

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Ю.М.ПОТЕБНІ  
КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

**Кваліфікаційна робота**

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження гідродинамічних процесів в каналах дискових  
обмоток силового трансформатора

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1440-з  
спеціальності теплоенергетика

(код і назва спеціальності)

освітньої програми теплоенергетика

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

\_\_\_\_\_ (код і назва спеціалізації)

Павлов Андрій Валерійович

(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доцент Ільїн С.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент проф. д.т.н. Банах В.А.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя  
2021

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики  
 Рівень вищої освіти другий магістерський  
 Спеціальність 144 Теплоенергетика  
(код та назва)  
 Освітня програма Теплоенергетика  
(код та назва)  
 Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
 « 21 » грудень 2021 року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Павлов Андрій Валерійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Дослідження гідродинамічних процесів в каналах дискових обмоток силового трансформатора  
 керівник роботи Ільїн Сергій Віталійович, к.т.н., доцент,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «30» червня 2021 року № 975-с

2 Строк подання студентом роботи 15 грудня 2021 р.

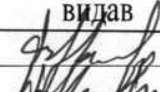

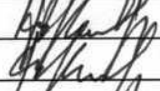
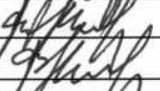
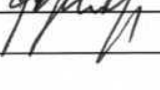
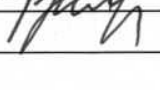
3 Вихідні дані до роботи Геометричні параметри системи теплового захисту силового обладнання. Теплофізичні властивості охолодної речовини.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Поле швидкостей течії охолоджуючого середовища в масляних каналах трансформатора. Особливості руху охолоджуючої рідини в горизонтальному каналі. Техніка безпеки та охорони праці

Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Контур руху охолоджуючої рідини в каналі. Графіки залежності швидкості течії масла від розташування котушки.



## 6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Ільїн С.В.		
2	Ільїн С.В.		
3	Ільїн С.В.		

## 7 Дата видачі завдання 05 травня 2021 р

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Сучасний стан питання	05.05.2021	<i>виконано</i>
2	Дослідження гідродинамічних процесів в каналах дискових обмоток силового трансформатора	01.08.2021	<i>виконано</i>
3	Охорона праці	05.11.2021	<i>виконано</i>
4	Оформлення пояснювальної записки	01.12.2021	<i>виконано</i>
5	Підготовка презентації	10.12.2021	<i>виконано</i>

Студент  (підпис)А.В. Павлов  
(ініціали та прізвище)Керівник роботи (проєкту)  (підпис)С.В. Ільїн  
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер  (підпис) (ініціали та прізвище)С.Є. Чижов

## АНОТАЦІЯ

Павлов А.В. Дослідження гідродинамічних процесів в каналах дискових обмоток силового трансформатора.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник к.т.н., доцент Ільїн С.В. Запорізький національний університет. Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2021.

В роботі розглянуто питання підвищення ефективності систем теплового захисту силового обладнання.

Ключові слова: силове обладнання, охолоджуюча рідина, горизонтальний канал, техіка безпеки та охорона праці.

## ABSTRACT

Pavlov A.V. Investigation of hydrodynamic processes in the channels of disk windings of a power transformer.

Qualification final work for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Heat Power Engineering, Supervisor Ph.D., Associate Professor Ilin S.V. Zaporizhzhia National University. Department of Heat and Hydropower, 2021.

The issue of increasing the efficiency of thermal protection systems of power equipment is considered in the work.

Keywords: power equipment, coolant, horizontal channel, safety and labor protection.

## ЗМІСТ

### ВСТУП

### 1 ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ. ПОНЯТТЯ, ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ, КЛАСИФІКАЦІЯ

1.1 Роль трансформаторних підстанцій в електроенергетиці

1.2 Засоби підвищення ефективності роботи трансформаторної підстанції

### 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В КАНАЛАХ ДИСКОВИХ ОБМОТОК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

2.1 Загальна характеристика системи захисту від перенапруг за обриву вторинного кола трансформатора струму

2.2 Течія в'язкої нестисливої рідини

2.3 Рівняння прикордонного шару при плоскому плинні

2.4 Контур природної циркуляції масла в каналах обмоток

2.5 Поле швидкостей течії охолоджуючого середовища в масляних каналах трансформатора

2.6 Характер руху масла в горизонтальному каналі при швидкості течії охолоджуючої рідини, необхідної для організації ефективного відводу теплоти від дискових котушок трансформатора

2.7 Особливості руху охолоджуючої рідини в горизонтальному каналі

### 3 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ

3.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів в лабораторії

3.2 Заходи з усунення шкідливих та небезпечних факторів

3.3 Виробнича санітарія

3.4 Техніка безпеки в лабораторії

3.5 Пожежна безпека в лабораторії

3.6 Дослідження ефективності та якості освітлення

ВИСНОВКИ

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛЬ ПОСИЛАНЬ

## ВСТУП

Електричні мережі сьогодні, як павутина, обплутують всі населені пункти. По ним в будинки та на підприємства надходить енергія, необхідна для роботи різного обладнання, освітлення, функціонування систем клімат-контролю та іншої техніки. Однак, сучасні прилади дуже чутливі до перепадів напруги і якщо у мережі такі ситуації трапляються часто, то доводиться шукати способи їх усунення. Для цього використовується спеціальне обладнання, яке входить в пристрій трансформаторної підстанції. Застосовується воно для міських районів, господарських об'єктів та інших споживачів [1].

У сучасному суспільстві жодна галузь промисловості та народного господарства не обходиться без електрики. Вона необхідна для створення комфортних умов для жителів міст та сіл, роботи різного роду обладнання та техніки. Але для того, щоб забезпечити електроенергією райони, віддалені від основних мереж, використовують трансформаторні підстанції.

## 1 ТРАНСФОРМАТОРНІ ПІДСТАНЦІЇ. ПОНЯТТЯ, ОСНОВНІ ЕЛЕМЕНТИ, КЛАСИФІКАЦІЯ

Трансформаторна підстанція (ТП) – це електроенергетичний об'єкт, який служить для зменшення чи підвищення напруги змінного струму і для розподілу електроенергії [2].

До складу трансформаторної підстанції входять:

- Силовий трансформатор чи автотрансформатор. Використовують щоб забезпечити безпеку електроенергії, вони здатний перетворити одну систему трифазного струму в іншу;
- Вимірювальні трансформатори струму та напруг;
- Розподільчі установки. Вони розподіляють вхідну електроенергію по окремих ланцюгах, тим самим зменшуючи напругу в головному ланцюзі;
- Системи захистів, автоматики, управління, сигналізації, вимірювання [3].

Для класифікації трансформаторних підстанцій використовують різні характеристики. Наприклад, якщо брати до уваги вид зміни електричної енергії, то трансформаторні підстанції бувають:

- Підвищувальні трансформаторні підстанції (споруджувані зазвичай при електростанціях) перетворюють напругу, що виробляється генераторами, у вищу напругу (одного або декількох значень), необхідну для передачі електроенергії по лініях електропередачі (ЛЕП).
- Знижувальні трансформаторні підстанції перетворюють первинну напругу електричної мережі в нижчу вторинну.

Залежно від призначення і від величини первинної і вторинної напруги знижувальні трансформаторні підстанції підрозділяються на районні, головні знижувальні і місцеві (цехові).



Районні трансформаторні підстанції приймають електроенергію безпосередньо від високовольтних ЛЕП і передають її на головні знижувальні ТП, а ті (знизивши напругу до 35, 10 або 6 кВ) — на місцеві і цехові підстанції, на яких здійснюється останній рівень трансформації (з пониженням напруги до 660, 400 або 230 В) і розподіл електроенергії між споживачами.

В залежності від місця і способу приєднання трансформаторні підстанції до електричної мережі нормативні документи не встановлюють класифікації підстанцій. Однак ряд джерел дає класифікацію виходячи із застосування типів конфігурацій мережі та можливих схем приєднання:

- Тупикові — живлення по одній або двом радіальним лініям.
- Відгалужувальні — приєднуються до однієї або двох ліній на відгалуженнях.
- Прокідні — підключаються до мережі шляхом заходу однієї лінії з двохстороннім живленням.
- Вузлові — підключаються до мережі не менше ніж трьома лініями живлення.

Відгалужувальні та прохідні трансформаторні підстанції об'єднують поняттям проміжні, яке визначає розміщення підстанції між двома центрами електроживлення або вузловими підстанціями.

Прокідні і вузлові підстанції, через шини яких здійснюються перетоки потужності між вузлами мережі, називають транзитними.

Також використовується термін опорна підстанція, який як правило позначає підстанцію більш високого класу напруги по відношенню до розглянутої трансформаторної підстанції або мережі.

Також трансформаторні підстанції розділяють на підстанції відкритого і закритого типу.

Закрита трансформаторна підстанція — ТП, обладнання якої розміщене в приміщенні або в металевій оболонці.

Прибудована трансформаторна підстанція — закрита трансформаторна підстанція, що має тільки один будівельний елемент, спільний з суміжними приміщеннями (стіну, перегородку або підлогу, що є перекриттям суміжного приміщення знизу).

Вбудована трансформаторна підстанція має два або більше будівельних елементів, спільні з суміжними приміщеннями.

Щоглова трансформаторна підстанція (ЩТП) — трансформаторна підстанція (у тому числі в конструктивному виконанні КТП), все устаткування якої встановлене на конструкціях (або опорі повітряної лінії електропередач (ПЛ) просто неба на висоті, що не потребує наземного огороження).

Вибухозахищена трансформаторна підстанція — трансформаторна підстанція для шахт [4].

### 1.1. Роль трансформаторних підстанцій в електроенергетиці

Електрифікація населених пунктів і об'єктів, що знаходяться далеко від них є обов'язковою умовою їх функціонування. Але оскільки в електромережах дуже часто трапляються перепади напруги, то підключений до них обладнання може вийти з ладу. Уникнути цього допомагають трансформаторні підстанції [1].

Трансформаторні підстанції мають дуже важливе значення в електроенергетиці оскільки струм, що передається з електростанцій має дуже велику напругу та силу струму. Струм передається по високовольтним ЛЕП і щоб зменшити втрати потужності струму за допомогою підвищувальних трансформаторів (які є складовою трансформаторних підстанцій) збільшують напругу та відповідно зменшують силу струму тому потужність струму залишається незмінною, а втрата потужності зменшується. Потім

знижувальними трансформаторами зменшують напругу і силу струму відповідно, яка необхідна споживачу.

Щодо перетворюючих підстанцій вони необхідні для перетворення змінного струму в постійний струм (за допомогою випрямлячів) або навпаки (за допомогою інверторів) оскільки багато електроустановок працюють на постійному струмі наприклад : прокатні станки, гальванічні ванни, міський транспорт тощо. Перетворюючі підстанції просто необхідні для роботи цих електроустановок.

Для ЛЕП постійного трьохфазного струму на початку лінії за допомогою перетворюючої підстанції змінний струм перетворюють в постійний (за допомогою вирівнювача), а в кінці лінії постійний струм в змінний (за допомогою інвертора).

Зазвичай видобуток и споживання електроенергії відбуваються на змінному струмі, а передача на постійному [5].

## 1.2 Засоби підвищення ефективності роботи трансформаторної підстанції

У системах електропостачання промислових підприємств використовуються силові трансформатори напругою (6-10) / (0,4-0,69), 10/6 і (35-220) / (6-10) кВ. Від їх роботи залежать ефективність функціонування виробничих об'єктів різних галузей народного господарства і величина втрат електроенергії в мережах різних напруг.

Найбільш поширеними є трансформатори з первинною напругою 6-10 кВ, що живлять різноманітні електроприймачі на напрузі 0,4-6 кВ. Режими роботи зазначених трансформаторів в значній мірі обумовлені технологічним процесом конкретного виробництва. Залежно від обсягу виробленої продукції навантаження трансформаторів коливаються в широкому діапазоні. При цьому можливі як періоди холостого ходу, так і

перевантаження окремих трансформаторів. Тому ці трансформатори в першу чергу потребують підвищення ефективності їх використання шляхом своєчасної зміни числа працюючих трансформаторів, так як трансформатори головних знижувальних підстанцій і підстанцій глибокого вводу з первинною напругою 35 кВ і вище з метою зниження втрат електроенергії у багатьох випадках відключати неприпустимо за вимогами надійності електропостачання споживачів.

Надійна та тривала робота силових трансформаторів можлива лише при чіткому дотриманні всіх вимог, регламентованих діючою нормативно-технічною документацією, і керівництв з експлуатації конкретних типів трансформаторів. Для цього необхідно дотримуватися встановлених температурних режимів і рівнів напруги, контролювати максимальні навантаження в нормальних і після аварійних режимах, відстежувати графік навантаження, в залежності від якого визначати і дотримуватися оптимального числа працюючих трансформаторів з метою зниження втрат потужності і електроенергії і т. д.

При цьому слід враховувати конкретні умови експлуатації, так як внутрішньо цехові трансформаторні підстанції максимально наближаються до технологічних електроприймачів і при відкритій установці можуть піддаватися несприятливому впливу навколишнього середовища, зумовленого виробничою діяльністю.

На жаль, в реальних умовах функціонування електричного господарства промислового підприємства, до складу якого входять і системи електропостачання, завжди знаходяться приватні, але в той же час вагомі причини, пов'язані з роботою технологічного устаткування, що перешкоджають виконанню в повному обсязі комплексу вимог, що забезпечують оптимальну експлуатацію силових трансформаторів.

На відміну від електричних мереж енергосистем на промислових підприємствах, особливо невеликих, зустрічаються випадки байдужого

ставлення до експлуатації трансформаторів при їх нормальному функціонуванні з причин недостатнього рівня кваліфікації обслуговуючого персоналу і відсутності спонукальних мотивів директивного або заохочувального характеру, що мають на меті підвищення ефективності використання електроустаткування.

Трансформаторні підстанції промислових об'єктів, як правило, експлуатуються без постійного обслуговуючого персоналу. Тому при відсутності пристроїв дистанційного контролю виміри навантажень і температури виробляються епізодично та зі значними погрішностями. Це не дозволяє відстежувати процес теплового і вібраційного зносу ізоляції, а також здійснювати оптимальну експлуатацію силових трансформаторів. Організацію постійного контролю за роботою трансформаторних підстанцій підприємства можна здійснювати двома шляхами: розширенням функціональних обов'язків персоналу енергетичних служб, що може потребувати залучення додаткових працівників, або впровадженням автоматизованої системи управління роботою трансформаторних підстанцій. На наш погляд, кращий другий шлях. Необхідно відзначити, що відносно компактне розташування цехових трансформаторних підстанцій і стабільність схем розподілу електроенергії на промислових підприємствах у порівнянні з електричними мережами 6-10 кВ енергосистеми є сприятливими факторами для впровадження в системах електропостачання телемеханічних автоматизованих систем з функціями вимірювання, управління і сигналізації. Також у разі впровадження автоматизованої системи виключається або зводиться до мінімуму людський фактор.

Ідея автоматизації управління роботою трансформаторів в залежності від навантаження приєднаних споживачів не нова, але аж ніяк не тривіальна, так як на промислових підприємствах вона практично не реалізована в повному обсязі з урахуванням комплексу вимог нормативно технічної документації.

Наявні теоретичні розробки з даного питання в основному стосуються паралельної роботи трансформаторів на підстанціях, в той час як на промислових об'єктах, як правило, передбачається їх роздільна робота на загальне навантаження. Як параметри, що визначають необхідність включення або відключення трансформаторів, використовуються навантаження трансформатора і поточна дата. Оскільки під час кожного вечірнього провалу навантаження неможливо відключати трансформатори через обмеженого комутаційного ресурсу вимикачів, пропонується відключати їх при значних зниженнях навантаження у вихідні дні. Такий підхід застосуємо для трансформаторів класу напруги 110-330 кВ.

Для трансформаторів 6-10 / 0,4 кВ систем електропостачання промислових підприємств характерні більш мінливий графік навантаження, що залежить від кількості виробленої продукції, і більш складні схеми розподілу електроенергії на вторинному напрузі. Тому необхідно контролювати значну кількість експлуатаційних параметрів і мати гнучкий алгоритм управління роботою по деякому обраному критерієм оптимальності.

Слід зазначити, що не можна розглядати оптимізацію роботи силових трансформаторів відокремлено від інших елементів систем електропостачання. Це пов'язано з тим, що при будь-яких змінах режиму роботи трансформатора також змінюються навантаження пов'язаних з ним інших елементів систем електропостачання.

Для оптимізації режимів роботи силових трансформаторів промислових підстанцій необхідні теоретичний апарат оптимізації та програмно-апаратний керуючий комплекс.

Теоретичний апарат оптимізації - це перш за все якийсь критерій оптимальності, формалізований за допомогою математичної моделі обладнання, експлуатацію якої планується оптимізувати. З цією метою складається алгоритм, що описує реалізацію оптимальної експлуатації, в

який вводяться додаткові умови, як правило, обмежуючі. На основі даного алгоритму розробляється програма, застосування якої дозволить підвищити ефективність використання силових трансформаторів в системі електропостачання промислових підприємств.

Стосовно силових трансформаторів промислових об'єктів в якості критерію оптимальності можна прийняти мінімум втрат електроенергії за аналізований період експлуатації, так як вартість втрат електроенергії входить в енергетичну складову собівартості продукції.

Підвищити ефективність роботи електроустаткування при зниженні загального навантаження можна шляхом відключення частини малозавантажених трансформаторів з переводом живлення їх споживачів на сусідні трансформатори.

Програма оптимізації в такому випадку використовує дані про завантаження трансформаторів і видає сигнали на їх відключення. По мірі зростання навантаження алгоритм видає команду на включення необхідної кількості відключених трансформаторів. Обмежувочими умовами в даному випадку є:

- надійність електропостачання споживачів, приєднаних до даної трансформаторної підстанції;
- математичне очікування електричного навантаження інших, пов'язаних з силовим трансформатором, елементів системи електропостачання та їх пропускна здатність;
  - попереднє завантаження трансформаторів;
  - попереднє значення сумарного зносу трансформаторів;
  - ступінь зносу і допустима кількість комутаційних циклів високовольтних вимикачів [6].

За перерахованих умов забезпечуються оптимальна робота силових трансформаторів за критерієм мінімуму втрат активної потужності і електроенергії та рівномірна витрата ресурсу силових трансформаторів, що

живлять кабелі та інші елементи. У найпростішому випадку зазначеним способом можна локально оптимізувати роботу двохтрансформаторної підстанції [6].

Для програми оптимізації потрібні вихідні дані, частина з яких є умовно-постійними (паспортні дані: номінальна потужність, втрати холостого ходу і короткого замикання і т. д.), а частина-умовно-змінними (поточний коефіцієнт завантаження, поточне значення відносного зносу виткової ізоляції, температура масла у верхніх шарах і т. д.). Перераховані величини характеризують силовий трансформатор і його роботу. Крім цього, в алгоритмі оптимізації слід врахувати і параметри пов'язаних з ним інших елементів СЕС, на які ступінь завантаження впливає більшою мірою [6].

Вихідними даними є інформація про досягнення контрольованими параметрами деяких критичних значень, після чого приймається рішення і подається сигнал на відключення або включення конкретних трансформаторів [6].

Зниження коефіцієнта несиметрії струму в знижувальному трансформаторі та в трифазній лінії електропередач

Спосіб підвищення надійності роботи знижувальної трансформаторної підстанції в розподільних мережах 6 (10) / 0,4 кВ призначений для роботи в розподільних мережах 6 (10) -0,4 кВ, що містять знижувальний трансформатор 6 (10) / 0,4 кВ, трифазні лінії 0.4 кВ, мікроконтролер, датчики струму, встановлені на шинах знижувального трансформатора і на відхідних кабелях навантажень, вимикачі з приводами, встановлені на стороні низької напруги трансформатора. Управління підключенням і відключенням однофазних навантажень здійснюється мікроконтролером. В якості комутуючих елементів використовуються модулі IGBT-транзисторів. Момент часу для подачі імпульсу управління з мікроконтролера для відключення навантажень визначається з умови рівності



нулю струму на відхідних кабелях навантажень, для включення навантажень - з умови рівності нулю струму на шинах понижувального трансформатора.

Винахід відноситься до області електротехніки, зокрема до електропостачання, і може бути використано в розподільних мережах 6 (10) / 0,4 кВ, що містять знижувальний трансформатор 6 (10) / 0,4 кВ, трифазні лінії 0,4 кВ, пов'язані з шинами знижувального трансформатора і передають електричну енергію від знижувального трансформатора до однофазних навантажень.

Відомий спосіб зниження втрат (пат. №2351049, публ. 27.03.2009 р), що полягає в зниженні коефіцієнта несиметрії струму в знижувальному трансформаторі і в трифазній лінії електропередач, яка живить знижувальну трансформаторну підстанцію, що має однофазні навантаження різної потужності, що відрізняється тим, що зниження коефіцієнта несиметрії струмів в фазах трифазної лінії і обмотках трансформатора здійснюється за допомогою перемикачів однофазних навантажень, підключених до шин знижувального трансформатора за допомогою вимикачів, управління якими здійснюється мікроконтролером, на аналогові входи якого поступають сигнали змінного струму з датчиків на стороні низької напруги трансформатора, при цьому мікроконтролер здійснює управління вимикачами, які перемикають навантаження з однієї фази на іншу на шинах знижувальної трансформаторної підстанції, виходячи з умови мінімізації коефіцієнта несиметрії струму, при цьому якщо сумарні значення струмів в фазах відрізняються від середнього значення струму, то частина навантажень з фази, що має більший струм, відключається від неї і включаються на фазу, що має менший струм, а конкретні навантаження, що підлягають переключенню, визначаються за допомогою мікроконтролера з умови близькості сумарних струмів в фазах їх середнього значення.

Недоліком даного способу є низька надійність внаслідок:

- наявності вимикачів, які не здатні забезпечити швидке включення і відключення навантажень фаз від шин знижувального трансформатора;
- великих значень струмів перехідних режимів при включенні і відключенні навантажень через неможливість точного визначення моменту підключення навантажень до шин знижувального трансформатора і їх відключення від шин знижувального трансформатора;
- неможливості контролю стану вимикачів, що приводить до одночасного включення вимикачів різних фаз на однофазне навантаження - виникнення міжфазного короткого замикання.

Завданням способу є підвищення надійності роботи понижувальної трансформаторної підстанції 6 (10) / 0,4 кВ.

Технічний результат, який досягається в процесі вирішення поставленого завдання, полягає в підвищенні надійності роботи понижувальної підстанції за рахунок зменшення максимального струму перехідних процесів при включенні і відключенні навантажень, а також в забезпеченні захисту трансформатора 6 (10) / 0,4 кВ та напівпровідникових модулів від міжфазних коротких замикань і збільшенні термінів служби трансформатора і напівпровідникових елементів.

Зазначений технічний результат досягається способом підвищення надійності роботи знижувальної трансформаторної підстанції в розподільних мережах 6 (10) / 0,4 кВ, що містять знижувальний трансформатор 6 (10) / 0,4 кВ, трифазні лінії 0,4 кВ, пов'язані з шиною знижувального трансформатора і передають електричну енергію від знижувального трансформатора до однофазних навантажень, мікроконтролер, керуючий підключенням однофазних навантажень до шин і їх відключенням від шин трансформатора понижувальної трансформаторної підстанції, сигнали на який надходять з датчиків струму, встановлених на кабелях, що з'єднують однофазні навантаження з шиною знижувального трансформатора і датчиків струму, встановлених на шині знижувального трансформатора, вимикачі з

приводами, встановлені на стороні високої напруги знижувального трансформатора, що полягає в зниженні струмів перехідних процесів при включенні і відключенні навантажень і недопущення міжфазного короткого замикання, при цьому в якості пристроїв підключають однофазні навантаження до шин і відключають їх від шин знижувального трансформатора використовуються напівпровідникові модулі на IGBT-транзисторах, управління станом яких здійснюється мікроконтролером, причому момент часу для подачі імпульсу управління з мікроконтролера для відключення транзисторів напівпровідникових модулів на IGBT-транзисторах визначається з умови рівності нулю струму у відведених кабелях навантажень, момент часу для подачі імпульсу управління з мікроконтролера для включення транзисторів напівпровідникових модулів на IGBT-транзисторах визначається з умови рівності нулю струму на шинах понижувального трансформатора.

Таким чином, досягається:

- зниження струмів перехідних процесів при включенні і відключенні навантажень за рахунок використання модулів, що містять IGBT-транзистори і здійснення включення транзисторів в момент рівності нулю струму на шинах понижувального трансформатора і відключення в момент рівності нулю струму на відхідних кабелях, що з'єднують навантаження з шинами понижувального трансформатора;

- усунення міжфазного короткого замикання за рахунок блокування замикання транзисторів модулів інших фаз при включеному транзисторі модуля будь-якої фази.

Спосіб підвищення надійності роботи знижувальної трансформаторної підстанції в розподільних мережах 6 (10) / 0,4 кВ, що полягає в зниженні струмів перехідних процесів при включенні і відключенні навантажень і усунення міжфазного короткого замикання в розподільних мережах 6 (10) / 0,4 кВ, що містять знижувальний трансформатор 6 (10) / 0,4

кВ, трифазні лінії 0,4 кВ, пов'язані з шинами знижувального трансформатора і передають електричну енергію від знижувального трансформатора до однофазних навантажень, мікроконтролер, керуючий підключенням однофазних навантажень до шин і їх відключенням від шин трансформатора знижувальної трансформаторної підстанції, сигнали на який надходять з датчиків струму, встановлених на кабелях, що з'єднують однофазні навантаження з шинами знижувального трансформатора і датчиків струму, встановлених на шинах знижувального трансформатора і на відхідних кабелях навантажень, вимикачі з приводами, встановлені на стороні високої напруги знижувального трансформатора, що відрізняється тим, що в якості пристроїв, що включають однофазні навантаження до шин і відключають і від шин знижувального трансформатора, використовуються напівпровідникові модулі на IGBT-транзисторах, управління комутацією яких здійснюється мікроконтролером, причому момент часу для подачі імпульсу управління з мікроконтролера для відключення транзисторів напівпровідникових модулів на IGBT-транзисторах визначається з умови рівності нулю струму в відведених кабелях навантажень, момент часу для подачі імпульсу управління з мікроконтролера для включення транзисторів напівпровідникових модулів на IGBT-транзисторах визначається з умови рівності нулю струму на шинах знижувального трансформатора [7].

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В КАНАЛАХ ДИСКОВИХ ОБМОТОК СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформаторні станції (ТС) повинні забезпечувати відповідну точність трансформації струму за всіх режимів їх роботи. Як уже зазначалося, за перехідних режимів роботи значно зростають струмові похибки ТС внаслідок сильного насичення їх магнітних кіл за наявності аперіодичної складової в первинному надструмі ТС. Для каскадних ТС на відміну від одноступеневих ТС зниження вторинного навантаження не сприяє значному зменшенню максимальної перехідної похибки, оскільки перші ще й містять значний внутрішній індуктивний опір [8]. За таких умов можливі порушення роботи пристроїв захисту та автоматики.

Тому для зниження впливу аперіодичної складової струму та усунення залишкової магнітної індукції в осердя ТС запропоновано вводити немагнітний проміжок [9 – 18]. Такі ТС мають практично лінійну характеристику намагнічування, через що й отримали назву лінійних. Перевагами лінійних трансформаторів над трансформаторами з суцільним магнітопроводом є понижена залежність їх похибок від величини первинного струму, відсутність впливу залишкової магнітної індукції то-що. Однак введення немагнітного зазору зумовлює зростання похибок та зменшення потужності ТС порівняно з трансформатором з суцільним магнітопроводом.

Варто відмітити також залежність похибок лінійного ТС від його вторинного навантаження [19].

Великі похибки лінійного ТС зумовлюють труднощі у забезпеченні необхідного класу точності його роботи за нормальних та перехідних режимів.

В [20] розглянуто вплив отворів у магнітопроводі ТС на його роботу за усталених та перехідних режимів. Таке виконання магнітопроводу порівняно з замкнутим осердям дозволяє значно зменшити похибки

трансформатора за перехідних режимів при великих кратностях первинного струму та постійних часу згасання його аперіодичної складової. Однак похибки за усталених режимів все ж будуть більшими.

Крім ТС з одним чи декількома суцільними немагнітними проміжками застосовуються і трансформатори з частковим немагнітним проміжком у магнітопроводі. За усталеного режиму короткого замикання ці трансформатори працюють із незначною похибкою, зумовленою нерозрізаною частиною осердя, а у перехідному режимі допустима похибка трансформатора забезпечується його розрізаною частиною.

Таке виконання ТС з частковими немагнітним проміжками в осерді дозволяє підключати до них як вимірювальні прилади, так і пристрої релейного захисту й автоматики. Недоліком же таких трансформаторів є спотворення кривої періодичної складової вторинного струму за перехідних режимів [21].

У каскадних ТС виконання осердя трансформатора верхнього ступеню з частковим немагнітним проміжком супроводжується певними труднощами, зумовленими гранично допустимим перерізом магнітопроводу. Прийнятний згідно конструктивних умов переріз все ж зумовлює значну абсолютну похибку трансформатора. Для зменшення перерізу осердя верхнього ступеню його частину, призначену для вимірювань, виконують із невеликим немагнітним проміжком та застосовують ємнісну компенсацію похибок [22].

Магнітопроводи нижнього ступеню каскадного ТС з вторинними обмотками, призначеними для підключення пристроїв РЗА, доцільно виконувати з невеликим немагнітним проміжком, що забезпечує лінійність їх характеристик. Довжину цих проміжків обирають з умов обмеження магнітної індукції в осерді граничним значенням та усунення впливу залишкової магнітної індукції [23].

Для зменшення похибок лінійного ТС застосовують ємнісну компенсацію його струму намагнічування та зменшення впливу магнітного потоку розсіяння вторинної обмотки, що полягає у під'єднанні до виводів цієї обмотки компенсуючого активноємнісного навантаження. У каскадних ТС ємнісну компенсацію застосовують для верхнього та за наявності – проміжного ступенів [24 – 27].

Внаслідок уведення ємнісної компенсації у вторинному струмі компенсованого каскадного ТС крім вимушених періодичної та аперіодичної складових струму з'являються ще й вільні згасаючі гармонічні складові. Їх амплітуда, частота і ступінь згасання залежать від параметрів елементів каскадного ТС [28, 29]. Ці вільні згасаючі складові можуть спричинити помилкові спрацювання пристроїв РЗА, що вважається одним із основних недоліків компенсованого ТС.

Для зменшення впливу вільних гармонічних складових необхідне застосування частотних фільтрів, встановлених перед вимірними органами релейних захистів. Як зазначається в [30], для запобігання неправильної роботи захисту достатньо збільшити частоту вільних гармонічних складових до 180 – 200 Гц. Для цього магнітоп-ровід верхнього ступеню каскадного ТС виконують комбінованим у вигляді двох осердь з різними немагнітними проміжками, що дозволяє значно зменшити вплив похибок таких ТС на роботу швидкодійного захисту.

В [31, 32] наведено рівняння струмів намагнічування одноступеневих та каскадних ТС з лінійними характеристиками намагнічування за перехідних режимів роботи. Як зазначають автори, отримані результати також можна використувати для якісного аналізу перехідних режимів роботи ТС з нелінійними характеристиками намагнічування.

Впровадження в ЕЕС цифрових пристроїв вимірювання, РЗА та керування постійно супроводжувалося й підвищенням вимог до надійності та технічних характеристик вимірювальних ТС електромагнітного типу. Ряд

їх недоліків, таких як явища магнітного гістерезису, залишкового намагнічування та насичення магнітопроводів, що обумовлюють погіршення точності вимірювання струму, труднощі виконання високовольтної ізоляції ТС надвисокої напруги, низька пожежна стійкість паперово-оливної ізоляції, втрата ізоляційних властивостей у процесі експлуатації та інші, зумовили необхідність створення якісно нових типів вимірювальних перетворювачів струму [28]. Одними з таких перетворювачів є оптико-електронні ТС (ОТС).

Принцип роботи таких ТС полягає у використанні магнітооптичного ефекту Фарадея – обертання площини поляризації лінійно поляризованого світла в оптично активному середовищі під дією створеного вимірюваним струмом магнітного поля. Вимірявши кут повороту площини поляризації світла, можна визначити величину напруженості магнітного поля і відповідно значення струму, який створив це поле. Знак кута зв'язаний з напрямом магнітного поля і не залежить від напрямку розповсюдження променя світла відносно цього поля [16].

В якості оптично активного середовища в комірках Фарадея використовують скло з вмістом оксиду свинцю або плавлений кварц. Досить високу магнітну чутливість мають також ферит-гранатові плівки [21].

Вимірювання кута повороту площини поляризації світла в змінному магнітно-му полі необхідно проводити окремо для додатного та від'ємного періодів первинного струму з подальшою синхронізацією результатів [6].

Таким чином, магнітооптична комірка Фарадея, що знаходиться під високою напругою, та заземлений приймальний пристрій зв'язані між собою лише світловим потоком.

Наведемо коротко конструктивне виконання ОТС. Оптичний світловод складається з циліндричного скляного волокна, розміщеного в захисній оболонці. Скляне волокно ж містить світлопровідне середовище, що виконане з чистого кварцового скла і поміщене в оболонку з іншого скла чи



полімеру з меншим показником залом-лення для внутрішнього відбиття світлового променя.

Крім оптичного давача в якості давача вхідної інформації в ОТС також можуть використовувати давачі на основі ефектів Холла, Гаусса, пояс Роговського тощо. Вхідний сигнал від цих давачів за визначеним законом модулює інтенсивність світлового потоку, який передають по оптичному волокну до приймального пристрою на потенціалі землі. В останньому здійснюється зворотна трансформація світлового потоку у вимірний електричний сигнал.

Сьогодні випускають ОТС на робочу напругу від 69 до 765 кВ з шириною їх вхідного частотного діапазону від 0,5 Гц до 6 кГц та класами точності 0,2S для ви-мірних кіл і 5P для кіл РЗА.

Основними перевагами ОТС є:

- можливість вимірювання як змінного, так і постійного й імпульсного струмів різних рівнів робочих напруг електричних мереж;
- малоінерційне, з високою точністю, вимірювальне перетворення сигналів за відсутності явищ гістерезису, магнітного насичення та залишкового намагнічування,
- характерних для електромагнітних ТС;
- широкий динамічний та частотний діапазони вимірювань, що дозволяє проводити повний аналіз кількості та якості електроенергії в частині її гармонічного складу, а також аналіз перехідних процесів в ЕЕС;
- можливість інтеграції у вимірювальні та інформаційні системи з використанням різних інтерфейсів;
- малі масогабаритні параметри трансформаторів, повна їх екологічна, пожежо-, вибухо- та електробезпека.

Однак на думку фахівців, ряд властивостей ОТС, зокрема, широка смуга пропускання сигналу, висока стійкість до електромагнітних завад, довговічність, стабільність параметрів, простота та надійність

конструктивного ви-конання, низька сприйнятливість до впливу вібрацій і зміни температури, не дають їм значних переваг, оскільки притаманні їй традиційним ТС.

Тобто витікає, що ОТС доцільно застосовувати, в першу чергу, в мережах висо-ких та надвисоких напруг, коли вартість ізоляції звичайного ТС є дуже високою, за великих кратностей первинного струму, за яких традиційні трансформатори входять у режим насичення.

До основних же недоліків ОТС можна віднести необхідність встановлення дже-рел живлення для блоків перетворення електричного сигналу в оптичний і навпаки, незначна потужність вихідних кіл для приведення в дію електромеханічних захистів і необхідність використання додаткових пристроїв для її підвищення, висока вар-тість виготовлення.

Таким чином, впровадження ОТС залишається перспективним рішенням, однак на сьогоднішній час для наших ЕЕС необхідно забезпечити відповідну технічну і нормативну базу для експлуатації таких типів ТС.

Пояс (катушка) Роговського являє собою тороїдальний соленоїд з осердям з неферромагнітного матеріалу, на який рівномірно намотана вторинна обмотка. Соленоїд охоплює струмоведучий провід, струм якого необхідно виміряти. Відсутність магнітопроводу у поясі Роговського забезпечує лінійність його характеристик, високу точність і надійність. Катушки можуть виконуватися як рознімними, так і нерознімними. З'єднання кінців рознімних катушок може здійснюватися встик або внахльост.

Оскільки напруга на виході катушки Роговського пропорційна похідній струму по часу, то для отримання кривої струму використовують відповідні аналогові або цифрові інтегратори.

Основними перевагами поясу Роговського є його низька вартість, можливість вимірювання струмів у широкому частотному діапазоні, відсутність насичення осердя, мала потужність споживання, низька

температурна залежність. Його ж недоліками є чутливість до зовнішніх магнітних полів, можливість вимірювання лише змінного струму, наявність зсуву по фазі між первинним струмом та вторинною на-пругою, що зумовлює необхідність використання інтеграторів для отримання вихідного сигналу [79, 74, 80].

Підводячи підсумки, завдяки своїм перевагам котушки Роговського зарекомендували себе як надійні давачі струму. Закордонними фірмами-виробниками (Eltek, ABB Ais, Taehwatrans Co., Rocoil Rogowski Coils тощо) представлена різноманітна типологія котушок Роговського для застосування в ЕЕС. Також перспективним на-прямом є розробка цифрових ТС з поясом Роговського у якості вимірювального да-вача струму.

## 2.1 Загальна характеристика системи захисту від перенапруг за обриву вторинного кола трансформатора струму

На основі пропонованих нами способів захисту ТС та його вторинних кіл від перенапруг, які виникають за обриву цих кіл, [7 – 9] була розроблена проста і недорога СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС з застосуванням у якості ОПН пробивного запобіжника з захисним повітряним іскровим проміжком. Пробивний запобіжник виготовляють серійно в Україні. Він має відповідний сертифікат для застосування в діючих електроустановках 220/380 В, що підключені до мережі з ізольованою нейтраллю. Запобіжник захищає ці електроустановки від пере-напруг, що проникають з високовольтної у низьковольтну обмотку за пошкодження ізоляції силового трансформатора. Режими роботи даної СЗ для різних типів ТС розглянуті нижче.

Оскільки пропонована СЗ має працювати в діючих електроустановках, то вона повинна задовольняти вимогам, що наведені в нормативних документах стосовно цих електроустановок. Очевидно, що детальний ро-

згляд остаточної відповідності пропонованої нами СЗ щодо вимог її експлуатації в діючих електроустановках буде проведено після випробувань промислового взірця системи. Нижче розглянемо три головні вимоги до пропонованої системи (аналогічно вимогам до систем РЗА електроустановок): селективність, швидкодія, надійність. Селективність СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС буде забезпечуватись безпосереднім підключенням вхідних затискачів окремих ОПН до затискачів окремих вторинних обмоток ТС (за наявності декількох осердь у ТС), а також відповідним узгодженням параметрів спрацювання ОПН з параметрами налаштування пристроїв РЗА та параметрами кіл струму, що живляться від окремих вторинних обмоток ТС. Швидкодія СЗ буде забезпечуватись застосуванням чутливого швидкодійного електромеханічного реле, контакти якого шунтуватимуть накоротко затискачі вторинної обмотки ТС після спрацювання ОПН. Надійність буде забезпечуватись за рахунок розміщення пристрою ОПН на опорі ТС безпосередньо біля коробки затискачів вторинних обмоток ТС. За рахунок малої відстані (малої довжини контрольного кабелю (~ до 1 м) та, таким чином, обмеження доступу будь-кого до ОПН і його кабелю, яким вхідні затискачі ОПН підключені до вторинних затискачів ТС, практично виключена можливість хибного спрацювання чи відмови у штатному спрацюванні СЗ. Очевидно, що аналітичний розрахунок апаратного напрацювання на відмову СЗ буде здійснений після виготовлення промислового взірця системи, коли буде відома елементна база промислового взірця, результати його випробувань тощо.

СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС (далі СИСТЕМА) призначена для захисту від дії перенапруг вище 1000 В, що виникають на затискачах вторинної обмотки даного ТС за обриву кіл струму, підключених до цих затискачів.

Від дії перенапруг СИСТЕМА захищає:

- персонал служб РЗА діючих електроустановок, що працюють у вторинних колах даного ТС (наладка, ремонт тощо);
- ізоляцію вторинної обмотки даного ТС, до затискачів якої підключені кола струму, в яких можливий обрив;
- ізоляцію кіл струму (пристроїв РЗА, вимірювання, обліку електричної енергії тощо), в яких можливий обрив і які підключені до затискачів даного ТС.

СИСТЕМИ для обмеження рівня перенапруг на затискачах вторинної обмотки ТС пропонується застосувати в якості ОПН пробивний запобіжник одноразової дії типу ПП-А/3 (промислове серійне виробництво в Україні, вартість  $\sim 300$  грн.). СИСТЕМА обмежує напругу на затискачах вторинної обмотки даного ТС до рівня напруги спрацювання (351-600 В, 50 Гц) пробивного запобіжника типу ПП-А/3. Відстань між електродами повітряного іскрового проміжку запобіжника становить  $d = (0,08+0,02)$  мм. Дані щодо часу  $t_{\Pi}$  пробиття такого проміжку – відсутні. Однак, враховуючи незначну величину  $d$ , за нашими попередніми даними  $t_{\Pi} \sim 1-2$  мкс. За такого часу, як показали результати комп'ютерного моделювання режимів роботи СИСТЕМИ для основних типів ТС (опорні, вбудовані, шинні, кас-кадні тощо) в мережах  $10 \div 750$  кВ, 50 Гц, навіть за первинних струмів ТС, рівних десятикратній величині від номінального значення, СИСТЕМА забезпечує ефективне обмеження напруги до рівня напруги пробиття даного запобіжника  $U_3 = 351-600$  В, 50 Гц, що суттєво менше за 1000 В, 50 Гц (напруга випробування ізоляції вторинних кіл ТС [11]).

Запобіжник витримує після пробиття струм  $I_{3M} = 200$  А, 50 Гц за максимальний час  $t_{3M} = 30$  хв. [28]. За номінального вторинного струму ТС  $I_{2ТСН} = 5$  А, 50 Гц, кратність струму запобіжника  $K_{I3} = I_{2ТСН} / I_{3M} = 5/200 = 0,025$ . Активна потужність, що ви-діляється в іскровому проміжку запобіжника, рівна  $U_{\Pi\Pi} \cdot I_{2ТСН}$ . Враховуючи, що для коротких іскрових проміжків ( $d \leq 1$  мм) напруга  $U_{\Pi\Pi}$  практично не залежить від величини струму, тому потужність

$P_{\text{III}}$  буде пропорційна струму  $I_{2\text{тсн}}$ . Тоді за номінального струму  $I_{2\text{тсн}}$  активна потужність  $P_{\text{III}}$  рівна  $P_{\text{III}} = K_{\text{Iз}} \cdot P_{\text{IIIМ}} = 0,025 \cdot P_{\text{IIIМ}}$ .

Очевидно, що допустимий час  $t_{\text{зд}}$  протікання через запобіжник струму  $I_{\text{зд}}$  обернено-пропорційний до величини струму  $I_{\text{зд}}$ . Тоді орієнтовно маємо

$$t_{\text{зд}} = (1 / K_{\text{Iз}}) \cdot t_{\text{зм}} = (1/0,025) \cdot t_{\text{зм}} = 40 \cdot t_{\text{зм}} = 40 \cdot 30 = 1200 \text{ (хв)} = 20 \text{ (год)}.$$

Тобто тривалість протікання струму становить 0,1 від півперіоду промислової частоти. В даному випадку, за номінального первинного струму ТС  $I_{1\text{тсн}}$  маємо орієнтовно допустимий час протікання струму через запобіжник  $t_{\text{здн}} = 10 \cdot t_{\text{зд}} = 10 \cdot 20 = 200 \text{ (год)}$ .

ОПН – запобіжник типу ПП-А/3 з послідовно увімкненим малоіндуктивним бетонним резистором (опір резистора рівний 2 Ом) – підключають до затискачів вторинної обмотки ТС. Резистор розрахований на спрацювання запобіжника типу ПП-А/3 за протікання в ньому десятикратного вторинного струму  $10 \cdot I_{2\text{тсн}} = 50 \text{ А}$ , 50 Гц, з наступним швидким (до 0,1 с) шунтуванням ОПН контактами електромеханічного реле СИСТЕМИ.

Тривалий режим роботи ТС з розімкненими його вторинними колами, незважаючи на застосування ОПН, є небажаним, тому що за такого режиму має місце глибоке насичення феромагнітного осердя ТС, в результаті чого різко зростають втрати активної потужності в осерді трансформатора. Це, в свою чергу, за рахунок зростання температури осердя, може призвести до пошкодження його ізоляції (як і внутрішньої між пластинами електротехнічної сталі («пожежа сталі»), так і головної – стосовно обмоток на заземленому осерді), в результаті чого ТС руйнується – виникає внутрішнє коротке замикання обмоток ТС на землю. У більшості випадків ТС вибухає і ремонту не підлягає. У цьому випадку матеріальні витрати на відновлення нормальної експлуатації приєднання, де був пошкоджений ТС

(придбання та встановлення нового ТС та іншого електрообладнання, перерва електропостачання споживачів тощо) набагато порядків більші вартості пропонованої СИСТЕМИ. Тому за спрацювання ОПН необхідно негайно замикати накоротко між собою затискачі вторинної обмотки ТС, до яких підключений даний ОПН. Таке замикання в СИСТЕМІ виконують контакти електромеханічного реле, що запускається електронним пристроєм, котрий фіксує спрацювання ОПН. Водночас, інші контакти цього реле запускають аварійну сигналізацію підстанції для сповіщення чергового на щиті управління підстанції.

Параметри СЗ від перенапруг за обриву вторинного кола ТС повинні бути узгоджені з параметрами налаштування пристроїв РЗА приєднання підстанції, струм якого підведений до первинної обмотки даного ТС. Суть узгодження полягає в тому, що СИСТЕМА не повинна спрацьовувати за протікання струму в первинній обмотці даного ТС, коли відсутній обрив кіл навантаження (РЗА, вимірювання тощо), підключених паралельно разом з СИСТЕМОЮ до затискачів вторинної обмотки даного ТС.

Як правило, повна типова номінальна потужність навантаження, підключеного до вторинної обмотки ТС не більше 40 В·А. Тоді напруга на затискачах вторинної обмотки ТС за номінального вторинного струму  $I_{2\text{тсн}5} = 5 \text{ А}$  становить  $U_{2\text{н}5} = 8 \text{ В}$ , а за номінального вторинного струму  $I_{2\text{тсн}1} = 1 \text{ А}$  –  $U_{2\text{н}1} = 40 \text{ В}$ . Очевидно, що за таких умов СИСТЕМА не спрацьовуватиме, оскільки мінімальна напруга пробиття запобіжника типу ПП-А/3 становить  $U_{\text{змін}} = 351 \text{ В}$  [98, 100], що значно більше за 8 В ( $U_{2\text{н}5}$ ) та 40 В ( $U_{2\text{н}1}$ ). Не спрацьовуватиме запобіжник і за десятикратного струму  $I_{2\text{тс}50} = 50 \text{ А}$ , бо відповідна цьому струму напруга становить  $U_{2\_50} = 80 \text{ В}$  і коефіцієнт відведення СИСТЕМИ за струмом  $I_{2\text{тс}50} = 50 \text{ А}$  та  $U_{\text{змін}} = 351 \text{ В}$  становить

$$K_{\text{в}} = U_{\text{змін}} / U_{2\_50} = 351/80 = 4,4.$$

На наш погляд, з урахуванням аперіодичної складової у вторинному струмі ТС  $I_{2\text{ТС}50} = 50$  А для надійного відведення СИСТЕМИ достатньо значення

$$K_{\text{в}} = U_{\text{змін}} / U_{2\_50} = 3,0.$$

Тому для усіх ТС з номінальними вторинним струмом 5 А та вторинним навантаженням до 40 В·А, за умови, що максимальний первинний аварійний струм ТС не більше десятикратного від номінальної величини, можна застосовувати СИСТЕМУ з пробивним запобіжником типу ПП-А/3 з мінімальною напругою пробиття

$$U_{\text{змін}} = 351 \text{ В.}$$

Перед випробуванням роботи СИСТЕМИ, а також періодичної перевірки її роботи, необхідно експериментально перевірити рівень напруги спрацювання (пробиття) запобіжника типу ПП-А/3. Рекомендації щодо експериментальної перевірки рівня напруги спрацювання запобіжника типу ПП-А/3 наведені в [11].

Для ТС з номінальним вторинним струмом  $I_{2\text{ТС}1} = 1$  А та вторинним навантаженням 40 В·А за десятикратного первинного струму трансформатора напруга на затискачах вторинної обмотки становитиме  $U_{2(1)10} = 400$  В. В даному випадку, за коефіцієнта відведення СИСТЕМИ  $K_{\text{в}} = 3$  необхідна мінімальна напруга пробиття запобіжника типу ПП-А/3 становитиме  $U_{\text{змін}} = K_{\text{в}} \cdot U_{2(1)10} = 3 \cdot 400 = 1200$  В, що більше 1000 В. Для СЗ від перенапруг більше 1000 В максимальна напруга спрацювання СИСТЕМИ не повинна бути більша від 1000 В. Таким чином, в даному випадку, застосування в СИСТЕМІ запобіжника типу ПП-А/3 не допустиме. Необхідно застосовувати більш стабільні (за напругою спрацювання) ОПН без



іскрового проміжку. На жаль, поки що в доступній літературі не знайдено таких потужних (з напругою спрацювання до 1000 В) ОПН без іскрового проміжку. Як тільки почнуть серійно виготовляти такі відносно дешеві ОПН, їх можна буде встановити в СИСТЕМУ за-мість пробивного запобіжника типу ПП-А/3 і застосувати таку СИСТЕМУ для ТС з номінальним вторинним струмом 1 А.

Очевидно, що в даному випадку необхідно провести узгодження такої системи з налаштуванням пристроїв РЗА (описано вище), врахувавши час  $t_{ш} = 0,1$  с (час шу-нтування СИСТЕМОЮ за її спрацювання затискачів вторинної обмотки ТС) під час протікання через ОПН номінального струму 1 А за обриву вторинних кіл ТС.

Нижче буде наведено результати попередньої оцінки можливості застосування для ТС різних типів серійних ОПН без іскрового проміжку, які застосовуються для захисту електрообладнання від дії грозових та комутаційних перенапруг.

Очевидно, що наведені вище розрахункові параметри та їх узгодження будуть підтверджені результатами експериментальних досліджень, проведених на промисловому взірці СИСТЕМИ.

Для симуляції режимів роботи одноступневих ТС застосовано розрахункову схему, в якій до затискачів вторинної обмотки ТС паралельно підключені вхідні затискачі ОПН та кола навантаження Н. Схема ОПН, його технічні характеристики, наведені вище, однакові для усіх основних типів одноступневих ТС. У розрахункових схемах досліджуваних типів ТС в схемі ОПН закладено про-бивний запобіжник FV типу ПП-А/3 з максимальною напругою пробиття (спрацю-вання)  $U_{з\max} = 600$  В, 50 Гц, та резистор  $r_{ш} = 2$  Ом. Комп'ютерну симуляцію всіх ре-жимів роботи ТС у розділі 4 реалізовано на програмному модулі «FASTMEAN». Це викликано тим, що модуль «FASTMEAN» більш швидкодійний (ОС Win-dows), ніж програмний комплекс «RE» (ОС DOS).

Для ТС типу ТОМ-765 дослідимо окремо режими роботи за розімкнених вто-ринних вимірювальної та захисної обмоток нижнього ступеню. До затискачів усіх вторинних обмоток нижнього ступеню ТС (одна вимірювальна і чотири захисні об-мотки) паралельно підключені вхідні затискачі ОПН та кола струму навантаження Н аналогічно вторинній обмотці, розміщеній на осерді одноступеневого ТС (див. ри-сунок 4.1). Для ТС типу ТОМ-765 у симульованій схемі ОПН СЗ аналогічно розгля-нутим вище одноступеневим ТС застосовуємо пробивний запобіжник FV типу ПП-А/3 з максимальною напругою пробиття (спрацювання)  $U_{\text{з макс}} = 600 \text{ В}$ , 50 Гц, та ре-зистор  $r_{\text{ш}} = 2 \text{ Ом}$ . Комп'ютерну симуляцію усіх режимів роботи ТС типу ТОМ-765 реалізовано на програмному комплексі «FASTMEAN». Симуляція режимів для каскадного ТС з під'єднаною СЗ проводилась, як і для одноступеневих ТС, за підве-дення струму поштовхом до первинної обмотки ТС.

Для дослідження гідродинамічних процесів в обмотці масляного трансформатора при природній циркуляції охолоджуючого середовища необхідно отримати поля швидкостей та тиску [124]. Для цього потрібно вирішити рівняння нерозривності, Нав'є – Стокса та рівняння енергії рідини в циліндричних координатах методом кінцевих елементів.

В якості об'єкту досліджень гідродинамічних процесів обрано вісесиметричну модель обмотки, як і в пункті 2.5.2. В результаті математичного моделювання визначаються не лише поля швидкостей течії масла в вертикальних та радіальних каналах трансформатора, але й надлишковий статичний тиск в масляних каналах по всій моделі, що є неможливим при експериментальному дослідженні.

## 2.2 Течія в'язкої нестисливої рідини

Основні рівняння руху в'язкої нестисливої рідини можуть бути записані через швидкості і тиск, причому швидкості повинні задовольняти рівнянню нерозривності для нестисливої рідини. Інший спосіб запису двомірних рівнянь зв'язаний з використанням функції струму  $\psi$ , що задовольняє рівнянню нерозривності [126]. При цьому рівняння кількості руху поєднуються в одне рівняння більш високого порядку, що вимагає безперервності як самої функції струму, так і її похідних.

У випадку тривимірних плинів ситуація ускладнюється, оскільки при цьому підході вимагаються три функції струму. Щоб не мати справу з функцією  $\psi$ , що вимагає забезпечення безперервності більш високого порядку, додатково до функції струму в якості невідомої вводиться завихрення  $\omega$ . У цьому випадку досить забезпечити безперервність  $\psi$  і  $\omega$  між елементами; безперервність їхніх похідних не обов'язкова.

Нижче наведено основні рівняння, що описують плин нестисливої ньютонівської рідини [27]:

- рівняння кількості руху

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + b_i + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta_{ij}}{\partial x_j} = \frac{Dv_i}{D}, i, j = 1, 2, 3,$$

де  $i, j$  характеризують порядковий номер точки, що досліджується;

- співвідношення між швидкостями деформацій і полем швидкостей у рідині

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right),$$

де  $e_{ij}$  - швидкість деформації зсуву.

- співвідношення між напругами і швидкостями деформацій (з умовами Стокса)

$$\theta_{ij} = 2\mu e_{ij} - \frac{2}{3}\mu e_v \delta_{ij};$$

- рівняння нерозривності

$$e_v = \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0;$$

- граничні умови на тій частині границі  $S_v$ , де задані швидкості

$$v_n = \bar{v}_n, v_s = \bar{v}_s;$$

- граничні умови на частині границі  $S_p$ , де задані сили

$$\begin{aligned} -p + 2\mu \frac{\partial v_n}{\partial n} &= \bar{p}_n, \\ \mu \left( \frac{\partial v_s}{\partial n} + \frac{\partial v_n}{\partial s} \right) &= \bar{p}_s. \end{aligned}$$

Варіаційне формулювання, що відповідає цій системі рівнянь [26]

$$\begin{aligned} \iiint \left[ -p \delta e_v - e_v \delta p + \theta_{ij} \delta e_{ij} \right] \rho \left\{ -b_i + \frac{Dv_i}{D} \right\} \delta v_i dV = \\ = \int_{S_p} \left\{ \bar{p}_n \delta v_n + \bar{p}_s \delta v_s \right\} dS. \end{aligned}$$

Для двомірного випадку формула може бути записана як [26]

$$\iint \left[ -p \delta e_v - e_v \delta p + \theta_{11} \delta e_{11} + \theta_{22} \delta e_{22} + \theta_{12} \delta \gamma_{12} \right] \rho \left\{ -b_1 + \frac{Dv_1}{D} \right\} \delta v_1 \rho \left\{ -b_2 + \frac{Dv_2}{D} \right\} \delta v_2 \right] dA = \\ = \iint \left\{ p_n \delta v_n + p_s \delta v_s \right\} dS,$$

де

$$\gamma_{12} = \frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 2e_{12}.$$

Рівняння нерозривності буде мати вид [28]

$$e_v = \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0.$$

Варіаційна формула має вигляд [26]

$$\iiint \left[ -p \delta e_v - e_v \delta p + \theta_{ij} \delta e_{ij} + \rho \left\{ -b_i + \frac{Dv_i}{D} \right\} \delta v_i \right] dV = \\ = \iint_{S_p} \left\{ \bar{p}_n \delta v_n + \bar{p}_s \delta v_s \right\} dS.$$

З допомогою співвідношень виключено напруги  $\tau_{ij}$ . Одержано [29]

$$\iiint \left[ \left\{ -p \delta e_v - e_v \delta p + 2\mu e_{ij} \delta e_{ij} - \frac{2}{3} \mu e_v \delta v - \rho b_i \delta v_i + \rho \left\{ v_i v_{ij} + \frac{\partial v_i}{\partial} \right\} \delta v_i \right\} \right] dV - \\ - \iint \left\{ \bar{p}_n \delta v_n + \bar{p}_s \delta v_s \right\} dS = 0.$$

Рівняння справедливо при довільних варіаціях  $\delta p$  та  $\delta v_i$ . Тиск можна розглядати як множник Лагранжа для умови нерозривності.

Тоді

$$p = \phi^T p^n, v_i = \phi^T v_i^n \quad i=1,2,3 ,$$

де  $p^n$  - матриця вузлових тисків елемента;  $v_i^n$  - матриця вузлових швидкостей.

Зроблено припущення, що для представлення тисків і швидкостей придатні ті самі інтерполяційні функції.

Скориставшись довільністю варіацій  $\delta p$  та  $\delta v_i$ , одержано в елементній формі для двовірної задачі два рівняння кількості руху [26]

$$-c'^T p^n + K' + A v_1^n + K'' v_2^n + M v_1^n = F_1,$$

$$-c''^T p^n + K'' + A v_2^n + K''' v_1^n + M v_2^n = F_2$$

і рівняння нерозривності

$$-c' v_1^n + c'' v_2^n = 0,$$

де

$$c' = \iint \phi \phi_1^T dx_1 dx_2; c'' = \iint \phi \phi_2^T dx_1 dx_2;$$

$$K' = \iint \mu \left\{ 2\phi_1 \phi_1^T + \phi_2 \phi_2^T - \frac{2}{3} \phi_1 \phi_2^T \right\} dx_1 dx_2;$$

$$K'' = \iint \mu \left\{ \phi_2 \phi_1^T - \frac{2}{3} \phi_1 \phi_2^T \right\} dx_1 dx_2;$$

$$K''' = \iint \mu \left\{ \phi_1 \phi_1^T + 2\phi_2 \phi_2^T - \frac{2}{3} \phi_2 \phi_1^T \right\} dx_1 dx_2;$$

$$A = \iint \rho \phi v_1 \phi_1^T + v_2 \phi_2^T dx_1 dx_2;$$

$$M = \iint \rho \phi \phi^T dx_1 dx_2;$$

$$F_i = \iint \rho \phi b_i dx_1 dx_2 + \int \phi p_i dS \quad (i=1,2)$$

Поєднавши рівняння по всіх елементах області, остаточно одержано

$$\begin{aligned} -b^T L_p + K + A L_v + M\dot{L}_v &= F_p, \\ bL_v &= 0, \end{aligned}$$

де  $L_p$  - невідомі вузлові тиски;  $L_v$  - невідомі швидкості.

Після накладення граничних умов для швидкості права частина рівняння нерозривності в загальному випадку не дорівнює нулю, тобто рівняння прийняло вид

$$bL_v = F_v,$$

де  $b$  в даному випадку вже інша матриця [30].

Так само облік граничних умов змінює зміст матриць рівняння кількості руху. Надалі зроблено припущення, що рівняння кількості руху і нерозривності виписані з урахуванням граничних умов [31].

Тоді вирішення рівняння щодо вузлових прискорень має вигляд:

$$\dot{L}_v = M^{-1} F_p + b^T L_p - K + A L_v .$$

Після диференціювання рівняння за часом отримано

$$b\dot{L}_v = \dot{F}_v$$

У результаті одержано

$$bM^{-1}b^T L_p = F,$$

де

$$F = F_v + bM^{-1} K + A L_v - bM^{-1} \dot{F}_p.$$

Після рішення рівняння можна знайти швидкості шляхом інтегрування. Це інтегрування можна виконати, використовуючи методи Рунге-Кутта, Ейлера чи будь-яким іншим явним методом [32]. Якщо течія повільна, то  $A=0$ ; в такому випадку одержано течію Стокса. Цю течію іноді використовують як початкове наближення при одержанні стаціонарного рішення для чисел Рейнольдса, відмінних від нуля [33].

Обчислення великої кількості інтегралів може бути серйозною проблемою під час виконання розрахунків поля швидкостей в каналах обмоток трансформатора.

## 2.3 Рівняння прикордонного шару при плоскому плинні

### 2.3.1 Складання рівнянь прикордонного шару для плинну уздовж плоскої пластини

З метою найбільш фізичного наочного пояснення способу, що дозволяє спростити рівняння Нав'є – Стокса, розглянуто плоску течію біля тонкого циліндричного тіла [34].

На деякій відстані від поверхні тіла усередині рідини переважають унаслідок малої в'язкості, сили інерції, дія ж в'язкості там майже не виявляється. Швидкість плинну майже до самої поверхні тіла має порядок швидкості  $v$  у дальності від тіла. Картина ліній струму, а також розподіл швидкостей усередині рідини практично мають такий же вид, як і при потенційному плинні рідини без тертя. Однак, більш точні спостереження показують, що рідина не ковзає по поверхні тіла, як при потенційному плинні, а прилипає до неї [35]. Перехід від нульової швидкості на стінці до повної швидкості, що існує на деякій відстані від стінки, відбувається в дуже



тонкому шарі, називаному прикордонним шаром чи шаром тертя. Отже, в розглянутому плинні розрізняють дві області, між якими, щоправда, не можна провести різкої границі:

1. Перша область - дуже тонкий шар у безпосередній близькості від тіла. У цій області градієнт швидкості  $\frac{\partial u}{\partial y}$  в напрямку, перпендикулярному до стінки, дуже великий (прикордонний шар), а в'язкість  $\mu$ , як би вона ні була мала, впливає на плин, оскільки тут дотичне напруження  $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$ , викликане тертям, може приймати великі значення.

2. Друга область - весь інший плин поза прикордонним шаром. У цій області градієнт швидкості не досягає таких великих значень, як у прикордонному шарі, тому дія в'язкості тут не грає ролі і можна вважати, що плин тут потенційний.

Як правило, прикордонний шар тим тонше, чим менше в'язкість, у більш загальному формулюванні, чим більше число Рейнольдса. Товщина прикордонного шару пропорційна кореню квадратному з кінематичної в'язкості, тобто  $\delta \sim \sqrt{\nu}$ , при спрощеннях, що можуть бути зроблені в рівнянні Нав'є – Стокса з метою одержання з них рівнянь пограничного шару, приймається, що товщина прикордонного шару дуже мала в порівнянні з деяким характерним лінійним розміром  $L$  тіла, тобто  $\delta \ll L$ . Таким чином, рішення рівнянь прикордонного шару являють собою власне кажучи асимптотичне рішення для великих чисел Рейнольдса.

Для спрощення рівнянь Нав'є – Стокса для плинну в прикордонному шарі, насамперед, зроблено оцінку окремих членів цих рівнянь з погляду порядку їхньої величини [35]. При розгляді двовимірної задачі приймається, що обтічна рідиною стінка плоска. Вісь  $x$  направлено уздовж стінки, а вісь  $y$  - перпендикулярно до стінки. Рівняння Нав'є – Стокса записано в безрозмірній формі, для чого усі швидкості віднесено до швидкості  $v$  потоку, що набігає, а всі довжини - до характерного лінійного розміру тіла  $L$ , який вибрано таким

чином, щоб безрозмірна величина  $\frac{\partial u}{\partial x}$  у розглянутої області плинину не перевищував один по одному одиницю. Тиск і час зроблено безрозмірними, розділивши їх відповідно на  $\rho v^2$  і на  $\frac{L}{v}$ . Отримані безрозмірні величини позначено для спрощення запису знову тими ж буквами.

У результаті рівняння Нав'є – Стокса розглянутої плоскої задачі прийняли вид: для напрямку  $x$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right),$$

$$1 \quad 1 \quad 1 \quad \delta \quad \frac{1}{\delta} \quad \delta^2 \quad 1 \quad \frac{1}{\delta^2}$$

для напрямку  $y$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right).$$

$$\delta \quad 1 \quad \delta \quad \delta \quad 1 \quad \delta^2 \quad \delta \quad \frac{1}{\delta}$$

Безрозмірним рівнянням нерозривності буде

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0.$$

Граничними умовами будуть: прилипання рідини до стінок, тобто

$$u = v = 0 \text{ при } u = 0,$$

і збіг швидкості  $u$  на зовнішньому краї прикордонного шару зі швидкістю  $U$  зовнішнього плинину, тобто

$$u = U \text{ при } y \rightarrow \infty.$$

Розділено товщину прикордонного шару  $\delta$  на характерний лінійний розмір тіла  $L$ , тобто ця товщина стала безрозмірна. Така безрозмірна товщина

- позначена тією же буквою  $\delta$  - на підставі зробленого вище припущення повинна бути дуже мала в порівнянні з одиницею, тобто

$$\delta \ll 1$$

Виконано оцінку окремих членів рівнянь з метою відкинути чисельно малі члени і тим самим спростити рівняння. З рівняння нерозривності відразу видно, що, оскільки величина  $\frac{\partial u}{\partial x}$  має порядок одиниці, такий же порядок має і величина  $\frac{\partial v}{\partial y}$ . Але тому що на стінці швидкість  $v=0$ , то звідси випливає, що в прикордонному шарі величина швидкості  $v$  має порядок  $\delta$ . Тому такий же порядок  $\delta$  мають у прикордонному шарі і величини  $\frac{\partial v}{\partial x}$  і  $\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$ . Величина  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$  має порядок одиниці.

У близькому до стінки шарі рідини деякі з других похідних швидкості повинні бути дуже великі. Відповідно до сказаного вище такими похідними можуть бути тільки  $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$  і  $\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}$  [35]. Тому що складова швидкості, рівнобіжна стінці, змінюється в тонкому шарі, що має товщину  $\delta$ , від нуля на стінці до одиниці на границі з зовнішнім плином, тоді

$$\frac{\partial u}{\partial y} \sim \frac{1}{\delta} \quad \text{та} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \sim \frac{1}{\delta^2},$$

у той час як

$$\frac{\partial v}{\partial y} \sim \frac{\delta}{\delta} \sim 1 \quad \text{та} \quad \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \sim \frac{1}{\delta}.$$

З першого рівняння видно, що величина членів, залежних від в'язкості, має в прикордонному шарі однаковий порядок з інерційними членами тільки за умови, що величина числа Рейнольдса має порядок  $1/\delta^2$ , тобто за умови, що

$$\frac{1}{Re} = \delta^2.$$

Таким чином, для плинину, у якому число Рейнольдса велике, можна спростити перше рівняння руху, відкинувши для цього величину  $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ , як малу в порівнянні з  $\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ . Рівняння нерозривності залишається незмінним [33]. Що стосується другого рівняння руху, то з нього видно, що величина  $\frac{\partial p}{\partial y}$  має порядок  $\delta$ ; отже, величина різниці тисків поперек прикордонного шару, яку можна було б обчислити шляхом інтегрування другого рівняння, має порядок  $\delta^2$ , тобто дуже мала, і тому тиск у поперечному напрямку прикордонного шару залишається практично постійним. Його можна прийняти рівним тому тиску, що існує на зовнішньому краї прикордонного шару і яке визначається тут плинном без тертя. Таким чином, тиск у прикордонному шарі як би створюється зовнішнім плинном, і його потрібно розглядати як відому функцію, що залежить тільки від подовжньої координати  $x$  і від часу  $\tau$  [34].

На зовнішній границі прикордонного шару подовжня швидкість  $u$  переходить у швидкість  $U(x)$  зовнішнього плинину [35]. Тому що тут уже немає сильного градієнта швидкості в напрямку, перпендикулярному до стінки, то тепер у рівнянні відпадають усі члени, залежні від в'язкості. Тому для зовнішнього плинину рівняння, якщо повернутися знову до розмірних величин, приймає вид

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}.$$

Для стаціонарного плинину  $\frac{\partial u}{\partial t} = 0$ , а тиск залежить тільки від  $x$ , і рівняння приймає після заміни частних похідних на звичайні ще більш простий вид

$$U \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}.$$

Проінтегрувавши це рівняння, одержано рівняння Бернуллі

$$p + \frac{\rho}{2} U^2 = \text{const.}$$

Граничні умови для зовнішнього плинину приблизно такі ж, як для плинину без тертя. Прикордонний шар дуже тонкий, а поперечна швидкість  $u$  на його зовнішньому краї дуже мала ( $v/V \sim \delta/L$ ). Отже, потенційне обтікання розглянутого тіла, що має на стінках тіла нормальну складову швидкості, рівну нулю, можна розглядати як дуже точне наближення для зовнішнього плинину в'язкої рідини. Тому для визначення перепаду тиску в подовжньому напрямку прикордонного шару досить скласти рівняння Бернуллі для співпадаючої зі стінкою лінії струму потенційного плинину, рахованого заданим [36].

Отже, після усіх виконаних спрощень від двох рівнянь Нав'є – Стокса залишається тільки одне, котре, якщо знову повернутися до розмірних величин, приймає разом з рівнянням нерозривності наступний вид

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2},$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

причому граничними умовами будуть

$$u = v = 0 \text{ при } y=0 \text{ та } u = U \text{ при } y=\infty.$$

Система рівнянь називається рівняннями Прандтля для прикордонного шару. Швидкість  $U(x,y)$  потенційного плинну потрібно розглядати як відому функцію, що визначає за допомогою рівняння розподіл тиску. Крім того, для нульового моменту часу повинне бути задане відповідне умовам задачі плин у прикордонному шарі у всій області розглянутих значень  $x$  и  $y$  [37].

Для стаціонарного плинну система рівнянь приймає більш простий вид

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2},$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0,$$

причому граничними умовами будуть

$$u = v = 0 \text{ при } y=0 \text{ та } u = U \text{ при } y=\infty.$$

Спрощення рівнянь Нав'є – Стокса, отримане Прандтлем, з математичної точки зору дуже важливе. Нелінійний характер рівнянь Нав'є – Стокса зберігається, однак із трьох первісних рівнянь плоскої задачі з перемінними  $u$ ,  $v$ ,  $p$  одне рівняння, а саме рівняння руху для напрямку, перпендикулярного до стінки, цілком відпадає. Відповідно до цього скорочується на одиницю число невідомих, і залишається система рівнянь тільки з двома невідомими  $u$  і  $v$ . Тиск  $p$  уже не є невідомою величиною, тому що воно може бути визначене з рівняння Бернуллі, складеного для потенційного плинну біля розглянутого тіла, причому цей плин варто вважати

заданим. Крім того, у єдиному з рівнянь руху, що залишилися, один із двох членів, що залежать від в'язкості, відсутній [38].

З формули  $\frac{1}{Re} = \delta^2$  виходить наступна оцінка для товщини прикордонного шару

$$\frac{\delta}{L} \sim \frac{1}{\sqrt{Re}} = \sqrt{\frac{\nu}{VL}},$$

що підтверджує колишню оцінку  $\delta \sim \sqrt{\nu}$ , отриману з точних рішень рівнянь Нав'є – Стокса. Для випадку пластини, обтічної паралельно своїй площини, чисельний множник, що переводить пропорційність (1.79) у рівність, дорівнює приблизно 5 за умови, що  $L$  позначає відстань від передньої кромки пластини [139].

2.3.2 Зауваження з приводу інтегрування рівнянь прикордонного шару

Для інтегрування рівнянь прикордонного шару при плоскій течії, як нестационарному, так і стаціонарному, часто спочатку задовольняється рівняння нерозривності, для чого введено функцію струму  $\psi(x, y, t)$ , тобто

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Підставивши ці вираження складових швидкості в рівняння, одержано

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial y \partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial x} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{\partial^3 \psi}{\partial y^3},$$

тобто диференціальне рівняння третього порядку. Граничні умови визначаються умовою прилипання на стінці, отже, повинні бути

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0.$$

У момент часу  $\tau = 0$  повинний бути заданий розподіл швидкостей

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}$$

у всьому просторі. Порівнюючи рівняння для функції струму з аналогічним рівнянням, отриманим із системи повних диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, видно, що в результаті спрощень, зроблених при виводі рівнянь прикордонного шару, порядок диференціального рівняння для функції течії понизився з четвертого до третього [35]. Базуючись на приведених вище рівняннях створена чисельна модель гідравлічних процесів в масляних каналах трансформатора, яка потребує вирішення методом кінцевих елементів.

#### 2.4 Контур природної циркуляції масла в каналах обмоток

Контур циркуляції масла з точки зору теплових процесів, які відбуваються в ньому, можна розділити на три характерні ділянки (рис.2.1) [17]:

- 1) ділянка нагрівання А—В;
- 2) наближено ізотермічні ділянки В—С і D—А;
- 3) ділянка охолодження С—D.

На ділянці А—В тепло від обмотки передається маслу. Холодне масло через канали нижньої ізоляції входить в обмотку, контактує з її поверхнею,



яка має більш високу, ніж масло, температуру, нагрівається, знижує свою питому вагу і переміщується вгору. Розмір перепаду температури між обмоткою та холодним маслом позначається  $\Delta\theta_f$ . Характер руху масла по обмотці визначається вертикальними і горизонтальними (радіальними) масляними каналами, які утворюються рейками і прокладками. Відповідним розташуванням вертикальних масляних каналів можна забезпечити певний напрям руху масла і в горизонтальних каналах між котушками. Рух масла в обмотці носить прикордонний характер.

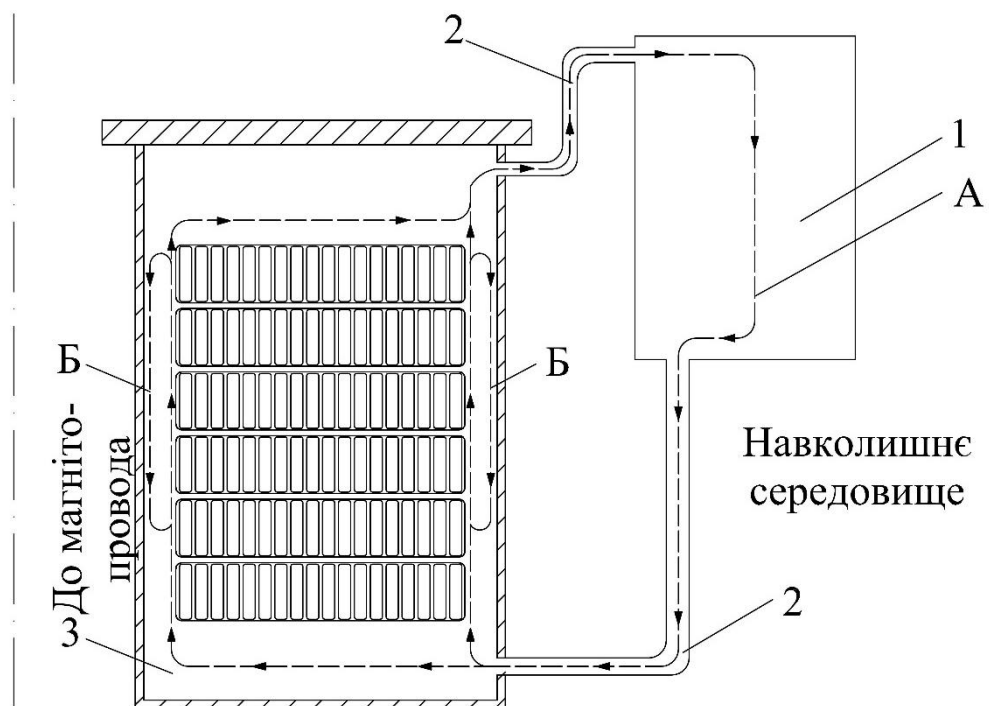


Рисунок 2.1 - Основний і паралельний контури циркуляції масла в трансформаторі з природним масляним охолодженням

Незначна частина нагрітого масла охолоджується біля стінки бака та опускається донизу уздовж стінки по вертикальному каналу. Кількість теплоти, яка відводиться таким чином складає не більше 5% [18] від теплоти, що віддається охолоджуючим середовищем через радіатори. Цей паралельний контур приведений на рисунку 2.1, де 1 – радіатор охолодження,

2 – маслопровод, 3 – бак, заповнений маслом, А – повний контур охолодження масла, Б – паралельні контури.

Горизонтальні канали обмоток мають чотири особливості [17]:

а) котушки, що утворюють горизонтальні канали, мають вздовж каналу практично постійну на одиниці радіального розміру поверхневу густину теплового потоку і рівномірно підігрівають масло, яке рухається вздовж каналу;

б) температура котушок, які знаходяться в маслі та розташовані одна над одною, тим більше, чим вище розташована котушка, а температура поверхні вище температури навколишнього масла на розмір перепаду температури  $\Delta \vartheta_f$ ;

в) середня температура прикордонного шару масла у поверхні котушки  $\Delta \vartheta_{mo}$  більше температури масла, що циркулює в каналах, на  $0,5 \vartheta_f$ . Оскільки масова витрата масла в прикордонному шарі потоку масла суттєва, то його середня температура впливає на температуру всього потоку масла;

г) хоча рух масла носить прикордонний характер, але завдяки розчленованості масляних каналів, та частій зміні напрямку руху, розподіл температури масла біля виходу з обмотки в точці В можна вважати близьким до рівномірного.

Масло, що рухається в вертикальних каналах біля стержня магнітопровода, підігрівається з двох сторін. Циркуляція в цих каналах носить прикордонний характер.

Теплота, яка виділяється в міді обмоток, передається через поверхню тепловіддачі площею  $F_k$  при поверхневій густині теплового потоку  $q$ , та підвищує температуру циркулюючого масла, що має масову витрату  $G_o$  і середню питому теплоємність  $C_o$ , на  $\Delta \vartheta_{to}$ .

$$\Delta \vartheta_{to} = \frac{q F_k}{c_o G_o} .$$

Величину  $\frac{F_k}{c_o}$  позначено через  $C_1$ . Тоді

$$\Delta \vartheta_{io} = C_1 \frac{q}{G_o} .$$

Для подальшого визначення підйомної сили, що діє в трансформаторному маслі, визначено гравітаційний тиск, чисельне значення якого  $\Delta p$ , розраховується по рівнянню

$$\Delta p = g \rho_k \beta_k \int \vartheta_{\text{ср}} dH$$

Параметр  $\rho_k \beta_k$ , кг/(м<sup>3</sup>·°С), являє собою зміну щільності масла, яка викликана зміною температури на 10 °С, і віднесена до середньої температури масла  $\vartheta_k$ . На ділянці А—В в обмотці висотою  $H_t$  масло нагрівається; на ділянці С-Д в радіаторах висотою  $H_t$  (відстань між осями приєднувальних патрубків) масло охолоджується. Прийнято, що на ділянці А—В температура змінюється за лінійним законом, тобто передбачається, що кількість теплоти, яка передається маслу в одиницю часу з одиниці довжини шляху (Вт/м), не змінюється зі зміною температури і що питома теплоємність масла також залишається постійною [17].

Характерною точкою ділянки А—В є точка Е, яка називається центром нагріву, що відповідає середині висоти обмотки і в якій масло, що циркулює в обмотці, має перевищення температури, яке дорівнює перевищенню середньої температури масла над температурою повітря  $\Delta \vartheta_{\text{оат}}$ .

Форма кривої ділянки С—Д відповідає температурному розподілу, який виникає в тому випадку, коли теплоємність одного з середовищ, що беруть участь в теплообміні, в даному випадку – повітря, приймається рівній

нескінченності [17]. Характерною точкою цієї кривої є точка F, яка називається центром охолодження. Температура повітря в радіаторі прийнята постійною у всьому радіаторі і дорівнює  $\vartheta_0$ . В точці F температура масла відрізняється від температури повітря в радіаторі на логарифмічну різницю температур  $\Delta\vartheta_{rk}$

$$\Delta\vartheta_{rk} = \frac{\Delta\vartheta_0}{\ln \frac{1}{1 - \Delta\vartheta_0 / \Delta\vartheta_{obe}}}$$

(3.41)

Точка F знаходиться вище середини висоти радіаторів на розмір  $H_2$ . Відстань між серединами обмотки і радіатора позначається через  $H_1$ . Різниця висот точок E і F

$$H_0 = H_1 + H_2.$$

Площа температурної петлі

$$T \approx (H_1 + H_2) \Delta\vartheta_0.$$

Для визначення розміру  $H_2$  знаходиться площа  $T_1$  фігури CDGC

$$T_1 = H_T (\Delta\vartheta_{rk} - \Delta\vartheta_{oki}).$$

Через те, що площа петлі CDGC дорівнює площі прямокутника, що має основу  $\vartheta_0$  і висоту  $0,5H_1 - H_2$ , то

$$T_1 = \Delta\vartheta_0 (0,5H_1 - H_2) = H_T (\Delta\vartheta_{rk} + \Delta\vartheta_0 - \Delta\vartheta_{obe}).$$

Тоді  $H_2$ :

$$H_2 = H_r \left( \frac{\Delta \mathcal{G}_{obe}}{\Delta \mathcal{G}_o} - \frac{\Delta \mathcal{G}_{rk}}{\Delta \mathcal{G}_o} - 0,5 \right).$$

Площа температурної петлі

$$T = \left[ H_1 + H_r \left( \frac{\Delta \mathcal{G}_{obe}}{\Delta \mathcal{G}_o} - \frac{\Delta \mathcal{G}_{rk}}{\Delta \mathcal{G}_o} - 0,5 \right) \right] \Delta \mathcal{G}_o = H_1 \Delta \mathcal{G}_o + H_r \left( \Delta \mathcal{G}_{obe} - \Delta \mathcal{G}_{rk} - 0,5 \Delta \mathcal{G}_o \right)$$

Тоді, гравітаційний тиск

$$\Delta P = g \rho_k \beta_k T.$$

Напір визначається

$$\Delta p = H_o g \rho_k \beta_k \Delta \mathcal{G}_o.$$

Нехай  $C_2 = H_o g \rho_k \beta_k$ . Тоді

$$\Delta p = C_2 \Delta \mathcal{G}_o.$$

Якщо в це рівняння підставити значення з формули і прийняти, що  $C_1 C_2 = C_3$ , то

$$\Delta p = C_3 \frac{q}{G_o}.$$

Це гравітаційний тиск, який покриває втрати тиску, що виникають при русі масла і зумовлені втратою тиску на гідравлічні опори в контурі циркуляції, які пропорційні масовій витраті масла

$$\Delta p = C_4 G_o$$

Отримано, що

$$G_o = C_5 \sqrt{q},$$

де  $C_5 = \sqrt{C_3/C_4}$

Підставляючи в формулу значення  $G_o$ , визначено осьовий перепад температури масла в обмотці

$$\Delta g_{to} = C_6 \sqrt{q},$$

де  $C_6 = C_1/C_5$

Тоді

$$\Delta p = C_7 \sqrt{q},$$

де  $C_7 = C_2 C_6$

Існування цих залежностей підтверджено експериментально [17].

## 2.5 Поле швидкостей течії охолоджуючого середовища в масляних каналах трансформатора

В обмотках силових трансформаторів виділяють вертикальні та горизонтальні (радіальні) масляні канали. Вертикальні канали утворюються поверхнями ізоляційних циліндрів. Горизонтальні – поверхнями котушок, які відділяються одна від одної дистанційними ізоляційними прокладками [18].

При створенні чисельної моделі були враховані наступні припущення:

- ізоляційні прокладки не виступають в вертикальні канали і не створюють додатковий опір в них [22];

- прокладки та рейки не перекривають перетин вертикальних та радіальних каналів. В реальній обмотці це припущення не є істиною, проте вплив прокладок та рейок не створюють значного опору течії масла та ним можна знехтувати [18];

- радіальні канали утворені паралельними площинами [26].

Для зниження похибки розрахунків було прийнято, що тиск масла на виході з моделі та швидкість на вході до неї розраховуються програмою, виходячи з величини підйомної сили, яка виникає в моделі. Крім того, швидкість масла на всіх поверхнях, які створюють канали моделі дорівнює нулю [14] (виконуються умови прилипання).

В якості швидкості течії масла в вертикальному каналі, яка наведена в таблиці, вибрана середня швидкість в правому каналі на рівні котушки з відповідним порядковим номером [20].

Швидкість течії масла в горизонтальному каналі дорівнює середній швидкості в каналі, який має відповідний порядковий номер. Наприклад, значення швидкості, яка приведена в першому рядку відповідає середній швидкості масла в радіальному каналі, який утворено першою та другою котушками. Результати, що наведені в таблиці відповідають модулям швидкостей.

Швидкість течії масла в вертикальних каналах перевищує швидкість в відповідних радіальних каналах в 1,2 – 20 разів. Кількість теплоти, яка віддається котушкою масла знаходиться в прямій залежності від швидкості цього масла [12]. Таким чином, підтверджено припущення, яке зроблено в розділі 2, що основна кількість теплоти віддається котушками саме в вертикальні канали, незважаючи на те, що площа контакту котушки з вертикальним каналом на порядок менша ніж з радіальним.

Очевидним є те, що швидкість течії масла і в радіальних, і в горизонтальних каналах збільшується з просуванням вгору уздовж обмотки. На графіку в діапазоні до 30 котушки спостерігається зростання чисельних значень швидкостей з незначними коливаннями, які викликані тим, що ці результати не враховують напрям течії масла і в певний момент виникає розворот току, який і призводить до коливань результатів. Розподіл швидкостей в масляних каналах над 30 котушкою майже неможливо представити у вигляді залежностей через суттєвий вплив паралельних циркуляційних потоків (пункт 3.3), які утворюються завдяки близькому розташуванню цих каналів до великої кількості масла в верхній частині баку, яке має більш низьку температуру за рахунок тепловіддачі зі стінок баку. В межах котушок №№ 1 – 30 залежність швидкості течії охолоджуючої рідини в масляних каналах від порядкового номеру котушки описується наступними рівняннями:

$$V_{\text{верт}} = 140,86 \cdot (h/H)^2 - 7,0852 \cdot (h/H) + 4,1976, \quad R^2=0,91,$$

$$V_{\text{гор}} = 37,303 \cdot (h/H)^2 - 9,7675 \cdot (h/H) + 0,5297, \quad R^2=0,81$$

де  $h$  – висота до точки розрахунку, м;  $H$  – висота обмотки, м;

$V$  – швидкість течії масла, м/с,

всі коефіцієнти в правій частині рівняння мають розмірність  $\text{м/с} \cdot 10^{-3}$ .



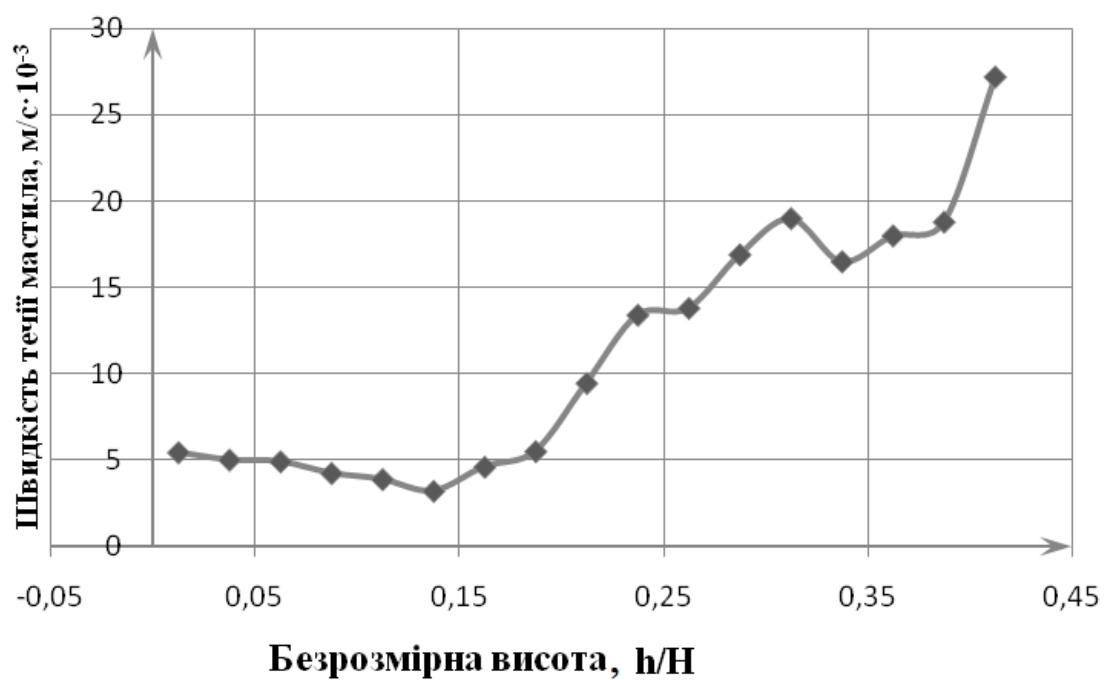


Рисунок 2.2 - Залежність середньої швидкості течії масла у вертикальному каналі обмотки трансформатора від розташування точки розрахунку

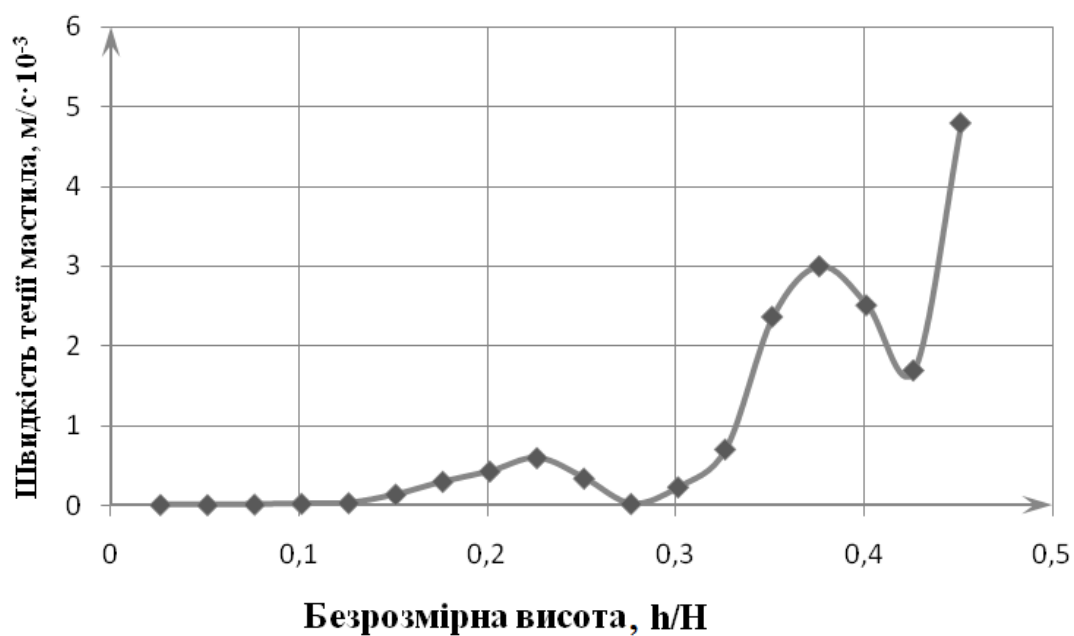


Рисунок 2.3 - Залежність середньої швидкості течії масла в горизонтальному каналі обмотки трансформатора від розташування точки розрахунку

Очевидно, що найбільша абсолютна швидкість масла уздовж вісі ОХ спостерігається в місцях округлення катушок. Причому негативні значення швидкостей спостерігаються в лівій частині моделі, а позитивні – в правій. Це означає, що в обох випадках масло направляється до виходу з радіального каналу. Проте, у випадку витікання масла в верхній частині входу в горизонтальний канал, в нижній частині спостерігається приток масла в цей канал. Про це можна судити виходячи з наявності на вході в канал зон, в яких масло рухається в протилежні боки. Отже, найбільш високі швидкості течії масла уздовж вісі ОХ спостерігаються в місцях, де розігріте масло намагається піднятися з – під катушки. Це забезпечує циркуляцію масла в зонах радіального каналу, які розташовані близько до вертикальних каналів. Чисельні значення швидкостей руху масла є незначними і не перевищують 6 мм/с (позначені на рис.2.4 відмітками «MN» та «MX»). Проте, в центральних частинах горизонтальних каналів спостерігається утворення зон застою масла, що в значній мірі ускладнює теплообмін між міддю катушок та охолоджуючою рідиною.

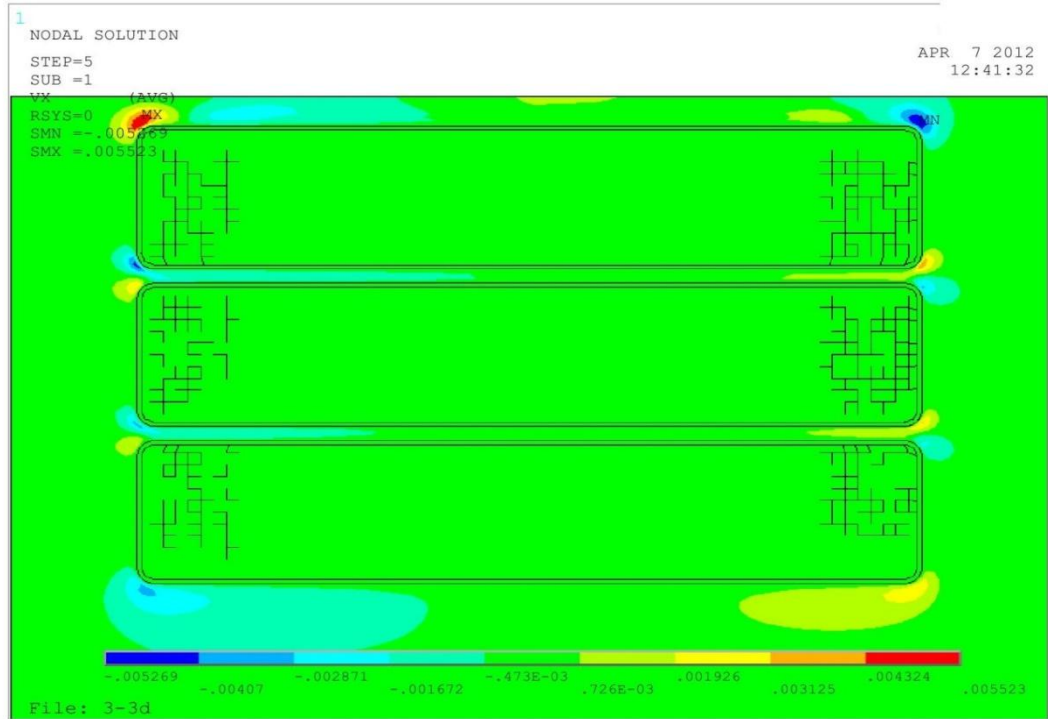


Рисунок 2.4 - Поле швидкостей масла (м/с) в каналах обмоток уздовж вісі ОХ

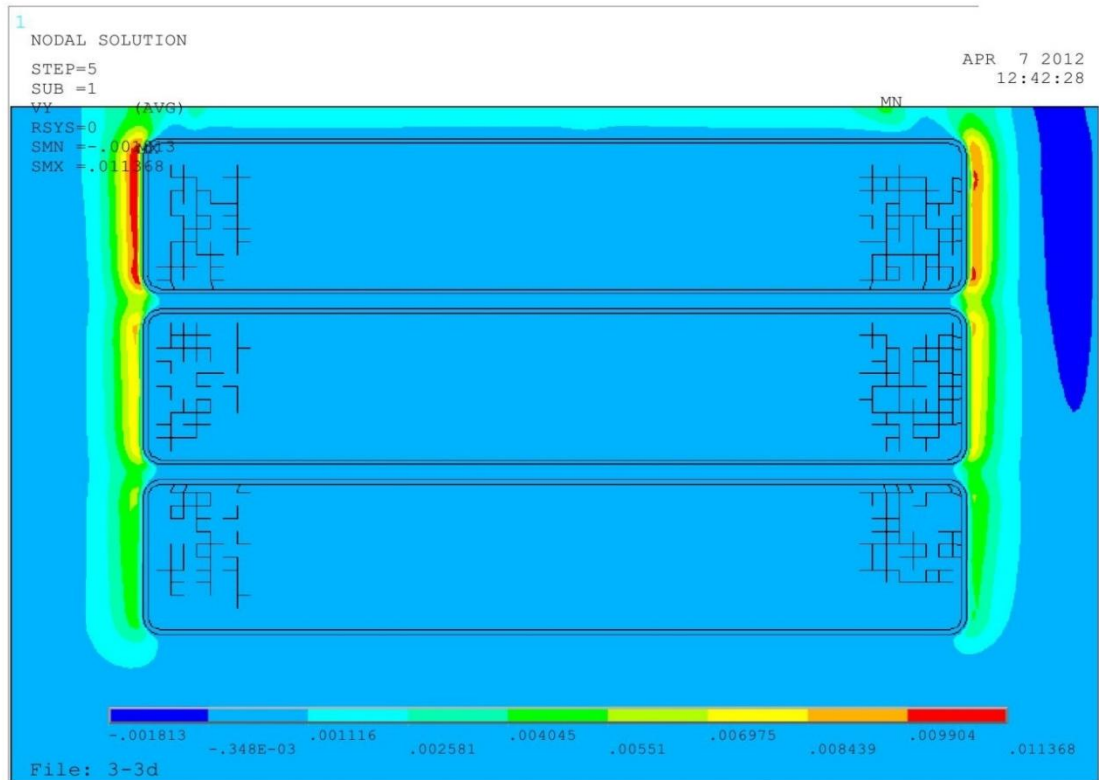


Рисунок 2.5 - Поле швидкостей масла (м/с) в каналах обмоток уздовж вісі ОУ

На рисунку 2.5 представлено поле швидкостей масла в каналах обмоток уздовж вісі ОУ. Очевидним є те, що У–компонента швидкості присутня лише в вертикальних каналах. Причому, з просуванням угору чисельне значення швидкості біля бокових стінок котушок зростає і досягає значення 11 мм/с (відмітка «МХ»). Це ще раз свідчить про те, що швидкість течії в вертикальному каналі на порядок вище швидкості в горизонтальному. Особливої уваги потребує характер розподілу швидкостей в верхній частині правого вертикального каналу. Наявність зони, масло в якій тече зверху вниз (чисельні значення швидкостей мають протилежний знак) свідчить про те, що в цьому каналі спостерігається циркуляція по паралельному контуру.

Наявність Х– та У–компоненти швидкості над верхньою та під нижньою котушкою свідчить про наявність циркуляції масла, подібної до циркуляції рідини біля розігрітої пластини [41].

2.6 Характер руху масла в горизонтальному каналі при швидкості течії охолоджуючої рідини, необхідної для організації ефективного відводу теплоти від дискових котушок трансформатора

Виходячи з досліджень можна зробити висновок, що підвищення швидкості на вході в радіальний канал призведе до значного зростання інтенсивності тепловіддачі від розігрітої міді котушок до охолоджуючого середовища.

Проте, для комплексної оцінки позитивності такого зовнішнього впливу необхідно провести аналіз залежності надлишкового тиску трансформаторного масла в горизонтальному каналі від швидкості середовища на його вході. Для цього на правій вертикальній границі каналу були встановлені штучні значення швидкостей масла. Дослідження проведені для наступних величин швидкостей: 0,1 м/с, 0,5 м/с, 1 м/с, 3 м/с, 4 м/с, 5 м/с, 6 м/с, 8 м/с, 9 м/с та 10 м/с [42].

Надлишковий тиск охолоджуючого середовища є тим параметром, який може викликати передчасний вихід трансформатора з ладу та привести до аварійної ситуації. Таким чином, виникає необхідність оцінювати значення максимального надлишкового тиску в радіальних каналах трансформатора. Для цього на графіку була додана лінія тренда, що усереднила отримані результати, яка описується рівнянням:

$$P_{кан} = 410,75 \cdot v_{вх.кан}^2 - 599,41 \cdot v_{вх.кан} + 311,79,$$

де  $P_{кан}$  – надлишковий тиск в горизонтальному каналі, Па,

$v_{вх.кан}$  – швидкість течії масла на вході в горизонтальний канал, м/с,

коефіцієнт 311,79 має розмірність Па, інші коефіцієнти в правій частині рівняння мають розмірність Па·с/м.

Таким чином, наявність штучної швидкості масла на вході в радіальний канал не може організувати наскрізну циркуляцію в ньому. Крім того, що організувати наявність цієї швидкості технічно неможливо без внесення змін в конструкцію трансформатора [42], так це призведе до суттєвого зростання надлишкового тиску в радіальних каналах, що може призвести до порушення роботи електричної машини та спричинити аварійну ситуацію.

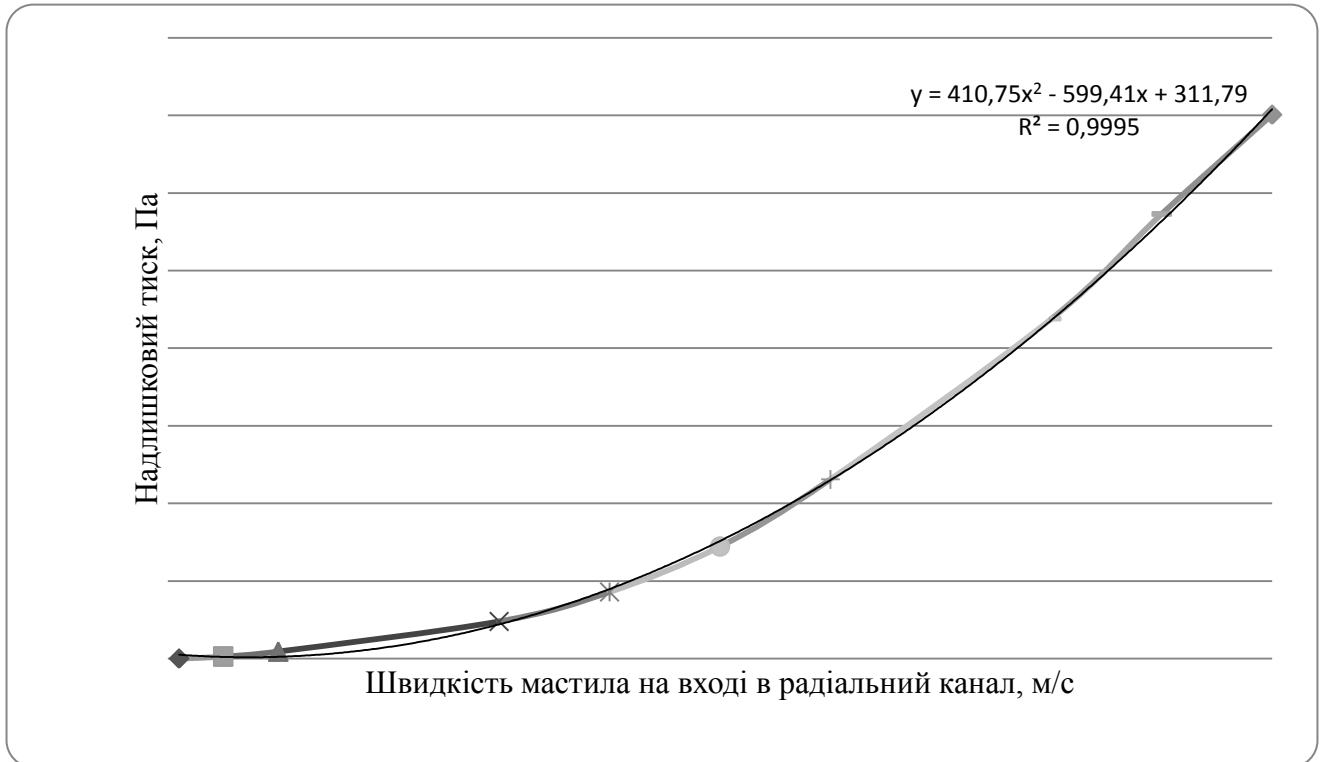


Рисунок 2.6 - Залежність надлишкового тиску масла від швидкості його течії на вході в горизонтальний канал

## 2.7 Особливості руху охолоджуючої рідини в горизонтальному каналі

Особливої уваги потребує дослідження характеру руху охолоджуючої рідини в радіальних каналах [43].

На рисунку 2.7 відображено поле швидкостей масла в радіальному каналі моделі, на рисунку 2.8 – розподіл надлишкового тиску.

На рисунку 2.9 видно, що в радіальному каналі відсутня наскрізна течія масла, що підтверджує висновки, які зроблені в другому розділі. Про це можна стверджувати виходячи з наявності зони, в якій швидкість течії масла наближається до 0 м/с. Ця зона знаходиться в центральній частині каналу.

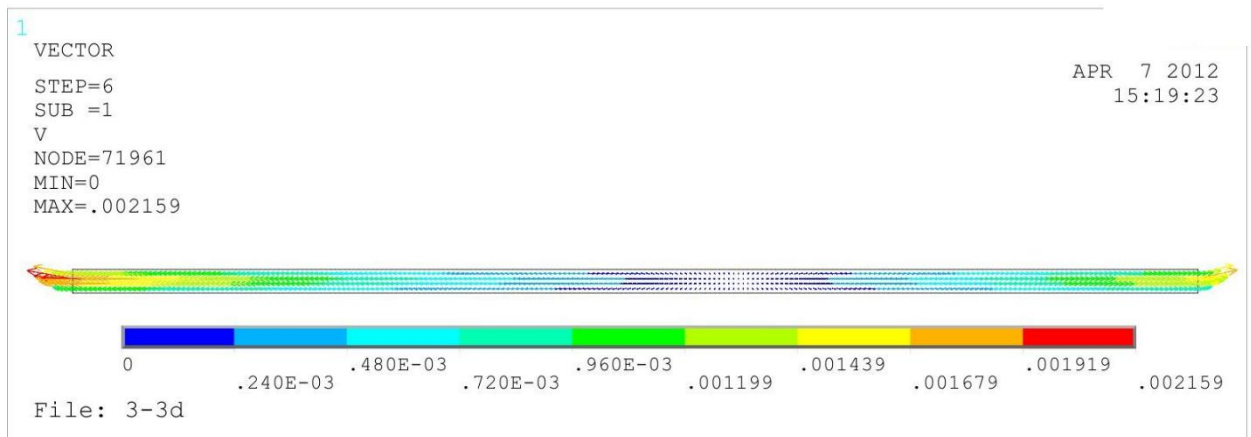


Рисунок 2.7 - Поле швидкостей масла в радіальному каналі трансформатора

Розподіл тиску в радіальному каналі (рис. 2.7) залежить від швидкості течії масла в цьому каналі. В центральній частині каналу масло прогрівається теплом, яке виділяється котушками, що утворили стінки каналу. Прогріте масло має меншу щільність, в рідині виникає підйомна сила. Масло, яке має більш високу температуру піднімається вгору поперек радіального каналу і зупиняється біля верхньої стінки. Охолоджуюча рідина прагне залишити об'єм каналу та піднятися вгору. Проте, сила в'язкості не дозволяє їй це зробити. Таким чином, в центральній частині каналу виникає зона з найбільш високим надлишковим тиском (позначка «МХ» на рис. 2.7).

В лівій та правій частинах каналу підйомна сила перевершує силу в'язкості, і, таким чином, в цих областях виникає невимушена циркуляція масла, яка направлена з каналу біля верхньої котушки, та в протилежний бік біля нижньої.

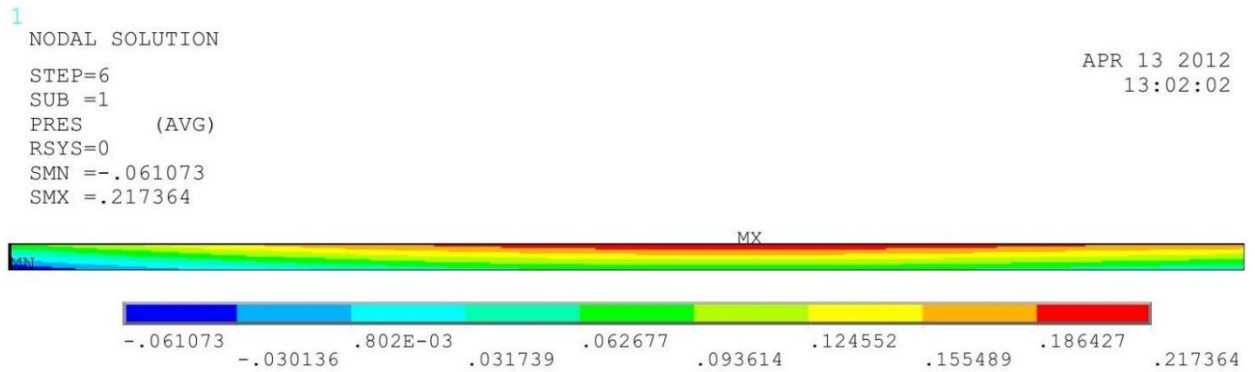


Рисунок 2.8 - Розподіл надлишкового тиску масла в радіальному каналі трансформатора

Виходячи з проведених розрахунків, об'єм радіального каналу можна розділити на наступні зони, які представлені на рисунку 2.9 [23]:

- 1 та 5 – вертикальні масляні канали;
- 2 та 6 – зони втікання масла в радіальний канал;
- 3 – зона застою масла;
- 4 та 7 – зони витікання масла з каналу.

Таким чином, в радіальних каналах відбувається рух рідини в зонах, які позначені на рис.3.18 цифрами 2, 4 ,6 та 7. Отримані результати мають характер ідентичний з результатами, які отримані експериментальним шляхом[17].



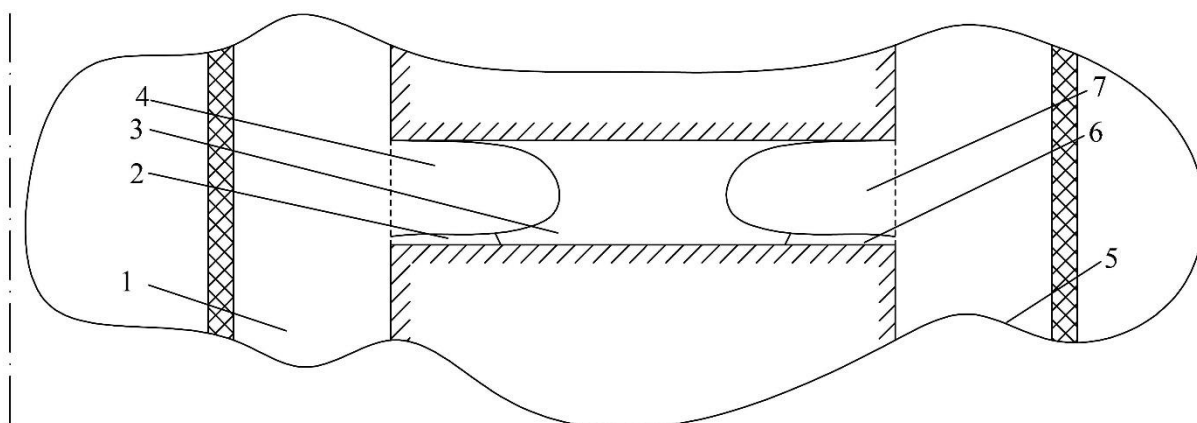


Рисунок 2.9 - Характер руху масла в горизонтальному каналі



Рисунок 2.10 - Нерухомий масляний шар в горизонтальному каналі за даними експериментів Л. Кіша

## 3 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 3.1 Аналіз шкідливих та небезпечних факторів в лабораторії

Одним з найголовніших умов здорової та високопродуктивної праці є забезпечення чистоти повітря. Технологічний процес в лабораторії не супроводжується надходженням в повітря робочої зони шкідливих речовин.

Такі роботи як, сварка, фарбування проводяться спеціалістами не в навчальний час.

По нормуванню шкідливих речовин в повітрі, приміщення відносять до 4 групи (малонебезпечні).

Роботи в лабораторії можна охарактеризувати як легкі, з надлишком явної теплоти.

В приміщенні присутнє джерело променистого потоку теплоти (Імітатор сонячного випромінювання).

Інтенсивність теплового опромінення людини, регламентується, виходячи з суб'єктивних відчуттів людиною енергії опромінювання. Людина може невизначено довго витримувати опромінювання інтенсивністю до 350 Вт/м<sup>2</sup>. Ця величина вважається верхньою межею оптимального опромінення (див. табл. 3.1). При більш високих значеннях повинно виконуватися повітряне душення робочих місць [31].

Таблиця 3.1 - Вплив теплового опромінення на людину в залежності від інтенсивності та тривалості

Інтенсивність опромінення, Вт/м <sup>2</sup>	Вплив	Тривалість опромінення, с
230-350	слабе	невизначено довго
350-1050	помірне	180-300
1050-1600	середнє	40-60
2000-2800	високе	18-24
3500	дуже високе	2-5

Вентиляція в лабораторії відноситься до вентиляції з природнім спонуканням та являється приливною.

Правильно виконане освітлення забезпечує нормальну діяльність. Небезпечної величини вібрацій в приміщенні не виявлено.

Лабораторія безпечна, в ній не виявлено жодного шкідливого чинника (сильна запиленість, підвищена волога, наявність біо- та хімічно-активних середовищ).

Пожежна безпека забезпечується вогнегасником. Приміщення має 1-ступінь вогнестійкості.

### 3.2 Заходи з усунення шкідливих та небезпечних факторів

Для запобігання виробничого травматизму та профзахворювань розроблені дві групи основних заходів з усунення шкідливих та небезпечних факторів: організаційні та інженерні (конструктивні).

Інженерні та організаційні заходи:

- строге дотримання технологічних інструкцій та інструкцій техніки безпеки;
- регулярне проведення інструктажів та навчання правил безпечної експлуатації установок для персоналу та студентів.

Студент може бути допущений до роботи тільки після проходження вхідного інструктажу з техніки безпеки, а також інструктажу на робочому місці. Вхідний інструктаж для студентів проводить викладач. Проведення інструктажу повинно бути закріплене записом в журналі реєстрації виробничого інструктажу з техніки безпеки [46].

### 3.3 Виробнича санітарія

Площа лабораторії становить 18 м<sup>2</sup>.

Природна вентиляція відбувається за рахунок різниці температур.

Джерела шуму та вібрації в даному приміщенні відсутні.

Опалення центральне, температура в приміщенні підтримується взимку в межах 15-21 °С.

Вологість не повинна перевищувати 70-75 %.

### 3.4 Техніка безпеки в лабораторії

Лабораторні роботи дозволяється виконувати тільки під наглядом викладача.

До виконання роботи в лабораторії допускаються студенти, які пройшли інструктаж з техніки безпеки при роботі в даній лабораторії та ознайомлені з правилами техніки безпеки при виконанні лабораторних робіт.

Інструктаж з техніки безпеки проводиться викладачем один раз в семестр на робочому місці до початку лабораторних робіт, проведення інструктажу реєструється. Всі підключення на головному щитку виконується тільки персоналом кафедри.

Студентам забороняється виконувати будь-яке перемикання, за виключенням тих, які передбачені по виконанню лабораторних робіт.

Для запобігання перегрівання стенду в процесі роботи ламп, необхідно попередньо увімкнути вентилятор. Вмикання вентилятора здійснюється після вимикання ламп.

Не рекомендується проводити вимірювання потоку світла, який перевищує верхню межу діапазону вимірювання, вказаний в технічних характеристиках пристрою в умовах експлуатації з метою уникнення виходу з ладу датчика вимірювальної головки.

Перед першим вимірюванням рекомендується витримати пристрій увімкненим протягом 30 хвилин. Після закінчення роботи, щоб уникнути передчасного розрядження елементів живлення, необхідно вимкнути пристрій, встановивши перемикач знову в положення “off” [47].

Після проведення роботи вимкнути електроживлення стенда.

### 3.5 Пожежна безпека в лабораторії

Питання забезпечення пожежної безпеки навчальної лабораторії має велике значення.

Пожежна безпека лабораторії може бути забезпечена заходами пожежної профілактики та активного пожежного захисту.

Поняття пожежної профілактики включає комплекс заходів, необхідних для попередження виникнення пожежі чи зменшення його наслідків.

Під активним пожежним захистом розуміються заходи, які забезпечують успішне подолання пожеж чи вибухонебезпечних ситуацій. Для визначення ступеня ймовірності виникнення пожежі, слід знати, до якої категорії небезпеки відносять споруду.

Приміщення лабораторії відноситься до категорії Д, це негорючі матеріали в холодному стані.

Єдина причина виникнення пожежі в лабораторії - коротке замикання електричної мережі та спалах інвентарю який знаходиться в приміщенні.

Горючими речовинами в установці являються в основному ізоляційний матеріали: Ізолон, пластмаса.

Ступінь вогнестійкості споруди - 1.

Організаційні заходи - розроблений план протипожежних заходів.

Всі студенти при роботі на установках проходять первинний та вторинний (на робочому місці) інструктаж з заходів пожежної безпеки.

Інженерні заходи - в лабораторії встановлені первинні та основні засоби пожежогасіння.

Так як лабораторія оснащена електричними установками, та такий засіб пожежогасіння, як вода, не підходить в даному випадку.

Основним засобом пожежогасіння являються порошкові вогнегасники.

В даній лабораторії використовується порошковий вогнегасник серії ОП - 02. Цей вогнегасник призначений для гасіння різних речовин (крім здатних горіти без повітря), а також установок з напругою до 1,0 кВ.

Застосування автоматичних засобів виявлення пожеж являється однією з умов забезпечення пожежної безпеки, так як дозволяє оповістити черговий персонал про пожежу та місце її виникнення.

В аудиторії відсутні автоматичні засоби виявлення пожежі.

### 3.6 Дослідження ефективності та якості освітлення

Раціональне освітлення приміщень та робочих місць - одна з найважливіших умов створення корисних та безпечних умов праці.

Схема освітлення лабораторії представлена на рисунку 3.1.

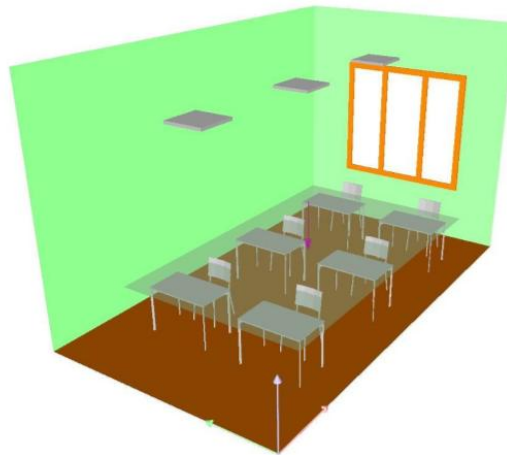


Рисунок 3.1 — Схема освітлення лабораторії

У відповідності до вимог Державних будівельних норм України ДБН В.2.5-28-2006. “Природне та штучне освітлення” величина середньої горизонтальної освітленості на робочих поверхнях (на рівні 0,8 м) в навчальних лабораторіях повинна становити не менше 400 лк [44].



Для вирішення поставленої задачі та досягнення необхідних значень основних параметрів якості світлового середовища в освітлюваній навчальній аудиторії шляхом комп’ютерного моделювання було проведено аналіз можливості застосування на об’єкті однієї з декількох найбільш поширених моделей плоских низькопрофільних накладних світлодіодних світильників розміром  $600 \times 600$  мм, з молочним розсіювачем.

Моделювання та світлотехнічні розрахунки проводилися за допомогою спеціальної комп’ютерної програми DIALux, призначеної для виконання світлотехнічних розрахунків та моделювання світлових сцен.

У якості основного типу світильників був обраний плоский панельний офісний світильник типу ДПО 03LL-40-01 (з високоефективним світлодіодним джерелом світла) виробленого українською фірмою Ledlab спільно з південноазіатським партнером.

Даний виріб відноситься до типових виробів низької цінової категорії “Бюджетна” (див. табл. 3.2) і має порівняно не погану якість серед світильників своєї групи.

Таблиця 3.2 — Умовні споживацькі категорії плоских офісних світлоїдних світильників, представлених на українському ринку.

Назва споживчої категорії світильників	Зовнішній вигляд	Коротка характеристика
Категорія 1 (бюджетна)		<p><math>P = 20...40 \text{ Вт}</math></p> <p><math>\Phi = 2500...3400 \text{ Вт}</math></p> <p><math>T = 25000...35000 \text{ годин}</math></p> <p>Роздрібна ціна...1200 грн</p>
Категорія 2 (стандартна якість)		<p><math>P = 30...45 \text{ Вт}</math></p> <p><math>\Phi = 3000...5000 \text{ Вт}</math></p> <p><math>T = 30000...40000 \text{ годин}</math></p> <p>Роздрібна ціна...2000 грн</p>
Категорія 3 (преміум)		<p><math>P = 30...60 \text{ Вт}</math></p> <p><math>\Phi = 3000...7000 \text{ Вт}</math></p> <p><math>T = 35000...50000 \text{ годин}</math></p> <p>Роздрібна ціна...2000 грн</p>

В розрахунку розглянуто 4 варіанти розташування світильників ДПО 0311-40-01 в аудиторії.

1. Перший варіант. Встановлено три світильника. Висота стелі в аудиторії - 4 м. Відстань підвісу світильника (від стелі) - 0,6 м. Відстань від



світильника до робочої поверхні - 2,6 м. Відстань від робочої поверхні до підлоги аудиторії - 0,8 м.

2. Другий варіант. Кількість встановлених світильників рівна 4. Всі параметри підвісу світлових приладів такі, як і в першому варіанті.

3. Третій варіант. Встановлені три світильника. Всі світильники максимально наближені до стелі. Оптимальна відстань між стелею та кожною панеллю становить 10-20 см ( з врахуванням необхідної відстані зі зворотнього боку панелі живлення — драйвера). Відстань від світильника до робочої поверхні приймалась рівною 3,0 м.

4. Четвертий варіант. Кількість встановлених світильників в аудиторії дорівнює 4. Всі відстані в вертикальній площині прийняті такими ж, як і у варіанті № 3.

Отримані результати світлотехнічного розрахунку за вказаними чотирма варіантами приведені нижче та зведені в таблицю 3.3.

Позначення:

$n$  – кількість світильників;

$H$  – відстань від світильника до робочої поверхні;

$l$  – відстань між центром світильників.

Таблиця 3. 3 — Основні результати світлотехнічного розрахунку

Варіант світлотехнічного розрахунку	Величина горизонтальної освітленості		
	$E_{\text{ср}}$ , лк	$E_{\text{min}}$ , лк	$E_{\text{max}}$ , лк
1 (n= 3 шт; H = 2,6 ; l = 2,3 м)	336	238	430
2 (n= 4 шт; H = 2,6 ; l = 1,75м)	445	307	533
3 (n= 3 шт; H = 3,0 ; l = 2,3 м)	308	240	354
4 (n= 4 шт; H = 3,0 ; l = 1,75м)	406	320	466

## Висновки та пропозиції:

1. Нормативні параметри світлового середовища об'єкта можуть бути забезпечені використанням 4 шт. офісних накладних панельних світлодіодних світильників типу ДПО 03LL-40-01.

2. Допускається для освітлення аудиторії, використання 3 шт. плоских світлодіодних панельних світильників розглянутого типу. При цьому висоту (H) підвісу та крок світильників в варіанті 1 доцільно ще зменшити на 10-15 %, а також на стільки ж збільшити відстань від центру крайнього світильника до вікна, доводячи його до 2,3...2,5 м.

3. Очікувана (розрахункова) величина зменшення електроспоживання на потреби освітлення об'єкта складе, %:

- у порівнянні зі старим проектним рішенням освітлення на лампах розжарювання та використання 4 - х світлодіодних світильників ДПО 03LL-40-01

---

- у порівнянні з трьома растровими люмінісцентними світильниками  $(4 \times 18) \times 3$  та трьома світлодіодними світильниками розглянутого типу

---

4. Реалізувати схему включення світильників за формулою 1+2 ( в варіантах 1 і 3), та 2+2 (в варіантах 2 і 4).

В залежності від джерела світла освітлення може бути трьох видів — природне, штучне та комбіноване (при комбінуванні природного та штучного освітлення).

Характеристика зорової роботи визначається мінімальним розміром об'єкта, контрастом об'єкта з фоном та характеристикою фону.

В реальних умовах на освітленість робочих поверхонь в приміщенні впливають такі фактори, як відбивання та поглинання освітлення стінами, стелею та іншими поверхнями, відстань від світильника до робочої поверхні, стан поверхні світильника і т.д. Внаслідок цього фактично використовується тільки частина світлового потоку, випромінюваного джерелом світла.

## ВИСНОВКИ

Силові трансформатори промислових об'єктів потребують підвищення ефективності їх використання з урахуванням конкретних умов експлуатації та навколишнього середовища. Виконання в повному обсязі вимог нормативно-технічної документації та інструкцій по експлуатації, що регламентують застосування силових трансформаторів на промислових підприємствах, можливо лише при впровадженні автоматизованої системи управління трансформаторними підстанціями.

При кількості трансформаторів більше одного і можливості перекладу навантаження з одного трансформатора на інші можна оптимізувати їх експлуатацію шляхом зміни кількості працюючих трансформаторів або перерозподілу між ними навантажень відповідно до обраного критерію оптимальності. Для цієї мети може бути використана система автоматичного або автоматизованого управління трансформаторними підстанціями, яка отримує на свій вхід дані вимірювань і формує керуючі впливу на високовольтні вимикачі, таким чином змінюючи кількість працюючих трансформаторів.

Також можна скористатися способом зниження коефіцієнта несиметрії струму в знижувальному трансформаторі та в трифазній лінії електропередач. Завдяки цьому способу досягається:

- зниження струмів перехідних процесів при включенні і відключенні навантажень за рахунок використання модулів, що містять транзистори і здійснення включення транзисторів в момент рівності нулю струму на шинах понижувального трансформатора і відключення в момент рівності нулю струму на відхідних кабелях, що з'єднують навантаження з шинами понижувального трансформатора;

- усунення міжфазного короткого замикання за рахунок блокування замикання транзисторів модулів інших фаз при включеному транзисторі модуля будь-якої фази.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛЬ ПОСИЛАНЬ

1. Лизунов, С. Д. Проблемы современного трансформаторостроения в России [Текст] / С. Д. Лизунов, А. К. Лоханин. – М.: Электричество, 2000. – 54с.
2. Копылов, И. П. Электрические машины: Трансформаторы. Учебное пособие для электромех. спец. вузов [Текст] / И. П. Копылов. — М.: Высш. шк., 1989.—352 с.
3. Prandtl, L. Fundamentals of hydro- and aeromechanics [Text] / L. Prandtl, O.G. Tietjens. — New York: McGraw-Hill, 1934. — 456 p.
4. Милн-Томсон, Л. М. Теоретическая гидродинамика [Текст] / Л. М. Милн-Томсон. — М.: Мир, 1964. — 530 с.
5. Bird, R. B. Transport phenomena [Text] / R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot. — New York: Wiley, 1960. — 182 p.
6. Aris, R. Vectors, tensors, and the basic equations of fluid mechanics [Text] / R. Aris. — New York: Prentice-Hall, 1962. — 604 p.
7. Happel, J. Low Reynolds number hydrodynamics (with special applications to particulate media) [Text] / John Happel, Howard Brenner. — New York: Prentice-Hall, 1965. – 631 p.
8. Andrade, E. N. Viscosity and plasticity [Text] / E. N. Andrade. — New York: Chemical Publishing Co., 1951. — 230p.
9. Rouse, H. Advanced mechanics of fluids [Text] / H. Rouse. — New York: Wiley, 1959. — 414 p.
10. Pai, S. Viscous flow theory: I—Laminar flow [Text] / S. Pai. — New York: D. Van Nostrand, 1956. — 364 p.
11. Meksyn, D. New methods in laminar boundary layer theory [Text] / D. Meksyn. — New York: Pergamon, 1961. — 322 p.
12. Preiningereva, V. Spojeny vypocet magnetickeho pole, pole ztrat a otepleni ve vinutich velkych olejovych transformatorn a jeho overeni [Text] / V.

Preiningereva, V. Kahoun, I. Dolezel // *Electrotechn. obz.* — 1984. — 73, №2. — pp. 69-76.

13. Preiningereva, V. Teplotni pole v civkach olejovych transformatoru [Text] / V. Preiningereva, M. Pivrnec // *Transformatory.* — 1976. — № 2-3. — P. 18-24.

14. Preiningereva, V. Temperature distribution in the coil of a transformer windings [Text] / V. Preiningereva, M. Pivrnec // *Proceedings of the IEE.* — 1977. — Vol. 124. — №3. — pp. 218-222.

15. Preiningereva, V. Method of calculation of the distribution of additional losses and temperature rise in the winding of a transformer [Text] / V. Preiningereva, M. Prager // *Int. Symp. Electrodyn. Forces and Losses Tr.* — 1979. — pp. 187-199.

16. Preiningereva, V. Thermal analysis of large oil-immersed transformer windings [Text] / V. Preiningereva, V. Kahoun, I. Dolezel // *Elec. and Power Syst.* — 1983. — 8. — №2. — pp. 89-102.

17. Исакеев, А.И. Расчет распределения температур в обмотках тяговых трансформаторов методом электротепловой аналогии [Текст] / А.И. Исакеев, Н.Н. Киселев // *Сб. трудов Ленинградского института ж. д. транспорта.* — 1979. — Вып. 295. — С. 65-70.

18. Рассальский, А.Н. Расчет максимальной температуры катушечных обмоток трансформаторов [Текст] / А.Н. Рассальский, В.А. Машкин, Ю.А. Михайловский // *Электричество.* — 1981. — №8. — С. 45-47.

19. Петров, Г.Н. К вопросу определения максимальной температуры изоляции обмоток силовых трансформаторов [Текст] / А.Н. Рассальский, В.А. Машкин, Ю.А. Михайловский // *Электротехника.* — 1974. — №4. — С. 15-17.

20. Бутина, Т. П. Температурные поля в трансформаторной обмотке с направляющими перегородками [Текст] / Т. П. Бутина, Ю. Я. Шелыкалов //

Тезисы доклада Международной научно-технической конференции "8 Бенардос. чтения", Иваново. — 1997. — С. 34-39.

21. Preiningerova, V. Foil-wound transformer [Text] / V. Preiningerova, J. Mlynek, V. Kahoun // *Ektrotechnic Obzerver*. — 1991. — № 6. - pp. 199-209.

22. Tanguy, A. Thermal Performance of Power Transformers: Thermal Calculation Tools Focused on New Operating Requirements [Text] / A. Tanguy, J.P. Patelli, J.P. Taisne, F. Devaux, T. Ngnegueu // *CIGRE Paris Session 2004*. — Report A2 — p.105.

23. Allen, P.H.G. Heat transfer in electrical machines [Text] / P.H.G. Allen // *Elec. Times*. — 1967. — № 19. — pp. 85-92.

24. Allen, P.H.G. Cooling transformer windings [Text]/ P.H.G. Allen, D.I. Allen // *Electr. Times*. — 1963. — № 143. — pp. 505-508.

25. Машкин, В.А. Исследование стационарных температурных полей обмоток трансформатора методом математического моделирования [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.09.01/ В.А. Машкин. — М., 1975. — 170с.

26. Петров, Г.Н. О нагревании катушек, обтекаемых током [Текст] / Г.Н. Петров // *Вестник электропромышленности*. — 1930. — №2. — С. 26-31.

27. Zhang, J. A comprehensive resistance network-based hydraulic model for coolant flow in disk-type electrical transformer windings. *Progress Transport Phenomena* [Text] / J. Zhang, X. Li // *Proc. 13th Int.Symp. Transport Phenomena, Elsevier*. — 2002. — pp. 545-550.

28. Zhang, J. Oil cooling for disk-type transformer windings [Text] / J. Zhang, X. Li // *Part I: Theory and model development, IEEE Trans. Power Del.* — Vol. 21. — 2006. — pp. 1318-1325.

29. Zhang, J. Oil cooling for disk-type transformer windings [Text] / J. Zhang, X. Li // *Part II: Parametric studies of design parameters, IEEE Trans. Power Del.* — Vol. 21. — 2006. — pp. 1326-1332.



30. Петров, Г.Н. Температурное поле в обмотках трансформатора [Текст] / Г.Н. Петров, В.А. Машкин // Изв. АН СССР: Энергетика и транспорт. — 1975. — №1. — С. 78-81.

31. Петров, Г.Н. Согласование теплового и гидравлического расчетов при моделировании температурных полей обмоток трансформаторов [Текст] / Г.Н. Петров, В.А. Машкин // Электротехника. — 1972. — №3. — С. 23-28.

32. Машкин, В.А. Определение коэффициентов теплоотдачи слоевых обмоток трансформаторов [Текст] / В.А. Машкин, А.Н. Рассальский // Проблемы технической термодинамики.- 1975. — № 51. — С. 85-88.

33. Петров, Г.Н. Теплоотдача в вертикальных охлаждающих каналах обмоток трансформаторов [Текст] / Г.Н. Петров, А.Н. Рассальский, В.А. Машкин // Труды МЭИ. — 1974. — № 189. — С. 3-9.