

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електромеханічних систем автоматизації
в промисловості і на транспорті

Пояснювальна записка

до магістерської кваліфікаційної роботи

_____магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Визначення залишкового ресурсу обмоток
силового масляного трансформатора»

Виконав: студент 2 курсу, гр. ЕПА-18м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____Вдовиченко В.Є.

(прізвище та ініціали)

Керівник _____Розводюк М.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент _____

(прізвище та ініціали)

Вінниця – 2019 року

Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра Електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

д.т.н., проф.
В. М. Кутін
“___” _____ 2019 року

З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Вдовиченку Віталію Євгенійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора

керівник роботи Розводюк М.П., к.т.н., доцент кафедри ЕМСАПТ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом вищого навчального закладу від “___” _____ 20__ року №___

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи

Інформація з Інтернет-джерел, патентів, науково-технічних журналів, монографій, підручників про методи та засоби визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз методів та способів визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора. 2. Математична модель для визначення залишкового ресурсу обмоток трансформатора. 3. Синтез структури пристрою для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора. 4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. 6. Економічна частина.

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

1. Об'єкт, предмет, мета й задачі дослідження; 2. Моделі ідентифікації технічного стану силового трансформатора; 3. Математична модель для визначення залишкового ресурсу обмоток трансформатора; 4. Дослідження впливу зміни значень параметрів математичної моделі на відносне зношення ізоляції обмоток; 5. Дослідження впливу зміни значень параметрів математичної моделі на відносне зношення ізоляції обмоток; 6. Дослідження впливу зміни вологості твердої ізоляції обмотки на її відносне зношення; 7. Дослідження впливу кислот в маслі на відносне зношення обмотки; 8. Дослідження впливу кисню в маслі на відносне зношення обмотки; 9. Дослідження впливу температури зовнішнього середовища на відносне зношення обмотки; 10. Дослідження впливу одночасної зміни

значень всіх параметрів на відносне зношення обмотки; 11. Граф функціонування блока обробки інформації; 12. Секвенційна модель функціонування блока обробки інформації; 13. Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора; 14. Наукова новизна та практичне значення одержаних результатів; 15. Апробація результатів дослідження.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Розводюк М.П., к.т.н., доцент		
Економічна частина	Мельничук Л.М., доцент		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кобилянський О.В., д.пед.н., завідувач кафедри, професор		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)		
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР		
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР		
4	Виконання розділу «Економічна частина»		
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»		
6	Попередній захист МКР		
7	Нормоконтроль МКР		
8	Рецензування МКР		
9	Захист МКР		

Студент

_____ (підпис)

Вдовиченко В.Є.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Розводюк М.П.

_____ (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Вдовиченко В.Є. Визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора. Магістерська кваліфікаційна робота. – Вінниця : ВНТУ, 2019. – 109 с. Бібл.: 40. Іл.: 24. Табл.: 16.

В магістерській кваліфікаційній роботі удосконалено математичну модель для визначення залишкового ресурсу силового масляного трансформатора за рахунок введення додаткового коефіцієнту впливу температури зовнішнього середовища.

Синтезовано структуру пристрою для діагностування трансформатора з використанням апарату секвенцій.

Розглянуті питання з охорони праці та економічна частина.

Ключові слова: трансформатор, залишковий ресурс, діагностування, секвенційний апарат, математична модель.

АННОТАЦИЯ

Вдовиченко В.Е. Определение остаточного ресурса обмоток силового масляного трансформатора. Магистерская квалификационная работа. – Винница: ВНТУ, 2019. – 109 с. Библ .: 40. Ил .: 24. Табл .: 16.

В магистерской квалификационной работе усовершенствована математическая модель для определения остаточного ресурса силового масляного трансформатора за счет введения дополнительного коэффициента влияния температуры внешней среды.

Синтезирована структура устройства для диагностики трансформатора с использованием аппарата секвенций.

Рассмотрены вопросы по охране труда и экономическая часть.

Ключевые слова: трансформатор, остаточный ресурс, диагностирование, секвенциальный аппарат, математическая модель.

ABSTRACT

Vdovychenko V.E. Determination of the residual life of the windings of the power oil transformer. Master's qualification work. – Vinnitsa: VNTU, 2019. – 109 p. Bibl .: 40. Ill .: 24. Tabl .: 16.

In the master's qualification work a mathematical model for determining the residual life of a power oil transformer was improved by introducing an additional factor of influence of the ambient temperature.

The structure of the device for diagnosing the transformer using the apparatus of sequences was synthesized.

The issues of labor protection and the economic part are considered.

Keywords: transformer, residual resource, diagnostics, sequencer, mathematical model.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА	8
1.1 Аналіз причин зменшення ресурсу обмоток силового масляного трансформатора	8
1.2 Постановка задачі дослідження.....	11
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА.....	13
2.1 Розробка математичної моделі для визначення залишкового ресурсу обмоток трансформатора.....	13
2.2 Дослідження впливу зміни значень параметрів математичної моделі на відносне зношення ізоляції обмоток	16
2.3 Дослідження впливу зміни вологості твердої ізоляції обмотки на її відносне зношення	22
2.4 Дослідження впливу кислот в маслі на відносне зношення обмотки	24
2.5 Дослідження впливу кисню в маслі на відносне зношення обмотки	26
2.6 Дослідження впливу температури зовнішнього середовища на відносне зношення обмотки.....	28
2.7 Дослідження впливу одночасної зміни значень всіх параметрів на відносне зношення обмотки.....	29
3 СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	32
3.1 Вихідні передумови синтезу	32
3.2 Синтез блоку обробки інформації	32
3.3 Синтез структури пристрою.....	39
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	55
4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту	56

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць	56
4.1.2 Електробезпека.....	57
4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	59
4.2.1 Мікроклімат	59
4.2.2 Склад повітря робочої зони	60
4.2.3 Виробниче освітлення	61
4.2.4 Виробничий шум.....	63
4.2.5 Виробничі вібрації	64
4.2.6 Психофізіологічні фактори	65
4.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи системи електропривода в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій	67
4.3.1 Дослідження стійкості роботи системи електропривода в умовах дії іонізуючого випромінювання	68
4.3.2 Дослідження стійкості роботи системи електропривода в умовах дії електромагнітного імпульсу	70
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	74
5.1 Розрахунок експлуатаційних витрат	75
5.2 Розрахунок амортизаційних відрахувань	76
5.3 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу	76
5.4 Розрахунок витрат на силову електроенергію	78
5.5 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання	79
5.6 Інші витрати.....	80
ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	84
Додаток А Технічне завдання	90
Додаток Б Ілюстративні матеріали.....	94

ВСТУП

Актуальність роботи. Відсутність фінансування енергетичної галузі в необхідному обсязі призводить до необхідності здійснювати експлуатацію силових масляних трансформаторів не за терміном їх служби, який гарантований заводом-виробником, а за технічним станом. За таких умов важливим фактором є забезпечення надійності функціонування силових масляних трансформаторів.

Обмотка є одним з найбільш вразливим елементом конструкції силового масляного трансформатора, який найбільш часто виходить з ладу. Це відбувається через старіння ізоляції обмотки як в стаціонарних режимах роботи, що відповідає природньому старінню, так і в режимах перевантаження та аварійних режимах, що призводить до прискореного старіння.

Реалізація такої умови можлива за рахунок визначення достовірного значення їхнього залишкового ресурсу. Розв'язання цієї задачі можливе з використанням засобів діагностування.

Найбільш ефективними є саме ті, що дозволяють визначати залишковий ресурс силового масляного трансформатора в процесі його експлуатації.

А тому тема роботи є актуальною.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення надійності роботи силового масляного трансформатора за рахунок визначення залишкового ресурсу його обмоток.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- 1) проаналізувати методи та способи визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора;
- 2) розробити математичну модель для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора;
- 3) синтезувати структуру пристрою для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора.

Розв'язанню поставлених задач присвячена дана магістерська кваліфікаційна робота.

Об'єктом дослідження в роботі є процеси зміни технічного стану обмоток силового масляного трансформатора.

Предметом дослідження є математичні моделі та структура пристрою для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора.

Методи дослідження. Для розв'язання й аналізу поставлених задач використані методи: математичне моделювання, секвенційний апарат.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі отримано такий новий науковий результат:

– удосконалено математичну модель для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора, яка за рахунок введення додаткового коефіцієнту впливу температури зовнішнього середовища дозволяє більш точно розрахувати відносне зношення ізоляції обмотки трансформатора;

– синтезовано структуру пристрою для діагностування трансформатора, яка, на відміну від існуючих, за рахунок введення в структуру пристрою додаткових блоків та зв'язків між ними дозволяє підвищити точність його роботи. Структура пристрою враховує температуру верхніх шарів масла в баку, струм в колі вторинної обмотки, напругу, коефіцієнт потужності, температуру навколишнього середовища, тиск масла в високовольтному вводі, концентрацію газів у маслі високовольтного вводу, швидкість зростання концентрації газів у маслі високовольтного вводу, а також технічний стан пристрою регулювання напруги під навантаженням.

Практичне значення одержаних результатів. Використання одержаних результатів дозволить підвищити надійність функціонування силових масляних трансформаторів за рахунок зменшення кількості виходу їх з ладу.

Апробація результатів. Основні положення та результати, виконаних у магістерській кваліфікаційній роботі досліджень, доповідались та

обговорювались на конференціях: Science, Research, Development. Technics and technology. #16 (Наука, исследования, развитие. Техника и технология. #16) 29.04.2019 – 30.04.2019, Barcelona (Испания) та «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2019)». Крім того обговорювалися на Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт зі спеціальності «Електричні машини та апарати» (Кременчуцький національний університет імені М. Остроградського, Кременчук, 2019 рік), за результатами чого отримано диплом II ступеня (тема роботи – «Діагностування силових масляних трансформаторів»).

Публікації. Основний зміст роботи опубліковано в 2 статтях, 1 патенті України на корисну модель та 1 тезі. Подано 2 заявки на отримання патенту України на корисну модель.

Обсяг і структура магістерської кваліфікаційної роботи. Робота містить 5 розділів, висновки, перелік посилань, 2 додатки. Загальний обсяг 109 сторінок, з яких основний зміст викладений на 89 сторінках друкованого тексту, містить 24 рисунки, 16 таблиць. Перелік посилань складається з 40 найменувань.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

1.1 Аналіз причин зменшення ресурсу обмоток силового масляного трансформатора

Обмотка є одним з найбільш вразливим елементом конструкції силового масляного трансформатора, який найбільш часто виходить з ладу. Це відбувається через старіння ізоляції обмотки як в стаціонарних режимах роботи, що відповідає природньому старінню, так і в режимах перевантаження та аварійних режимах, що призводить до прискореного старіння.

В роботі [1] приводиться модель старіння ізоляції обмотки, яка представлена на рисунку 1.1.

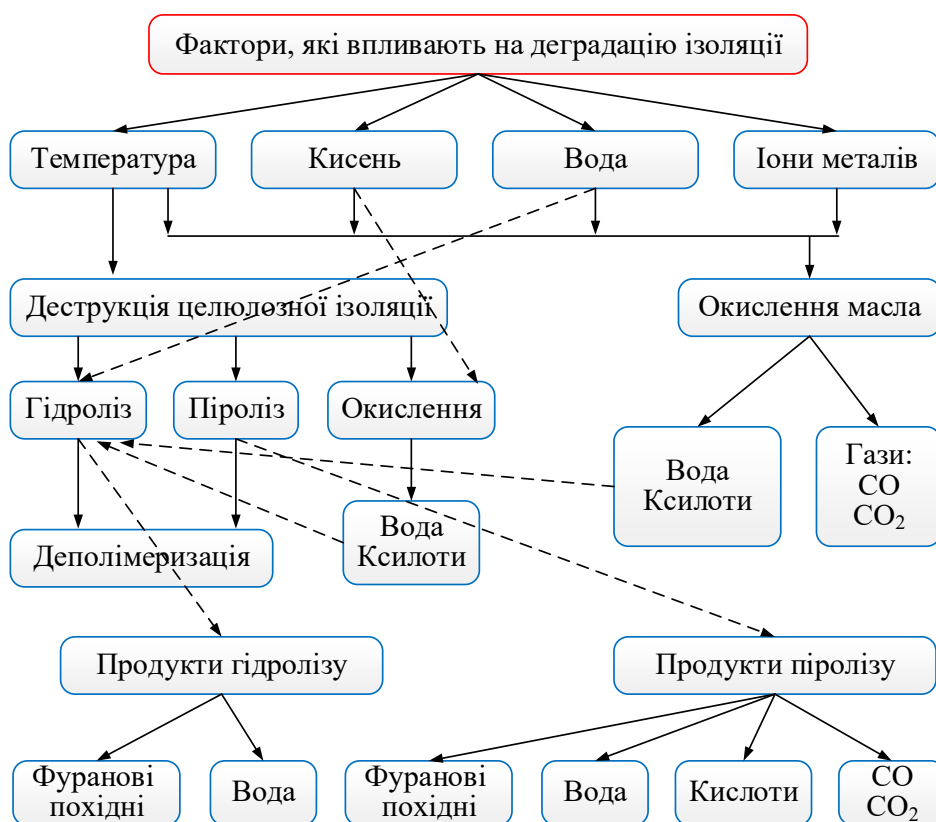


Рисунок 1.1 – Модель старіння ізоляції обмотки

Відповідно до [1] старіння ізоляції включає деструкцію целюлози в результаті:

- піролізу (термічного розкладання);
- гідролізу (розкладання внаслідок обмінної реакції з водою);
- окислення (під впливом кислот, кисню та ін.).

Деполімеризація целюлози утворюється за рахунок її гідролізу та піролізу. Це призводить до утворення фуранових похідних, які розчиняються в маслі і використовуються для оцінки можливого зниження степені полімеризації. Обидва механізми утворюють воду. Піроліз целюлози викликає також виділення кислот і характерних газів CO та CO₂. Останні використовуються для виявлення перегріву ізоляції [1].

Основними факторами прискореного старіння ізоляції є [1]:

- підвищена температура;
- підвищена вологість виткової ізоляції;
- кисень;
- продукти старіння масла.

В роботі [2] до цих факторів додають ще температуру зовнішнього середовища.

Істотним фактором окислення масла навіть при невеликому вмісті кисню є підвищений вміст в маслі металів.

Основною задачею при старінні ізоляції обмотки є пошук найбільш нагрітої її точки [3].

В роботах [4], [5] для визначення залишкового ресурсу ізоляції силового трансформатора запропоновано враховувати індивідуальні особливості його життєвого циклу.

В роботі [6] запропоновано схему класифікації показників діагностування паперово-масляної ізоляції силових трансформаторів (рисунок 1.2).

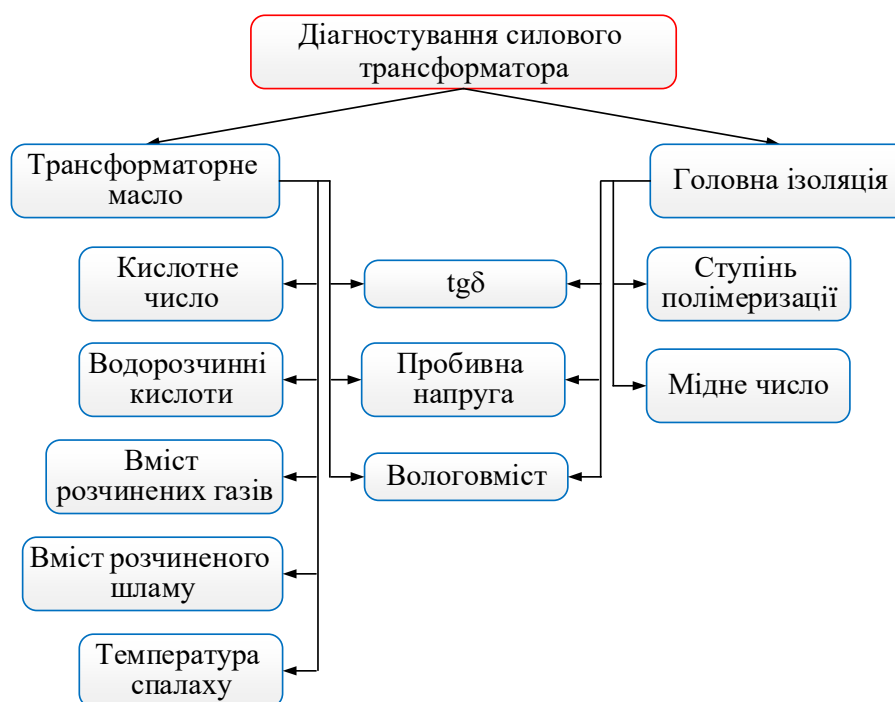


Рисунок 1.2 – Класифікація показників діагностування паперово-масляної ізоляції силових трансформаторів

В роботі [7] встановлено, що більшість силових трансформаторів після закінчення нормативного терміну служби ще зберігає свою працездатність. Але при цьому повинні дотримуватися допустимі навантажувальні режими та своєчасне проведення випробувань.

В роботі [8] стверджується, що для визначення залишкового ресурсу ізоляції обмоток трансформатора потрібно мати статистичну базу даних про вичерпання ресурсу за рік.

Головними факторами для забезпечення збереженості твердої ізоляції є контроль вмісту її вологи, наявності розчинених в маслі кислот, а також підвищеної концентрації кисню в ньому [9].

Встановлено в роботі [10], що на нагрівання ізоляції обмоток впливає також і якість електроенергії, що споживається з мережі.

В роботі [11] запропоновано для оцінки залишкового ресурсу використовувати стохастичні моделі процесів у трансформаторі.

Часто для визначення залишкового ресурсу використовують генетичні алгоритми [12], [13] та нечіткі моделі [14] – [18].

Нерідко зустрічається використання хроматографічного аналізу розчинених газів в маслі [19].

Основні причини виходу з ладу трансформатора та її причини, а також оцінка залишкового трансформатора приведені в роботі [20].

Оцінка ефективності методів та засобів діагностування силового обладнання енергосистем приведено в роботі [21].

Одним із способів діагностування обмоток трансформаторів є визначення впливу на них електродинамічних зусиль, що дозволяє визначити їх деформацію [22] – [27].

Пошкодження в трансформаторних обмотках можна визначити й шляхом відслідковування зміни індуктивного опору трансформатора [28].

Сьогодні все більше використовується систем безперервного контролю технічного стану силового трансформатора, в тому числі й неперервного контролю його ізоляції [29] – [34].

1.2 Постановка задачі дослідження

Здійснивши аналіз причин зменшення ресурсу обмоток силового масляного трансформатора, можна стверджувати, що основними з них є (рисунок 1.3):

- вологість;
- наявність кислот в маслі;
- підвищена концентрація кисню в маслі;
- температура навколишнього середовища.

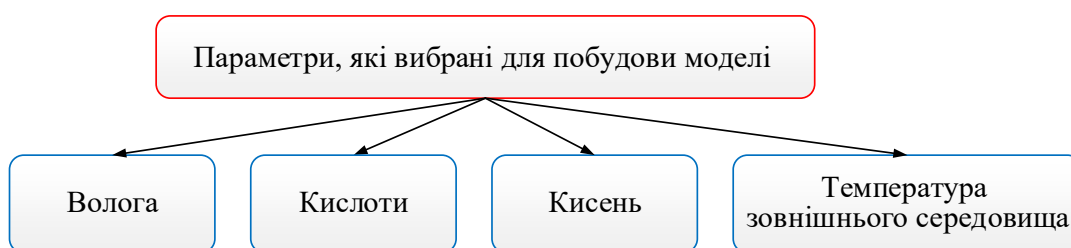


Рисунок 1.3 – Параметри, які вибрані для побудови математичної моделі

Останній показник суттєвий особливо тоді, коли трансформатор або знаходиться під безпосереднім потраплянням на нього сонячних променів, або ж коли на нього діють інші джерела теплової енергії. Як перша, так і друга причина призводить до додаткового нагрівання баку трансформатора, а як наслідок, – і масла в баку, і самих обмоток.

Тому необхідно розробити математичну модель, яка б дозволила визначати залишковий ресурс обмоток силового масляного трансформатора з врахуванням обраних показників.

Другою задачею дослідження є синтез структури пристрою для визначення залишкового ресурсу силового масляного трансформатора з врахуванням запропонованої математичної моделі.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

2.1 Розробка математичної моделі для визначення залишкового ресурсу обмоток трансформатора

Як відомо, на швидкість зношення ізоляції обмоток трансформатора впливають вологість твердої ізоляції, кислотного числа масла в баку трансформатора та концентрації кисню, розчиненого в маслі.

В кислому розчині целюлоза може бути повністю розкладена на глюкозу при високій концентрації кислоти достатньо швидко (біля доби). Наявність кисню необхідна для деструкції целюлози, без якої вона стійка до деградації до високих температур 120°C...150°C. Збільшення вологості призводить до збільшення швидкості деполімеризації паперової ізоляції в десятки разів.

На термічне зношення ізоляції, крім струмів, які протікають по обмотці, впливає й температура зовнішнього середовища, яка додатково «підігріває» масло в баку.

Оцінку термічного зношення ізоляції обмотки трансформатора можна здійснити з використанням формули Монтзінгера. Виходячи з неї, відносно зношення ізоляції для інтервалу часу $(t_0, t_0 + T)$ має вигляд [1]:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta}\right)} dt, \quad (2.1)$$

де t_0 – початок відліку;

T – тривалість зношення ізоляції;

Θ_h – температура найбільш нагрітої точки обмотки, °C (приймаємо $\Theta_h = 104^\circ\text{C}$);

Δ – інтервал температур Θ_h , на якому відбувається подвійне зношення ізоляції ($\Delta = 6^\circ\text{C}$ – для міжнародного стандарту ІЕС 60076-7; ($\Delta = 7^\circ\text{C}$ – для російського стандарту).

Але якщо врахувати вплив на зношення ізоляції обмотки вказані вище параметри, то формула (2.1) трансформується до вигляду:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[V(K_{\text{вол}}, K_{\text{кисл}}, K_{O_2}, K_{\text{зовн},t}) \cdot e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta} \right)} \right] dt, \quad (2.2)$$

де V – швидкість відносного зношення ізоляції, в.о.;

$K_{\text{вол}}, K_{\text{кисл}}, K_{O_2}, K_{\text{зовн},t}$ – коефіцієнти впливу вологи, розчинених кислот, кисню та температури зовнішнього середовища, відповідно, в.о.

Швидкість відносного зношення ізоляції можна представити як

$$V = K_{\text{вол}} \cdot K_{\text{кисл}} \cdot K_{O_2} \cdot K_{\text{зовн},t}. \quad (2.3)$$

Коефіцієнт впливу вологи можна представити як

$$K_{\text{вол}} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{\text{вол}} \leq C_{\text{вол.баз}}; \\ \left(\frac{C_{\text{вол}}}{C_{\text{вол.баз}}} \right)^\alpha, & \text{якщо } C_{\text{вол}} > C_{\text{вол.баз}}, \end{cases} \quad (2.4)$$

де $C_{\text{вол}}$ – вміст вологості твердої ізоляції, %;

$C_{\text{вол.баз}}$ – базове значення вмісту вологості твердої ізоляції, % (приймаємо

$C_{\text{вол.баз}} = 0,3\%$ для «сухої ізоляції» і температурі 98°C);

α – показник ($\alpha = 1,493$).

Коефіцієнт впливу кислотного числа можна представити як

$$K_{\text{кисл}} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{\text{кисл}} \leq C_{\text{кисл.баз}}; \\ \left(\frac{C_{\text{кисл}}}{C_{\text{кисл.баз}}} \right)^\beta, & \text{якщо } C_{\text{кисл}} > C_{\text{кисл.баз}}, \end{cases} \quad (2.5)$$

де $C_{\text{кисл}}$ – вміст кислот в маслі, мг КОН/г;

$C_{\text{кисл.баз}}$ – базове значення вмісту кислот в маслі, г/т (приймаємо в першому наближенні $C_{\text{кисл.баз}} = 0,01$ мг КОН/г);

β – показник ($\beta = 2,05$).

Коефіцієнт впливу вмісту кисню в маслі можна представити як

$$K_{O_2} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{O_2} \leq C_{O_2.баз}; \\ \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.баз}} \right)^\gamma, & \text{якщо } C_{O_2} > C_{O_2.баз}, \end{cases} \quad (2.6)$$

де C_{O_2} – вміст кисню в маслі, мг КОН/г;

$C_{O_2.баз}$ – базове значення вмісту кисню в маслі, г/т (приймаємо в першому наближенні $C_{O_2.b} = 0,1$ мг КОН/г);

γ – показник ($\gamma = 2,05$).

Коефіцієнт впливу зовнішньої температури можна представити як

$$K_{зовн,t} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{зовн,t} \leq C_{зовн,t,баз}; \\ \left(\frac{C_{зовн,t}}{C_{зовн,t,баз}} \right)^\nu, & \text{якщо } C_{зовн,t} > C_{зовн,t,баз}, \end{cases} \quad (2.7)$$

де $C_{зовн,t}$ – температура зовнішнього середовища, °С;

$C_{зовн,t,баз}$ – базове значення зовнішньої температури, °С (приймаємо в першому наближенні $C_{зовн,t,баз} = 24^\circ\text{С}$);

ν – показник (приймаємо $\nu = 1,2$).

Тоді швидкість відносного зношення ізоляції можна записати як

$$V = \left(\frac{C_{вол}}{C_{вол.баз}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{C_{кисл}}{C_{кисл.баз}} \right)^\beta \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.баз}} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{C_{зовн,t}}{C_{зовн,t,баз}} \right)^\nu. \quad (2.8)$$

З врахуванням викладено формула Монтзінгера (2.1) трансформується до вигляду:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[\left(\frac{C_{вол}}{C_{вол.баз}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{C_{кисл}}{C_{кисл.баз}} \right)^\beta \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.баз}} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{C_{зовн,t}}{C_{зовн.t,баз}} \right)^\nu \times e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta} \right)} \right] dt. \quad (2.9)$$

Виходячи з міркувань, що параметри $C_{вол}$, $C_{кисл}$, C_{O_2} , та $C_{зовн,t}$ змінюються в часі доволі повільно, то можна винести за знак інтеграла і перезаписати формулу (2.9) до вигляду:

$$L(t_0, t_0 + T) = \left(\frac{C_{вол}}{C_{вол.баз}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{C_{кисл}}{C_{кисл.баз}} \right)^\beta \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.баз}} \right)^\gamma \cdot \left(\frac{C_{зовн,t}}{C_{зовн.t,баз}} \right)^\nu \times \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta} \right)} \right] dt. \quad (2.10)$$

2.2 Дослідження впливу зміни значень параметрів математичної моделі на відносне зношення ізоляції обмоток

Дослідимо вплив вмісту вологості твердої ізоляції $C_{вол}$ на відповідний коефіцієнт впливу $K_{вол}$ відповідно до виразу (2.4) з використанням програми Mathcad (рисунок 2.1).

$$C_{вол} := 0.01, 0.1..1$$

$$K_{вол}(C_{вол}) := \begin{cases} 1 & \text{if } C_{вол} \leq C_{вол_баз} \\ \left(\frac{C_{вол}}{C_{вол_баз}} \right)^\alpha & \text{if } C_{вол} > C_{вол_баз} \end{cases}$$

Рисунок 2.1 – Розрахунок коефіцієнт впливу $K_{вол}$

Динаміка зміну коефіцієнт впливу $K_{вол}$ при зміні вмісту вологості твердої ізоляції $C_{вол}$ подана на рисунку 2.2.

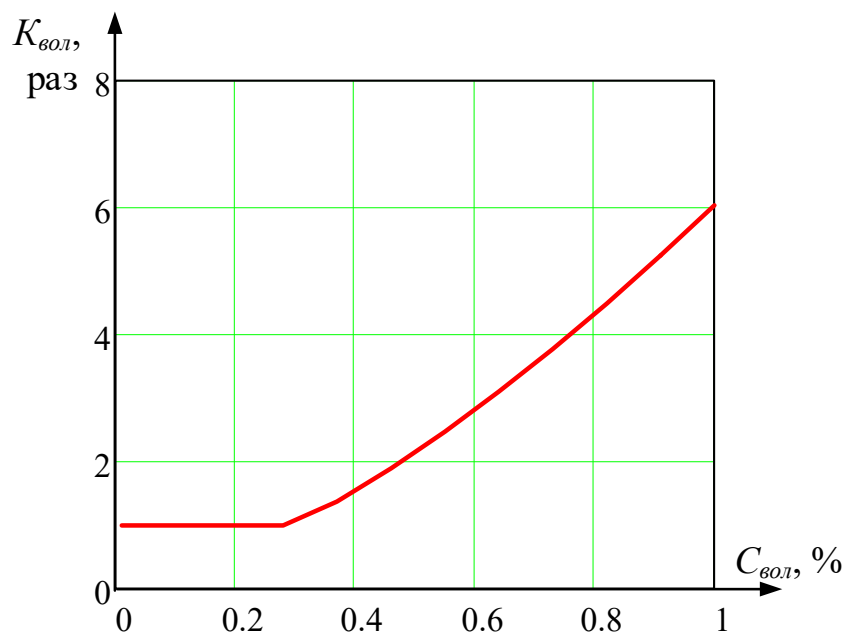


Рисунок 2.2 – Динаміка зміну коефіцієнт впливу $K_{вол}$ при зміні вмісту вологості твердої ізоляції $C_{вол}$

Дослідимо вплив вмісту кислот $C_{кисл}$ в маслі на відповідний коефіцієнт впливу $K_{кисл}$ відповідно до виразу (2.5) з використанням програми Mathcad (рисунок 2.3).

$$C_{кисл} := 0.001, 0.01 \dots 0.05$$

$$K_{кисл}(C_{кисл}) := \begin{cases} 1 & \text{if } C_{кисл} \leq C_{кисл_баз} \\ \left(\frac{C_{кисл}}{C_{кисл_баз}} \right)^\beta & \text{if } C_{кисл} > C_{кисл_баз} \end{cases}$$

Рисунок 2.3 – Розрахунок коефіцієнт впливу $K_{кисл}$

Динаміка зміну коефіцієнт впливу $K_{кисл}$ при зміні вмісту кислотності $C_{кисл}$ в маслі подана на рисунку 2.4.

Дослідимо вплив вмісту кисню C_{O_2} на відповідний коефіцієнт впливу K_{CO_2} відповідно до виразу (2.6) з використанням програми Mathcad (рисунок 2.5).

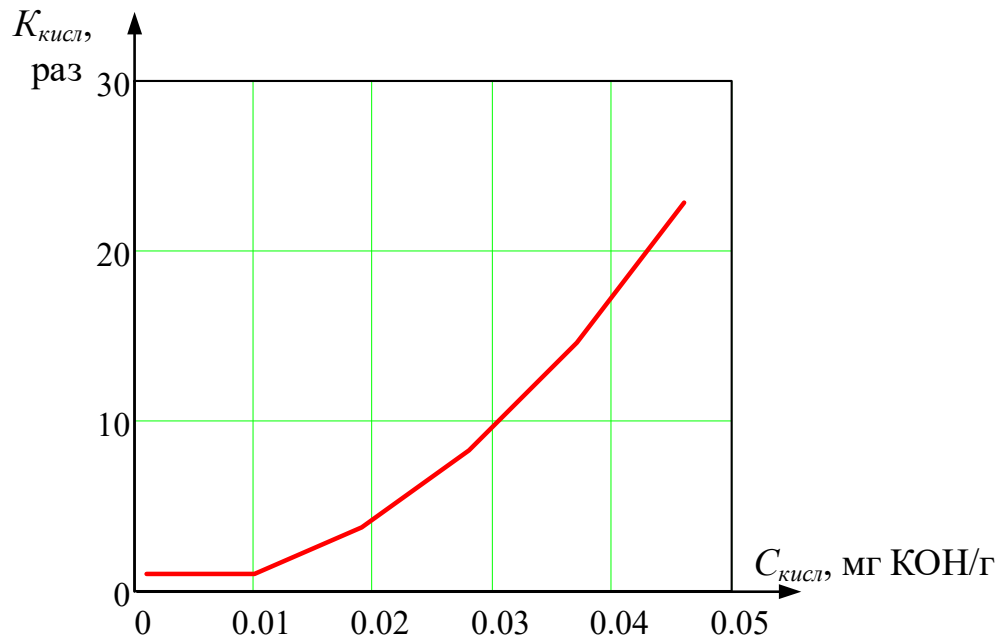


Рисунок 2.4 – Динаміка зміну коефіцієнт впливу $K_{\text{кисл}}$ при зміні вмісту кислот в маслі $C_{\text{вол}}$

$$C_{O_2} := 0.01, 0.015 \dots 0.5$$

$$K_{O_2}(C_{O_2}) := \begin{cases} 1 & \text{if } C_{O_2} \leq C_{O_2_баз} \\ \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2_баз}} \right)^\gamma & \text{if } C_{O_2} > C_{O_2_баз} \end{cases}$$

Рисунок 2.5 – Розрахунок коефіцієнт впливу K_{CO_2}

Динаміка зміну коефіцієнт впливу K_{CO_2} при зміні вмісту кисню C_{O_2} в маслі подана на рисунку 2.6.

Дослідимо вплив зовнішньої температури $C_{зовн.t}$ на відповідний коефіцієнт впливу $K_{зовн.t}$ відповідно до виразу (2.7) з використанням програми Mathcad (рисунок 2.7).

Динаміка зміну коефіцієнт впливу $K_{зовн.t}$ при зміні зовнішньої температури $C_{зовн.t}$ подана на рисунку 2.8.

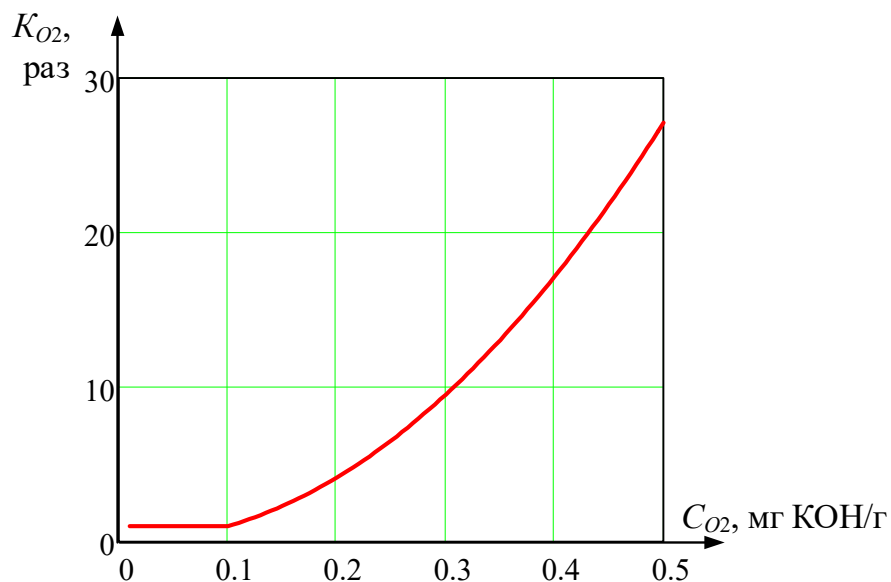


Рисунок 2.6 – Динаміка зміну коефіцієнт впливу K_{CO_2} при зміні вмісту кисню C_{O_2} в маслі

$$C_{зovн.t} := -20, 0.1.. 50$$

$$K_{зovн.t}(C_{зovн.t}) := \begin{cases} 1 & \text{if } C_{зovн.t} \leq C_{зovн.t_баз} \\ \left(\frac{C_{зovн.t}}{C_{зovн.t_баз}} \right)^{\nu} & \text{if } C_{зovн.t} > C_{зovн.t_баз} \end{cases}$$

Рисунок 2.7 – Розрахунок коефіцієнт впливу $K_{зovн.t}$

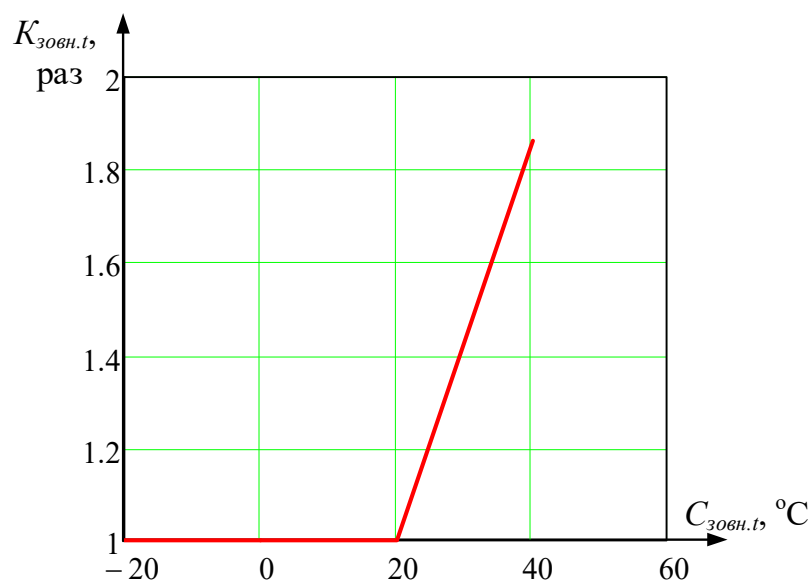


Рисунок 2.6 – Динаміка зміну коефіцієнт впливу $K_{зovн.t}$ при зміні зовнішньої температури $C_{зovн.t}$

Дослідимо вплив кожного з коефіцієнтів $K_{вол}$, $K_{кисл}$, K_{O_2} , $K_{зовн,t}$ на швидкість зменшення терміну служби ізоляції. Результати подані на рисунку 2.7 – рисунку 2.10.

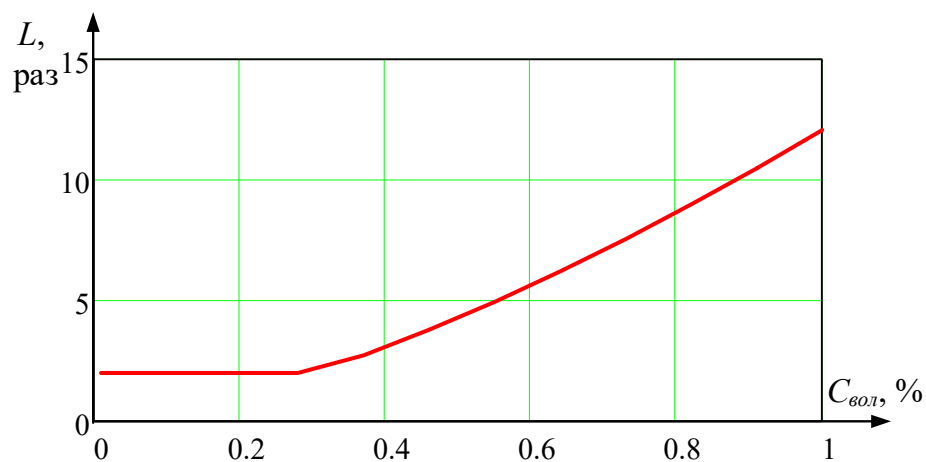


Рисунок 2.7 – Відносне зношення ізоляції при зміні вмісту вологості твердої ізоляції

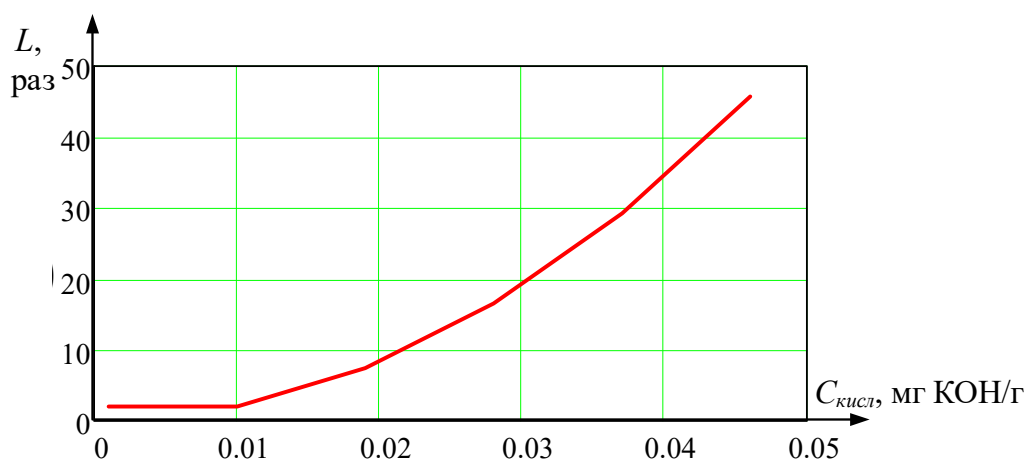


Рисунок 2.8 – Відносне зношення ізоляції при зміні вмісту кислот в маслі

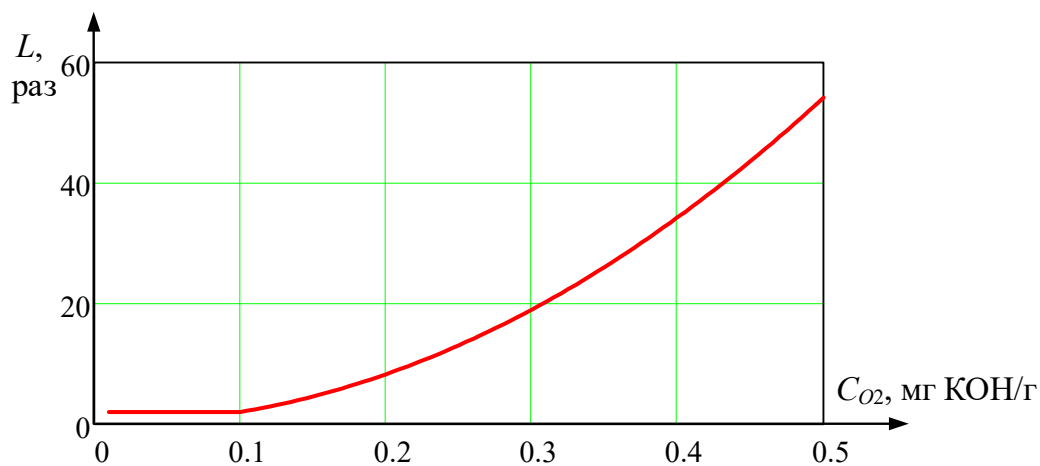


Рисунок 2.9 – Відносне зношення ізоляції при зміні вмісту кисню в маслі

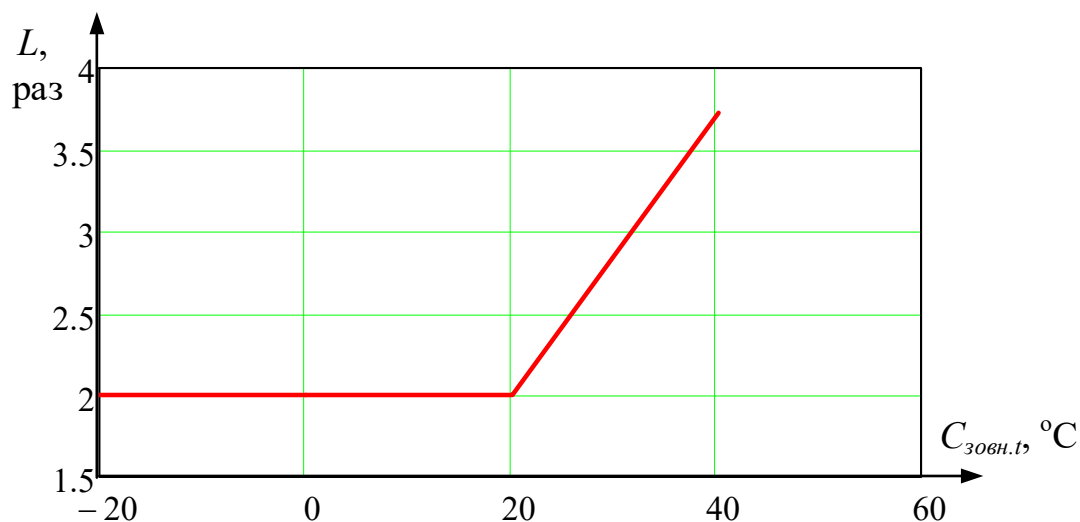


Рисунок 2.10 – Відносне зношення ізоляції при зміні зовнішньої температури

Якщо у вираз (2.10) покласти поточні значення вмісту вологості твердої ізоляції $C_{вол} = C_{вол.баз}$, вмісту кисню в маслі $C_{O_2} = C_{O_2.баз}$, вмісту кислот в маслі $C_{кисл} = C_{кисл.баз}$ та температуру зовнішнього середовища $C_{зovн.т} = C_{зovн.т.баз}$, то динаміка зміни відносного зношення ізоляції при таких значеннях при зміні температури обмотки буде мати вигляд, показаний на рисунку 2.11.

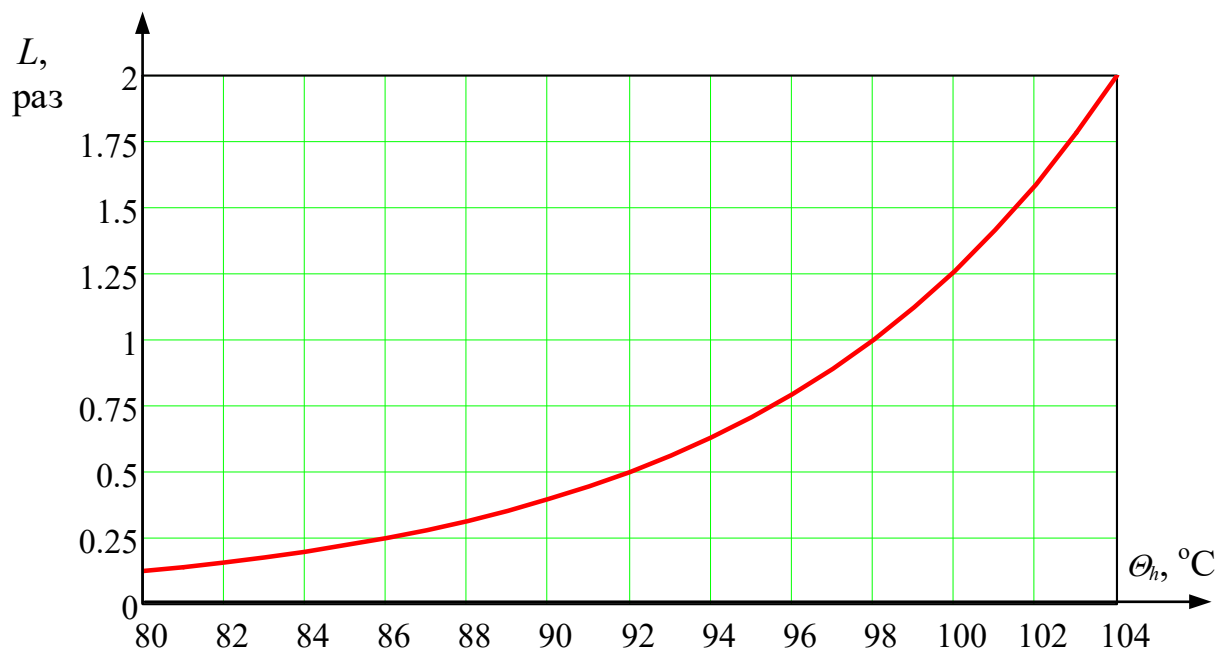


Рисунок 2.11 – Залежність відносного зношення ізоляції при базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{O_2.баз}$ та $C_{зovн.т.баз}$ від температури обмотки

2.3 Дослідження впливу зміни вологості твердої ізоляції обмотки на її відносне зношення

Дослідимо зміну відносного зношення ізоляції при зміні вологості твердої ізоляції обмотки $C_{вол}$ та базових значеннях кислот в маслі $C_{кисл.баз}$, кисню в маслі $C_{O_2.баз}$ та зовнішньої температури $C_{зовн.т.баз}$.

Результати розрахунків збільшенні вологості приведені в таблиці 2.1 та на рисунку 2.12 й рисунку 2.13.

Таблиця 2.1 – Параметри відносного зношення ізоляції при зміні $C_{вол}$ та базових значеннях $C_{кисл.баз}$, $C_{O_2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$

Зміна $C_{вол}$		$K_{вол}$, %	$L(90^{\circ}C)$, %	$L(100^{\circ}C)$, %	$L(104^{\circ}C)$, %
$C_{вол.баз}$, %	0,3	1	0,4	1,26	2
$1,2C_{вол.баз}$, %	0,36	1,31	0,52	1,65	2,63
$1,4C_{вол.баз}$, %	0,42	1,65	0,66	2,08	3,31
$1,6C_{вол.баз}$, %	0,48	2,02	0,8	2,54	4,03
$1,8C_{вол.баз}$, %	0,54	2,41	0,95	3,03	4,81
$2C_{вол.баз}$, %	0,6	2,82	1,12	3,55	5,63
$3,3C_{вол.баз}$, %	1	6,03	2,39	7,59	12,05
$6,7C_{вол.баз}$, %	2	17,11	6,79	21,56	34,23
$10C_{вол.баз}$, %	3	31,12	12,35	39,21	62,23
$13,3C_{вол.баз}$, %	4	47,63	18,9	60,01	95,27
$16,7C_{вол.баз}$, %	5	69,91	26,56	84,31	133,83

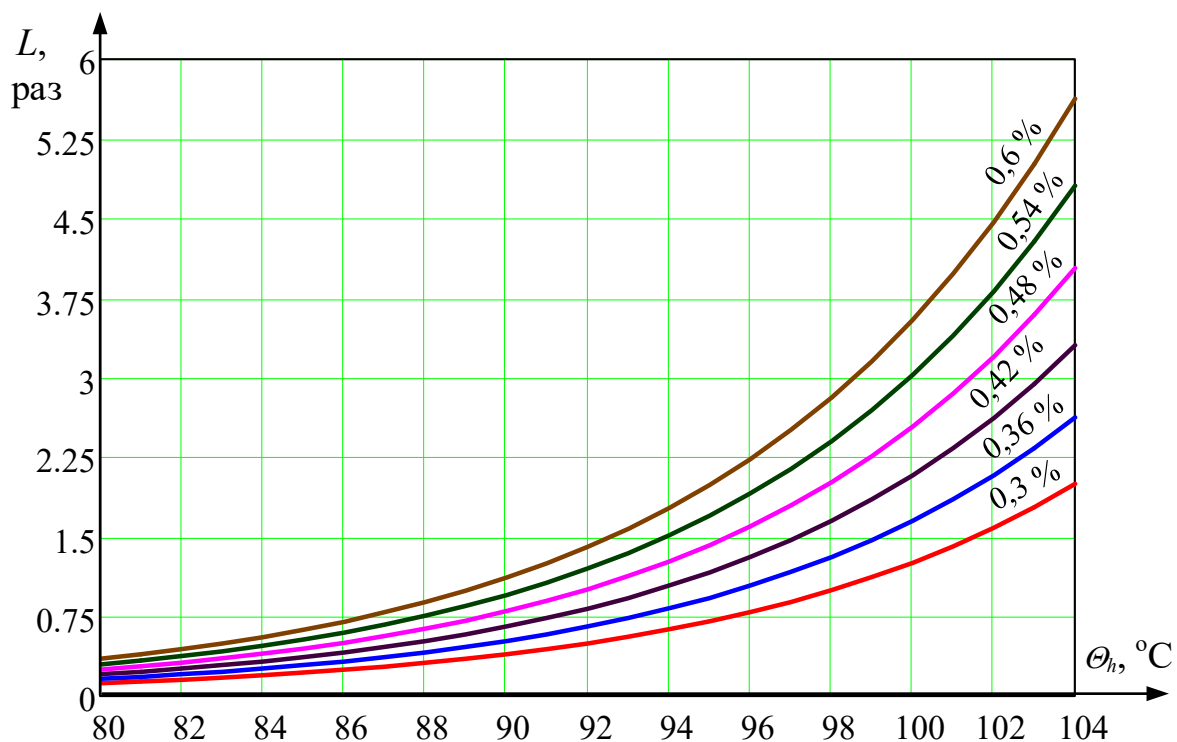


Рисунок 2.12 – Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{вол}$ від $C_{вол.баз}$ до $2C_{вол.баз}$ та базових значеннях $C_{кисл.баз}$, $C_{O_2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

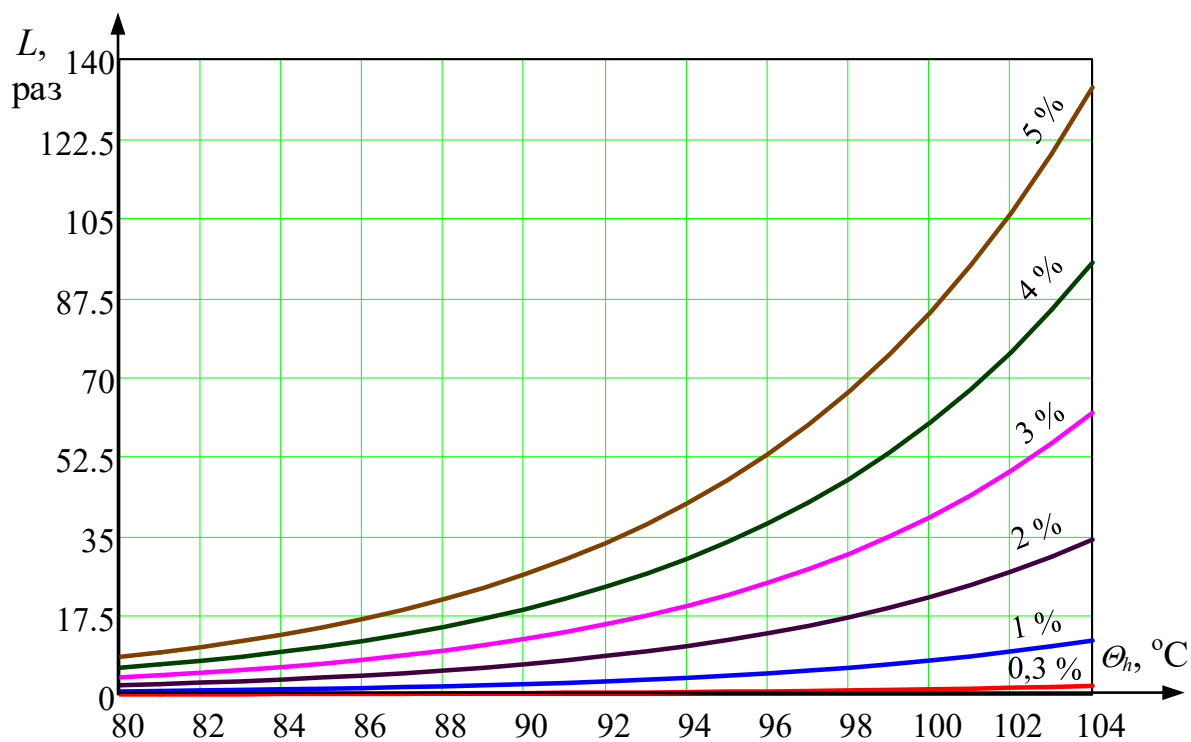


Рисунок 2.13 – Залежність відносного зношення ізоляції при збільшенні $C_{вол}$ до 5% від $C_{вол.баз}$ та базових значеннях $C_{кисл.баз}$, $C_{O_2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

Проаналізувавши отримані результати, можна стверджувати, що при збільшенні вологості в ізоляції в 2 рази при незмінних інших параметрах коефіцієнт впливу вологи зростає в 2,82 разів, а при збільшенні до 5% (16,7 разів) – в 69,91 разів, а це означає, що в стільки ж разів швидше відбувається відносне зношення ізоляції.

2.4 Дослідження впливу кислот в маслі на відносне зношення обмотки

Дослідимо зміну відносного зношення ізоляції при зміні кислот в маслі $C_{\text{кисл}}$ та базових значеннях вологості твердої ізоляції обмотки $C_{\text{вол.баз}}$, кисню в маслі $C_{\text{O}_2.\text{баз}}$ та зовнішньої температури $C_{\text{зовн.т.баз}}$. Результати розрахунків приведені в таблиці 2.2 та на рисунку 2.14 й рисунку 2.15.

Таблиця 2.2 – Параметри відносного зношення ізоляції при зміні $C_{\text{кисл}}$ та базових значеннях $C_{\text{вол.баз}}$, $C_{\text{O}_2.\text{баз}}$, $C_{\text{зовн.т.баз}}$

Зміна $C_{\text{кисл}}$		$K_{\text{кисл}}, \%$	$L(90^\circ\text{C}), \%$	$L(100^\circ\text{C}), \%$	$L(104^\circ\text{C}), \%$
$C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,01	1	0,4	1,26	2
$1,2C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,012	1,45	0,58	1,831	2,906
$1,4C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,014	1,99	0,79	2,511	3,987
$1,6C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,016	2,62	1,04	3,302	5,242
$1,8C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,018	3,34	1,32	4,204	6,673
$2C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,02	4,14	1,64	5,217	8,282
$3C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,03	9,51	3,77	11,98	19,02
$6C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,06	39,37	15,63	49,61	78,75
$9C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,09	90,41	35,88	113,9	180,81
$12C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,12	163,05	64,71	205,43	326,1
$15C_{\text{кисл.баз}}, \%$	0,15	257,62	102,24	324,59	515,25

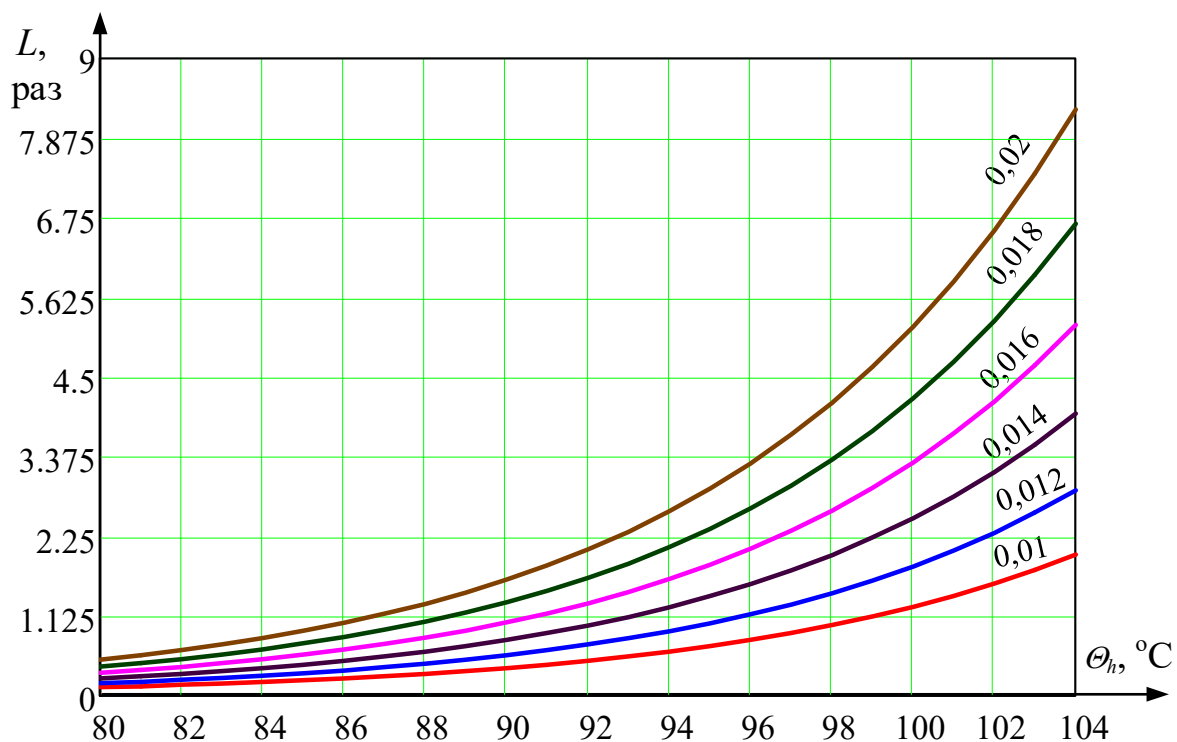


Рисунок 2.14 – Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $S_{кисл}$ від $S_{кисл.баз}$ до $2S_{кисл.баз}$ та базових значеннях $S_{вол.баз}$, $S_{O2.баз}$, $S_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

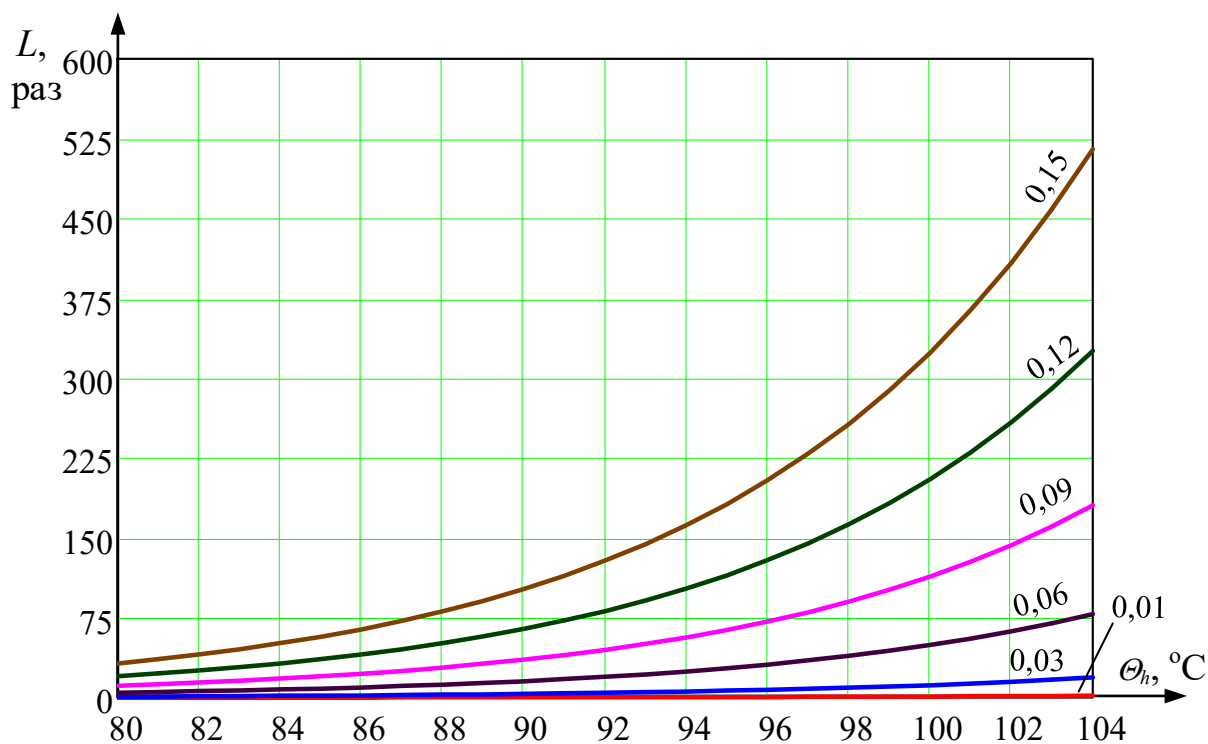


Рисунок 2.15 – Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $S_{кисл}$ від $S_{кисл.баз}$ до $15S_{кисл.баз}$ та базових значеннях $S_{вол.баз}$, $S_{O2.баз}$, $S_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

Як видно з отриманих результатів, при збільшенні кислот в маслі в 2 рази при незмінних інших параметрах коефіцієнт впливу кислот зростає в 4,14 разів, а при збільшенні в 15 разів – в 257,62 разів, а це означає, що в стільки ж разів швидше відбувається відносно зношення ізоляції.

2.5 Дослідження впливу кисню в маслі на відносне зношення обмотки

Дослідимо зміну відносного зношення ізоляції при зміні кисню в маслі C_{O_2} та базових значеннях вологості твердої ізоляції обмотки $C_{вол.баз}$, кислоти в маслі $C_{кисл.баз}$ та зовнішньої температури $C_{зовн.т.баз}$. Результати розрахунків приведені в таблиці 2.3 та на рисунку 2.16 та рисунку 2.17.

Таблиця 2.3 – Параметри відносного зношення ізоляції при зміні C_{O_2} та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$

Зміна C_{O_2}		K_{O_2} , %	$L(90^\circ C)$, %	$L(100^\circ C)$, %	$L(104^\circ C)$, %
$C_{O_2.баз}$, %	0,1	1	0,34	1,26	2
$1,2C_{O_2.баз}$, %	0,12	1,45	0,58	1,83	2,91
$1,4C_{O_2.баз}$, %	0,14	1,99	0,79	2,51	3,99
$1,6C_{O_2.баз}$, %	0,16	2,62	1,04	3,3	5,24
$1,8C_{O_2.баз}$, %	0,18	3,34	1,32	4,2	6,67
$2C_{O_2.баз}$, %	0,2	4,14	1,64	5,22	8,28
$3C_{O_2.баз}$, %	0,3	9,51	3,77	11,98	19,02
$6C_{O_2.баз}$, %	0,6	39,37	15,63	49,61	78,49
$9C_{O_2.баз}$, %	0,9	90,41	35,88	113,91	180,81
$12C_{O_2.баз}$, %	1,2	163,05	64,71	205,43	326,1
$15C_{O_2.баз}$, %	1,5	257,62	102,24	324,59	515,25

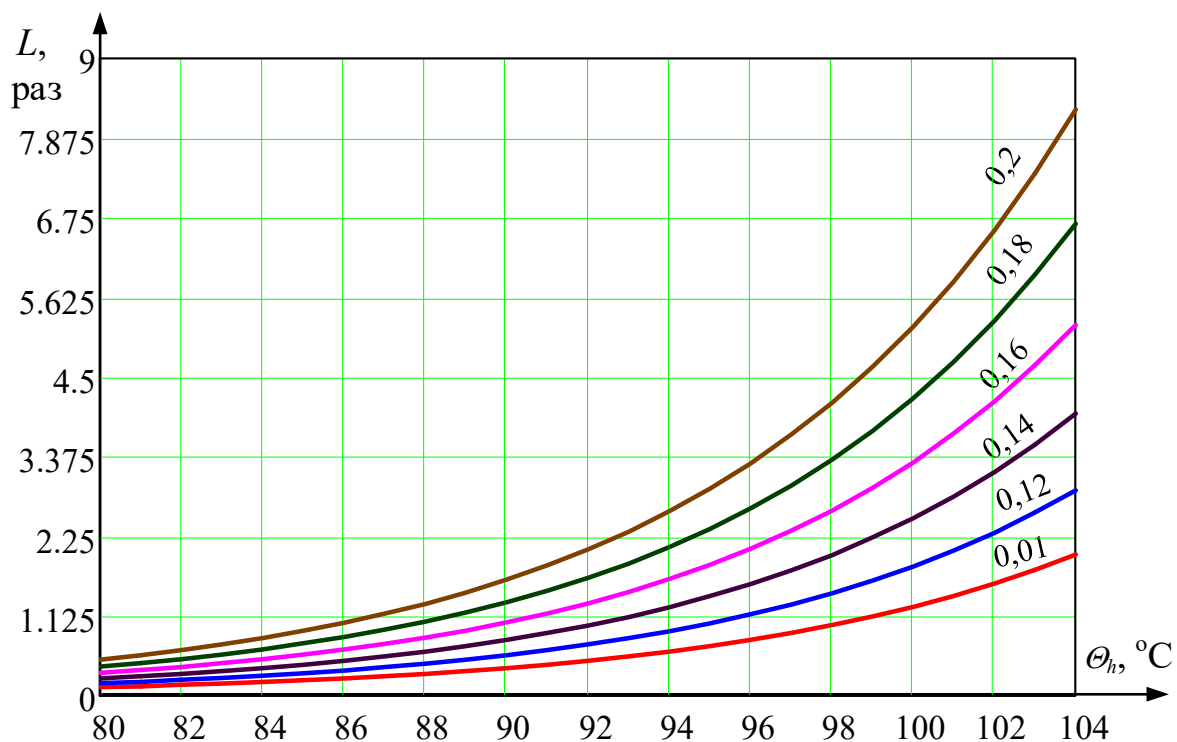


Рисунок 2.15 – Залежність відносного зношення ізоляції при зміні C_{O_2} від $C_{O_2.баз}$ до $2C_{O_2.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

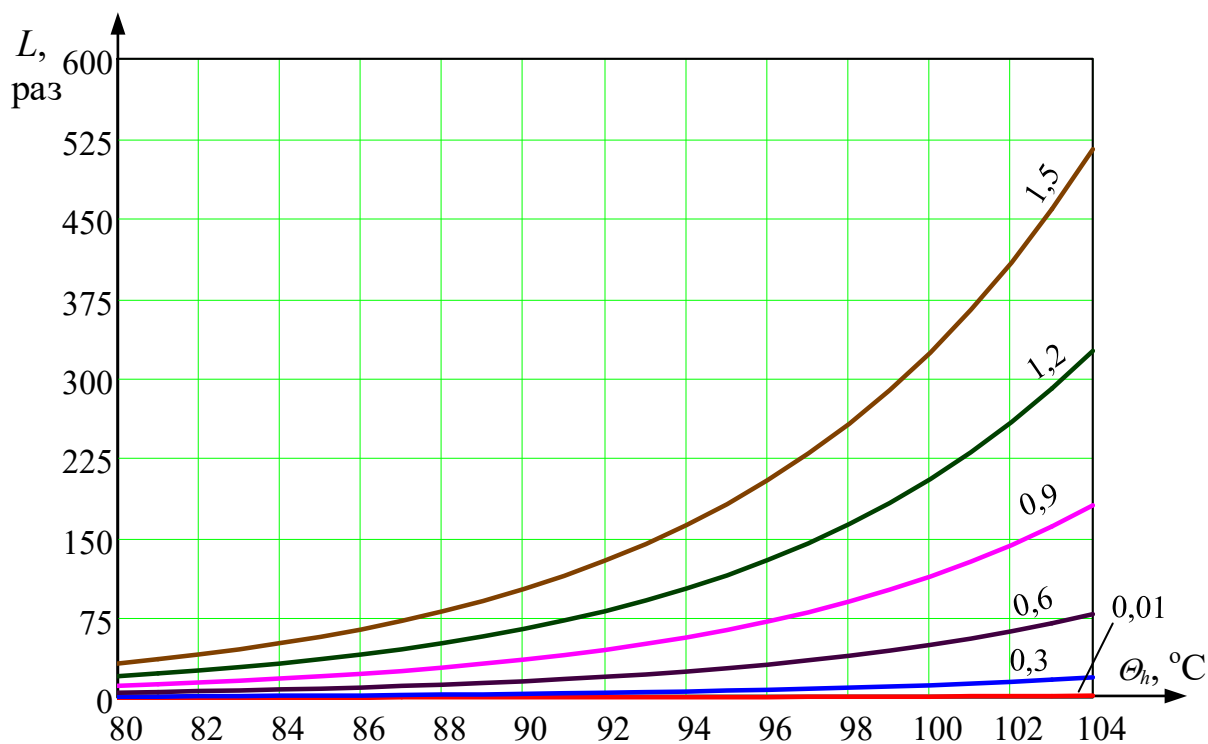


Рисунок 2.16 – Залежність відносного зношення ізоляції при збільшенні C_{O_2} від $C_{O_2.баз}$ до $15C_{O_2.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

Як видно з таблиці 2.2 та таблиці 2.3, а також з рисунку 2.13 – рисунку 2.16, вплив кислоти та кисню в маслі призводять до однакової зміни відносного зношення ізоляції обмотки. Такий результат справедливий за прийнятих базових значень кислот та кисню в маслі. За інших умов він може відрізнятись.

2.6 Дослідження впливу температури зовнішнього середовища на відносне зношення обмотки

Дослідимо зміну відносного зношення ізоляції при зміні температури зовнішнього середовища $C_{зовн.t}$ та базових значеннях вологості твердої ізоляції обмотки $C_{вол.баз}$, кислоти в маслі $C_{кисл.баз}$ та кисню в маслі $C_{O_2.баз}$. Результати розрахунків приведені в таблиці 2.4 та на рисунку 2.17.

Таблиця 2.4 – Параметри відносного зношення ізоляції при зміні $C_{зовн.t}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{O_2.баз}$

Зміна $C_{зовн.t}$		$K_{зовн.t}$, %	$L(90^\circ\text{C})$, %	$L(100^\circ\text{C})$, %	$L(104^\circ\text{C})$, %
$C_{зовн.t.баз}$, °C	24	1	0,4	1,26	2
$1,2C_{зовн.t.баз}$, °C	28,8	1,25	0,49	1,57	2,49
$1,4C_{зовн.t.баз}$, °C	33,6	1,5	0,59	1,89	3
$1,6C_{зовн.t.баз}$, °C	38,4	1,76	0,7	2,22	3,52
$1,8C_{зовн.t.баз}$, °C	43,2	2,03	0,8	2,55	4,05
$2C_{зовн.t.баз}$, °C	48	2,3	0,91	2,9	1,59
$2,2C_{зовн.t.баз}$, °C	52,8	2,58	1,02	3,25	5,15
$2,5C_{зовн.t.баз}$, °C	60	3	1,19	3,78	6,01

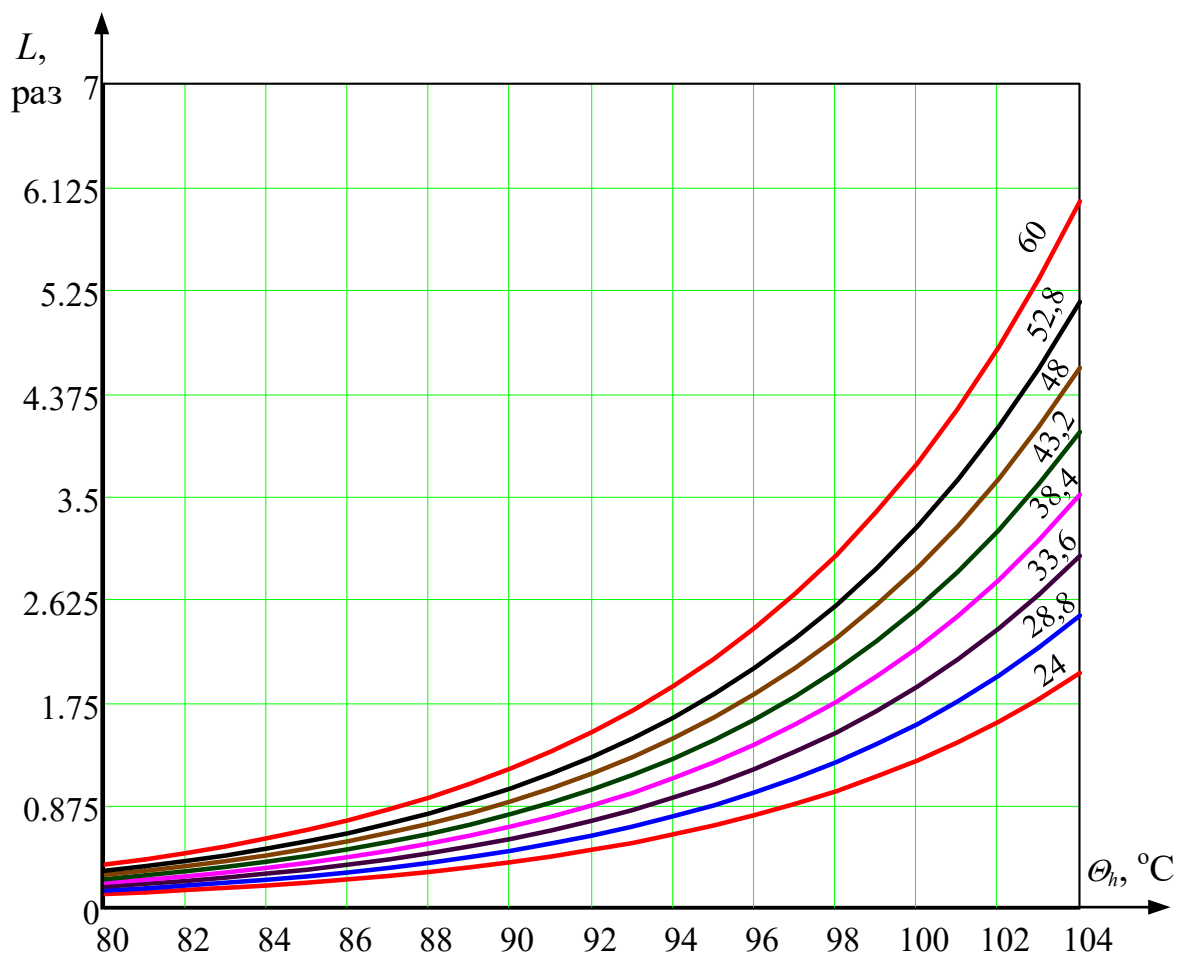


Рисунок 2.17 – Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{зовн.t}$ від $C_{зовн.t.баз}$ до $2,5C_{зовн.t.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{O_2.баз}$ від температури обмотки

Як видно з отриманих результатів, при збільшенні зовнішньої температури в 2,5 рази при незмінних інших параметрах коефіцієнт впливу зовнішньої температури збільшується в 3 рази, а це означає, що в стільки ж разів швидше відбувається відносне зношення ізоляції.

2.7 Дослідження впливу одночасної зміни значень всіх параметрів на відносне зношення обмотки

Результати розрахунків при таких змінах приведені в таблиці 2.5 та на рисунку 2.18 [35].

Таблиця 2.5 – Параметри відносного зношення ізоляції при одночасній рівномірній зміні $C_{вол}$, $C_{кисл}$, C_{O_2} та $C_{зовн.т}$

Параметр	Значення параметра, при його збільшенні на			
	15%	30%	50%	70%
$K_{вол}, \%$	1,23	1,48	1,83	2,21
$K_{кисл}, \%$	1,33	1,71	2,3	2,3
$K_{O_2}, \%$	1,33	1,71	2,3	2,3
$K_{зовн.т}, \%$	1,18	1,37	1,63	1,89
$L(90), \%$	1,03	2,36	6,24	14,59
$L(100), \%$	3,26	7,49	19,8	46,32
$L(104), \%$	5,17	11,87	31,42	73,53

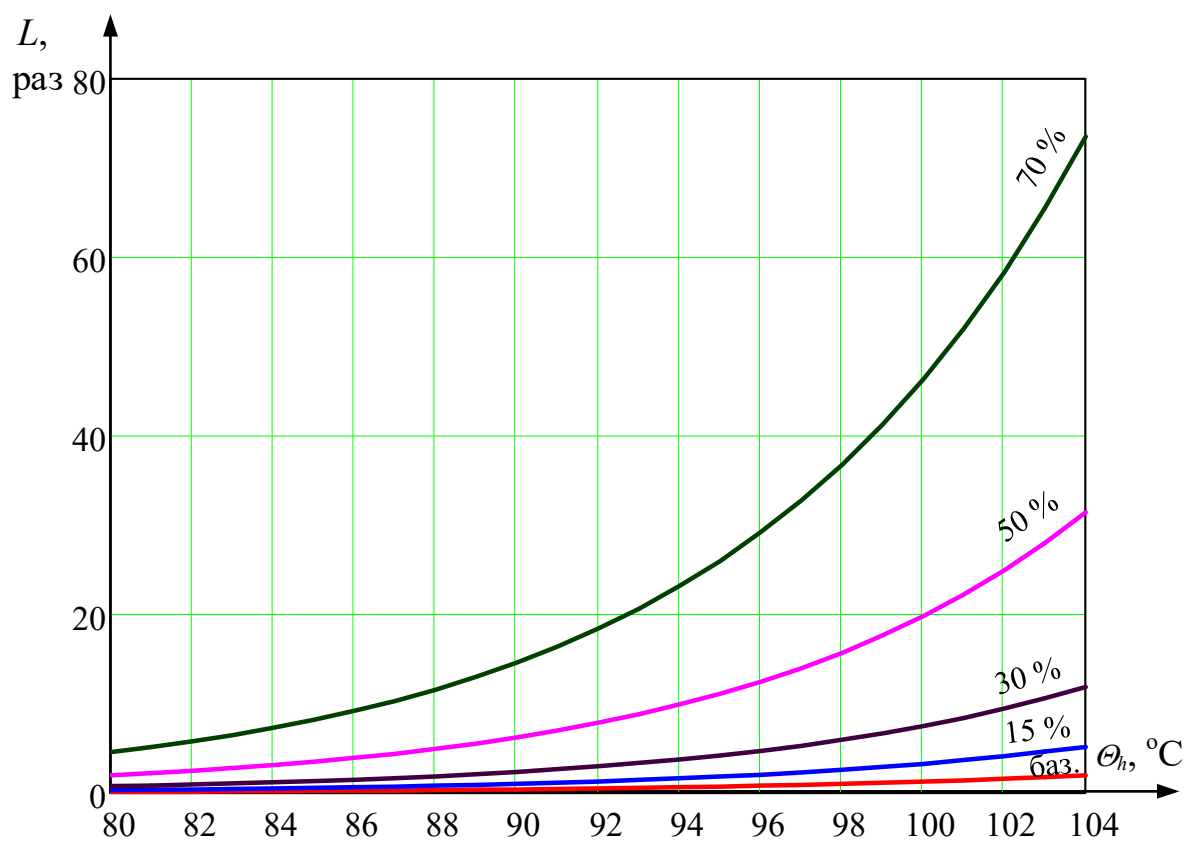


Рисунок 2.18 – Залежність відносного зношення ізоляції при одночасній рівномірній зміні на $C_{вол}$, $C_{кисл}$, C_{O_2} та $C_{зовн.т}$ від температури обмотки

Як видно з результатів дослідження, суттєве зростання вологості твердої ізоляції обмотки $C_{вол}$, кислоти в маслі $C_{кисл}$, кисню в маслі C_{O_2} та температури зовнішнього середовища $C_{зовн.t}$ призводить до швидшого зношення ізоляції обмотки трансформатора.

3 СИНТЕЗ СТРУКТУРИ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

3.1 Вихідні передумови синтезу

Для визначення ресурсу силового масляного трансформатора пропонується використати параметри, які найбільш суттєво впливають на його зміну, або ж перевищення максимально допустимих значень яких призводить до аварійних ситуацій. До таких параметрів віднесемо: температуру верхніх шарів масла в баку, струм в колі вторинної обмотки, напругу, коефіцієнт потужності, температуру навколишнього середовища, тиск масла в високовольтному вводі, концентрацію газів у маслі високовольтного вводу, швидкість зростання концентрації газів у маслі високовольтного вводу, а також технічний стан пристрою регулювання напруги під навантаженням.

Основним елементом структури пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора є блок обробки інформації. Для його синтезу скористаємося апаратом секвенцій [36] – [39].

3.2 Синтез блоку обробки інформації

Для опису роботи блоку обробки інформації введемо позначення [40]:

- 1) Z – сигнал початкового стану блока обробки інформації в момент подачі напруги живлення;
- 2) S_1, \dots, S_{36} – стани переходу блоку обробки інформації (стани, в яких він може перебувати);
- 3) N – сигнал, який відповідає спрацюванню ресурсу трансформатора під час нормального режиму його роботи;
- 4) H – сигнал, який свідчить про виникнення режиму перевантаження в процесі роботи трансформатора;
- 5) F_1, F_2, F_3, F_4 – сигнали, які характеризують перевантаження

трансформатора за першим, другим, третім та четвертим рівнями, відповідно. Зауважимо, що чим вищий рівень перевантаження трансформатора, тим більшою буде швидкість зменшення його ресурсу;

б) Y – вихідний сигнал, який характеризує нульове значення ресурсу трансформатора.

В структуру блока обробки інформації введемо:

1) тригер $T1$ – для реалізації генератора тактових імпульсів з часовими затримками τ_1 і τ_3 , яким моделюється режим перевантаження трансформатора за першим рівнем;

2) тригер $T2$ – для реалізації генератора тактових імпульсів з часовими затримками τ_1 і τ_4 , яким моделюється режим перевантаження трансформатора за другим рівнем;

3) тригер $T3$ – для реалізації генератора тактових імпульсів з часовими затримками τ_1 і τ_5 , яким моделюється режим перевантаження трансформатора за третім рівнем;

4) тригер $T4$ – для реалізації генератора тактових імпульсів з часовими затримками τ_1 і τ_6 , яким моделюється режим перевантаження трансформатора за четвертим рівнем;

5) тригер $T5$ – для реалізації генератора тактових імпульсів з часовими затримками τ_1 і τ_2 , яким моделюється режим спрацювання ресурсу ізоляції в нормальному режимі роботи;

б) тригери $T6, \dots, T9$ – для реалізації блоку підрахунку імпульсів, що надходять, з часовою затримкою τ_6, \dots, τ_9 між змінами станів тригерів для підрахунку вказаних імпульсів.

Часова затримка τ_1 характеризує тривалість імпульсу, а часові затримки $\tau_2, \tau_3, \tau_4, \tau_5, \tau_6, \tau_7, \tau_8$ та τ_9 – тривалість паузи між імпульсами.

Тривалості пауз між імпульсами відповідають умові:

$$\tau_1 \ll \tau_6 < \tau_5 < \tau_4 < \tau_3 < \tau_2. \quad (3.1)$$

Відповідно до зроблених викладок, отримано граф функціонування блока обробки інформації, поданий на рисунку 3.1.

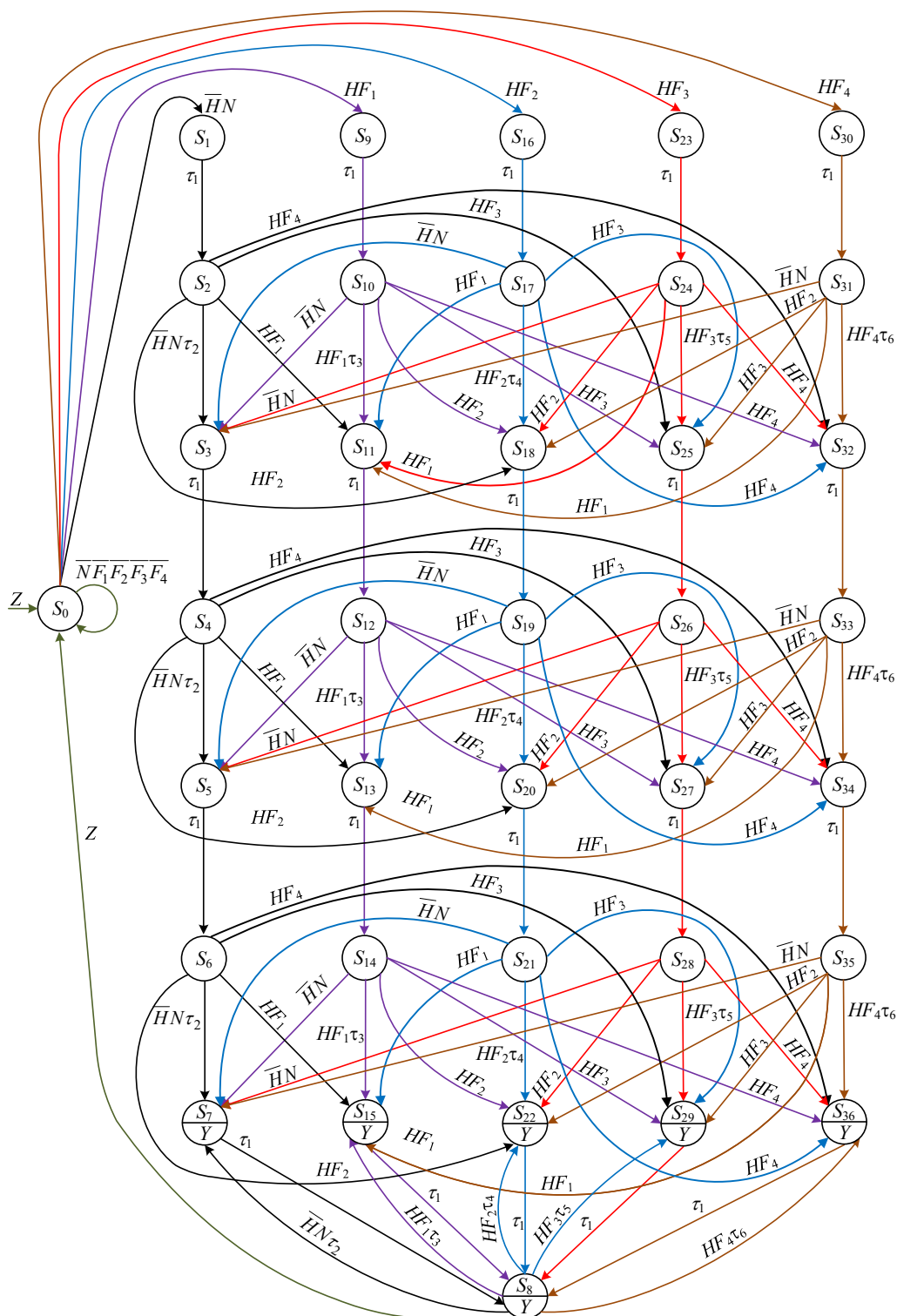


Рисунок 3.1 – Граф функціонування блока обробки інформації пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора

Аналітичний опис роботи блоку обробки інформації відповідно до графа функціонування можна представити системою секвенцій:

$$\begin{aligned}
 & ZS_0 \vdash S_0; \\
 & \overline{NF_1F_2F_3F_4}S_0 \vdash S_0; \\
 & \overline{NHS_0} \vdash S_1; \\
 & HF_1S_0 \vdash S_9; \\
 & HF_2S_0 \vdash S_{16}; \\
 & HF_3S_0 \vdash S_{23}; \\
 & HF_4S_0 \vdash S_{30}; \\
 & \tau_1S_1 \vdash S_2; \\
 & \overline{NH}\tau_2S_2 \vdash S_3; \\
 & \tau_1S_3 \vdash S_4; \\
 & \overline{NH}\tau_2S_4 \vdash S_5; \\
 & \tau_1S_5 \vdash S_6; \\
 & \overline{NH}\tau_2S_6 \vdash S_7; \\
 & \tau_1S_7 \vdash S_8; \\
 & \overline{NH}\tau_2S_8 \vdash S_7; \\
 & \tau_1S_9 \vdash S_{10}; \\
 & HF_1\tau_3S_{10} \vdash S_{11}; \\
 & \tau_1S_{11} \vdash S_{12}; \\
 & HF_1\tau_3S_{12} \vdash S_{13}; \\
 & \tau_1S_{13} \vdash S_{14}; \\
 & HF_1\tau_3S_{14} \vdash S_{15}; \\
 & \tau_1S_{15} \vdash S_8; \\
 & HF_1\tau_3S_8 \vdash S_{15}; \\
 & \tau_1S_{16} \vdash S_{17}; \\
 & HF_2\tau_4S_{17} \vdash S_{18}; \\
 & \tau_1S_{18} \vdash S_{19}; \\
 & HF_2\tau_4S_{19} \vdash S_{20}; \\
 & \tau_1S_{20} \vdash S_{21}; \\
 & HF_2\tau_4S_{21} \vdash S_{22}; \\
 & \tau_1S_{22} \vdash S_8; \\
 & HF_2\tau_4S_8 \vdash S_{22}; \\
 & \tau_1S_{23} \vdash S_{24}; \\
 & HF_3\tau_5S_{24} \vdash S_{25}; \\
 & \tau_1S_{25} \vdash S_{26}; \\
 & HF_3\tau_5S_{26} \vdash S_{27}; \\
 & \tau_1S_{27} \vdash S_{28};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& HF_3 \tau_5 S_{28} \vdash S_{29}; \\
& \quad \tau_1 S_{29} \vdash S_8; \\
& HF_3 \tau_5 S_8 \vdash S_{29}; \\
& \quad \tau_1 S_{30} \vdash S_{31}; \\
& HF_4 \tau_6 S_{31} \vdash S_{32}; \\
& \quad \tau_1 S_{32} \vdash S_{33}; \\
& HF_4 \tau_6 S_{33} \vdash S_{34}; \\
& \quad \tau_1 S_{34} \vdash S_{35}; \\
& HF_4 \tau_6 S_{35} \vdash S_{36}; \\
& \quad \tau_1 S_{36} \vdash S_8; \\
& HF_4 \tau_6 S_8 \vdash S_{36}; \\
& HF_1 S_2 \vdash S_{11}; \\
& HF_2 S_2 \vdash S_{18}; \\
& HF_3 S_2 \vdash S_{25}; \\
& HF_4 S_2 \vdash S_{32}; \\
& HF_1 S_4 \vdash S_{13}; \\
& HF_2 S_4 \vdash S_{20}; \\
& HF_3 S_4 \vdash S_{27}; \\
& HF_4 S_4 \vdash S_{34}; \\
& HF_1 S_6 \vdash S_{15}; \\
& HF_2 S_6 \vdash S_{22}; \\
& HF_3 S_6 \vdash S_{29}; \\
& HF_4 S_6 \vdash S_{36}; \\
& \overline{HNS}_{10} \vdash S_3; \\
& HF_2 S_{10} \vdash S_{18}; \\
& HF_3 S_{10} \vdash S_{25}; \\
& HF_4 S_{10} \vdash S_{32}; \\
& \overline{HNS}_{12} \vdash S_5; \\
& HF_2 S_{12} \vdash S_{20}; \\
& HF_3 S_{12} \vdash S_{27}; \\
& HF_4 S_{12} \vdash S_{34}; \\
& \overline{HNS}_{14} \vdash S_7; \\
& HF_2 S_{14} \vdash S_{22}; \\
& HF_3 S_{14} \vdash S_{29}; \\
& HF_4 S_{14} \vdash S_{36}; \\
& \overline{HNS}_{17} \vdash S_3; \\
& HF_1 S_{17} \vdash S_{11}; \\
& HF_3 S_{17} \vdash S_{25}; \\
& HF_4 S_{17} \vdash S_{32}; \\
& \overline{HNS}_{19} \vdash S_5;
\end{aligned} \tag{3.1}$$

$$HF_1S_{19} \vdash S_{13};$$

$$HF_3S_{19} \vdash S_{27};$$

$$HF_4S_{19} \vdash S_{34};$$

$$\overline{HNS}_{21} \vdash S_7;$$

$$HF_1S_{21} \vdash S_{15};$$

$$HF_3S_{21} \vdash S_{29};$$

$$HF_4S_{21} \vdash S_{36};$$

$$\overline{HNS}_{24} \vdash S_3;$$

$$HF_1S_{24} \vdash S_{11};$$

$$HF_2S_{24} \vdash S_{18};$$

$$HF_4S_{24} \vdash S_{32};$$

$$\overline{HNS}_{26} \vdash S_5;$$

$$HF_1S_{26} \vdash S_{13};$$

$$HF_2S_{26} \vdash S_{20};$$

$$HF_4S_{26} \vdash S_{34};$$

$$\overline{HNS}_{28} \vdash S_7;$$

$$HF_1S_{28} \vdash S_{15};$$

$$HF_2S_{28} \vdash S_{22};$$

$$HF_4S_{28} \vdash S_{36};$$

$$\overline{HNS}_{31} \vdash S_3;$$

$$HF_1S_{31} \vdash S_{11};$$

$$HF_2S_{31} \vdash S_{18};$$

$$HF_3S_{31} \vdash S_{25};$$

$$\overline{HNS}_{33} \vdash S_5;$$

$$HF_1S_{33} \vdash S_{13};$$

$$HF_2S_{33} \vdash S_{20};$$

$$HF_3S_{33} \vdash S_{27};$$

$$\overline{HNS}_{35} \vdash S_7;$$

$$HF_1S_{35} \vdash S_{15};$$

$$HF_2S_{35} \vdash S_{22};$$

$$HF_3S_{35} \vdash S_{29};$$

$$ZS_8 \vdash S_0;$$

$$S_7 \vee S_8 \vee S_{15} \vee S_{22} \vee S_{29} \vee S_{36} \vdash Y.$$

При цьому повинна виконуватися умова:

$$\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \in S_0;$$

$$\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \in S_1;$$

$$\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} T_5 T_6 \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9} \in S_2;$$

$$\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} T_4 T_5 T_6 T_7 \overline{T_8} \overline{T_9} \in S_3;$$

$$\begin{aligned}
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_4; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_5; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_6; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_7; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_8; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_9; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{10}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{11}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{12}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{13}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{14}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{15}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{16}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{17}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{18}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{19}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{20}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{21}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{22}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{23}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{24}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{25}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{26}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{27}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{28}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{29}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{30}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{31}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{32}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{33}; \\
& \overline{T_1 T_2 T_3 T_4 T_5 T_6 T_7 T_8 T_9} \in S_{34};
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}\overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} T_6 T_7 T_8 \overline{T_9} &\in S_{35}; \\ \overline{T_1} \overline{T_2} \overline{T_3} \overline{T_4} \overline{T_5} T_6 T_7 T_8 T_9 &\in S_{36}.\end{aligned}$$

Після підстановки виразів (3.2) в (3.1) та здійснення перетворень і мінімізації секвенційних виразів відповідно до [16, 17], отримаємо:

$$\begin{aligned}F_1 \overline{T_1} \tau_3 &\vdash T_1; \\ T_1 \tau_1 &\vdash T_1; \\ F_2 \overline{T_2} \tau_4 &\vdash T_2; \\ T_2 \tau_4 &\vdash T_2; \\ F_3 \overline{T_3} \tau_5 &\vdash T_3; \\ T_3 \tau_5 &\vdash T_3; \\ F_4 \overline{T_4} \tau_6 &\vdash T_4; \\ T_4 \tau_6 &\vdash T_4; \\ NT_5 \tau_2 &\vdash T_5; \\ T_5 \tau_1 &\vdash T_5; \\ (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4)H \vee T_5 \overline{H} &\vdash T_6; \\ [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4)H \vee T_5 \overline{H}] T_6 \tau_6 &\vdash T_7; \\ [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4)H \vee T_5 \overline{H}] T_7 \tau_6 &\vdash T_8; \\ [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4)H \vee T_5 \overline{H}] T_8 \tau_6 &\vdash T_9; \\ Z &\vdash \overline{T_6} \overline{T_7} \overline{T_8} \overline{T_9}; \\ T_6 T_7 T_8 T_9 &\vdash Y.\end{aligned}\tag{3.3}$$

3.3 Синтез структури пристрою

Використовуючи мінімізовану систему секвенцій (3.3), здійснено синтез структурної схеми блоку обробки інформації, на основі чого здійснено повну реалізацію структури пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора. Для цього в структуру пристрою введено відповідні сенсори параметрів, що впливають на зменшення його ресурсу, а також необхідні блоки узгодження, обробки та передачі сигналів.

З врахуванням викладеного, отримано структуру пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора, подану на рисунку 3.2.

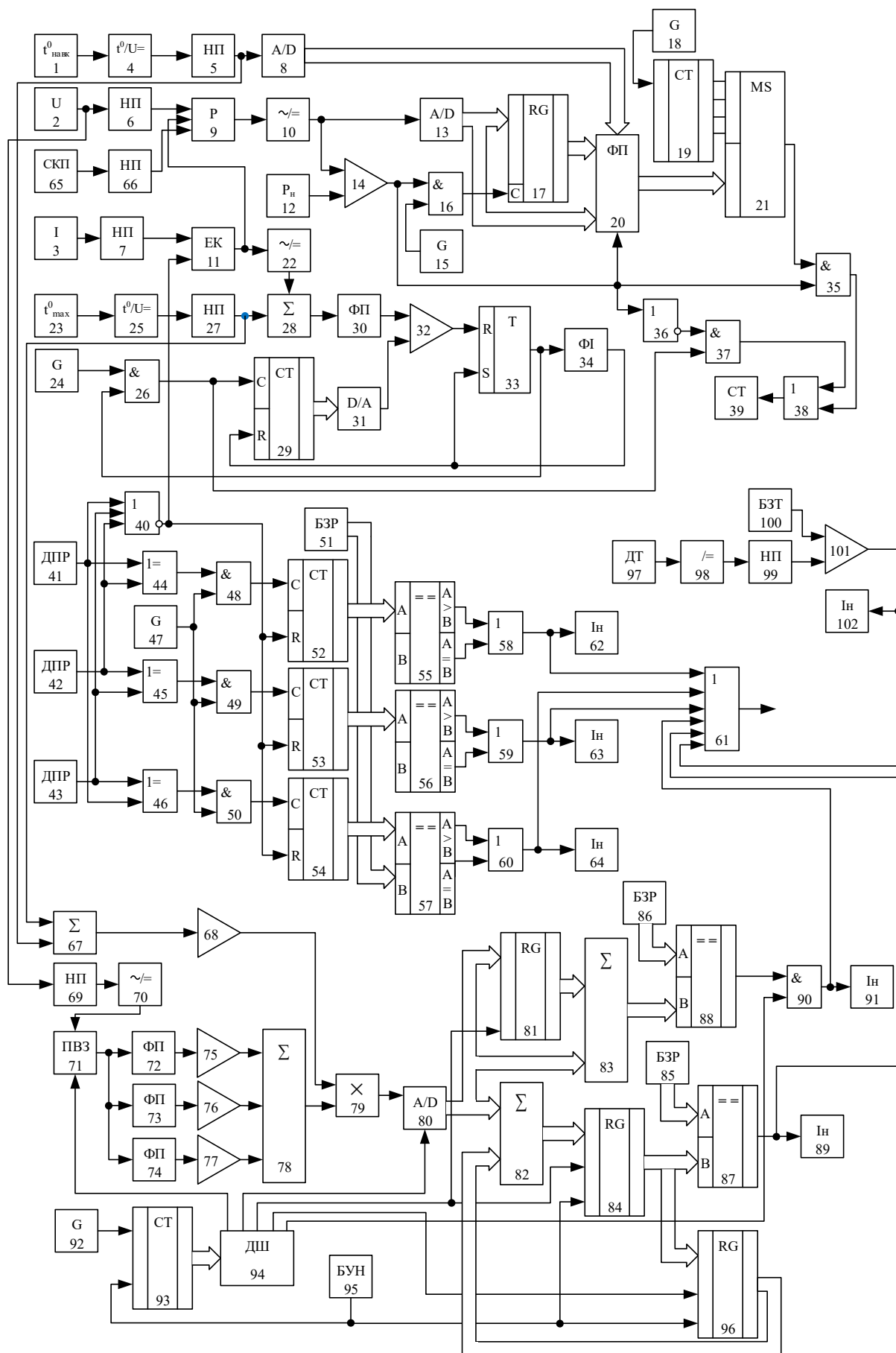


Рисунок 3.2 – Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора

На рисунку 3.2: 1, 23 – перший та другий датчики температури відповідно; 2 – датчик напруги; 3 – датчик струму; 4, 25 – перший та другий перетворювач температури в постійну напругу; 5, 6, 7, 27, 66, 70, 99 – перший, другий, третій, четвертий, п'ятий, шостий та сьомий нормуючі перетворювачі відповідно; 8, 13, 80 – перший, другий та третій аналого-цифрові перетворювачі відповідно; 9 – блок обчислення потужності; 10, 22, 69 – перший, другий та третій перетворювачі змінної напруги в постійну відповідно; 11 – електронний ключ; 12 – блок задання потужності; 14, 32, 101 – другий, перший та третій компаратори відповідно; 15, 18, 24, 47, 92 – третій, перший, другий, четвертий та п'ятий генератори імпульсів відповідно; 16, 26, 35, 37, 48, 49, 50, 90 – другий, перший, третій, четвертий, п'ятий, шостий, сьомий та восьмий логічні елементи І відповідно; 17, 81, 84, 96 – перший, другий, третій та четвертий реєстри відповідно; 19, 29, 39, 52, 53, 54, 93 – перший, другий, третій четвертий, п'ятий, шостий та сьомий лічильники імпульсів відповідно; 20, 30, 72, 73, 74 – другий, перший, третій, четвертий та п'ятий функціональні перетворювачі відповідно; 21 – комутатор; 28, 67, 78 – перший, другий та третій суматори відповідно; 31 – цифро-аналоговий перетворювач; 33 – RS-тригер; 34 – формувач імпульсів; 36 – логічний елемент НІ; 38, 58, 59, 60, 61 – перший, третій, четвертий, п'ятий та другий логічні елементи АБО відповідно; 40 – логічний елемент АБО-НІ; 41, 42, 43 – перший, другий та третій датчики початку руху приводу пристрою РПН, відповідно; 44, 45, 46 – перший, другий та третій логічні елементи ВИКЛЮЧНЕ АБО відповідно; 51, 85, 86 – перший, другий та третій блоки задання ресурсу відповідно; 55, 56, 57, 87, 88 – перший, другий, третій, четвертий та п'ятий цифрові компаратори відповідно; 62, 63, 64, 89, 91, 102 – перший, другий, третій, четвертий, п'ятий та шостий індикатори відповідно, 65 – датчик коефіцієнта потужності; 68, 75, 76, 77 – перший, другий, третій та четвертий масштабуючі підсилювачі відповідно; 71 – пристрій вибірки-зберігання; 79 – блок множення; 82, 83 – перший та другий цифрові суматори відповідно; 94 – дешифратор; 95 – блок установки нуля; 97 – датчик тиску; 98 – перетворювач тиску в постійну напругу; 100 – блок задання тиску.

Оцінка робочого ресурсу обмоток силового масляного трансформатора в нормальному режимі його функціонування здійснюється за даними датчика струму 3 та другого датчика температури 23. Ці датчики розподілені по об'єкту таким чином: датчик струму 3 встановлений в колі вторинної обмотки силового трансформатора, а другий датчик температури 23 встановлений в середині трансформатора та призначений для вимірювання температури верхніх шарів трансформаторного масла.

Спрацювання ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора в режимі перевантаження здійснюється за даними першого датчика температури 1, датчика напруги 2, датчика струму 3 та датчика коефіцієнта потужності 65. Перший датчик температури 1 розташований поблизу силового масляного трансформатора та дозволяє контролювати температуру навколишнього середовища. Датчик напруги 2 призначений для вимірювання значення напруги в електричній мережі трансформатора. Датчик коефіцієнта потужності 65 встановлений у вторинному колі трансформатора.

Контролювання тиску у маслі високовольтного вводу силового масляного трансформатора здійснюється за даними датчика тиску 97, який встановлений у високовольтному вводі трансформатора.

Контролювання неодночасності перемикання пристрою РПН при пофазному перемиканні відпайок силового трансформатора здійснюється за даними першого 41, другого 42 та третього 43 датчиків початку руху приводу пристрою РПН. Перший датчик початку руху 41 установлений на валу приводу перемикання відпайок фази А пристрою РПН, другий датчик початку руху 42 встановлений на валу приводу перемикання відпайок фази В, а третій датчик початку руху 43 встановлений на валу приводу перемикання відпайок фази С.

У першому блоці задання ресурсу 51 записаний цифровий код, що відповідає значенню ресурсу пристрою РПН, у другому блоці задання ресурсу 85 – цифровий код, що відповідає, граничному значенню концентрації газів $C_{г.мах}$ у маслі високовольтного вводу, за яким визначається повний відпрацьований робочий ресурс високовольтного вводу трансформатора, а у

третьому блоці задання ресурсу 86 – цифровий код, що відповідає, граничному значенню швидкості зміни концентрації газів $\left(\frac{dC_z(t)}{dt}\right)_{\max}$ у маслі високовольтного вводу.

У блоці задання тиску 100 записане максимально допустиме значення тиску в маслі трансформаторного вводу.

Запропонований пристрій працює так.

Генерування відповідних послідовностей імпульсів першим 18, другим 24, третім 15, четвертим 47 та п'ятим 92 генераторами імпульсів починається з моменту подачі напруги живлення на схему. Одночасно з цим блок установки нуля 95 виробляє імпульс, який встановлює сьомий лічильник імпульсів 93, а також третій 84 та четвертий 96 реєстри в початковий стан.

Старіння ізоляції обмоток трансформатора можна описати рівнянням Монтзінгера [1, 20]:

$$L = L_0 e^{\alpha\theta} = L_0 e^{\alpha(\theta_m + \theta_0)}, \quad (3.4)$$

де L – тривалість «життя» ізоляції;

L_0 – термін служби ізоляції, який відповідає нормованій температурі, – нормативний термін служби обмоток силового трансформатора;

α – коефіцієнт, що враховує зміну терміну служби ізоляції при зміні температури θ найбільш нагрітої точки ізоляції обмоток;

θ_m – перевищення температури найбільш нагрітої точки ізоляції, викликане зміною струмів навантаження; θ_0 – температура ізоляції обмоток.

З урахуванням можливості нехтуванням сталої часу перевищення температури θ_m найбільш нагрітої точки ізоляції обмотки можна представити у вигляді [1, 20]:

$$\theta_m = \beta' \tau_n k^n, \quad (3.5)$$

де β' – коефіцієнт, що враховує різницю температур між середньою та найбільш нагрітою точками обмоток;

τ_n – усталений середній перегрів обмотки над її температурою в номінальному режимі;

k^n – кратність струму навантаження трансформатора; n – коефіцієнт, який залежить від системи охолодження трансформатора.

Миттєве старіння ізоляції трансформатора, відповідно до (3.4), визначається експоненціальною функцією зі степенем, який дорівнює $(\theta_m + \theta_0)$.

Відповідно до цього, сумарне значення спрацювання обмоток силового трансформатора за станом ізоляції, який працює як в нормальному режимі, так і в режимі перевантаження, за деякий проміжок часу t визначається за формулою [1]:

$$R = m \int_0^t e^{\alpha(\theta_m + \theta_0)} dt + R_n, \quad (3.6)$$

де m – масштабний коефіцієнт;

R_n – ресурс, що спрацьовується в режимі перевантаження трансформатора.

При вимірюванні робочого ресурсу ізоляції обмоток силового масляного трансформатора в нормальному режимі його функціонування сигнали з другого датчика температури 23 та датчика струму 3 через другий перетворювач температури в постійну напругу 25, четвертий нормуючий перетворювач 27 та третій нормуючий перетворювач 7, електронний ключ 11 і другий перетворювач змінної напруги в постійну 22 відповідно подаються на входи першого суматора 28. При цьому на його виході формується сигнал, пропорційний $(\theta_m + \theta_0)$.

Якщо RS-тригер 33 встановлений в одиничний стан (а це має місце, коли на виході формувача імпульсів 34 короткочасно з'являється сигнал логічної одиниці), то перший логічний елемент І 26 відкритий і імпульси з виходу другого генератора імпульсів 24 надходять на вхід другого лічильника імпульсів 29, з виходу якого сигнали по цифровій шині подаються на вхід цифро-аналогового перетворювача 31, а з його виходу лінійно зростаючий

аналоговий сигнал поступає на другий вхід першого компаратора 32, на перший вхід якого надходить сигнал, пропорційний $e^{\alpha(\theta_m + \theta_0)}$ з виходу першого функціонального перетворювача 30, який здійснює перетворення вхідного сигналу за експоненціальним законом.

Коли сигнали на входах першого компаратора 32 зрівнюються, то на його виході з'являється сигнал логічної одиниці, який переводить RS-тригер 33 в нульовий стан, а перший логічний елемент І 26 закривається. Подача імпульсів від другого генератора імпульсів 24 до другого лічильника імпульсів 29 припиняється. В цей момент на виході формувача імпульсів 34 з'являється короткий імпульс, яким здійснюється скид другого лічильника імпульсів 29 та установка в одиничний стан RS-тригера 33. Цикл роботи при цьому повторюється.

В період, коли відкритий перший логічний елемент І 26, імпульси з його виходу через четвертий логічний елемент І 37 та перший логічний елемент АБО 38 поступають також в третій лічильник імпульсів 39 та фіксуються в ньому як ресурс роботи ізоляції обмоток трансформатора за період, починаючи з часу t_1 коли відкривається перший логічний елемент І 26, та до часу t_2 , коли перший логічний елемент І 26 закривається, у вигляді інтегралу $m \int_0^t e^{\alpha(\theta_m + \theta_0)} dt$.

Обчислюючи суму інтегралів у вигляді суми імпульсів, які надходять в третій лічильник імпульсів 39 в кожному циклі роботи блоків пристрою, можна визначити спрацьований в нормальному режимі роботи ресурс ізоляції обмоток трансформатора. Зазначимо, що в третьому лічильнику імпульсів 39 введено у вигляді двійкового коду загальний робочий ресурс ізоляції обмоток трансформатора, витрачання якого здійснюється при надходженні на вхід лічильника різних послідовностей імпульсів в нормальному режимі роботи трансформатора та в режимі його перевантаження.

В режимі перевантаження силового масляного трансформатора з виходів датчика напруги 2, датчика струму 3 та датчика коефіцієнта потужності 65 сигнали, що відповідають значенням напруги трансформатора, струму, що

протікає через трансформатор, коефіцієнту потужності відповідно надходять через відповідні перетворювачі сигналів – другий нормуючий перетворювач 6, третій нормуючий перетворювач 7, електронний ключ 11 та п'ятий нормуючий перетворювач 66 до блоку обчислення потужності 9.

У блоці обчислення потужності 9 визначається поточне значення активної потужності трансформатора. Сигнал, що відповідає значенню обчисленої потужності, надходить через перший перетворювач змінної напруги в постійну 10 на перший вхід другого компаратора 14, на другий вхід якого подається з виходу блока задання потужності 12 сигнал, пропорційний найбільшому значенню потужності нормального режиму роботи силового трансформатора.

У разі, коли поточне значення потужності силового трансформатора перевищує межу нормального режиму роботи на виході другого компаратора 14 з'являється сигнал логічної одиниці, яким закривається другий логічний елемент І 16, внаслідок чого в першому регістрі 17 залишається записаним значення потужності нормального режиму роботи трансформатора після подачі останнього імпульсу з третього генератора імпульсів 15.

Одночасно вихідним сигналом другого компаратора 14 відкривається третій логічний елемент І 35 та через логічний елемент НІ 36 закривається четвертий логічний елемент І 37. В результаті в третій лічильник імпульсів 39 спрямовується послідовність імпульсів, що характеризує спрацювання робочого ресурсу силового трансформатора в режимі перевантаження.

Крім того, вихідним сигналом другого компаратора 14 розблоковується робота другого функціонального перетворювача 20, на входи якого подається з виходу першого аналого-цифрового перетворювача 8 код, пропорційний температурі навколишнього середовища, який до нього надходить з першого датчика температури 1 через перший перетворювач температури в постійну напругу 4 та перший нормуючий перетворювач 5, а з виходу першого регістра 17 – код, пропорційний значенню потужності роботи трансформатора в нормальному режимі, та код, що відповідає значенню потужності трансформатора в режимі перевантаження, який надходить з виходу другого

аналого-цифрового перетворювача 13, на вхід якого поступає сигнал з виходу першого перетворювача змінної напруги в постійну 10.

Під дією вхідних сигналів на виході другого функціонального перетворювача 20 формується в цифровій формі поточне значення залишкового робочого ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора.

Вихідний цифровий код з виходу другого функціонального перетворювача 20 поступає на вхідну цифрову шину комутатора 21, внаслідок чого в залежності від поданого цифрового коду послідовність імпульсів з одного із виходів першого лічильника імпульсів 19 поступає на вихід комутатора 21 і далі через третій логічний елемент І 35 та перший логічний елемент АБО 38 подається на вхід третього лічильника імпульсів 39, фіксуючи в ньому використання робочого ресурсу ізоляції обмоток силового трансформатора при поточному перевантаженні.

Якщо параметри перевантаження силового трансформатора змінюється, то на виході другого функціонального перетворювача 20 з'являється інший код, і послідовність імпульсів з іншого виходу першого лічильника імпульсів 19 подається в третій лічильник імпульсів 39.

Послідовність імпульсів на виході першого лічильника імпульсів 19 формуються під дією вихідних сигналів першого генератора імпульсів 18.

При завершенні режиму перевантаження силового масляного трансформатора на виході другого компаратора 14 з'являється сигнал логічного нуля і пристрій переходить в режим відслідковування спрацювання ресурсу ізоляції обмоток в нормальному режимі роботи трансформатора.

Спектр сигналів різних частот легко розширити за допомогою першого лічильника імпульсів 19, якщо це потрібно при конкретній реалізації пристрою залежно від діапазону та дискретності вхідних сигналів.

Датчики початку руху 41, 42 та 43 реєструють момент пофазного перемикавання пристрою РПН. Під час спрацювання датчиків початку руху 41, 42 та 43 сигнал надходить у логічний елемент АБО-НІ 40, вихідний сигнал якщо розмикає електронний ключ 11, вимикаючи канал діагностування

трансформатора в режимі перевантаження, та розблоковує роботу четвертого 52, п'ятого 53 та шостого 54 лічильників імпульсів.

Припустимо, що у фазі А почалось перемикання раніше, ніж у фазах В та С. Тоді на виході першого датчика початку руху 41 сигнал з'являється раніше, ніж на датчиках 42 та 43. Відповідно сигнал з датчика 41 подається на перший 44 та третій 46 логічні елементи ВИКЛЮЧНЕ АБО, вихідні сигнали з яких дають можливість проходження імпульсів з четвертого генератора імпульсів 47 через п'ятий 48 та сьомий 50 логічні елементи І до четвертого 52 та шостого 54 лічильників імпульсів відповідно, вихідні цифрові коди яких порівнюються у першому 55 та третьому 57 цифрових компараторах із цифровим кодом, який надходить із блоку задання ресурсу 51. Якщо цифровий код, який записаний у лічильник імпульсів, менший цифрового коду, який записаний у блоці задання ресурсу 51, то пристрій РПН працює у допустимому режимі роботи. В іншому випадку на виходах першого 55 та третього 57 цифрових компараторів з'являються сигнали, які через третій 58 та п'ятий 60 логічні елементи АБО відповідно надходять на перший 62 та третій 64 індикатори та на другий логічний елемент АБО 61, з якого сигнал надходить у кола сигналізації оперативного персоналу.

Аналогічно пристрій працює, якщо перемикання починається раніше у фазі В. У цьому випадку сигнал проходить через другий 45 та перший 44 логічні елементи ВИКЛЮЧНЕ АБО, шостий 49 та п'ятий 48 логічні елементи І, п'ятий 53 та четвертий 52 лічильники імпульсів, другий 56 та перший 55 цифрові компаратори, четвертий 59 та третій 58 логічні елементи АБО. При перевищенні кількості імпульсів, записаних у лічильниках імпульсів, допустимого значення, буде надходити сигнал у другий 63 та перший 62 індикатори та через другий логічний елемент АБО 61 у кола сигналізації оперативного персоналу. Аналогічним чином працюватиме пристрій, якщо перемикання починається раніше у фазі С.

Після закінчення переключення електронний ключ 11 замикається, режим діагностування обмоток трансформатора відновлюється, четвертий 52, п'ятий

53 та шостий 54 лічильники імпульсів обнуляються й пристрій переходить в режим очікування перемикання пристроєм РПН відпайок фаз силового масляного трансформатора.

Слід зазначити, що при спрацюванні пристрою, коли має місце несинхронне перемикання відпайок пристрою РПН, вмикаються одночасно два індикатори. Якщо вмикається перший індикатор 62 (даний індикатор символізує про присутність несинхронного режиму під час перемикання між фазами А та В) та третій індикатор 64 (даний індикатор символізує про присутність несинхронного режиму під час перемикання між фазами А та С), відповідно робиться висновок про ненормальну роботу пристрою РПН у фазі А. Якщо вмикається перший індикатор 62 та другий індикатор 63 (даний індикатор символізує про присутність несинхронного режиму під час перемикання між фазами В та С), відповідно робиться висновок про ненормальну роботу пристрою РПН у фазі В. Якщо вмикається другий індикатор 63 та третій індикатор 64, відповідно робиться висновок про ненормальну роботу пристрою РПН у фазі С.

Зростання концентрації газу ΔC_2 в маслі високовольтного вводу трансформатора в часі Δt відбувається за рахунок старіння ізоляції при тривалому впливі початкових часткових розрядів внаслідок повільного розкладання масла та накопичення в ньому побічних продуктів. В такому випадку зростання концентрації газу ΔC_2 в маслі можна визначити як [20]:

$$\Delta C_2 = \frac{\gamma}{V_0} P_n(t) \Delta t, \quad (3.6)$$

де γ – питома газовиділення;

V_0 – повний об'єм масла у високовольтному вводі;

$P_n(t)$ – середня потужність початкових часткових розрядів в момент часу t .

До моменту часу t концентрація газів, що виділяються з масла у високовольтному вводі, може бути визначена шляхом інтегрування виразу (3.6) [20]:

$$C_2(t) = \int_0^t \frac{\gamma}{V_0} P_n(t) dt. \quad (3.7)$$

Врахувавши, що середня потужність $P_n(t)$ часткових розрядів залежить від фазної напруги, прикладеної до ізоляції вводу, після перетворень отримаємо [20]:

$$C_2(t) = \int_0^t \left(\frac{2}{[2 + \alpha_m (T_{вим} + T_{навк} - 2T_n)]} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{\gamma A_i}{V_{\Sigma n}} U^{\beta_i}(t) \right) dt, \quad (3.8)$$

де α_m – температурний коефіцієнт об’ємного розширення масла;

$T_{вим}$ – температура верхніх шарів масла силового трансформатора;

$T_{навк}$ – температура навколишнього середовища;

T_n – температура масла у вводі в номінальному режимі роботи; A_i, β_i – коефіцієнти апроксимації ($i = \overline{1,3}$);

$V_{\Sigma n}$ – повний об’єм масла у вводі при номінальному режимі роботи трансформатора;

U – напруга.

Визначивши значення концентрації $C_2(t)$ розчинених в маслі газів та швидкість її зростання $dC_2(t)/dt$, визначатимемо термін роботи високовольтного вводу силового масляного трансформатора. За умови, коли хоча б один із зазначених параметрів перевищує гранично допустиме значення $C_{2, \max}$ чи

$\left(\frac{dC_2(t)}{dt} \right)_{\max}$, високовольтний ввід трансформатора потрібно замінювати.

Контролювання тиску в маслі трансформаторного вводу потрібно через те, що при суттєвих виділеннях газу в високовольтному вводі він зростає.

Вимірювання ресурсу високовольтного вводу силового масляного трансформатора відбувається у такій послідовності. Сигнал з першого датчика температури 1, пропорційний температурі $T_{навк}$, через перший перетворювач температури в постійну напругу 4 та перший нормуючий перетворювач 5 надходить на другий вхід другого суматора 67. Сигнал з другого датчика

температури 23, пропорційний температурі верхніх шарів масла силового трансформатора $T_{вим}$, через другий перетворювач температури в постійну напругу 25 та четвертий нормуючий перетворювач 27 надходить на перший вхід другого суматора 67. На виході другого суматора 67 формується сигнал $T_{навк} + T_{вим}$, який подається на вхід першого масштабуючого підсилювача 68. На виході першого масштабуючого підсилювача 68 формується сигнал $\frac{2}{2 + \alpha_m \cdot (T_{вим} + T_{навк} - 2T_n)}$, який подається на перший вхід блоку множення 79.

Напруга, що вимірюється датчиком напруги 2, через третій перетворювач змінної напруги в постійну 69 та шостий нормуючий перетворювач 70 подається на перший вхід пристрою вибірки-зберігання 71.

При появі імпульсу на першому виході дешифратора 94, керування яким здійснюється сьомим лічильником імпульсів 93, відповідне значення напруги запам'ятовується в пристрої вибірки-зберігання 71, а далі подається на входи третього 72, четвертого 73 та п'ятого 74 функціональних перетворювачів, в яких відбувається обчислення значень $U^{\beta_i}(t)$. Результати розрахунків далі надходить на відповідні входи другого 75, третього 76 та четвертого 77 масштабуючих підсилювачів, в яких відбувається множення вихідних сигналів на відповідні коефіцієнти $\frac{\gamma A_i}{V_{\Sigma_n}}$ та передача отриманих сигналів на відповідні входи третього

суматора 78. На виході третього суматора 78 формується сигнал, пропорційний $\sum_{i=1}^3 \frac{\gamma A_i}{V_{\Sigma_n}} U^{\beta_i}(t)$, який далі подається на другий вхід блоку множення 79. Сигнал з

виходу блоку множення 79 подається на вхід третього аналого-цифрового перетворювача 80, в якому здійснюється перетворення аналогового сигналу в цифровий при появі на керуючому вході імпульсу з другого виходу дешифратора 94. Вихідний цифровий код третього аналого-цифрового перетворювача 80 по цифровій шині надходить до першого входу першого цифрового суматора 82 та до цифрового входу другого регістра 81.

В початковий момент часу третій 84 та четвертий 96 регістри обнулені, тому на виході першого цифрового суматора 82 буде цифровий сигнал, рівний вхідному, який при появі імпульсу на третьому виході дешифратора 94 записується в третій регістр 84, який є регістром робочого ресурсу високовольтного вводу трансформатора. Одночасно за сигналом на третьому виході дешифратора 94 цифровий код з виходу аналого-цифрового перетворювача 80 записується в другий регістр 81.

Сигнал з виходу третього регістра 84 по цифровій шині записується в четвертий регістр 96 за умови появи імпульсу на четвертому виході дешифратора 94.

В першому циклі роботи пристрою ($t_1 = 0$) за період $[t_1, t_2]$ визначається робочий ресурс високовольтного вводу трансформатора згідно виразу

$$\int_0^t \left(\frac{2}{2 + \alpha_m (T_{вим} + T_{навк} - 2T_n)} \cdot \sum_{i=1}^3 \frac{\gamma A_i}{V_{\Sigma n}} U^{\beta_i}(t) \right) dt.$$

В другому та наступних циклах роботи блоків пристрою в першому цифровому суматорі 82 відбувається сумування поточного значення відпрацьованого робочого ресурсу високовольтного вводу з сумарним відпрацьованим ресурсом, обчисленим у всіх попередніх циклах та записаним в четвертому регістрі 96.

При рівності цифрових кодів, які надходять з виходу третього регістра 84 та з виходу другого блоку задання ресурсу 85 до відповідних входів четвертого цифрового компаратора 87, що відповідає вичерпанню робочого ресурсу високовольтного вводу, то на виході четвертого цифрового компаратора 87 з'являється сигнал логічної одиниці, який включає четвертий індикатор 89 та через другий логічний елемент АБО 61 поступає в коло сигналізації.

Після запису інформації в четвертий регістр 96 за сигналом з четвертого виходу дешифратора 94 на його першому виході знову з'являється сигнал, що призводить до запам'ятовування в пристрої вибірки-зберігання 71 нового значення фазної напруги електричної мережі, що подається з виходу датчика

напруги 2 через третій перетворювач змінної напруги в постійну 69 та шостий нормуючий перетворювач 70.

При цьому на виході блока множення 79 формується нове миттєве значення концентрації розчинених в маслі газів і при появі імпульсу на другому виході дешифратора 94 відповідний вхідний аналоговий сигнал перетворюється в цифровий код, який з виходу третього аналого-цифрового перетворювача 80 подається на вхід другого цифрового суматора 83. На виході другого цифрового суматора 83 формується цифровий код різниці операції різниці вхідних цифрових кодів, які надходять від другого регістра 81 та третього аналого-цифрового перетворювача 80, тобто сигнал різниці миттєвих значень концентрації розчинених в маслі газів, що характеризує швидкість її зміни.

З виходу другого цифрового суматора 83 сигнал поступає на вхід п'ятого цифрового компаратора 88, де він порівнюється з кодом, що подається з виходу третього блоку задання ресурсу 86, що відповідає значенню $\left(\frac{dC_2(t)}{dt}\right)_{\max}$. За умови перевищення цифрового коду з виходу другого цифрового суматора 83 цифрового коду, що надходить з третього блоку задання ресурсу 86, то на виході п'ятого цифрового компаратора 88 з'являється сигнал логічної одиниці, що характеризує перевищення допустимого значення швидкості зростання концентрації розчинених в маслі газів.

Після цього сигнал на п'ятому виході дешифратора 94 відкриває восьмий логічний елемент І 90. Якщо на виході п'ятого цифрового компаратора 88 присутній сигнал логічної одиниці, то на виході восьмого логічного елемента І 90 з'являється сигнал логічної одиниці, який включає п'ятий індикатор 91 і через другий логічний елемент АБО 61 сповіщає оперативний персонал про перевищення граничної швидкості зростання концентрації розчинених в маслі газів.

Сигнал з виходу датчика тиску 97 через перетворювач тиску в постійну напругу 98 та сьомий нормуючий перетворювач 99 подається на другий вхід третього компаратора 101. Якщо цей сигнал перевищує значення сигналу, який

надходить з виходу блоку задання тиску 100, що відповідає перевищенню тиску в маслі високовольтного вводу допустимого рівня, то на виході третього компаратора 101 з'являється сигнал логічної одиниці, який включає шостий індикатор 102 та через другий логічний елемент АБО 61 подається в коло сигналізації.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

У випускній магістерській роботі аналізуються методи та засоби визначення залишкового ресурсу силового масляного трансформатора.

Охорона праці належить до соціально-економічних систем, головним завданням яких є врахування громадських та особистих інтересів людей. Соціальне значення охорони праці полягає в сприянні росту ефективності суспільного виробництва шляхом безперервного вдосконалення і поліпшення умов праці, підвищення їх безпеки, зниження виробничого травматизму і профзахворювань. Економічне значення охорони праці визначається ефективністю заходів з покращення умов і підвищення безпеки праці та є економічним виразом соціальної значущості охорони праці.

Роботодавець зобов'язаний створити на робочому місці в кожному структурному підрозділі умови праці відповідно до нормативно-правових актів, а також забезпечити додержання вимог законодавства щодо прав працівників у галузі охорони праці. Це забезпечить не лише безпечність умов праці, а й створить відповідний настрій всередині колективу.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які впливають на оперативно-ремонтний персонал, що здійснює контроль та обслуговування силового обладнання підприємства, зокрема масляних трансформаторів, згідно ГОСТ 12.0.003-74.

Фізичні: підвищена та понижена рухомість повітря; підвищена та понижена температура повітря робочої зони; рухомі машини і механізми, незахищені рухомі елементи виробничого обладнання; підвищена та понижена температура поверхонь обладнання, матеріалів; недостатнє освітлення робочої зони; недостатність природного освітлення; небезпечний рівень напруги електричного кола, замикання якого може відбутися через тіло людини; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена вологість повітря; психофізіологічні небезпечних та шкідливих виробничих фактори: фізичні

перевантаження (динамічні); нервово-психічні перевантаження (перенапруга аналізаторів, монотонність праці).

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Організація робочих місць електротехнічного оперативно-ремонтного персоналу підприємства, який здійснює впровадження заходів з енергоефективності електричного обладнання має відповідати вимогам НПАОП 0.00-1.28-10.

Приміщення, в якому знаходять робочі місця персоналу, має площу 27 м^2 , при висоті стелі $3,0$ метри. У приміщенні є 2 вікна шириною $2,3$ м і висотою $1,5$ м і двері шириною $1,5$ м. У приміщенні працює 4 особи (рисунок 4.1). Тобто площа на одного працівника складає $6,75 \text{ м}^2$, що повністю відповідає встановленим нормам. Крім того, передбачається наявність таких побутових приміщень як роздягальня, кімната особистої гігієни, медпункт.

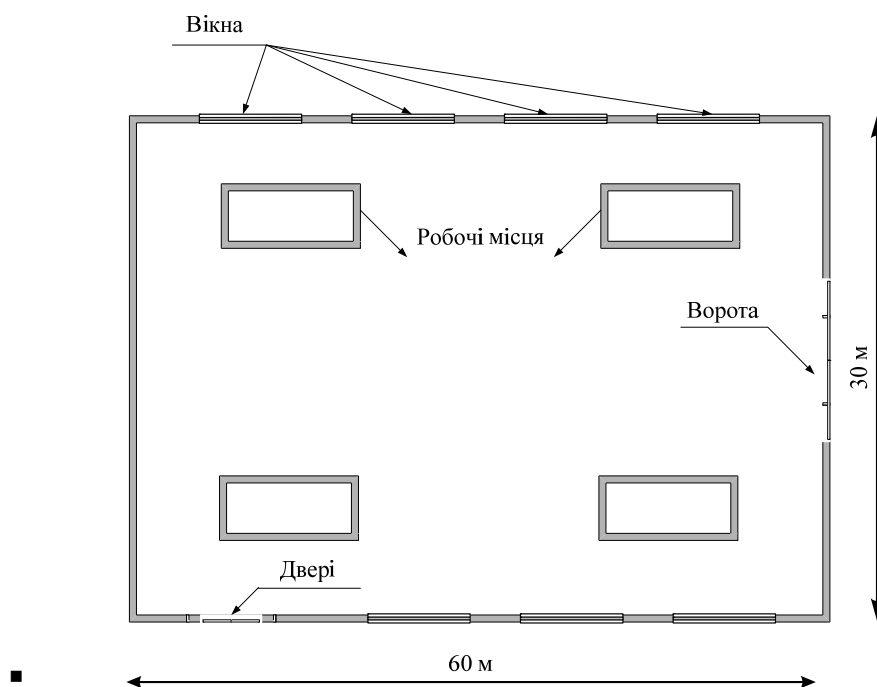


Рисунок 4.1 – Схема виробничого приміщення, де розташоване силове обладнання, що діагностується

4.1.2 Електробезпека

Живлення силового обладнання та системи освітлення здійснюється від чотирихпровідної трифазної мережі 380 x 220 В (фазна напруга (фаза – "0") – 220 В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380 В), з'єднаної з силовим трансформатором, який діагностується. Категорія умов по небезпеці електротравматизму – підвищеної небезпеки, у зв'язку з наявністю у цехах струмопровідної підлоги. Технічні рішення щодо запобігання електротравмам: для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмовідними елементами електроустаткування, необхідно:

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

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

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

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до

струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000 В):

- ізолювальні штанги;
- ізолювальні та струмовимірювальні кліщі;
- покажчики напруги;
- діелектричні рукавиці;
- слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

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

При роботі, яка зв'язана з доторканням до струмоведучих частин, необхідно вимкнути його і повісити плакат "НЕ ВМИКАТИ, ПРАЦЮЮТЬ ЛЮДИ".

Розшиновку або від'єднання кабеля при підготовці робочого місця може виконати ремонтний робітник, який має третю групу. Під наглядом чергового або оперативно-ремонтного робітника. З найближчих до робочого міста струмоведучих частин до наступних доторканню повинна бути знята напруга або вони повинні бути огорожені.

Відключене положення комутаційних апаратів до 1000 В з недоступними для огляду контактами (автоматичні вимикачі, пакетні вимикачі, рубильники в закритому виконанні тощо) визначається перевіркою відсутності на їх затискачах або на відходячих шинах, проводах або затискачах обладнання, яке відключається цими комутаційними апаратами. В електроустановках до 1000 В при роботах на збірних шинах РУ, щитів, збірок напруга з шин повинна бути знята та шини (за винятком шин, які виконані ізольованим проводом) повинні бути заземлені.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

Категорія робіт – розмежування робіт за тяжкістю на основі загальних енерговитрат організму (Вт).

Головним завданням будь-якої галузі промисловості є збільшення продуктивності праці. Разом з тим, людина, що працює, проводить на виробництві значну частину свого життя. Тому для її нормальної життєдіяльності в умовах виробництва треба створити санітарні умови, які б дали змогу їй плідно працювати, не перевтомлюючись, та зберігати своє здоров'я.

Для цього треба, щоб енергетичні витрати при праці компенсувалися відпочинком та умовами оточуючого середовища. Ці умови створюються забезпеченням для працюючого: зручного робочого місця; чистого повітря; нормованої освітленості; захисту від шуму та вібрації; робочим одягом та різними засобами індивідуального захисту.

У відповідності з наведеними енерговитратами на базі вимог даний тип роботи відносять до категорії Пб.

4.2.1 Мікроклімат

Суттєвий вплив на стан організму працівника, його працездатність здійснює мікроклімат (метеорологічні умови) у виробничих приміщеннях, під яким розуміють клімат внутрішнього середовища цих приміщень, що визначається діючою на організм людини сукупністю температури, вологості, руху повітря та теплового випромінювання нагрітих поверхонь.

На відміну від мікроклімату житла та громадських споруд мікроклімат виробничих приміщень характеризується значною динамічністю і залежить від коливань зовнішніх метеорологічних умов часу доби та пори року, теплофізичних особливостей технологічного процесу, умов опалення та вентиляції.

Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні оптимальних

параметрів мікроклімату не повинні бути більше ніж на 2°C за діапазон норм. Якщо температура поверхонь вище чи нижче оптимальної температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м.

Основні джерела теплоти бажано розміщувати безпосередньо під аераційним ліхтарем, біля зовнішніх стін будівлі і в один ряд на такій відстані один від одного, щоб теплові потоки від них не перехрещувались на робочих місцях. Для охолодження гарячих виробів необхідно передбачити окремі приміщення. Найкращим рішенням є розміщення тепловипромінюючого обладнання в ізольованих приміщеннях або на відкритих ділянках.

Допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничого приміщення приводяться в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні виробничих приміщень з категорією робіт Пб

Період року	Категорія робіт	Температура, °C	Відносна вологість, %	Швидкість повітря не >, м/с
Холодний	Пб	17-25	75	0,2
Теплий	Пб	19-30	60	0,2

Вентиляція повітря робочої зони відповідно до відбувається через нещільно закриті вікна і через встановлену в лабораторії вентиляційну шахту.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Робочою зоною вважається простір, який обмежений огорожуючими конструкціями виробничих приміщень, що мають висоту 2 м над рівнем підлоги або площини, на яких знаходяться місця постійного або непостійного перебування працюючих. Склад повітря робочої зони залежить від складу атмосферного повітря і впливу на нього ряду шкідливих виробничих факторів, утворених в процесі трудової діяльності людини. Склад повітря залишається

постійним. Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м.

Можливі забруднювачі повітря і їх ГДК наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Можливі забруднювачі повітря і їх ГДК

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

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів по очищенню області. Необхідно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (зернистість), тим вище небезпека.

4.2.3 Виробниче освітлення

Світло впливає не лише на функцію органів зору, а й на діяльність організму в цілому. При поганому освітленні людина швидко втомлюється, працює менш продуктивно, зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків. Згідно з статистичними даними, до 5% травм можна пояснити недостатнім або нераціональним освітленням, а в 20% воно сприяло виникненню травм. Врешті, погане освітлення може призвести до професійних захворювань, наприклад, таких як робоча міопія (короткозорість), спазм акомодатції.

Виробниче освітлення використовується природне, штучне та суміщене. Природне та штучне освітлення нормується згідно в залежності від характеру зорової роботи, найменшого розміру об'єкта розрізнення, розряду і підрозряду зорової роботи, фона і контрасту об'єкта з фоном. Згідно діючим нормам в

промислових приміщеннях з постійним перебуванням працівників повинні бути передбачені світлові прорізи в стіні, для забезпечення природного освітлення:

- характер зорової роботи – середня точність;
- розряд зорової роботи – IV;
- підрозряд зорової роботи – б;
- контраст об'єкта розпізнавання – середній;
- характеристика фону – темний;
- штучне освітлення, лк: загальне – 200; бокове КПО – 1,5 %; природне – 1,5; суміщене – 0,9.

Нормовані значення параметрів приведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Норма освітленості

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір б'єкта розпізнавання, мм	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Характер фону	Контраст об'єкта розпізнавання з	Штучне освітлення	
						Освітленість, лк	
						Комбіноване	Загальне
Середня точність	Від 0,5 до 1	IV	б	темний	середній	400	200

Основною величиною для розрахунку і нормування природного освітлення є коефіцієнт природної освітленості (КПО). Прийняте роздільне нормування КПО для бічного і верхнього освітлення. Нормовані значення КПО для будинків, розташованих у IV поясах світлового клімату, визначаються по формулі:

$$E = e_i m, \quad (4.1)$$

де e_i – визначення КПО по таблиці;

m – коефіцієнт світлового клімату ($m = 0,9$).

$$E = 1,5 \cdot 0,9 = 1,35 (\%).$$

Надійність та ефективність природного і штучного освітлення залежить від своєчасності і ретельності їх обслуговування. Забруднення скла світлових отворів, ламп та світильників може знизити освітленість приміщень в 1,5-2 рази. Тому вікна необхідно мити не рідше двох разів у рік для приміщень з незначним виділенням пилу і не рідше чотирьох разів – при значному виділенні пилу. Періодичність чищення світильників – 4...12 разів на рік (залежно від характеру запиленості виробничих приміщень).

Періодично, не рідше одного разу на рік, необхідно перевіряти рівень освітленості в контрольних місцях виробничого приміщення. Основний прилад для вимірювання освітленості – люксметр.

4.2.4 Виробничий шум

Шум – будь-який небажаний звук, котрий заважає. Виробничим шумом називається шум на робочих місцях, ділянках або на територіях підприємств, котрий виникає під час виробничого процесу.

Наслідком шкідливої дії виробничого шуму можуть бути професійні захворювання, підвищення загальної захворюваності, зниженні працездатності, підвищення ступеня ризику травм та нещасних випадків пов'язаних з порушенням сприйняття попереджувальних сигналів порушення слухового контролю функціонування технологічного обладнання, зниження продуктивності праці.

За характером порушення фізіологічних функцій шум поділяється на такий, що заважає (перешкоджає мовному зв'язку), подразнювальний (викликає нервові напруження і внаслідок цього — зниження працездатності, загальну перевтому), шкідливий (порушує фізіологічні функції на тривалий період і викликає розвиток хронічних захворювань, котрі безпосередньо або опосередковано пов'язані зі слуховим сприйняттям, погіршення слуху, гіпертонію, туберкульоз, виразку шлунку), травмуючий (різко порушує фізіологічні функції організму людини). В робочому приміщенні підприємства, джерелом шуму є машини, механізми та верстати - механічний шум. Найбільш

раціональний спосіб - пониження шуму в джерелі або зміна напрямку його випромінювання. Однак вони потребують конструкторської переробки джерела, яке випромінює шум або механізму в цілому, що є несприятливими.

Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку та еквівалентні рівні звуку у виробничому приміщенні приведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Допустимі рівні звукового тиску та рівня звуку

Вид трудової діяльності, робоче місце	Рівні звукового тиску, дБ в октавних полосах із середньогометричними частотами, Гц								
	1,5	3	25	50	500	1000	2000	4000	8000
На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Пониження рівня шуму, який проникає з джерела утворення назовні можна отримати шляхом підвищення рівня звукоізоляції огорожуючи конструкцій. Звукопоглинання є найбільш простим і в той же час достатньо ефективним способом зменшення шуму у виробничих приміщеннях. Звукопоглинаюче облицювання слід розміщувати на стелі та верхній частині стін (вище 1,5...2 м). Найбільше поглинання шуму досягається при облицюванні більше 60 % площі від загальної площі поверхонь приміщення. Ефект поглинання шуму збільшується зі зменшенням висоти приміщення.

4.2.5 Виробничі вібрації

Вібрація відноситься до факторів, які мають велику біологічну активність. Як загальна, так і локальна вібрація несприятливо впливає на організм людини, викликає зміну у функціональному стані вестибулярного апарату, центральної

нервової, серцево-судинної систем, погіршує самопочуття та може призвести до розвитку професійних захворювань.

За допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях приведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Середньоквадратичні значення віброприскорення та віброшвидкості

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	1,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на пост. Роб. місцях у вироб. Прим.	$\frac{1,3}{108}$	$\frac{0,45}{99}$	$\frac{0,22}{93}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	-	-	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	-	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с 10-2, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено:

– динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи;

– зміна конструктивних елементів машин;

– застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

4.2.6 Психофізіологічні фактори

Класи умов праці за показниками важкості праці.

Зовнішнє фізичне динамічне навантаження, виражене в одиницях механічної роботи за зміну, кг/(Вт):

- при регіональному навантаженні (для чоловіків) – 12 000(40);
- при загальному навантаженні (за участю м'язів рук, тулуба, ніг) – 40000(80).

Маса вантажу, що постійно підіймається – до 25 кг.

Стереотипні робочі рухи:

- при локальному навантаженні (участь м'язів кистей та пальців рук) – до 60000;
- при регіональному навантаженні (участь рук та плечового суглоба) – до 30000.

Статичне навантаження (кг/с):

- двома руками (чоловіки) – до 70 000;
- за участю м'язів тулуба та ніг – до 200 000.

Робоча поза: періодичне перебування в незручній позі (робота з поворотом тулуба, незручним розташуванням кінцівок) до 25% часу зміни.

Нахил тулуба:

- вимушені нахили протягом зміни – 150 разів;
- переміщення у просторі (переходи задля технологічного процесу) – більше 12.

Класи умов праці за показниками напруженості праці.

Інтелектуальні навантаження.

Зміст роботи – рішення складних завдань з вибором за алгоритмом;

Сприймання інформації та їх оцінка – сприймання інформації з наступною корекцією дій та операцій;

Розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, контроль, перевірка завдання.

Сенсорні навантаження:

- зосередження (%за зміну) – до 50;
- щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150.

Навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80;

Навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 20 до 25.

Емоційне навантаження. Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний.

Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб – є відповідальним за безпеку інших.

Режим праці:

- тривалість робочого дня – більше 8 год;
- змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

4.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Дослідження стійкості роботи системи електропривода в умовах дії загрозливих чинників надзвичайних ситуацій

Під стійкістю роботи системи діагностування масляних трансформаторів розуміють його здатність виконувати задані функції, що відповідають вимогам відповідних планів в умовах надзвичайних ситуацій, а також пристосованість засобів діагностування до відновлення їх роботи.

На основі вивчення факторів, які впливають на стійкість роботи системи діагностування масляних трансформаторів і оцінки стійкості елементів до дії уражаючих факторів стихійних лих та виробничих аварій, необхідно завчасно організувати і провести організаційні, інженерно-технічні й технологічні заходи для підвищення стійкості роботи. До загальних інженерно-технічних заходів можна віднести: розміщення системи в заглиблених приміщеннях, а також використання спеціальних захисних пристосувань, закріплення пристрою, застосування контрфорсів для підвищення стійкості проти перекидання обладнання.

Силовими масляними трансформаторами комплектуються підприємства, станції, військові і стратегічні об'єкти. Тому на них можуть впливати іонізуючих випромінювання та електромагнітний імпульс і відповідно виводити з ладу стратегічні об'єкти, спецоб'єкти та об'єкти критичної інфраструктури .

У системах діагностування масляних трансформаторів найбільш чутливими до дії іонізуючого випромінювання є мікропроцесорні регулятори струму і швидкості, а також мікросхеми.

В результаті опромінення системі діагностування масляних трансформаторів, в регуляторах змінюється струм і коефіцієнти підсилення; в конденсаторах понизиться напруга пробою і опір витоку, зміниться провідність і внутрішнє нагрівання. В ізоляційних і діелектричних матеріалах зміняться такі параметри: електрична провідність та діелектрична провідність.

Дія електромагнітного імпульсу може призвести до загоряння чутливих електричних та електронних елементів, а також до серйозних порушень в цифрових і контрольних пристроях. Електромагнітний імпульс пробиває ізоляцію, випалює елементи мікросхем, викликає коротке замикання. Саме тому є необхідність запобіганню при дії цього фактору на електричне та електронне обладнання.

4.3.1 Дослідження стійкості роботи системи електропривода в умовах дії іонізуючого випромінювання

Визначаємо граничні значення дози опромінення $D_{грі}$, для елементної бази системи діагностування масляних трансформаторів, при яких виникають незворотні зміни. Отримані дані заносимо в таблицю 4.6.

Проаналізувавши дані таблиці 6.1, визначили, що самим уразливим елементом системи діагностування масляних трансформаторів з мінімальною дозою $D_{грі} = 10^4 \text{ Р}$ є такі транзистори та діоди.

Таблиця 4.6 – Граничні значення експозиційних доз елементів засобів діагностування

Блоки та елементи засобів діагностування	$D_{\text{грі}}, \text{P}$	$D_{\text{гр}}, \text{P}$
Мікросхеми типу К90УД2	10^5	10 ⁴
Блок керування типу КР1553ЛА5	5×10^5	
Транзистори типу МЛТ	10^4	
Діоди типу КД523Б	10^4	
Конденсатори типу К56-17	10^7	
Резистори типу СПЗ	10^7	

Визначаємо можливу дозу опромінення D_m за формулою:

$$D_m = \frac{2 \cdot P_{1\text{max}} (\sqrt{t_k} - \sqrt{t_n})}{k_{\text{осл}}}, \quad (4.2)$$

де $P_{1\text{max}}$ – максимальне значення рівня радіації ($P_{1\text{max}} = 6,76 \text{ P/год}$);

t_k – час наробки на відказ ($t_k = 131400 \text{ год} - 5 \text{ років}$);

t_n – час початку опромінення ($t_n = 1 \text{ год}$);

$k_{\text{осл}}$ – коефіцієнт послаблення радіації будинком ($k_{\text{осл}} = 2$).

$$D_m = \frac{2 \cdot 6,76 \cdot (\sqrt{131400} - \sqrt{1})}{2} = 2443,68 \text{ (P)}.$$

Оскільки $D_{\text{грі}} > D$, то дані система діагностування масляних трансформаторів стійка до дії радіації. Визначимо допустимий час роботи РЕА в заданих умовах за формулою:

$$t_{\partial} = \left(\frac{D_{\text{гр}} \cdot k_{\text{осл}} + 2 \cdot P_{1\text{max}} \cdot \sqrt{t_n}}{2 \cdot P_{1\text{max}}} \right)^2, \quad (4.3)$$

$$t_{\partial} = \left(\frac{10^4 \cdot 2 + 2 \cdot 6,7 \cdot \sqrt{1}}{2 \cdot 6,7} \right)^2 = 1480,29 \text{ (год)}.$$

Отже можлива доза опромінення елементної бази $D_m = 2443,68 \text{ Р}$, а допустима – 10^4 Р . Отже, система є стійкою в умовах дії іонізуючого випромінювання. Допустимий час роботи системи діагностування масляних трансформаторів в заданих умовах становить 1480 год., при рівні радіації 6,76 Р/год, це більше, ніж час морального засобів діагностування.

4.3.2 Дослідження стійкості роботи системи електропривода в умовах дії електромагнітного імпульсу

Визначимо горизонтальну складову напруженості електромагнітного поля:

$$U_z = E_e \cdot L_z, \quad (4.4)$$

де E_e – величина електромагнітного імпульсу ($E_e = 9,82 \text{ кВ/м}$);

L_z – довжина горизонтальної струмопровідної частини системи, м.

Визначаємо горизонтальну та вертикальну напругу наводки:

$$U_z = 9,82 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = 4910 \text{ (В/м)}.$$

$$U_e = 9,82 \cdot 0,5 = 4,91 \text{ (В/м)}.$$

Визначаємо допустимі коливання напруги живлення для різних блоків:

$$U_{\partial} = U_{ж} + \frac{U_{ж}}{100} \cdot N, \quad (4.5)$$

де N – відсоток допуску.

$$U_{\partial} = 12 + \frac{12}{100} \cdot 5 = 12,6 \text{ (В)};$$

$$U_{\delta} = 24 + \frac{24}{100} \cdot 5 = 25,2 \text{ (В)};$$

$$U_{\delta} = 306 + 306 \cdot 5 = 320,25 \text{ (В)}.$$

Визначаємо коефіцієнти безпеки для кожної ділянки:

– горизонтальної:

$$K\bar{b}_{\epsilon 1} = 20 \cdot \lg \frac{12,6}{4910} = -51,25 \text{ (дБ)};$$

$$K\bar{b}_{\epsilon 2} = 20 \cdot \lg \frac{25,2}{4910} = -45,23 \text{ (дБ)};$$

$$K\bar{b}_{\epsilon 3} = 20 \cdot \lg \frac{320,5}{4910} = -23,15 \text{ (дБ)};$$

– вертикальної:

$$K\bar{b}_{\epsilon 1} = 20 \cdot \lg \frac{12,6}{4,91} = 8,75 \text{ (дБ)};$$

$$K\bar{b}_{\epsilon 2} = 20 \cdot \lg \frac{25,2}{4,91} = 14,77 \text{ (дБ)};$$

$$K\bar{b}_{\epsilon 3} = 20 \cdot \lg \frac{320,5}{4,91} = 36,85 \text{ (дБ)}.$$

Отримані дані заносимо в таблицю 4.7.

Границя стійкості системи діагностування масляних трансформаторів $K\bar{b}_{\min} = -51,25$ дБ, а $K\bar{b}_{\text{гр}} = 36,85$ дБ. Отже, засоби діагностування є нестійкими в умовах дії електромагнітного імпульсу. Дія підвищення стійкості необхідно використовувати пасивне екранування блоків РЕА.

Таблиця 4.7 – Значення коефіцієнтів безпеки системи діагностування масляних трансформаторів

№	Найменування блоків	Кб _Г , дБ	Кб _В , дБ	Результат дії
1	Блок живлення, 12 В	-51.25	8.75	Нестійкий
2	Блок управління, 24 В	-45.23	14.77	Нестійкий
3	Силові елементи, 305 В	-23.15	36.85	Нестійкі

Перехідне гасіння енергії електричного поля екраном для сталі:

$$A = 40 - Kб_{\min}. \quad (4.6)$$

Для БЖ:

$$A_1 = 40 + 51,25 = 91,25 \text{ (дБ). (дБ);}$$

Для БУ:

$$A_2 = 40 + 45,23 = 85,23 \text{ (дБ).}$$

Для БСЕ:

$$A_3 = 40 + 23,15 = 63,15 \text{ (дБ).}$$

Розрахуємо товщини захисних екранів:

$$t = \frac{A}{5.2 \cdot \sqrt{f}}, \quad (4.7)$$

де f – найбільш характерна частота ($f = 15$ кГц).

Для БЖ:

$$t_1 = \frac{91,25}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,95 \text{ (см).}$$

Для БУ:

$$t_3 = \frac{85,23}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,093 \text{ (см)}.$$

Для БСЕ:

$$t_3 = \frac{63,25}{5,2 \cdot \sqrt{15000}} = 0,087 \text{ (см)}.$$

Отже, при екрануванні блоку живлення та блоку керування з використанням екрану товщиною до 1 мм зі сталі, система діагностування масляних трансформаторів буде стійкою в умовах дії електромагнітного імпульсу, при екрануванні силових елементів з використанням екрану товщиною 0,1 см, вона буде стійкою в умовах дії електромагнітного імпульсу.

Після проведених розрахунків визначено, що робота системи діагностування масляних трансформаторів стійка при заданому рівні радіації 8,21 Р/год. До дії ЕМІ система керування виявилась нестійкою. Застосування екранування РЕА суттєво підвищує його стійкість в умовах дії електромагнітного імпульсу.

В результаті застосування екранів системи діагностування масляних трансформаторів буде працювати стійко аж до значення напруженості вертикальної складової 9,82 кВ/м. Ще одним варіантом підвищення стійкості апаратури до дії імпульсу є зменшення довжини струмопровідних частин шляхом вдосконалення схемокомпоновки РЕА. Крім цього необхідно екранувати кабелі живлення, а також застосувати прилади, які б вимикали електронні схеми на період впливу ЕМІ.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Метою функціонального діагностування трансформаторів є забезпечення найбільш економічної його експлуатації при заданому рівні надійності і скороченні до мінімуму витрат на технічне обслуговування та ремонт. Ця мета досягається шляхом відслідковування технічного стану електрообладнання в процесі експлуатації, що дозволяє своєчасно запобігати відмовам, скорочувати простої через пошкодження, проводити комплекс заходів для підтримки його працездатності відповідно до даних діагностування.

Збитки залежать від раптовості перерви, її тривалості і глибини. Математичне сподівання збитків від переривання електропостачання може бути визначене за виразом

$$Z_{пер} = \omega \cdot Z_{пер}(0) + \omega \cdot t_B \cdot Z(t), \quad (5.1)$$

де $Z_{пер}(0)$ – прямі збитки від самого факту переривання електропостачання;

$Z(t)$ – прямі і додаткові збитки, які залежать від тривалості перерви електропостачання;

ω – частота відмов;

t_B – тривалість відновлення після відмови.

Збитки від переривання електропостачання можна оцінити за спрощеною формулою:

$$Z_{пер} = Z_{пер.а} M(W_{нед.а}) + Z_{пер.п} M(W_{нед.п}), \quad (5.2)$$

де $Z_{пер.а}$, $Z_{пер.п}$ – питомі складові збитків від, відповідно, аварійного і планового недовідпущень електроенергії;

$M(W_{нед.а})$, $M(W_{нед.п})$ – математичні сподівання середньорічних аварійного і планового недовідпущень електроенергії.

Математичне сподівання аварійного і планового недовідпущень електроенергії знаходять з формул:

$$M(W_{нед.а}) = k_a P_M T_M; \quad M(W_{нед.п}) = k_n P_M T_M, \quad (5.3)$$

де k_a , $k_{п}$ – коефіцієнти аварійного і планового простоїв.

Для двоколової системи (з резервуванням) планове недовідпущення електроенергії відсутнє, а середньорічне аварійне недовідпущення електроенергії практично дорівнює нулю.

В таблиці 5.1 приведено розрахунок капітальних вкладень на розробку пристрою для діагностування силового трансформатора.

Таблиця 5.1 – Капітальні витрати на електроустаткування

Найменування обладнання	Кошторисна вартість, грн.
Датчики: струму (трифазний), температури (навколишнього середовища), температури (масла), температури (обмотки), напруги	6200
Нормуючий перетворювач	2100
Мультиплексор	4800
CPU (центральний процесор)	9700
Всього	22800
Монтажні та налагоджувальні роботи (10%)	2280
Всього капітальні вкладення	25080

Отже, капітальні витрати $E_k = 25080$ грн.

5.1 Розрахунок експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати включають витрати на забезпечення нормального функціонування певного технічного рішення в період його експлуатації в розрахунку на рік.

Експлуатаційні витрати E включають:

- 1) амортизаційні відрахування E_a ;
- 2) заробітна плата E_{zn} обслуговуючого персоналу (основна, додаткова, нарахування на заробітну плату);

- 3) витрати на силову електроенергію E_e ;
- 4) витрати на поточний ремонт E_{np} ;
- 5) інші витрати $E_{ін}$.

Тобто:

$$E = E_a + E_{zn} + E_e + E_{np} + E_{ін}. \quad (5.4)$$

5.2 Розрахунок амортизаційних відрахувань

Річні амортизаційні відрахування становлять (норма амортизації 10 % в рік):

$$E_a = 10\% \cdot E_k, \quad (5.5)$$

$$E_a = 0,1 \cdot 25080 = 2508 \text{ (грн)}.$$

5.3 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Згідно ПУЕ обслуговувати установки до 1000 В може робітник, у якого розряд не нижче четвертого, група допуску не нижча третьої групи по електробезпеці.

Тарифна сітка погодинників приведена в таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Тарифна сітка погодинників

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу розраховуємо за формулою:

$$E_{zn} = E_{zo} + E_{зо} + E_{зн}, \quad (5.5)$$

де $E_{зо}$ – основна заробітна плата по тарифу;

$E_{зд}$ – додаткова заробітна плата;

$E_{зн}$ – нарахування на заробітну плату.

$$E_{зо} = NT_I K \Phi_{ef} K_c \beta, \quad (5.6)$$

де N – кількість робітників, що обслуговують установку ($N = 1$ чол.);

T_I – погодинна тарифна ставка робітника 1-го розряду ($T_I = 22$ грн/год);

K – тарифний коефіцієнт ($K = 2,33$);

Φ_{ef} – ефективний фонд робочого часу на обслуговування електропривода подачі за рік (приймаємо $\Phi_{ef} = 110$ год);

K_c – коефіцієнт співвідношення, встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_c = 1$);

β – частка часу, який витрачає робітник на обслуговування установки в загальному часі своєї роботи ($\beta = 1$).

Розраховуємо основну заробітну плату по тарифу:

$$E_{зо} = 22 \cdot 2,33 \cdot 110 \cdot 1 \cdot 1 = 5638,6 \text{ (грн)}.$$

Додаткова заробітна плата $E_{зд}$ становить 10% основної заробітної плати:

$$E_{зд} = 5638,6 \cdot 0,1 = 564 \text{ (грн)}.$$

Розрахунок нарахувань на заробітну плату зведемо в таблицю 5.2.

Таблиця 5.2 – Розрахунок нарахувань на заробітну плату

Показник	Сума
Основна заробітна плата $E_{зо}$, грн.	5638,6
Додаткова заробітна плата $E_{зд}$, грн.	564
Разом основна і додаткова заробітна плата, $(E_{зо} + E_{зд})$, грн.	6202,6

Продовження таблиці 5.2.

Показник	Сума
Єдиний внесок на загальнообов'язкове соціальне страхування (22%), грн.	1364,6
Всього нарахування, грн	7567,2

Таким чином, маємо:

$$E_{zn} = 5638,6 + 564 + 1364,6 = 7567,2 \text{ (грн)}.$$

5.4 Розрахунок витрат на силову електроенергію

Витрати на силову електроенергію знаходимо за формулою:

$$E_e = \frac{P}{\eta} B \Phi_{ef} K_{vm} K_z, \quad (5.7)$$

де B – вартість електроенергії. Ціна на універсальні послуги для малих побутових споживачів (Постанова НКРЕКП від 11.12.2018 №1863), електроустановки яких приєднані до електричних мереж АТ «Вінницяобленерго» згідно з класом напруги з ПДВ складає $B = 3,44$ грн/кВт·год);

P – номінальна потужність;

η – коефіцієнт корисної дії ($\eta = 0,85$);

T_{ef} – ефективний фонд часу роботи в рік;

K_{vm} – коефіцієнт ввімкнення (використання за часом $K_{vm} = 0,8$);

K_z – коефіцієнт завантаження (використання за потужністю).

Номінальна потужність складає 180 Вт. Коефіцієнт ввімкнення приймаємо рівним 0,8, а коефіцієнт завантаження рівний 0,72.

Ефективний фонд робочого часу при режимі роботи в 1 зміну протягом 95% часу за рік становить:

$$\Phi_{ef} = 220 \cdot 8 \cdot 0,95 = 1672 \text{ (год).}$$

Отже, маємо:

$$E_e = \frac{0,18}{0,85} \cdot 3,44 \cdot 1672 \cdot 0,8 \cdot 0,72 = 701,6 \text{ (грн/рік).}$$

5.5 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання

Поточний ремонт електроустаткування здійснюється на місці встановлення з його відключенням і зупинкою, силами змінного ремонтного персоналу.

Витрати на проведення ремонтних робіт включають витрати на комплектуючі і запасні частини та інші елементи, які підлягають заміні та витрати на оплату праці персоналу, який проводить ремонтні роботи. Для визначення витрат на оплату праці робітників-ремонтників необхідно розрахувати трудомісткість ремонтних робіт. Трудомісткість ремонтних робіт визначається згідно графіка планово-попереджувальних ремонтів (таблиця 5.3), у якому зазначено тривалість міжремонтних періодів та трудомісткість кожного виду ремонту.

Таблиця 5.3 – Графік ремонтів

Найменування обладнання	Види ремонтів по місяцях												Трудомісткість, люд·год
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Датчики			4				4				4		12
Нормуючий перетворювач		5				5					6		16
Мультиплексор				4				4				5	13
СРУ		6				6				8			20
Сенсори	4				4				5				13
Загальна трудомісткість												74	

Вважаємо, що ремонтні роботи проводить електромонтер шостого розряду. З врахуванням того, що нам відома трудомісткість робіт (таблиця 5.3), основну заробітну плату розрахуємо за формулою:

$$E_{zo} = T_I K \Phi_{ef}, \quad (5.8)$$

$$E_{zo} = 22 \cdot 2,7 \cdot 74 = 4396 \text{ (грн).}$$

Нарахування на заробітну плату (22%):

$$E_{zn} = 4396 \cdot 0,22 = 967,1 \text{ (грн).}$$

Всього витрати на заробітну плату для проведення ремонтних робіт становлять:

$$E_{zp} = 4396 + 967,1 = 5363,1 \text{ (грн).}$$

Витрати на матеріали, комплектуючі та запасні частини для поточного ремонту приймають рівними 15% витрат від основної заробітної плати. Тобто, витрати на матеріали для ремонтів становить:

$$E_m = 5363,1 \cdot 0,15 = 804,5 \text{ (грн).}$$

Всього витрати на поточний ремонт обладнання становлять:

$$E_{np} = E_{zp} + E_m, \quad (5.9)$$

$$E_{np} = 5363,1 + 804,5 = 6167,6 \text{ (грн).}$$

5.6 Інші витрати

Розмір інших витрат приймаємо рівним 5% від загальної суми попередніх витрат. Тобто:

$$E_{in} = (E_a + E_{zn} + E_e + E_{np}) \cdot 5\%, \quad (5.9)$$

$$E_{in} = (2508 + 7576,2 + 701,6 + 6167,6) \cdot 0,05 = 847,2 \text{ (грн).}$$

Розрахунок загальної суми експлуатаційних витрат наведемо в таблиці 5.4.

Таблиця 5.4 – Розрахунок сумарних експлуатаційних витрат

Найменування витрат	Сума
Амортизаційні відрахування E_a , грн.	2508
Заробітна плата E_{zn} обслуговуючого персоналу, грн.	7567,2
Витрати на електроенергію E_e , грн.	701,6
Витрати на поточний ремонт E_{np} , грн.	6167,6
Інші витрати E_{in} , грн.	847,2
Всього експлуатаційні витрати E , грн.	17792

В даному розділі було проведено розрахунок капітальних вкладень створення засобу для діагностування трансформатора. Була розрахована основна заробітна плата, витрати на електроенергію, на планові ремонти та інші витрати. Оскільки, прибуток від засобу невідомий або не розраховується як такий, то термін окупності неможливо розрахувати, тому зупиняємося на експлуатаційних витратах.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання магістерської кваліфікаційної роботи отримано такі результати:

1. Проаналізовані методи та способи визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора, в результаті чого встановлено, що найбільше впливають на його зменшення вологість твердої ізоляції, вміст кислот в маслі, підвищена концентрація кисню в маслі та зовнішня температура навколишнього середовища.

2. Удосконалено математичну модель для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора, яка дозволяє більш точно оцінити залишковий ресурс обмоток.

3. Запропоновано визначати ресурс силового масляного трансформатора за такими показниками: температурою верхніх шарів масла в баку, струмом в колі вторинної обмотки, напругою, коефіцієнтом потужності, температурою навколишнього середовища, тиском масла в високовольтному вводі, концентрацією газів у маслі високовольтного вводу, швидкістю зростання концентрації газів у маслі високовольтного вводу, а також за технічним станом пристрою регулювання напруги під навантаженням. Розроблено граф функціонування блока обробки інформації структури пристрою, який характеризує стани переходу системи при різних режимах роботи трансформатора: в нормальному та режимах перевантаження за чотирма параметрами. Здійснено аналітичний опис функціонування графа за допомогою апарату секвенцій. Це дало можливість синтезувати структуру пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора, яка враховує всі зазначені вище показники, які впливають на зменшення цього ресурсу. Крім визначення ресурсу трансформатора, як в нормальному режимі роботи, так і в режимі перевантаження, пристрій має здатність контролювати допустимий тиск в маслі високовольтного вводу та визначати неодноразовість перемикачів пристрою регулювання напруги під навантаженням при пофазному

перемиканні відпайок. При перевищенні хоча б одного з показників трансформатора допустимого значення, подається сигнал в коло сигналізації та відображається інформація на відповідному індикаторі. Використання отриманих результатів дозволить підвищити надійність функціонування силових масляних трансформаторів.

4. Розглянуті питання з охорони праці та здійснено економічний розрахунок по даній розробці.

Результати досліджень опубліковані в роботах [15], [34], [35], [40].

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Конограй С.П. Применение модели старения твёрдой изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации / С.П. Конограй // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2010. – №1. – С. 43-45.
2. Грабко В. В. Математична модель для діагностування обмоток силового масляного трансформатора з урахуванням факторів зовнішнього впливу / В.В. Грабко, І. В. Бальзан // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2011. – Вип. 3/2011 (15). – С. 134–136
3. Поляков М. А., Климов С.И. Исследование температуры наиболее нагретой точки силового трансформатора. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi/Tezi_EES_%20pdf/336.PDF
4. Поляков М.А. Оценка остаточного ресурса изоляции на основе учета индивидуальных особенностей жизненного цикла силового трансформатора / М.А. Поляков, В.В. Василевский // *Електротехніка і Електромеханіка*. – 2014. – №3. С. 38-41.
5. Поляков М.А. Моделирование динамики распределений дефектов в изделиях в ходе технологического процесса /М.А. Поляков, В.В. Василевский // *Системные технологии*. – 2013. – №4(87). – С. 73-81.
6. Матусевич О.О. Удосконалення системи діагностування силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/147449?locale-attribute=ru>
7. Матусевич О.О. Метод визначення технічного ресурсу силового трансформатора тягових підстанцій в умовах експлуатації / О.О. Матусевич, М.В. Хворост, В.В. Малишева // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2017. – 3/8 (87).
8. Васин В.П. Ресурс изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов / В.П. Васин, А.П. Долин // *ЭЛЕКТРО. Электротехника,*

электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2008. – №3. – С. 12-17.

9. Васин В.П. Оценки выработанного ресурса изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов // В.П. Васин, А.П. Долин. ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. – №3. – С. 37-41.

10. Ясинський Ю.О. Нікішин. Прогнозування технічного стану ізоляції електрообладнання з урахуванням якості споживаної електроенергії / Ю.О. Ясинський, А.О. Немчинов, О.М. Нікішин // Системи обробки інформації. – 2010. – Випуск 9 (90). – С. 130-133.

11. Денисюк С.П., Притискач І.В. Загальні підходи до побудови систем моніторингу силових трансформаторів з використанням стохастичних моделей. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ied.org.ua/ansborn/ansb37.s12.html>

12. Лежнюк П.Д. Використання генетичного алгоритму при діагностуванні РПН трансформаторів / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, М.І. Пиріжок // Наукові праці ДонНТУ. – 2008. – Випуск 8 (140). – С. 175-178.

13. Костерев Н.В. Нечеткие алгоритмы оценки технического состояния и прогнозирования остаточного ресурса электрооборудования / Н.В. Костерев, Е.И. Бардик, Р.В. Вожаков, Т.Ю. Курач // Наукові праці ДонНТУ. – 2008. – Випуск 8 (140). – С. 65-70.

14. Лежнюк П.Д. Оперативне діагностування високовольтного обладнання в задачах оптимального керування режимами електроенергетичних систем / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, О.В. Нікіторович // Технічна електродинаміка. – 2012. – №3. – С. 35-36.

15. Розводюк М. П. Визначення залишкового ресурсу силового масляного трансформатора на базі нечіткої логіки / М.П. Розводюк, В.В. Овчарук, В.Є. Вдовиченко, І.М. Овчар // Monografia. Pokonferencyjna. Science, research, development #16. Technics and technology. Barcelona 29.04.2019 - 30.04.2019. – Zbiór artykułów naukowych enzowanych. Zbiór artykułów naukowych z Konferencji

Miedzynarodowej Naukowo-Praktycznej (on-line) zorganizowanej dla pracowników naukowych uczelni, jednostek naukowo-badawczych oraz badawczych z państw obszaru byłego Związku Radzieckiego oraz byłej Jugosławii. (30.04.2019). – Warszawa, 2019. – 84 str. – S.71-77.

16. Лиля В.Б, Костюков А.В. Экспертная система диагностики силовых трансформаторов. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/ekspertnaya-sistema-dagnostiki-silovyh-transformatorov/viewer>

17. Лежнюк П.Д. Діагностування силових трансформаторів з використанням нечітких множин / П.Д. Лежнюк, О.Є. Рубаненко, І.А. Жук // Вісник ВПІ. – 2005. – №1. – С. 43-51.

18. Рубаненко О.Є. Нейро-нечітке моделювання в задачах оперативного діагностування електрообладнання. – [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/3772/1/03.pdf>

19. Зозуля Д.В. Разработка и научное обоснование технических предложений по повышению надежности, энергетической эффективности и продлению ресурса трансформаторов ТНЦ-1250000/330 на блоках АЭС Украины / Д.В. Зозуля // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. – 2013. – Выпуск 20. – С. 57-67.

20. Багаутдинов И.З. Оценка состояния и остаточного ресурса трансформаторного оборудования / И.З. Багаутдинов // Теория и практика современной науки. – 2016. – №12(18). – С. 1-5. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.modern-j.ru

21. Рубаненко О.Є. Визначення дефектів трансформаторного обладнання з використанням частотних діагностичних параметрів / О.Є. Рубаненко, М.П. Лабзун, М.О. Гришук // Вісник НТУ "ХПІ". – 2017. – № 23 (1245). – С. 41-46.

22. Хренников А. Ю. Диагностика силовых трансформаторов в Самарэнерго методом низковольтных импульсов / А. Ю. Хренников, О.М. Киков // Электрические станции. – 2003. – № 11. – С. 47–51.

23. Осотов В. Н. Оценка механического состояния обмоток крупных трансформаторов без их разборки / В. Н. Осотов, В. Н. Рушинский, В.В. Рушинский и др. // Электрические станции. – 2003. – № 6. – С. 51–57.

24. Показатели состояния изоляции для оценки возникновения внутренних коротких замыканий в силовых трансформаторах / В. Б. Ванин, Ю. Н. Львов, М. Ю. Львов, Б. Н. Неклепаев // Электрические станции. – 2003. – №2. – С. 65–69.

25. Monitoring of Winding Displacement in HV Transformer in Service / R. Malewski, A. Yu. Khrennikov, O. A. Shlegel, A. G. Dolgoplov CIGRE, Italy, Padua, 1995, 4-9 Sept.

26. Khrennikov A. Yu. Short-circuit performance of power transformers. LVI Test experience at Samaraenergo Co and at Power Testing Station in Togliatti, including fault diagnostics / A.Yu. Khrennikov CIGRE, Hungary, Budapest, 1999, 14-17 June.

27. Lapworth J.A. Transformer Winding Movement Detection by Frequency Response Analysis (FRA) / J.A. Lapworth, A.J. McGrail - Sixty-Sixth Annual International Conference of Doble Clients, 1999, April.

28. Хренников А. Ю. Контроль изменения индуктивного сопротивления трансформатора для определения повреждений в обмотках / А. Ю. Хренников, О.А. Шлегель // Энергетик. – 2004. – № 2. – С. 27–30.

29. Василевский В.В. Оценка расхода ресурса бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора с помощью уточненной формулы интеграла старения / В.В. Василевский // Електротехніка і Електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 16-19.

30. Пат. 135680 UA, МПК G01R 31/06. Пристрій для контролю технічного стану силового масляного трансформатора / Розводюк М.П., Овчарук В.В., Бомбик В.С., Левашов С.С. – № u 201901342; заявл. 11.02.2019; опубл. 10.07.2019, Бюл. № 13. – 10 с. : кресл.

31. Пат. 135897 UA, МПК G01R 31/06. Пристрій для діагностування силового масляного трансформатора / Розводюк М.П., Бомбик В.С., Овчарук

В.В. – № u 201901323; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.07.2019, Бюл. № 14. – 10 с. : кресл.

32. Пат. 57719 UA, МПК G01R 31/06. Пристрій для контролю технічного стану трансформатора [Текст] / М. П. Розводюк (Україна). – № u201009853; заявл. 09.08.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5. – 4 с. : кресл.

33. Розводюк М.П. Синтез структури пристрою для контролю технічного стану силового масляного трансформатора / М.П. Розводюк, С.С. Левашов // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2019), м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 11-30 травня 2019 р. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2019/paper/view/6231>

34. Пат. 135969 UA, МПК G07C 3/10. G07C 3/14, H02P 29/00. Пристрій для визначення залишкового ресурсу електричного двигуна / Розводюк М.П., Овчарук В.В., Овчар І.М., Вдовиченко В.Є. – № u 201901819; заявл. 22.02.2019; опубл. 25.07.2019, Бюл. № 14. – 16 с. : кресл.

35. Розводюк М.П. Визначення відносного зношення ізоляції обмоток силового масляного трансформатора / М.П. Розводюк, В.Є. Вдовиченко, К.М. Розводюк // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2020), м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 1-15 травня 2020 р. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2020/paper/view/8463>

36. Грабко В.В. Діагностування трансформаторів власних потреб та систем технологічних захистів енергоблока теплової електростанції: монографія / В.В. Грабко, Д.О. Березницький. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 124 с.

37. Захаров В. Н. Автоматы с распределенной памятью / В. Н. Захаров. – М. : Энергия, 1975. – 136 с.

38. Розводюк М. П. Синтез структури пристрою для визначення залишкового ресурсу асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором /

М. П. Розводюк, В. С. Бомбик // Вісник Вінницького політехнічного інституту.
– 2019. – №2 (143). – С. 52-60.
DOI <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2019-143-2-52-60>

39. Мокін Б. І. Математичні моделі та системи технічної діагностики основних електротехнічних систем міських трамваїв [Текст] : монографія / Б. І. Мокін, М. П. Розводюк. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 126 с. – ISBN 966-641-106-7.

40. Розводюк М. П. Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора / М.П. Розводюк, В.Є. Вдовиченко, К.М. Розводюк // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Випуск 3/2019 (47). – С.35-47. DOI: 10.30929/2072-2052.2019.3.47.35-47.

Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕМСАПТ
д.т.н., проф.
_____ В. М. Кутін
“ ___ ” _____ 2019 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ
на магістерську кваліфікаційну роботу
ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК
СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

08-16.МКР.001.00.000 ТЗ

Керівник роботи
_____ Розводюк М.П., к.т.н., доцент.
“ ___ ” _____ 2019 р.

Виконавець: ст. гр. ЕПА-18м
_____ Вдовиченко В.Є.....
“ ___ ” _____ 2019 р.

1 Загальні відомості

Повне найменування дослідження – «Визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора».

Скорочене найменування розробки – «Діагностування трансформатора».

Замовник – кафедра електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Дослідження призначені для підвищення надійності функціонування силових масляних трансформаторів.

Можуть бути використані на підстанціях, де встановлені трансформатори.

4 Вимоги до розробки

Результати досліджень повинні мати структуру пристрою для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора.

Комплектація розробки

Пояснювальна записка, структура пристрою для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора та опис її роботи.

6 Технічні характеристики

Можливість здійснювати визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора в реальному часі його функціонування.

7 Джерела розробки

1. Конограй С.П. Применение модели старения твёрдой изоляции силовых маслонаполненных трансформаторов для их диагностики в режиме эксплуатации / С.П. Конограй // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – №1. – С. 43-45.
2. Поляков М. А., Климов С.И. Исследование температуры наиболее нагретой точки силового трансформатора. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kdu.edu.ua/statti/Tezi/Tezi_EES_%20pdf/336.PDF
3. Поляков М.А. Оценка остаточного ресурса изоляции на основе учета индивидуальных особенностей жизненного цикла силового трансформатора / М.А. Поляков, В.В. Василевский // Електротехніка і Електромеханіка. – 2014. – №3. С. 38-41.
4. Василевский В.В. Оценка расхода ресурса бумажной изоляции силового маслонаполненного трансформатора с помощью уточненной формулы интеграла старения / В.В. Василевский // Електротехніка і Електромеханіка. – 2015. – №1. – С. 16-19.
5. Пат. 135897 UA, МПК G01R 31/06. Пристрій для діагностування силового масляного трансформатора / Розводюк М.П., Бомбик В.С., Овчарук В.В. – № u 201901323; заявл. 11.02.2019; опубл. 25.07.2019, Бюл. № 14. – 10 с. : кресл.

8 Елементна база

Персональний комп'ютер, Microsoft Office, Microsoft Visio, Mathcad.

9 Конструктивне виконання

Структура пристрою повинна бути реалізована на доступній елементній базі.

10 Показники технологічності

При використанні розроблених математичних моделей та структури пристрою визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора повинне дотримуватися авторське право.

11 Технічне обслуговування

Технічне обслуговування здійснюється розробником або відповідними довіреними особами.

Додаток Б
Ілюстративні матеріали

Об'єкт, предмет, мета й задачі дослідження

Об'єкт дослідження: процеси зміни технічного стану в обмотках трансформатора.

Предмет дослідження: математичні моделі та структура пристрою для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора.

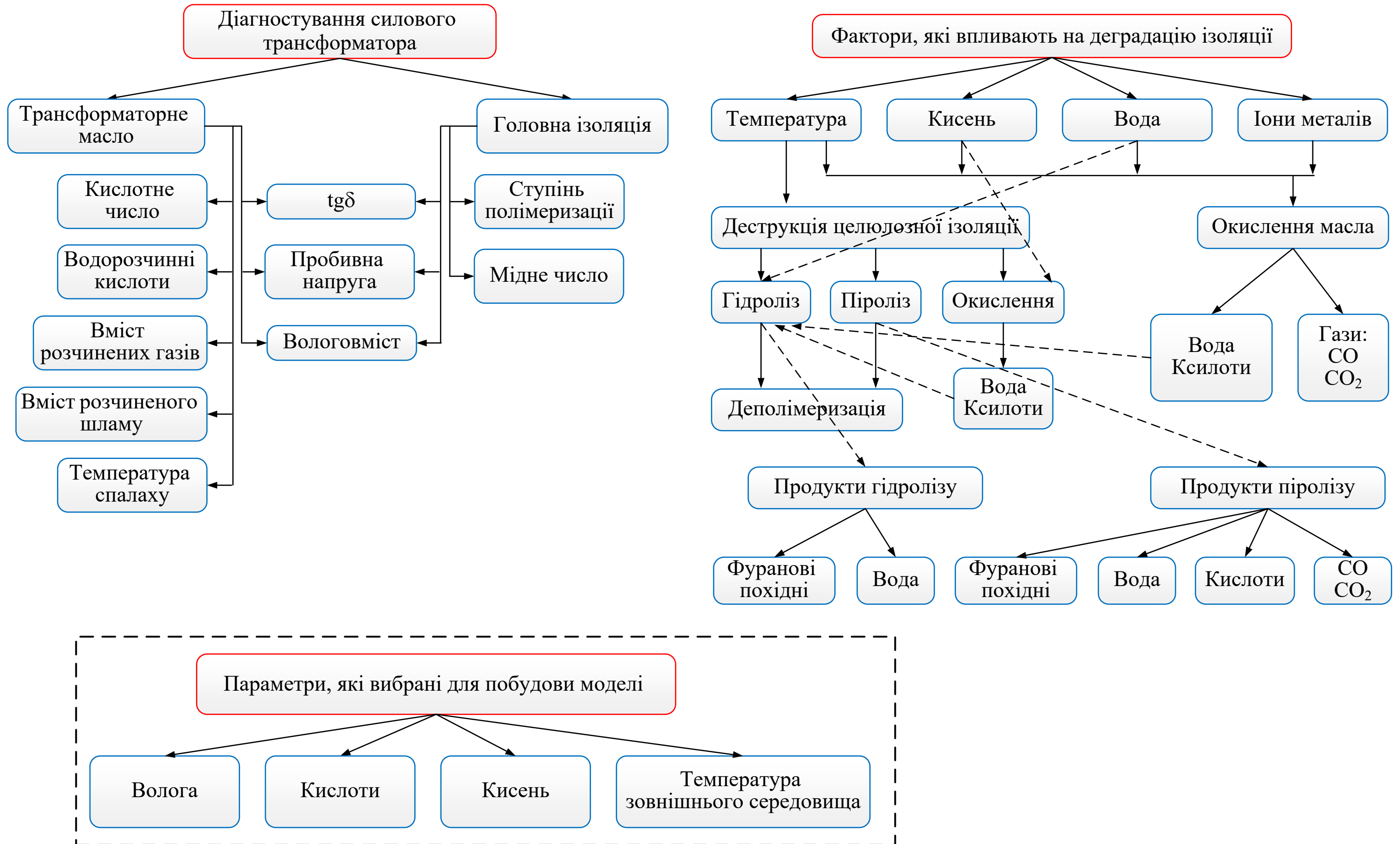
Мета роботи: підвищення надійності роботи силового масляного трансформатора за рахунок визначення залишкового ресурсу його обмоток.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

- проаналізувати методи та способи визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора;
- розробити математичну модель для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора;
- синтезувати структуру пристрою для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора.

Розв'язанню поставлених задач присвячена дана робота

Моделі ідентифікації технічного стану силового трансформатора



МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Відносне зношення ізоляції для інтервалу часу $(t_0, t_0 + T)$ відповідно до формули Монтзінгера:

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta}\right)} dt, \quad (1)$$

де t_0 – початок відліку;

T – тривалість зношення ізоляції;

Θ_h – температура найбільш нагрітої точки обмотки (приймаємо

$\Theta_h = 104^\circ\text{C}$);

Δ – інтервал температур Θ_h , на якому відбувається подвійне зношення ізоляції ($\Delta = 6^\circ\text{C}$ – для міжнародного стандарту ІЕС 60076-7).

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[V(K_{\text{вол}}, K_{\text{кисл}}, K_{O_2}, K_{\text{зовн},t}) \cdot e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta}\right)} \right] dt, \quad (2)$$

де V – швидкість відносного зношення ізоляції, в.о.:

$$V = K_{\text{вол}} \cdot K_{\text{кисл}} \cdot K_{O_2} \cdot K_{\text{зовн},t}. \quad (3)$$

Коефіцієнт впливу вологи:

$$K_{\text{вол}} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{\text{вол}} \leq C_{\text{вол.баз}}; \\ \left(\frac{C_{\text{вол}}}{C_{\text{вол.баз}}}\right)^\alpha, & \text{якщо } C_{\text{вол}} > C_{\text{вол.баз}}, \end{cases} \quad (4)$$

Коефіцієнт впливу кислотного числа:

$$K_{\text{кисл}} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{\text{кисл}} \leq C_{\text{кисл.баз}}; \\ \left(\frac{C_{\text{кисл}}}{C_{\text{кисл.баз}}}\right)^\beta, & \text{якщо } C_{\text{кисл}} > C_{\text{кисл.баз}}, \end{cases} \quad (5)$$

Коефіцієнт впливу вмісту кисню в маслі:

$$K_{O_2} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{O_2} \leq C_{O_2.\text{баз}}; \\ \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.\text{баз}}}\right)^\gamma, & \text{якщо } C_{O_2} > C_{O_2.\text{баз}}, \end{cases} \quad (6)$$

Коефіцієнт впливу зовнішньої температури:

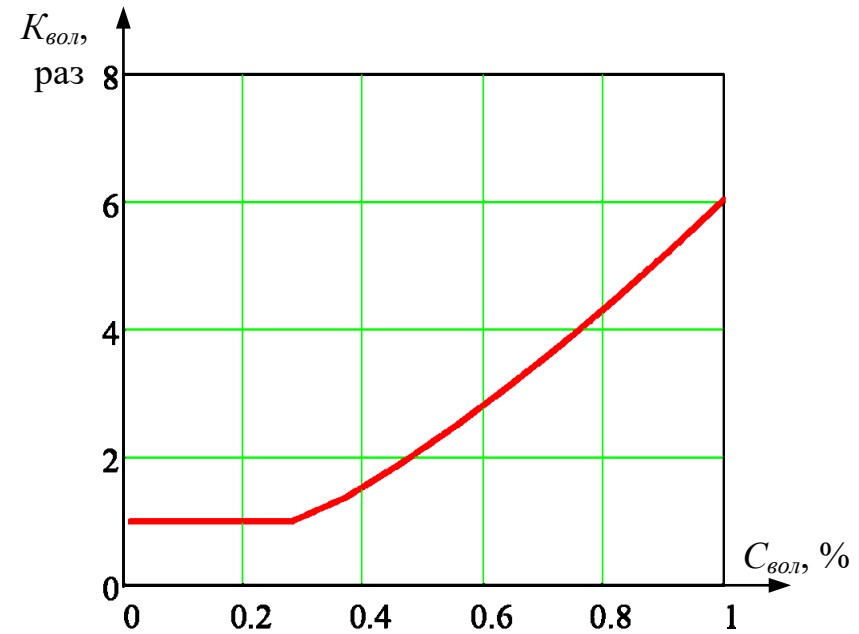
$$K_{\text{зовн},t} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } C_{\text{зовн},t} \leq C_{\text{зовн},t.\text{баз}}; \\ \left(\frac{C_{\text{зовн},t}}{C_{\text{зовн},t.\text{баз}}}\right)^\nu, & \text{якщо } C_{\text{зовн},t} > C_{\text{зовн},t.\text{баз}}, \end{cases} \quad (7)$$

$$V = \left(\frac{C_{\text{вол}}}{C_{\text{вол.баз}}}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{C_{\text{кисл}}}{C_{\text{кисл.баз}}}\right)^\beta \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.\text{баз}}}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{C_{\text{зовн},t}}{C_{\text{зовн},t.\text{баз}}}\right)^\nu. \quad (8)$$

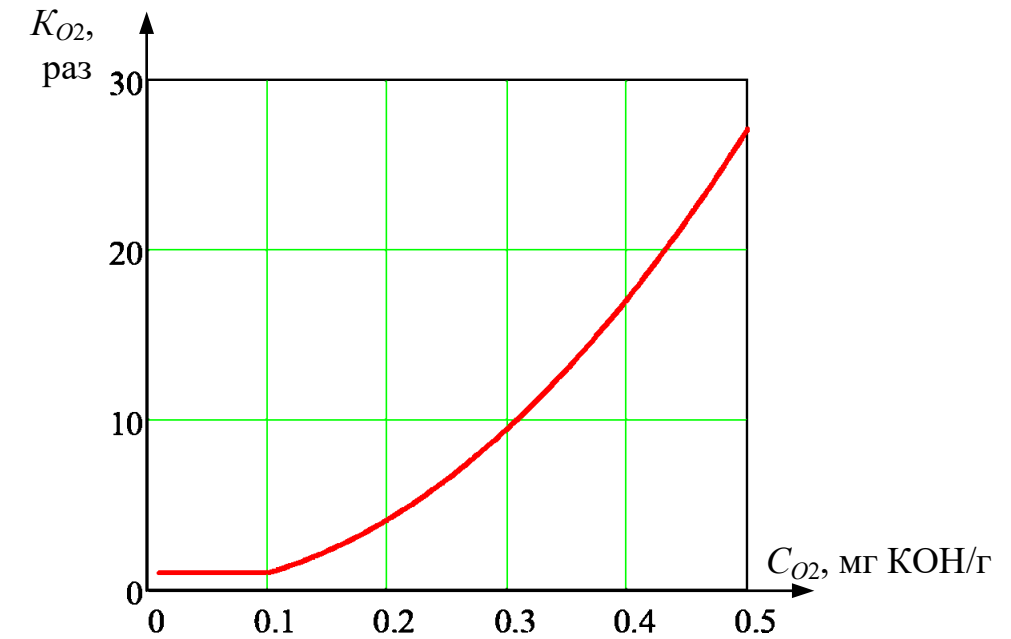
$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[\left(\frac{C_{\text{вол}}}{C_{\text{вол.баз}}}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{C_{\text{кисл}}}{C_{\text{кисл.баз}}}\right)^\beta \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.\text{баз}}}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{C_{\text{зовн},t}}{C_{\text{зовн},t.\text{баз}}}\right)^\nu \times e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta}\right)} \right] dt. \quad (9)$$

$$L(t_0, t_0 + T) = \left(\frac{C_{\text{вол}}}{C_{\text{вол.баз}}}\right)^\alpha \cdot \left(\frac{C_{\text{кисл}}}{C_{\text{кисл.баз}}}\right)^\beta \cdot \left(\frac{C_{O_2}}{C_{O_2.\text{баз}}}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{C_{\text{зовн},t}}{C_{\text{зовн},t.\text{баз}}}\right)^\nu \times \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[e^{\left(\frac{\ln 2 \cdot (\Theta_h - 98)}{\Delta}\right)} \right] dt. \quad (10)$$

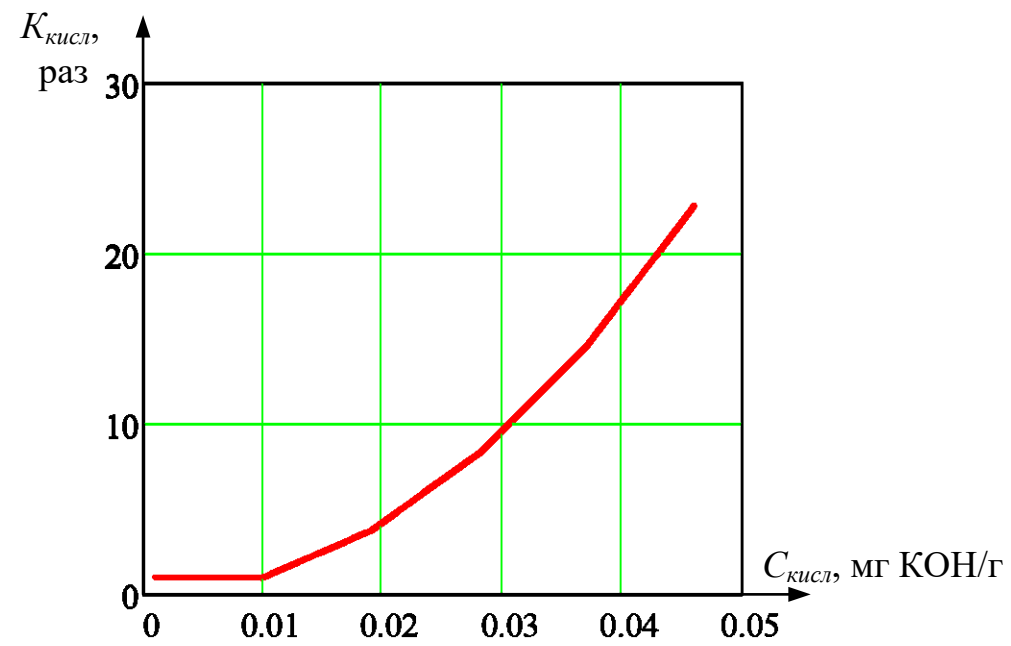
Дослідження впливу зміни значень параметрів математичної моделі на відносне зношення ізоляції обмоток



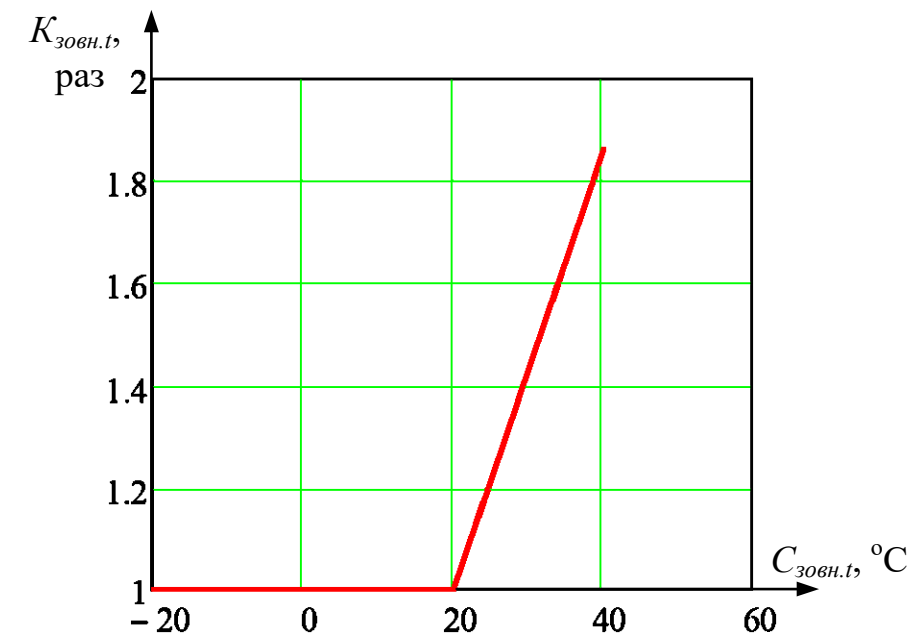
Динаміка зміни коефіцієнт впливу $K_{вол}$ при зміні вмісту вологості твердої ізоляції $C_{вол}$



Динаміка зміни коефіцієнт впливу K_{CO_2} при зміні вмісту кисню C_{O_2} в маслі

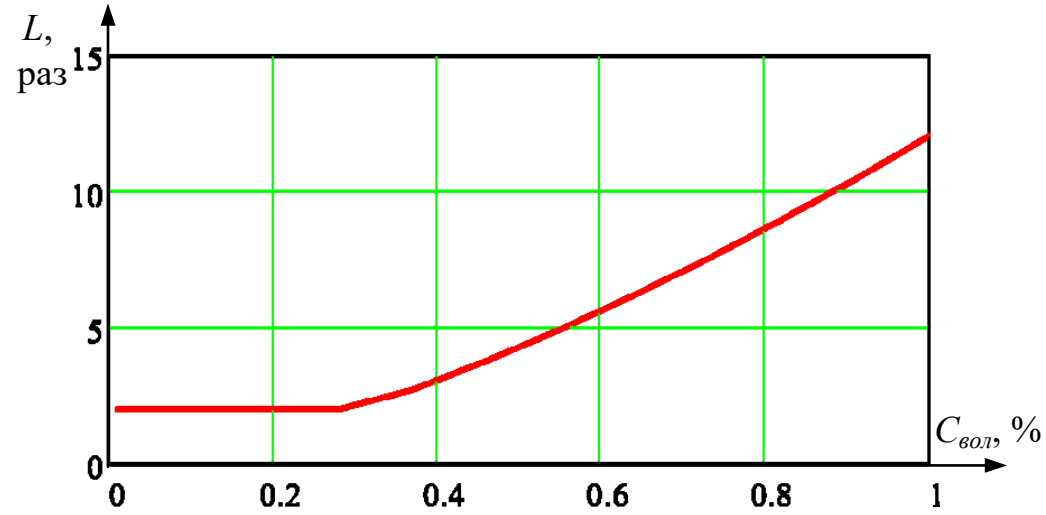


Динаміка зміни коефіцієнт впливу $K_{кисл}$ при зміні вмісту кислот в маслі $C_{кисл}$

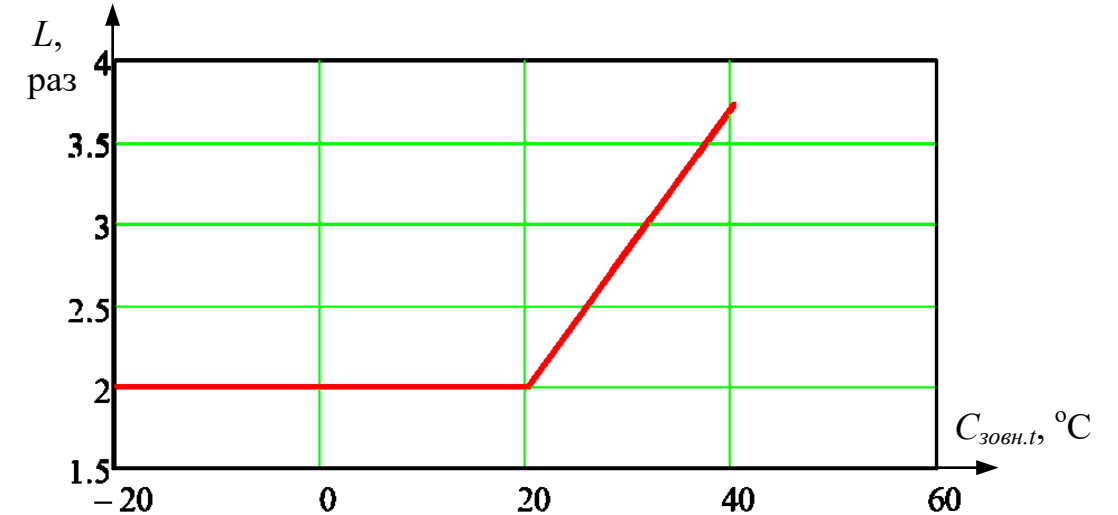


Динаміка зміни коефіцієнт впливу $K_{зовн.т}$ при зміні зовнішньої температури $C_{зовн.т}$

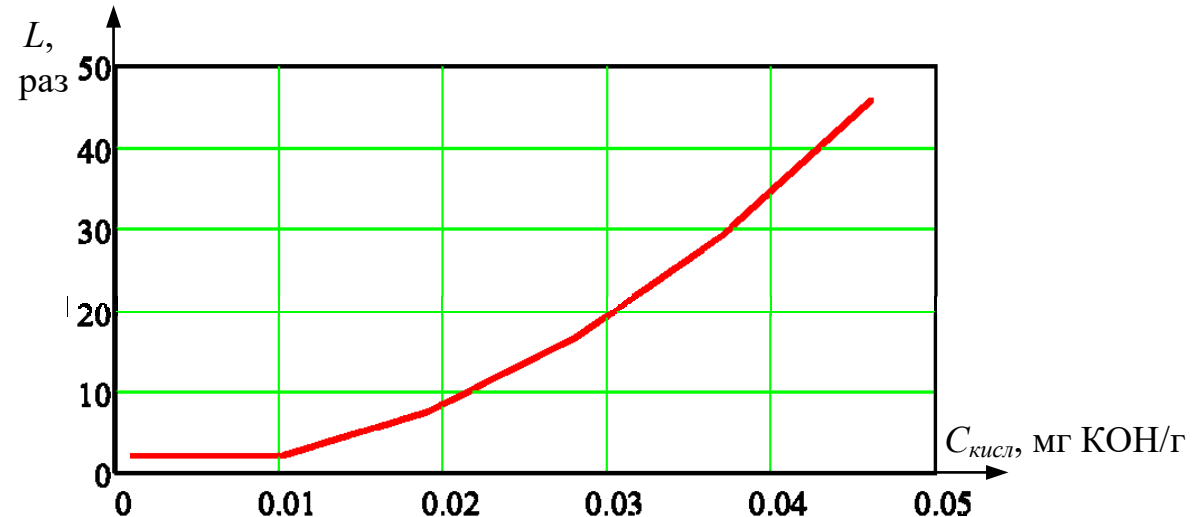
Дослідження впливу зміни значень параметрів математичної моделі на відносне зношення ізоляції обмоток



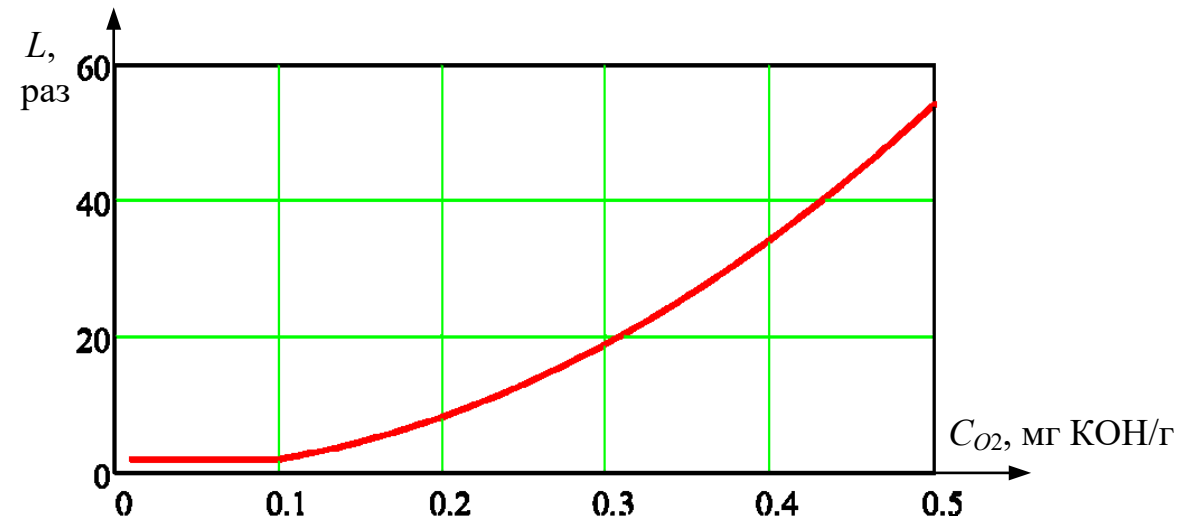
Відносне зношення ізоляції при зміні вмісту вологості твердої ізоляції



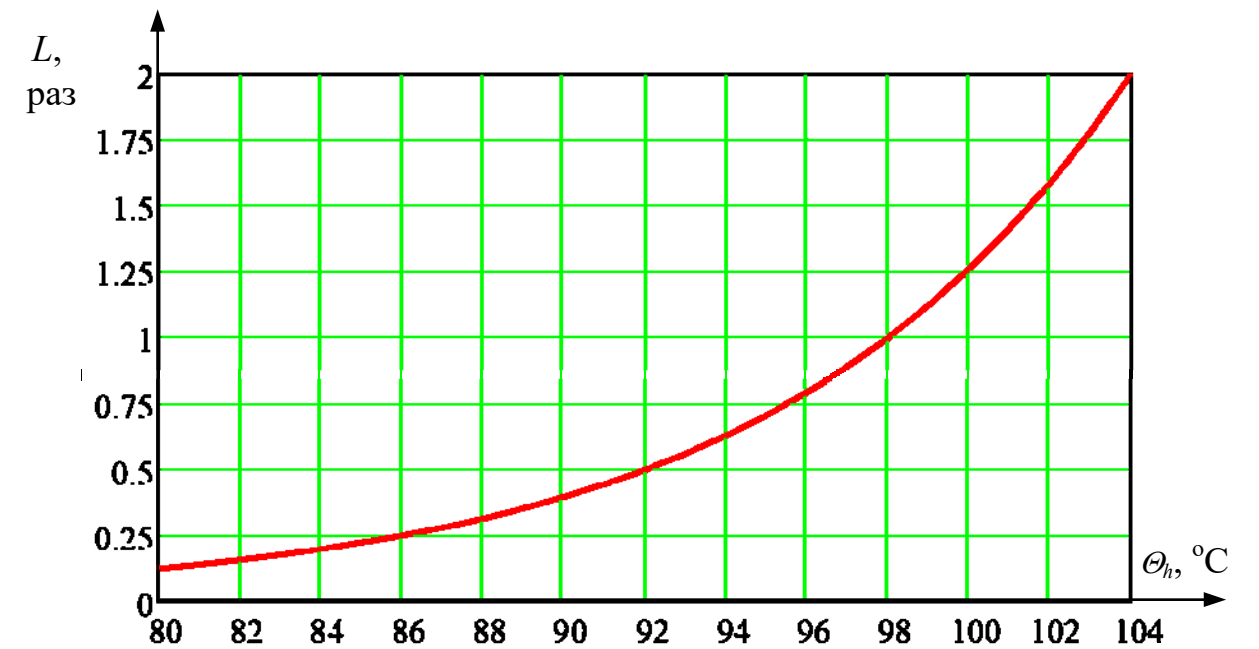
Відносне зношення ізоляції при зміні зовнішньої температури



Відносне зношення ізоляції при зміні вмісту кислот в маслі



Відносне зношення ізоляції при зміні вмісту кисню в маслі

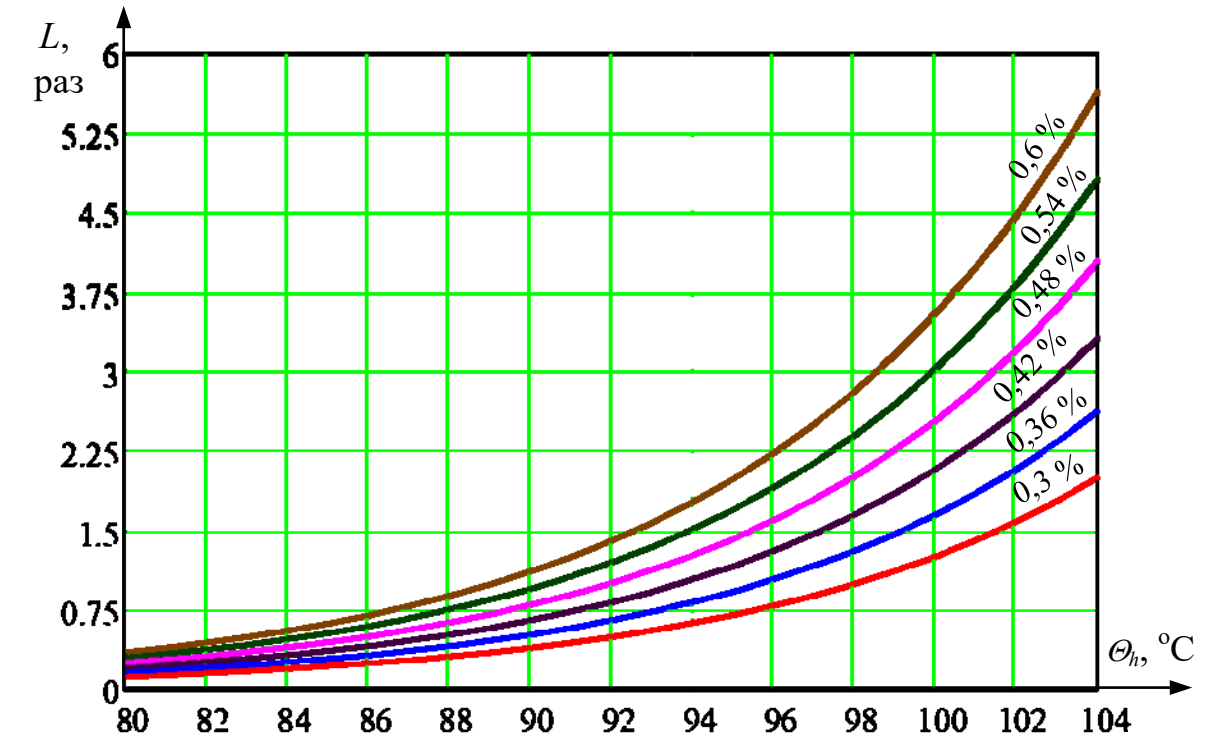


Залежність відносного зношення ізоляції при базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{O_2.баз}$ та $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

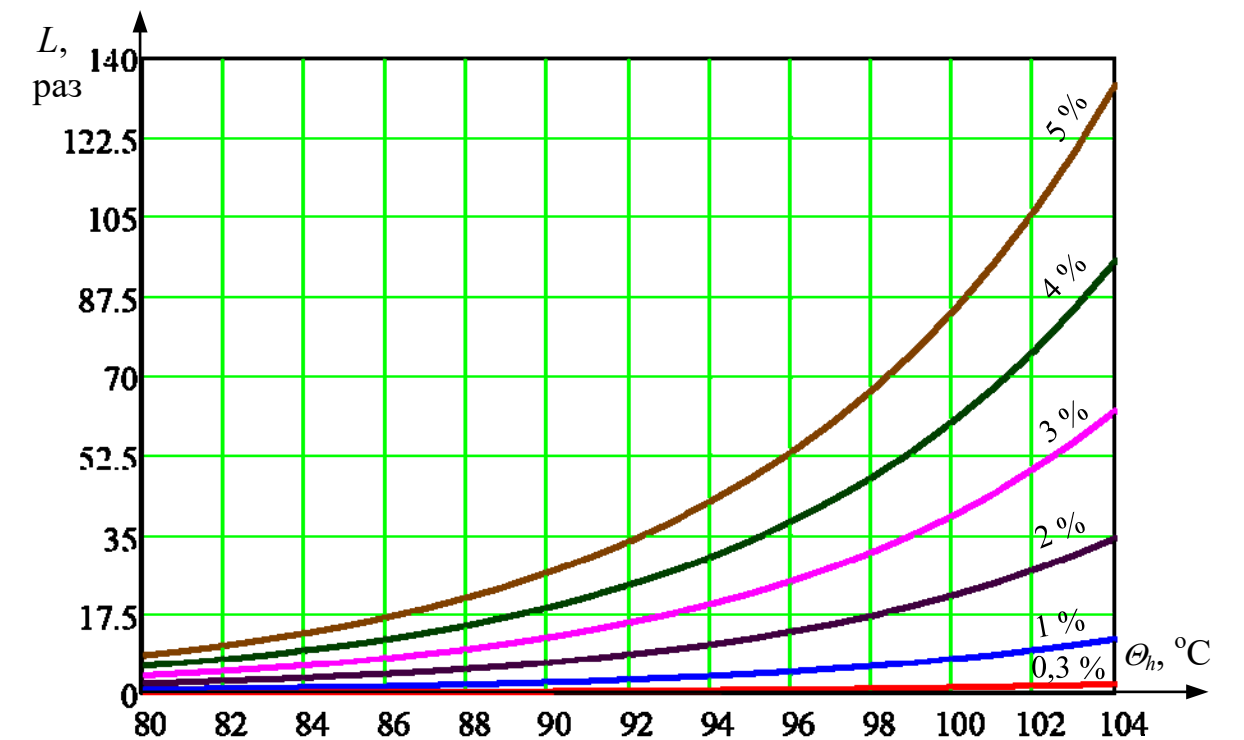
Дослідження впливу зміни вологості твердої ізоляції обмотки на її відносне зношення

Параметри відносного зношення ізоляції
при зміні $C_{вол}$ та базових значеннях $C_{кисл.баз}$, $C_{O2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$

Зміна $C_{вол}$		$K_{вол}, \%$	$L(90^\circ\text{C}), \%$	$L(100^\circ\text{C}), \%$	$L(104^\circ\text{C}), \%$
$C_{вол.баз}, \%$	0,3	1	0,4	1,26	2
$1,2C_{вол.баз}, \%$	0,36	1,31	0,52	1,65	2,63
$1,4C_{вол.баз}, \%$	0,42	1,65	0,66	2,08	3,31
$1,6C_{вол.баз}, \%$	0,48	2,02	0,8	2,54	4,03
$1,8C_{вол.баз}, \%$	0,54	2,41	0,95	3,03	4,81
$2C_{вол.баз}, \%$	0,6	2,82	1,12	3,55	5,63
$3,3C_{вол.баз}, \%$	1	6,03	2,39	7,59	12,05
$6,7C_{вол.баз}, \%$	2	17,11	6,79	21,56	34,23
$10C_{вол.баз}, \%$	3	31,12	12,35	39,21	62,23
$13,3C_{вол.баз}, \%$	4	47,63	18,9	60,01	95,27
$16,7C_{вол.баз}, \%$	5	69,91	26,56	84,31	133,83



Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{вол}$ від $C_{вол.баз}$ до $2C_{вол.баз}$ та базових значеннях $C_{кисл.баз}$, $C_{O2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

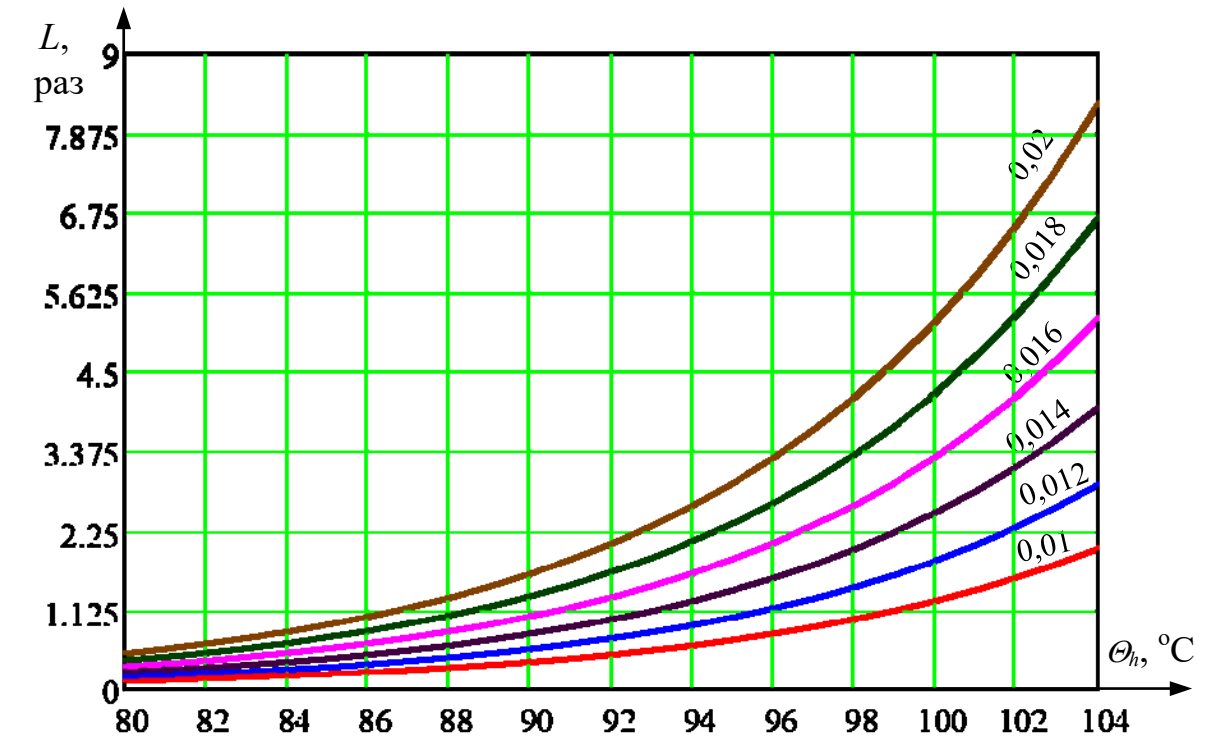


Залежність відносного зношення ізоляції при збільшенні $C_{вол}$ до 5% від $C_{вол.баз}$ та базових значеннях $C_{кисл.баз}$, $C_{O2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

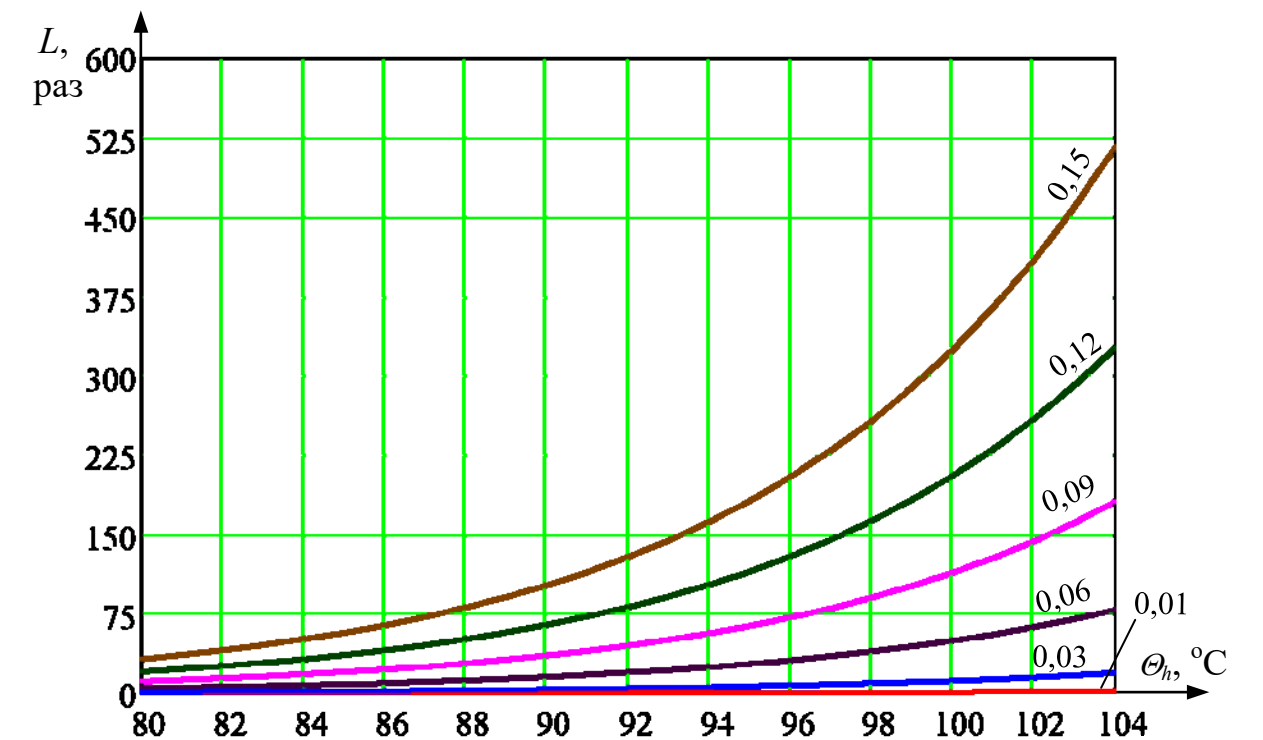
Дослідження впливу кислот в маслі на відносне зношення обмотки

Параметри відносного зношення ізоляції
при зміні $C_{кисл}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{O2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$

Зміна $C_{кисл}$		$K_{кисл}$, %	$L(90^{\circ}C)$, %	$L(100^{\circ}C)$, %	$L(104^{\circ}C)$, %
$C_{кисл.баз}$, %	0,01	1	0,4	1,26	2
$1,2C_{кисл.баз}$, %	0,012	1,45	0,58	1,831	2,906
$1,4C_{кисл.баз}$, %	0,014	1,99	0,79	2,511	3,987
$1,6C_{кисл.баз}$, %	0,016	2,62	1,04	3,302	5,242
$1,8C_{кисл.баз}$, %	0,018	3,34	1,32	4,204	6,673
$2C_{кисл.баз}$, %	0,02	4,14	1,64	5,217	8,282
$3C_{кисл.баз}$, %	0,03	9,51	3,77	11,98	19,02
$6C_{кисл.баз}$, %	0,06	39,37	15,63	49,61	78,75
$9C_{кисл.баз}$, %	0,09	90,41	35,88	113,9	180,81
$12C_{кисл.баз}$, %	0,12	163,05	64,71	205,43	326,1
$15C_{кисл.баз}$, %	0,15	257,62	102,24	324,59	515,25



Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{кисл}$ від $C_{кисл.баз}$ до $2C_{кисл.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{O2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

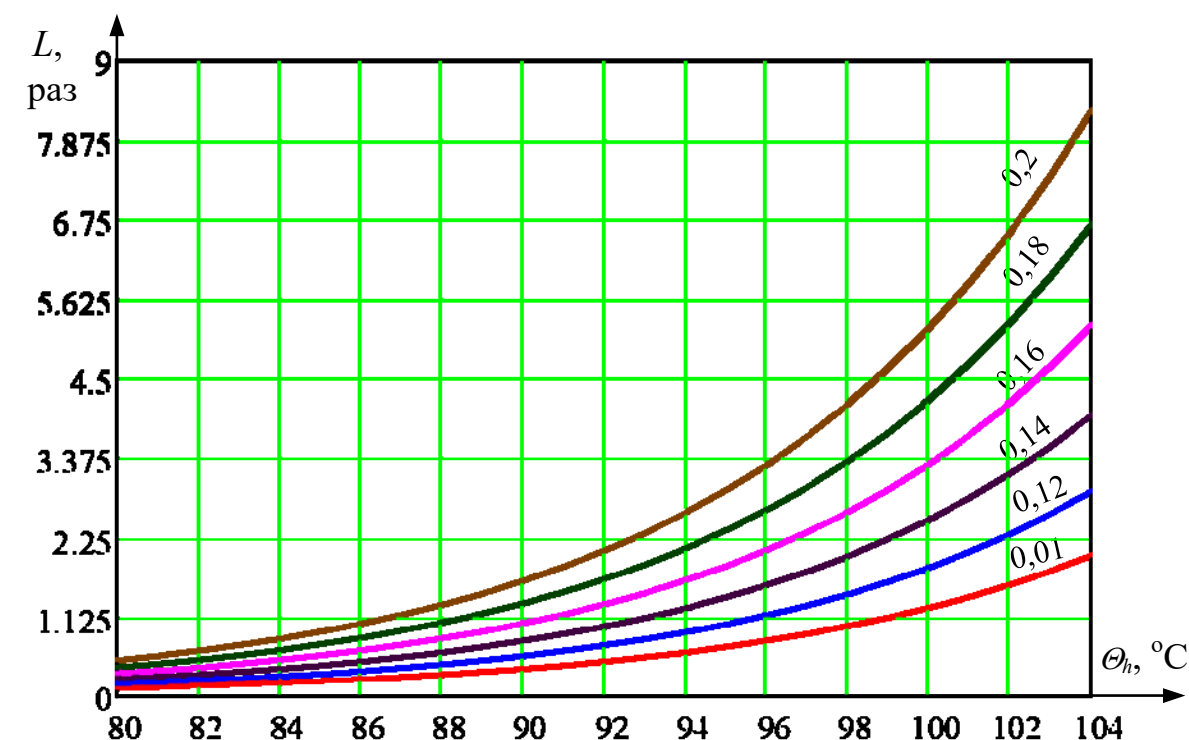


Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{кисл}$ від $C_{кисл.баз}$ до $15C_{кисл.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{O2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

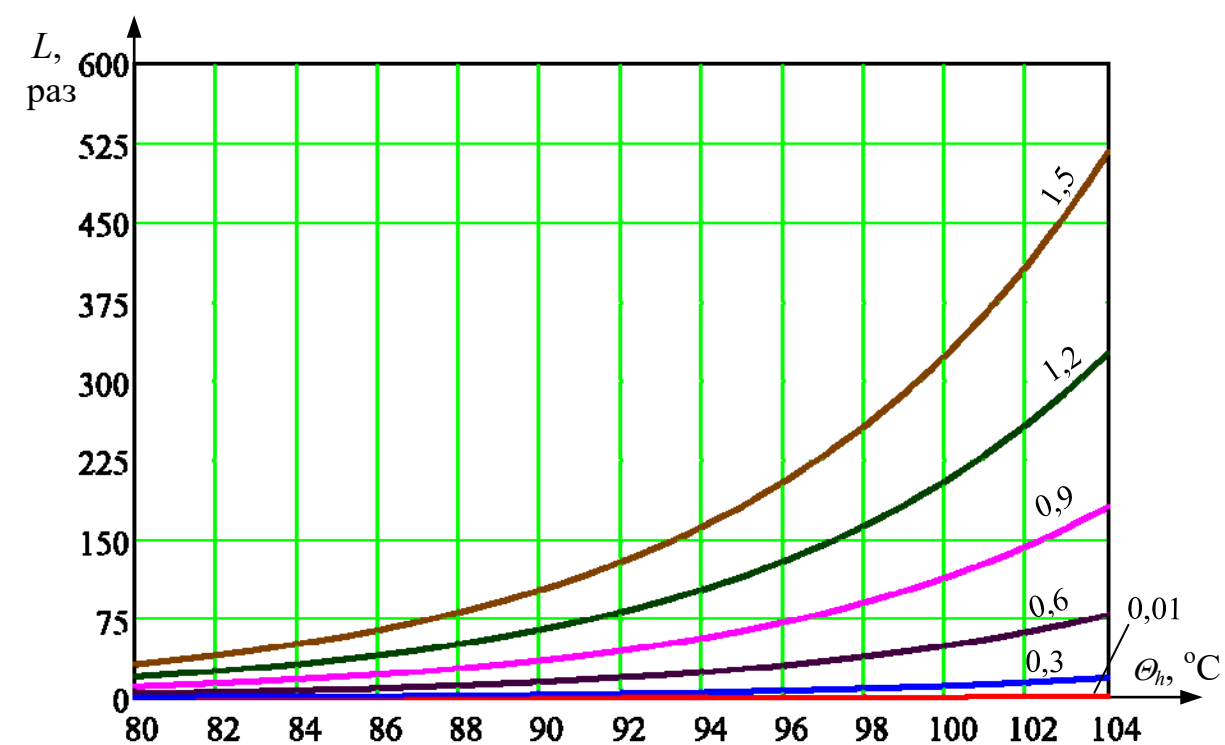
Дослідження впливу кисню в маслі на відносне зношення обмотки

Параметри відносного зношення ізоляції при зміні C_{O_2} та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$

Зміна C_{O_2}		$K_{O_2}, \%$	$L(90^\circ\text{C}), \%$	$L(100^\circ\text{C}), \%$	$L(104^\circ\text{C}), \%$
$C_{O_2.баз}, \%$	0,1	1	0,34	1,26	2
$1,2C_{O_2.баз}, \%$	0,12	1,45	0,58	1,83	2,91
$1,4C_{O_2.баз}, \%$	0,14	1,99	0,79	2,51	3,99
$1,6C_{O_2.баз}, \%$	0,16	2,62	1,04	3,3	5,24
$1,8C_{O_2.баз}, \%$	0,18	3,34	1,32	4,2	6,67
$2C_{O_2.баз}, \%$	0,2	4,14	1,64	5,22	8,28
$3C_{O_2.баз}, \%$	0,3	9,51	3,77	11,98	19,02
$6C_{O_2.баз}, \%$	0,6	39,37	15,63	49,61	78,49
$9C_{O_2.баз}, \%$	0,9	90,41	35,88	113,91	180,81
$12C_{O_2.баз}, \%$	1,2	163,05	64,71	205,43	326,1
$15C_{O_2.баз}, \%$	1,5	257,62	102,24	324,59	515,25



Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{кисл}$ від $C_{кисл.баз}$ до $2C_{кисл.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{O_2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

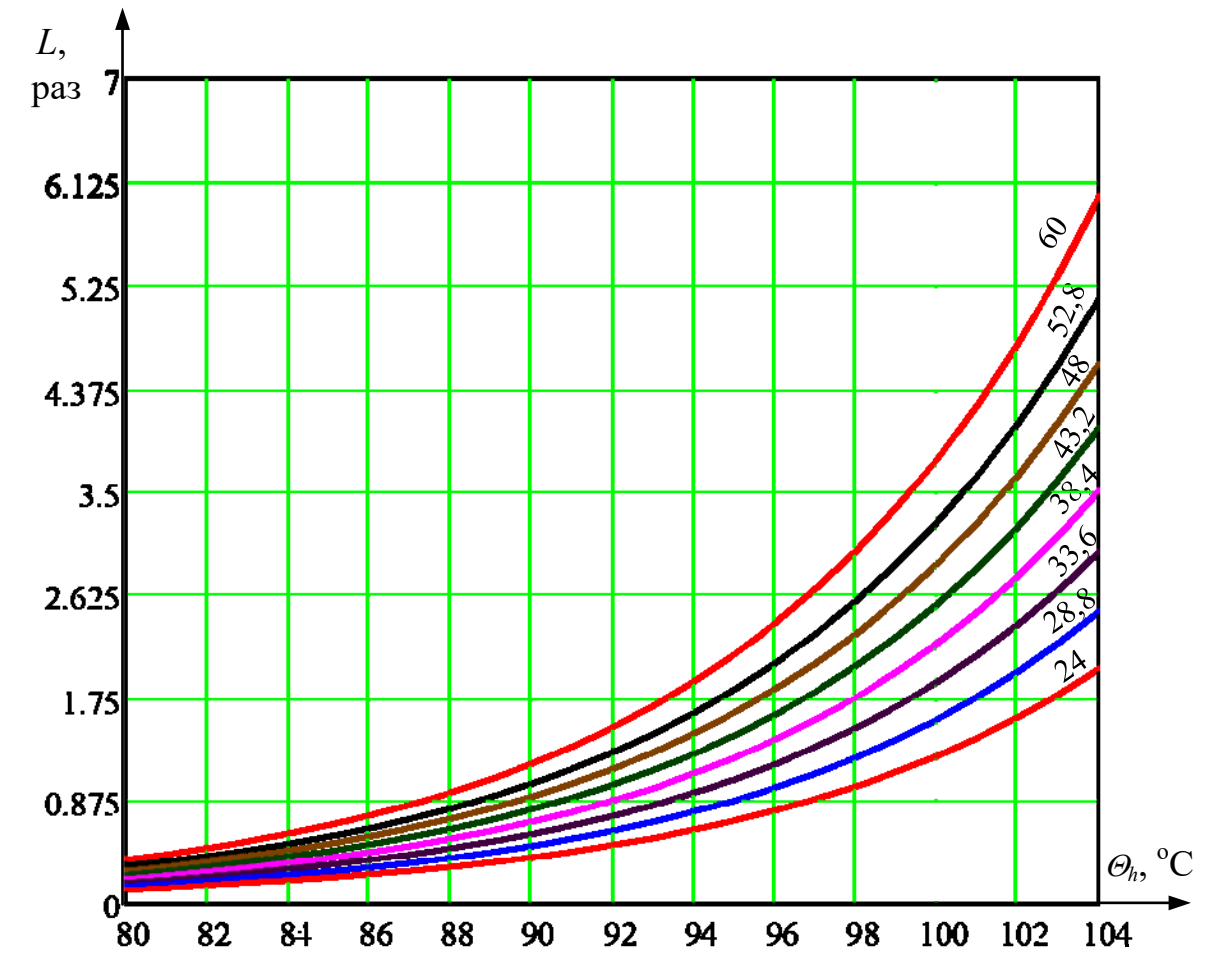


Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{кисл}$ від $C_{кисл.баз}$ до $15C_{кисл.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{O_2.баз}$, $C_{зовн.т.баз}$ від температури обмотки

Дослідження впливу температури зовнішнього середовища на відносне зношення обмотки

Параметри відносного зношення ізоляції при зміні $C_{зовн.т}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{O2.баз}$

Зміна $C_{зовн.т}$		$K_{зовн.т}$, %	$L(90^{\circ}\text{C})$, %	$L(100^{\circ}\text{C})$, %	$L(104^{\circ}\text{C})$, %
$C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	24	1	0,4	1,26	2
$1,2C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	28,8	1,25	0,49	1,57	2,49
$1,4C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	33,6	1,5	0,59	1,89	3
$1,6C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	38,4	1,76	0,7	2,22	3,52
$1,8C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	43,2	2,03	0,8	2,55	4,05
$2C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	48	2,3	0,91	2,9	4,59
$2,2C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	52,8	2,58	1,02	3,25	5,15
$2,5C_{зовн.т.баз}$, $^{\circ}\text{C}$	60	3	1,19	3,78	6,01

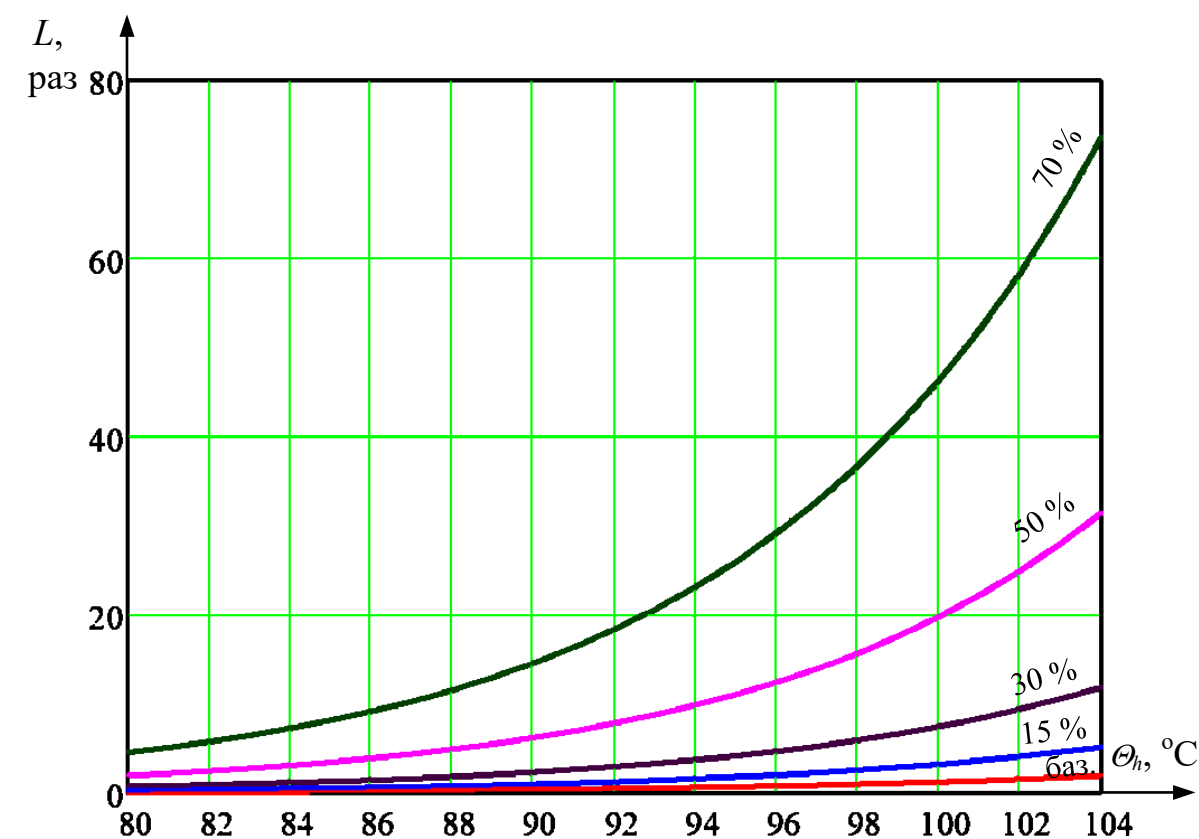


Залежність відносного зношення ізоляції при зміні $C_{зовн.т}$ від $C_{зовн.т.баз}$ до $2,5C_{зовн.т.баз}$ та базових значеннях $C_{вол.баз}$, $C_{кисл.баз}$, $C_{O2.баз}$ від температури обмотки

Дослідження впливу одночасної зміни значень всіх параметрів на відносне зношення обмотки

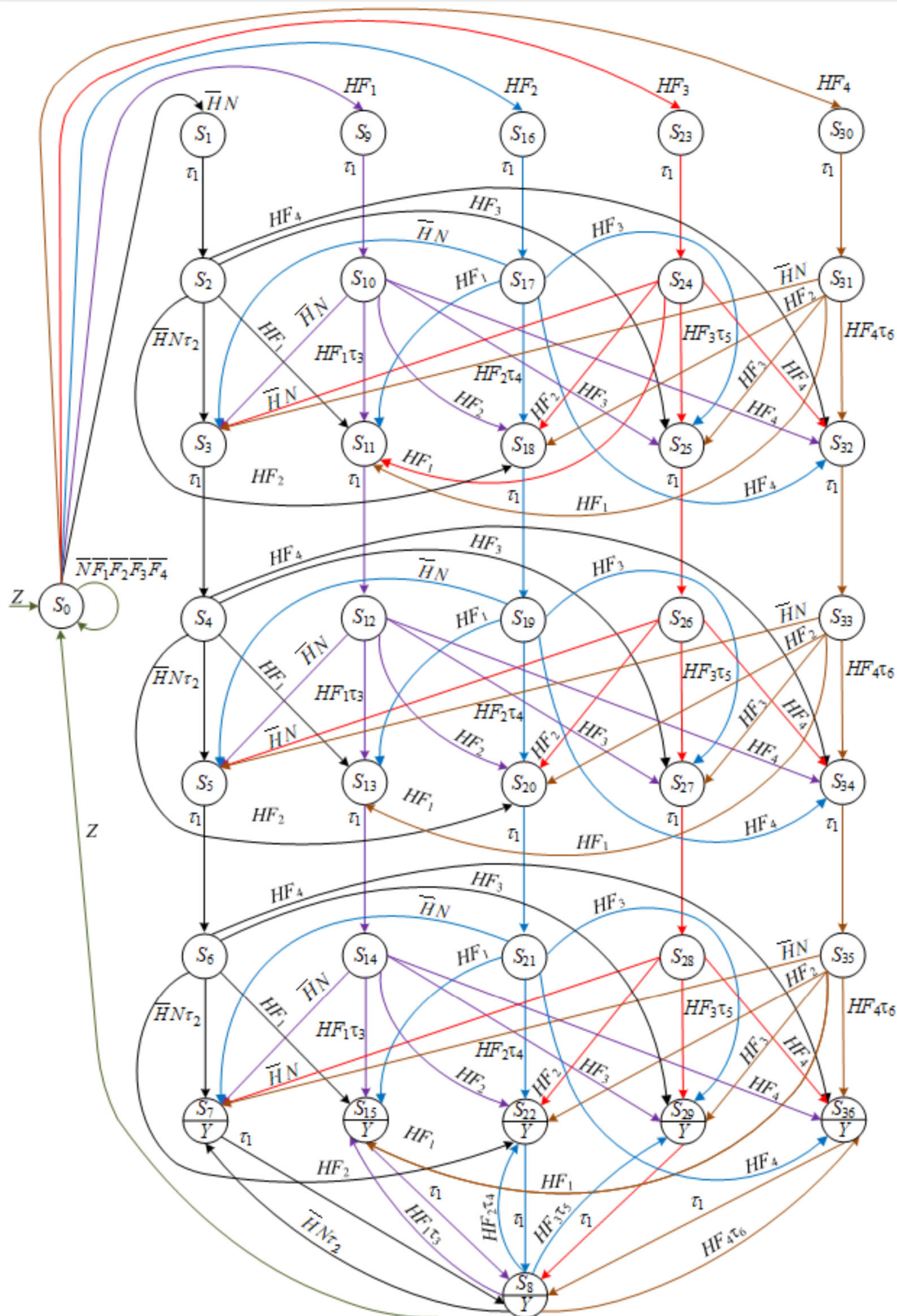
Параметри відносного зношення ізоляції при одночасній рівномірній зміні $C_{вол}$, $C_{кисл}$, C_{O_2} та $C_{зовн.t}$

Параметр	Значення параметра, при його збільшенні на			
	15%	30%	50%	70%
$K_{вол}, \%$	1,23	1,48	1,83	2,21
$K_{кисл}, \%$	1,33	1,71	2,3	2,3
$K_{O_2}, \%$	1,33	1,71	2,3	2,3
$K_{зовн.t}, \%$	1,18	1,37	1,63	1,89
$L(90), \%$	1,03	2,36	6,24	14,59
$L(100), \%$	3,26	7,49	19,8	46,32
$L(104), \%$	5,17	11,87	31,42	73,53



Залежність відносного зношення ізоляції при одночасній рівномірній зміні $C_{вол}$, $C_{кисл}$, C_{O_2} та $C_{зовн.t}$ від температури обмотки

Граф функціонування блока обробки інформації



- Z – сигнал початкового стану блока обробки інформації в момент подачі напруги живлення;
-
- H – сигнал, який свідчить про виникнення режиму перевантаження в роботі трансформатора;
-
- N – сигнал, який відповідає спрацюванню ресурсу нормальному режимі роботи трансформатора;
-
- F_1, F_2, F_3, F_4 – сигнали, які характеризують перевантаження трансформатора за першим, другим, третім та четвертим рівнями, відповідно;
-
- Y – вихідний сигнал, що характеризує повне витрачання робочого ресурсу трансформатора;
-
- S_1, \dots, S_{36} – стани переходу системи

Секвенційна модель функціонування блока обробки інформації

$$\begin{aligned}
 & ZS_0 \vdash S_0; \\
 & \overline{NF_1F_2F_3F_4}S_0 \vdash S_0; \\
 & \overline{NHS_0} \vdash S_1; \\
 & HF_1S_0 \vdash S_9; \\
 & HF_2S_0 \vdash S_{16}; \\
 & HF_3S_0 \vdash S_{23}; \\
 & HF_4S_0 \vdash S_{30}; \\
 & \tau_1S_1 \vdash S_2; \\
 & \overline{NH}\tau_2S_2 \vdash S_3; \\
 & \tau_1S_3 \vdash S_4; \\
 & \overline{NH}\tau_2S_4 \vdash S_5; \\
 & \tau_1S_5 \vdash S_6; \\
 & \overline{NH}\tau_2S_6 \vdash S_7; \\
 & \tau_1S_7 \vdash S_8; \\
 & \overline{NH}\tau_2S_8 \vdash S_7; \\
 & \tau_1S_9 \vdash S_{10}; \\
 & HF_1\tau_3S_{10} \vdash S_{11}; \\
 & \tau_1S_{11} \vdash S_{12}; \\
 & HF_1\tau_3S_{12} \vdash S_{13}; \\
 & \tau_1S_{13} \vdash S_{14}; \\
 & HF_1\tau_3S_{14} \vdash S_{15}; \\
 & \tau_1S_{15} \vdash S_8; \\
 & HF_1\tau_3S_8 \vdash S_{15}; \\
 & \tau_1S_{16} \vdash S_{17}; \\
 & HF_2\tau_4S_{17} \vdash S_{18}; \\
 & \tau_1S_{18} \vdash S_{19}; \\
 & HF_2\tau_4S_{19} \vdash S_{20}; \\
 & \tau_1S_{20} \vdash S_{21}; \\
 & HF_2\tau_4S_{21} \vdash S_{22}; \\
 & \tau_1S_{22} \vdash S_8; \\
 & HF_2\tau_4S_8 \vdash S_{22}; \\
 & \tau_1S_{23} \vdash S_{24};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & HF_3\tau_5S_{24} \vdash S_{25}; \\
 & \tau_1S_{25} \vdash S_{26}; \\
 & HF_3\tau_5S_{26} \vdash S_{27}; \\
 & \tau_1S_{27} \vdash S_{28}; \\
 & HF_3\tau_5S_{28} \vdash S_{29}; \\
 & \tau_1S_{29} \vdash S_8; \\
 & HF_3\tau_5S_8 \vdash S_{29}; \\
 & \tau_1S_{30} \vdash S_{31}; \\
 & HF_4\tau_6S_{31} \vdash S_{32}; \\
 & \tau_1S_{32} \vdash S_{33}; \\
 & HF_4\tau_6S_{33} \vdash S_{34}; \\
 & \tau_1S_{34} \vdash S_{35}; \\
 & HF_4\tau_6S_{35} \vdash S_{36}; \\
 & \tau_1S_{36} \vdash S_8; \\
 & HF_4\tau_6S_8 \vdash S_{36}; \\
 & HF_1S_2 \vdash S_{11}; \\
 & HF_2S_2 \vdash S_{18}; \\
 & HF_3S_2 \vdash S_{25}; \\
 & HF_4S_2 \vdash S_{32}; \\
 & HF_1S_4 \vdash S_{13}; \\
 & HF_2S_4 \vdash S_{20}; \\
 & HF_3S_4 \vdash S_{27}; \\
 & HF_4S_4 \vdash S_{34}; \\
 & HF_1S_6 \vdash S_{15}; \\
 & HF_2S_6 \vdash S_{22}; \\
 & HF_3S_6 \vdash S_{29}; \\
 & HF_4S_6 \vdash S_{36}; \\
 & \overline{HNS}_{10} \vdash S_3; \\
 & HF_2S_{10} \vdash S_{18}; \\
 & HF_3S_{10} \vdash S_{25}; \\
 & HF_4S_{10} \vdash S_{32}; \\
 & \overline{HNS}_{12} \vdash S_5; \\
 & HF_2S_{12} \vdash S_{20};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & HF_3S_{12} \vdash S_{27}; \\
 & HF_4S_{12} \vdash S_{34}; \\
 & \overline{HNS}_{14} \vdash S_7; \\
 & HF_2S_{14} \vdash S_{22}; \\
 & HF_3S_{14} \vdash S_{29}; \\
 & HF_4S_{14} \vdash S_{36}; \\
 & \overline{HNS}_{17} \vdash S_3; \\
 & HF_1S_{17} \vdash S_{11}; \\
 & HF_3S_{17} \vdash S_{25}; \\
 & HF_4S_{17} \vdash S_{32}; \\
 & \overline{HNS}_{19} \vdash S_5; \\
 & HF_1S_{19} \vdash S_{13}; \\
 & HF_3S_{19} \vdash S_{27}; \\
 & HF_4S_{19} \vdash S_{34}; \\
 & \overline{HNS}_{21} \vdash S_7; \\
 & HF_1S_{21} \vdash S_{15}; \\
 & HF_3S_{21} \vdash S_{29}; \\
 & HF_4S_{21} \vdash S_{36}; \\
 & \overline{HNS}_{24} \vdash S_3; \\
 & HF_1S_{24} \vdash S_{11}; \\
 & HF_2S_{24} \vdash S_{18}; \\
 & HF_4S_{24} \vdash S_{32}; \\
 & \overline{HNS}_{26} \vdash S_5; \\
 & HF_1S_{26} \vdash S_{13}; \\
 & HF_2S_{26} \vdash S_{20}; \\
 & HF_4S_{26} \vdash S_{34}; \\
 & \overline{HNS}_{28} \vdash S_7; \\
 & HF_1S_{28} \vdash S_{15}; \\
 & HF_2S_{28} \vdash S_{22}; \\
 & HF_4S_{28} \vdash S_{36}; \\
 & \overline{HNS}_{31} \vdash S_3; \\
 & HF_1S_{31} \vdash S_{11};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & HF_2S_{31} \vdash S_{18}; \\
 & HF_3S_{31} \vdash S_{25}; \\
 & \overline{HNS}_{33} \vdash S_5; \\
 & HF_1S_{33} \vdash S_{13}; \\
 & HF_2S_{33} \vdash S_{20}; \\
 & HF_3S_{33} \vdash S_{27}; \\
 & \overline{HNS}_{35} \vdash S_7; \\
 & HF_1S_{35} \vdash S_{15}; \\
 & HF_2S_{35} \vdash S_{22}; \\
 & HF_3S_{35} \vdash S_{29}; \\
 & ZS_8 \vdash S_0;
 \end{aligned}$$

$$S_7 \vee S_8 \vee S_{15} \vee S_{22} \vee S_{29} \vee S_{36} \vdash Y.$$

$$\begin{aligned}
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}\overline{T_5}\overline{T_6}\overline{T_7}\overline{T_8}\overline{T_9} \in S_0; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6\overline{T_7}\overline{T_8}\overline{T_9} \in S_1; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6\overline{T_7}T_8\overline{T_9} \in S_2; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7\overline{T_8}\overline{T_9} \in S_3; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8\overline{T_9} \in S_4; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_5; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_6; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_7; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_8; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_9; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{10}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{11}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{12}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{13}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{14}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{15}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{16}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{17}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{18};
 \end{aligned}$$

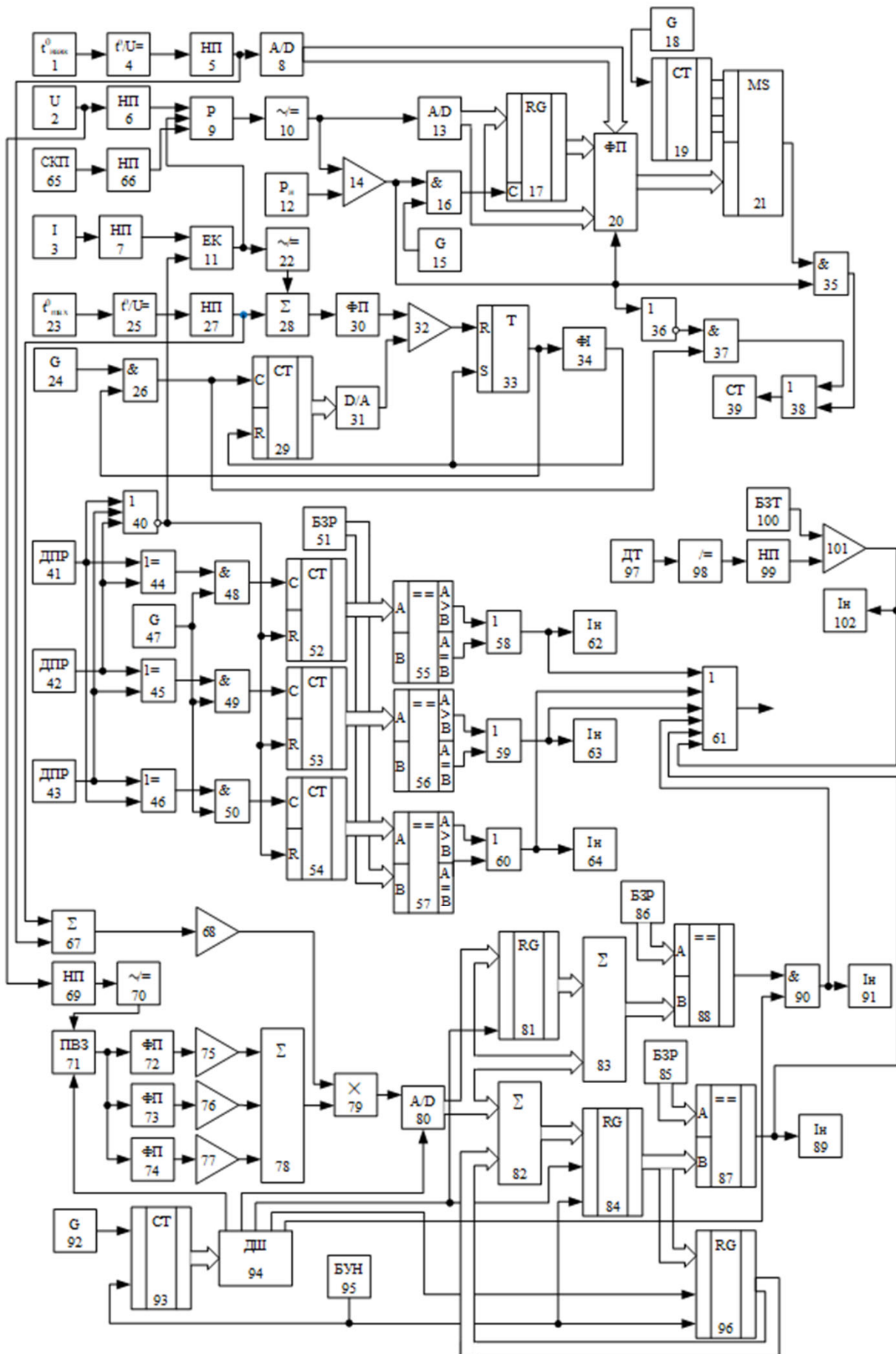
$$\begin{aligned}
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{19}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{20}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{21}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{22}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{23}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{24}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{25}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{26}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{27}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{28}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{29}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{30}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{31}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{32}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{33}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{34}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{35}; \\
 & \overline{T_1}\overline{T_2}\overline{T_3}\overline{T_4}T_5T_6T_7T_8T_9 \in S_{36}.
 \end{aligned}$$

Результат мінімізації секвенційної моделі

$$\begin{aligned}
 & F_1\overline{T_1}\tau_3 \vdash T_1; & T_3\tau_5 \vdash T_3; & (T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4)H \vee T_5\overline{H} \vdash T_6; \\
 & T_1\tau_1 \vdash T_1; & F_4\overline{T_4}\tau_6 \vdash T_4; & [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4)H \vee T_5\overline{H}]T_6\tau_6 \vdash T_7; \\
 & F_2\overline{T_2}\tau_4 \vdash T_2; & T_4\tau_6 \vdash T_4; & [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4)H \vee T_5\overline{H}]T_7\tau_6 \vdash T_8; \\
 & T_2\tau_4 \vdash T_2; & N\overline{T_5}\tau_2 \vdash T_5; & [(T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4)H \vee T_5\overline{H}]T_8\tau_6 \vdash T_9; \\
 & F_3\overline{T_3}\tau_5 \vdash T_3; & T_5\tau_1 \vdash T_5; & Z \vdash \overline{T_6}\overline{T_7}\overline{T_8}\overline{T_9};
 \end{aligned}$$

$$T_6T_7T_8T_9 \vdash Y.$$

Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора



Наукова новизна та практичне значення одержаних результатів

Наукова новизна одержаних результатів:

- удосконалено математичну модель для визначення залишкового ресурсу обмоток силового масляного трансформатора, яка за рахунок введення додаткового коефіцієнту впливу температури зовнішнього середовища дозволяє більш точно розрахувати відносне зношення ізоляції обмотки трансформатора;
- синтезовано структуру пристрою для діагностування трансформатора, яка, на відміну від існуючих, за рахунок введення в структуру пристрою додаткових блоків та зв'язків між ними дозволяє підвищити точність його роботи. Структура пристрою враховує температуру верхніх шарів масла в баку, струм в колі вторинної обмотки, напругу, коефіцієнт потужності, температуру навколишнього середовища, тиск масла в високовольтному вводі, концентрацію газів у маслі високовольтного вводу, швидкість зростання концентрації газів у маслі високовольтного вводу, а також технічний стан пристрою регулювання напруги під навантаженням.

Практичне значення одержаних результатів:

- використання одержаних результатів дозволить підвищити надійність роботи трансформаторів, зменшити кількість простою технологічного обладнання через аварійні ситуації, обумовлені виходом з ладу трансформаторів.

Апробація результатів дослідження

Матеріали обговорювалися на конференціях, конкурсах наукових робіт

- Science, Research, Development. Technics and technology. #16 (Наука, исследования, развитие. Техника и технология. #16) 29.04.2019 – 30.04.2019, Barcelona (Испания);
- Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2019);
- Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт зі спеціальності «Електричні машини та апарати» (Кременчуцький національний університет імені М. Остроградського, Кременчук, 2019 рік), за результатами чого отримано диплом II ступеня (тема роботи – «Діагностування силових масляних трансформаторів»).

За результатами дослідження опубліковано:

- Розводюк М. П. Визначення залишкового ресурсу силового масляного трансформатора на базі нечіткої логіки / М.П. Розводюк, В.В. Овчарук, В.Є. Вдовиченко, І.М. Овчар // Monografia. Pokonferencyjna. Science, research, development #16. Technics and technology. Barcelona 29.04.2019 - 30.04.2019. – Zbiór artykułów naukowych enzowanych. Zbiór artykułów naukowych z Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej (on-line) zorganizowanej dla pracowników naukowych uczelni, jednostek naukowo-badawczych oraz badawczych z państw obszaru byłego Związku Radzieckiego oraz byłej Jugosławii. (30.04.2019). – Warszawa, 2019. – 84 str. – S.71-77.
- Розводюк М. П. Структура пристрою для визначення ресурсу силового масляного трансформатора / М.П. Розводюк, В.Є. Вдовиченко, К.М. Розводюк // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Випуск 3/2019 (47). – С.35-47. DOI: 10.30929/2072-2052.2019.3.47.35-47.
- Розводюк М.П. Визначення відносного зношення ізоляції обмоток силового масляного трансформатора / М.П. Розводюк, В.Є. Вдовиченко, К.М. Розводюк // Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи» (МН-2020), м. Вінниця, Вінницький національний технічний університет, 1-15 травня 2020 р. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2020/paper/view/8463>
- Пат. 135969 UA, МПК G07C 3/10. G07C 3/14, H02P 29/00. Пристрій для визначення залишкового ресурсу електричного двигуна / Розводюк М.П., Овчарук В.В., Овчар І.М., Вдовиченко В.Є. – № u 201901819; заявл. 22.02.2019; опубл. 25.07.2019, Бюл. № 14. – 16 с. : кресл.

Подані заявки на отримання патенту України на корисну модель:

- Пристрій для визначення залишкового ресурсу силового масляного трансформатора
- Пристрій для контролю технічного стану силового масляного трансформатора