

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Електротехнічний
(повне найменування факультету)

Електричні та електронні апарати
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему Розрахунок однофазного маслонаповненого шунтувального реактора
60 МВАр, 500 кВ та застосування нейронних мереж для визначення
параметрів його ізоляції в експлуатації

(назва теми)

Виконав(ла): студент(ка) II курсу, групи E-412м

Спеціальності 141 Електроенергетика,

(код і найменування спеціальності)

Електротехніка та електромеханіка

Освітня програма (спеціалізація)

Електричні та електронні апарати

БРАГІНА С.М.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник ВАСИЛЕВСЬКИЙ В.В.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент НОВІКОВ О.М.

(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет Електротехнічний

Кафедра Електричні та електронні апарати

Ступінь вищої освіти магістр

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код і найменування)

Освітня програма (спеціалізація)

Електричні та електронні апарати

(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри проф. АНДРІЄНКО П.Д.

«30» листопада 2023 року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

БРАГІНА Світлана Миколаївна

(ПРИЗВИЩЕ, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Розрахунок однофазного маслонаповненого шунтувального реактора 60 МВАр, 500 кВ та застосування нейронних мереж для визначення параметрів його ізоляції в експлуатації

керівник проєкту (роботи) к.т.н., доц. ВАСИЛЕВСЬКИЙ Володимир Валентинович,

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «01» листопада 2023 року № 407

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 27.11.2023 року

3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Номінальна напруга $U = 500$ кВ, Номінальна потужність $P = 60\ 000$ кВАр

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Вибір напрямку проєктування; 2. Розрахунок основних параметрів реактора; 3. Розрахунок індуктивності шунтувального реактора; 4. Тепловий розрахунок; 5. Розрахунок маси шунтувального реактора; 6. Технологія складання активної частини шунтувального реактора; 7. Застосування нейронних мереж для прогнозування вологості ізоляції шунтувального реактора під час експлуатації

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількість слайдів, плакатів)

ГКІЮ 6713.001 СК Остов, ГКІЮ 6713.001 СК Реактор 60000/500, презентація 13 слайдів

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	ПРИЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-7	ВАСИЛЕВСЬКИЙ В.В., доцент		

7. Дата видачі завдання «04» вересня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Техніко-економічне обґрунтування магістерської роботи	02.10.2023	
2	Попередній розрахунок головних елементів апарата	16.10.2023	
3	Повірний розрахунок з висновками про роботоспроможність елементів апарата	23.10.2023	
4	Виконання загального виду виробу, робочих креслень головних вузлів та деталей апарата	31.10.2023	
5	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки магістерської роботи	07.11.2023	
6	Узгодження проекту з керівником	13.11.2023	
7	Перевірка керівником пояснювальної записки магістерської роботи на антиплагіат	27.11.2023	
8	Нормоконтроль та затвердження завідувачем кафедри	30.11.2023	
9	Рецензування магістерської роботи	04.12.2023	
10	ЗАХИСТ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ	11.12.2023	
11	Здача магістерської роботи до репозитарію	15.12.2023	

Студент(ка)

_____ **Світлана БРАГІНА**
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи)

_____ **Володимир ВАСИЛЕВСЬКИЙ**
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 61 стор., 15 рисунків, 2 таблиці, 12 джерел

ІНДУКТИВНІСТЬ, ПОВІТРЯНИЙ ЗАЗОР, БРОНЕСТРИЖНЬОВА МАГНІТНА СИСТЕМА, ПОТУЖНІСТЬ, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, ІЗОЛЯЦІЯ, ТРАНСФОРМАТОРНЕ МАСЛО

Предмет дослідження – однофазний маслонаповнений шунтувальний реактор потужністю 60 000 кВар та напругою 500 кВ.

Об'єкт дослідження – процеси змінення параметрів ізоляції шунтувального маслонаповненого реактора під час експлуатації.

Мета роботи – розробка конструкції однофазного шунтувального реактора за заданими параметрами з покращеними техніко-економічними показниками, дослідження можливості прогнозування динаміки вологості ізоляції шунтувального реактору із застосуванням нейронної мережі на основі нелінійної авторегресійної моделі з екзогенними входами.

Методи дослідження – вибір конструктивних форм на основі існуючих заводських аналогів, розрахунок та уточнення обраної конструкції, нейромережеве моделювання із застосуванням програмного забезпечення Matlab.

Анотація. Дана магістерська робота містить інформацію про можливі види шунтувальних реакторів, розрахунки реактора, визначення його призначення й особливості застосування. На підставі обраного аналога розроблена конструкція шунтувального реактора з покращеними техніко-економічними та масогабаритними показниками.

Із використанням інструменту Neural Network Toolbox в середовищі Matlab побудована нейронна мережа на основі нелінійної авторегресійної моделі з екзогенними входами, виконано навчання та тестування цієї мережі з використаннями даних про зміну параметрів трансформаторного масла

однофазного шунтувального реактора протягом чотирьох місяців експлуатації.

Отримані результати демонструють можливість застосування апарату нейронних мереж для прогнозування зміни вологості трансформаторного масла шунтуючих реакторів.

Публікації. Брагіна С.М. Вибір технологічного режиму 3D друку за допомогою експертної системи побудованої на нечіткій логіці / С.М. Брагіна В.В. Василевський // Тиждень науки-2022. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 18–22 квітня 2022 р. [Електронний ресурс] / Редкол. :В. В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2022. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана. С. 377-379

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ВИБІР НАПРЯМКУ ПРОЄКТУВАННЯ	8
1.1 Особливості застосування ШР	8
1.2 Огляд існуючих конструкцій шунтуючих реакторів	9
1.3 Вибір аналога	12
1.4 Динаміка вологості ізоляція шунтувального реактору під час експлуатації	16
1.5 Постановка проєктного завдання.....	20
2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕАКТОРА	21
2.1 Розрахунок електричних характеристик	21
2.3 Вибір матеріалів та основних параметрів магнітної системи	23
2.4 Попередній вибір конструкції, матеріалу обмотки та ізоляційних проміжків	24
2.5 Розрахунок розмірів реактора	25
3 РОЗРАХУНОК ІНДУКТИВНОСТІ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА	32
4 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК.....	35
4.1 Тепловий розрахунок обмоток	35
4.2 Розрахунок системи охолодження	36
5 РОЗРАХУНОК МАСИ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА	45
5.1 Розрахунок маси обмотувального дроту	45
5.2 Розрахунок маси феромагнітної сталі	46
5.3 Маса електротехнічної сталі.....	47
5.4 Повна маса активної частини	48
6 ТЕХНОЛОГІЯ СКЛАДАННЯ АКТИВНОЇ ЧАСТИНИ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА	49
7 ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВОЛОГОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ	53
ВИСНОВКИ.....	60
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61

ВСТУП

При роботі ліній електропередачі ними передається як активна, так і реактивна потужність. Остання може бути індуктивною, що залежить від корисного навантаження лінії (електродвигуни, трансформатори), чи ємнісною. Ємнісна потужність визначається, перед усе, ємністю лінії, а також ємністю конденсаторних батарей.

Шунтувальні реактори (ШР) є важливим електротехнічним обладнанням, оскільки вони здійснюють компенсацію реактивної потужності, яка негативно впливає на роботу всієї лінії електропередачі і погіршує якісні характеристики електроенергії.

ШР – це статичний електромагнітний пристрій, що має велику індуктивність і дуже малий активний опір. ШР застосовують для підвищення пропускної спроможності ліній надвисокої напруги, регулювання реактивної потужності та напруги. Виробляються ШР на напруги 35 – 750 кВ, вони можуть як приєднуватися до лінії, так і включатися на шини підстанції. Реактор споживає реактивну потужність, яка в зоні лінійності його електромагнітної характеристики залежить від напруги:

Необхідна потужність реакторів, що підключаються до лінії електропередач, залежить від довжини лінії та навантаження.

Однією з основних проблем ШР є їх великі масогабаритні показники та висока ціна. Вирішенням цих проблем може стати збільшення індукції у стрижні реактора, що дозволить зменшити перетин стрижня та знизити таким чином витрати матеріалів при виробництві реактора.

1 ВИБІР НАПРЯМКУ ПРОЄКТУВАННЯ

1.1 Особливості застосування ШР

Найбільш широке поширення в енергосистемах отримали реактори постійної потужності для роботи в мережах напругою 500 кВ і вище однофазні, що з'єднуються в трифазну групу за схемою «зірка з нейтраллю глухо заземленою». Вони досить надійні та прості в експлуатації. Основний недолік таких реакторів – відсутність можливості регулювання потужності, тому в разі необхідності доводиться відключати частину реакторів, що є в лінії передач. У деяких випадках це доводиться робити дуже часто, наприклад щодня при добових змінах навантаження. З іншого боку при відключенні частини реакторів погіршується захист лінії від перенапруг. У зв'язку з цим бажано мати реактори, потужність яких можна регулювати під напругою. Іноді потрібно мати можливість відібрати від лінії високої напруги невелику потужність у місці встановлення реактора – наприклад, для живлення власних потреб підстанції, або для електропостачання невеликих населених пунктів. У таких випадках замість встановлення дорогих високовольтних трансформаторів невеликої потужності можна використовувати реактори з пристроєм відбору потужності. Відбір може бути здійснений за трансформаторною або автотрансформаторною схемою. Крім зниження капітальних витрат, такі реактори можна використовувати для короткочасного форсування реактивної потужності, замикаючи коротко або через опір вторинну сторону відбору, наприклад, з метою обмеження комутаційних перенапруг. Якщо з тією ж метою застосовується іскрове підключення, можна спеціально розробити реактори для короткочасного включення в аварійних режимах. Вони вимагають значно меншої витрати матеріалів, простішої системи охолодження (або можуть працювати взагалі без системи охолодження). З іншого боку, до них можуть пред'являтися більш жорсткі вимоги щодо електричної міцності при комутаційних перенапругах і електродинамічної стійкості при струмах включення.

Для збільшення потужності при підвищенні напруги на лінії, у тому числі при перенапругах, можна застосовувати реактори, що насичуються, з нелінійною вольт-амперною характеристикою. Такі реактори повинні мати замкнуту магнітну систему без немагнітних проміжків, з індукцією в робочій області близькою до коліна насичення. Для полегшення умов відновлення нормальної роботи ліній передачі після короткого замикання та автоматичного повторного вмикання застосовуються реактори, нейтраль трифазної групи яких замикається на землю через т.з. компенсуючий реактор. При цьому на ізоляцію нейтралі в умовах експлуатації впливають як напруги робочої частоти, викликані несиметрією фазної напруги, так і грозові та комутаційні перенапруги. Тому до технічних вимог включаються відповідні випробувальні напруги ізоляції нейтралі. Реактори з нейтраллю, що заземлюється через компенсуючий реактор, за конструкцією можуть відрізнятися від звичайних реакторів.

1.2 Огляд існуючих конструкцій шунтуючих реакторів

У 50-х роках було освоєно виробництво реакторів для мереж напругою 400 кВ (пізніше 500 кВ), у 60-х для мереж 750 кВ, а в 70-х – 1150 кВ. Реактори виготовлялися на Запорізькому трансформаторному заводі та Московському електрозаводі. На даний момент проектування та виготовлення шунтувальних реакторів в Україні здійснює ПрАТ «Запоріжтрансформатор», м. Запоріжжя.

Також великим виробником шунтувальних реакторів, є компанія АВВ, яка наразі здійснює виробництво реакторів для безпосереднього підключення до електричної мережі високої напруги. Залежно від характеру навантаження та балансу реактивної потужності реактори виробництва АВВ можуть застосовуватися як за тривалої роботи, так і при операціях перемикавання. Конструкція реакторів АВВ заснована на застосуванні броньового осердя із зазором, тому такі реактори мають малі масогабаритні показники за низьких

втрат. Цей принцип облаштування реакторів застосовується із середини шістдесятих років минулого століття. Продовжуючи вдосконалення конструкції реакторів, компанія АВВ звертає увагу і на такі важливі експлуатаційні параметри, як рівень вібрацій та шуму. Зараз реактори є продуктом високих технологій, які потребують великого досвіду при проектуванні та виробництві. Шунтувальний реактор потужністю 120-200 МВАр на напругу 420 кВ виробництва АВВ представлений на рис. 1.1.



Рисунок 1.1 – Шунтувальний реактор на 420 кВ виробництва фірми АВВ

Компанія «Siemens» стала піонером у розробці регульованих шунтуючих реакторів, які ідеально підходять для підключення вітрових електростанцій до існуючих енергомереж. Поєднуючи перевірену конструкцію шунтуючих реакторів з надійністю перемикачів відгалужень, регульовані шунтуючі реактори можуть підтримувати напругу в межах певного діапазону навіть при сильних коливаннях напруги. Це в свою чергу дозволяє операторам мереж адаптуватися до необхідної нині реактивної потужності та мінімізувати втрати.

В шунтувальних реакторах до 800 кВ і до 300 МВАр компанія Siemens

використовує залізне осердя, розділене повітряними проміжками. В результаті виходить компактний реактор з низьким рівнем шуму, вібрації та втрат. Осердя виготовлене з радіально ламінованих залізних пакетів, а керамічні прокладки забезпечують точну відповідність конкретним вимогам до повітряного зазору.



Рисунок 1.2 – Шунтувальний реактор виробництва Siemens

Осердя реактора, що утримується на місці в затискній рамці, скріплюється сталевими стрижнями та/або лімбами. Унікальна пружинна технологія Siemens між тягою та поперечиною забезпечує постійне притискання стрижня. Таким чином, конструкція пружин та затискачів Siemens постійно підтримує найнижчі рівні шуму та вібрації протягом усього терміну служби цих пристроїв.

Шунтувальні реактори виробництва ПрАТ «Запоріжтрансформатор» мають високу надійність, простоту в експлуатації, економічність і можливість встановлення на існуючих підстанціях в поєднанні з будь-якими типами пристроїв захисту обладнання від перенапруг, передбачених схемою підстанцій.

Найбільш близьким за параметрами до реактора, що проєктується, є шунтувальний реактор РОМ-60000/500 – однофазний реактор, призначений для компенсації реактивної потужності в ЛЕП представлений на рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Шунтувальний реактор РОМ-60000/500

Основою конструкції реактора є остов виконаний однострижньовим із бічними ярами. Стрижень виконаний із радіально шихтованих дисків, розділених керамічними ізоляційними прокладками. Верхнє, нижнє та бічне яро шихтоване з листів електротехнічної сталі з жаростійким ізоляційним покриттям. Обмотки – циліндричні, котушкові із мідного дроту прямокутного перерізу.

1.3 Вибір аналога

Аналіз конструкцій показує, що реактори виробництва ПрА «Запоріжтрансформатор» не поступаються якісними характеристиками закордонним апаратам тієї ж категорії. Тому в якості аналогу оберемо ШР виробництва ЗТР типу РОМ 60000/500, оскільки його параметри максимально наближені до заданих параметрів проєктованого реактора, а також він має оптимальні параметри при мінімальних розмірах. Це шунтувальний однофазний масляний реактор з природним охолодженням типу ONAN, магнітопроводом бронестрижньового типу, номінальною потужністю 60000 кВар, та номінальною напругою 500 кВ.

Одним із основних недоліків даного пристрою є його великі масогабаритні показники та висока ціна. Вирішенням цієї проблеми може стати збільшення індукції у стрижні реактора, що дозволить зменшити перетин стрижня та знизити матеріальні витрати при виробництві реактора.

Однофазний масляний реактор призначений для паралельного включення до мережі з метою компенсації ємнісного струму. Зовнішній вигляд та габаритні розміри реактора представлені рисунку 1.4.

Остов реактора складається з магнітопроводу та елементів конструкції, що забезпечують механічну міцність магнітопроводу та всієї активної частини. Конструкція остова забезпечує необхідне пресування обмоток.

Магнітопровід бронестрижньового типу, зібраний з листів холоднокатаної електротехнічної сталі з жаростійким ізоляційним покриттям. Стрижень зібраний із радіально шихтованих дисків. Диски ізольовані один від одного та від торцевих ярем керамічними прокладками.

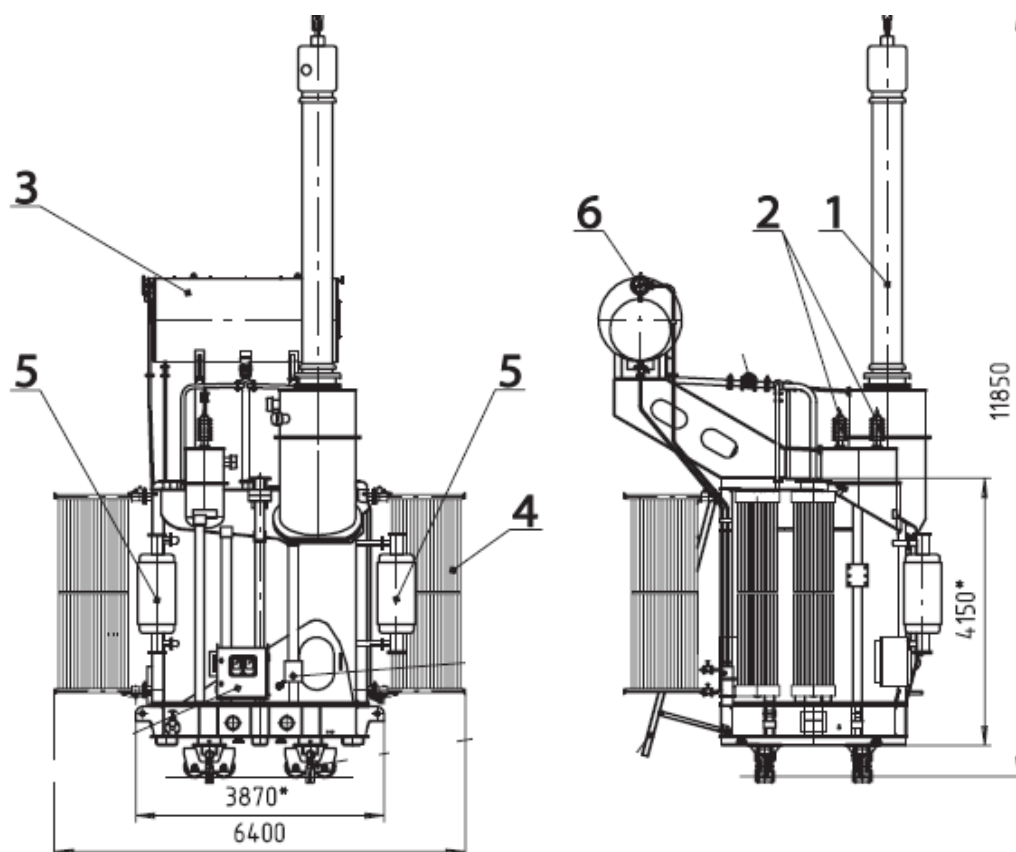
Мережева обмотка реактора – безперервна, виконана з мідного дроту прямокутного перерізу з паперовою ізоляцією. Пресування обмоток здійснюється через картонні кільця.

Ізоляція між обмотками та заземленими частинами (магнітопровід, бак) виконана маслбар'єрною. В якості бар'єрів використовуються листи з електротехнічного картону, які дистанціюються між собою за допомогою картонних рейок або прокладок, утворюючи канали.

Між стрижнем магнітопроводу та обмоткою встановлюється електростатичний екран.

Активна частина встановлена у баку на прокладках з електрокартону. Фіксоване положення активної частини в баку забезпечується її розкріпленням у поздовжньому та поперечному напрямках.

Лінійні відводи та відводи нейтралі обмоток виконані з гнучкого проводу з напаяними на них наконечниками для приєднання до вводів.



1 – ввід 550 кВ, 2 – ввід нейтралі, 3 – розширювач, 4 – радіатор,
5 – фільтр, 6 – показчик рівня трансформаторного масла

Рисунок 1.4 – Шунтувальний реактор РОМ-60000/500

Розкріплення в поздовжньому напрямку виконано прокладками з електрокартону вгорі та внизу на обох торцях активної частини (всього 4 місця). Основні параметри шунтувального реактора наведені в табл.1.1.

Розкріплення в поперечному напрямку виконано прокладками, у чотирьох місцях вгорі та у чотирьох місцях внизу бака (всього 8 місць). Доступ до верхніх розпірних вузлів здійснюється через люки на кришці бака.

Переведення реактора з транспортного положення до робочого не вимагає виконання додаткових операцій з розпірними вузлами.

Заземлення активної частини та магнітної системи остова на бак здійснюється через окремі прохідні вводи.

Таблиця 1.1 – Основні параметри шунтувального реактора РОМ-60000/500

Тип установки	зовнішня
Кількість фаз	1
Частота, Гц	50
Номинальна напруга, кВ	$500\sqrt{3}$
Максимальна робоча напруга, кВ	$550\sqrt{3}$
Номинальна потужність при номінальній напрузі, МВАР	60000
Номинальний струм, А	198
Імпеданс реактора при 75°C, Ω	1531
Нормована випробувальна напруга 50 Hz (1хв) лінія/нейтраль, кВ	630/85
Нормована випробувальна напруга повного грозового імпульсу лінія/нейтраль, кВ	16750/190
Нормована випробувальна напруга комутаційного імпульсу, лінія, кВ	1230
Перевищення температури над температурою навколишнього середовища при максимальній тривалій робочій напрузі та номінальній частоті: Обмотка, найбільш нагріта точка, °С	78
Обмотка, (середня), °С	65
Трансформаторне масло (у верхніх шарах), °С	60
Бак, °С	70
Осердя, °С	80
Тип системи охолодження	ONAN

На кришці бака в місцях поздовжнього розкріплення активної частини розташовані люки, через які можна відбирати зразки електрокартону макета ізоляції.

Макет ізоляції – набір листів електрокартону завтовшки 0,5; 1,0; 3,0 мм, встановленого на верхній ярмовій балці для визначення вмісту вологи твердої

ізоляції. Бак реактора дзвонового типу складається з верхньої (знімної) та нижньої частин. Рознімання між частинами бака ущільнено гумовими прокладками за допомогою болтового з'єднання.

1.4 Динаміка вологості ізоляція шунтувального реактору під час експлуатації

Наявність води в целюлозній ізоляції впливає на швидкість її старіння. Так, при вологовмісті 2 % від маси паперу в реакторі, швидкість старіння целюлози збільшується в 6–16 разів, а при 4 % – в 12–45 разів (нормальній швидкості старіння відповідає значення вологості 0,3 %). В свою чергу, саме старіння паперової ізоляції визначає термін служби шунтувального реактора або силового трансформатора.

Відомим є метод розрахунку зміни вологості целюлозної ізоляції силових трансформаторів та шунтуючих реакторів по виміряному значенню вологовмісту трансформаторного масла.

Згідно цього методу розрахункова вологість целюлозної ізоляції в певний момент часу t визначається з виразу:

$$W_c = A \cdot e^{-B \cdot \Theta_h} \cdot p^{k + a \cdot \Theta_h} \quad (1.1)$$

де W_c – розрахункова вологість целюлозної ізоляції шунтувального реактора, %;

A, B, k, a – емпіричні коефіцієнти;

Θ_h – температура найбільш нагрітої точки ізоляції реактора, °C;

p – парціальний тиск парів води, мм рт. ст.

В свою чергу, значення парціального тиску парів води залежить від відносної вологості трансформаторного масла за відповідної температури найбільш нагрітої точки:

$$p = \varphi' \cdot 10^4 \cdot f_h^{(\Theta)} \quad (1.2)$$

де φ' – відносна вологість масла за температури найбільш нагрітої точки, %.

Наведений вираз визначає зміст води в целюлозній ізоляції шунтувального реактора при рівноважному стані системи, який характеризується рівністю температур целюлозної ізоляції, трансформаторного масла та охолодного середовища.

Аналіз негативних наслідків підвищеного вологовмісту трансформаторного масла наведений в роботі [11]:

1. Зниження діелектричних властивостей (електричної міцності) масла, зниження стійкості до часткових розрядів.
2. Утворення більшої кількості вугілля під дією електричної дуги (майже в 3 рази більше, ніж у сухому маслі).
3. Збільшення каталітичної активності заліза та рясне виділення опадів із трансформаторного масла за наявності вільної води.
4. Прискорення окиснення масла.
5. Посилення корозійного впливу масла на сталеві частини апаратів та трансформаторів;
6. Погіршення механічних характеристик масла, зі зростанням температури.

Вимірювання вологості масла під час експлуатації здійснюється пристроями контролю параметрів трансформаторного масла (рис. 1.5), такими як Calisto (виробництва фірми Morgan Schaffer, Канада) і Hydran M2 (виробництва фірми General Electric), для цього використовуються занурені безпосередньо в масло ємнісні тонко-плівкові датчики.

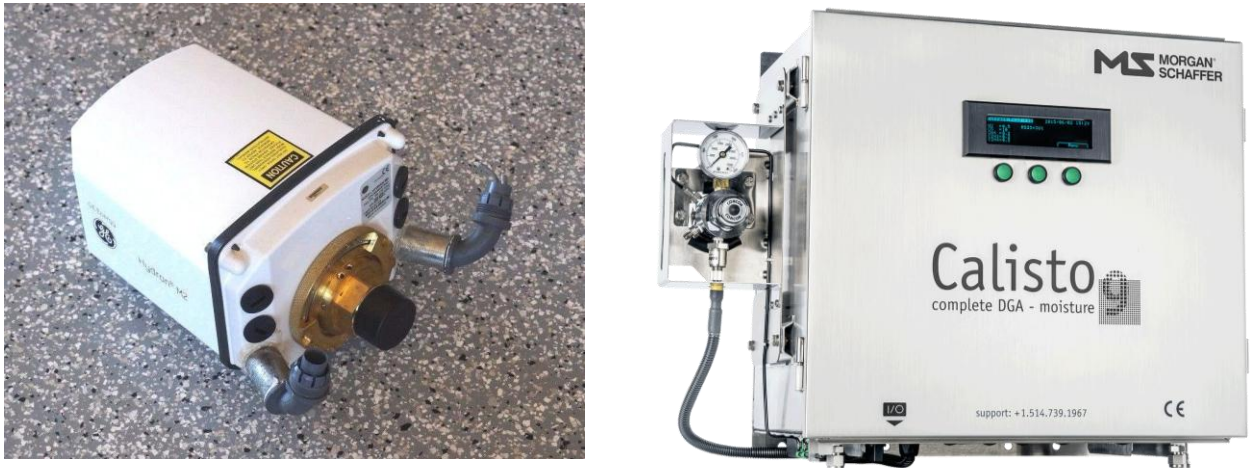


Рисунок 1.5 – Пристрої для контролю параметрів трансформаторного масла, які дозволяють виконувати вимірювання вологості масла

Hydran M2 є пристроєм для здійснення неперервного онлайн контролю концентрації розчинених в трансформаторному маслі газів та вологовмісту трансформаторного масла. При цьому діапазон вимірювання вологовмісту складає від 0 до 100% відносної вологості, точність вимірювань – $\pm 2\%$ відносної вологості, повторюваність вимірювань – $\pm 2\%$ відносної вологості [9].

Як зазначається виробником, Hydran M2 дозволяє проводити розрахунок математичних моделей силових трансформаторів та шунтуючих реакторів на основі стандартів IEEE, порівнюючи їх із даними, отриманими безпосередньо на місці експлуатації. Таким чином присутня можливість реалізації наступних моделей:

- оцінка температури обмотки у зоні температурного максимуму;
- рівень вологи у паперовій ізоляції;
- температура кипіння вологи;
- старіння ізоляції;
- допустимі навантаження;
- ефективність охолодження;
- перепад температур на перемикачі відгалужень під навантаженням [9].

На рис. 1.6 наведені рекомендовані місця для встановлення пристрою Hydran M2 на трансформаторі.

Прилади Calisto 5 та Calisto 9 використовуються для онлайн моніторингу діагностичних газів, компонентів повітря та вологи в трансформаторному маслі. Для вимірювання вологовмісту трансформаторного масла використовується занурений в масло сенсорний датчик відносного насичення. Діапазон вимірювань – 2-100%; точність $\pm 3\%$ або ± 3 ppm. Інтервал вимірювань складає 6 с.

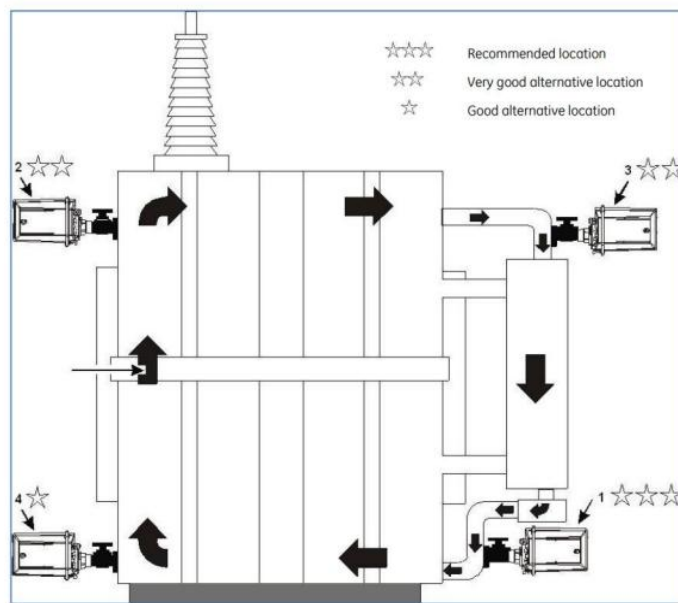


Рисунок 1.6 – Рекомендовані місця встановлення Hydran M2 на трансформаторі

У працюючому реакторі відбувається постійна міграція вологи між целюлозою та трансформаторним маслом внаслідок зміни температури при змінненні навантаження та атмосферних умов.

Динаміка зміни вологості в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло для нерівноважного стану може бути представлена в вигляді моделі, наведеній на рис. 1.7. Модель на рис. 7.2 являє собою діаграму станів, яка містить в собі три стани. Стан ЦІ→ТМ описує перенос вологи з целюлозної ізоляції в трансформаторне масло. У стані ТМ→ЦІ відбувається перенос вологи з трансформаторного масла в целюлозну ізоляцію, стан ЦІ=ТМ характеризує рівноважний стан системи і є початковим. Переходи між станами здійснюються з

урахуванням співвідношень між парціальними тисками парів води в целюлозній ізоляції (p_{paper}) і трансформаторному маслі (p_{oil}) [6].

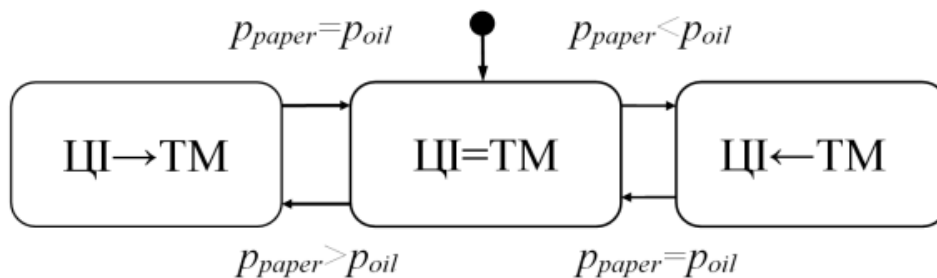


Рисунок 1.7 – Модель вологообміну в системі целюлозна ізоляція – трансформаторне масло

Вхідними даними для моделі (1.1)-(1.2) та моделі на рис. 1.7 можуть служити як значення вологості масла, отримані в результаті прямих вимірювань, так і дані, прогнозовані за допомогою нейронної мережі.

1.5 Постановка проектного завдання

розробка конструкції однофазного шунтувального реактора за заданими параметрами з покращеними техніко-економічними показниками, дослідження можливості прогнозування динаміки вологості ізоляції шунтувального реактору із застосуванням нейронної мережі на основі нелінійної авторегресійної моделі з екзогенними входами.

2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РЕАКТОРА

2.1 Розрахунок електричних характеристик

Знаючи номінальну напругу можна знайти фазну напругу з формули:

$$U_{\phi} = \frac{U_H}{\sqrt{3}}, \quad (2.1)$$

де U_{ϕ} – фазна напруга шунтувального реактора, кВ;

U_H – Номінальна напруга шунтувального реактора, кВ.

$$U_{\phi} = \frac{500}{\sqrt{3}} = 290 \text{ кВ.}$$

Струм в обмотці реактора розраховується виходячи зі значення його реактивної потужності:

$$I = \frac{Q \cdot \sqrt{3}}{U_H}, \quad (2.2)$$

де I – Струм реактора, А;

Q – номінальна потужність, кВт.

$$I = \frac{60000 \cdot \sqrt{3}}{500} = 208 \text{ А.}$$

Індуктивний реактивний опір знаходиться за допомогою виразу:

$$X = \frac{U_H}{I}, \quad (2.3)$$

$$X = \frac{500000}{\sqrt{3} \cdot 208} = 1388.$$

Виходячи із закону Ома знаходиться номінальна індуктивність реактора:

$$L = \frac{X}{2\pi \cdot f}, \quad (2.4)$$

де L – Індуктивність реактора, Гн;

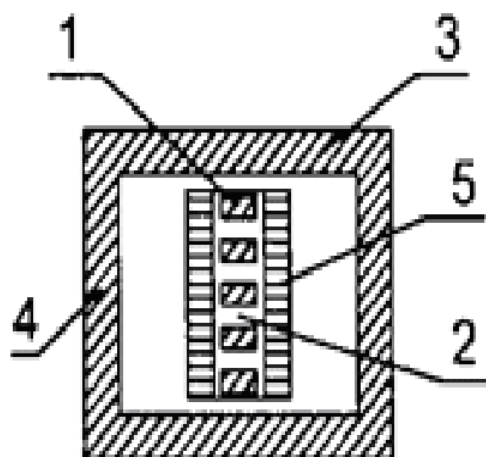
f – промислова частота;

$$L = \frac{1388,1}{2\pi \cdot 50} = 4,42 \text{ Гн.}$$

2.2 Вибір схеми та конструкції магнітної системи реактора

Активна частина проєктованого шунтувального реактора на 500 кВ складається з магнітопроводу та обмоток, закріплених на магнітопроводі, які електрично з'єднані між собою.

Для попереднього розрахунку реактора виберемо бронестрижньову магнітну систему з немагнітними зазорами, оскільки така система має ряд переваг: висока надійність, низькі втрати, низький рівень шуму та вібрації, тривалий термін експлуатації. Ескіз магнітопроводу представлений на рис. 2.1



1 – стрижень, 2 – немагнітний зазор, 3 – верхнє ярмо, 4 – шунт, 5 – обмотка

Рисунок 2.1 – Ескіз бронестрижнєвої магнітної системи

2.3 Вибір матеріалів та основних параметрів магнітної системи

Магнітопровід ШР набраний з листів холоднокатаної електротехнічної сталі з жаростійким ізоляційним покриттям. Жаростійке ізоляційне покриття передбачено для запобігання виникнення вихрових струмів між пластинами магнітопроводу. Стрижень зібраний із радіально шихтованих дисків. Обираємо сталь марки 3408 за ГОСТ 21427.1 – 83 завтовшки 0,3 мм, оскільки саме така сталь має найкращі показники для виготовлення магнітної системи реакторів.

За таблицею, що наведена в визначимо коефіцієнт заповнення. Для сталі марки 3408 товщиною 0,3 мм та жаростійким покриттям $k_s = 0,96$.

Досить важливу роль при розрахунку реактора має вибір індукції у стрижні магнітної системи.

В існуючій конструкції шунтувального реактора закладено запас індукції, що дозволяє збільшити індукцію в стрижні магнітопроводу не порушуючи лінійної характеристики реактора.

Виходячи з параметрів реактора, обраного в якості аналога можна

зробити висновок, що реактор зберігає лінійність до досягнення значення 140% від номінальної напруги, при цьому індукція дорівнює 1,3 Тл. Виходячи з даних ГОСТ 1516.3 – 96 перевищення напруги до 140% і вище є незначними за часом і значення лінійності вольт-амперної характеристики можна прийняти меншим, ніж у реактора аналога.

При розрахунку будемо виходити з того, що індукція, яка виникає в стрижні, не повинна перевищувати 1,43 Тл, при цьому реактор зберігає лінійність до досягнення 130% від номінальної напруги.

2.4 Попередній вибір конструкції, матеріалу обмотки та ізоляційних проміжків

Для маслонаповнених реакторів з мідними провідниками, потужністю більше 25000 кВар зазвичай застосовується переплетена котушкова обмотка з прямокутного провідника. Такий тип обмотки забезпечує високу електричну та механічну міцність і добре охолодження. Для забезпечення достатнього охолодження між обмоткою та іншими частинами реактора, між котушками виконуються масляні канали. Марка проводу, з якого намотується обмотка – ПБПУ, що має ізоляцію з ущільненого паперу. Виток виконаний групою паралельних проводів прямокутного перерізу. Конструкція проводів обмотки зображена на рис. 2.2.

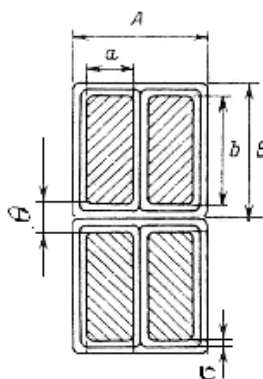


Рисунок 2.2 – Ескіз перерізу витка обмотки марки ПБПУ

2.5 Розрахунок розмірів реактора

Завдання розрахунку обмоток включає визначення кількості витків, величини струму, площі поперечного перерізу провідників, вибір за знайденими значеннями провідникових матеріалів, їх марок і позначень; розрахунок та вибір ізоляції тощо.

Площа поперечного перерізу обмотки вибирається за такою формулою:

$$q = \frac{I_{ном}}{j} \quad (2.5)$$

де j – густина струму, для міді $j = 2,5 \text{ А/мм}^2$.

Оскільки обмотка складається з двох паралельних проводів, то струм у кожному з них буде вдвічі меншим від номінального, тобто:

$$q = \frac{208}{2,5 \cdot 2} = 40 \text{ мм}^2.$$

Розміри проводу обираємо відповідно до рис. 2.2

$$a = 2 \text{ мм}$$

тоді

$$2a = 2 \cdot 2 = 4 \text{ мм},$$

$$b = \frac{q}{2a}, \quad (2.6)$$

$$b = \frac{40}{4} = 10 \text{ мм}.$$

По сортаменту обираємо провід ПБПУ із розмірами дроту 4×10 мм.

За даними виробників, ізоляція між витками, тобто. розмір Δ (рисунок 2.2) може набувати значень 2,00; 2,48; 2,96мм. Вибір товщини ізоляції залежить від класу напруги реактора. Для заданої напруги обирається ізоляція витків $\theta = 2,00$ мм, ізоляція дроту $\sigma = 0,34$ мм.

Активний переріз стрижня знаходимо із виразу:

$$S_c = \frac{U_{НОМ}}{4,44 \cdot f \cdot W \cdot B_c \cdot \sqrt{3}}, \quad (2.7)$$

де S_c – активний переріз стрижня, м²;

B_c – індукція у стрижні, Тл;

W – кількість витків в обмотці;

f – Частота струму мережі, що дорівнює 50 Гц.

Кількість витків обмотки знаходимо з наступного виразу:

$$W = \frac{U_{НОМ}}{e_g \cdot \sqrt{3}}, \quad (2.8)$$

де e_g – ЕРС витка, $e_g = 62,66$ кВ/виток;

$$W = \frac{500000}{\sqrt{3} \cdot 62,66} = 4608.$$

Таким чином, активний переріз стрижня складатиме:

$$S_c = \frac{500000}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 4608 \cdot 1,43} = 0,2 \text{ м}^2.$$

Орієнтуючись на конструкцію магнітної системи аналога проєктованого реактора (рис. 2.3), визначаємо зовнішній діаметр стрижня:

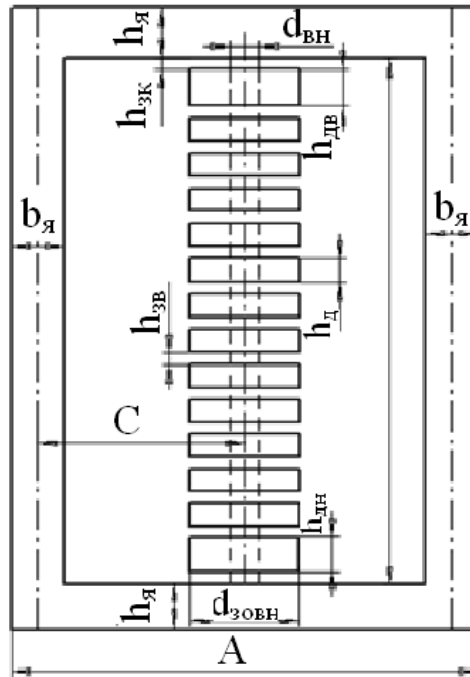


Рисунок 2.3 – Ескіз магнітної системи

$$S_C = \frac{d_{\text{зовніш}}^2 - d_{\text{внутр}}^2}{4}, \quad (2.9)$$

де $d_{\text{внутр}}$ – внутрішній діаметр стрижня. Відповідно до виробничих можливостей ЗТЗ приймаємо найменший можливий внутрішній діаметр стрижня $d_{\text{внутр}} = 210\text{мм}$;

$d_{\text{зовніш}}$ – зовнішній діаметр стрижня.

Отже, можна визначити зовнішній діаметр стрижня:

$$d_{\text{зовніш}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_C}{\pi} + d_{\text{внутр}}^2}, \quad (2.10)$$

$$d_{\text{зовніш}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,2}{3,14} + 0,210^2} = 0,55 \text{ м}$$

Знаючи внутрішній та зовнішній діаметри, можна знайти периметр стрижня:

$$P_{\text{СТ}} = \pi \cdot (d_{\text{зовніш}} + d_{\text{внутр}}); \quad (2.11)$$

$$P_{\text{СТ}} = 3,14 \cdot (0,55 + 0,210) = 2,38 \text{ м.}$$

Кількість і розмір немагнітних зазорів для попереднього розрахунку можемо вибрати такими, як і у реактора аналога:

h_{dv} – висота внутрішнього диска стрижня, $h_{dv} = 96$ мм;

n_{dv} – кількість внутрішніх дисків, $n_{dv} = 14$;

h_{dk} – висота крайнього диска стрижня, $h_{dk} = 170$ мм;

n_{dk} – Число крайніх дисків $n_{dk} = 2$;

El – Сумарна висота всіх зазорів стрижня, мм;

n – кількість внутрішніх повітряних проміжків, $n = 15$;

$h_{зв}$ – Висота зовнішніх повітряних зазорів, $h_{зв} = 0,0043$ м;

$h_{зк}$ – Висота внутрішніх повітряних зазорів, $h_{зк} = 0,006$ м.

Виходячи з цих даних, орієнтуючись на рис. 2.3 можна визначити висоту вікна магнітопроводу:

$$H_o = h_{dv} \cdot n_{dv} + h_{dk} \cdot n_{dk} + El, \quad (2.11)$$

$$H_o = 96 \cdot 14 + 170 \cdot 2 + 787,6 = 2458 \text{ мм.}$$

Перетин верхнього та нижнього торцевого яра розраховуємо за формулою:

$$S_{\text{я}} = 0,5 \cdot S, \quad (2.12)$$

де S – повний переріз стрижня.

Повний переріз стрижня:

$$S = \frac{\pi \cdot d_{\text{внешн}}^2}{4}. \quad (2.13)$$

$$S = \frac{3,14 \cdot 0,55^2}{4} = 0,23 \text{ м}^2.$$

$$S_{\text{я}} = 0,5 \cdot 0,23 = 0,11 \text{ м}^2.$$

Для розрахунку висоти яра задамо його ширину. Приймаємо її рівною зовнішньому діаметру стрижня, тобто $b_{\text{я}} = d_{\text{зовніш.}}$

Отже, можна знайти висоту яра:

$$h_{\text{я}} = \frac{S_{\text{я}}}{b_{\text{я}}}; \quad (2.14)$$

$$h_{\text{я}} = \frac{0,11}{0,55} = 0,2 \text{ м.}$$

Приймаємо висоту обмотки, що дорівнює 0,2 м при її ширині 0,55 м.

Розраховуємо радіальний розмір обмотки:

$$a_r = (a \cdot n + (n-1) \cdot \sigma + \theta) \cdot n_{\text{пр}} \cdot W \cdot k_{\text{н.н}}, \text{ мм} \quad (2.15)$$

де a – радіальний розмір однієї жили дроту, $a = 1,25$ мм;

n – кількість паралельних жил дроту, $n = 2$;

σ – товщина ізоляції елементарного дроту $\sigma = 0,34$ мм;

Θ – товщина ізоляції дроту на дві сторони $\Theta = 1,68$ мм;

$n_{\text{пр}}$ – кількість проводів у радіальному напрямку;

$k_{\text{н.н}}$ – коефіцієнт нещільності намотування, $k_{\text{н.н}} = 1,03$;

W – число витків в котушці .

$$a_r = (1,25 \cdot 2 + 0,34 + 1,68) \cdot 37 \cdot 1,03 \approx 363 \text{ мм.}$$

Внутрішній діаметр обмотки розраховується, виходячи з формули:

$$D'_1 = d_{\text{зовніш}} + 2 \cdot a_{01} \cdot 10^{-3} \quad (2.16)$$

де $d_{\text{зовніш}}$ – зовнішній діаметр стрижня, м;

a_{01} – відстань від обмотки до стрижня. Для реакторів потужністю, що перевищує 10000 кВар $a_{01} = 30$ мм

$$D'_1 = 0,55 + 2 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 0,60 \text{ мм.}$$

Зовнішній діаметр обмотки:

$$D'_2 = D'_1 + 2 \cdot a_r \quad (2.17)$$

де a_r – Радіальний розмір обмотки.

$$D'_2 = 0,60 + 2 \cdot 363 \cdot 10^{-3} = 1,32 \text{ м.}$$

Знаючи внутрішній та зовнішній діаметри обмотки, можна визначити середній діаметр за формулою:

$$D'_{CP} = D'_1 + \frac{D'_2 - D'_1}{2}, \quad (2.18)$$

$$D'_{CP} = 0,60 + \frac{1,32 - 0,60}{2} = 0,96 \text{ м}$$

За методикою наведеною в і графічною залежністю максимальних значень розрядних напруг від довжини проміжку, визначаємо, що ізоляційна відстань в маслі для випробувальної напруги 364 кВ дорівнює:

$$a_2 = 200 \text{ мм.}$$

Відстань від осі стрижня до осі бокового ярма визначається з формули:

$$C = \frac{d_{\text{внешн}}}{2} + a_{01} + a_r + a_2 + \frac{h_{\text{я}}}{2} \quad (3.15)$$

$$3 = \frac{0,55}{2} + 0,03 + 0,363 + 0,2 + \frac{0,2}{2} = 0,96 \text{ м.}$$

Розмір А (рисунок 2.3) визначатиметься виходячи з формули:

$$A = 2 \cdot C + 2 \cdot \frac{h_{\text{я}}}{2}. \quad (3.16)$$

$$A = 2 \cdot 0,96 + 2 \cdot \frac{0,2}{2} = 2,12 \text{ м.}$$

3 РОЗРАХУНОК ІНДУКТИВНОСТІ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА

Індуктивність реактора визначається виходячи з формули:

$$L_p = W^2 \cdot G_{SUM}, \quad (3.1)$$

де W – кількість витків на стрижень.

G_{SUM} – сумарна магнітна провідність усіх немагнітних повітряних зазорів, що визначається за формулою. Розрахунок провідності зазорів проводиться без урахування випучування, оскільки розміри повітряних зазорів набагато менше розмірів полюсів.

$$G_{SUM} = \frac{(G_{\Sigma_{\text{вн}}} \cdot G_{\Sigma_{\text{кр}}})}{(G_{\Sigma_{\text{вн}}} + G_{\Sigma_{\text{кр}}})}, \quad (3.2)$$

де $G_{\Sigma_{\text{вн}}}$ – сумарна провідність внутрішніх проміжків (зазори між сусідніми дисками стрижня);

$G_{\Sigma_{\text{кр}}}$ – сумарна провідність крайніх зазорів (зазори між диском стрижня та ярмом).

$$G_{\Sigma_{\text{вн}}} = \frac{G_{\text{вн}}}{n}, \quad (3.3)$$

де n – кількість внутрішніх повітряних проміжків;

$G_{\text{вн}}$ – провідність одного внутрішнього повітряного зазору, яка розраховується за формулою:

$$G_{\text{вн}} = \mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{(d_{\text{внешн}} - d_{\text{внутр}})^2}{4 \cdot h_{\text{зв}}}, \quad (3.5)$$

де $h_{\text{зв}}$ – висота внутрішніх немагнітних зазорів;

μ_0 – магнітна постійна, яка дорівнює $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$.

$$G_{\text{вн}} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot \frac{(0,55 - 0,21)^2}{4 \cdot 0,043} = 2,6 \cdot 10^{-6}$$

Таким чином, можна розрахувати сумарну провідність внутрішніх зазорів:

$$G_{\Sigma \text{вн}} = \frac{2,6 \cdot 10^{-6}}{15} = 1,7 \cdot 10^{-7}$$

Провідність крайнього зазору знаходиться на основі формули:

$$G_{\text{кр}} = \mu_0 \cdot \pi \cdot \frac{(d_{\text{внешн}} - d_{\text{внутр}})^2}{4 \cdot h_{\text{зк}}}. \quad (3.6)$$

де $h_{\text{зк}}$ – висота крайніх зазорів;

$$G_{\text{кр}} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot \frac{(0,55 - 0,21)^2}{4 \cdot 0,0064} = 17,8 \cdot 10^{-6}$$

Отже, можна визначити сумарну провідність крайніх зазорів:

$$G_{\Sigma \text{кр}} = \frac{G_{\text{кр}}}{2}, \quad (3.7)$$

$$G_{\Sigma \text{кр}} = \frac{17,8 \cdot 10^{-6}}{2} = 8,913 \cdot 10^{-6}$$

Тоді сумарна провідність всіх немагнітних проміжків знаходиться виходячи з виразу (3.2):

$$G_{SUM} = \frac{(1,7 \cdot 10^{-7} \cdot 8,913 \cdot 10^{-6})}{(1,7 \cdot 10^{-7} + 8,913 \cdot 10^{-6})} = 2,1 \cdot 10^{-7}$$

Розрахункова індуктивність визначається з виразу (3.1):

$$L_p = 4608^2 \cdot 2,1 \cdot 10^{-7} = 4,45 \text{ Гн.}$$

Відхилення розрахункової індуктивності реактора від номінальної:

$$\Delta L = \frac{(L_p - L) \cdot 100}{L}, \quad (3.8)$$

$$\Delta L = \frac{(4,45 - 4,42) \cdot 100}{4,42} = 0,67\%.$$

Відхилення розрахункової індуктивності від номінальної становить 0,67%, тому можна зробити висновок, що кількість витків і висота зазорів обрані правильно.

4 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК

4.1 Тепловий розрахунок обмоток

Завдання теплового розрахунку шунтувального реактора полягає:

- у визначенні перепадів температури між обмотками та магнітною системою, з одного боку, та маслом – з іншого;
- в підборі конструкції і розмірів бака та системи охолодження, що забезпечують нормальну тепловіддачу всіх втрат при температурах обмоток, магнітної системи та масла, що не перевищують допустимі температури;
- у розрахунку перевищень температури обмоток, магнітної системи та масла над навколишнім середовищем.

Внутрішній перепад температури в ізоляції одного дроту розраховується за формулою:

$$\Theta_0 = \frac{q \cdot \delta}{\lambda_{Из}}, \quad (4.1)$$

- де q – густина теплового потоку по поверхні обмотки;
 δ – товщина ізоляції по одній стороні, $\delta = 1,00$ мм;
 $\lambda_{Из}$ - теплопровідність дроту $\lambda_{Из} = 0,16$ Вт/м °С.

Густина теплового потоку визначається за формулою:

$$q = \frac{107 \cdot j^2 \cdot k_{\delta} \cdot b \cdot a}{k_3}, \quad (4.2)$$

- де j – реальна густина струму;
 b – висота обмотки без ізоляції;
 k_3 – Коефіцієнт, що враховує закриття частини поверхні обмотки

ізоляційними деталями, $k_3 = 0,75$.

$$q = \frac{107 \cdot 2,6^2 \cdot 10^6 \cdot 0,008}{0,75} \cdot 10^{-10} = 364,9 \text{ Вт/м}^2,$$

$$\Theta_0 = \frac{364,9 \cdot 0,01}{0,16} = 2,28^\circ\text{C}.$$

Перепад температури на поверхні обмотки визначається, виходячи з формули:

$$\Delta\Theta_{\text{оп}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot 0,35 \cdot q^{0,6}, \quad (4.3)$$

де k_1, k_2, k_3 – визначаються за таблицями і дорівнюють 1; 1; 1,05.

Повний середній перепад температури від обмотки до масла:

$$\Delta\Theta_{\text{оср}} = \Theta_{\text{про}} + \Theta_{\text{оп}}, \quad (4.4)$$

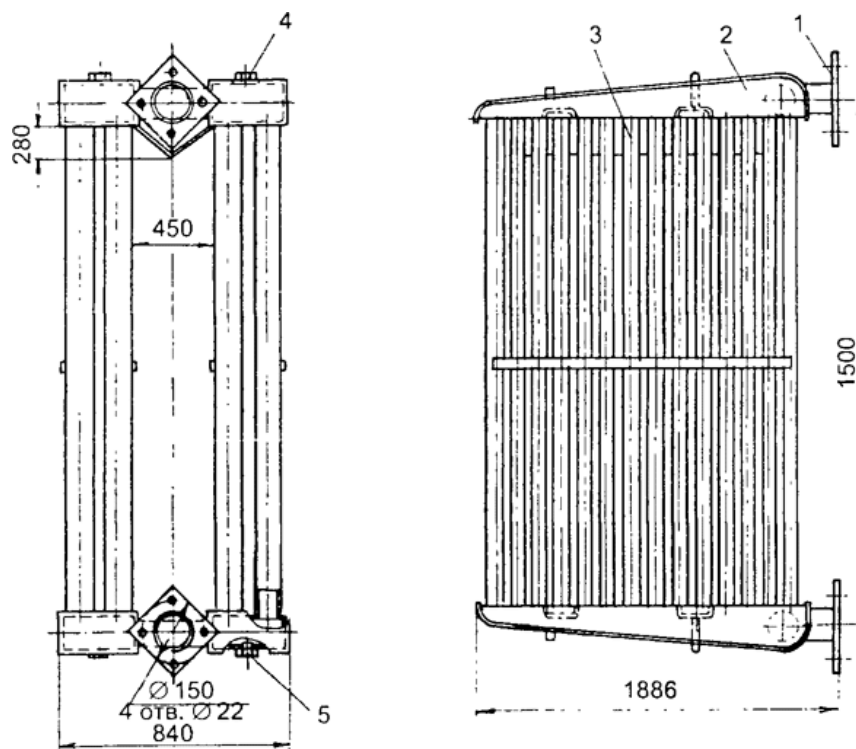
$$\Delta\Theta_{\text{оср}} = 2,28 + 12,7 = 14,98^\circ\text{C}.$$

Отримане значення перепаду температури від обмотки до масла буде використано в подальшому для розрахунку допустимого перевищення середньої температури масла над температурою навколишнього середовища для нагрітої обмотки.

4.2 Розрахунок системи охолодження

Оскільки втрати у реакторі пов'язані з його потужністю, під час вибору

конструкції бака можна орієнтуватися на потужність реактора. За класифікаційною таблицею визначаємо, що для реактора потужністю від 10 000 до 80 000 кВА застосовують бак з навісними радіаторами з гнутими трубами з дугтям і гладкою поверхнею. Загальний вигляд такого радіатора представлений на рисунку 4.1



1 – фланець, 2 – колектор коробчатий, 3 – труби з овальним профілем, 4 – пробка для випуску повітря, 5 – пробка для спуску масла

Рисунок 4.1 – Подвійний прямо трубний радіатор

Теплопередача від активної частини до масла та далі в охолодне середовище здійснюється за рахунок конвекції олії та навколишнього середовища. Мінімальні внутрішні розміри бака визначаються зовнішніми габаритами активної частини та мінімально необхідними ізоляційними проміжками від обмоток та відводів до стінок бака. Для цього потрібно визначити такі мінімальні розміри та відстані:

d_1 – діаметр ізольованого відводу обмотки. При класі напруги 500 кВ і

потужності реактора 60000 кВА, $d_1 = 70$ мм;

s_1 – ізоляційна відстань від ізольованого відводу до ярма і рівну їй відстань від відводу до стінки бака s_2 . $s_1 = s_2 = 40$ мм;

s_3 – відстань між ярмом остова та стінкою бака. Може бути прийнято так само, як для відводу. Тобто $s_3 = 40$ мм;

Визначення параметрів d_1 , s_1 , s_2 , s_3 – проводилося за методикою, наведеною в для випробувальної напруги 80 кВ. Тоді мінімальна ширина бака дорівнює:

$$A_6 = A + (d_1 + s_1 + s_2 + s_3) \cdot 10^{-3}, \quad (4.5)$$

$$A_6 = 1,884 + (70 + 40 + 40 + 40) \cdot 10^{-3} = 2,074 \text{ м.}$$

Розраховуємо мінімальну довжину бака для реактора із класом напруги обмотки 500 кВ:

$$B_6 = D'_2 + 0,8, \quad (4.6)$$

$$B_6 = 0,96 + 0,8 = 1,76 \text{ м.}$$

Висота бака розраховується виходячи з формули:

$$h_{\text{бак}} = h_{\text{а.ч}} + h_{\text{я.к}}, \quad (4.7)$$

де $h_{\text{а.ч}}$ – висота активної частини реактора,

$h_{\text{я.к}}$ – відстань від верхнього ярма до кришки бака. Визначається для класу обмотки 500 кВ і дорівнює 500 мм.

$$h_{\text{а.ч}} = h_{\text{ок}} + 2 \cdot h_{\text{я}} + n \cdot 10^{-3} \quad (4.8)$$

де n – товщина підкладки під нижнє ядро. $n = 30 - 50$ мм. Приймаємо $n = 50$ мм.

$$h_{a.ч} = 2,092 + 2 \cdot 0,2 + 50 \cdot 10^{-3} = 2,542 \text{ м.}$$

Тоді:

$$h_6 = 2,542 + 500 \cdot 10^{-3} = 3,042 \text{ м.}$$

Основні розміри та розміщення основних елементів реактора показані на рисунку 4.2. Допустиме перевищення середньої температури масла над температурою навколишнього середовища для нагрітої обмотки:

$$\Delta\Theta_{м.в} = \Theta_{прном} - \Theta_{о. ср}, \quad (4.9)$$

де $\Delta\Theta_{прном}$ – тривало допустиме середнє перевищення температури обмоток над температурою повітря за номінального навантаження. Прийнято $\Delta\Theta_{прном} = 65^\circ$;

$\Delta\Theta_{о. ср}$ – повний середній перепад температури від обмотки до масла.

$$\Delta\Theta_{м.в} = 65 - 14,98 \approx 50^\circ\text{C.}$$

Знайдене перевищення менше за допустиму величину, оскільки $50^\circ\text{C} < 60^\circ\text{C}$.

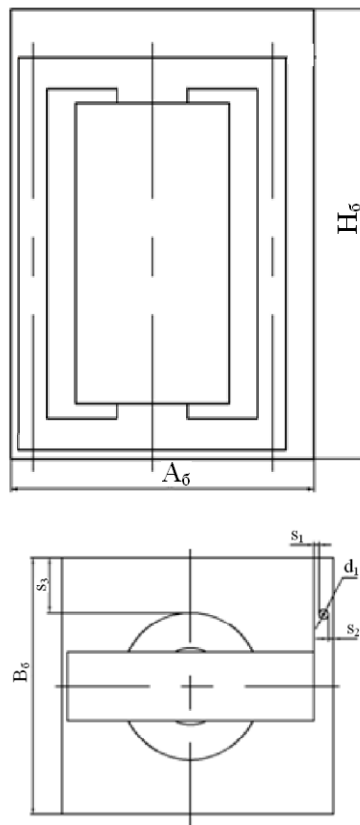


Рисунок 4.2 – Схема розташування основних елементів у баку

Попередньо приймаючи перепад температури на внутрішній стінці бака $\Theta_{м.б} = 5^\circ\text{C}$ і запас 2°C , знаходимо середнє перевищення температури зовнішньої стінки бака над температурою повітря:

$$\Delta\Theta_{б.в} = \Delta\Theta_{м.в} - \Delta\Theta_{м.б} \quad (4.10)$$

$$\Delta\Theta_{б.в} = 50 - 5 - 2 = 43^\circ\text{C}.$$

Для вибраних розмірів бака розраховуємо поверхню конвекції гладкої стінки бака:

$$\Pi_k \approx 2(A+B)H, \quad (4.11)$$

де A і B – висота та ширина стінки бака (див. рисунок 4.2).

$$\Pi_k \approx 2 \cdot (2,074 + 1,76) \cdot 3,042 = 22,2 \text{ м}^2.$$

Тоді орієнтовна поверхня випромінювання бака визначатиметься виходячи з формули:

$$\Pi_{и} = \Pi_{к} \cdot k, \quad (4.12)$$

де k – коефіцієнт, що враховує відношення периметра поверхні випромінювання до поверхні гладкої частини бака; для бака з підвісними радіаторами дорівнює 1,5 – 2,0. Приймаємо $k = 1,5$, тоді:

$$\Pi_{и} = 22,2 \cdot 1,5 = 33,3 \text{ м}^2.$$

Орієнтована необхідна поверхня конвекції для розрахованого значення $\Theta_{б.в} = 43^\circ \text{C}$ дорівнює:

$$\Pi_{к}' = \frac{1,05 \cdot \Sigma P}{2,5 \cdot \Delta \Theta_{б.в.}^{1,25}} 1,12 \Pi_{и}, \quad (4.13)$$

де ΣP – сумарні втрати реактора, що приймаються виходячи з характеристик аналога;

$\Pi_{и}$ – орієнтовна поверхня випромінювання бака;

$\Delta \Theta_{б.в.}$ – середнє перевищення температури зовнішньої стінки бака над температурою повітря.

$$\Pi_{к}' = \frac{1,05 \cdot 110 \cdot 10^3}{2,5 \cdot 43^{1,25}} 1,12 \cdot 33,3 = 279,7 \text{ м}^2.$$

Поверхня конвекції складається з поверхні гладкого бака і поверхні кришки бака, що розраховується за формулою:

$$\Pi_{к,кр} = 0,5 \cdot (A+B) \cdot (B+0,16), \quad (4.14)$$

де $0,16$ = подвійна ширина верхньої рами бака, м;
 $0,5$ – коефіцієнт, що враховує закриття поверхні кришки вводами та арматурою.

$$\Pi_{\text{к,кр}} = 0,5 \cdot (2,074 + 1,76) \cdot (1,76 + 0,16) = 3,68 \text{ м}^2.$$

Поверхня конвекції радіаторів розраховується за виразом:

$$\Sigma \Pi_{\text{к.р.}} = \Pi_{\text{к}'} - \Pi_{\text{к}} - \Pi_{\text{к,кр}}, \quad (4.15)$$

де $\Pi_{\text{к}'}$ – орієнтована необхідна поверхня конвекції, м^2 ;
 $\Pi_{\text{к}}$ – поверхня конвекції гладкої стінки бака, м^2 ;
 $\Pi_{\text{к,кр}}$ – поверхня кришки бака, м^2 .

$$\Sigma \Pi_{\text{к.р.}} = 279,7 - 22,2 - 3,68 = 253,82 \text{ м}^2.$$

Поверхня конвекції радіатора, наведена до поверхні гладкої стінки:

$$\Pi_{\text{к,р}} = \Pi_{\text{тр}} \cdot k_{\text{ф}} + \Pi_{\text{к,к}}, \quad (4.16)$$

де $\Pi_{\text{тр}}$ – поверхня конвекції труб;
 $k_{\text{ф}}$ – коефіцієнт, що враховує поліпшення чи погіршення тепловіддачі за рахунок конвекції;

$\Pi_{\text{к,к}}$ – поверхня конвекції двох колекторів.

Наведені вище параметри визначаються з табличних даних і дорівнюють:

$$\Pi_{\text{тр}} = 7,533 \text{ м}^2, \quad k_{\text{ф}} = 2,24, \quad \Pi_{\text{к,к}} = 0,34 \text{ м}^2.$$

Відповідно, поверхня конвекції радіатора, приведена до поверхні гладкої

стілки, дорівнює:

$$\Pi_{к,р} = 7,533 \cdot 2,24 + 0,34 = 17,21 \text{ м}^2.$$

Конвекція бака розраховується виходячи з формули:

$$\Pi_{к,б} = \sum \Pi_{к.р.} + \Pi_{к} + \Pi_{к,кр}, \quad (4.17)$$

$$\Pi_{к,б} = 253,82 + 22,2 + 3,68 = 279,7 \text{ м}^2.$$

Визначаємо середнє перевищення температури зовнішньої поверхні труби над температурою повітря.

$$\Delta \Theta_{б.в.} = \left(\frac{1,05 \cdot P}{2,8 \cdot \Pi_{И} + 2,5 \cdot \Pi_{К}} \right)^{0,8}, \quad (4.18)$$

де $\Pi_{И}$ – орієнтовна поверхня випромінювання бака, м^2 ;

$\Pi_{К}$ – поверхня конвекції гладкої стінки бака, м^2 .

$$\Delta \Theta_{б.в.} = \left(\frac{1,05 \cdot 100 \cdot 10^3}{2,8 \cdot 33,3 + 2,5 \cdot 279,7} \right)^{0,8} = 42,8 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Середнє перевищення температури масла поблизу стінки над температурою внутрішньої поверхні стінки труби дорівнює:

$$\Delta \Theta_{м.б.} = k_1 \cdot 0,165 \left(\frac{k \cdot P}{\sum \Pi_{К}} \right)^{0,6}, \quad (4.19)$$

де $\sum \Pi_{К}$ – сума поверхонь конвекції гладкої частини труб та кришки без

урахування коефіцієнтів покращення або погіршення конвекції.

k_1 – Коефіцієнт, що дорівнює 0,9 при охолодженні з дуттям.

$$\Delta\Theta_{\text{м.б.}} = 0,9 \cdot 0,165 \left(\frac{1,05 \cdot 100 \cdot 10^3}{279,7} \right)^{0,6} = 4,65^\circ\text{C}.$$

Перевищення температури масла над температурою повітря:

$$\Delta\Theta_{\text{МВ}} = \Theta_{\text{МГ}} + \Theta_{\text{бВ}}, \quad (4.20)$$

$$\Delta\Theta_{\text{МВ}} = 42,8 + 4,65 = 47,45^\circ\text{C}.$$

Перевищення температури масла у зовнішніх шарах над температурою повітря:

$$\Delta\Theta_{\text{МВВ}} = k \cdot \Theta_{\text{МВ}}, \quad (4.21)$$

$$\Delta\Theta_{\text{МВВ}} = 1,05 \cdot 47,45 = 49,8^\circ\text{C}.$$

Значення $\Delta\Theta_{\text{МВВ}} < 60^\circ\text{C}$, що відповідає вимогам до меж допустимого нагріву за ГОСТ11677-85.

5 РОЗРАХУНОК МАСИ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА

5.1 Розрахунок маси обмотувального дроту

Середня довжина одного витка знаходиться за виразом:

$$l_{\text{cp}} = \pi \cdot D_{\text{cp}}, \quad (5.1)$$

$$l_{\text{cp}} = \pi \cdot 0,96 = 3,01 \text{ м.}$$

Довжина всієї обмотки:

$$l_{\text{об}} = W \cdot l_{\text{cp}}, \quad (5.2)$$

$$l_{\text{об}} = 4608 \cdot 3,01 = 13870 \text{ м.}$$

Знаючи довжину всієї обмотки, можна розрахувати масу голого дроту:

$$m_{\text{об}} = l_{\text{об}} \cdot q \cdot \gamma_m, \quad (5.3)$$

де γ_m – густина міді.

$$m_{\text{об}} = 13870 \cdot 39,6 \cdot 10^{-6} \cdot 8,93 \cdot 10^3 = 4830 \text{ кг.}$$

Розрахунок маси кабельного паперу (за рис. 3.2):

$$m_{\text{из}} = 2 \cdot l_{\text{об}} \cdot (A \cdot B - 2a \cdot b) \cdot \gamma_{\text{б}}, \quad (5.4)$$

$$m_{\text{из}} = 2 \cdot 13870 \cdot (5,48 \cdot 10,34 - 2 \cdot 1,4 \cdot 8) \cdot 10^{-6} \cdot 760 = 718 \text{ кг.}$$

Отже, можна знайти масу всього дроту:

$$m_{\text{пр}} = m_{\text{из}} + m_{\text{об}}, \quad (5.5)$$

$$m_{\text{пр}} = 718 + 4830 = 5548 \text{ кг.}$$

5.2 Розрахунок маси феромагнітної сталі

Маса одного диска розраховується виходячи з формули:

$$m_{\text{д}} = \gamma \cdot S_{\text{а}} \cdot h_{\text{д}} \cdot k_{\text{з}}, \quad (5.6)$$

де γ – густина сталі марки 3408 $\rho = 7650 \text{ кг/м}^3$;

$h_{\text{д}}$ – висота диска;

$k_{\text{з}}$ – Коефіцієнт заповнення шихтованого магнітопроводу сталлю $k_{\text{з}} = 0,96$.

Тоді можна знайти масу одного середнього диска:

$$m_{\text{сд1}} = \gamma \cdot S_{\text{а}} \cdot h_{\text{сд}} \cdot k_{\text{з}}, \quad (5.7)$$

$$m_{\text{сд1}} = 7650 \cdot 0,2 \cdot 0,101 \cdot 0,96 = 148,3 \text{ кг.}$$

Маса верхнього диска:

$$m_{\text{вд}} = \gamma \cdot S_{\text{а}} \cdot h_{\text{вд}} \cdot k_{\text{з}}, \quad (5.8)$$

$$m_{\text{вд}} = 7650 \cdot 0,2 \cdot 0,179 \cdot 0,96 = 262,9 \text{ кг.}$$

Маса нижнього диска:

$$m_{\text{нд}} = \gamma \cdot S_{\text{а}} \cdot h_{\text{нд}} \cdot k_3, \quad (5.9)$$

$$m_{\text{нд}} = 7650 \cdot 0,2 \cdot 0,129 \cdot 0,96 = 189,4 \text{ кг.}$$

Повна маса феромагнітної сталі знаходиться з виразу:

$$m_{\text{ф}} = m_{\text{нд}} + m_{\text{вд}} + 12 \cdot m_{\text{сд1}}, \quad (5.10)$$

$$m_{\text{ф}} = 189,4 + 262,9 + 12 \cdot 148,3 = 2231,9 \text{ кг.}$$

5.3 Маса електротехнічної сталі

Маса бічного ярма:

$$m_{\text{б.я.}} = \gamma \cdot h_{\text{ок}} \cdot h_{\text{я}} \cdot b_{\text{я}} \cdot k_3, \quad (5.11)$$

де k_3 – коефіцієнт заповнення сталлю, $k_3 = 0,96$.

$$m_{\text{б.я.}} = 7650 \cdot 2,458 \cdot 0,2 \cdot 0,55 \cdot 0,96 = 1985,6 \text{ кг.}$$

Маса верхнього ярма:

$$m_{\text{в.я.}} = \gamma \cdot A \cdot h_{\text{я}} \cdot b_{\text{я}} \cdot k_3, \quad (5.12)$$

де A – ширина магнітної системи.

$$m_{\text{в.я.}} = 7650 \cdot 2,12 \cdot 0,2 \cdot 0,55 \cdot 0,96 = 1712,6 \text{ кг.}$$

Тоді повна маса остова:

$$m_{\text{ос.}} = 2 \cdot m_{\text{в.я.}} + 2 \cdot m_{\text{б.я.}}, \quad (5.13)$$

$$m_{\text{ос.}} = 2 \cdot 1985,6 + 2 \cdot 1712,6 = 7396,4 \text{ кг.}$$

5.4 Повна маса активної частини

$$m_{\text{а.ч.}} = m_{\text{ос.}} + m_{\text{ф}} + m_{\text{пр}}, \quad (5.14)$$

$$m_{\text{а.ч.}} = 7396,4 + 2231,9 + 5548 = 15176,3 \text{ кг.}$$

Отримано менше значення маси активної частини, ніж значення маси активної частини реактора аналога. Це дозволяє зробити висновок про поліпшення масогабаритних показників реактора, що проектується, порівняно з реактором аналогом.

6 ТЕХНОЛОГІЯ СКЛАДАННЯ АКТИВНОЇ ЧАСТИНИ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА

Річна програма випуску становить 50 виробів, тому обирається серійний тип виробництва. При цьому типу виробництва характерним є поточне виробництво з певним рівнем механізації. Обладнання на ділянці не тільки універсальне, а й спеціальне та спеціалізоване. З'являється досить велика кількість оснастки та пристроїв, і при виконанні операцій використовуються універсальні та спеціальні інструменти. Робітники мають низьку кваліфікацію та вузьку спеціалізацію.

Обладнання розташовується з технологічного процесу. Технологічний процес зазвичай диференційований на операції та за кожним робочим місцем закріплена одна або кілька операцій.

Для раціональнішого використання обладнання пропонується робота ділянки у дві зміни.

Технологічний процес складання шунтувальних реакторів містить наступні операції:

- підготовка робочого місця;
- комплектуюча;
- підготовча;
- встановлення крану;
- складальна.

При підготовці робочого місця проводиться інструктаж на робочому місці та візуальний огляд обладнання для вирішення питання про його працездатність, відбувається підготовка необхідних інструментів та оснащення для виконання основної операції, перевірка технічної та технологічної документації.

Комплектуюча операція виконується на основному обладнанні, тобто на складальному столі, що входить до складу стенду. На столі розкладаються

складальні одиниці, деталі та кріплення. Їх кількість вказується у робочому кресленні та специфікації.

У процесі третьої операції, підготовчої, робітнику (збиральнику трансформаторів) спочатку потрібно протерти поверхні основи, які стикаються з олією бавовняною серветкою, яка не залишає ворсу, а потім сухою ганчіркою.

При виконанні операції встановлення крана необхідно встановити основу на складальний стенд, накрутити на патрубок гайку, потім – пеньку, попередньо на патрубок наноситься емаль ПФ-115. Далі потрібно накрутити кран та підтягнути його гайкою, після чого в отвір крана необхідно вкрутити пробку.

При виконанні складальної операції крокують активну частину, встановлюють її на основу, на пластини кріплення і наживляють. Кріплення активної частини основи виконується болтами, гайками, шайбами за допомогою коловороту та насадки.

У конструкцію реактора входять:

– активна частина – складальна одиниця, що включає остов, обмотки, ізоляцію і відводи.

– бак із запірною арматурою;

– вводи;

– система охолодження;

– установка розширювача;

Обладнання ділянки складається зі складального стенду, слюсарного столу, гільотинних ножиць та мостового крана.

Складальний стенд призначений для складання шунтувальних реакторів. Він являє собою сукупність складальних столів, рейкових колій, візків та дерев'яного настилу. Рейкові шляхи складаються із зварених між собою металевих швелерів, кріплення яких забезпечується за допомогою анкерних болтів. По рейковій колії рухається візок, призначений для роботи збирачів на висоті, який є звареною металевою конструкцією на колесах. На металевий каркас кріпиться дерев'яний настил, який забезпечує пересування робітників

під час збирання реакторів. Вище настилу встановлюється металева огорожа для забезпечення безпеки працюючих. Наприкінці колії розташовані кінцеві черевики, які запобігають з'їзду візка з рейкового полотна. На колесах візка розташовані гальмівні болти для фіксації візка в потрібному положенні. Між залізничними коліями розташовані складальні столи, на яких проводиться складання реакторів. Розміри стенду 2980×7600 мм. Вантажопідйомність візка становить 400 кг, а столу – 3000 кг. Розміри складального столу 3000×1000 мм, висота 960 мм.

Гільйотинні ножиці призначені для прямолінійного, поздовжнього та поперечного розрізу листового матеріалу, а також обрізання кромки після прокочування. Поперечний розкрій листа товщиною до 1,6 мм і шириною до 1600 мм виконується за один рух ножа, а поздовжній при довжині листа більш 1600 мм декількома повторними рухами з переміщенням листа вздовж стола.

Листові ножиці використовуються в різних галузях промисловості. Ножиці використовуються також для крою гуми, пластмаси та інших твердих матеріалів. На ножицях встановлено електродвигун приводу типу АОС-2-32-6 потужністю 2,7 кВт та електромагніт типу МИС-6100. Розміри ножиць 1400×2000 мм.

Кран мостового типу є допоміжним обладнанням ділянки. На ділянці застосовується мостовий кран загального призначення. Кран має вантажний гачок, що призначений для виконання масових вантажно-розвантажувальних робіт. Кран складається з двох основних вузлів: мосту та кранового візка.

На ділянці знаходиться двобалковий кран опорного типу, який упирається на чотири ходові колеса, що рухаються по кранових рейках, які закріплені на підкрановій балці, встановленій на колонах цеху.

Кран має електричний привід вантажопідйомністю 5 т, потужністю 2,1 кВт, швидкість підйому становить 0,32 – 0,63 м/с, прогин 10,5 – 34,5 м. Міст двобалкового мостового крана складається з двох жорстких балок, званих головними. Головні балки та кінцеві балки становлять міст крана. Головну балку мостового крана виготовляють із коробчастим перерізом з симетрично

розташованою рейкою. Вона складається з двох вертикальних стояків та горизонтальних поясів. Кінцеві балки мостів виготовляють також коробчастими, щоб мати достатню жорсткість. У мостових кранах виникає великий прогин мостів, особливо під час підйому максимальних вантажів. Тому головна балка має вигин нагору, який називається будівельним підйомом.

На крановому візку встановлений головний та допоміжний механізм підйому вантажу та механізм переміщення візка. Допоміжний підйом використовується під час кантування та центрування вантажів. Металоконструкція візка виконана з листової сталі. Рама візка виконана із зварених поздовжніх та поперечних балок, які мають гнуті профілі, що дозволяє значно збільшити жорсткість рами візка без збільшення його ваги. У візку забезпечений зручний доступ до всіх механізмів.

До мосту крана прикріплено закриту кабінку управління. Живлення механізмів крана виконується за допомогою спеціальних струмопровідних шин, встановлених вздовж стін цеху.

Подача живлення на механізми підйому вантажу та рух візка виконується за допомогою гнучкого кабелю, що розміщується на катках вздовж натягнутої струни.

Слюсарний стіл використовується при підготовці робочого місця, комплектуванні, розрізанні та виготовленні тимчасових бірок. Він являє собою металозварювальну конструкцію, на його каркасі кріпиться металевий настил. Має розміри 1000 x 2500 мм.

В якості оснастки на ділянці використовують стропи, які призначені для транспортування вантажів, траверса для підняття, переміщення та встановлення фарфорових покриттів, а також траверса для переміщення кістяків. Стropи мають спеціальне пристосування у вигляді римболтів, гаків, скоб. Стropи складаються з тросів та гаків із запобіжними замками.

7 ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ВОЛОГОСТІ ІЗОЛЯЦІЇ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ

В загальному випадку нейронні мережі являють собою сукупності нейронів, які пов'язані певним чином, основною відмінністю яких є способи зв'язку нейронів між собою, функції нейроелементів, а також механізми і напрямки розповсюдження сигналів [1].

За типом розв'язуваних задач можна розрізнити нейронні мережі для обробки та фільтрації даних, категоризації і таксономії даних, пошуку закономірностей у даних, заповнення прогалів у таблицях даних, візуалізації та картографування даних, розпізнавання (класифікації) образів, непараметричної апроксимації залежностей за точковими даними, побудови баз даних великої ємності з швидким асоціативним пошуком інформації за неповними вхідними даними, розробки пристроїв асоціативної пам'яті, побудови експертних систем, яких навчають, на прикладах, здобуття знань з даних, адаптивного управління складними об'єктами і процесами, трудомістких задач оптимізації (типу задач про комівояжера і т. п.), шифрування, дешифрування, стиснення інформації, перекладу тексту [12].

Перспективним напрямком дослідження є використання нейронних мереж для прогнозування зміни параметрів шунтувального реактора, які безпосередньо впливають на строк його служби, таких як навантаження, температура найбільш нагрітої точки (ТННТ), ступінь зволоженості целюлозної ізоляції, параметри трансформаторного масла і т. д [10, 2- 5].

Завдання даного розділу полягає в розробці з використаннями апарату нейронних мереж моделі взаємозв'язку температури верхніх і нижніх шарів трансформаторного масла зі ступенем його зволоженості.

Оскільки дані щодо зміни вологості трансформаторного масла внаслідок зміни теплового режиму трансформатора є часовим рядом, пропонується задіяти мережу на основі нелінійної авторегресійної модель з екзогенними

входами (NARX), яка відноситься до рекурентних нейронних мереж [7,8]. Відомі два типи архітектури нейронних мереж NARX – послідовно-паралельна та з паралельна. Математична модель мережі NARX із послідовно-паралельною архітектурою має вигляд:

$$\hat{y}(t+1) = f(x(t-1), \dots, (t-d), y(t-1), \dots, (t-d))$$

де $\hat{y}(t+1)$ – прогнозоване значення y для моменту часу $t = t+1$;

$x(t-1)$ – вхідні дані нейронної мережі;

$y(t-1)$ – фактичні значення вихідних даних нейронної мережі;

d – значення параметру затримки (*number of delays*).

Математична модель нейронної мережі з паралельною архітектурою:

$$\hat{y}(t+1) = f(x(t-1), \dots, (t-d), \hat{y}(t-1), \dots, (t-d))$$

де $\hat{y}(t-1)$ – прогнозовані значення вихідних даних нейронної мережі.

Мережі типу NARX виконують прогнозування базуючись як на попередніх значеннях незалежних вхідних даних, так і на попередніх значеннях фактичних $y(t-1)$ або прогнозованих $\hat{y}(t-1)$ вихідних даних. При навчанні та тестуванні мережі доцільним є використання послідовно-паралельної архітектури, коли на вхід подаються фактичні попередні значення $y(t-1)$, що дозволяє підвищити точність навчання нейронної мережі.

З метою реалізації нейронної мережі використано інструмент Neural Network Toolbox в середовищі Matlab. Даний програмний засіб дозволяє будувати мережі які складаються з двох шарів, в якості функції активації в першому шарі використовується сигмоїдна функція (*sigmoid function*), у другому шарі – лінійна функція (*linear function*). Структура нейронної мережі типу NARX, реалізована в середовищі Matlab наведена на рис. 7.1.

Вихідним параметром мережі y є прогнозоване значення вологості трансформаторного масла, г/т.

Навчання та тестування нейронної мережі. В табл.7.1 наведений фрагмент вибірки вихідних даних, які використані для навчання та тестування побудованої нейронної мережі.

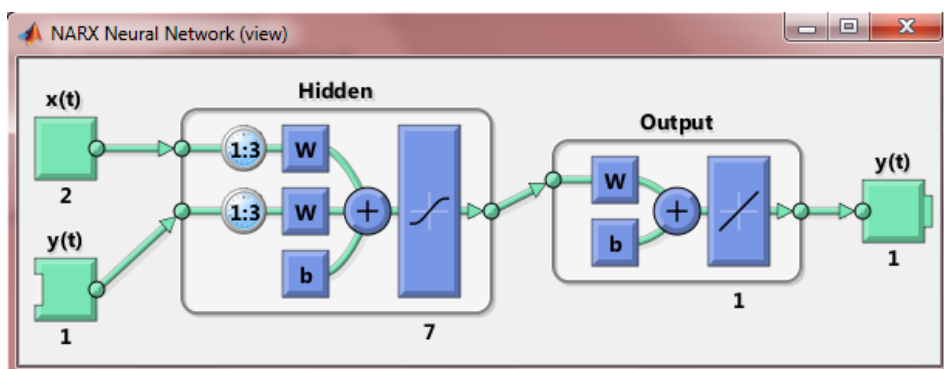
Для навчання та тестування нейронної мережі використані значення наступних параметрів реактора:

x_1 – температура верхніх шарів трансформаторного масла, °C;

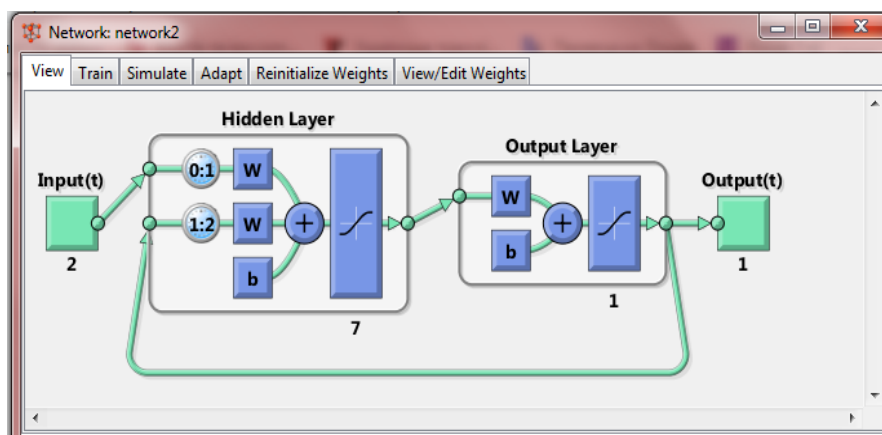
x_2 – температура нижніх шарів трансформаторного масла, °C;

x_3 – виміряна абсолютна вологість трансформаторного масла, г/т;

x_4 – значення абсолютної вологості трансформаторного масла в момент часу $t=t-1$, г/т.



(a)



(б)

Рис. 7.1 – Структура мережі NARX з послідовно - паралельною (а) та паралельною (б) архітектурою в середовищі Matlab

Таблиця 7.1 – Фрагмент даних, що використовуються для навчання та тестування нейронної мережі

Номер вимірювання	Температура верхніх шарів трансформаторного масла, °C	Температура нижніх шарів трансформаторного масла, °C	Значення вологовмісту трансформаторного масла, г/т
1	26,0	-12,6	7,8
2	26,0	-12,6	7,8
3	25,7	-12,6	8,0
4	25,6	-12,6	7,8
5	25,6	-12,6	7,8
6	25,6	-12,6	7,8
7	25,7	-12,6	7,8
8	25,7	-12,6	7,8
9	25,7	-12,6	8,0
10	26,0	-12,6	8,0
11	26,0	-12,6	7,8
12	26,0	-12,6	7,8
13	26,0	-12,6	7,8
14	26,0	-12,6	7,8
15	26,0	-12,7	7,7
16	26,0	-12,8	7,9
17	26,0	-12,8	7,7
18	26,0	-12,8	7,8

В середовищі Neural Network Toolbox є можливість використання алгоритмів навчання нейронних мереж, це метод нелінійної оптимізації Левенберга – Марквардта (*Levenberg-Marquard*), метод Бассової регуляризації

(*Bayesian Regularization*) та метод сполучених градієнтів (*Scaled Conjugate Gradient*).

Для вирішення поставленого завдання достатню точність і швидкість розрахунку забезпечує метод Левенберга – Марквардта. Значення параметру затримки d (*number of delays*) обрано рівним 3, кількість нейронів прихованого шару (*number of hidden neurons*) – 7.

Навчання мережі виконано з використанням статистичних даних про зміну температури та вологості трансформаторного масла протягом чотирьох місяців експлуатації. Загальний об'єм вибірки становить 80 000 значень кожного параметру x_n . Кількість циклів навчання склало близько 200 епох. Значення середньоквадратичної похибки розрахунку (MSE), отримане в результаті навчання нейронної мережі дорівнює $4,18 \cdot 10^{-3}$.

Для тестування мережі використаний фрагмент масиву вихідних даних не задіяний у навчанні нейронної мережі, об'єм якого склав 15 % від загального об'єму вибірки (12 000 значень кожного параметру x_n). Величина похибки MSE, отримана в результаті тестування мережі становить $3,25 \cdot 10^{-3}$.

На графіках рис. 7.2 наведені результати прогнозування зміни вологості трансформаторного масла протягом 10 днів експлуатації, які отримані з використанням побудованої нейронної мережі. Виконано порівняння результатів прогнозу з фактичними значеннями вологості масла. З графіку на рис. 7.3, видно, що максимальна помилка прогнозу складає до 12 %.

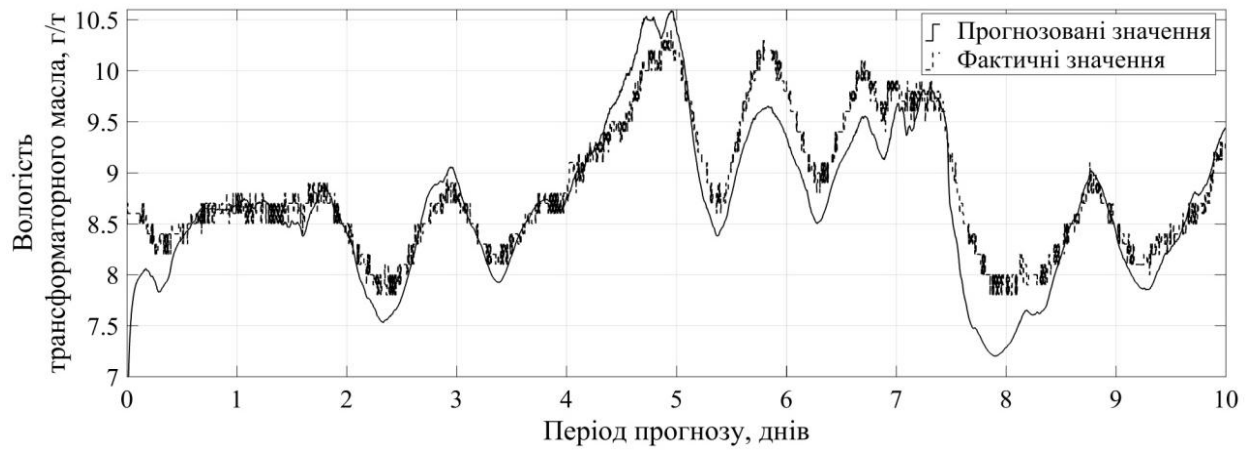


Рисунок 7.2 – Результати прогнозування зміни вологості трансформаторного масла за допомогою побудованої нейронної мережі

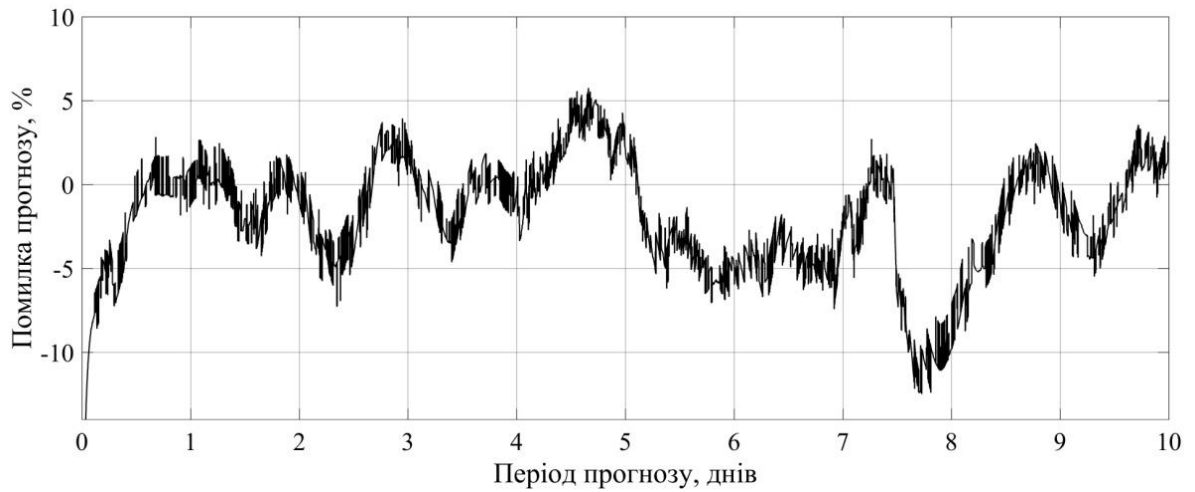


Рисунок 7.3 – Розрахунок помилки прогнозу

Величину помилки прогнозу можна пояснити тим, що при побудові нейронної мережі не враховуються наступні параметри: режим і тип охолодження трансформатора, температура охолодного середовища і т. д.

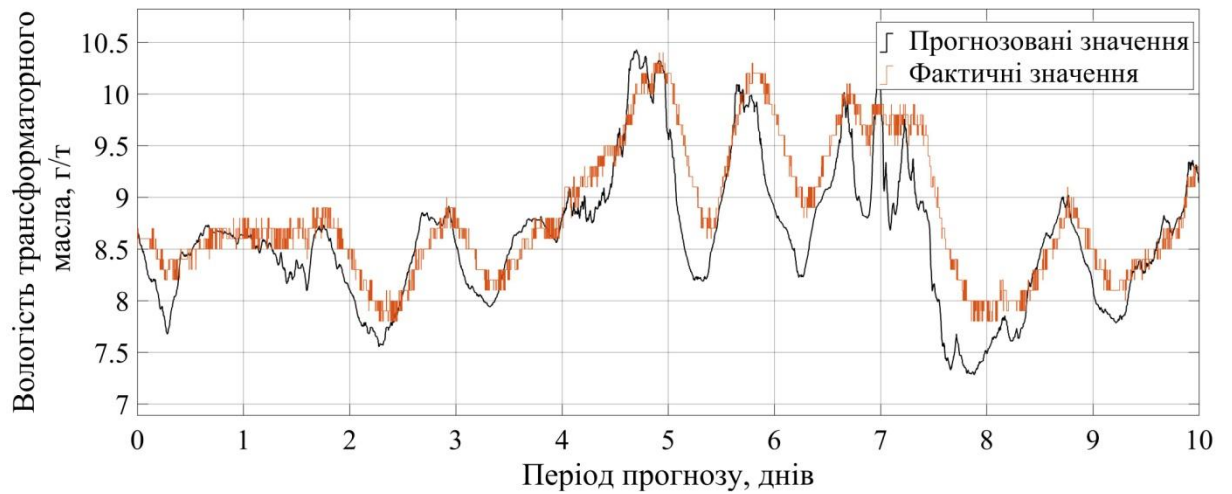


Рисунок 7.6 – Результати прогнозування зміни вологості трансформаторного масла із використанням мережі прямого розповсюдження (feed forward network)

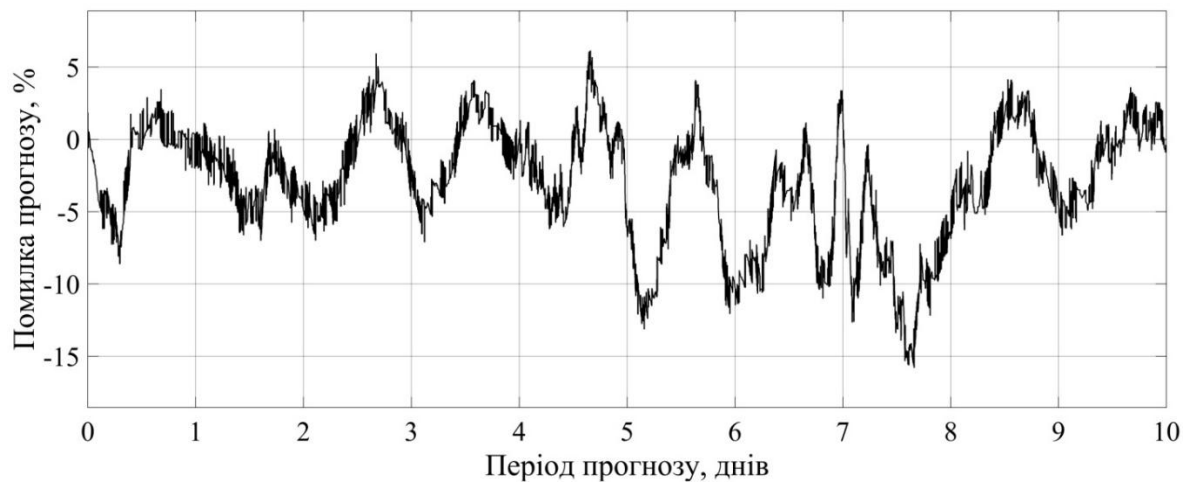


Рисунок 7.7 – Розрахунок помилки прогнозу

ВИСНОВКИ

В ході виконання дипломного проєкту був розроблений за заданими параметрами шунтувальний реактор на 500 кВ потужністю 600 МВар.

Відповідно до запасу індукції, закладеному в конструкції аналога, значення індукції в стрижні було прийнято 1,43 Тл, що дозволило застосувати стрижень меншого перерізу, порівняно з реактором аналогом. По проведеному розрахунку зменшення діаметра стрижня склало 550 мм порівняно з 600 мм аналогом. Це дало змогу зменшити внутрішній та зовнішній діаметр обмотки, а також масу активної частини реактора.

Отримана маса активної частини – 15176 кг, що значно менше від маси активної частини аналога (17243 кг). Цей результат досягнутий за рахунок зменшення перерізу стрижня магнітопроводу та використання меншої кількості витків обмотки, у порівнянні з конструкцією реактору аналогу. В свою чергу, зменшення маси активної частини шунтувального реактору дасть змогу знизити вартість виробництва шунтувального реактора.

За допомогою інструменту Neural Network Toolbox в середовищі Matlab побудована нейронна мережа на основі нелінійної авторегресійної моделі з екзогенними входами, виконано навчання та тестування цієї мережі з використаннями даних про зміну параметрів трансформаторного масла протягом чотирьох місяців експлуатації.

Отримані результати демонструють можливість застосування апарату нейронних мереж для прогнозування зміни вологості трансформаторного масла шунтуючих реакторів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Субботін С. О. Олійник А. О. Нейронні мережі: навч. посіб. // Запоріжжя. ЗНТУ, 2014 г. – 132 с.
2. Конограй С. П. Прогнозирование температуры верхних слоев масла силового трансформаторного оборудования с помощью нейронных сетей // Вісник НТУ "ХПІ". – 2010. – № 55. – С. 43-48.
3. Бондаренко В. Е., Шутенко О. В. Разработка нечеткой нейронной сети для интерпретации результатов анализа растворенных в масле газов // Електротехніка і електромеханіка – 2017. – № 2. – С. 49-56.
4. Шутенко О. В. Прогнозирование значений показателей качества трансформаторного масла с помощью нейро нечеткой системы ANFIS // Світлотехніка та електроенергетика. – 2008. – № 4. – С. 49-56.
5. Sakthivel G., Arun Sankar S. Furan Prediction in Transformer Oil using Artificial Neural Network // International Journal of Computer Applications. – 2013. – № 4. – pp. 18-23.
6. Василевский В. В. Модель динамики влажности в системе "Бумажная изоляция – Трансформаторное масло" в нестационарных тепловых режимах силового трансформатора // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №13 – С.17 – 20.
7. Boussaada, Zina & Curea, Octavian & Ahmed, Remaci & Camblong, Haritza & Najiba, Mrabet Bellaaj A Nonlinear Autoregressive Exogenous (NARX) Neural Network Model for the Prediction of the Daily Direct Solar Radiation // Energies. – 2018. – Vol.11 – pp 1 – 21.
8. Nair, K.R.M. Power and Distribution Transformers: Practical Design Guide. – CRC Press, 2021. – 497 p.
9. https://www.gegridsolutions.com/products/brochures/md/hydranm2-gea-12934a_a4_hr.pdf
10. Василевський В. В. Застосування нейронних мереж для

прогнозування вологості ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів / В. В. Василевський, О. О. Каплієнко, С. І. Шило // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Problems of electrical machines and apparatus perfection. Theory and practice : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – № 2. – С. 8-12.

11. Андриєнко П. Д., Сахно А. А., Конограй С. П., Скрупская Л. С. Особенности непрерывного контроля характеристик влагосодержания изоляции маслонеполненного электрооборудования. Электротехника и электроэнергетика, №2, 2014. с. 32-39.

12. Субботін С. О. Нейронні мережі : теорія та практика : навч. посіб. / С. О. Субботін. – Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2020. – 184 с.