

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи магістра
зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
освітньо-професійна програма
«Системи електропостачання промислових підприємств, міст та локальних
об'єктів»

На тему: «Аналіз методів оцінювання рівня справності високовольтних
вимикачів розподільних пристроїв»
КНУ.МР.141.25.667с-09

Здобувач
групи СЕП-24м

/підпис/

Сергій ХУДОРОЖКОВ

/ ім'я, прізвище /

Завідувач кафедри:
д.т.н., проф.

/підпис/

Олег СІНЧУК

/ ім'я, прізвище /

Керівник:
к.т.н., доц.

/підпис/

Олексій МИХАЙЛЕНКО

/ ім'я, прізвище /

Гарант ОП:
к.т.н., доц.

/підпис/

Олексій МИХАЙЛЕНКО

/ ім'я, прізвище /

Кривий Ріг – 2025

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ
Худорожкова Сергія Руслановича

Тема роботи: Аналіз методів оцінювання рівня справності високовольтних
вимикачів розподільних пристроїв

1. Строк подання студентом роботи:
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: _____
3. Зміст пояснювальної записки _____
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
I	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
II	Олексій МИХАЙЛЕНКО		
III	Олексій МИХАЙЛЕНКО		

6. Календарний план

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	Загальна частина	
2	Спеціальна частина	
3	Проектно-конструкторська розробка	
4	Оформлення пояснювальної записки	
5	Оформлення презентації	

Дата видачі завдання: 01.09.2025 р.

Здобувач вищої освіти

Сергій ХУДОРОЖКОВ

Керівник роботи

Олексій МИХАЙЛЕНКО

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра на тему «Аналіз методів оцінювання рівня справності високовольтних вимикачів розподільних пристроїв» *КНУ.МР.141. 25.667-09*

_____ с., _____ рис., _____ табл.,
_____ літературних джерел

Об'єкт розробки – високовольтні вимикачі.

У загальній частині розглянуто відомості про високовольтні вимикачі та методики дослідження їх параметрів деградації, які дають можливість оцінювати зміну параметрів в процесі експлуатації, що дозволить швидко розпізнавати несправність, а також створити базу даних для технічного обслуговування устаткування.

У теоретичній частині обґрунтована методика оцінки теплових параметрів, яка дозволяє з доволі високою точністю визначати та систематизувати данні з теплових знімків .

У аналітично-дослідницькій частині виконано експериментальні дослідження теплових знімків за допомогою програмного забезпечення MATLAB Image Processing та статистичного критерію, що дозволили отримати методику аналізу стану високовольтних вимикачів.

ВИСОКОВОЛЬТНІ ВИМИКАЧІ, ПІДСТАНЦІЯ, МЕТОДИКА, НАГРІВ,
ОБРОБКА ЗОБРАЖЕНЬ, ПРОГНОСТИЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1	7
1.1 Загальна характеристика вимикачів	7
1.2 Класифікація та порівняльний аналіз вимикачів	7
1.3 Види пошкоджень їх причини та ознаки	11
1.3.1 Пошкодження ізоляції	12
1.3.2 Несправності контактної системи	14
1.3.3 Пошкодження приводного механізму та кінематики	15
1.4 Методи діагностування	16
1.4.1 Вібраційний метод контролю	16
1.4.2 Акустичні методи діагностування високовольтних вимикачів	18
1.4.3 Діагностування підвищеною напругою	19
1.5 Причини нагріву в енергосистемах	20
1.6 Залежність нагріву від струмового навантаження	21
1.7 Види теплового методу контролю	22
1.7.1 Контактні методи теплового контролю	23
1.7.2 Безконтактні методи теплового контролю	24
1.8 Методика проведення теплового контролю	25
1.9 Нормативи та допустимі температурні відхилення згідно стандартів	27
РОЗДІЛ 2	30
2.1 Обґрунтування методики аналізу теплових знімків. Переваги використання візуального калібрування	30
2.2 Обґрунтування застосування колірного індексування та лінійної інтерполяції	31
2.3 Опис розробленої методики. Підготовка середовища та завантаження вихідних даних	32
2.3.1 Відокремлення області даних	33
2.3.2 Побудова колірної карти та індексування зображення	34
2.3.4 Калібрування та формування абсолютного температурного поля	35
2.3.5 Статистичний аналіз та критерій виявлення дефектів	36
РОЗДІЛ 3	38
3.1 Забезпечення експериментальної частини та об'єктів обстеження	38
3.2 Використання методики обробки тепловізійного зображення	40
3.2.1 Завантаження вихідного зображення тепловізора	41
3.2.2 Вирізання робочої області та температурної шкали	42
3.2.3 Побудова колірної карти температурної шкали	42
3.2.4 Перетворення зображення у індексований формат	43

3.2.5	Формування температурного поля у фізичних одиницях	44
3.2.6	Побудова гістограми температурного розподілу	44
3.2.7	Розрахунок статистичних параметрів і визначення перегрітих ділянок	45
3.2.8	Експорт отриманих результатів у Excel-файл	46
3.3	Аналіз розподілу температур трьох видів вимикачів. Вакуумний вимикач	48
3.3.1	Аналіз розподілу температур масляного вимикача	49
3.3.2	Аналіз розподілу температур елегазового вимикача	50
3.4	Висновки до практичного застосування аналізу теплових знімків	51
	ВИСНОВКИ	53
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	55
	ДОДАТКИ	56

ВСТУП

Надійність роботи розподільчих пристроїв електроенергетичних систем таких як підстанції та розподільчі установки, залежить безпосередньо від технічного стану їх ключових апаратів, серед яких високовольтні вимикачі займають особливе місце. Саме вони забезпечують комутацію силових кіл у штатних та аварійних режимах, локалізацію ушкоджень, підтримання стійкості енергосистеми та її безпечну експлуатацію. Порухи справності вимикачів може призвести до відмов, тривалих відключень, теплових пошкоджень, зниження якості електроенергії та значних економічних втрат. Тому питання своєчасної, точної та об'єктивної оцінки їх технічного стану є одними з найбільш актуальних у сучасній практиці експлуатації електрообладнання.

З огляду на розвиток діагностичних технологій, у тому числі тепловізійного контролю, вимірювальних систем, прогнозувальної аналітики та цифрових засобів моніторингу, виникає необхідність комплексного аналізу наявних методів оцінювання справності високовольтних вимикачів. Що дозволяє змогу визначити їх ефективність, обмеження та можливості для вдосконалення систем технічного обслуговування та підвищення рівня безпеки об'єктів електроенергетики.

Метою роботи є аналіз існуючих методів оцінювання рівня справності високовольтних вимикачів розподільних пристроїв та визначення їх інформативності, переваг і недоліків у практиці експлуатації та розробка методу аналізу теплових знімків в середовищі програмного забезпечення MATLAB Image Processing.

Для досягнення мети у роботі вирішуються питання аналізу конструктивних особливостей високовольтних вимикачів та чинників, що можуть призвести до їхніх несправностей, опрацювання сучасних підходів до діагностування і контролю технічного стану, серед яких тепловізійний, вібраційний, електричний та комбінований контроль; а також формування

узагальнених рекомендацій щодо ефективного використання методів оцінювання рівня справності високовольтних вимикачів у практичних умовах.

Предмет дослідження – методи та критерії оцінювання їх технічного стану високовольтних вимикачів.

Методи дослідження, використані у роботі, включають аналіз наукових джерел і нормативної документації, порівняльний аналіз діагностичних технологій, методи теплового контролю, статистичну обробку результатів та елементи технічної діагностики.

Наукова новизна роботи полягає у структурованому системному підході до порівняння та оцінювання сучасних методів діагностики високовольтних вимикачів з акцентом на їх практичну ефективність у реальних умовах експлуатації.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання висновків та рекомендацій для підвищення надійності роботи розподільних пристроїв, оптимізації технічного обслуговування, запобігання аварійним ситуаціям та економії витрат на ремонт обладнання.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ БУДОВИ, РОБОТИ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ

1.1 Загальна характеристика вимикачів

Вимикачі високої напруги – один із ключових елементів електричних мереж та систем електропостачання, вони виконують функцію оперативного та надійного керування електричними колами, а також захист обладнання від роботи аварійних режимів. Вимикачі виконують функції комутації робочих струмів, відключення перевантажень і коротких замикань, а також організовують можливість проведення ремонтних та профілактичних робіт на обладнанні без повного знеструмлення мережі.

Основною роботою вимикача є швидке і безпечне розмикання електричного кола під навантаженням, особливо під час аварійного режиму, коли у колі виникають значні електродинамічні та термічні навантаження. Наразі в енергосистемах використовують вакуумні, елегазові, масляні та повітряні вимикачі, кожен з яких має свої технічні переваги, обмеження та характерні області використання.

Вимикач має рухомі та нерухомі контакти, систему приводу, яка здійснює операції вмикання й вимикання, дугогасильну систему, а також ізоляційні елементи, які забезпечують надійність під дією високих напруг. Приводи вимикачів можуть бути електромагнітними, пружинними, гідравлічними або пневматичними, і від їхньої конструкції залежить швидкодія та механічна надійність комутаційних операцій.

Надійність вимикачів визначається їхньою здатністю виконувати комутаційні операції у широкому діапазоні режимів, зберігаючи механічну та електричну цілісність протягом усього терміну служби.

1.2 Класифікація та порівняльний аналіз вимикачів

Високовольтні вимикачі є складною конструкцією, керованою електромагнітними, пружинними, гідравлічними або пневматичними приводами, також їх можна розподілити на кілька типів залежно від середовища в якому здійснюється процес гасіння дуги. Історично їх розробка, дослідження та впровадження йшло починаючи з масляних у 1920-1950 роках, далі з'явилися повітряні вимикачі у 1940-1960 роках, а згодом – вакуумні та елегазові.

За середовищем масляні вимикачі, гасять дугу в трансформаторному маслі. Для вимикачів цього типу характерно нижча електрична міцність дугогасного проміжку, ці вимикачі мають посередню зносостійкість та значно менший міжремонтний ресурс. Капітальний ремонт необхідно проводити кожні сім відключень струмів короткого замикання, це обумовлено тим, що трансформаторне масло підлягає заміні, оскільки під час експлуатації втрачає свої ізоляційні та дугогасні властивості після комутації. З точки зору безпеки, масляні вимикачі є найнебезпечнішими з погляду пожежної безпеки, оскільки містять легкозаймисту рідину. Вони також мають найбільш згубний вплив на навколишнє середовище, оскільки масло нерідко потрапляє у ґрунт через порушення герметичності баків або в разі аварії. З огляду на всі недоліки, масляні вимикачі практично не випускаються і поступово замінюються сучаснішими аналогами.

Повітряні вимикачі використовують потік стисненого повітря для гасіння електричної дуги. За даними аналізу літературних джерел, повітряні вимикачі практично не використовуються, оскільки вони є найменш ефективними, мають великі габаритні розміри та дорогі в обслуговуванні, а їхня установка вимагає великих відстаней. Повітряні вимикачі поступово замінюються ефективнішими та надійнішими вимикачами, хоча вони є вибухо та пожежобезпечними та безпечними щодо навколишнього середовища, недоліком їх експлуатації є чутливість до впливу температури та вологості навколишнього середовища.

Вакуумні вимикачі здійснюють гасіння дуги у глибокому вакуумі. Вони мають найпростішу конструкцію, що забезпечує найвищу механічну міцність серед усіх типів, також вони мають високу зносостійкість, невеликі габаритні розміри є нечутливими до впливу навколишнього середовища, оскільки мають повністю запаяну герметичну камеру. Вакуумний вимикач не вимагає обслуговування дугогасної та контактної частини і має найменший обсяг обслуговування, а після вичерпання комутаційного ресурсу вакуумний вимикач підлягає заміні.

Елегазові вимикачі в якості дугогасного середовища використовують електричний газ (SF₆), він має найвищу діелектричну міцність, особливо на напрузі 110 кВ і вище. Такі вимикачі є абсолютно безпечними з точки зору пожежної безпеки та мають високу зносостійкість, також є нечутливими до впливу навколишнього середовища завдяки герметичній камері. Хоча електричний газ є небезпечним парниковим газом, технічно справний і періодично обслуговуваний вимикач має малий відсоток витоків і, як правило, не завдає шкоди навколишньому середовищу. Після вичерпання комутаційного ресурсу елегазовий вимикач підлягає капітальному ремонту з оцінкою можливості його подальшої експлуатації. Елегазові та вакуумні вимикачі визнані найбільш ефективними, якісними та надійними, тому саме їм віддається перевага при будівництві нових об'єктів та технічному переоснащенні старих. Повна класифікаційна схема високовольтних вимикачів представлена на рис.1.1.

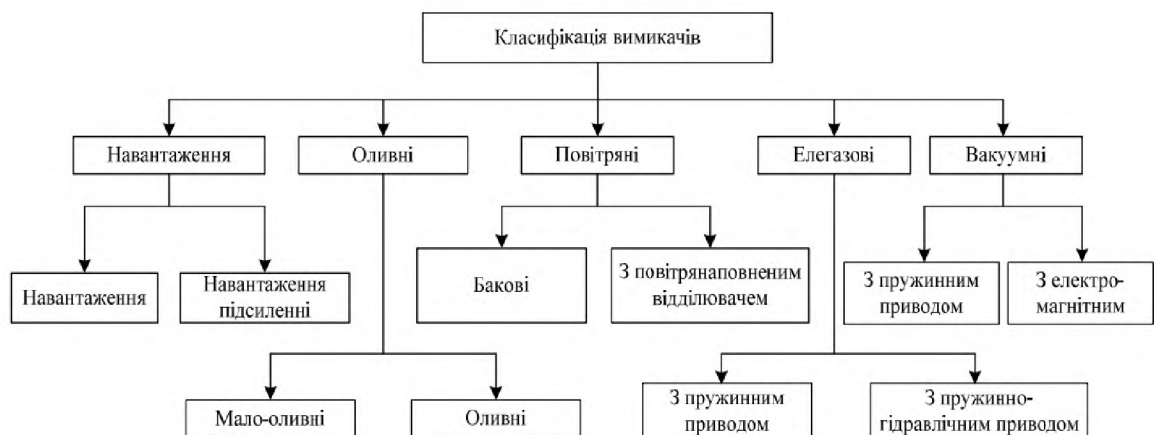


Рис.1.1. Класифікація вимикачів

Використовуючи досвід експлуатації вимикачів різних категорій, що описаний у працях [1-3], можна зробити порівняльний аналіз вимикачів за їх параметрами. Однією з важливих конструкторських та експлуатаційних характеристик є вага та габарити вимикачів, що є чи не малим критерієм при розробці енергосистеми. Якщо порівнювати вимикачі на напругу 110 кВ, то, незважаючи на покращені експлуатаційні характеристики, елегазові та вакуумні мають у кілька разів менший габаритний розмір, ніж масляні та повітряні. Питання експлуатації та обслуговування також є ключовим, включаючи проведення періодичних капітальних, поточних та позапланових ремонтів. Вакуумний вимикач є найбільш простим у цьому плані, оскільки не вимагає обслуговування дугогасної та контактної частини, його конструкція спрощена, що полегшує обслуговування без спеціалізованого обладнання. Не зважаючи на те що елегазовий вимикач має складнішу конструкцію, обсяг його періодичних технічних обслуговувань не перевищує обсягу робіт з вакуумним вимикачем. При експлуатації елегазового вимикача необхідно лише слідкувати за рівнем та докачувати елегаз у разі зниження тиску.

Однією з найважливіших характеристик є механічна міцність вимикачів. Розглядаючи три типи комутаційних апаратів прослідковується пряма залежність: чим простіша конструкція вимикача, тим вищою буде його механічна міцність. Серед трьох основних типів, вакуумний вимикач вирізняється найпростішою конструкцією і, відповідно, найвищою механічною міцністю, тоді як масляний вимикач має найменшу міцність.

Електрична міцність також є критично важливою характеристикою вимикачів. У цьому аспекті, елегаз демонструє найвищу діелектричну міцність, що особливо помітно на напрузі 110 кВ та вище. При цьому, дугогасне середовище вакуумних вимикачів на напругу 110 кВ включно не поступається елегазовим за електричною міцністю. Масляні вимикачі, навпаки, характеризуються нижчою електричною міцністю дугогасного проміжку.

Щодо комутаційного ресурсу, який визначає дозволена кількість циклів роботи вимикача. Ця кількість прямо залежить від величини комутуваних струмів – чим більший струм, тим швидше апарат вичерпує свій ресурс. Після вичерпання комутаційного ресурсу вакуумний вимикач підлягає заміні, Елегазовий, в свою чергу, вимагає проведення капітального ремонту, під час якого оцінюється його стан і визначається можливість подальшої експлуатації. Масляний вимикач має значно менший міжремонтний ресурс, як правило капітальний ремонт є обов'язковим після семи автоматичних відключень струмів короткого замикання. Це спричинено необхідністю заміни трансформаторного масла, яке втрачає ізоляційні та дугогасні властивості після комутації.

Окрему увагу в електроустановках приділяють пожежній безпеці. Масляні вимикачі є найбільш небезпечними в цьому контексті, оскільки містять легкозаймисту рідину – трансформаторне масло. Це вимагає підвищених вимог пожежної безпеки в розподільних пристроях із масляними вимикачами. Натомість, елегазові та вакуумні вимикачі вважаються абсолютно безпечними, оскільки вони конструктивно не містять легкозаймистих рідин або матеріалів. Короткий порівняльний аналіз вимикачів надано у таблиці 1.1

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика повітряного, масляного, вакуумного та елегазового вимикачів

Тип	Габарити	Обслуговування	Зносостійкість	Безпечність під час експлуатації	Екологічність
Елегазові	Невеликі	Змащення механізмів керування в мінімальному обсязі	Висока	Немає ризику виникнення вибуху або зовнішніх проявів	При утилізації або витоку екологічно небезпечний
Вакуумні	Не габаритні	Масило механізмів керування в мінімальному обсязі	Висока	Немає ризику виникнення вибуху або зовнішніх проявів	Відсутність забруднення навколишнього середовища
Масляні	Відносно	Періодична	Посередня	Ризик виникнення	Екологічно

	великі розміри пристрою	заміна олії		пожежі або вибуху	небезпечний
Повітряні	Установка, що вимагає великих відстаней	Часта заміна дугогасних контактів, обслуговування механізму управління	Середня	Вибухо- та пожежобезпечний	Безпечний

1.3 Види пошкоджень їх причини та ознаки

Метою цього пункту є аналіз особливостей експлуатації високовольтних електричних вимикачів (ВВ), визначення відсоткової частки пошкоджень вимикачів різних конструкцій через аналіз літературних джерел, визначення ризиків, що виникають під час експлуатації вимикачів технічний стан яких є невизначеним.



Рис.1.2. Частота відмов вимикачів різних видів

Аналіз літературних джерел [1-3] та статистики пошкоджень демонструє, що елегазові вимикачі мають значно меншу частку відмов у загальній структурі пошкоджених високовольтних вимикачів, складаючи 7,1%, тоді як частка повітряних вимикачів становить 22,3%, а масляних вимикачів – 70,6%. Не зважаючи на загальну надійність, досвід експлуатації фіксує низку пошкоджень вимикачів, спричинених різними факторами.

1.3.1 Пошкодження ізоляції

Пошкодження ізоляції є однією з найсерйозніших і найнебезпечніших несправностей високовольтних вимикачів, оскільки пошкодження такого виду може призвести до повного міжфазного або міжконтактного пробоя, а

в деяких випадках – до вибуху обладнання. Ізоляція забезпечує електричну міцність апарата, розділяючи струмопровідні частини між собою та від заземлених елементів. Надійність ізоляції критично залежить від якості використовуваного матеріалу, його герметичності та чистоти.

За критерієм пошкодження всі дефекти ізоляції можна розділити на три критерії. Першим можна виділити вроджені дефекти, вони формуються ще на етапі виробництва ізоляційного матеріалу або безпосередньо обладнання. Такі дефекти можуть виникати внаслідок нерівномірної товщини ізоляційного шару, присутності сторонніх включень, надмірної пористості або інших технологічних недоліків виробництва. Часто такі вади залишаються непомітними на початкових етапах експлуатації, але з часом можуть стати прямою причиною електричного пробоя. Другим видом є експлуатаційні дефекти, що утворюються протягом терміну використання обладнання. Їхнє виникнення спровоковане тривалим впливом робочих умов, таких як електричні, теплові або механічні навантаження, а також природним старінням матеріалів. Випадкові пошкодження є наслідком, зовнішніх, непередбачуваних факторів, включаючи механічні удари, вплив підвищеної вологості, забруднення навколишнім середовищем або наслідки аварійних ситуацій є третім з основних джерел походження дефектів.

За характером впливу на ізоляцію, дефекти поділяють на локальні та системні. Локальні дефекти являють собою невеликі пошкодження, які можуть бути неочевидними при поверхневій діагностиці. Вони є вкрай небезпечними через свою схильність до поширення і потенційного перетворення на повний пробій. На противагу цьому, системні дефекти мають більш глобальний характер, охоплюючи, наприклад, рівномірне старіння ізоляції по всій її площі або значне загальне зниження механічної міцності матеріалу. Крім того, виділяються особливі види дефектів серед яких часткові розряди є мікроскопічними електричними пробоями всередині ізоляційного матеріалу. Хоча ці розряди не проходять через всю товщу ізоляції, вони викликають її поступове руйнування і вважаються одним із

найбільш поширених та небезпечних прихованих дефектів. Кліматичні фактори такі як вологість та забруднення також належать до особливих факторів, проникнення вологи або накопичення пилу на поверхні ізоляції різко знижує її електричну міцність, що може стати прямою причиною збільшення струмів витоку та наступного пробоя.

Пошкодження ізоляції можна класифікувати за матеріалом та характером пробоя. До основних видів відноситься пробій твердої ізоляції, пробій або зниження електричної міцності рідкого діелектрика та зниження тиску/густини газоподібного діелектрика. Ознакою пошкодження ізоляції є часткові розряди, які виникають у діелектрику під впливом високої напруги через локальні дефекти. Ці розряди з часом руйнують ізоляцію, утворюючи провідні канали. Іншою ознакою є заміна хімічного складу середовища – наприклад, у маслі, пробій ізоляції може призвести до значного збільшення вмісту газів, що виявляється за допомогою хроматографічного аналізу. Для елегазових вимикачів головною ознакою є зниження тиску або витік газу, що безпосередньо погіршує дугогасні та ізоляційні властивості.

Запобігання пошкодженням ізоляції вимагає суворого дотримання експлуатаційних норм та регулярної діагностики. Найважливішим є систематичний контроль якості ізоляційного середовища. Для масляних вимикачів це включає періодичний відбір проб масла з вимірюванням його пробивної напруги та проведенням хроматографічного аналізу розчинених газів. Для елегазових вимикачів необхідний безперервний контроль тиску газу та, за необхідності, його прокачування.

1.3.2 Несправності контактної системи

Контактна система високовольного вимикача зазнає значних електродинамічних та теплових навантажень під час комутацій, що часто призводить до погіршення її технічного стану рис. 1.3. Одним з важливіших видів пошкодження контактної системи є зношення та ерозія дугогасильних контактів, що спричинені багаторазовою комутацією струмів навантаження

та, особливо, струмів короткого замикання. З часом метал контактів обгоряє, через що його поверхня стає нерівною, що в свою чергу ускладнює процес гасіння дуги та зменшує комутаційний ресурс апарата. Другий поширений вид пошкоджень – це перехідний опір у головному або струмопровідному контакті. Таке пошкодження може бути викликано окисленням контактних поверхонь, забрудненням їх продуктами розкладу дугогасного середовища наприклад, сажею в масляних ВВ, або послабленням натиску контактів через деформацію або старіння пружин. Третій вид пошкодження включає механічні деформації та порушення кінематики контактів, що призводить до несинхронного або неповного замикання/розмикання.

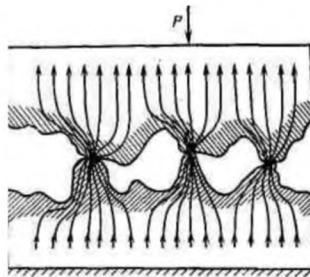


Рис. 1.3. Зіткнення поверхонь пошкоджених контактів

Запобігання пошкодженням контактної системи вимагає комплексного підходу, що включає як експлуатаційні, так і технічні заходи. Найпершим методом є суворе дотримання комутаційного ресурсу вимикача, визначеного виробником, особливо кількості відключень струмів короткого замикання. Наприклад, для масляних вимикачів капітальний ремонт необхідно проводити після семи автоматичних відключень струмів короткого замикання.

1.3.3 Пошкодження приводного механізму та кінематики

Пошкодження приводного механізму та кінематики належать до найпоширеніших причин відмов високовольтних вимикачів. Привід є складною системою, яка забезпечує необхідну швидкість і силу для

переміщення контактів та швидкого гасіння дуги. Його несправність порушує задані часові характеристики комутаційного апарата, що може призвести до несинхронного спрацювання, уповільнення вимикання та, як наслідок, до руйнування дугогасильної камери або нездатності вимкнути струм короткого замикання. Поширеними є механічні пошкодження елементів такі як тріщини, деформації або злам важелів, тяг, шарнірів, а також зношення рухомих частин та підшипників, що спричиняє заклинювання або підвищене тертя. Для пружинних приводів критичним є послаблення або злам пружин або несправність двигуна заведення пружин, електромагнітним приводам характерні несправності, пов'язані з обмотками електромагнітів або вторинними колами керування. На рисунку 1.4. показані відсоткові частки відмов таких вузлів та деталей.



Рис. 1.4. Діаграма відмов елегазових вимикачів

Запобігання пошкодженням приводу та кінематики вимагає регулярного контролю швидкісних характеристик вимикача. Ці характеристики, такі як час роботи двигуна зведення пружини, струм приводу та струм двигуна зведення пружини, є дуже інформативними і можуть контролюватися сучасними мікропроцесорними системами діагностування.

1.4 Методи діагностування

Сучасне електротехнічне обладнання характеризується доволі високими розрахунковими параметрами надійності. Однак, під час експлуатації, вплив різноманітних чинників, умов роботи та режимів використання постійно призводить до погіршення початкового технічного стану обладнання, що

знижує його експлуатаційну надійність та підвищує ризик виникнення відмов. Надійність будь-якого електротехнічного обладнання визначається не лише якістю його виробництва, але й залежить від проведення обстежень протягом експлуатації, належного технічного обслуговування та своєчасності проведення ремонтних робіт. В цьому підрозділі будуть описані декілька методів як руйнівного так и неруйнівного контролю, існуючі методи викладені на рис. 1.5.

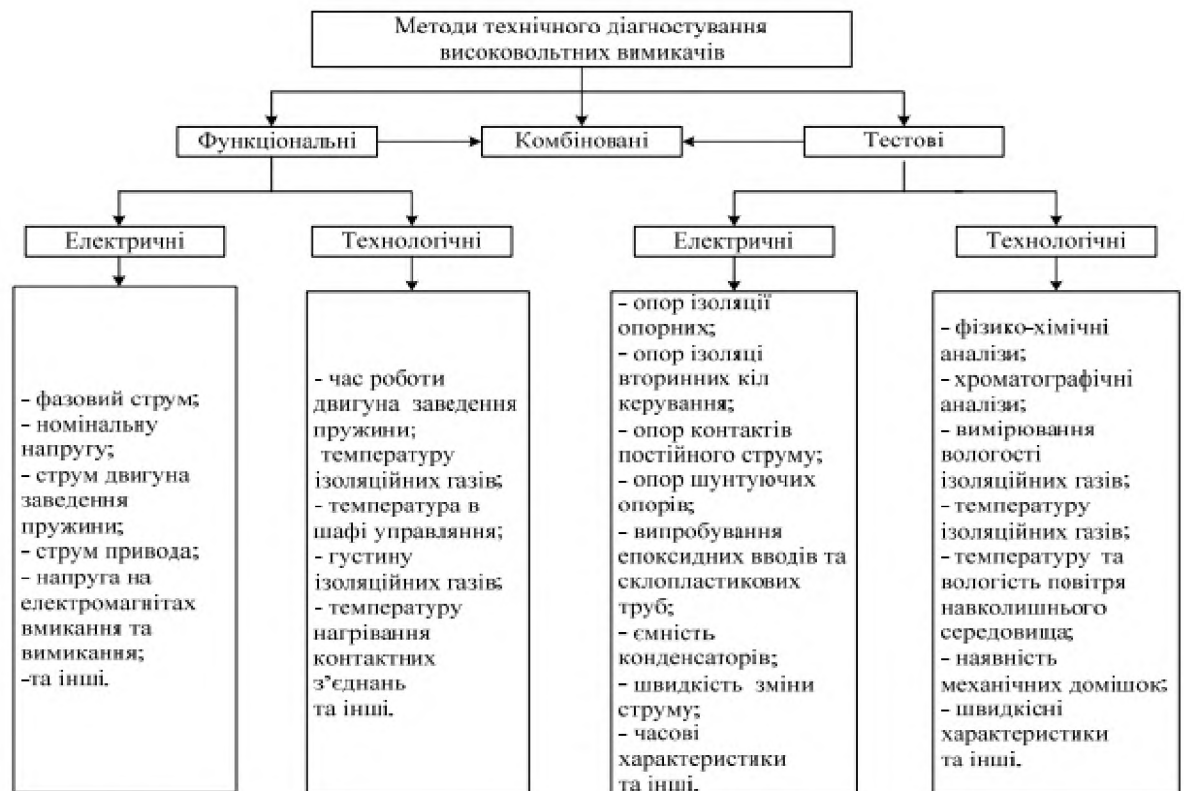


Рис.1.5. Методи технічного діагностування високовольних вимикачів

1.4.1 Вібраційний метод контролю

Вібраційний метод діагностування використовується для оцінки механічного стану високовольного вимикача, а саме його приводного механізму та кінематичної системи. Привід – це складна система важелів, тяг і пружин, яка забезпечує необхідну швидкість і послідовність руху контактів під час операцій вмикання та вимикання. Метод дозволяє виявити несправності, пов'язані зі зносом, деформацією або послабленням елементів

кінематики, що призводить до порушення часових характеристик вимикача, несинхронного спрацювання полюсів або збільшення тертя. Крім того, вібраційний метод застосовується для контролю стану гідравлічних та пневматичних систем приводу, виявляючи проблеми з тиском, клапанами або двигунами зведення пружин.

Базується вібраційний метод на фіксації та аналізі коливань, які генеруються вимикачем під час його роботи, тобто в процесі комутації. Кожен комутаційний апарат має свій унікальний, характерний для справного стану вібраційний профіль. Для проведення діагностики на корпус вимикача або елементи його приводу встановлюються високочутливі акселерометри, які перетворюють механічні коливання на електричні сигнали. Далі ці сигнали реєструються, оцифровуються та піддаються спектральному аналізу, наприклад, за допомогою перетворення Фур'є у спеціалізованому програмному забезпеченні.

Принцип виявлення несправностей полягає у порівнянні поточного вібраційного спектра вимикача з його еталонним або попередньо записаним спектром у справному стані. Будь-які зміни в кінематичній системі або приводі такі як збільшення тертя, люфти у шарнірах, тріщини або послаблення кріплень призводить до появи нових гармонік у спектрі вібрації або до зміни амплітуди вже наявних частот. Наприклад, збільшення тертя, може проявитися у вигляді високочастотних коливань, тоді як значне механічне пошкодження або зміна швидкості руху контактів може змінити час спрацювання та амплітуду ударних імпульсів. Таким чином, аналізуючи склад та інтенсивність вібрації, можна ідентифікувати тип несправності, її локалізацію (наприклад, несправність двигуна заведення пружин або проблему в гідравлічному контурі) та оцінити ступінь її розвитку.

1.4.2 Акустичні методи діагностування високовольних вимикачів

Використовуються для оцінки механічного та електричного стану високовольних вимикачів шляхом аналізу звукових коливань, що генеруються апаратом. Ці методи застосовуються для контролю приводного механізму та кінематики, подібно до вібраційних методів, оскільки дозволять фіксувати нехарактерні звукові імпульси, викликані зносом, тертям, ударами або люфтами рухомих частин під час комутації. Однак, на відміну від вібраційних методів, акустичні методи мають унікальну перевагу яка виражається у можливості виявлення електричних дефектів у дугогасильній камері та ізоляції. Цей метод дозволяє ефективно реєструвати шуми пов'язані з частковими розрядами, які можуть бути ознакою погіршення електричної міцності ізоляції.

Грунтується дана методика на реєстрації звукових хвиль, що випромінюються вимикачем у процесі його роботи або за наявності дефекту. Метод поділяється на дві основні групи звичайний звуковий (шумовий) аналіз та акустична емісія. Звичайний звуковий аналіз використовує мікрофони для реєстрації звуків у чутному діапазоні, дозволяючи виявити сильні механічні удари або аномальний шум двигунів приводу. Метод акустичної емісії є більш чутливим і використовує ультразвукові датчики, які фіксують високочастотні акустичні імпульси, нечутні для людського вуха, такі імпульси генеруються внаслідок швидких процесів до яких відносяться: рух газів, удари металевих частин або, що найважливіше, розряди у діелектрику. Датчики акустичної емісії встановлюються безпосередньо на корпусі або ізоляторі вимикача.

Виявлення несправностей акустичним методом відбувається шляхом аналізу часу приходу та інтенсивності звукових імпульсів. У випадку діагностики механічних частин вимикача, вимірюється послідовність та інтенсивність ударних хвиль під час операцій. Будь-які зміни в часових характеристиках або поява додаткових, нехарактерних імпульсів свідчать про порушення регулювання, знос або заклинювання. У випадку діагностики

ізоляції, ультразвукові датчики фіксують високочастотні імпульси, що виникають у місцях часткових розрядів, наприклад, усередині ізолятора або в порожнині елегазового вимикача. Проаналізувавши інтенсивність та частоту імпульсів акустичної емісії, можна не тільки виявити факт наявності часткових розрядів, а й, використовуючи метод триангуляції з кількома датчиками, локалізувати джерело електричного дефекту, що дозволяє вчасно провести ремонт і запобігти пробою ізоляції.

1.4.3 Діагностування підвищеною напругою

Основна мета цього методу полягає у стрес-тестуванні ізоляційної системи шляхом прикладання до неї напруги, яка є суттєво вищою за номінальну робочу, але не перевищує рівень, гарантований виробником для нової ізоляції. Цей цілеспрямований електричний вплив необхідний для виявлення прихованих та розвинутих дефектів ізоляції, які можуть не проявитися під час звичайної експлуатації, але з часом призведуть до аварійного пробою. Таким чином, високовольтні випробування слугують важливим інструментом для попередження пошкодження.

Методологія випробувань чітко регламентована галузевими нормами та передбачає використання різних видів підвищеної напруги до яких відносяться змінна, постійна або імпульсна, що імітує комутаційні або грозові перенапруги. Процес випробувань полягає поступовому нарощуванні прикладеної напруги до заданого нормованого значення, з подальшим її витримуванням протягом встановленого часу. Під час цього процесу відбувається контроль ключових діагностичних параметрів, таких як струми витоку та тангенс кута діелектричних втрат ізоляції. Обладнання вважається таким, що витримало випробування, якщо протягом усього часу не зафіксовано пробою ізоляційного проміжку та не відбулося різких стрибків струмів витоку, що свідчать про локальні пробої.

Ключове значення високовольтних випробувань полягає в їхній здатності форсувати прояв дефектів. Якщо ізоляція має критичні вади, такі як

глибоке зволоження, забруднення або механічні тріщини, то прикладена підвищена напруга спричиняє пробій дефектної зони, що призводить до вимкнення випробувальної установки і, відповідно, до бракування апарата. Таким чином, випробування підвищеною напругою виконує як діагностичну функцію, підтверджуючи необхідний рівень електричної міцності, та превентивну, знімаючи з експлуатації елементи, що знаходяться на межі руйнування. Регулярне проведення випробувань цього методу, у межах технічного обслуговування, є обов'язковою складовою для забезпечення довгострокової надійності роботи як високовольтних вимикачів так і іншого електроустаткування.

1.5 Причини нагріву в енергосистемах

Фундаментальною основою нагріву будь-якого елемента електричної мережі є перетворення електричної енергії в теплову під час проходження струму крізь провідник. До експлуатаційних причин нагріву можна віднести погану площу контактів, поверхні контактів мають мікроскопічні нерівності, тому струм проходить лише через окремі точки дотику "плями контакту". Це різко зменшує ефективний переріз провідника в цій зоні та збільшує локальний опір. У процесі експлуатації під дією вібрацій, циклів нагрівання-охолодження та окислення, площа цих плям зменшується, що підвищує нагрів. Також в наслідок нагріву утворюється оксидна плівка яка має вищий питомий опір, ніж чистий метал, що також підвищує нагрів, в наслідок чого пришвидшується окислення.

Тепловий ефект є одним з механізмів впливу на ізоляцію електрообладнання під час експлуатації. Ефект виникає через діелектричні втрати в ізоляційному матеріалі, які перетворюються на тепло під дією високої напруги. Тепло може мати значний вплив на стан ізоляції, сприяючи її деградації та скороченню терміну служби. Під час експлуатації на ізоляцію діє електричне поле, яке викликає зміщення молекул і диполів у матеріалі, що призводить до появи внутрішніх струмів у діелектрику, які через опір

ізоляції спричиняють виділення тепла. Якщо напруга висока, а ізоляція має дефекти чи нерівномірну структуру, то тепловий ефект може стати значним і спричинити локальний перегрів матеріалу.

Перегрів небезпечний для багатьох видів ізоляційних матеріалів. У полімерних і паперових ізоляторах тривала дія підвищеної температури викликає хімічну деградацію, наприклад, окислення або розпад молекулярних зв'язків. Це призводить до втрати еластичності, зниження електричної міцності та утворення мікротріщин. Ще одним негативним наслідком, який створює потенційні струмопровідні шляхи є утворення вуглецевих доріжок. Також тепловий ефект може викликати розшарування багатошарових ізоляційних систем, оскільки різні матеріали в складі таких систем мають різні коефіцієнти теплового розширення. Нерівномірне нагрівання може призвести до появи механічних напружень, що сприяють утворенню тріщин і розривів у шарі ізоляції.

Високовольтні випробування можуть посилювати ці явища, особливо якщо тестування проводиться тривалий час або з перевищенням допустимих рівнів напруги. У таких умовах тепловий ефект може призводити до лавиноподібного пошкодження матеріалу, коли перегрів у одній зоні сприяє поширенню деградації на інші ділянки.

1.6 Залежність нагріву від струмового навантаження

Залежність температури вимикача від струмового навантаження є фундаментальною для діагностики, оскільки вона визначає базовий тепловий режим апарата в справному стані та підкреслює критичну роль перехідного опору несправності.

Підвищення температури струмопровідних частин вимикача, особливо контактних з'єднань, є прямим наслідком протікання електричного струму. Такий зв'язок описується тепловою потужністю, що виділяється, згідно із законом Джоуля-Ленца, де потужність втрат пропорційна квадрату струму і електричному опору. Таким чином, при зростанні номінального струму,

температура зростає квадратично, що вимагає встановлення максимально допустимих температурних меж нагріву з метою запобігання виходу температури з-під контролю.

Контроль залежності температури від навантаження використовується для встановлення максимально допустимих температурних меж нагріву вимикача, що гарантує його здатність тривалий час проводити номінальний струм без перегріву струмопровідних частин. У процесі експлуатації початковий стан обладнання постійно погіршується, що призводить до зростання перехідного опору. Якщо нагрів, спричинений протіканням струму, виходить за встановлені межі, це свідчить про внутрішній дефект, найчастіше про пошкодження контактної системи. При цьому, навіть при протіканні короткотривалого струму короткого замикання, встановлюється вимога, що струмопровідні частини повинні витримувати значний нагрів без критичних пошкоджень.

Номінальний тривалий струм використовується саме для встановлення цих температурних меж. Для гарантування витримування струмопровідними частинами високовольтного вимикача нагрівання струмом короткого замикання встановлена вимога у вигляді номінального значення короткотривалого струму, який вимикач повинен проводити в положенні «увімкнено» протягом встановленого часу, наприклад 1-2 секунди.

1.7 Види теплового методу контролю

Апаратура для вимірювання поділяється на контактні та безконтактні засоби. У неруйнівному тепловому контролі ці засоби мають надзвичайно широку сферу застосування. Насамперед, їх використовують для виявлення дефектів цілісності матеріалів, таких як порушення суцільності, розшарування клейових з'єднань, дефекти структури композитних матеріалів, пошкодження захисних покриттів, а також наявність вологи у стільникових панелях. По-друге, ця апаратура є високоефективною для тепловою діагностики енергетичного обладнання, контролю теплових

режимів різних машин і механізмів, а також моніторингу різноманітних технологічних процесів.

1.7.1 Контактні методи теплового контролю

Контактні методи засновані на безпосередньому контакті перетворювача температури з об'єктом, температуру якого необхідно визначити. До ключових переваг цього методу належить висока точність вимірювання температури та загальна простота використання контактних термометрів. Ці методи реалізуються через різні типи приладів, термометричною ознакою в яких є зміна фізичної величини, пов'язаної з різними типами приладів, термометричною ознакою в яких є зміна фізичної величини, пов'язаної з температурою.

Серед контактних методів, які вимагають безпосереднього фізичного контакту перетворювача з об'єктом, що вимірюється, особливе місце займають термомелектричні термометри або термопари. Термопара по суті є електричним контуром, який спаяний з двох різних металевих провідників, один спай яких знаходиться при вимірюваній температурі, а інший еталонний спай, при відомій температурі, наприклад при кімнатній. Через різницю температур спаїв виникає електрорушійна сила, вимірювання якої дозволяє визначати різницю температур спаїв, а відповідно, температуру вимірювального спаю.

В такому термометрі термометричним тілом є спай двох металів, а термометричною ознакою – виникаюча в колі термо-ЕРС. Чутливість термопар складає від одиниць до сотень мкВ/К, а діапазон вимірюваних температур від декількох десятків кельвінів до півтори тисячі градусів Цельсія. Для високих температур використовуються термопари з благородних металів. Найбільшого поширення набули термопари на основі спаїв наступних матеріалів: мідь – константан, залізо – константан, хромель – алюмель, платиновородій – платина. Варто відзначити, що термопара здатна виміряти лише різницю температур вимірювального і еталонного спаю.

Вільний спай, зазвичай, знаходиться при кімнатній температурі. Тому для визначення кімнатної температури необхідно використовувати додатковий термометр або систему компенсації вимірювання температури вільного спаю.

1.7.2 Безконтактні методи теплового контролю

Безконтактні методи вимірювання температури полягають у вимірюванні температури без безпосереднього контакту з об'єктом вимірювання. Такі методи зручні при необхідності вимірювати температуру об'єктів, які знаходяться у важкодоступних місцях або таких, які неможливо виміряти контактними методами, наприклад температура доменної печі, температура розплавленого металу, тощо. Використання безконтактних методів вимірювання дозволяє запобігати пошкодженню засобів вимірювання, підвищити безпеку обслуговуючого персоналу. Крім того немає необхідності зупиняти технологічний процес для вимірювання температури на якійсь із ланок, а максимальна температура, яку можна виміряти таким методом практично необмежена. На рисунку 1.5 зображено класифікацію приймачів випромінювання.



Рис. 1.5. Класифікація приймачів випромінювання

Приймач випромінювання – це пристрій, на вхід якого надходить теплове випромінювання, що перетворюється в електричний сигнал, пропорційний параметрам цього випромінювання. Головним параметром ПВ є пороговий потік $\Phi_{\text{пор}}$, що визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{пор}} = H_0 \cdot A_d \cdot \frac{U_n}{U_s} \quad (1.1)$$

де H_0 – коефіцієнт опромінення приймача, Вт·см⁻²; A_d – площа чутливої ділянки приймача, см²; U_n та U_s – середньоквадратичне значення напруги корисного сигналу на виході приймача і шуму, відповідно.

За принципом дії приймачі випромінювання бувають фотоелектричні, теплові та болометри. В основі фотоелектричних приймачів випромінювання покладено явище внутрішнього фотоефекту, вони відносяться до класу селективних приймачів і працюють тільки в одному з зазначених ІЧ-діапазонів. Як правило, приймачі такого типу необхідно охолоджувати, але існують і не охолоджувані. Такі приймачі використовуються в більшості тепловізорів і радіометрів. Фотоелектричні приймачі випромінювання бувають трьох типів: вентилі, фотодіоди, фоторезистори.

У вентиліях в момент потрапляння на них ІЧ-випромінювання роль внутрішнього фотоефекту зводиться до зміни опору запірного шару р-п переходу, і як результат, в замкнутому колі з'являється фотострум. У фотодіодах внутрішній фотоефект пов'язаний з генерацією носіїв, що призводить до виникнення Е.Р.С. на контактах р-п переходу. Таким чином дія фоторезисторів базується на явищі фотопровідності.

Теплові приймачі випромінювання відносяться до неселективних приймачів, тобто мають практично постійну спектральну чутливість у всьому інфрачервоному діапазоні. Вони не потребують охолодження, що є їхньою перевагою, розрізняють термоелектричні та піроелектричні теплові приймачі випромінювання.

1.8 Методика проведення теплового контролю

У процесі технічного обслуговування тепловий контроль зазвичай проводиться у декількох випадках. Перевірка під час планового обходу або енергоаудиту, на цьому етапі формується загальна картина температурного стану обладнання. Також має місце уточнювальний контроль після виконання ремонтних робіт або підтягування контактів, для упевнення в

усуненні перегрівів. Такий підхід дозволяє не лише виявити несправність, а й проконтролювати якість її усунення.

Проведення теплового огляду починається з підготовки, яка включає аналіз технічної документації, визначення конкретних об'єктів контролю, уточнення режимів роботи обладнання та погодження умов виконання робіт. Перед проведенням огляду приділяють увагу стану навантаження електрообладнання. Відповідно до діючих рекомендацій, для отримання достовірних результатів устаткування повинно працювати під струмом не менше ніж 40-50 відсотків від номінального значення. За нижчого навантаження контактні дефекти, які за звичайних умов проявляються у вигляді перегрівів, можуть залишитися непомітними, що зменшить інформативність обстеження та унеможливить аналіз дійсного стану обладнання.

У процесі підготовки враховують також умови навколишнього середовища, такі як інтенсивність сонячної радіації, швидкість вітру, вологість повітря та наявність атмосферних опадів. Пряма дія сонячного випромінювання може викликати локальний перегрів обладнання, який не має відношення до технічного стану об'єкта. Вітер, навпаки, призводить до зниження температури через примусове охолодження, що маскує реальні дефекти контактних з'єднань. Тепловізійний огляд зазвичай виконують у ранкові або вечірні періоди, коли сонячна активність мінімальна, атмосферні умови стабільні, а обладнання працює у сталому режимі.

Після завершення підготовки виконується безпосередня зйомка обладнання. Процедура тепловізійного огляду включає кілька етапів, які виконуються послідовно відповідно до узгодженої методики. На початку оператор проводить загальне сканування об'єкта з метою виявлення можливих зон перегріву, після чого переходить до детального обстеження окремих вузлів. Кожна точка зйомки вибирається таким чином, щоб тепловізор був розташований під оптимальним кутом, який зменшує вплив відбитого випромінювання і забезпечує максимальну чіткість зображення.

Відповідно до стандартів, бажано, щоб кут зйомки був максимально наближений до перпендикулярного, оскільки саме в цьому випадку показники температури є найбільш достовірними. Дистанція до об'єкта вибирається згідно з вимогами електробезпеки та технічними можливостями тепловізора, з урахуванням його оптичної роздільної здатності.

У сучасних системах енергоменеджменту тепловий контроль виконує важливу діагностичну функцію, результати контролю інтегруються до загальної бази технічного стану обладнання. Така методика створює хронологічний та систематизований підхід та дозволяє відстежувати зміну температурних показників у часі, порівнювати їх із попередніми перевірками й робити висновки про динаміку зносу контактних елементів. На багатьох підприємствах створюються теплові паспорти вимикачів, у яких зберігаються всі термограми з датами зйомки, зазначенням умов експлуатації та отриманих результатів. Архів допомагає прогнозувати майбутні несправності й планувати профілактичні роботи заздалегідь.

Отримані термограми зберігаються в електронному вигляді та підлягають подальшому аналізу. На кожному знімку оцінюється максимальна температура контрольної ділянки, визначається різниця між нею та середньою температурою аналогічних елементів або навколишнього середовища. Якщо різниця перевищує 20-25 °C, з'єднання вважається потенційно небезпечним. При підвищенні температури понад 40 °C щодо середнього фону обладнання слід терміново вивести з роботи для усунення дефекту. Для зручності аналізу застосовуються кольорові шкали та ізотермічні контури, що допомагають швидко ідентифікувати найгарячіші зони.

Важливо зазначити, що не кожен перегрів означає безпосередню загрозу. Температурні показники необхідно оцінювати комплексно, з урахуванням умов в яких працює вимикач, так як струмове навантаження, тривалість роботи вимикача в певному режимі та характеристик матеріалу контактів. Наприклад, мідні елементи можуть мати вищу робочу температуру

порівняно з алюмінієвими, не втрачаючи працездатності. Інтерпретація отриманих результатів вимагає технічної компетентності та досвіду, особливо під час аналізу складних розподільних пристроїв із кількома рівнями струмопровідних шин.

1.9 Нормативи та допустимі температурні відхилення згідно стандартів

Оцінювання температурного стану високовольтних вимикачів ґрунтується не лише на фактичних вимірюваннях, а й на порівнянні отриманих даних із установленими нормативними значеннями. Стандарти задають межі допустимих температурних відхилень, перевищення яких свідчить про наявність дефектів або перевантаження обладнання. Правильне трактування цих норм має вирішальне значення для визначення технічного стану вимикача та забезпечення його безпечної експлуатації.

Основні вимоги до температурного режиму контактних з'єднань і струмопровідних частин регламентуються кількома нормативними документами, такими як положення стандартів ДСТУ EN 62271-100:2018, ДСТУ ІЕС 60865-1:2016, а також рекомендації «Правил улаштування електроустановок» і ГОСТ 10434-82. Вони визначають не лише гранично допустиме нагрівання елементів, а й правила оцінювання температурного підвищення відносно навколишнього середовища.

Для нормальної роботи високовольтного вимикача важливо, щоб температура його контактів, струмопровідних шин і з'єднань не перевищувала встановлені межі. За стандартом ДСТУ EN 62271-100, нагрівання струмопровідних частин при номінальному струмі не повинно перевищувати 65 °C для мідних елементів та 50 °C для алюмінієвих, при цьому температура поверхні ізоляційних деталей має залишатися нижчою за 105 °C, якщо вони виготовлені з термореактивних матеріалів, і нижчою за 90 °C для термопластичних.

Під час термографічного контролю температура оцінюється не в абсолютних значеннях, а у вигляді перевищення над середньою температурою аналогічних елементів або навколишнього середовища. Такий підхід дозволяє враховувати вплив умов експлуатації, адже вимикачі в різних комірках можуть працювати при різних навантаженнях і режимах охолодження. Якщо перевищення становить до 15 °С, стан вважається задовільним. При відхиленні від 15 до 25 °С рекомендується провести додаткову перевірку контактних з'єднань. Коли ж різниця перевищує 25 °С, обладнання підлягає обов'язковому ремонту або тимчасовому відключенню для усунення дефекту.

Згідно з ГОСТ 10434-82, підвищення температури на контактах і струмопровідних частинах не повинно перевищувати значень, що призводять до втрати механічної міцності або порушення електричної провідності. Для контактів вимикачів граничне підвищення не повинно перевищувати 65 °С відносно навколишнього середовища, для струмоведучих шин становить 60 °С, а для затискачів це 55 °С. Якщо за результатами теплового контролю температура перевищує ці межі навіть короткочасно, це вважається порушенням нормальної роботи.

Вимикачі розподільних пристроїв працюють у різних умовах, так одні працюють у закритих камерах із природною вентиляцією, інші – у відкритих комірках під дією сонячного опромінення або низьких температур. Тому стандарти передбачають поправки на зовнішні фактори. Наприклад, при температурі повітря нижче +10 °С допускається короткочасне підвищення температури контактів на 5-10 °С вище норми, якщо перегрів рівномірний і не супроводжується локальними аномаліями. У спекотну погоду, навпаки, граничні значення зменшуються, оскільки охолодження елементів ускладнене.

Особливу увагу необхідно приділити рівномірності нагрівання. Локальний перегрів однієї ділянки вказує на наявність дефекту ослабленого контакту, забруднення або підвищений перехідний опір. Тому в термограмах

важливо звертати увагу не лише на максимальні значення, а й на форму теплового поля. За ДСТУ EN ISO 6781-3:2016, відхилення понад 10 °C між сусідніми точками одного вузла вже вважається ознакою порушення теплового балансу.

Також нормативи визначають допустимі відхилення для елементів із різних матеріалів. Для мідних контактів робоча температура може бути вищою через хорошу теплопровідність, тоді як алюмінієві з'єднання потребують суворішого контролю. В ізоляційних частинах головним критерієм є не абсолютне значення температури, а відсутність ознак перегріву до яких можна віднести зміни кольору, тріщин, запаху або деформації. Для полімерних ізоляторів підвищення температури понад 20 °C порівняно з навколишнім повітрям уже вважається небезпечним сигналом.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ АНАЛІЗУ ТА ОБРОБКИ ТЕПЛОВИХ ЗНІМКІВ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ОБЛАДНАННЯ

2.1 Обґрунтування методики аналізу теплових знімків. Переваги використання візуального калібрування

Методика, обрана для аналізу термограм високовольтних вимикачів, ґрунтована на візуальному калібруванні за вбудованою в знімок кольоровою шкалою. Це рішення має чітке практичне та академічне обґрунтування.

Доступність та універсальність, формат JPG є стандартним для більшості тепловізійних камер (FLIR, Testo, Seek Thermal тощо), коли вони зберігають візуалізоване зображення. Хоча професійні камери зберігають точні радіометричні дані у складних приватних форматах, використання цих форматів часто вимагає спеціалізованих платних SDK (Software Development Kits) або пропрієтарного програмного забезпечення. Для навчальної роботи, де акцент ставиться на методиці обробки зображень, а не на ліцензуванні програмного забезпечення, метод візуального калібрування є найбільш доступним. У деяких випадках, при пересиланні або копіюванні файлів, метадані, які містять точну матрицю температури або параметри випромінювальної здатності, можуть бути пошкоджені або втрачені. Однак, візуальна інформація залишається незмінною. Обробка зображень, що базується на аналізі пікселів, забезпечує високу надійність навіть зі стандартними графічними копіями.

Методика чітко показує перехід від візуалізації до кількісної оцінки. Головна складність аналізу термограм полягає у тому, що пікселі містять інформацію про колір RGB, а не про температуру. Застосування виділеної кольорової шкали як еталонної палітри демонструє глибоке розуміння принципу роботи тепловізора: кольорове відображення є просто графічним представленням числових даних. Це дозволяє в рамках курсової роботи не

просто використовувати готові дані, а самостійно реконструювати їх із візуального джерела.

В результаті, обраний підхід дозволяє створити практичну, незалежну та ефективну систему аналізу теплових знімків, що є вагомим внеском у практичний розділ роботи.

2.2 Обґрунтування застосування колірного індексування та лінійної інтерполяції

Перетворення «RGB» пікселів на чисельну температуру вимагає двох послідовних і критично важливих кроків, колірне індексування та лінійна інтерполяція. Колірне індексування, яке виконується за допомогою використання функції 'rgb2ind' є ключовою ланкою, що зв'язує колір і число. Тепловізійна камера, по суті, робить те саме – відображає певний діапазон температури T_{min} , T_{max} на фіксований набір кольорів (колірна палітра, або colormap). Завдання полягало в тому, щоб «змусити» MATLAB відтворити процес відображення певного діапазону температури T_{min} , T_{max} на фіксований набір кольорів. Встановлено, що кожен колір у виділеній кольоровій шкалі має свій унікальний RGB-код, який відповідає певному температурному значенню. Функція 'rgb2ind', використовуючи виділену палітру 'storedColorMap', знаходить для кожного пікселя основного зображення найбільш подібний колір у палітрі та повертає його індекс. Цей індекс є прямим числовим еквівалентом відносної температури.

Автоматично та об'єктивно виявити місце де відбувається перегрів спираючись на максимальну температуру не можна, тому що максимальна висока температура може бути нормою для певних елементів конструкції. Тому отримавши чисельне температурне поле після перетворення теплограм, було застосовано статистичний критерій рис. 2.1., а саме поріг середня температура плюс два стандартні відхилення.

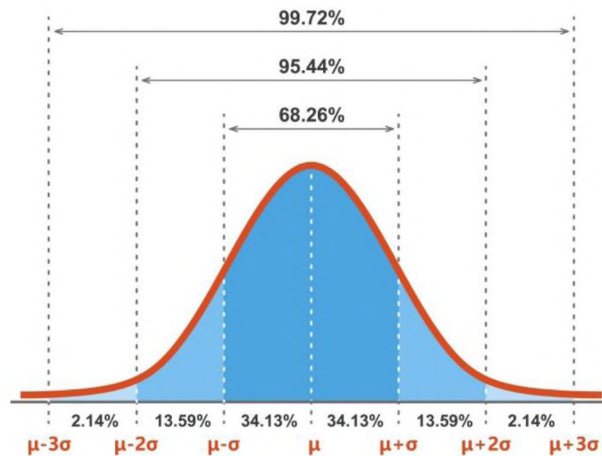


Рис 2.1. Графічне зображення статистичного критерію

2.3 Опис розробленої методики. Підготовка середовища та завантаження вихідних даних

Для практичного застосування методів обстеження високовольтних вимикачів необхідно створити ефективний інструмент для аналізу термограм. Вирішено використовувати середовище MATLAB завдяки його потужним бібліотекам для обробки зображень, а саме Image Processing Toolbox та чисельних розрахунків.

Початковий етап роботи програми сфокусований на налаштуванні робочого простору та забезпеченні доступу до вихідних даних, щоб очистити середовище від попередніх змінних та графічних об'єктів, для уникнення конфліктів. Для цього використано набір команд: 'clc' (очищення командного вікна), 'close all' (закриття всіх відкритих графічних вікон) та 'clear' (видалення всіх змінних з робочого простору).

Для зручності та забезпечення точності відображення числових результатів встановлено компактний формат виводу 'format compact'. Додатково, для уніфікації графічного оформлення та покращення читабельності графіків, задається стандартний розмір для шрифту 'fontSize'.

Наступний етап підготовки – завантаження термограми. Щоб завантажити файл визначається шлях його розташування 'folder' та його ім'я 'file'. Необхідно точно перевіряти розширення файлу, оскільки некоректне ім'я файлу призведе до зупинки роботи. Перед зчитуванням зображення

проводиться обов'язкова перевірка наявності файлу на диску за допомогою функції 'exist'. Це дозволяє уникнути критичної помилки коду та забезпечити стабільність програми. У разі відсутності файлу виводиться відповідне повідомлення про помилку.

Після успішної перевірки, зображення було завантажено у змінну 'originalRGBImage' за допомогою функції 'imread'. Завдяки цьому вихідне зображення відображається у першому підвікні графічної панелі, що дозволяє візуально оцінити якість та зміст термограми перед початком аналізу. Таким чином, на першому етапі було забезпечено надійну основу для подальшої чисельної роботи з візуальними даними.

2.3.1 Відокремлення області даних

Для коректного перетворення візуального зображення на температурне поле було необхідним розділити термограму на дві функціональні частини: основне теплове поле (ділянка, що містить вимикач) та кольорову шкалу (еталон калібрування).

Отримані розміри вихідного зображення: кількість рядків 'rows' та стовпців 'columns', це необхідно для подальшого обрізання, яке має бути адаптивним до роздільної здатності конкретного знімка.

Виділення критичних температурних областей проведено за допомогою функції 'imcrop'. Координати обрізання є жорстко заданими в коді, що вимагає ручного підбору для кожного типу зображень або моделі тепловізора.

Обрізання кольорової шкали 'colorBarImage' виконується зліва, захоплюючи невелику ширину (17 пікселів) та майже всю висоту зображення. Координати '[1, 20, 17, rows]' вказують, що обрізання починається від першого стовпця та двадцятого рядка.

Основне теплове поле 'rgbImage' включає об'єкт аналізу та обрізана таким чином, щоб виключити всі допоміжні елементи тепловізора наприклад, логотипи, службові написи та саму шкалу. Для цього виділяються

координати `[81, 1, columns-100, rows]` забезпечили відступ від лівого краю, де знаходилася шкала, та правого краю.

Обрізані зображення одразу відображені на графічній панелі. Відображення тексту `title('Обрізане теплове поле')` підтверджує, що для подальшої обробки залишається лише відокремлена корисна інформація, а `title('Виділена кольорова шкала')` – демонструє успішне вилучення еталона для калібрування. В цій частині програми забезпечується чітка візуалізація розділення даних, що є необхідною умовою для наступного етапу чисельного перетворення.

2.3.2 Побудова колірної карти та індексування зображення

Цей етап є основним для методики, оскільки він дозволяє перейти від суб'єктивного сприйняття кольору до об'єктивних числових індексів за допомогою формування колірної карти. Кольорова шкала, виділена на попередньому етапі `'colorBarImage'`, є, по суті, набором пікселів «RGB» кольору. Для створення карти береться лише один стовпець пікселів, оскільки горизонтально колір не змінюється. Перший стовпець шкали витягується цією частиною коду: `'storedColorMap = colorBarImage(:,1,:).'`

Отримані значення кольорів від 0 до 255 перетворюються на числа з плаваючою комою у діапазоні $[0, 1]$ та "витисняються" з тривимірного масиву за допомогою функцій `'double(squeeze(...)) / 255'`.

Функція `'flipud(storedColorMap)'` перевертає колірну карту і це необхідно тому, що MATLAB очікує, що елемент «1» колірної карти відповідає найнижчому індексу, а отже, і найнижчій температурі, тоді як у типовій візуалізації термограми найгарячіші кольори, вони ж – найвищі температури, знаходяться нагорі шкали. Перевертання забезпечує коректне зіставлення.

Отримана колірна карта тепер використовується як палітра для основного теплового поля. Функція `'indexedImage = rgb2ind(rgbImage, storedColorMap)'` виконує ітеративний пошук: для кожного кольорового

пікселя основного поля знаходиться найближчий відповідний колір у побудованій ‘storedColorMap’ і присвоює його індекс.

В результаті отримано індексоване зображення (‘indexedImage’), де кожен піксель є цілим числом, що відповідає позиції кольору в еталонній шкалі. Це зображення також відображається, підтверджуючи успішне перетворення. Важливо розуміти, що на цьому етапі отримано лише відносне теплове поле (індекси), але не абсолютні температури.

2.3.4 Калібрування та формування абсолютного температурного поля

Отримана в попередньому пункті індексована матриця є відносним відображенням температури, але для проведення діагностики необхідно отримати абсолютні значення у °C. Спершу задаються абсолютні межі температурної шкали, які видно на вихідній термограмі ‘highTemp = 28.9’ верхня межа та ‘lowTemp = 0.9’ нижня межа. Ці значення взяті з метаданих або відображення тепловізора. Далі необхідно перетворити цілі числа на індексовані (з плаваючою комою), щоб встановити відповідність між числовим значенням та кольором. Це виконується за допомогою функції ‘mat2gray(indexedImage)’, яка перетворює цілочисельну матрицю індексів на матрицю чисел із плаваючою комою в діапазоні [0, 1]. Нульове значення відповідає найнижчому індексу (найхолоднішому кольору), а одиниця — найвищому (найгарячішому).

Фінальне температурне поле ‘thermalImage’ обчислюється за принципом лінійної інтерполяції:

$$T = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \cdot N \quad (3.1)$$

де N – коефіцієнт масштабування індексу, який має бути в діапазоні від 0 до 1; $T_{\min}$ та $T_{\max}$ – встановлені межі шкали.

Математичне співвідношення гарантує, що індекси 0 та 1 відповідатимуть T_{min} та T_{max} відповідно, а всі проміжні індекси отримають коректне проміжне значення температури.

Отримане чисельне поле (`thermalImage`) відображається. Застосована функція `colormap(gca, storedColorMap)` для того, щоб відображення температурного поля використовувало таку ж палітру кольорів, що і вихідний знімок, що значно покращує візуальне сприйняття. Додавання `colorbar` та `impixelinfo` дозволяє оператору миттєво бачити абсолютну температуру, просто наводячи курсор на будь-яку точку зображення.

2.3.5 Статистичний аналіз та критерій виявлення дефектів

Після успішного перетворення термограми на кількісне температурне поле, наступним кроком є проведення чисельного аналізу для автоматизованого виявлення аномалій. Спершу необхідно отримати основні статистичні показники: T_{max} , T_{mean} , T_{std} , максимальне значення температури, середнє та стандартне відхилення відповідно. Ці значення необхідні для об'єктивної оцінки стану обладнання та автоматизації виявлення дефектів.

Максимальна температура T_{max} визначається використаною функцією `'max'` для отримання найвищого зареєстрованого значення, середня температура T_{mean} отримується через обчислення середнього значення температури по всій площі об'єкта. Стандартне відхилення T_{std} Визначена міра розкиду температури відносно середнього значення, що вказує на однорідність теплового режиму. Ці значення виводяться у командне вікно, надаючи миттєву чисельну оцінку стану об'єкта. Далі проведено аналіз розподілу температур за допомогою гістограми `'histogram'`. Гістограма показує, як часто зустрічається кожне значення температури. У більшості випадків, розподіл близький до нормального, але наявність невеликої кількості пікселів із суттєво вищою температурою свідчить про теплову аномалію, тобто перегрів.

Для автоматичного виявлення цих аномалій використано статистичний критерій виявлення гарячих зон. За поріг критичної температури прийнято значення, яке перевищує середню температуру на два стандартних відхилення $\mu+2\sigma$.

$$T_{\text{критична}} = T_{\text{середня}} + 2\sigma \quad (3.2)$$

Цей критерій є консервативним інженерним підходом, який ефективно ідентифікує пікселі, що є статистично значущим розкидом. Якщо розподіл близький до нормального, такий поріг виділить приблизно 2,3% найбільш гарячих точок.

На фінальному етапі сформована бінарна маска 'hotMask', де значення 1 відповідає пікселям, температура яких перевищує встановлений поріг, а 0 – решті. Ця маска відображається окремо, наочно виділяючи зони потенційного перегріву на високовольтному вимикачі. Таким чином, метод забезпечує не лише чисельну, а й чітку візуальну діагностику.

РОЗДІЛ 3

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДИКИ ТА АНАЛІЗ ТЕМПЕРАТУРНИХ РОЗПОДІЛІВ РІЗНИХ ТИПІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМИКАЧІВ

3.1 Забезпечення експериментальної частини та об'єктів обстеження

Для практичної апробації розробленої методики аналізу тепловізійних знімків було сформовано вибірку матеріалів. Вихідні дані включали тепловізійні зображення (термограми), отримані безпосередньо під час проходження переддипломної практики, а також додаткові зразки, використані для розширення діапазону об'єктів обстеження. Аналіз охопив три типові конструкції високовольтних вимикачів з різним принципом гасіння дуги та класом напруги: вакуумний, повітряний та елегазовий вимикачі.

Для забезпечення точності та достовірності практичних розрахунків, а також для коректної інтерпретації отриманих результатів, було систематизовано технічну інформацію про об'єкти обстеження. Технічні характеристики підстанції ЦРП-2 та основні параметри розглянутих зразків високовольтних вимикачів, необхідні для подальшого аналізу теплового режиму, представлені у Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Характеристики досліджуваних вимикачів та підстанції

Характеристики підстанції		
Тип	Закрита	
Підприємство виробник	«ЗТЗ» м. Запоріжжя	
Рік виготовлення	1967	
Робоча напруга, кВ	154/35/6	
Характеристики вимикачів		
Тип	Робоча напруга, кВ	Тип дугогасного середовища
Siemens 3AP1FG	154	Елегазовий
ВР-10-20	6	Вакуумний
ВМП-10К	6	Масляний

Результати методики по кожному з розглянутих вимикачів викладені в додатку А

Тепловізійний контроль виконувався за допомогою портативного тепловізора Flir C5 рис. 3.1., який належить до сучасного класу компактних інфрачервоних приладів контролю. Конструкція цієї моделі орієнтована на роботу в умовах підвищеної вимогливості, де необхідна швидка діагностика стану електрообладнання без прямого контакту з потенційно небезпечними елементами. Прилад обладнаний детектором типу VOx мікроболометр з матрицею 160 на 120 пікселів, що забезпечує достатню деталізацію температурного поля для виявлення аномальних зон нагріву, характерних для перевантажень, підвищеного перехідного опору або порушення ізоляції.

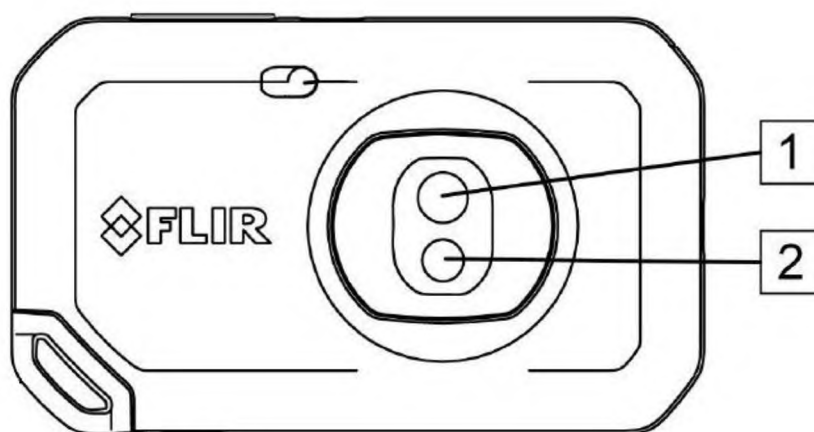


Рис.3.1. Схема теплокамери Flir C5, 1 – інфрачервоний об'єктив; 2 – об'єктив візуальної камери

Спектральний діапазон тепловізора становить від 7,5 до 14 мкм, що відповідає довгохвильовій частині інфрачервоного спектра, у якій успішно реєструється теплове випромінювання більшості електротехнічних матеріалів та металевих конструкцій. Завдяки цьому забезпечується коректне вимірювання температури незалежно від освітлення та зовнішніх оптичних умов. Діапазон робочих температур приладу: від -20 °С до +400 °С, що

дозволяє проводити контроль як побутових електромереж, так і елементів промислових установок.

3.2 Використання методики обробки тепловізійного зображення

Процедура аналізу термограми складається з послідовності етапів, що відповідають логіці роботи програмного коду. Кожен крок виконує окрему функцію, спрямовану на підготовку та обробку даних для подальшого теплотехнічного аналізу стану електрообладнання.

3.2.1 Завантаження вихідного зображення тепловізора

У заздалегідь створену папку завантажуються знімки термограм, задається повний шлях до файлу з термограмою формату .jpg або .png, для подальшого завантаження їх для аналізу, наприклад, термограма масляного вимикача. Виконується перевірка наявності файлу в робочому каталозі та його завантаження у вигляді RGB-зображення. Після завантаження термограма виводиться на екран рис. 3.2., що дозволяє впевнитися в правильності вибору файлу та оцінити якість вхідних даних перед подальшими операціями :

```
folder = 'C:\D\Папка з термограмами\';
file = 'FLIR0776.jpg'; % або .png
fullFileName = fullfile(folder, file);
if exist(fullFileName, 'file')
    img = imread(fullFileName);
    imshow(img);
    title('Теплове зображення FLIR');
else
    disp(['Файл не знайдено: ', fullFileName]);
end
```

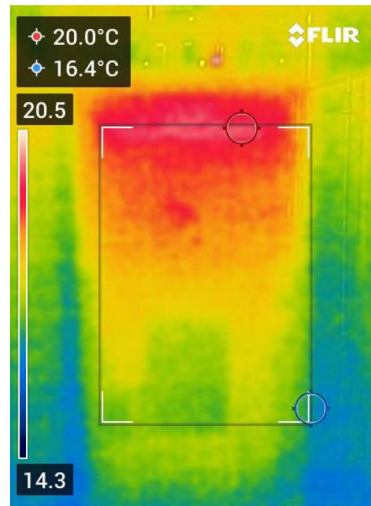


Рис3.2. Імпорт оригінального зображення

3.2.2 Вирізання робочої області та температурної шкали

Загальне тепловізійне зображення містить службову інформацію, рамки та інші графічні елементи, тому далі виконується вирізання двох ділянок, основного теплового поля та кольорової температурної шкали рис. 3.3. Для цього використовуються координати рамки, підібрані під геометрію конкретної моделі FLIR. Така операція суттєво спрощує подальшу обробку та підвищує точність індексації кольорів:

```
[rows, columns, ~] = size(originalRGBImage);
colorBarImage = imcrop(originalRGBImage, [1, 20, 17, rows]);
rgbImage = imcrop(originalRGBImage, [81, 1, columns-100, rows]);
subplot(2,3,2);
imshow(rgbImage, []);
title('Обрізане теплове поле');
subplot(2,3,3);
imshow(colorBarImage, []);
title('Виділена кольорова шкала');
```



Рис.3.3. Виділена кольорова шкала

3.2.3 Побудова колірної карти температурної шкали

Зі шкали виділяється вертикальна смуга пікселів, що містить повний градієнт кольорів тепловізора, вона перетворюється у нормалізовану колірну карту рис. 3.4., що відображає відповідність між кольором і рівнем температури. Потім карта інвертується для узгодження верхніх кольорів із високими температурами, що характерно для моделі тепловізора FLIR C5:

```
storedColorMap = colorBarImage(:,1,:);
storedColorMap = double(squeeze(storedColorMap)) / 255;
storedColorMap = flipud(storedColorMap);
```

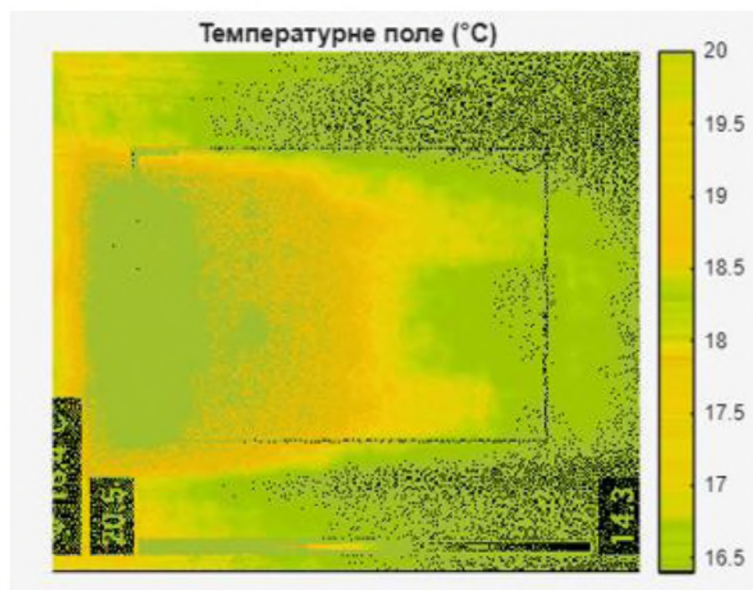


Рис. 3.4. Температурне поле

3.2.4 Перетворення зображення у індексований формат

Обрізане теплове поле трансформується у індексоване зображення, де кожному пікселю надається номер кольору у побудованій карті рис. 3.5. Перетворення необхідно, оскільки RGB-комбінації мають тисячі значень, а індексація дозволяє перевести зображення у стандартизовану форму, придатну для подальшого масштабування у фізичні температури:

```
indexedImage = rgb2ind(rgbImage, storedColorMap);
subplot(2,3,4);
imshow(indexedImage, []);
title('Індексоване зображення');
```

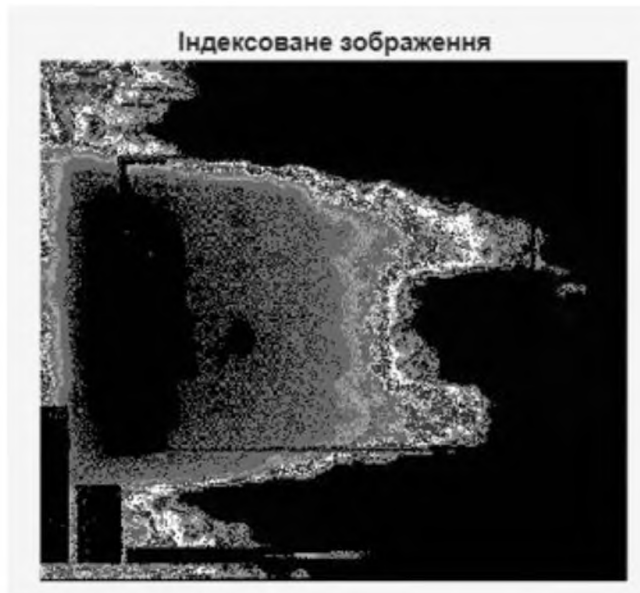


Рис. 3.5. Індексоване зображення

3.2.5 Формування температурного поля у фізичних одиницях

Після індексування виконується нормалізація матриці пікселів та масштабування у реальний температурний діапазон. Межі шкали задаються відповідно до показань тепловізора. Результатом є двовимірне поле температур, у якому кожен піксель відповідає конкретному значенню в °C:

highTemp = 28.9; % верхня межа шкали, °C (можна змінити)

lowTemp = 0.9; % нижня межа шкали, °C

```

thermalImage = lowTemp + (highTemp - lowTemp)
mat2gray(indexedImage);
subplot(2,3,5);
imshow(thermalImage, []);
title('Температурне поле (°C)');
colormap(gca, storedColorMap);
colorbar;
impixelinfo;

```

3.2.6 Побудова гістограми температурного розподілу

Для оцінки загального характеру теплового стану будується гістограма, що відображає частоту появи певних температур представлено на рис.3.6.:

```

subplot(2,3,6);
histogram(thermalImage, 'Normalization','probability');
xlabel('Температура, °C'); ylabel('Частота');
title('Розподіл температур');

```

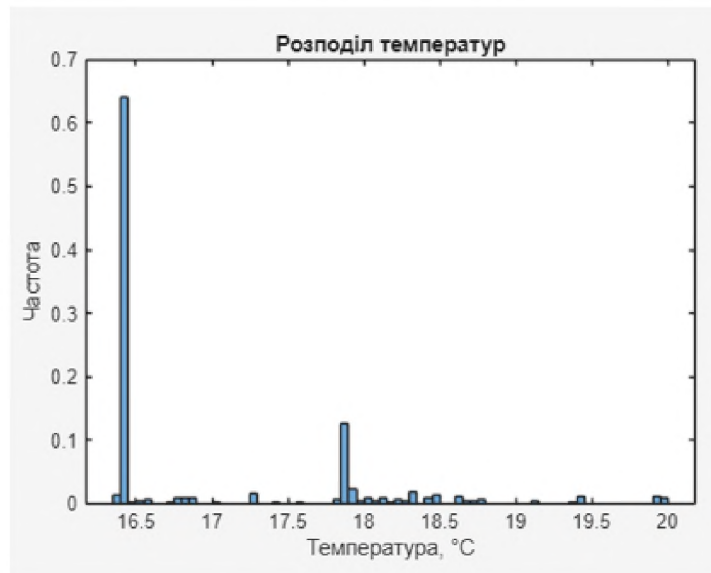


Рис. 3.6. Розподіл температур

Такий аналіз дозволяє швидко визначити, чи домінують нормальні температури, або ж наявні значні відхилення, які можуть свідчити про аномальні режими обладнання.

3.2.7 Розрахунок статистичних параметрів і визначення перегрітих ділянок

У цьому кроці обчислюються та виводяться на екран рис. 3.7. три ключові характеристики теплового поля: максимальна температура, середнє значення та стандартне відхилення. На основі цих параметрів задається поріг перегріву за формулою:

$$T > (T_{\text{середня}} + 2\sigma)$$

утворюється двійкова маска, яка виділяє зони з підвищеним тепловим навантаженням

```
maxT = max(thermalImage(:));
meanT = mean(thermalImage(:));
stdT = std(thermalImage(:));
fprintf('Максимальна температура: %.2f°C\n', maxT);
fprintf('Середня температура: %.2f°C\n', meanT);
fprintf('Стандартне відхилення: %.2f°C\n', stdT);
Виділення "гарячих зон"
threshold = meanT + 2stdT;
hotMask = thermalImage > threshold;
figure;
imshow(hotMask);
title(sprintf('Гарячі зони (T > %.2f°C)', threshold));
```

Що видає розрахунки рис. 3.7

```
Максимальна температура: 20.00°C
Середня температура: 16.99°C
Стандартне відхилення: 0.90°C
```

Рис.3.7. Підсумкові температури

3.2.8 Експорт отриманих результатів у Excel-файл

Для документування та використання в подальших розрахунках програмою формується таблиця з розрахованими параметрами до яких входять максимальна температура, середнє значення та стандартне відхилення. Таблиця експортується у файл формату «.xlsx» рис. 3.8, що забезпечує зручність інтеграції даних у звітну документацію та дозволяє проводити додатковий аналіз поза середовищем MATLAB:

```
resultTable = table(maxT, meanT, stdT, ...  
'VariableNames',{ 'Максимальна температура', 'Середня температура',  
'Стандартне відхилення' });  
writetable(resultTable, 'thermal_results.xlsx');
```

1	Максимальна температура	Середня температура	Стандартне відхилення
2	20	16.9886	0.8986

Рис. 3.8. Експортована таблиця

3.3 Аналіз розподілу температур трьох видів вимикачів. Вакуумний вимикач

Отримана гістограма рис.3.9. демонструє щільність розподілу температурних значень по поверхні об'єкта, умовно розділимо її на три частини низького, середнього і високого рівня. Температура низького рівня розподілу відповідає температурі навколишнього середовища та ненагрітих елементів корпусу комірки.

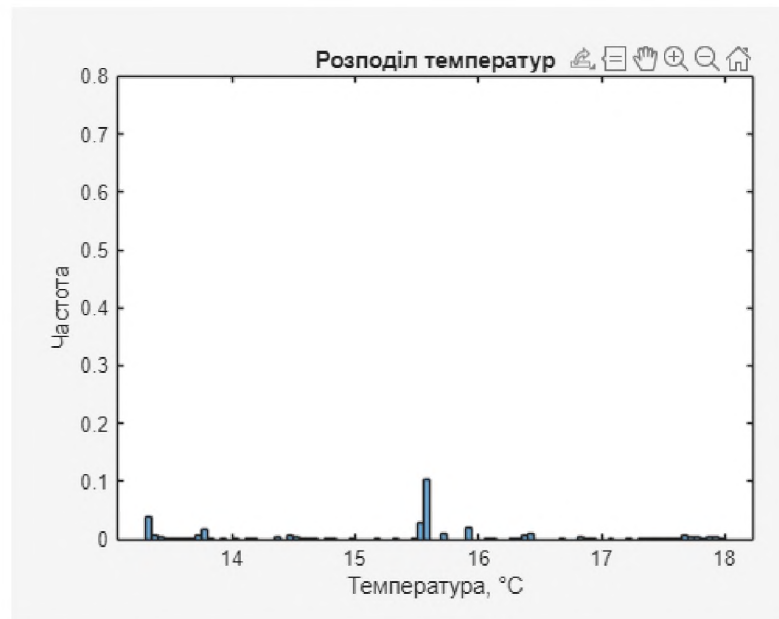


Рис. 3.9. Гістограма розподілу температур вакуумного вимикача

На середньому розподілі найбільш виражений пік спостерігається на позначці 15,6 °C, вона свідчить про те, що значна частина поверхні струмопроводів має саме цю температуру, що в свою чергу вказує на рівномірне навантаження фаз, що є ознакою нормального режиму роботи.

Зона найвищих температур закінчується на значеннях 17,8-18,2°C. Кількість пікселів у цій зоні мінімальна свідчить про відсутність великих зон перегріву. Найімовірніше, ці значення відповідають точкам болтових з'єднань перехідних пластин.

Розподіл температур рівномірний, про що свідчить чіткий пік на гістограмі. Ознак термічної деградації контактів або перегріву вакуумної камери не виявлено. Обладнання не потребує додаткового обслуговування і може експлуатуватися у штатному режимі до наступного планового огляду.

3.3.1 Аналіз розподілу температур масляного вимикача

На основі гістограми розподілу температур масляного вимикача рис. 3.10., виявлено суттєву варіативність температурних режимів, що свідчить про нестабільність теплового стану об'єкта. Температури коливаються в діапазоні приблизно від 3 °C до 27 °C, причому розподіл є нерівномірним і містить окремі пікові значення.

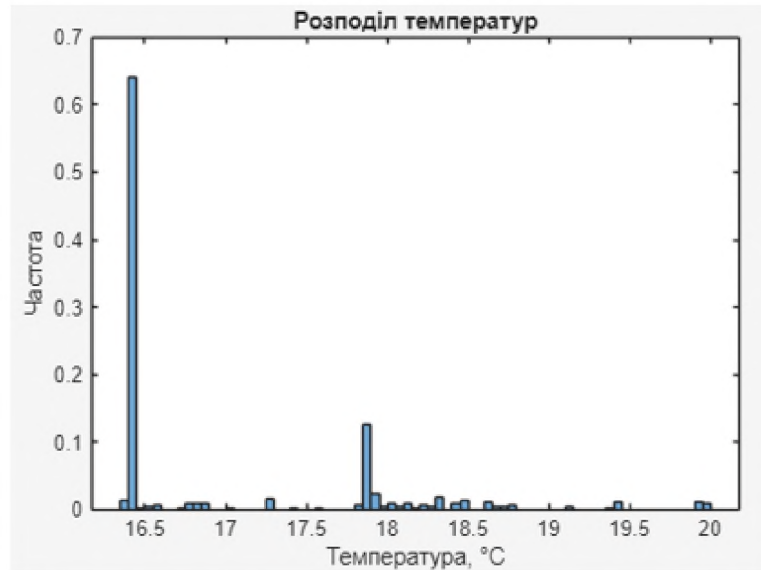


Рис. 3.10. Гістограма розподілу температур масляного вимикача

Розділяємо гістограму на три ділянки аналогічно попередньому аналізу та розглядаємо їх окремо. Нижній частині діапазону (3-8 °C) притаманні поодинокі піки, що може бути пов'язано з неоднорідними умовами навколишнього середовища або нерівномірним тепловідводом.

Середньотемпературна зона (10-20 °C) характеризується низькою частотою появи значень, що не відповідає типовому рівномірному розподілу для обладнання, яке працює у стабільних режимах. Отримана форма розподілу вказує на можливі порушення умов роботи, асиметрію навантаження або ранні ознаки деградації елементів.

Найбільш критичним є формування вираженого піку біля 27 °C, тому що значення не виходить за межі допустимого, але його повторюваність і домінування потребують додаткової перевірки.

Для подальшої експлуатації обладнання рекомендовано провести технічний огляд контактних з'єднань, перевірити стан ізоляції, а також здійснити повторні тепловізійні вимірювання під навантаженням. За умови підтвердження локальних перегрівів варто спланувати регламентні роботи з метою усунення потенційних дефектів.

3.3.2 Аналіз розподілу температур елегазового вимикача

Розподіл температур, представлений на гістограмі рис. 3.11., характеризується вузьким діапазоном значень – приблизно 16,5-20 °С, що є типовим для обладнання, яке працює у стабільних умовах і не зазнає перевантажень. Значна концентрація вимірювань спостерігається в області 16,5-17 °С, де формується різко виражений піковий стовпець із частотою понад 0,6, що свідчить про домінуючу кількість пікселів із однаковою або близькою температурою. Подібна одноманітність теплової карти найчастіше є ознакою рівномірного тепловідводу та відсутності локальних зон перегріву.

Другий, менш виражений пік спостерігається поблизу 18 °С, що може відповідати невеликим ділянкам із підвищеним тепловим навантаженням, однак амплітуда цього піку є низькою, що не вказує на критичні відхилення. У діапазоні 18,5–20 °С частота майже нульова, що підтверджує відсутність «гарячих точок» і перегрітих елементів у контрольованій зоні.

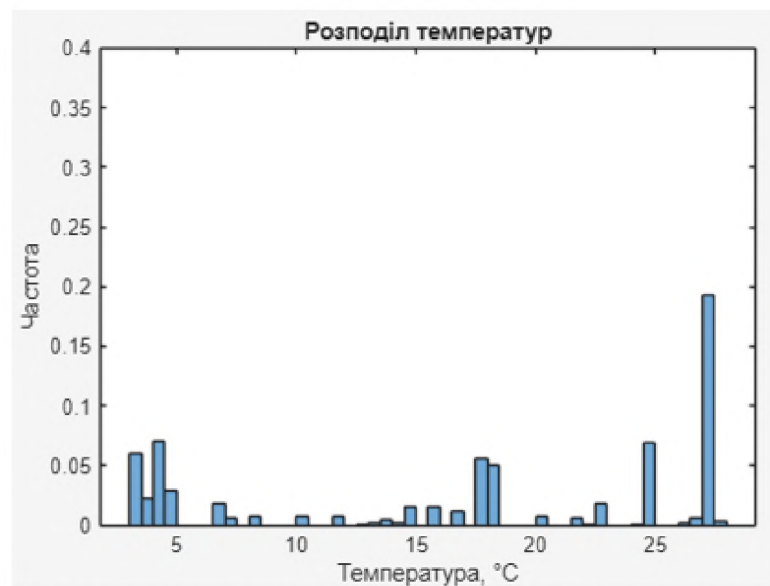


Рис. 3.11. Гістограма розподілу температур елегазового вимикача

Отриманий розподіл демонструє високий рівень теплової однорідності та відповідає нормальному режиму роботи високовольтного обладнання. Такий характер гістограми дозволяє зробити висновок, що на момент обстеження апарат працює у штатному тепловому режимі, а поточний стан не потребує позапланових втручань або ремонту.

Рекомендовано продовжувати експлуатацію обладнання в існуючих режимах, здійснюючи регулярний тепловізійний моніторинг для своєчасного виявлення можливих майбутніх відхилень, особливо у зонах, що демонструють температурну концентрацію на рівні 18 °С.

3.4. Висновки до практичного застосування аналізу теплових знімків

Проведена практична робота підтвердила високу ефективність методу обробки зображень, оскільки дозволяє подолати головне обмеження стандартної візуалізації – суб'єктивність. Розроблена методика, що ґрунтується на калібруванні за вбудованою кольоровою шкалою, забезпечила можливість отримувати абсолютні значення температури, що є фундаментальною основою для будь-якої об'єктивної діагностики. В результаті, отримано не просто зображення, а матрицю даних, придатну для складного математичного аналізу, що переводить процес обстеження з площини простої фотографічної фіксації у площину точного інженерного вимірювання. Методика може бути застосована не лише до високовольтних вимикачів, а й до будь-яких інших елементів електротехнічного обладнання таких як трансформатори, шинних мости, ізоляторів, для яких характерний нормальний розподіл температур у справному стані.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексний аналіз методів оцінювання рівня справності високовольтних вимикачів, що застосовуються у розподільних пристроях електроенергетичних систем. За результатами аналізу літературних джерел, дослідження сучасних методів діагностування та обробку експериментальних даних, отримано:

1. Комплексний аналіз конструкцій та умов експлуатації високовольтних вимикачів, визначено основні причини виникнення їх несправностей, а також систематизовано основні методи діагностування технічного стану, включаючи тепловізійний, вібраційний та електричний контроль.
2. Методику аналізу теплових знімків на основі побудови колірної карти та індексування зображення, що дозволяє перетворювати тепловізійні дані у чисельну температурну матрицю для подальшого математичного аналізу.
3. Доведено практичну ефективність запропонованої методики обробки тепловізійних зображень, яка забезпечує точний аналіз температурних значень. Також методика дає можливість автоматизованого формування даних для протоколів теплового контролю високовольтного та іншого електротехнічного обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

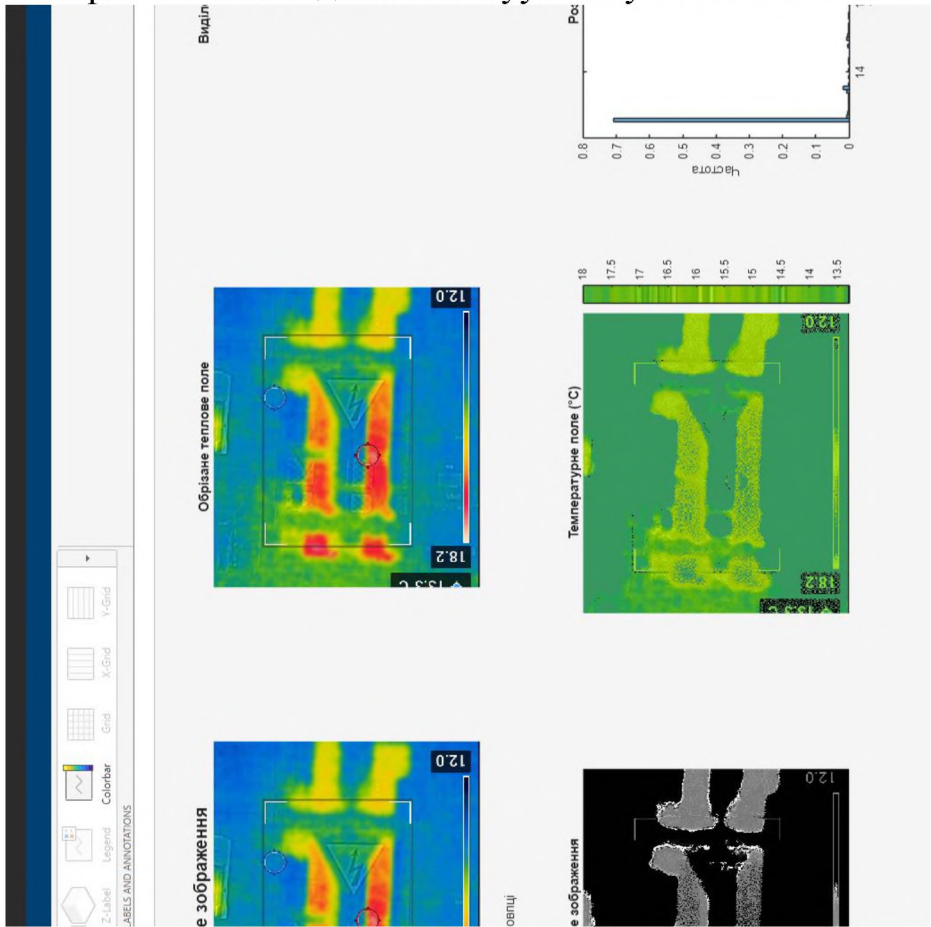
1. Романченко Ю. А. Порівняльний аналіз високовольтних вимикачів різних типів // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2022. – № 2 (272).
2. Рубаненко О. Є., Лесько В. О., Поліщук А. В., Мельничук Д. О. Особливості експлуатації високовольтних електричних вимикачів // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця : Вінницький національний технічний університет.
3. Кутін В. М., Рубаненко О. Є., Мисенко С. В. Методи та засоби діагностування елегазових вимикачів : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2018.
4. Панов А. В. Методи і система моніторингу елегазових вимикачів на напругу 330–750 кВ : дис. ... канд. техн. наук / Інститут електродинаміки НАН України. – Київ, 2019.
5. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту : навчальний посібник.
6. Кутін В. М., Ілюхін М. О. Діагностика електрообладнання. Типові задачі та лабораторний практикум : навчальний посібник.
7. Количев С. В. Конспект лекцій з дисципліни «Електричні апарати» для здобувачів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – Кам'янське : Дніпровський державний технічний університет, 2019.
8. Протасов А. Г., Лисенко Ю. Ю. Технології теплового неруйнівного контролю : підручник. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
9. Рубаненко О. Є., Мисенко С. В. Координація впровадження та забезпечення надійності елегазових вимикачів в умовах експлуатації // Вісник Вінницького національного технічного університету.

ДОДАТКИ

Додаток А

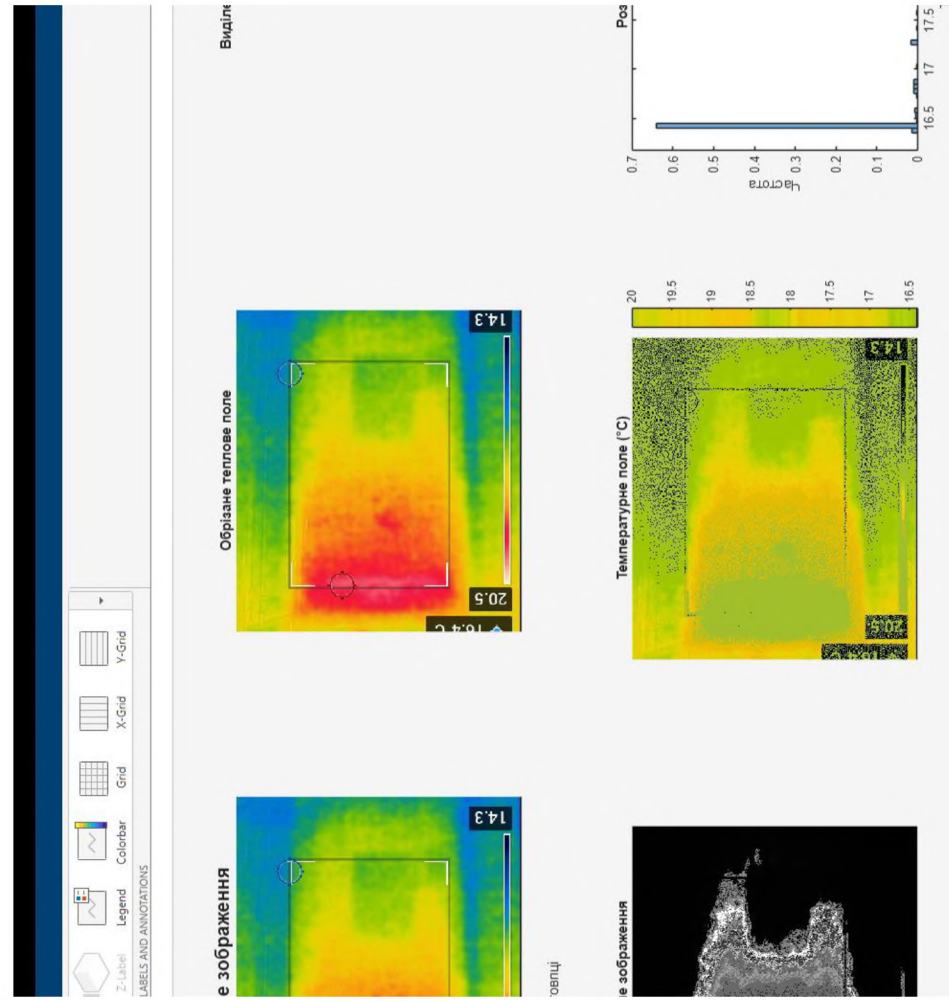
ГРАФІЧНІ МАТЕРІАЛИ

Аркуш 1. Результати використання методики на вакуумному вимикачі



Продовження додатку А

Аркуш 2. Результати використання методики на масляному вимикачі



Продовження додатку А

Аркуш 3. Результати використання методики на елегазовому вимикачі



е зображення



Обрізане теплове поле



зображення



Температурне поле (°C)

