

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему:

Система віддаленого моніторингу технічного стану

високовольтних масляних вимикачів

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТс-42

спеціальнос

ті 141

електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Франчук Ю.Р.

(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник	(підпис)	Белякова І.В.	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Коваль В.П.	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	(підпис)	Коваль В.П.	(прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	Трембач Р.Б.	(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« 27 » січня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

студенту Франчуку Юрію Руслановичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система віддаленого моніторингу технічного стану високовольтних масляних вимикачів

Керівник роботи ... Белякова Ірина Володимирівна, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 24 » Січня 2025 року № 4/7-53

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Високовольтні масляні вимикачі серії ВМТ на напругу 110 кВ розташованих на підстанціях розподільчих мереж

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

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунковий розділ

4. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	Гурик О. Я. к.т.н., доцент кафедри МТ		
Нормоконтроль	Коваль В.П., к.т.н., зав. кафедри ЕІ		

7. Дата видачі завдання 27 січня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	32.01.2025	
2	Аналітичний розділ	26.02.2025	
3	Проектно-конструкторський розділ	30.03.2025	
4	Розрахунковий розділ	21.04.2025	
5	Безпека життєдіяльності та основи охорони праці	18.05.2025	
6	Висновки	29.05.2025	
7	Оформлення пояснювальної записки	09.06.2025	
8	Оформлення графічної частини	16.06.2025	

Студент

(підпис)

Франчук Ю.Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Беякова І.В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра. Кафедра електричної інженерії, група ЕТ–41.
- Т. : ТНТУ, 2025.

Стор.54; рис.15 ; табл. 7 ; джерел 10; додатків –.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Система віддаленого моніторингу технічного стану високовольтних масляних вимикачів»

Мета кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності оцінки технічного стану маломасляних вимикачів на підстанціях розподільчих мереж завдяки впровадженню технології дистанційного контролю параметрів вимикача, для зниження ризиків відмови вимикача в момент комутації..

У першому розділі детально розглянуто використання високовольтних маломасляних вимикачів у розподільних мережах. Досліджено різні конструкції камер гасіння дуги, які використовують у високовольтних вимикачах із рідким середовищем

Визначено аналітичні залежності, що дають змогу визначати базові параметри функціонування високовольтних вимикачів з рідким середовищем гасіння дуги. До таких параметрів віднесено тиск усередині камери гасіння дуги, а також час відновлення електричної міцності проміжку між контактами вимикача після розмикання.

Розроблено алгоритм дистанційного оцінювання технічного стану високовольтного вимикача серії ВМТ на напругу 110 кВ за витратою комутаційного ресурсу під час операцій увімкнення та вимкнення вимикача. Розроблено концепцію програмного продукту, що дає змогу вести дистанційну оцінку та проводити контроль технічного стану високовольтного вимикача серії ВМТ.

Ключові слова: високовольтний масляний вимикач, комутаційний ресурс, алгоритм дистанційного оцінювання.

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	4
ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	7
1.1 Конструкція і особливості роботи маломасляних вимикачів	7
1.2 Аналіз підходів до гасіння дуги в масляних вимикачах	10
1.3 Висновки до розділу	15
2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	16
2.1 Аналітичний розрахунок особливостей роботи та гасіння дуги у високовольтних вимикачах рідким середовищем	16
2.2 Методика оцінки ресурсу вимикача за зносом контактів	25
2.3 Методика оцінки за коефіцієнтом технічного стану високовольтного обладнання	29
2.4 Висновки до розділу	31
3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ	32
3.1 Система дистанційної оцінки технічного стану вимикачів ВМТ-110	32
3.2 Моделювання алгоритму дистанційної оцінки технічного стану вимикача ВМТ-110	39
3.3 Висновки до розділу	43
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	45
4.1 Інструктажі з охорони праці	45
4.2 Захист від статичної електрики	47
4.3 Запобігання виникненню та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного походження на об'єктах електроенергетики	48
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	53

ВСТУП

Ступінь зносу потужностей в електроенергетичній галузі становить близько 65 %. Найбільший знос припадає на сегмент розподільчих мереж, близько 70%. Разом з тим, продовжує зростати попит на електричну енергію. Вітчизняне комутаційне обладнання підстанцій потребує модернізації. На тлі обмежених можливостей у фінансуванні галузі, з'являється завдання оптимізації витрат на капітальні вкладення під час реконструкції діючих електроустановок.

Велика кількість обладнання в розподільних мережах належить до високовольтних вимикачів. На підстанціях розподільчих мереж можуть застосовуватися, залежно від схеми розподільчого пристрою високої напруги, від двох до п'яти вимикачів - для розподільчих мереж 35 - 110 кВ.

Істотний вплив на функціонування підстанцій розподільчих мереж мають високовольтні вимикачі. Високовольтні вимикачі призначені для комутації кіл у різних режимах: нормальному та аварійному. При цьому для проведення комутації може використовуватися як ручне керування, так і автоматичне та дистанційне.

Понад 40% від загальної кількості вимикачів, що перебувають в експлуатації, вже відпрацювали свій нормативний ресурс. При цьому наразі спостерігається перехід до використання більш сучасних високовольтних вимикачів із вакуумними дугогасними камерами та дугогасними камерами, у яких як дугогасне середовище використовується шести фториста сірка SF₆ (елегаз). Однак, з огляду на той факт, що в розподільних мережах нині експлуатується велика кількість маломасляних вимикачів, зокрема й на напругах 35 кВ і 110 кВ, то обрана тематика є актуальною. актуальність роботи пов'язана з тим, що не на всіх підстанціях потрібне встановлення саме сучасних вакуумних або елегазових вимикачів. Насамперед це пов'язано з вартістю купівлі та заміни високовольтних вимикачів. Підстанції, які істотно віддалені від великих джерел генерації і не живлять високопотужні навантаження, не вимагають високої вимикальної здатності від вимикачів, тому доцільно, під час проведення реконструкцій, виконувати заміну комутаційних апаратів на тих центрах живлення, де ресурс високовольтних вимикачів вичерпано,

або потрібна висока вимикальна здатність вимикачів. Виходячи з цього, необхідно розробити систему контролю технічного стану високовольтного маломасляного вимикача, що дасть змогу істотно спростити експлуатацію цих вимикачів, а також дасть змогу зменшити витрати підприємств, які обслуговують розподільні підстанції зі встановленими маломасляними вимикачами. Крім того, пропоновані технічні рішення мають забезпечити підвищення ресурсу роботи високовольтних маломасляних вимикачів.

Сучасний підхід до оцінки технічного стану високовольтного обладнання заведено називати предиктивним. Предиктивний підхід характеризується як підхід щодо визначення технічного стану за даними систем моніторингу. Цей підхід не вимагає проведення періодичних оглядів обладнання з метою контролю його технічного стану. Візуальний огляд повинен виконуватися тільки в екстрених ситуаціях, за даними системи моніторингу.

Мета кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності оцінки технічного стану маломасляних вимикачів на підстанціях розподільчих мереж завдяки впровадженню технології дистанційного контролю параметрів вимикача, для зниження ризиків відмови вимикача в момент комутації.

Для досягнення поставленої мети в даній роботі необхідно було вирішити такі завдання:

- аналіз використання високовольтних маломасляних вимикачів у розподільних мережах;
- дослідження особливостей режимів роботи високовольтних вимикачів для визначення параметрів, що підлягають контролю системою дистанційної оцінки технічного стану;
- аналіз наявних підходів у визначенні технічного стану високовольтних вимикачів;
- розроблення та тестування алгоритму дистанційного контролю технічного стану високовольтного маломасляного вимикача.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Конструкція і особливості роботи маломасляних вимикачів

Високовольтні масляні вимикачі різних типів належать до групи вимикачів, у яких використовується рідке середовище для гасіння електричної дуги в момент розмикання та розбіжності контактів.

Як рідкі середовища для гасіння електричної дуги у високовольтних вимикачах, що належать до групи - вимикачі з рідким середовищем для гасіння дуги, використовуються такі види рідких середовищ, представлені за рівнем використання:

- трансформаторне масло;
- діелектрична суміш на основі трансформаторного масла;
- фторорганічні синтетичні рідини;
- рідкий елегаз;
- кремній органічні рідкі діелектрики.

Кожен із зазначених у переліку тих, що використовуються як рідке середовище для гасіння дуги у високовольтних вимикачах, має свої переваги і недоліки.

Основними параметрами, за якими виконують оцінку застосовності того чи іншого рідкого діелектрика як середовища для гасіння дуги в дугогасильній камері вимикача є:

- електрична міцність рідкого діелектрика;
- значення діелектричної постійної;
- електричний опір рідкого діелектрика;
- горючість рідкого діелектрика;
- в'язкість діелектрика;
- термічна стабільність;
- коефіцієнт заповнення;
- вартість рідкого діелектрика.

Основним видом рідкого середовища для гасіння дуги, яке застосовують у високовольтних вимикачах, є трансформаторна олива і діелектричні суміші на основі трансформаторної оливи.

Порівняно з мінеральною трансформаторною оливою сучасні синтетичні рідкі діелектрики мають вищу електричну міцність, краще відводять тепло від внутрішніх частин трансформатора, а також мають вищу термічну стабільність, тобто менш схильні до термічного розкладання. Однак не завжди застосування синтетичних рідких діелектриків є безпечним. Наприклад, хлоровані вуглеводні ароматичного ряду, прикладом яких є совтол і совол, є вкрай токсичними рідинами і контакт з ними несприятливо позначається на здоров'ї людини. Тому, незважаючи на вищі характеристики як рідкого діелектрика, такі діелектрики нині не застосовують [1-3].

Кремнійорганічні рідкі діелектрики або силікони та силоксани мають стабільні параметри, що не змінюються від температури та тиску, проте їхнім головним недоліком є висока вартість. Саме тому кремній органічні рідкі діелектрики не набули нині широкого поширення на Російських заводах з виробництва високовольтного обладнання [3].

Фторорганічні рідкі діелектрики мають дуже хороші властивості. Зокрема, вони повністю не горючі, дугостійкі та можуть працювати за температури 200°C і вище. Однак виробництво фторорганічних рідких діелектриків потребує використання спеціалізованих реактивів і сировини, тому також нині вони не можуть навіть частково замінити традиційну мінеральну трансформаторну оливу[4].

Їхньої групи високовольтних вимикачів із рідким середовищем гасіння дуги - трансформаторне мастило і суміш на основі трансформаторного мастила, виокремлюють дві основні контракції вимикачів:

- багатооб'ємні вимикачі - бакові вимикачі;
- малооб'ємні вимикачі - маломасляні вимикачі.

У багатооб'ємних (бакових) вимикачах рідкий діелектрик - трансформаторне масло або суміш на основі трансформаторного масла - використовується не тільки як середовище для гасіння електричної дуги, а й як головна ізоляція вимикача.

У малооб'ємних (маломасляних) вимикачах рідкий діелектрик - трансформаторне мастило або суміш на основі трансформаторного мастила - не використовують як головну ізоляцію вимикача, а тільки для забезпечення гасіння дуги в дугогасильній камері або додатково для забезпечення ізоляції між струмоведучими контактами в період знаходження контактів вимикача в розімкнутому стані.

Серед марок вимикачів, є вимикачі марки ВМТ-110Б:

- ВМ - вимикач маломасляний;
- Т - конструктивне виконання вимикача;
- 110Б - номінальна напруга вимикача. Для об'єкта дослідження 110 кВ.

Промисловістю випускаються вимикачі марки ВМТ на номінальні напруги 110 кВ і 220 кВ. У таблиці 1.1 подано паспортні дані для вимикачів марки ВМТ, що випускаються промисловістю на напругу 110 кВ, а в таблиці 1.2 подано дані для вимикачів ВМТ, що випускаються на напругу 220 кВ.

Таблиця .11 - Параметри вимикачів ВМТ, що випускаються, на напругу 110кВ

Найменування параметра	Одиниця виміру параметра	Марка вимикача	
		ВМТ-110 Б-40/2000	ВМТ-110 Б-25/1250
Номінальна напруга	кВ	110	
Найбільша робоча напруга	кВ	126	
Номінальний струм	А	2000	1250
Номінальний струм відключення	кА	40	25
Струм термічної стійкості	кА	40	25
Час протікання струму термічної стійкості	с	3	
Власний час вимкнення вимикача	с	0,035 - 0,005	
Повний час вимкнення вимикача	с	0,06	
Мінімальна безстокова пауза під час АПВ	с	0,3	
Власний час увімкнення вимикача	с	0,13 - 0,03	
Робочий тиск газу в дугогасильних пристроях приведене до 20°C	МПа	0,5 - 1,0	

Таблиця 1.2 -Параметри вимикачів ВМТ, що випускаються, на напругу 220 кВ

Найменування параметра	Одиниця виміру параметра	Марка вимикача	
		ВМТ-220 Б-40/2000	ВМТ-220 Б- 25/1250
Номінальна напруга	кВ	220	
Найбільша робоча напруга	кВ	252	
Номінальний струм	А	2000	1250
Номінальний струм відключення	кА	40	25
Струм термічної стійкості	кА	40	25
Час протікання струму термічної стійкості	с	3	
Власний час вимкнення вимикача	с	0,035 - 0,005	
Повний час вимкнення вимикача	с	0,06	
Мінімальна безстокова пауза під час АПВ	с	0,3	
Власний час увімкнення вимикача	с	0,13 - 0,03	
Робочий тиск газу в дугогасильних пристроях приведений до 20°C	МПа	0,5 - 1,0	

1.2 Аналіз підходів до гасіння дуги в масляних вимикачах

У високовольтних вимикачах з рідким середовищем, гасіння дуги виконується за рахунок її ефективного охолодження. Охолодження дуги відбувається в газопаровій суміші, яка утворюється в процесі горіння дуги з випаровуванням і розкладанням рідкого діелектрика [5].

Особливості утворення дуги між контактами вимикача характеризуються струмом дуги, тобто за великих струмів - понад 100 А і малих струмів - менше 100 А. Незалежно від величини струму дуги, вона гасне тільки в момент переходу напруги через нуль. При цьому якщо в камері гасіння дуги (КГД) після її гасіння збереглися умови для її зворотного загоряння, то дуга не гасне і продовжує горіти. Такі умови можуть виникнути в разі забруднення рідкого середовища продуктами термічного розкладання як самого рідкого діелектрика, так і продуктами розпаду контактів вимикача. Тому важливим є підтримання рідкого діелектрика в нормативному стані та своєчасно виконувати очищення оливи (заміну оливи) у вимикачах з рідким середовищем гасіння дуги.

За струму дуги понад 100 А охолодження стовбура дуги здійснюється за рахунок процесів конвекції, оскільки під час гасіння дуги великого струму підвищується тиск у газопаровій суміші. Підвищення тиску крім збільшення ефективності процесу відведення тепла зі стовбура дуги, забезпечує зростання електричної міцності проміжку між контактами. Зі зростанням тиску підвищується електрична міцність газопарової суміші за законом Пашена. Таким чином обидва ці фактори створюють сприятливі умови для відновлення базової електричної міцності проміжку між контактами вимикача після переходу через нуль [6].

Основними видами КГД у високовольтних вимикачах з рідким середовищем гасіння дуги є:

- камера гасіння дуги з поперечним дуттям рідкого діелектрика;
- камера гасіння дуги з поздовжнім дуттям рідкого діелектрика;
- камери гасіння дуги з комбінованим дуттям рідкого діелектрика.

Для вимикачів напругою 110 кВ і вище з рідким середовищем гасіння дуги застосовують КГД із великим числом модулів розриву дуги, серед яких можна виділити:

- модулі з великим числом розривів контактів з однаковими умовами гасіння дуги;
- модулі з великим числом основних і допоміжних розривів дуги.

У КГД з автодуттям, залежно від їхнього конструктивного виконання, можуть бути отримані перпендикулярні та коаксіальні потоки парогазової суміші відносно стовбура дуги. Схеми застосовуваних у високовольтних вимикачах КГД представлені на рисунку 1.1:

- схема КГД із поздовжнім дуттям (рисунок 1.1 а);
- схема КГД із поперечним дуттям (рисунок 1.1 б);
- схема КГД із комбінованим дуттям (рисунок 1.1 в). Для рисунка 1.1 прийнято такі позначення:
 - позиція 1 - нерухомий контакт високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги;

- позиція 2 - рухомий контакт високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги;
- позиція 3 - канал дуття КГД;
- позиція 4 - щілина каналу КГД;
- позиція 5 - простір над камерою гасіння дуги;
- позиція 6 - повітряна подушка або буферна зона.

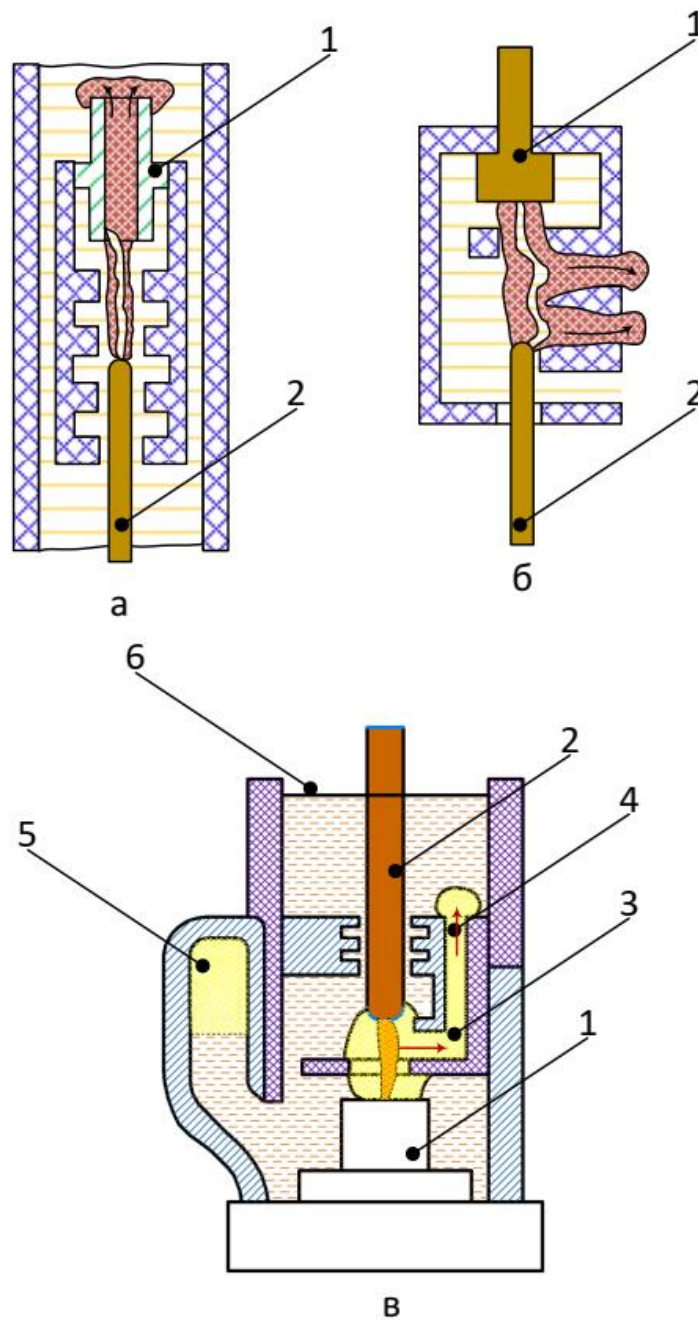


Рисунок 1.1 - Схеми типових камер гасіння дуги високовольтних вимикачів із рідким середовищем

У загальному вигляді процес гасіння дуги, що виникає в момент розведення контактів високовольтного вимикача можна уявити трьома базовими етапами [7]. Схеми базових етапів гасіння дуги в КГД високовольтних вимикачів із рідким середовищем графічно подано на рисунку 1.2.

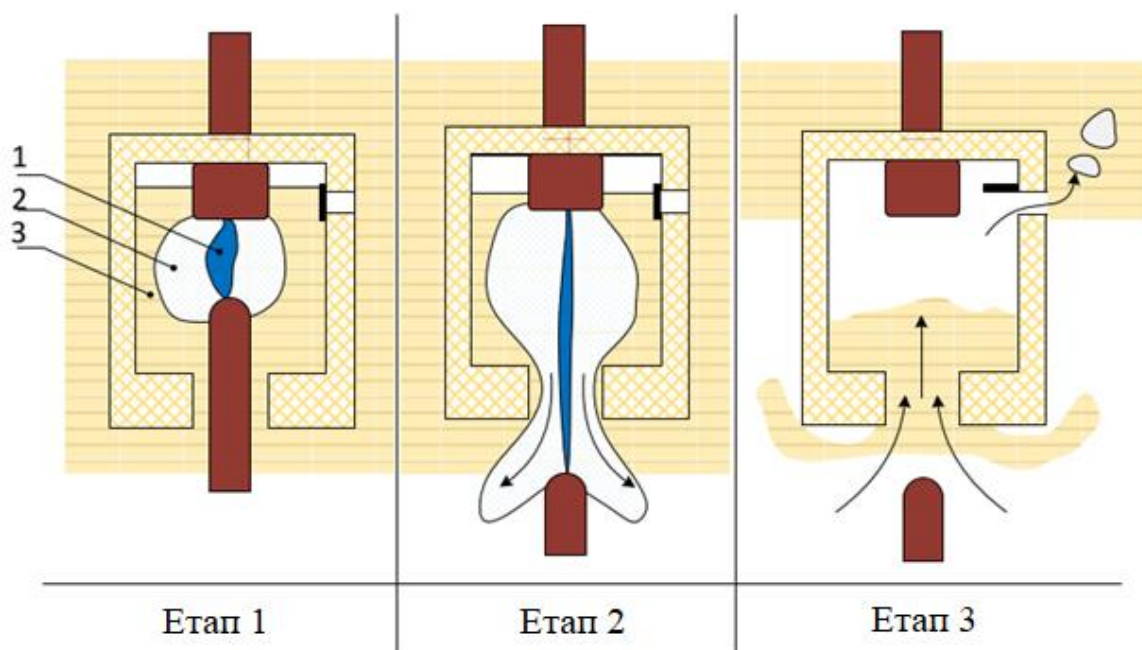


Рисунок 1.2 - Етапи гасіння дуги в КГД високовольтних вимикачів із рідким середовищем

Перший етап гасіння дуги (рисунок 1.2, етап 1) - характеризується початком горіння дуги між контактами високовольтного вимикача, що розходяться, і початком горіння електричної дуги. Початок процесу горіння дуги на першому етапі супроводжується утворенням газопарової бульбашки за рахунок термічної дії дуги.

Другий етап гасіння дуги (рисунок 1.2, етап 2) - характеризується продовженням горіння дуги між контактами високовольтного вимикача та початком процесу витікання газопарової суміші зі збільшеної області газопарового міхура за межі камери гасіння дуги високовольтного вимикача.

Третій етап гасіння дуги (рисунок 1.2, етап 3) - характеризується відновленням електричної міцності проміжку між контактами високовольтного вимикача, а також видаленням із камери гасіння дуги гарячих газів, які виникли після гасіння дуги під

час переходу через нуль. Також на третьому етапі відбувається наповнення камери гасіння дуги рідким діелектриком. Після завершення третього етапу високовольтний вимикач може бути використаний повторно. Однак час протікання трьох зазначених етапів, особливо етапу відновлення електричної міцності, є досить тривалими, тому вимикачі з рідким середовищем гасіння дуги не можуть застосовуватися як швидкодіючі, а також у тривалих циклах автоматичного повторного увімкнення.

На рисунку 1.2 прийнято такі позначення:

- позиція 1: дуга;
- позиція 2: бульбашка газопарової суміші;
- позиція 3: рідкий діелектрик (трансформаторне масло і суміш на основі трансформаторного масла).

Основними циклами і операціями роботи високовольтних вимикачів з рідким середовищем гасіння дуги є:

- операція вимкнення (O);
- операція увімкнення (B);
- цикл увімкнення - вимкнення ($B \rightarrow B$) із навмисною витримкою часу між операцією O і операцією B;
- цикл увімкнення - вимкнення ($B \rightarrow O$) без навмисної витримки часу між операцією O і операцією B;
- цикл вимкнення - увімкнення - вимкнення ($O \rightarrow B \rightarrow B$) з контролем тривалості безстокової паузи між операціями $O \rightarrow B$ і $B \rightarrow B$;
- цикл вимкнення - увімкнення ($O \rightarrow B$) з контролем тривалості безструмової паузи між операцією O і B;

Виконання одного з комутаційних циклів, обмежує час проведення наступного оперативного увімкнення високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги на рівні $t_{оп} = 15$ (хв).

Обмеження за часом між тривалими циклами зумовлене необхідністю відновлення електричної міцності та охолодженням камери гасіння дуги [8-9].

1.3 Висновки до розділу

У першому розділі детально розглянуто використання високовольних маломасляних вимикачів у розподільних мережах. Досліджено різні конструкції камер гасіння дуги, які використовують у високовольних вимикачах із рідким середовищем.

Розглянуто особливості підходу до гасіння дуги в масляних вимикачах. Аналіз показав, що ефективність процесу значною мірою залежить від властивостей рідкого діелектрика та конструкції дугогасильної камери. Основними методами гасіння є охолодження дуги парогазовою сумішшю та підвищення тиску, що сприяє відновленню електричної міцності між контактами. Важливою умовою надійної роботи є своєчасне очищення або заміна масла для запобігання повторному займання дуги.

2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Аналітичний розрахунок особливостей роботи та гасіння дуги у високовольтних вимикачах рідким середовищем

У попереднього розділі розглянуто етапи гасіння дуги в КГД високовольтних вимикачів із рідким середовищем. Перші два етапи гасіння дуги в КГД характеризуються пов'язаним комплексом процесів:

- газодинамічних;
- термодинамічних;
- гідродинамічних.

Сукупність зазначених процесів забезпечує ефективність і швидкість гасіння дуги в КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння. Аналіз зазначених процесів ґрунтується на розрахунках, представлених далі.

Визначення потужності дуги в КГД:

$$P_{\text{дуги}} = U_{\text{дуги}} \cdot i_{\text{дуги}} = E_{\text{дуги.ср}} \cdot l_{\text{дуги}} \cdot i_{\text{дуги}} \quad (2.1)$$

де $U_{\text{дуги}}$ - напруга на дузі, кВ;

$i_{\text{дуги}}$ - миттєве значення струму в каналі дуги, А;

$E_{\text{дуги.ср}}$ - середня напруженість електричного поля в каналі дуги, кВ/мм;

$l_{\text{дуги}}$ - довжина дуги, мм.

Для (2.1) параметри дуги є в розрахунках або струмом навантаження вимикача, або струмом короткого замикання.

Для виразу (2.1) миттєве значення струму в каналі дуги ($i_{\text{дуги}}$), а також значення довжини дуги ($l_{\text{дуги}}$) задають для певних моментів часу (t), оскільки вони істотно змінюються в процесі її горіння і гасіння.

Довжина дуги для (2.1) визначається за виразом:

$$l_{\text{дуги}.t} = \int_0^t v_{\text{конт}.t} dt \quad (2.2)$$

Де $v_{\text{конт}.t}$ - швидкість розбіжності контактів високовольного вимикача, м/с.

Для випадку горіння дуги в замкнутій газопаровій бульбашці довжина дуги для (2.1) визначається не за (2.2), а спрощено за виразом:

$$l_{\text{дуги}.t} = \frac{1}{m_1} \cdot e^{(v_{\text{конт}.t} \cdot m_1 \cdot t) - 1} \quad (2.3)$$

де m_1 - коефіцієнт, що враховує вплив електродинамічних сил на довжину дуги, м^{-1} ;

$v_{\text{конт}.cp}$ - середня швидкість розбіжності контактів вимикача, м/с;

t - момент часу, для якого визначається довжина дуги в КГД вимикача, с.

Для різних вимикачів з рідким середовищем гасіння дуги коефіцієнт m_1 може набувати різних значень. Для КГД великого об'єму $m_1 = 0,15 \div 0,25$, для КГД меншого об'єму, $m_1 = 0,05 \div 0,15$.

Вираз (2.1) з урахуванням горіння дуги в замкнутій газопаровій бульбашці (2.3) у КГД вимикача з рідким середовищем гасіння дуги набуде вигляду:

$$P_{\text{дуги}}(t) = U_{\text{дуги}} \cdot l_{\text{дуги}} \cdot i_{\text{дуги}} = E_{\text{дуги}.cp} \cdot I_{\text{дуги}} \cdot f(t) \quad (2.4)$$

де $E_{\text{дуги}.cp} \cdot I_{\text{max}}$ - функція енергії дуги, що виділяється за час t

Для оцінки тиску в КГД високовольного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги на основі виразів (2.1) - (2.4) можна використовувати вираз:

$$W_{\text{дуги}}(t) = E_{\text{дуги}.cp} \cdot I_{\text{max}} \int_0^t f(t) dt \quad (2.5)$$

У процесі горіння дуги в КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги утворюється газопарова бульбашка, хімічний склад якої, представлений у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Хімічний склад газу в газопаровому міхурі під час гасіння дуги

Найменування	Хімічна формула	Склад, %
Водень	H_2	60 - 66
Ацетилен	C_2H_2	17 - 20
Метан	CH_4	9 - 15
Гідролітичний етилен вуглець	$CH_3 - CH_3$	5 - 8

Тиск у КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги визначається рівнянням газового стану з урахуванням виразу (2.5):

$$p(t) = \frac{K_{г.у} \cdot R_{г} \cdot T_{г} \cdot W_{дуги}(t)}{V_t} \quad (2.6)$$

де $K_{г.у}$ - приведений масовий коефіцієнт газоутворення;

$R_{г}$ - газова постійна, визначається для кожного з газів представленого в таблиці 2.1, Дж / моль·К;

$T_{г}$ - температура газопарової суміші в КГД вимикача, К;

V_t - об'єм газопарової суміші, м³.

Обсяг газопарової суміші в КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги в загальному випадку визначається за виразом:

$$V_t(t) = V_{конт.}(t) + V_{вит}(t) + V_{м.в}(t) + V_{буф}(t) + V_{деф}(t) \quad (2.7)$$

де $V_{конт.}(t)$ - об'єм, що звільняється внаслідок руху рухомого контакту високовольтного вимикача, м³;

$V_{\text{вит.}(t)}$ - об'єм оливи, що витекла з КГД за час t , м^3 ;

$V_{\text{м.в.}(t)}$ - об'єм масла, що випарувалося, м^3 ;

$V_{\text{буф}(t)}$ - об'єм буферної порожнини, м^3 ;

$V_{\text{деф}(t)}$ - об'єм, що утворюється за рахунок пружної деформації, м^3 .

Для визначення об'ємів у виразі (2.7) необхідно попередньо визначити площу поперечного перерізу контактної стрижня:

$$S_{\text{к.с.}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{к.с.}}^2}{4} \quad (2.8)$$

де $d_{\text{к.с.}}$ - діаметр контактної стрижня високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги, мм.

Також для визначення параметрів у виразі (2.7), додатково до значення з (2.8) необхідно визначити перетин струменя газопарової суміші:

$$S_{\text{г.с.}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{г.с.}}^2}{4} \quad (2.9)$$

де $d_{\text{г.с.}}$ - діаметр газового струменя. Визначається залежно від конструкції КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги і приймається як найменший переріз дуттьової щілини, мм.

З урахуванням виразу (2.8) об'єм, що звільняється в результаті руху рухомого контакту високовольтного вимикача для виразу (2.7):

$$V_{\text{конт.}}(t) = S_{\text{к.с.}} \cdot \int_0^t v_{\text{конт.т}}(t) dt \quad (2.10)$$

Для виразу (2.10) швидкість руху рухомого контакту визначається на підставі механічної характеристики $v_{\text{конт.т}}(t) = f(t)$.

Обсяг оливи, що минула з КГД за час t для виразу (2.7) з урахуванням значень, отриманих за виразами (2.8) і (2.9), визначається виразом:

$$V_{\text{вум.}}(t) = (S_{\text{з.с.}} - S_{\text{к.с.}}) \cdot \int_0^t v_{\text{масла}}(t) dt \quad (2.11)$$

де $v_{\text{масла}}$ - швидкість витікання масла з КГД високовольтного вимикача, м/с.

Також для виразу (2.7) об'єм буферної порожнини $V_{\text{буф}(t)}$ визначається конструктивними особливостями кожного вимикача використовуваної КГД.

Розрахунок тиску в КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги виконують з урахуванням таких припущень:

- процес витікання газопарової суміші з КГД вимикача приймається як квазістаціонарний;
- витікання газопарової суміші в простір над КГД відбувається тільки в підкритичному або критичному режимах;
- переріз струменя приймається постійним $S_{\text{г.с}} = \text{const}$.

Визначення тиску в КГД у початковий момент часу закінчення суміші виконується на підставі (2.1) за виразом:

$$p(t_1) = \frac{(K_{\text{г.о}} \cdot W_{\text{дуги}}(t) - m_{\text{вум.с}}) \cdot R_{\text{г}} \cdot T_{\text{г}}}{V_t} \quad (2.12)$$

де $m_{\text{вум.с}}$ - маса витекшої газопарової суміші з КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги, кг.

Для виразу (2.12) маса газопарової суміші, що витекла, з КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги визначається за виразом:

$$m_{\text{вум.с}}(t) = \int_{t_1}^t S_{\text{з.с.}} \cdot \gamma_{\text{з.с.}} \cdot v_{\text{з.с.}} dt \quad (2.13)$$

де $\gamma_{\text{г.с}}$ - густина газопарової суміші в КГД вимикача, кг/м³; $v_{\text{г.с}}$ - швидкість витікання газопарової суміші з КГД високовольтного вимикача, м/с.

Визначення швидкості та часу відновлення електричної міцності проміжку між контактами вимикача з рідким середовищем гасіння дуги виконують з урахуванням кількох характерних моментів часу і відповідних їм значень напруги:

– $U_{\text{розр.}}(t)$ - розрядна напруга, кВ;

– $U_{\text{відн.}}(t)$ - перехідна напруга або напруга відновлення електричної міцності, кВ.

Під час розгляду процесу відновлення електричної міцності проміжку між контактами високовольтного вимикача використовують насамперед зміну значення $U_{\text{відн.}}(t)$. Процес відновлення електричної міцності проміжку між контактами вимикача може бути представлений таким чином (рисунок 2.1):

– інтервал часу $0 < t < t_1$ лінійне відновлення електричної міцності;

– інтервал часу $t < t_2$ характеризується стійким горінням дуги

$U_{\text{розр.}} = \text{const}$, тобто не відбувається відновлення електричної міцності;

– інтервал часу $t > t_2$ лінійне збільшення електричної міцності проміжку між контактами високовольтного вимикача, що розмикаються.

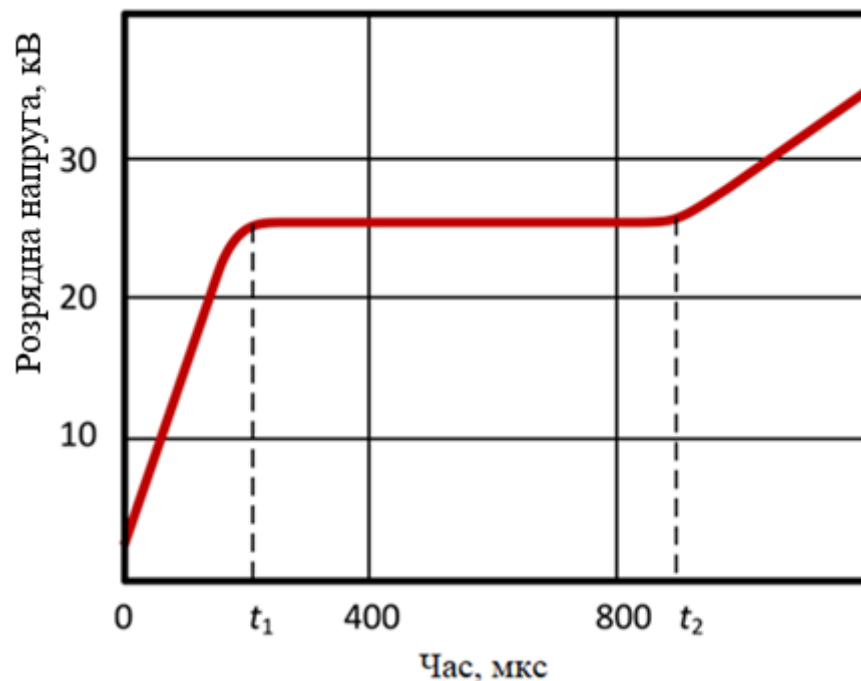


Рисунок 2.1 - Залежність відновлюваної електричної міцності (збільшення розрядної напруги)

Як відомо електрична міцність газопарової суміші в загальному випадку підпорядковується закону Пашена, тобто залежить від тиску і відстані між контактами вимикача. З огляду на те, що найбільший інтерес представляє відновлення електричної міцності за повністю розімкнутих контактів вимикача, то за законом Пашена приймається значення відстані між контактами $S_{м.к.} = const$. Тоді вираження закону Пашена через концентрацію нейтральних частинок що залишилися в КГД після повного розмикання контактів вимикача, запишеться у вигляді:

$$n_a = \frac{p_0}{k_B \cdot T_{0.д}} \quad (2.14)$$

де p_0 - тиск у КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги після повного розмикання контактів і переході струму через нуль, Па;

k_B - постійна Больцмана $k_B = 1,380649 \cdot 10^{-23}$, Дж/К;

$T_{0.д.}$ - температура стовбура дуги в момент повного розмикання контактів вимикача і при переході струму через нуль, К.

За концентрацією нейтральних частинок (n_a) за різних значень тиску ($p_{(0)}$) у КГД високовольтного вимикача збільшення розрядної напруги, тобто відновлення електричної міцності, може бути описано через безрозмірну змінну $x(t)$ через співвідношення:

$$U_{роз.}[x(t)] = A_i [x(t)]^{m_i} \quad (2.15)$$

де A_i - емпіричний коефіцієнт, що набуває певного значення на ділянці i

m_i - емпіричний коефіцієнт, що набуває певного значення на ділянці i .

Для виразу (2.15) значення емпіричних коефіцієнтів для різних значень i зменшуються за таблицею 2.2, де умови за температурою в КГД визначають відносно граничного значення температури залишкового стовбура дуги в КГД високовольтного вимикача, яке відповідає інтервалу температур $T \in [1200, 3000]$ (К).

Таблиця 2.2 - Значення емпіричних коефіцієнтів

i	Значення A_i	m_i	Умова щодо температури в КГД
1	25	0,67	$T_{0.д.} < T$
2	8,4	0,62	$T_{0.д.} > T$

Після розмикання контактів високовольтного вимикача і під час проходження струму через нуль дуга в КГД гасне й умова не виникнення зворотного загоряння дуги записується у вигляді:

$$U_{роз.}(t) > U_{відн.} \quad (2.16)$$

де $U_{роз.}(t)$ - визначається на підставі виразу (2.15), кВ;

$U_{відн.}(t)$ - величина напруги відновлення, зворотного запалювання дуги, кВ.

Варто зазначити, що напруга, яку розглядають у виразах (2.15) і (2.16) це значення напруг, що відповідають електричній міцності проміжків між контактами вимикача. Електрична міцність для газопарової суміші називається напругою, за якої відбувається пробій розглянутого проміжку, тобто втрата діелектричним проміжком своєї електричної міцності. Оцінюючи процеси горіння дуги і не відновлення зворотного запалювання дуги в КГД високовольтного вимикача, не розглядаються іонізаційні процеси, що відбуваються на поверхні електродів, тобто контактів вимикача. Усі зазначені факти враховуються в значеннях емпіричних коефіцієнтів (таблиця 2.2) і принциповій умові (2.16) - значення напруги відновлення дуги в якій ($U_{відн.}(t)$) уже враховує у своєму значенні всі зазначені фактори.

З урахуванням вище сказаного час гасіння дуги в КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем визначається на підставі кусочно-лінійної апроксимації функції $p_0(t, I)$ для необхідного факту встановлення моменту згасання дуги в КГД і виконання умови (2.16) для максимально досяжного в КГД значення електричної міцності проміжку між контактами вимикача $U_{роз.}(t) = U_{мак.роз.} \Big|_{t=t_{max}}$

$$U_{\text{мак.роз.}} = A_i \left[\frac{p_n (1 + \alpha_p \cdot I_{\text{д}}^n \cdot t_{\text{д}} \cdot v_{\text{конт.л}} \cdot t_{\text{д}})}{k_B (n_a, l_{\text{д}})_0 \cdot T_{\text{д.мак}}} \right]^{m_i} \quad (2.17)$$

де $T_{\text{д.мак}}$ - залишкова температура стовбура дуги в КГД високовольного вимикача в характерний момент часу, К.

За виразом (2.17) можливо визначити час гасіння дуги в КГД високовольного вимикача, водночас час гасіння дуги $t_{\text{д}}$ є функцією від струму дуги, тобто $t_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$ (рисунок 2.2).

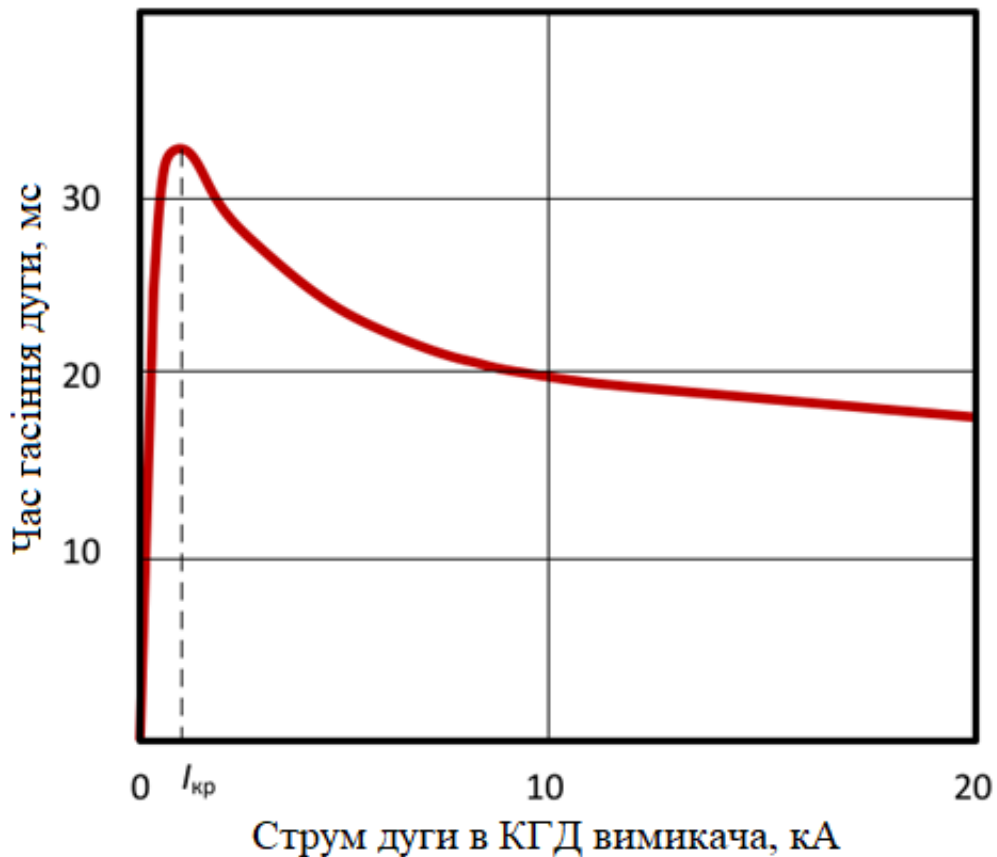


Рисунок 2.2 - Залежність часу гасіння дуги від струму відключення для вимикача з рідким середовищем гасіння дуги

Для рисунка 2.2 критичне значення струму ($I_{кр}$) змінюється для різних видів високовольтних вимикачів з рідким середовищем гасіння дуги. Залежність 2.6 подано для маломасляного вимикача.

2.2 Методика оцінки ресурсу вимикача за зносом контактів

Як було визначено в попередньому розділі, велике значення на технічний стан, а отже, і на ресурс високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги має сам процес горіння і гасіння дуги.

Під час проведення комутаційних операцій або циклів у КГД вимикача виникає електрична дуга, яка спричиняє термічне розкладання рідкого діелектрика - трансформаторної оливи або суміші на основі трансформаторної оливи. Продуктами термічного розкладання трансформаторного масла в КГД високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги є:

- водень (H_2);
- метан (CH_4);
- етан (C_2H_6);
- етилен (C_2H_4);
- ацетилен (C_2H_2);
- двоокис вуглецю (CO_2);
- монооксид вуглецю (CO);
- гідролітичний етилен вуглець ($CH_3 - CH_3$).

Крім зазначених продуктів розкладання трансформаторної оливи, у КГД високовольтного вимикача присутні іонізований газ і, головним чином, пари матеріалу контактів вимикача.

Усі зазначені домішки негативно позначаються на процесі гасіння дуги, збільшуючи час гасіння. Після 15 операцій типу О здійснених вимикачем час горіння дуги починає збільшуватися.

Істотно зростатиме, що знижує ефективність роботи вимикача в електричних мережах і може спричинити аварійну ситуацію, спричинену відмовою вимикача,

тобто під час подавання сигналу на вимкнення та розмикання контактів вимикача умова (2.16) не виконається і відбудеться зворотнє перекриття дуги.

Крім того, пари металів контактів вимикача, що утворюються в результаті горіння дуги, збільшують в'язкість оливи і знижують ефективність гасіння дуги за низьких температур навколишнього повітря. Графічна залежність відносної в'язкості оливи від вмісту в ній осаду представлена на рисунку 2.3.

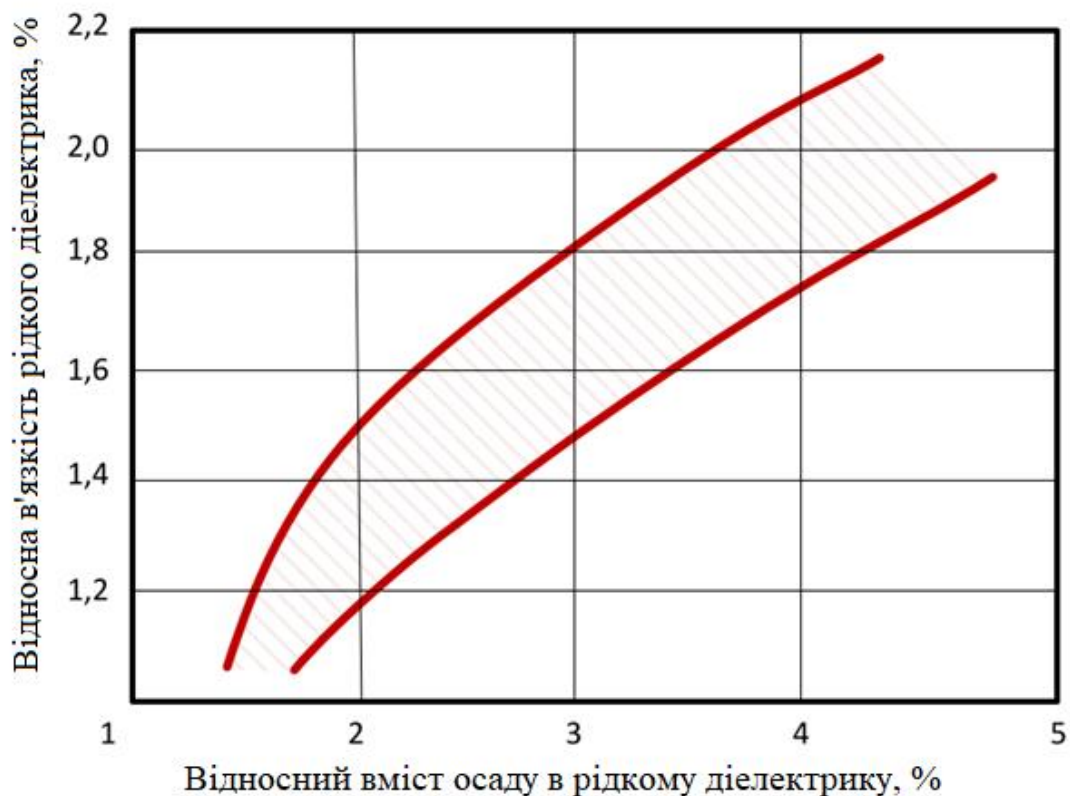


Рисунок 2.3 - Залежність в'язкості рідкого діелектрика від концентрації осаду

Збільшення часу горіння дуги залежно від відносної концентрації осаду в рідкому діелектрику для високовольтних вимикачів представлено на рисунку 2.4.

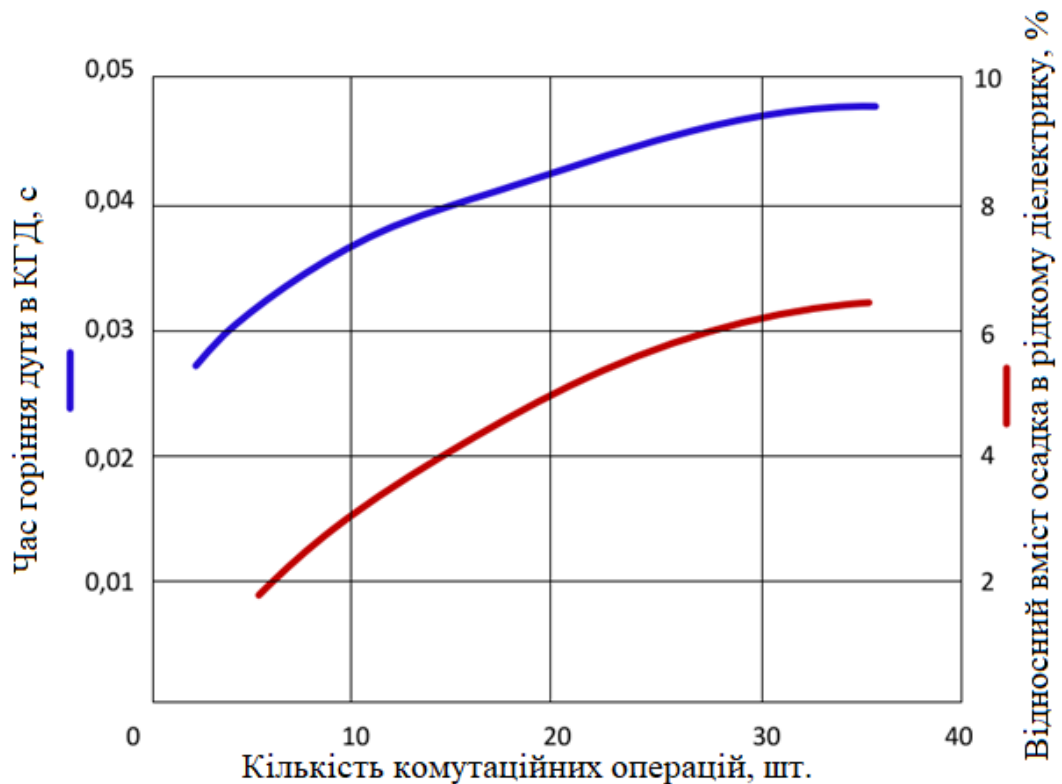


Рисунок 2.4 - Час горіння дуги в КГД вимикача і відносний вміст домішок у рідкому діелектрику залежно від числа комутаційних операцій

Домішки в рідкому діелектрику, що з'являються в результаті горіння дуги і розкладання контактів контактної групи високовольтних вимикачів з рідким середовищем гасіння дуги, також серйозно впливають на опір рідкого діелектрика. Нормальним вважається опір на рівні $R_{з.норм} = 10000$ (МОм). Залежність зниження опору рідкого діелектрика від числа комутаційних операцій показано на рисунку 2.5.

З огляду на те, що найбільше зниження параметрів рідкого діелектрика і відповідно ресурсу високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги та, як наслідок, зниження рівня його технічного стану досягається за представленими залежностями через підвищення концентрації металів від розкладання під дією дуги контактів, то необхідно і важливо, оцінювати зміну маси контактів вимикача.

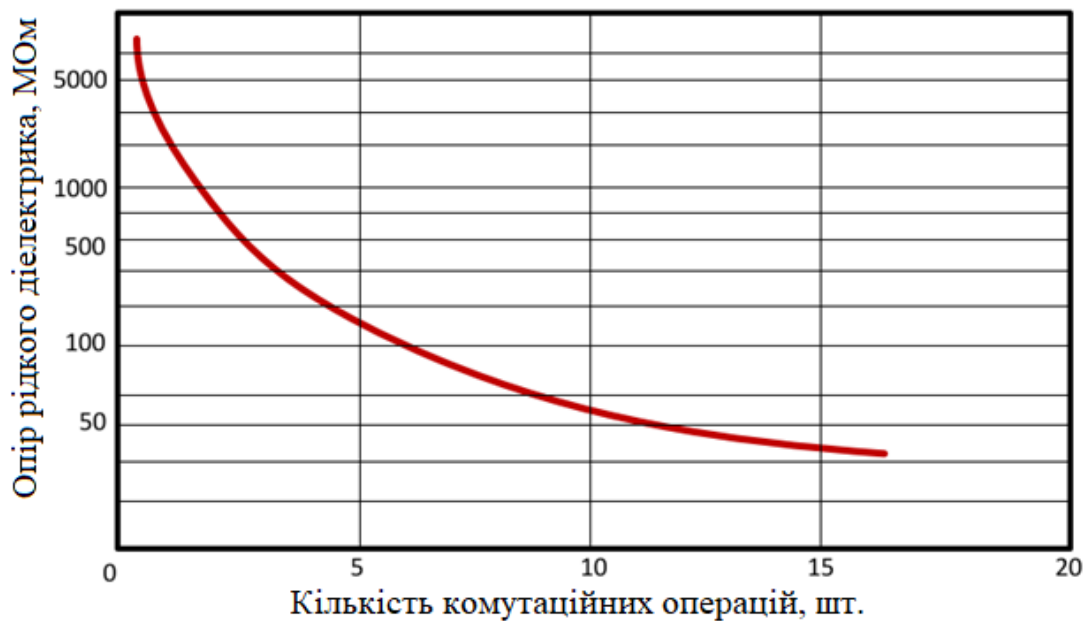


Рисунок 2.5 - Залежність опору рідкого діелектрика від числа комутаційних операцій

Зменшення маси контакту вимикача може бути визначено виразом:

$$\Delta m_{\text{конт.}} = K_{\text{матер.}} \cdot t_{\text{д}} \cdot I_{\text{відк}}^{\alpha} \quad (2.18)$$

де $K_{\text{матер.}}$ - коефіцієнт, який визначається матеріалом контакту вимикача;

$t_{\text{д}}$ - тривалість горіння дуги с;

$I_{\text{відк.}}$ - величина струму, який відключив вимикач кА;

α - коефіцієнт, що залежить від матеріалу контакту вимикача.

Для виразу (2.18) значення постійних коефіцієнтів в значущості від матеріалів контактів подано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Значення коефіцієнтів для виразу (2.18)

Матеріал контактів	Позначення матеріалу контактів	Постійні коефіцієнти	
		α	K_E
Мідь-Вольфрам	W-Cu	1,58	2,15
Мідь	Cu	1,8	0,274

Оцінка технічного стану в даному підході дає змогу не тільки контролювати зношення контактів високовольтного вимикача, а й за значеннями, отриманими за виразом (2.18), визначати рівень домішок у рідкому діелектрику, а отже, контролювати опір рідкого діелектрика, в'язкість рідкого діелектрика та час гасіння дуги.

Цей метод може бути реалізований для віддаленого контролю технічного стану з використанням засобів вимірювання струму, що проходить через вимикач. При цьому час горіння і гасіння дуги в КГД високовольтного вимикача оцінюється за осцилограмою, записаною для моменту комутації пристроєм моніторингу.

2.3 Методика оцінки за коефіцієнтом технічного стану високовольтного обладнання

Технічного стану розраховується для функціональних вузлів обладнання розподільчих мереж і для всього обладнання в цілому.

Для визначення технічного стану для узагальненого вузла розподільчої мережі використовується вираз:

$$I_{TC.O} = \frac{100 \cdot \sum_{i=1}^n KB_i \cdot ОГП_i}{4} \quad (2.19)$$

де KB_i - ваговий коефіцієнт для i -й групи параметрів; $ОГП_i$ - бальна оцінка i -ої групи параметрів; n - кількість груп параметрів для узагальненого вузла розподільчої мережі.

Для визначення технічного стану одиниці технологічного обладнання використовується вираз:

$$I_{TC} = \sum_{i=1}^n KBB_i \cdot ITCB_i \quad (2.20)$$

де K_{BV_i} - ваговий коефіцієнт для i - го функціонального вузла обладнання;
 I_{TCB_i} - індекс технічного стану i - го функціонального вузла обладнання; n -
 кількість функціональних вузлів, що впливають на підсумковий індекс технічного
 стану, визначається конкретним видом обладнання.

Також для оцінки технічного стан може застосовуватися коефіцієнт поточного
 технічного стану.

$$K_{ПТС.B.i} = 1 - \sum_{i=1}^n K_{ПТС.B.i} \quad (2.21)$$

де $K_{ПТС.У.i}$ - коефіцієнт поточного технічного стану i -го вузла обладнання;
 n - кількість вузлів обладнання, що впливають на технічний стан.

Варто зазначити, що на відміну від індексу технічного стану (I_{TC}), коефіцієнт
 поточного технічного стану ($K_{ПТС}$) визначається під час технічного діагностування
 або ремонту обладнання. І після проведення ремонту значення $K_{ПТС} = 1$. Порівняльні
 графіки зміни індексу технічного стану та коефіцієнта поточного технічного стану
 показано на рисунку 2.6.

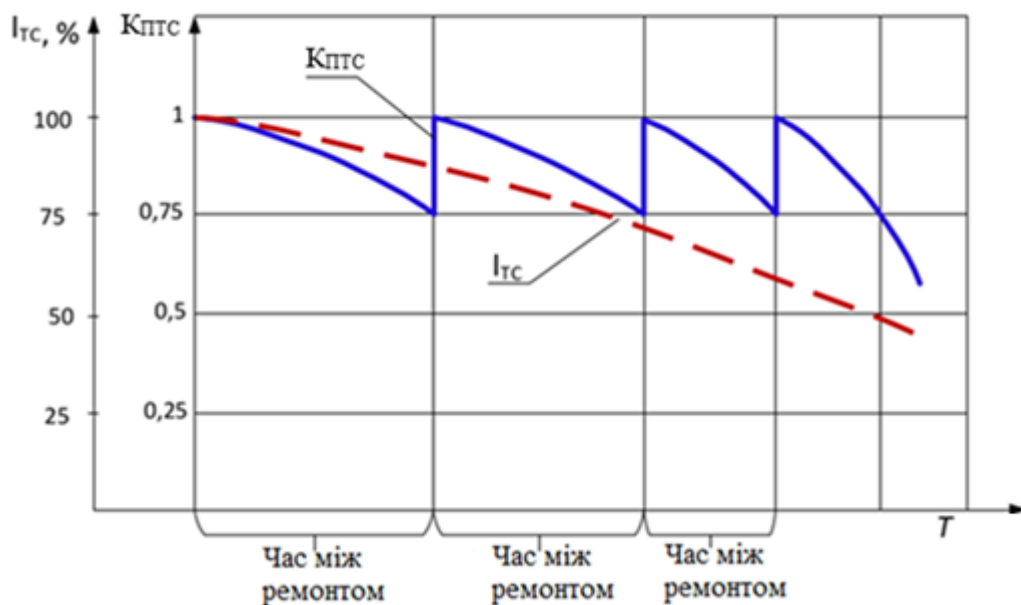


Рисунок 2.6 - Зв'язок індексу технічного стану та коефіцієнта поточного технічного стану

Для визначення вагових коефіцієнтів, рекомендується використання методу Сааті - метод парних порівнянь. Такий метод дає змогу визначити значення вагових коефіцієнтів для різних функціональних вузлів, спираючись на думки кількох фахівців - експертів. Застосування в цьому методі думок кількох експертів дає змогу знизити ймовірність суб'єктивного розподілу значень вагових коефіцієнтів.

2.4 Висновки до розділу

Визначено аналітичні залежності, що дають змогу визначати базові параметри функціонування високовольтних вимикачів з рідким середовищем гасіння дуги. До таких параметрів віднесено тиск усередині камери гасіння дуги, а також час відновлення електричної міцності проміжку між контактами вимикача після розмикання. Розглянуто метод оцінки технічного стану високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги, що базується на контролі зміни маси контактів вимикача. Оцінка технічного стану в даному підході дає змогу не тільки контролювати зношення контактів високовольтного вимикача, а й визначати рівень домішок у рідкому діелектрику, а отже, контролювати опір рідкого діелектрика, в'язкість рідкого діелектрика та час гасіння дуги. Даний метод може бути реалізований для віддаленого контролю технічного стану вимикача з використанням засобів вимірювання струму, що проходить через вимикач. При цьому час горіння і гасіння дуги в КГД високовольтного вимикача оцінюють за осцилограмою, записаною для моменту комутації пристроєм моніторингу.

Встановлено, що методика оцінки коефіцієнта поточного технічного стану дає змогу визначати знос обладнання або окремих його вузлів у періоді циклу між ремонтами обладнання. Після кожного ремонту обладнання коефіцієнт набуває значення, що дорівнює 1.

3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

3.1 Система дистанційної оцінки технічного стану вимикачів ВМТ-110

Основним параметром, що характеризує зміну технічного стану високовольтного вимикача, є рівень і число комутованих струмів. Для досліджуваного вимикача у паспорті подано графіки залежності числа комутацій для різних значень комутованих струмів. Однак, графічна залежність не може бути використана в роботі автоматизованої системи дистанційного контролю технічного стану. Тому паспортну залежність комутованого струму необхідно обробити засобами MS Excel:

- визначено максимально достовірні, характерні точки на графічній залежності з паспорта вимикача;
- отримані значення занесено в таблицю MS Excel;
- побудовано діаграму за визначеними точками;
- для побудованої діаграми вибрано вид тренда, що має найбільше значення достовірності апроксимації $-R^2$. Що ближче значення R^2 до одиниці, то достовірніше лінія тренда описує побудовану діаграму.

За представленою методикою визначено, що максимальне значення достовірності апроксимації має степеневу функцію тренда. При цьому достовірність апроксимації $R^2 = 0,9503$. Для даного рівняння степеневого тренда в MS Excel визначаємо рівняння тренда. Діаграма, побудована за даними паспорта вимикача серії ВМТ у MS Excel із лінією тренду та отриманим рівнянням лінії тренду з достовірністю апроксимації $R^2 = 0,9503$, показана на рисунку 3.1.

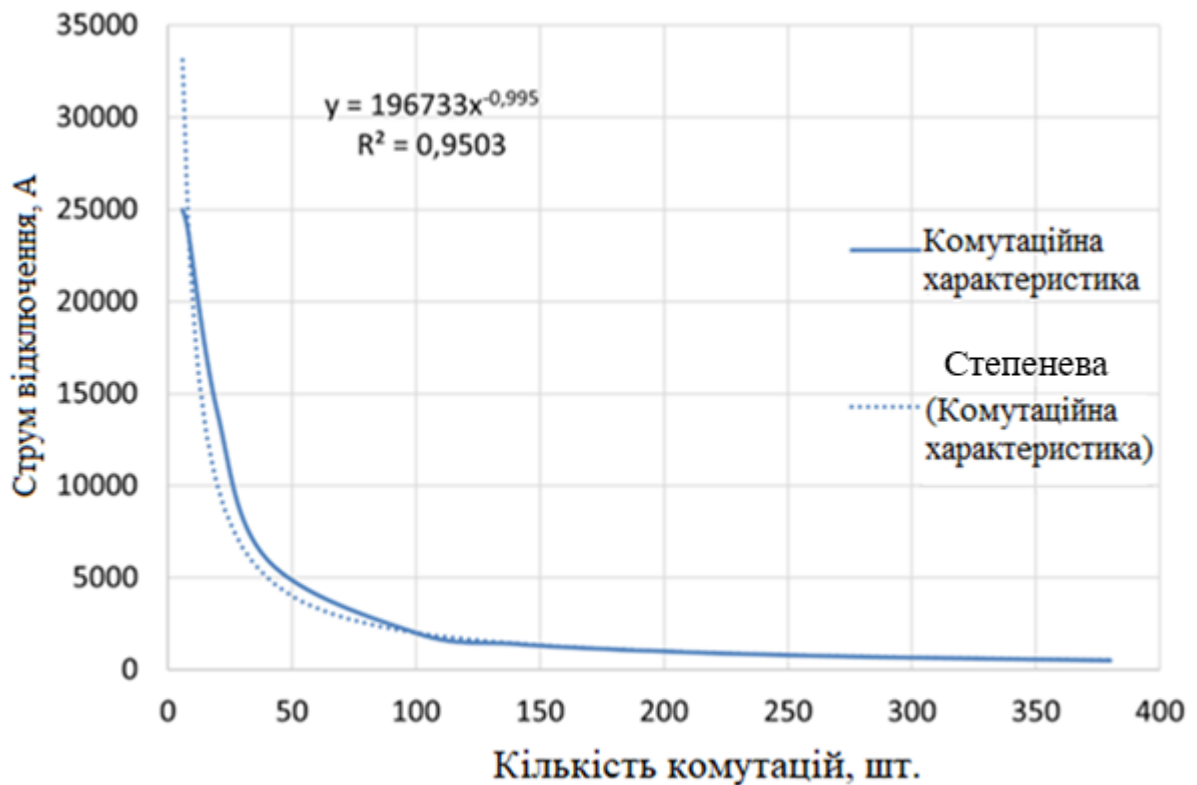


Рисунок 3.1 - Комутаційна характеристика вимикача серії ВМТ

Для визначення зниження комутаційного ресурсу вимикача типу ВМТ з номінальним струмом відключення 25 кВ може бути використана функція, отримана на підставі апроксимації паспортної характеристики:

$$I_{\text{відк.}i} = 196733 \cdot n_i^{-0,995} \quad (3.1)$$

де $I_{\text{відк.}i}$ - значення струму, що відключається на i -й операції А; n_i - допустиме число відключень i -го струму, шт.

Для перевірки достовірності отриманої функції (3.1) необхідно побудувати за нею діаграму також засобами MS Excel. Діаграму, побудовану за функцією (3.1), представлено на рисунку 3.2.

Для контролю достовірності змодельованої комутаційної характеристики вимикача ВМТ-110 було виконано порівняння характерних точок, отриманих за паспортною комутаційною характеристикою з розрахунковими точками за виразом (3.1). Порівняння значень представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Порівняння паспортної та змодельованої комутаційної характеристики

Паспортна комутаційна характеристика		Змодельована комутаційна характеристика	$\Delta K T_{,i} \%$
Число комутацій, шт.	Комутований струм ($K C_{(пасп.i)}$), А	Комутований струм ($K C_{мод.i}$), А	
380	500	518	3,6
280	700	703	0,42
220	900	894	0,66
200	1000	984	1,6
180	1100	1093	0,63
140	1400	1405	0,35
100	2000	1967	1,65
40	6000	5897	1,71
20	14000	13588	2,94
8	24000	24592	2,46
6	25000	25212	0,84

Порівняння значень паспортної та змодельованої комутаційних характеристик для характерних точок виконано за виразом:

$$\Delta K C_i = \left| 1 - \frac{K C_{мод.i}}{K C_{пасп.i}} \right| \cdot 100 \quad (3.2)$$

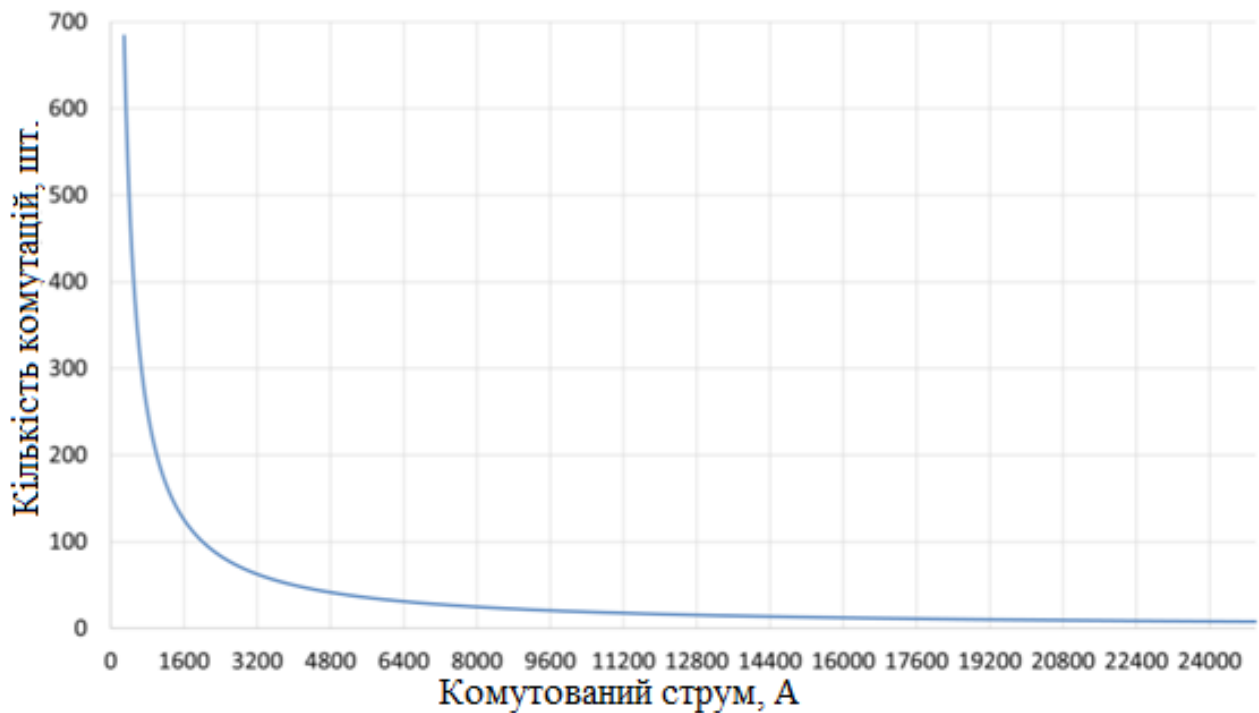


Рисунок 3.2 - Змодельована комутаційна характеристика вимикача серії ВМТ

За результатами таблиці 3.1 отримано, що відхилення значень змодельованої та паспортної комутаційних характеристик для більшості значень не перевищує 3 %, що є високим показником точності змодельованої характеристики. Отже, отримана залежність (рисунок 3.2) може бути використана для оцінки залишкового комутаційного ресурсу.

Для складання алгоритму роботи системи необхідно перетворити отриману комутаційну функцію (3.1) відносно числа комутацій:

$$n_i = 0,995 \sqrt{\frac{196733}{I_{відк.i}}} \quad (3.3)$$

Тоді підставивши перетворений вираз (3.3) і отримаємо:

$$\Delta P_{випрам.КР.i}^2 = \frac{1}{0,995 \sqrt{\frac{196733}{I_{відк.i}}}} \quad (3.4)$$

Значення витрати комутаційного ресурсу отримане за (3.4) необхідно визначати для кожної комутації вимикача. Визначення залишкового ресурсу в результаті кожної комутації визначається шляхом доповнення результуючого значення залишкового ресурсу.

Розроблену методику дистанційного автоматизованого оцінювання комутаційного ресурсу, для моделювання, необхідно відобразити у вигляді алгоритму. Алгоритм автоматизованого дистанційного оцінювання комутаційного ресурсу вимикача серії ВМТ-110 подано на рисунку 3.3.

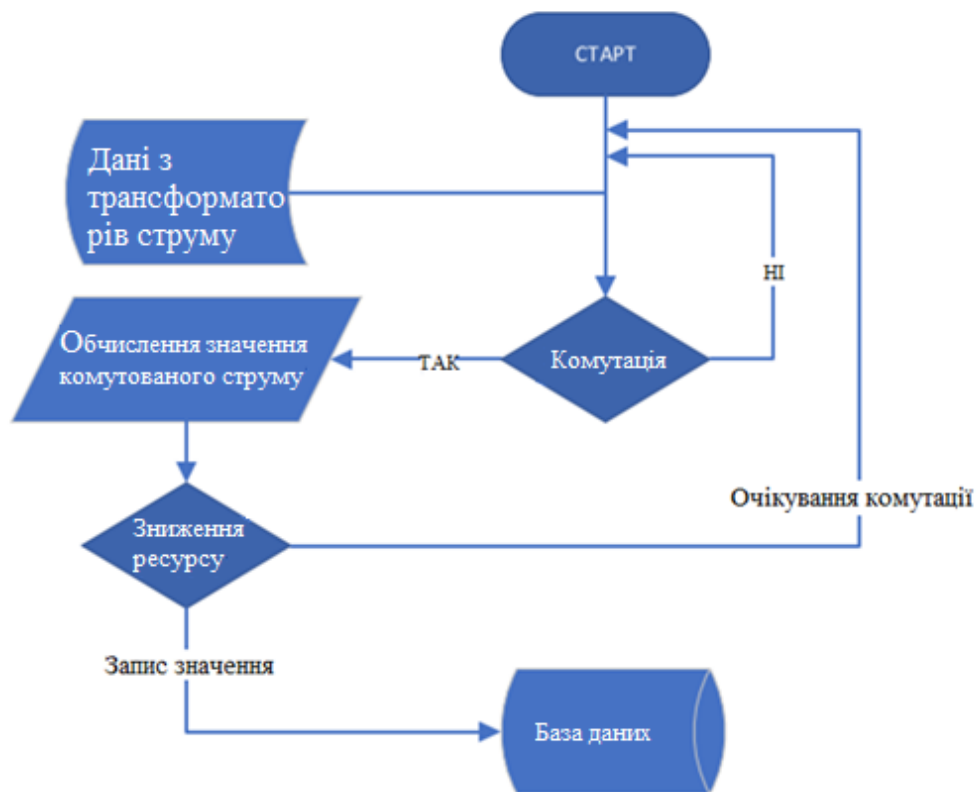


Рисунок 3.3 - Алгоритм автоматизації дистанційного контролю комутаційного ресурсу

Крім автоматизованого контролю комутаційного ресурсу система дистанційної оцінки технічного стану повинна забезпечувати контроль тиску в куполі вимикача ВМТ. Цей показник є важливим для вимикачів серії ВМТ. Від

рівня тиску залежить комутаційна здатність вимикача серії ВМТ. Зниження тиску у вимикача ВМТ може бути спричинене витоком газу, що, своєю чергою, спричинено відсутністю масла в додаткових резервуарах ковпака вимикача. Підвищення тиску, особливо в зимовий час, свідчить від потрапляння вологи або бруду у випускний клапан, а також може свідчити про деформацію гумових ущільнювачів.

Алгоритм автоматизованого дистанційного контролю надлишкового тиску представлено на рисунку 3.4.

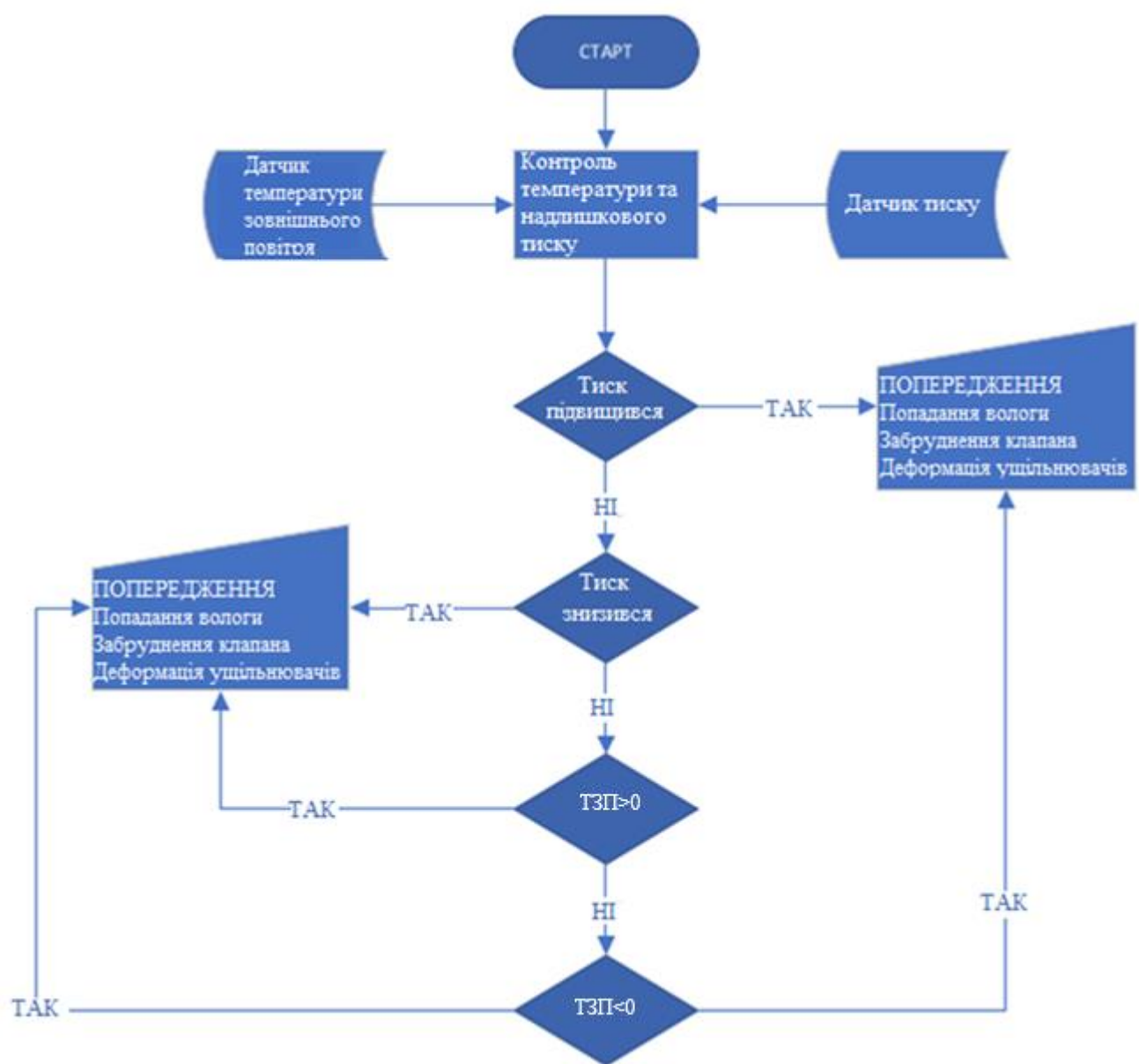


Рисунок 3.4 -Алгоритм автоматизованого дистанційного контролю надлишкового тиску

Запуск представлених на рисунках 3.3 і 3.4 алгоритмів відбувається тільки:

- при зміні контрольованого тиску;
- під час здійснення комутації.

У усіх інших випадки ведеться безперервний моніторинг параметрів:

- температура зовнішнього повітря (ТЗП);
- струм, що протікає через вимикач;
- надлишковий тиск у куполі вимикача.

Усі контрольовані параметри відображаються у вікні системи дистанційної оцінки технічного стану високовольтного вимикача (рисунок 3.5).

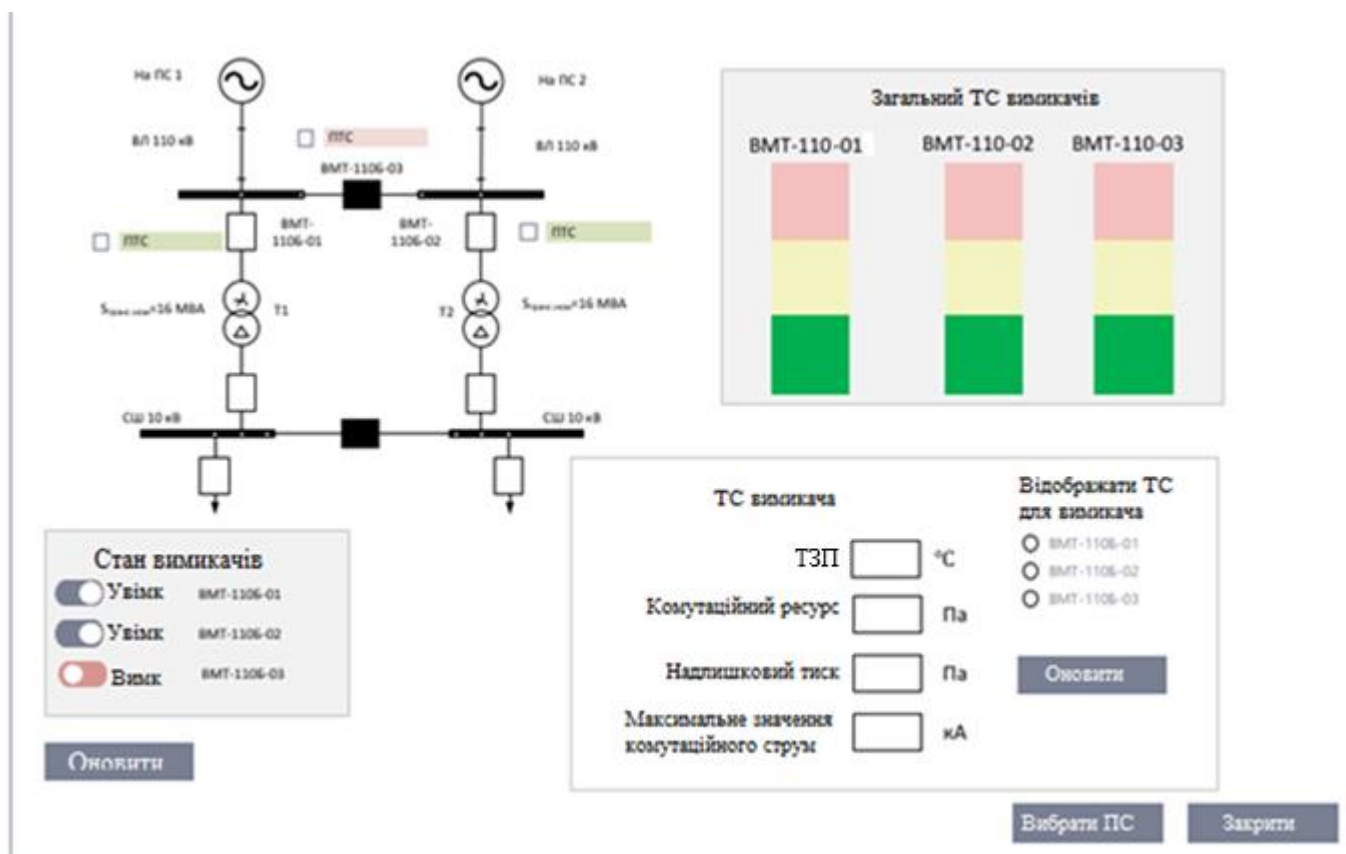


Рисунок 3.5 - Вікно розробленої системи дистанційної оцінки технічного стану вимикачів серії ВМТ

На рисунку 3.5 показано концепцію інтерфейсу системи дистанційного оцінювання технічного стану вимикачів серії ВМТ.

У вікні системи (рисунок 3.5) відображається однолінійна схема підстанції, на якій встановлено вимикачі серії ВМТ. Показано їхній стан: увімкнений або вимкнений. Для оновлення даних про стан вимикачів використовується кнопка "Оновити", розташована під групою перемикачів "Стан вимикача".

У правому верхньому кутку вікна показано загальний технічний стан вимикачів серії ВМТ, встановлених на підстанції. Загальний технічний стан визначається за шкалою "світлофор", де червоний колір свідчить про незадовільний стан вимикача, жовтий - про стан, що потребує уваги, і зелений - про задовільний стан.

Також у вікні системи демонструються параметри, що використовуються для оцінки технічного стану вимикачів серії ВМТ. Параметри представлені згідно з розробленими алгоритмами (рисунки 3.3 і 3.4). Для перемикачів параметрів, що відображаються для різних вимикачів, використовують групу перемикачів "Відображати ТС для вимикача".

У правій нижній частині вікна розташовані групи кнопок:

- "Вибрати ПС" - для переходу у вікно контролю технічного стану вимикачів наступної підстанції;
- "Закрити" - для закриття вікна контролю технічного стану вимикачів серії ВМТ.

3.2 Моделювання алгоритму дистанційної оцінки технічного стану вимикача ВМТ-110

Для моделювання розробленого алгоритму системи дистанційного оцінювання технічного стану вимикача серії ВМТ, використано програмний комплекс MATLAB\Simulink.

Для розроблення алгоритму системи дистанційної оцінки технічного стану вимикачів серії ВМТ використовуємо стандартні блоки бібліотеки Simulink.

Модель алгоритму системи дистанційного оцінювання технічного стану вимикача серії ВМТ представлено на рисунку 3.6.

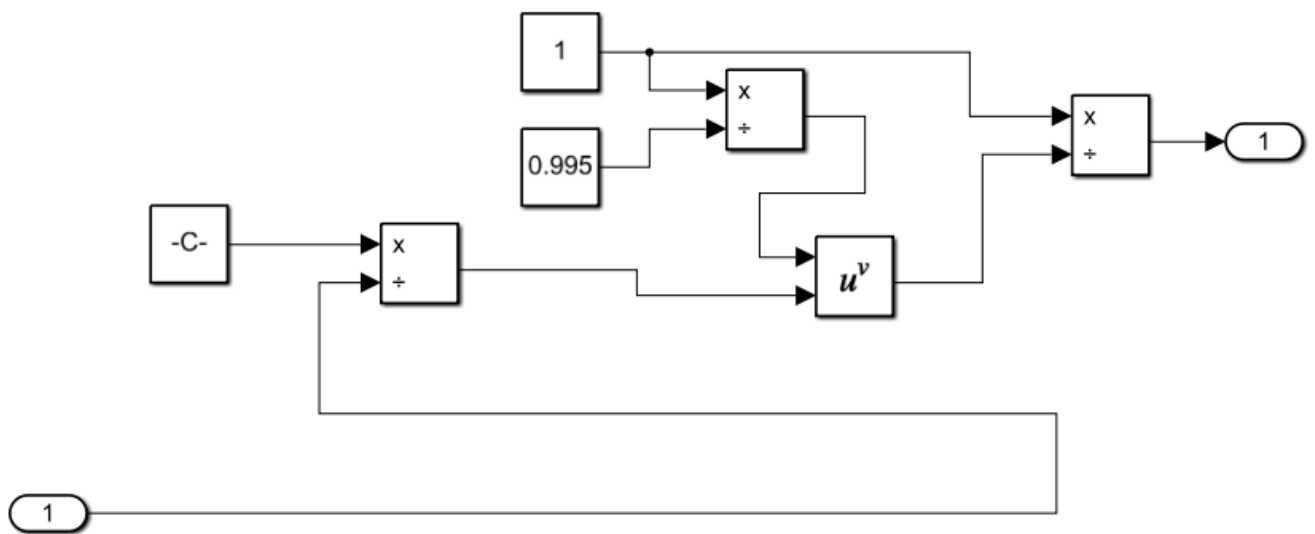


Рисунок 3.6 - Модель алгоритму контролю залишкового ресурсу

Для тестування моделі алгоритму розроблено тестову схему в MATLAB/Simulink, що представлена на рисунку 3.7.

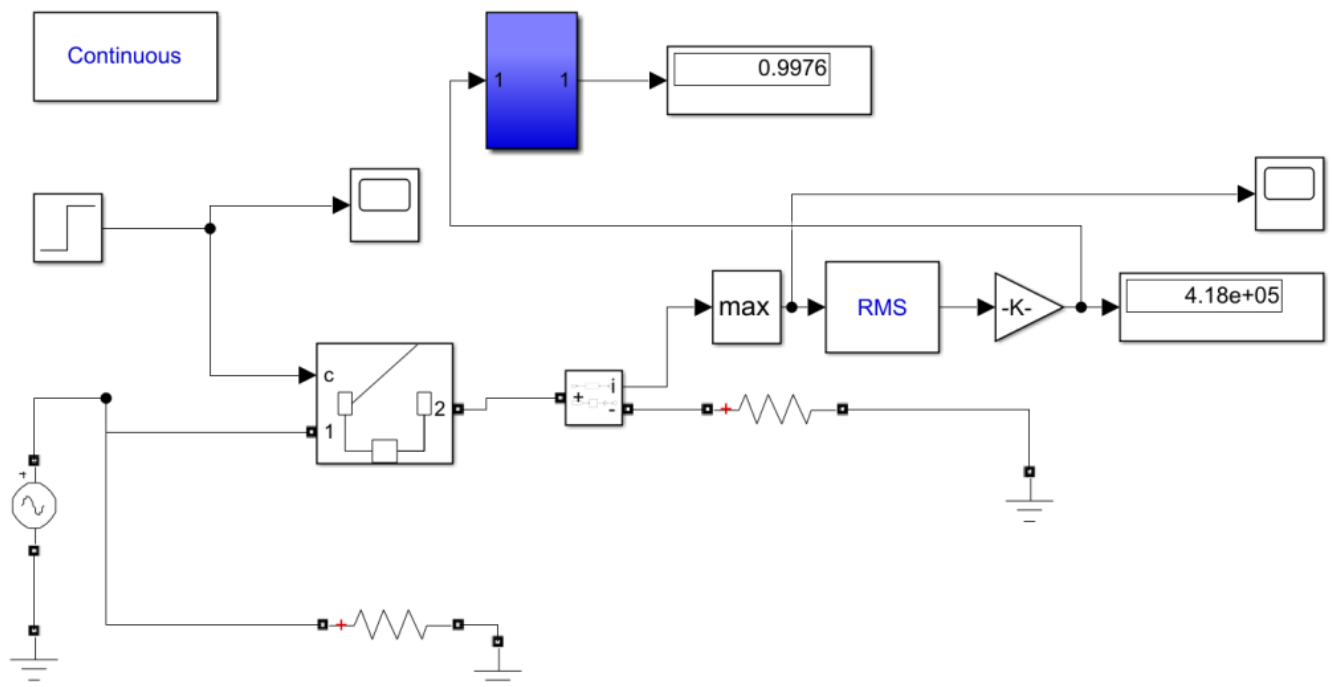


Рисунок 3.7 - Тестова модель

Для моделювання вимикача використовувався блок "Braker" з бібліотеки Simulink. Керування вимикачем виконував блок "Step".

Моделний час встановлено на рівні 10 с. Комутацію (увімкнення) вимикача здійснювали в момент модельного часу 9 с. Після цього дані отримані з блоку системи дистанційної діагностики, зі зміною комутаційного ресурсу відображались в блоці "Display". Значення вимірюного струму також фіксувалося за допомогою блоку "Display". Для тестування розробленої моделі використовувалися значення потужності (активної потужності), які задавалися в блок "RLC-Series Load". Для тестування використовувалося 33 варіанти різної потужності. Для кожного змодельованого варіант з потужністю навантаження записувалися дані струму і зміни комутаційного ресурсу. Результати комп'ютерного тестування подано в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Результати комп'ютерного експерименту

$P_{\text{нав.}i}, \text{ кВт}$	$I_{\text{відк.}i}, \text{ А}$	$\Delta P^2_{\text{витрат.КР.}i}$	$\Delta P^2_{\text{залишковий.КР.}i}$
100	0,428	0	1
500	2,153	1,14E-119	1
900	3,857	9,19E-112	1
1300	5,496	1,19E-78	1
1700	7,285	1,61E-59	1
2100	8,996	2,46E-48	1
2500	10,7	9,83E-41	1
2900	12,48	4,97E-35	1
3300	14,13	4,79E-31	1
3700	15,93	1,30E-27	1
4100	17,57	4,16E-25	1
4500	19,26	5,85E-23	1
5000	21,41	9,89E-21	1
6000	25,88	2,84E-17	1

Продовження таблиці 3.2

7000	29,97	5,14E-15	1
8000	34,27	3,19E-13	1
9000	38,57	7,88E-12	1
10000	43,12	1,17E-10	1
11000	47,13	8,17E-10	0,999999999
12000	51,75	5,29E-09	0,999999995
13000	56,06	2,29E-08	0,999999977
14000	59,93	7,13E-08	0,999999929
15000	64,04	2,05E-07	0,999999795
16000	68,45	5,58E-07	0,999999442
17000	72,58	1,26E-06	0,999998744
18000	77,44	2,95E-06	0,999997053
30000	127,9	4,49E-04	0,9995509
40000	171,4	3,18E-03	0,996825
80000	345,2	5,70E-02	0,943
120000	517,4	1,48E-01	0,852
4000000	1,70E+04	9,44E-01	0,056
10000000	4,30E+04	9,77E-01	0,0227
100000000	4,18E+05	9,98E-01	0,0024

За результатами тестування розробленого алгоритму системи дистанційної оцінки технічного стану отримано, що за низьких значень струму комутації вимикач практично не знижує свій комутаційний ресурс. Цей факт якісно і кількісно корелюється з паспортною комутаційною характеристикою.

Для високих значень комутуваних струмів, вище 5000 А, відбувається різке зниження комутаційного ресурсу вимикача. Комутація струму 418 кВ повністю витрачає комутаційний ресурс вимикача. Варто зазначити, що для вимикача допустимим струмом відключення є струм 25 кА, тобто, інакше кажучи, вимикач не розрахований на відключення струмів вище 25 кА. Відключення струму 17 кА, за

даними таблиці 3.2, також різко знижує комутаційний ресурс вимикача. Варто зазначити, що незважаючи на те, що вимикач розрахований на відключення струму такого рівня, це не може сприятливо позначитися на його технічному стані. Також під час моделювання не враховували час дії струму на контакти вимикача, оскільки використовували діюче амплітудне значення. У реальних умовах, дії піків ударного струму короткого замикання набагато нижчі за 1 с, тому потрібне проведення тестування розробленого алгоритму на реальних умовах вимкнення струмів короткого замикання і струмів навантаження вимикача серії ВМТ.

3.3 Висновки до розділу

У третьому розділі розроблено алгоритм дистанційного оцінювання технічного стану високовольтного вимикача серії ВМТ на напругу 110 кВ за витратою комутаційного ресурсу під час операцій увімкнення та вимкнення вимикача.

Розроблено алгоритм, що дає змогу вести дистанційний контроль надлишкового тиску у вимикача серії ВМТ. Алгоритм дає змогу видавати попередження і пропонувати можливі варіанти пошкоджень, що виникли у вимикачі ВМТ.

Розроблено концепцію програмного продукту, що дає змогу вести дистанційну оцінку та проводити контроль технічного стану високовольтного вимикача серії ВМТ.

Для тестування розробленого алгоритму дистанційного оцінювання технічного стану високовольтного вимикача серії ВМТ на напругу 110 кВ за витратою комутаційного ресурсу під час операцій увімкнення та вимкнення вимикача створено комп'ютерну модель алгоритму в програмному комплексі MATLAB/Simulink.

Розроблено тестову однофазну модель для верифікації результатів роботи алгоритму дистанційної оцінки технічного стану високовольтного вимикача серії ВМТ на напругу 110 кВ за витратою комутаційного ресурсу.

За результатами тестування встановлено, що під час комутації струмів, вищих за 5000 А, відбувається різке зниження комутаційного ресурсу вимикача. Комутація струму 418 кВ повністю витрачає комутаційний ресурс вимикача. Вимкнення струму 17 кА, найближчого за значенням до номінального струму відключення вимикача ВМТ, також різко знижує комутаційний ресурс.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Інструктажі з охорони праці

Усі працівники, які приймаються на постійну чи тимчасову роботу, і при подальшій роботі, повинні проходити на підприємстві навчання в формі інструктажів з питань охорони праці, надання першої допомоги потерпілим від нещасних випадків, а також з правил поведінки та дій при виникненні аварійних ситуацій, пожеж і стихійних лих.

За характером і часом проведення інструктажі з питань охорони праці поділяються на вступний, первинний, повторний, позаплановий та цільовий.

Вступний інструктаж проводиться:

- з усіма працівниками, які приймаються на постійну або тимчасову роботу, незалежно від їх освіти, стажу роботи та посади;
- з працівниками інших організацій, які прибули на підприємство і беруть безпосередню участь у виробничому процесі або виконують інші роботи для підприємства;
- з учнями та студентами, які прибули на підприємство для проходження виробничої практики;
- у разі екскурсії на підприємство;

Первинний інструктаж проводиться до початку роботи безпосередньо на робочому місці з працівником:

- новоприйнятим (постійно чи тимчасово) на підприємство;
- який переводиться з одного цеху виробництва до іншого;
- який буде виконувати нову для нього роботу;
- відрядженим працівником, який бере безпосередню участь у виробничому процесі на підприємстві [13].

Повторний інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці в терміни, визначені відповідними чинними галузевими нормативними актами або керівником підприємства з урахуванням конкретних умов праці, але не рідше:

- на роботах з підвищеною небезпекою - 1 раз на 3 місяці;
- для решти робіт - 1 раз на 6 місяців.

Позаплановий інструктаж проводиться з працівниками на робочому місці або в кабінеті охорони праці:

- при введенні в дію нових або переглянутих нормативних актів про охорону праці, а також при внесенні змін та доповнень до них;
- при зміні технологічного процесу, заміні або модернізації устаткування, приладів та інструментів, вихідної сировини, матеріалів та інших факторів, що впливають на стан охорони праці;
- при порушеннях працівниками вимог нормативних актів про охорону праці, що можуть призвести або призвели до травм, аварій, пожеж тощо;
- при виявленні особами, які здійснюють державний нагляд і контроль за охороною праці, незнання вимог безпеки стосовно робіт, що виконуються працівником;
- при перерві в роботі виконавця робіт більш ніж на 30 календарних днів - для робіт з підвищеною небезпекою, а для решти робіт - понад 60 днів.

Цільовий інструктаж проводиться з працівниками:

- при виконанні разових робіт, не передбачених трудовою угодою;
- при ліквідації аварії, стихійного лиха;
- при проведенні робіт, на які оформлюються наряд-допуск, розпорядження або інші документи.

Стажування (дублювання) та допуск працівників до роботи.

Новоприйняті на підприємство працівники після первинного інструктажу на робочому місці до початку самостійної роботи повинні під керівництвом досвідчених, кваліфікованих фахівців пройти стажування протягом 2 - 15 змін або дублювання протягом не менше шести змін.

Працівники, функціональні обов'язки яких пов'язані із забезпеченням безаварійної роботи важливих і складних господарчих потенційно небезпечних об'єктів або з виконанням окремих потенційно небезпечних робіт (теплові та атомні електричні станції, гірничодобувні підприємства, інші подібні об'єкти, порушення

технологічних режимів яких являє загрозу для працівників та навколишнього середовища), до початку самостійної роботи повинні проходити дублювання з обов'язковим суміщенням з протиаварійними і протипожежними тренуваннями відповідно до плану ліквідації аварій.

Допуск до стажування (дублювання) оформлюється наказом (розпорядженням) по підприємству (структурному підрозділу), в якому визначаються тривалість стажування (дублювання) та прізвище відповідального працівника. Перелік посад і професій працівників, які повинні проходити стажування (дублювання), а також тривалість стажування (дублювання) визначаються керівником підприємства. Тривалість стажування (дублювання) залежить від стажу і характеру роботи, а також від кваліфікації працівника. Керівнику підприємства надається право своїм наказом (розпорядженням) звільняти від проходження стажування (дублювання) працівника, який має стаж роботи за відповідною професією не менше 3 років або переводиться з одного цеху до іншого, де характер його роботи та тип обладнання, на якому він працюватиме, не змінюються.

Стажування (дублювання) проводиться за програмами для конкретної професії, посади, робочого місця, які розробляються на підприємстві і затверджуються керівником підприємства (структурного підрозділу) на робочих місцях свого або іншого подібного за технологією підприємства. У процесі стажування працівники повинні виконувати роботи, які за складністю, характером, вимогами безпеки відповідають роботам, що передбачаються функціональними обов'язками цих працівників.

4.2 Захист від статичної електрики

Статична електрика — це сукупність явищ, що пов'язані з виникненням, накопиченням та релаксацією вільного електричного заряду на поверхні або в об'ємі діелектричних та напівпровідникових речовин, матеріалів та виробів. Виникнення

зарядів статичної електрики є результатом складних процесів перерозподілу електронів чи іонів при стиканні двох різнорідних тіл (речовин) [13].

Порушення поверхневого контакту при терті тіл призводить до електризації - виникнення електричних зарядів, які можуть утримуватись на поверхні цих тіл протягом тривалого часу. Такі заряди, на відміну від рухомих зарядів динамічної електрики (електричний струм) знаходяться у статичному стані.

Електричні заряди виникають:

- при терті діелектричних тіл один об одного або об метал (наприклад, пасові передачі);
- при переливанні, перекачуванні, перевезенні в ємностях горючих та легкозаймистих рідин;
- при транспортуванні горючих газів трубопроводом;
- при подрібненні діелектриків;
- при переміщенні сухого запиленого повітря зі швидкістю понад 15 –20 м/с і т.п.

Систематичний вплив електростатичного поля підвищеної напруженості негативно впливає на організм людини, викликаючи, в першу чергу, функціональні розлади центральної нервової та серце-судинної систем.

Захист від статичної електрики та її небезпечних проявів досягається трьома основними способами:

- запобіганням виникнення та накопичення статичної електрики,
- прискоренням стікання електростатичних зарядів,
- нейтралізацією електростатичних зарядів.

4.3 Запобігання виникненню та ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного походження на об'єктах електроенергетики

Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій — це підготовка та реалізація комплексу правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання безпеки,

проведення оцінки рівнів ризику, завчасне реагування на загрозу виникнення надзвичайної ситуації на основі даних моніторингу (спостережень), експертизи, досліджень та прогнозів щодо можливого перебігу подій з метою недопущення їх переростання у надзвичайну ситуацію або пом'якшення її можливих наслідків.

Зазначені функції запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного характеру в нашій країні виконує Єдина державна система запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 3 серпня 1998 р. № 1198.

Єдина державна система запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру (ЄДСЗР) включає в себе центральні та місцеві органи виконавчої влади, виконавчі органи рад, державні підприємства, установи та організації з відповідними силами і засобами, які здійснюють нагляд за забезпеченням техногенної та природної безпеки, організують проведення роботи із запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного походження і реагування у разі їх виникнення з метою захисту населення і довкілля, зменшення матеріальних втрат.

Основною метою створення ЄДСЗР є забезпечення реалізації державної політики у сфері запобігання і реагування на надзвичайні ситуації, забезпечення цивільного захисту населення.

Завданнями ЄДСЗР є:

- розроблення нормативно-правових актів, а також норм, правил та стандартів з питань запобігання надзвичайним ситуаціям та забезпечення захисту населення і територій від їх наслідків;
- забезпечення готовності центральних та місцевих органів виконавчої влади, виконавчих органів рад, підпорядкованих їм сил і засобів до дій, спрямованих на запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- забезпечення реалізації заходів щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій;
- навчання населення щодо поведінки та дій у разі виникнення надзвичайної ситуації;

- виконання цільових і науково-технічних програм, спрямованих на запобігання надзвичайним ситуаціям, забезпечення сталого функціонування підприємств, установ та організацій, зменшення можливих матеріальних втрат;
- збирання та аналітичне опрацювання інформації про надзвичайні ситуації, видання інформаційних матеріалів з питань захисту населення і територій від наслідків надзвичайних ситуацій;
- прогнозування і оцінка соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій, визначення на основі прогнозу потреби в силах, засобах, матеріальних та фінансових ресурсах;
- створення, раціональне збереження і використання резерву матеріальних та фінансових ресурсів, необхідних для запобігання і реагування на надзвичайні ситуації;
- проведення державної експертизи, забезпечення нагляду за дотриманням вимог щодо захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій (у межах повноважень центральних та місцевих органів виконавчої влади);
- оповіщення населення про загрозу та виникнення надзвичайних ситуацій, своєчасне та достовірне його інформування про фактичну обстановку і вжиті заходи;
- захист населення у разі виникнення надзвичайних ситуацій;
- проведення рятувальних та інших невідкладних робіт щодо ліквідації надзвичайних ситуацій, організація життєзабезпечення постраждалого населення;
- пом'якшення можливих наслідків надзвичайних ситуацій у разі їх виникнення;
- здійснення заходів щодо соціального захисту постраждалого населення, проведення гуманітарних акцій;
- реалізація визначених законодавством прав у сфері захисту населення від наслідків надзвичайних ситуацій, в тому числі осіб (чи їх сімей), що брали безпосередню участь у ліквідації цих ситуацій;
- участь у міжнародному співробітництві у сфері цивільного захисту населення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі детально розглянуто використання високовольтних маломасляних вимикачів у розподільних мережах. Досліджено різні конструкції камер гасіння дуги, які використовують у високовольтних вимикачах із рідким середовищем. Розглянуто особливості підходу до гасіння дуги в масляних вимикачах.

Визначено аналітичні залежності, що дають змогу визначати базові параметри функціонування високовольтних вимикачів з рідким середовищем гасіння дуги. До таких параметрів віднесено тиск усередині камери гасіння дуги, а також час відновлення електричної міцності проміжку між контактами вимикача після розмикання. Розглянуто метод оцінки технічного стану високовольтного вимикача з рідким середовищем гасіння дуги, що базується на контролі зміни маси контактів вимикача. Оцінка технічного стану в даному підході дає змогу не тільки контролювати зношення контактів високовольтного вимикача, а й визначати рівень домішок у рідкому діелектрику, а отже, контролювати опір рідкого діелектрика, в'язкість рідкого діелектрика та час гасіння дуги. Даний метод може бути реалізований для віддаленого контролю технічного стану вимикача з використанням засобів вимірювання струму, що проходить через вимикач. При цьому час горіння і гасіння дуги в КГД високовольтного вимикача оцінюють за осцилограмою, записаною для моменту комутації пристроєм моніторингу.

Встановлено, що методика оцінки коефіцієнта поточного технічного стану дає змогу визначати знос обладнання або окремих його вузлів у періоді циклу між ремонтами обладнання. Після кожного ремонту обладнання коефіцієнт набуває значення, що дорівнює 1.

Розроблено алгоритм дистанційного оцінювання технічного стану високовольтного вимикача серії ВМТ на напругу 110 кВ за витратою комутаційного ресурсу під час операцій увімкнення та вимкнення вимикача.

Розроблено алгоритм, що дає змогу вести дистанційний контроль надлишкового тиску у вимикача серії ВМТ. Алгоритм дає змогу видавати

попередження і пропонувати можливі варіанти пошкоджень, що виникли у вимикачі ВМТ.

Розроблено концепцію програмного продукту, що дає змогу вести дистанційну оцінку та проводити контроль технічного стану високовольтного вимикача серії ВМТ.

Для тестування розробленого алгоритму дистанційного оцінювання технічного стану високовольтного вимикача серії ВМТ на напругу 110 кВ за витратою комутаційного ресурсу під час операцій увімкнення та вимкнення вимикача створено комп'ютерну модель алгоритму в програмному комплексі MATLAB/Simulink.

Розроблено тестову однофазну модель для верифікації результатів роботи алгоритму дистанційної оцінки технічного стану високовольтного вимикача серії ВМТ на напругу 110 кВ за витратою комутаційного ресурсу.

За результатами тестування встановлено, що під час комутації струмів, вищих за 5000 А, відбувається різке зниження комутаційного ресурсу вимикача. Комутація струму 418 кВ повністю витрачає комутаційний ресурс вимикача. Вимкнення струму 17 кА, найближчого за значенням до номінального струму відключення вимикача ВМТ, також різко знижує комутаційний ресурс.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Белякова, І. В., Сисак, І. М., & Котюк, В. А. (2023). Атомна енергетика України. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 239-240.
2. Свідницький, М. М., Буркало, В. І., & Філюк, Я. О. (2019). Пристрій обліку електричної енергії в режимі реального часу. Збірник тез доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 3, 58-58.
3. Белякова, І. В., Вакуленко, О. О., & Гейруш, Г. Г. (2021). Забезпечення ефективності електричних мереж металопрокатних підприємств. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 11-12.
4. Белякова, І. В., Вакуленко, О. О., & Гріша, В. В. (2021). Підвищення стійкості електричних мереж та проблеми їх модернізації. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 13-14.
5. Белякова, І. В., Вакуленко, О. О., & Фіголь, Р. П. (2020). Перспективи розвитку розподільних електромереж середнього класу напруги. Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 2, 94-95.
6. Оробчук, Б. Я., Продан, П. П., & Лещук, А. Я. (2024). Підвищення селективності роботи автоматики при тривалих коротких замиканнях. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 63-64.
7. Оробчук, Б. Я., & Розмірчук, О. (2024). Система моніторингу якості електроенергії на базі навчального тренажера. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 69-70.

8. БУНЯК, О., БАБЮК, С., ОРОБЧУК, Б., & МОВЧАН, Л. (2023). РИНОК ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ: ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 327(5 (2)), 25-29..

9. Тарасенко М.Г., Коваль В.П., Буняк О.А., Мовчан Л.Т. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів першого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 50 с.

10. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський) / укл. : О. Я. Гурик , І. Б. ОкіДЖний. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.