря. На комерційному ринку обчислювальної гідро-газодинамики сьогодні ніякий інший постачальник не пропонує більш складні фізичні моделі на неструктурованій сітці. Складні чисельні дані й алгоритми рішення гарантують точні результати. Нова неповторювана схема просування часу відчутно скоротила час розрахунку для перехідних моделювань. Здатності паралельної обробки, доступні на NT, Linux, і платформах Unix, можуть використатися на декількох процесорах однієї машини або багатьох машинах у мережі. Динамічний розподіл навантаження, що балансує автоматично, виявляє й аналізує паралельну роботу й регулює розподіл обчислювальних осередків серед процесорів так, щоб загальне навантаження було розділено центральними процесорами порівну.

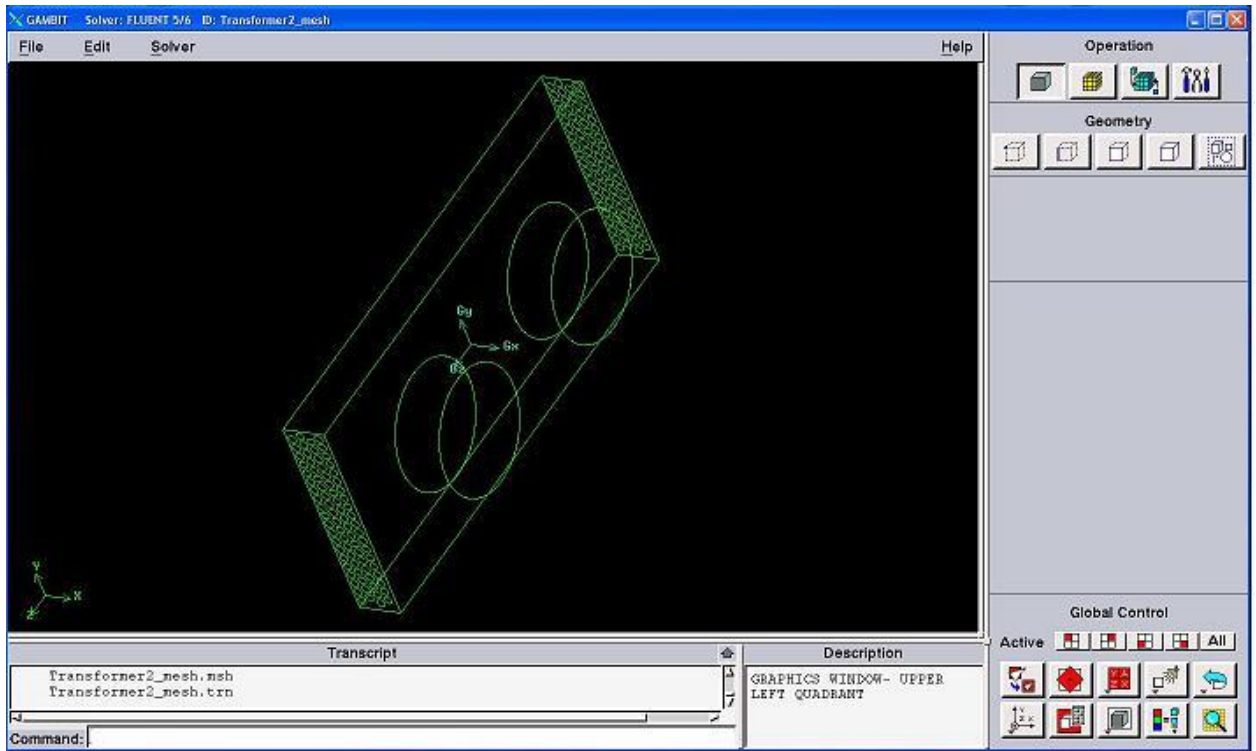


Рисунок 3.5 - Модель охолоджувача трансформатора без структурної сітки

FLUENT завжди був лідером у комерційному програмному забезпеченні обчислювальної гідро-газодинамики, пропонуючи безпрецедентну кількість моделей. Доступні також кілька версій часто використовуваної k-моделі турбулентності, зокрема Reynolds-модель напруги (RSM) для анізотропних потоків. Недавні збільшення потужності комп'ютерної техніки разом зі зменшеннями їхньої вартості дало можливість зробити велике моделювання вихрів та зробити окреме моделювання буревію. Гнучкість моделей дозволяє змоделювати потік з будь-якими характеристиками. Граничні функції й збільшена кількість граничних варіантів обробки враховують усіляке подання всіх прикордонних потоків. Аероакустика - важливий центр для багатьох індустріальних потреб, але традиційно важка в моделюванні. В FLUENT шуми, що виходять із нестійких коливань тиску можуть тепер бути обчислені декількома способами. Перехідні процеси для поверхневого тиску можуть бути перетворені в спектр частот, використовуючи вбудовану опцію Фур'є-перетворень. Моделі джерела широкополосного шуму дозволяють

оцінити акустичні джерела, це - практичні інструменти для того, щоб швидко оцінити будь-які модифікації проекту.

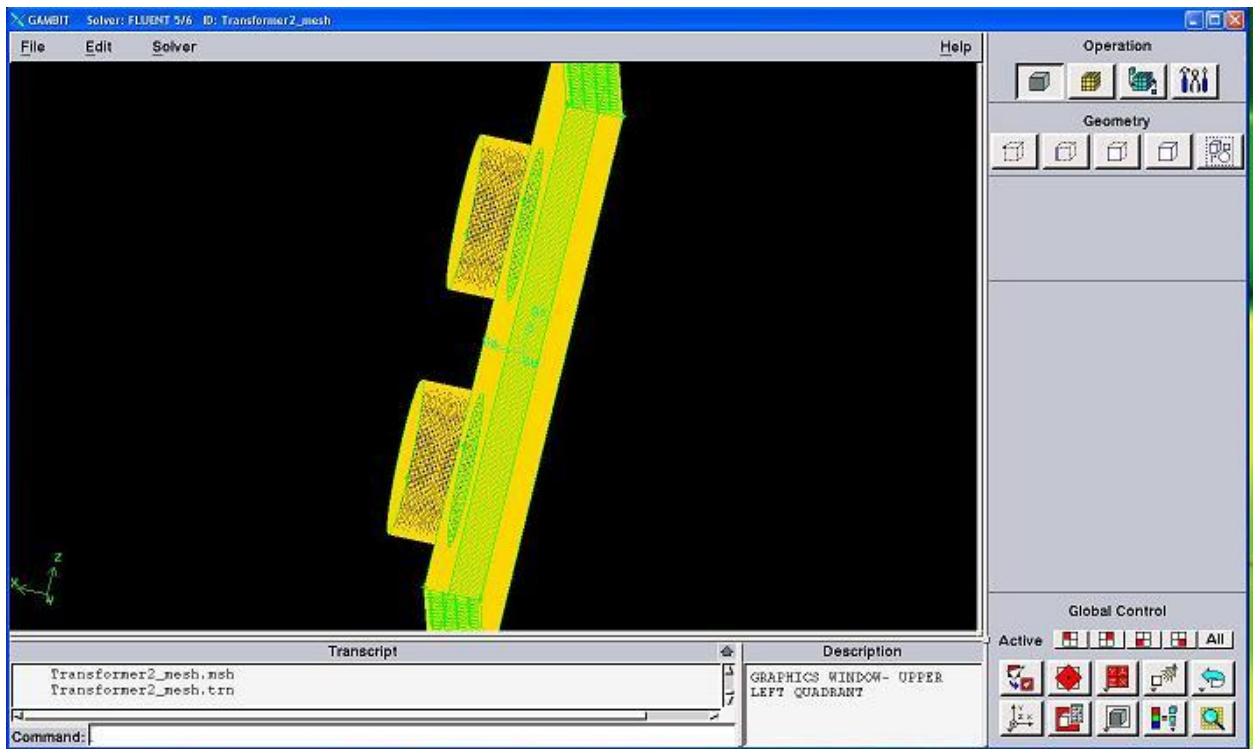


Рисунок 3.6 - Модель охолоджувача трансформатора з структурною сіткою

Так як теплопередача містить у собі багато різних варіантів потоку рідини, FLUENT пропонує всебічний набір варіантів для конвекції, тепло провідності, і радіації. Для радіації також доступні моделі Росселанда. Моделювання дискретних ординат задовільне для будь-якого середовища. Сонячна модель навантаження використовує алгоритм променя, що простежується, і включає в себе сонячний калькулятор. Це враховує візуалізацію освітлених і затінених областей, висуваючи результати моделювання контролю клімату на більше високий рівень. Інші здатності, близько пов'язані з теплопередачею включають моделі для кавітації, стиснутих рідин, теплообмінників, реальних газів і вологої пари. Пряме доповнення джерел високої температури й повного набору теплових

варіантів граничними умовами теплопередачі робить FLUENT надійним інструментом для рішення будь-якого набору завдань.

Програмовані користувачем функції - популярний вибір для користувачів, що бажають настроїти FLUENT. Всебічна документація й безліч навчальних програм доступна, точно так само як і повна технічна підтримка. Глобальна консультаційна мережа FLUENT може забезпечити допомогу при створенні шаблону для повторної установки будь-якого типу встаткування.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Розділ бакалаврської роботи присвячений дотримання вимог охорони праці під час монтажу та обслуговуванню повітряних ліній електропередач в електричних мережах. На оперативно-ремонтний персонал, що здійснює експлуатації системи електропостачання, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [1, 2]:

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

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

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

4.1 Технічні рішення з безпечної організації будівельно-монтажних робіт

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Експлуатація пристроїв компенсації реактивної потужності передбачає розробку та експлуатацію системи автоматичного управління ними. Для убезпечення робіт, що їх провадять в колах вимірювальних приладів і пристроїв релейного захисту, всі вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму і напруги слід постійно заземлювати. За

необхідності розриву кола струму вимірювальних приладів і реле кола вторинної обмотки трансформатора струму попередньо закорочується на спеціально призначених для цього затискачах.

Розривати кола, підключені до вторинної обмотки трансформатора струму, забороняється. За необхідності розриву цих кіл вони мають бути попередньо замкнуті перемичкою, встановленою до передбачуваного місця розриву (рахуючи від трансформатора струму). Під час встановлення перемички слід застосовувати інструмент з ізолювальними рукоятками.

Під час роботи на трансформаторах струму або в колах, підключених до їх вторинних обмоток, слід виконувати такі заходи безпеки: зажими вторинних обмоток до закінчення монтажу кіл, що до них підключаються, мають бути замкнені накоротко. Після приєднання змонтованих кіл до трансформатора струму закоротку слід переносити на найближчу збірку затискачів і знімати тільки після повного закінчення монтажу та перевірки правильності приєднання змонтованих кіл; під час перевірки полярності до подавання імпульсів струму в первинну обмотку прилади слід приєднувати до затискачів вторинної обмотки. Забороняється використовувати шини первинних обмоток як струмопровідні під час монтажних та зварювальних робіт.

Робота в колах пристроїв релейного захисту, електроавтоматики і телемеханіки (РЗАіТ) проводиться за виконавчими схемами. Під час робіт в пристроях РЗАіТ слід користуватися слюсарно-монтажним інструментом з ізолювальними рукоятками.

Під час перевірки кіл вимірювання, сигналізації, керування і захисту за необхідності в приміщенні електроустановок напругою понад 1000 В дозволяється залишатися одному члену бригади за умовами роботи (наприклад, регулювання вимикачів, перевірка ізоляції); працівник, який перебуває окремо від керівника робіт, повинен мати групу III. Під час робіт в колах трансформаторів напруги з подачею напруги від стороннього джерела знімаються запобіжники з боку вищої і нижчої напруги, а також

відключаються автомати від вторинних обмоток.

За необхідності проведення будь-яких робіт в колах чи на апаратурі РЗАіТ за умови ввімкненого основного обладнання слід вжити додаткових заходів щодо запобігання його випадковому відключенню. Забороняється на панелях або поблизу місця розміщення релейної апаратури провадити роботи, які викликають сильний струс релейної апаратури, що може спричинити до помилкових дій реле.

Перемикання, вмикання і вимикання вимикачів, роз'єднувачів та іншої комутаційної апаратури, пускання і зупинення агрегатів, регулювання режиму їх роботи, необхідні під час налагодження або перевірки пристроїв РЗАіТ, провадять тільки оперативні працівники.

Записувати покази електролічильників та інших вимірювальних приладів, встановлених на щитах керування і в РУ, дозволяється:

- одноособово працівникам з групою II за наявності місцевих оперативних працівників (з чергуванням двох осіб) і з групою III — без місцевих оперативних працівників;
- працівникам інших організацій з групою III у супроводі місцевого оперативного працівника.

Встановлення і зняття електролічильників та інших вимірювальних приладів, підключених до вимірювальних трансформаторів, повинні провадити за нарядом зі зняттям напруги два працівники, один з яких повинен мати групу IV, а другий — групу III. За наявності в колах електролічильників контактів (блоків), що дозволяють працювати без розмикання кіл, підключених до вторинних обмоток трансформатора струму, ці роботи можна виконувати за розпорядженням, не знімаючи напруги зі схеми електролічильника. За відсутності вказаних контактів напругу і струм в колах електролічильника слід відключити.

Приєднання вимірювальних приладів, встановлення і зняття електролічильників, підключених до вимірювальних трансформаторів, за наявності випробувальних блоків або спеціальних затискачів, що дають

змогу безпечно закорочувати кола струму, виконуються без зняття навантаження і напруги. Встановлення і зняття електролічильників безпосереднього ввімкнення допускається провадити за розпорядженням одному працівнику з групою III. Встановлення і зняття електролічильників, а також приєднання вимірювальних приладів виконуються зі зняттям напруги.

Роботи з електролічильниками на різних приєднаннях, розміщених в одному приміщенні, можна виконувати за одним нарядом (розпорядженням). Оформлення в наряді переходу з одного робочого місця на інше не вимагається.

4.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання підприємства та систем освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В), з'єднаної з силовим трансформатором. Категорія умов за небезпекою електротравматизму – підвищеної небезпеки, у зв'язку з наявністю на об'єктах, що будуються та реконструюються, струмопровідної підлоги.

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам: для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно:

- розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні – написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

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

нульового захисного провідника.

- електрозахисні засоби захисту. Електротехнічний персонал повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Забороняється користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов.

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

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

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Мікроклімат приміщення – це сукупність фізичних параметрів повітря в виробничому приміщенні, які діють на людину в процесі праці на її робочому місці, в робочій зоні. Параметри мікроклімату характеризуються такими показниками: температурою повітря і відотною вологістю повітря, швидкістю його переміщення, потужністю теплових випромінювань. При цьому слід розрізняти оптимальні та допустимі мікрокліматичні умови.

Допустимі мікрокліматичні умови – поєднання кількісних показників

мікроклімату, які при тривалому та систематичному впливові на людину можуть викликати скороминучі зміни, що швидко нормалізують тепловий стан організму, і які супроводжуються напруженням механізмів терморегуляції, не виходячи за межі фізіологічних пристосувальних можливостей. При цьому виникає пошкодження або порушення стану здоров'я, але можуть спостерігатися дискомфортні тепловідчуття, погіршення самопочуття та зниження працездатності. Допустимі величини показників мікроклімату встановлюють тоді, коли за технологічними умовами, технічними і економічними причинами не забезпечуються оптимальні норми.

Нормуються параметри мікроклімату в виробничих приміщеннях та гранично допустимі концентрації шкідливих речовин в повітрі робочої зони. Тяжкість роботи розділяється на категорії залежно від загальних енерговитрат організму, ккал/с (Вт). Параметри мікроклімату в приміщенні наведено в таблиці 4.1.

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату на робочому місці оператора крану передбачається: в холодну пору року – використання калорифера; в літню пору – застосування кондиціонерів та вентиляторів обдуву, провітрювання приміщень.

Таблиця 4.1 – Нормування параметрів мікроклімату на непостійних робочих місцях

Період року	Категорія робіт	Температура, °C	Відносна вологість, %	Швидкість руху, м/с
Теплий	ІІб	15-29	70 при 25°C	0,2-0,5
Холодний	ІІб	13-23	не більш 75	не більш 0,4

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується концентраціями (ГДК) в мг/м. В умовах роботи на граничнодопустимих концентраціях

можливими забруднювачами повітря робочої зони можуть бути пил та шкідливі гази, їх ГДК наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони

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

Для забезпечення складу повітря робочої зони передбачено: провітрювання приміщень; встановлення пиловловлюючих засобів.

4.2.3 Виробниче освітлення

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

Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Норми при штучному, природньому та суміщеному освітленні наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення виробничих приміщень

Харак-ка зорової роботи	Найменши й або еквівалент-ний розмір об'єкта розрізненн я, мм	Розря д зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характе-ристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природн є Ен пр	Сумісне Е сум
						всьог о	у т. ч. від загального		
Середнь ої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий середні й великий	світлий середні й темний	400	200	4	2,4

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне

очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп [E25 LED 15W NW A50 "SG"](#). Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

При експлуатації здійснюється контроль за рівнем напруги освітлювальної мережі, своєчасна заміна перегорілих ламп, забезпечується чистота повітря у приміщенні.

4.2.4 Виробничий шум

Для відносної логарифмічної шкали в якості нульових рівнів обрані показники, що характеризують мінімальний поріг сприйняття звуку людським вухом на частоті 1000 Гц. Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є «ССБТ. Шум Загальні вимоги безпеки». Норми звукового тиску на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Рівень звукового тиску

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

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту – «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі (ширми, екрани тощо).

- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

4.3 Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують «Правила пожежної безпеки в Україні» та інші правила пожежної безпеки для промислових підприємств і окремих об'єктів [11, 12]. Визначення пожежо- вибухонебезпечності речовин і матеріалів здійснюється за рекомендаціями [13], а, відповідно, категорії приміщень, будинків та зовнішніх установок, де вони використовуються, зберігаються тощо, за [14].

Приміщення підстанції за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-ІІІ (місця, де зберігаються тверді горючі речовини – зерно, борошно тощо).

Будівлі, в якій розташовані ці приміщення, характеризується ІІ-ІV ступенем вогнестійкості. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 7.5.

Межі вогнестійкості самонесучих стін, які враховуються в розрахунках жорсткості та стійкості будинку, приймають, як для несучих стін. Будівельні конструкції класифікують за вогнестійкістю та здатністю поширювати вогонь. Показником вогнестійкості є межа вогнестійкості конструкції, що

визначається часом (у хвилинах) від початку вогневого випробування за стандартним температурним режимом до настання одного з граничних станів конструкції:

- втрати несучої спроможності (R);
- втрати цілісності (E);
- втрати тепло та ізолювальної спроможності (I).

Таблиця 4.5 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площі, сходи, балки, марші сходових кліток	перекриття між поверхами (у т.ч. горищі та надпідвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, настили, прогни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0, E 30, M1	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	
IV	REI 30 M1	REI 15 M1	E 15 M1	E1 15 M1	R 30 M1	R 15 M1	REI 15 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за таблицею 4.7 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 4.7. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських, сільськогосподарських будинків і споруд слід приймати за таблицею 4.7 (знаменник).

Таблиця 4.7 Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків, сільськогосподарських будівель і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IIIa, IIIб, IV, IVa, V
I, II	6/9	8/9	10/12
III	8/9	8/12	10/15
IIIa, IIIб, IV, IVa, V	10/12	10/15	15/18

На території підстанції на кожному з об'єктів потрібно встановити від 2 до 5 вогнегасників ВП-5, ВВП-5 або аналогічних ємністю 6 або 9 л.

Висновки

Підвищення технічного рівня трансформаторів, пов'язане з розв'язанням таких проблем, як: застосування для магнітних систем високоякісних марок електротехнічних сталей з питомими втратами на рівні 1 Вт/кг і нижче, впровадження в конструкцію магнітних систем сучасних схем шихтовки, включаючи повну схему "степ-лєп", впровадження для трансформаторів 110 кВ здійснюваного в спеціальних камерах вакуумного заливання активних частин трансформаторним маслом у власних баках, використання в багатопаралельних обмотках емальпроводів прямокутного перерізу, впровадження технології, що забезпечує стабілізацію висоти обмоток, застосування для обмоток, які стискаються у випадку КЗ, циліндрів із склопластику, застосування пресувальних кілець із склопластику або твердого електрокартону, впровадження сучасних конструкцій пристроїв РПН (РПН - перемикальний пристрій регулювання напруги під навантаженням), зниження додаткових втрат в елементах конструкцій трансформаторів, підвищення ефективності систем охолодження, більш широке використання трьохобмоткових трансформаторів із зниженими потужностями обмоток СН та НН. Актуальність вирішення проблеми зниження витрат під час експлуатації силових трансформаторів зумовлена тим, що створення досконалих конструкцій трансформаторів, які не вимагають капітального ремонту (огляду активної частини, підпресування обмоток тощо) протягом всього терміну експлуатації, дозволить суттєво знизити витрати під час їх експлуатації, адже вартість капітального ремонту трансформатора становить більше 50% його ціни.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Безпека в енергетиці - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.centrenerg.com/newsroom/news/item_39/
2. Бондаренко Є. А. Навчальний посібник до розділу «Охорона праці» в магістерських кваліфікаційних роботах для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка : навч. посібник / Бондаренко Є. А., Кутін В. М., Лежнюк П. Д. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 120 с.
3. Методичні вказівки до виконання розділу з охорони праці в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього ступеня бакалавра галузі знань 14 «Електрична інженерія» / уклад.: С. В. Дембіцька, І. М. Кобилянська, О. В. Кобилянський. – Вінниця: ВНТУ, 2022. – 65 с.
4. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міненерговугілля України. - Х. : Видавництво «Форт», 2017. - 760 с.
5. Притака І.П., Козирський. Електропостачання сільського господарства -К.: Вища школа 1995.
6. Методичні вказівки по розрахунку і підбору пристрою компенсації реактивної потужності. Фірми «СВ АЛЬТЕРА». 2008.
7. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0093-98#Text>.
8. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів: НПАОП 40.1-1.21-98: Затв. 09.01.1998 № 4 /Держ. Комітет України по нагляду за охороною праці. Київ, 2008. 150 с.
- 9 Бондаренко Є. А., Кутін В. М., Лежнюк П. Д. Навчальний посібник до розділу «Охорона праці» в магістерських кваліфікаційних роботах для студентів спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Навчальний посібник. Вінниця, ВНТУ, 2018. 46 с. 70
10. Положення про кваліфікаційні роботи на першому (бакалаврському) рівні вищої освіти. СУЯ ВНТУ-03.02.02-П.001.01:21 / А. О. Семенов, Л. П. Громова, О. В.

11. Лежнюк П.Д., Собчук Н.В., Слободянюк О.В. Локальні електроенергетичні системи: Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2017. 141 с.
12. Хмельницький Є.Д., Крупник О.О. Електропостачання промислових підприємств (Частина 2): Навчальний посібник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016. 126 с.
13. Лежнюк П.Д., Комар В.О. Регулювання напруги в електричних системах. Навчальний посібник. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 171 с.
14. Попов В.А., Ткаченко В.В., Ярмолюк О.С. Ефективне керування режимами систем забезпечення споживачів електричною енергією: Навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 163 с.
15. Хмельницький Є.Д., Крупник О.О. Електропостачання промислових підприємств (Частина 1): Навчальний посібник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016. 120 с.
16. Masiokas, S. Elektrotechnika. Kaunas: Candela. 1994. 431 p.
17. Weedy, B.M. Electric Power Systems Second Edition. John Wiley and Sons, London, 1972. 149 p.
18. Сінчук І. О., Бойко С. М. /; під ред. Сінчука О. М. Системи накопичення електричної енергії : підручник. Кривий Ріг : [б. в.], 2020. 218 с.
19. Офіційна web-сторінка фірми IEA. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.iea.org/analysis>.
20. Liudvinavičius, L. Compensation of Reactive Power of AC Catenary System. Procedia Engineering. 10th International Scientific Conference Transbaltica 2017: Transportation Science and Technology. 2017. P. 185-197.

ДОДАТОК А
ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ
ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Підвищення ефективності використання трансформаторів в
електричних системах

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра електричних станій та систем, факультет електроенергетики
та електромеханіки
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 94,3 % Схожість 5,7 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ✓ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку
(підпис)

Вишневецький С.Я.
(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи

Витиш
(підпис)

Вихристюк В. В.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

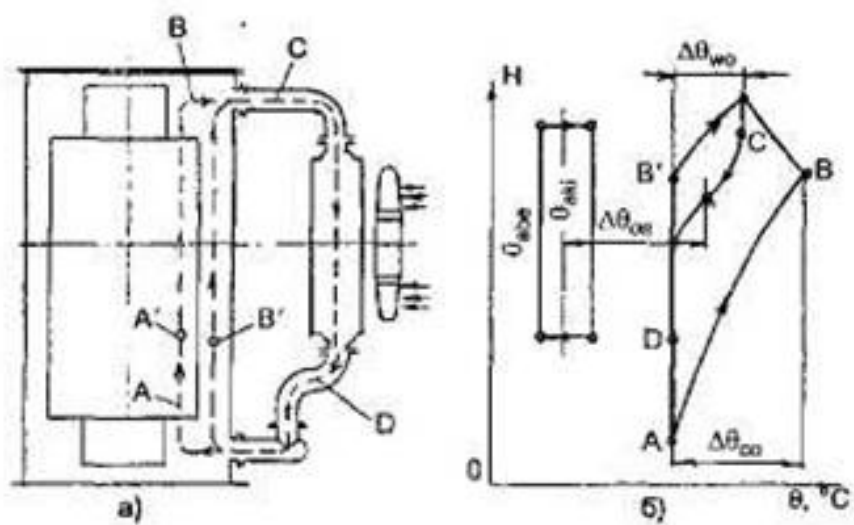
О.Х.
(підпис)

Казьмірук О. І.
(прізвище, ініціали)

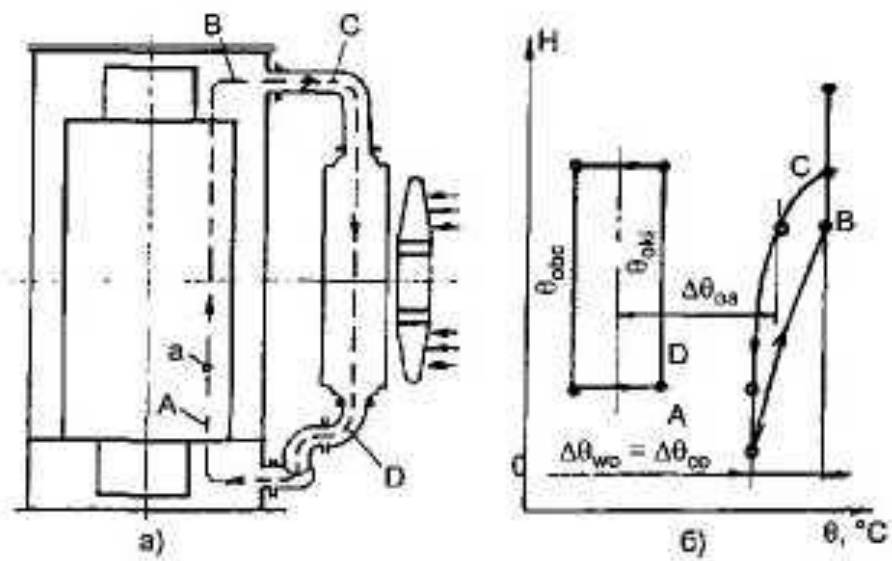
Додаток Б
Ілюстративний матеріал

Види систем охолодження

Вид системи охолодження трансформатора	Позначення системи	
	За ГОСТ 11677—85	Охолодження по МЕК
Природна циркуляція повітря й масла	М	ONAN
Примусова циркуляція повітря й природна циркуляція масла	Д	ONAF
Природна циркуляція повітря й примусова циркуляція масла з ненаправленим потоком масла	МЦ	OFAN
Природна циркуляція повітря й примусова циркуляція масла зі спрямованим потоком масла	НМД	ODAN
Примусова циркуляція повітря й масла з ненаправленим потоком масла	ДЦ	OFAF
Примусова циркуляція повітря й масла зі спрямованим потоком масла	НДЦ	ODAF
Примусова циркуляція води й масла з ненаправленим потоком масла	Ц	OFWF
Примусова циркуляція води й масла зі спрямованим потоком масла	НЦ	ODWF



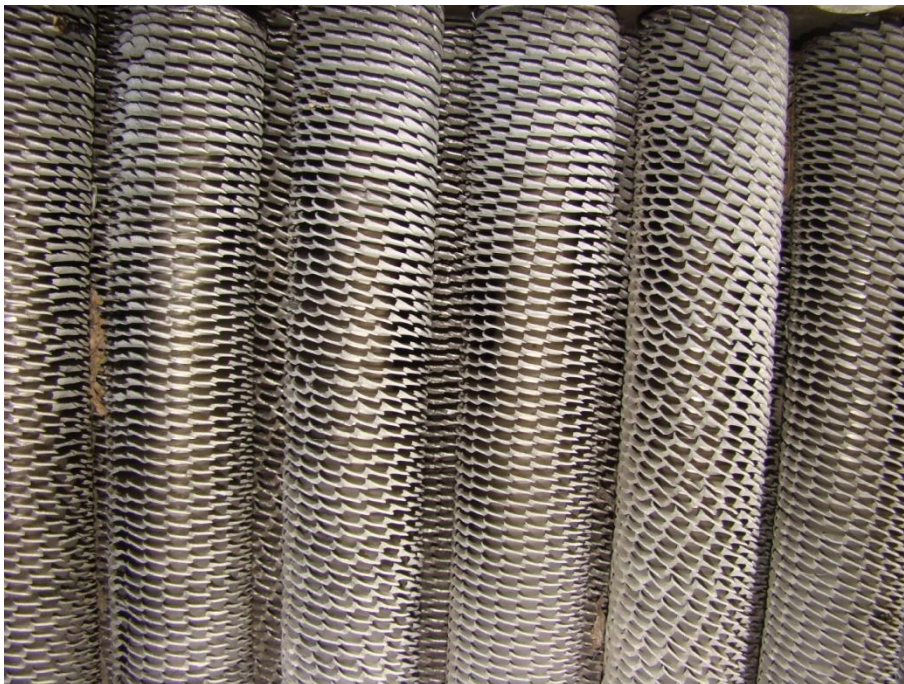
Принципова схема охолодження трансформатора при примусовій циркуляції масла й повітря



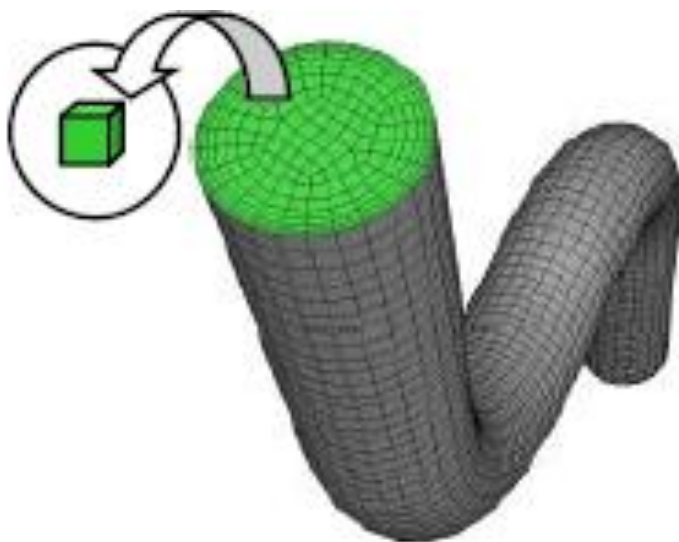
Принципова схема охолодження трансформатора при спрямованій циркуляції масла

Граничні значення температури й струму для режимів навантаження, що
перевищує номінальну

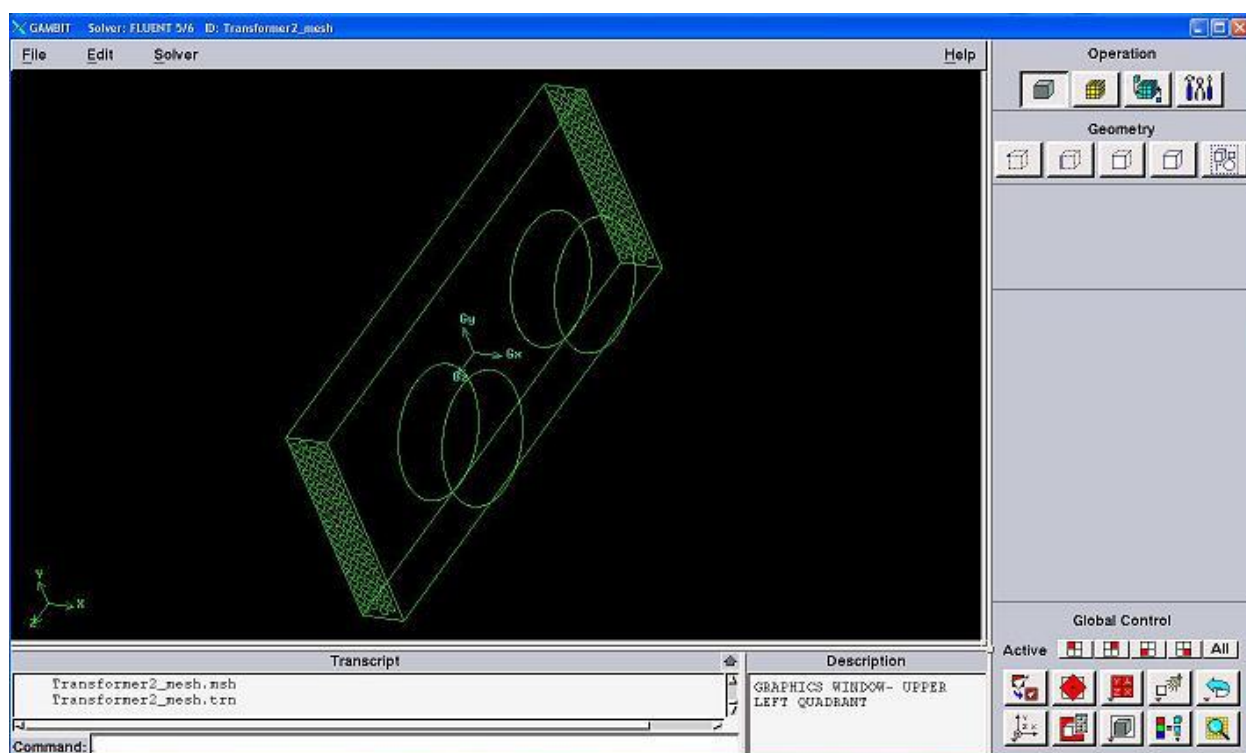
Тип навантаження	Трансформатори		
	Розподільні	Середньої потужності	Великої потужності
Режим систематичних навантажень			
Струм, від. од.	1,5	1,5	1,3
Температура найбільш нагрітої точки й металевих частин, що стикаються з ізоляційним матеріалом, °C	140	140	120
Температура масла у верхніх шарах, °C	105	105	105
Режим тривалих аварійних перевантажень			
Струм, від. од.	1,8	1,5	1,3
Температура найбільш нагрітої точки й металевих частин, що стискаються з ізоляційним матеріалом, °C	150	140	130
Температура масла у верхніх шарах, °C	115	115	115
Режим короточасних аварійних перевантажень			
Струм, від. од.	2,0	1,8	1,5
Температура найбільш нагрітої точки й металевих частин, що стикаються з ізоляційним матеріалом, °C	По 1.5. 2	160	160
Температура масла у верхніх шарах, °C	По 1.5. 2	115	115



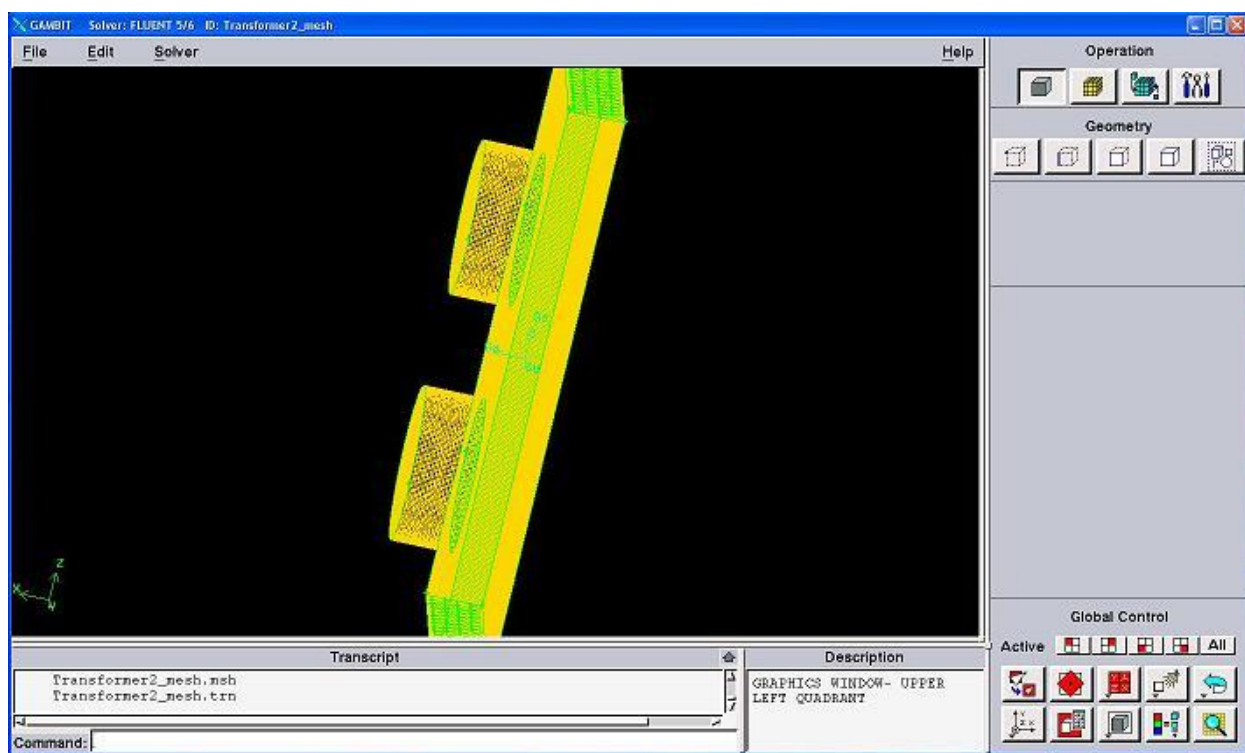
Охолоджувач трансформатора АТДЦТН-125000/330/110/35-77-У-1



Неструктурована сітка Fluent



Модель охолоджувача трансформатора без структурної сітки



Модель охолоджувача трансформатора з структурною сіткою