

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(назва факультету)

Кафедра електричної інженерії

(повна назва кафедри)

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: Оцінка технічного стану електрообладнання методом

тепловізійної діагностики

Виконав: студент 4 курсу, групи ЕТ-41  
спеціальнос  
ті 141

електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

|          |                        |
|----------|------------------------|
|          | Коцюруба М.В.          |
| (підпис) | (прізвище та ініціали) |

|          |                        |
|----------|------------------------|
| Керівник | Філюк Я.О.             |
|          | (прізвище та ініціали) |

|               |                        |
|---------------|------------------------|
| Нормоконтроль | Коваль В.П.            |
|               | (прізвище та ініціали) |

|                      |                        |
|----------------------|------------------------|
| Завідувач<br>кафедри | Коваль В.П.            |
|                      | (прізвище та ініціали) |

|           |                        |
|-----------|------------------------|
| Рецензент | Романюк Л.А.           |
|           | (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 Коцюрубі Максиму Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Оцінка технічного стану електрообладнання методом тепловізійної діагностики

Керівник роботи ... Філюк Ярослав Олександрович, к.т.н.

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

Затверджені наказом ректора від « 24 » Січня 2025 року № 4/7-52

2. Термін подання студентом завершеної роботи червень 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Електротехнічне устаткування розподільчих пристроїв, трансформаторів, ліній електропередач. Системи тепловізійної діагностики електротехнічного устаткування.

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                                           | 30.01.2025                     |          |
| 2     | Аналітичний розділ                              | 26.02.2025                     |          |
| 3     | Проектно-конструкторський розділ                | 29.03.2025                     |          |
| 4     | Розрахунковий розділ                            | 22.04.2025                     |          |
| 5     | Безпека життєдіяльності та основи охорони праці | 13.05.2025                     |          |
| 6     | Висновки                                        | 31.05.2025                     |          |
| 7     | Оформлення пояснювальної записки                | 07.06.2025                     |          |
| 8     | Оформлення графічної частини                    | 10.06.2025                     |          |
|       |                                                 |                                |          |
|       |                                                 |                                |          |
|       |                                                 |                                |          |
|       |                                                 |                                |          |
|       |                                                 |                                |          |
|       |                                                 |                                |          |
|       |                                                 |                                |          |
|       |                                                 |                                |          |
|       |                                                 |                                |          |
|       |                                                 |                                |          |

Студент

(підпис)

Коцюрба М.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Філюк Я.О.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

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

Стор.53; рис.22 ; табл.6 ; джерел 13; додатків –.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра: «Оцінка технічного стану електрообладнання методом тепловізійної діагностики».

Мета кваліфікаційної роботи є аналіз та удосконалення методів оцінки технічного стану електрообладнання на основі тепловізійної діагностики для забезпечення надійної та безпечної експлуатації.

У першому розділі розглянуто критерії оцінки стану електротехнічного обладнання. Показано, що вид технічного впливу залежить від індексу технічного стану та середньої різниці температур, отриманої під час тепловізійного обстеження, з урахуванням чинників, що впливають на достовірність результатів діагностики..

Представлено розрахунки оцінки впливу факторів на показники надійності електротехнічного обладнання методом рангової кореляції.

Розглянуто типовий алгоритм тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання. Виконано аналіз організації системи тепловізійної діагностики електротехнічного устаткування під час технічного обслуговування, який дозволив скласти організаційну систему тепловізійної діагностики електротехнічного устаткування за функціями та функціональними підсистемами.

Проаналізовано структурну схему проведення тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання. Для складеної структурної схеми описано типовий алгоритм тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання. Розглянуто приклади висновку про залишковий ресурс або небезпеку виявленого дефекту.

Проведено структурний аналіз за видами економічних ефектів.

*Ключові слова:* тепловізійна діагностика, електрообладнання, надійність, економічний ефект.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| РЕФЕРАТ                                                                                                                 | 3  |
| ЗМІСТ                                                                                                                   | 4  |
| ВСТУП                                                                                                                   | 5  |
| 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ                                                                                                   | 7  |
| 1.1 Критерії оцінки стану електротехнічного обладнання                                                                  | 7  |
| 1.2 Проведення оцінки впливу факторів на показники надійності електротехнічного обладнання методом рангової кореляції   | 11 |
| 1.3 Висновки до розділу                                                                                                 | 16 |
| 2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ                                                                                     | 17 |
| 2.1 Аналіз організації системи тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання під час технічного обслуговування | 17 |
| 2.2 Аналіз систем прогнозування стану електротехнічного обладнання з метою визначення його залишкового ресурсу          | 22 |
| 2.3 Висновки до розділу                                                                                                 | 28 |
| 3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ                                                                                                 | 29 |
| 3.1 Структура і алгоритм тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання                                         | 29 |
| 3.2 Економічної ефективності інвестицій у заходи з оцінки стану електротехнічного обладнання                            | 38 |
| 3.4 Висновки до розділу                                                                                                 | 44 |
| 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ                                                                         | 45 |
| 4.1 Підвищення стійкості функціонування організації в надзвичайних ситуаціях                                            | 46 |
| 4.2 Заходи з електробезпеки                                                                                             | 48 |
| 4.3 Заходи протипожежної безпеки                                                                                        | 49 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ                                                                                                       | 51 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ                                                                                                        | 52 |

## ВСТУП

Тепловізійна діагностика електрообладнання як один із методів неруйнівного контролю забезпечує отримання економічних ефектів, що виражаються як сума технічних, ресурсощадних і організаційно- соціальних ефектів.

Кожна аварія, що трапилася на електрообладнанні, це не тільки зупинка технологічного процесу на підприємстві, а й багатомільйонні збитки.

В останні десятиліття великого поширення набувають методи контролю параметрів електрообладнання під робочою напругою. Значна частина енергетичного обладнання системи генерації та розподілу електроенергії потребує реконструкції та заміни, але, незважаючи на вищевикладене, триває його експлуатація, оскільки на його заміну або модернізацію потрібні колосальні вкладення. У зв'язку з цим витрати на проведення комплексного діагностування з кожним роком зростають. Ухвалення рішень щодо термінів та обсягів попереджувальних ремонтів за фактичним станом силового електрообладнання на підставі діагностичних вимірювань є дуже складним і відповідальним завданням.

Можливістю попередити аварію і вихід з ладу дорогого обладнання є своєчасне діагностування для виявлення дефекту на ранній стадії. Для виконання завдань із тепловізійного контролю використовується прилад - термограф (тепловізор). Раннє виявлення відхилень стану енергетичного обладнання призводить до істотного зниження витрат на його відновлення і ремонт, а також дає змогу запобігти збиткам від ймовірних аварій і відмов.

Актуальність теми зумовлена зростаючими вимогами до надійності та безпеки електрообладнання в умовах інтенсивної експлуатації. Тепловізійна діагностика дозволяє виявляти приховані дефекти на ранніх стадіях, що мінімізує ризики аварій та незапланованих простоїв. Застосування цього методу сприяє підвищенню енергоефективності та зниженню витрат на ремонт і обслуговування. У зв'язку з цим дослідження методів контролю за допомогою тепловізійного обладнання є надзвичайно актуальним у сучасній електроенергетиці.

Мета кваліфікаційної роботи є аналіз та удосконалення методів оцінки технічного стану електрообладнання на основі тепловізійної діагностики для забезпечення надійної та безпечної експлуатації.

Для досягнення поставленої мети в даній роботі необхідно було:

- Провести оцінку різних чинників на показники надійності;
- Провести дослідження типового алгоритму тепловізійного обстеження електрообладнання;
- Розрахувати економічну ефективність оцінки технічного стану електрообладнання за допомогою тепловізійних обстежень.

# 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Критерії оцінки стану електротехнічного обладнання

Нині ідентифікація дефектів електротехнічного обладнання за результатами тепловізійного контролю стає дедалі актуальнішою. Основні несправності найпоширеніших видів електротехнічного обладнання наведено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 - Несправності електротехнічного обладнання

Найважливішим критерієм під час проведення тепловізійного обстеження є достовірність і точність отриманої інформації про стан обладнання. Варто згадати, що на сьогоднішній день не існує методу неруйнівного контролю, дані якого можна було б використати і вважати однозначно достовірними. Ситуація, за якої справний об'єкт буде визнано дефектним. У нормативній документації прийнято систему бального оцінювання стану електротехнічного обладнання, залежно від величини якої визначається вид технічного впливу. Залежність видів технічного стану

електротехнічного обладнання від величини індексу технічного стану з розшифруванням їхніх функцій наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Розподіл дефектів контактних з'єднань

| Індекс технічного стану | Вид технічного стану | Функція виду технічного стану                                                                                                                                                   |
|-------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $I_{тс} \leq 25$        | Критичне             | Виміряні параметри перебувають за межами гранично - допустимих значень, визначених нормативною та технічною                                                                     |
| $25 < I_{тс} \leq 50$   | Незадовільний        | Виміряні параметри перебувають на рівні гранично-допустимих значень, визначених нормативною і технічною документацією, обладнання виконує необхідні функції не в повному обсязі |
| $50 < I_{тс} \leq 70$   | Задовільний          | Виміряні параметри перебувають у межах значень, визначених нормативною і технічною документацією, але виникає загроза настання відмов                                           |
| $70 < I_{тс} \leq 85$   | Гарне                | Виміряні параметри перебувають у межах значень, визначених нормативною і технічною документацією.                                                                               |
| $85 < I_{тс} \leq 100$  | Дуже гарне           | Відсутнє відхилення виміряних параметрів від вимог нормативної та технічної документації, обладнання виконує необхідні функції в повному обсязі                                 |

Види технічного впливу залежно від індексу технічного стану показано на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Види технічного впливу залежно від індексу технічного стану

У теперішній час згідно з керівними документами.

Вироблено підходи, що дають змогу оцінити роботу обладнання, які застосовні до більшості видів електротехнічного обладнання:

- порівняння середньої температури елементів електротехнічного обладнання, з аналогічним обладнанням, яке працює з однаковим навантаженням і в однакових умовах навколишнього середовища [9];
- порівняння температури конструктивних елементів із даними типових заводських випробувань або результатами випробувань нового обладнання на етапі введення в експлуатацію;
- Порівняння надлишкової температури елементів електротехнічного обладнання із зазначеними в керівних документах величинами. Аналіз типових результатів тепловізійного контролю і численний досвід його проведення у зарубіжних і [1,2,5,6] вітчизняних джерелах дає змогу встановити середню різницю

температур, характерну для кожного виду конструктивного елемента обладнання. Критерії відбраковування за надлишковою температурою контактних з'єднань з урахуванням чинників, що впливають на точність вимірювань, показано на рисунку 1.3.

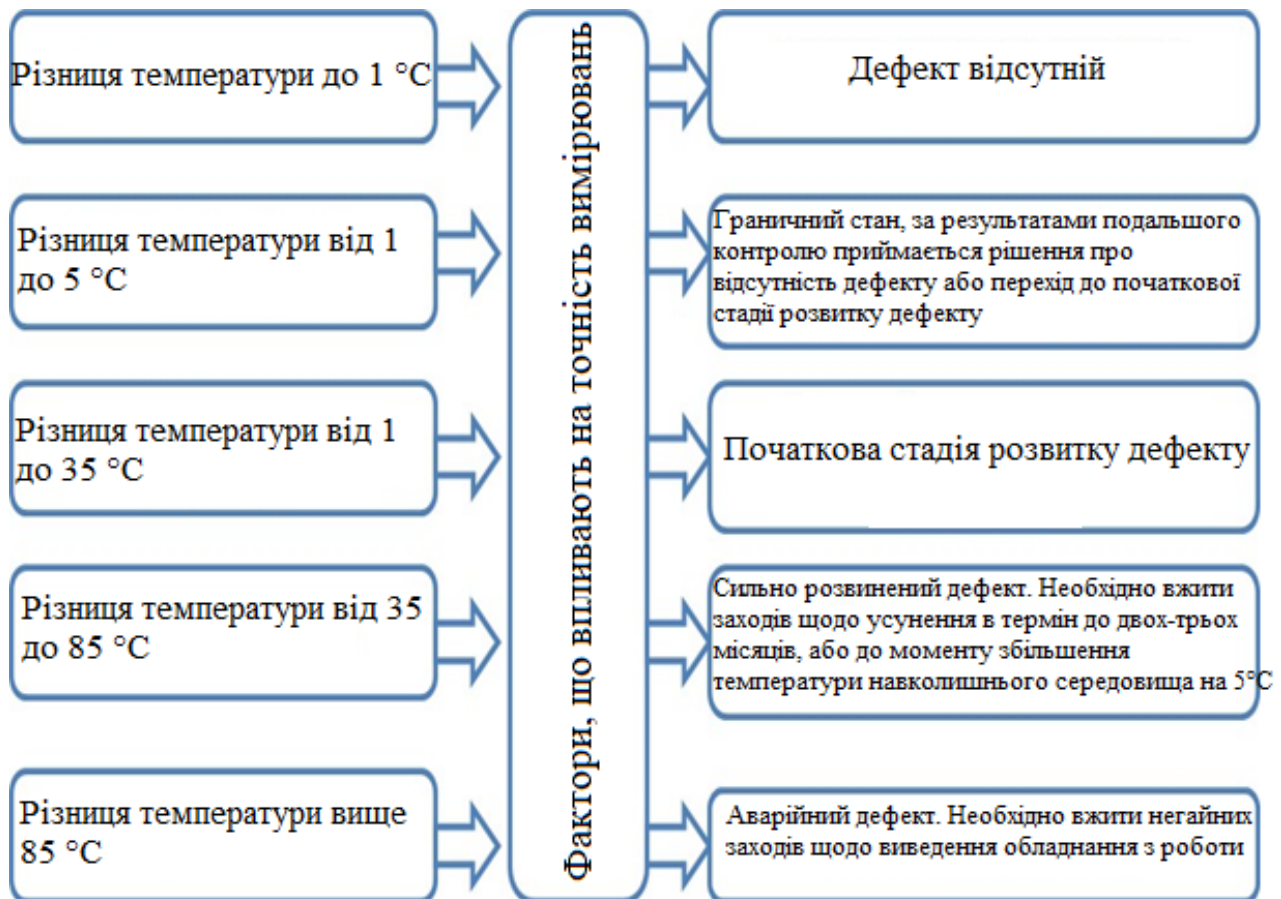


Рисунок 1.3 - Критерії відбраковування за надлишковою температурою контактних з'єднань

Отже, для оцінювання стану електротехнічного обладнання можна виконати розрахунок і аналіз його критеріїв для ухвалення рішення щодо технічного впливу, зводячи до мінімуму величину невизначеності, а відтак - зниження наслідків аварійних ситуацій.

## **1.2 Проведення оцінки впливу факторів на показники надійності електротехнічного обладнання методом рангової кореляції**

Що більше часу електротехнічне обладнання перебуває в роботі, то більше виникає дефектів, за розвитком яких слідує перехід до стану відмови, а потім - аварійний і позапланові ремонти електротехнічного обладнання, що вийшло з ладу.

Як показує досвід, найпоширенішими дефектами контактних з'єднань, як ранніше виявлених відхилень, є дефекти контактних з'єднань. Розподіл дефектів контактних з'єднань залежно від їхніх типів наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Розподіл дефектів контактних з'єднань

| Електротехнічна арматура     | Відносна кількість виявлених дефектів, % |
|------------------------------|------------------------------------------|
| Апаратні контактні затискачі | 65                                       |
| Болтові з'єднання            | 15                                       |
| Рухомі контакти              | 20                                       |

Щорічні обстеження електротехнічного обладнання з реєстрацією дефектів, що утворюються, свідчать про постійно діючі чинники старіння контактних елементів обладнання або про несвоєчасний чи неякісний ремонт. У такому разі для визначення впливу чинників необхідно скористатися критеріями, так званими непараметричними критеріями оцінки надійності у вигляді сум рангів і середнього значення суми рангів. Такий варіант дає змогу не враховувати час розподілу дефектів контактних з'єднань у часі і дає змогу уникнути помилок із вибором закону розподілу. Однак можливість попередити аварію і вихід з ладу дорогого устаткування без даних про спостереження й оцінка ймовірності безвідмовної роботи після факту відмови є не можливими. Тому будь-який набір даних про обстеження елементів електротехнічного обладнання повинен спочатку піддаватися не параметричним методам аналізу, а потім на основі прийнятої гіпотези піддаватися параметричному методу аналізу.

Можливий випадок спільного застосування параметричного і не параметричного методів аналізу для формалізації стану електротехнічного обладнання [8]. Джерелами інформації для ухвалення рішень про відхилення параметрів і наявність дефектів мають бути накопичені дані про вимірювання параметрів електротехнічного обладнання.

Перший масив даних являє собою параметричні дані про динаміку розвитку дефектів і пошкоджень, а другий - показники надійності. Також необхідно орієнтуватися на ремонтні та експлуатаційні документи, матеріали спеціальних досліджень, акти розслідування аварій і рекламації, які можуть виступати як додаткові джерела інформації [3,4].

Основою для оцінювання показників надійності під час непараметричного аналізу є досвід, знання та інтуїція (передбачення) спеціалістів-експертів, що є найпріоритетнішим для аналізу та обґрунтування впливу різноманітних чинників [7].

Експертні оцінки, з точки зору відповідальності за ухвалені рішення, бувають такими:

- індивідуальні оцінки одного фахівця. У контексті моніторингу (оглядів) і діагностики - це якісна оцінка електротехнічним персоналом стану обладнання, згідно з параметрами, що ідентифікують.
- колективні - нарада фахівців у галузі електроенергетики, спрямована на підготовку інформації до прийняття рішення з урахуванням колективної думки [10].

Оцінка впливу факторів на показники надійності електротехнічного обладнання визначається методом знаходження коефіцієнта множинної рангової кореляції. Опрацювання анкет фахівців-експертів виражається за важливістю того чи іншого показника надійності електроустаткування без оцінювання важливості або небезпеки таких показників і відображаються на відповідній шкалі.

Практичне розв'язання типової задачі рангової кореляції чинників, що найбільше впливають на величину потоку відмов, об'єкта. Цей аналіз ґрунтується на колективній оцінці кожного фактора, що впливає на показники надійності електротехнічного обладнання. Оскільки величина коефіцієнта конкордації завжди

менша за одиницю, то для зниження похибки аналізу необхідно, щоб кількість фахівців-експертів була не меншою від кількості чинників, які враховують під час оцінювання показників надійності. Кількість факторів, що підлягають оцінці, має бути від трьох до семи. Перелік факторів, що впливають на показники надійності, наведено в таблиці 1.3, де місце фактора відповідає його важливості.

Таблиця 1.3 - Перелік факторів, що впливають на показники надійності

| Номер фактора | Фактор, що впливає на показник надійності           |
|---------------|-----------------------------------------------------|
| 1             | Напрацювання обладнання                             |
| 2             | Якість електротехнічного обладнання та його монтажу |
| 3             | Кількість коротких замикань                         |
| 4             | Максимальне навантаження за час експлуатації        |
| 5             | Погодні умови                                       |
| 6             | Якість експлуатаційного обслуговування              |
| 7             | Кількість резервного обладнання                     |

Найважливіший фактор розташовується на першому рядку і має перший ранг. Опрацювання анкет фахівців-експертів для наочності подано у вигляді матриці рангів у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Матриця значущості факторів за анкетами фахівців- експертів

| Фахівці-експерти             | Фактор, що впливає на показник надійності |    |    |    |    |    |    |
|------------------------------|-------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
|                              | 1                                         | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  |
| спеціаліст-експерт 1         | 1                                         | 2  | 5  | 6  | 4  | 3  | 7  |
| спеціаліст-експерт 2         | 3                                         | 1  | 5  | 4  | 6  | 2  | 7  |
| спеціаліст-експерт 3         | 6                                         | 1  | 7  | 4  | 5  | 3  | 2  |
| спеціаліст-експерт 4         | 1                                         | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  |
| спеціаліст-експерт 5         | 2                                         | 1  | 5  | 6  | 4  | 3  | 7  |
| спеціаліст-експерт 6         | 5                                         | 1  | 3  | 4  | 6  | 2  | 7  |
| спеціаліст-експерт 7         | 3                                         | 4  | 1  | 2  | 5  | 6  | 7  |
| сума рангів фактора          | 21                                        | 12 | 29 | 30 | 35 | 25 | 44 |
| середнє значення суми рангів | 28                                        |    |    |    |    |    |    |
| абсолютне відхилення         | 7                                         | 16 | 1  | 2  | 7  | 3  | 16 |

У зв'язку з тим, що в думках експертів присутні пов'язані ранги, необхідно переформувати матрицю. На підставі переформування рангів будують нову матрицю і її дані заносять у таблицю 1.5 [11].

Таблиця 1.5- Матриця значущості факторів за анкетами фахівців- експертів з урахуванням пов'язаних рангів

| Фахівці-експерти             | Фактор, що впливає на показник надійності |      |      |     |      |     |      |
|------------------------------|-------------------------------------------|------|------|-----|------|-----|------|
|                              | 1                                         | 2    | 3    | 4   | 5    | 6   | 7    |
| спеціаліст-експерт 1         | 1,5                                       | 4,5  | 7    | 1,5 | 3    | 6   | 4,5  |
| спеціаліст-експерт 2         | 5,5                                       | 2,5  | 2,5  | 5,5 | 2,5  | 2,5 | 7    |
| спеціаліст-експерт 3         | 5                                         | 5    | 7    | 2,5 | 5    | 2,5 | 1    |
| спеціаліст-експерт 4         | 6,5                                       | 3,5  | 3,5  | 3,5 | 6,5  | 3,5 | 1    |
| спеціаліст-експерт 5         | 1,5                                       | 6,5  | 4    | 4   | 1,5  | 6,5 | 4    |
| спеціаліст-експерт 6         | 3,5                                       | 1    | 3,5  | 6,5 | 3,5  | 3,5 | 6,5  |
| спеціаліст-експерт 7         | 4,5                                       | 4,5  | 1    | 4,5 | 4,5  | 4,5 | 4,5  |
| сума рангів фактора          | 28                                        | 27,5 | 28,5 | 28  | 26,5 | 29  | 28,5 |
| середнє значення суми рангів | 28                                        |      |      |     |      |     |      |
| абсолютне відхилення         | 0                                         | 0,5  | 0,5  | 0   | 1,5  | 1   | 0,5  |

Таким чином значущість досліджуваних чинників розподілилася як показано в таблиці 1.6.

Таблиця 1.6 - Перелік факторів, що надають вплив на показники надійності за ранговими оцінками фахівців-експертів

| Ранг | Фактор, що впливає на показник надійності           |
|------|-----------------------------------------------------|
| 1    | Погодні умови                                       |
| 2    | Якість електротехнічного обладнання та його монтажу |
| 3    | Напрацювання обладнання                             |
| 4    | Максимальне навантаження за час експлуатації        |
| 5    | Кількість коротких замикань                         |
| 6    | Кількість резервного обладнання                     |
| 7    | Якість експлуатаційного обслуговування              |

Оцінювання ступеня узгодженості думок усіх фахівців-експертів здійснюється розрахунковим методом визначення коефіцієнта конкордації для однакових значень рангів в оцінках одного експерта за формулою.

$$W = \frac{S}{\frac{1}{12} \cdot m^2 (n^3 - n) - m \cdot \sum T_i} \quad (1.1)$$

де  $S$  - сума квадратів різниць рангів;  $n$  - кількість чинників;  $m$  - кількість експертів;  $T_i$  - кількість зв'язків в оцінках  $i$ -го експерта.

$$T_i = \frac{1}{12} \sum (t_j^3 - t_j) \quad (1.2)$$

де  $t_j$  - кількість повторюваних елементів в  $i$ -й зв'язці  $i$ -го експерта.

Відповідно коефіцієнт множинної рангової кореляції за формулою (1.1) дорівнює:

$$W = \frac{4}{\frac{1}{12} \cdot 7^2 (7^3 - 7) - 7 \cdot 40,5} = 0,00367 \quad (1.3)$$

Значення коефіцієнта, меншого за три десятих, свідчить про наявність слабого ступеня узгодженості думок фахівців-експертів у сенсі їхньої корельованості.

Слабка корельованість думок фахівців-експертів свідчить про високий вплив виробничих чинників, на мінімізацію яких слід звертати увагу та вживати адекватних заходів щодо зменшення їх впливу. Водночас можна з упевненістю сказати про переважний вплив атмосферних і кліматичних умов на надійність контактних з'єднань електротехнічного обладнання відкритих розподільчих пристроїв. Вплив атмосферних і кліматичних умов проявляються у вигляді

перенапруг у період гроз, а також впливом впливу промислових об'єктів, що розташовані поблизу підстанцій.

### **1.3 Висновки до розділу**

У першому розділі розглянуто критерії оцінки стану електротехнічного обладнання. Показано, що вид технічного впливу залежить від індексу технічного стану та середньої різниці температур, отриманої під час тепловізійного обстеження, з урахуванням чинників, що впливають на достовірність результатів діагностики..

Представлено розрахунки оцінки впливу факторів на показники надійності електротехнічного обладнання методом рангової кореляції

## **2. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ**

### **2.1 Аналіз організації системи тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання під час технічного обслуговування**

Технічне обслуговування за факторною реалізацією передбачає два методи заснованих на аналізі його минулих станів:

- статистичний метод опрацювання даних, заснований на даних про відмови електротехнічного обладнання аналогів;
- екстраполяційний метод, заснований на аналізі попередніх станів конкретного електротехнічного обладнання.

Для впровадження так званого ефективного управління електротехнічним обладнанням з терміном служби, вищим за нормативний, і запобігання аваріям необхідно впровадити систему тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання, як частину системи контролю технічного стану. У чистому вигляді застосування статистичного методу можливе під час експлуатації простого не дорогого устаткування, що резервується іншим електротехнічним обладнанням, відмова якого не призводить до технологічних порушень основного обладнання або технологічного циклу.

Тепловізійний контроль електрообладнання - є першим у застосуванні теплового методу неруйнівного контролю для потреб промислових підприємств безпосередньо під час виконання робіт.

Для побудови організації системи тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання розглянемо функції, подані на рисунку 2.1, і згрупуємо їх у три функціональні підсистеми, спрямовані на підвищення ефективності технічного обслуговування і утворення стимулів для надання реальної інформації про стан електротехнічного обладнання.



Рисунок 2.1 - Функції тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання

Типовий алгоритм проведення тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання представлений на рисунку 2.2.

Електротехнічне обладнання характеризується багатовимірністю і нелінійністю параметрів.



Рисунок 2.2 - Типовий алгоритм тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання

В вітчизняній енергетиці прийнято вертикальна система розмежування функцій в залежності від рівня відповідальності структурного підрозділу. Наочно така система представлена на рисунку 2.3.

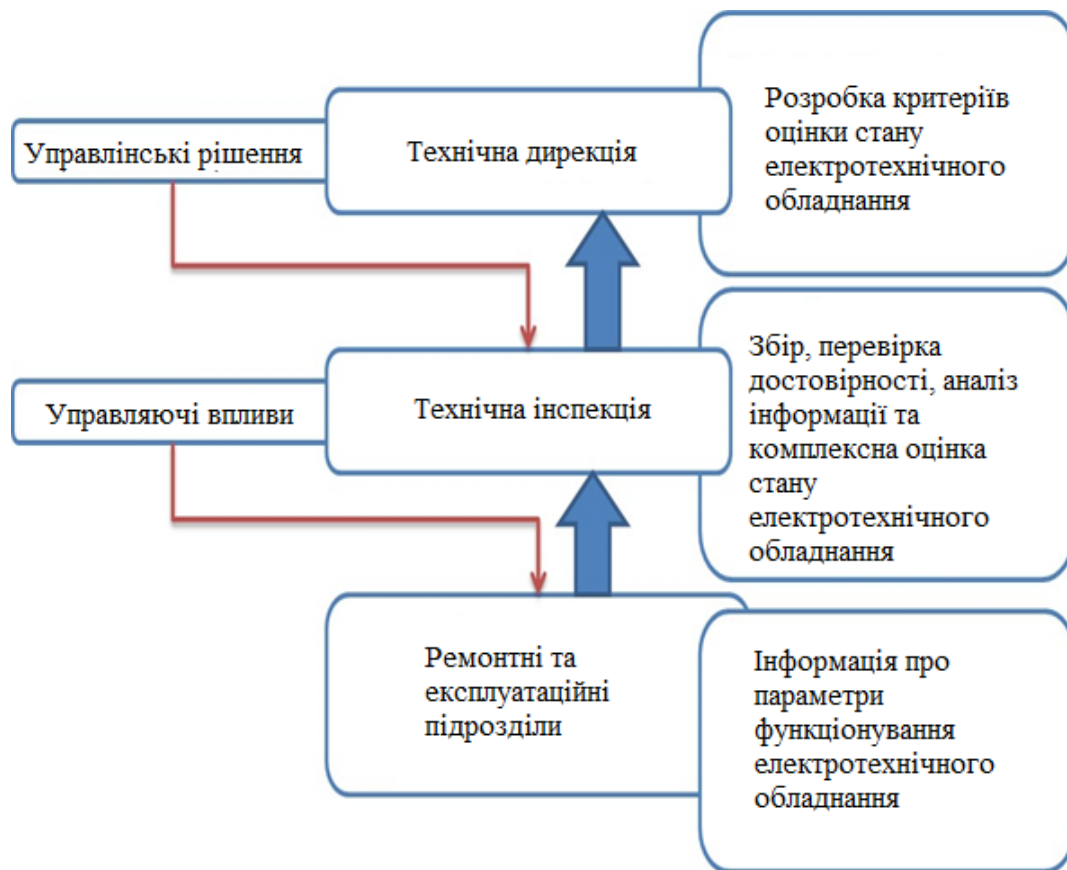


Рисунок 2.3 - Структурна схема системи контролю технічного стану електротехнічного обладнання

Отже, організація системи тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання перебуває в зоні відповідальності технічної інспекції або іншої штатної структури, відповідальної за технічний стан.

Завданнями, що стоять перед підрозділами з прогнозування стану електротехнічного обладнання, є:

- визначення стану елементів з урахуванням похибок;
- визначення часу до настання відмови обладнання;
- визначення керуючих впливів для досягнення технічних та економічних

завдань" [12].

Засобами для досягнення вищевказаних завдань є сценарне прогнозування, стимулювання підвищення ефективності ремонтів та управління ризиками. Функціональну схему системи прогнозування стану електротехнічного обладнання наведено на рисунку 2.4.

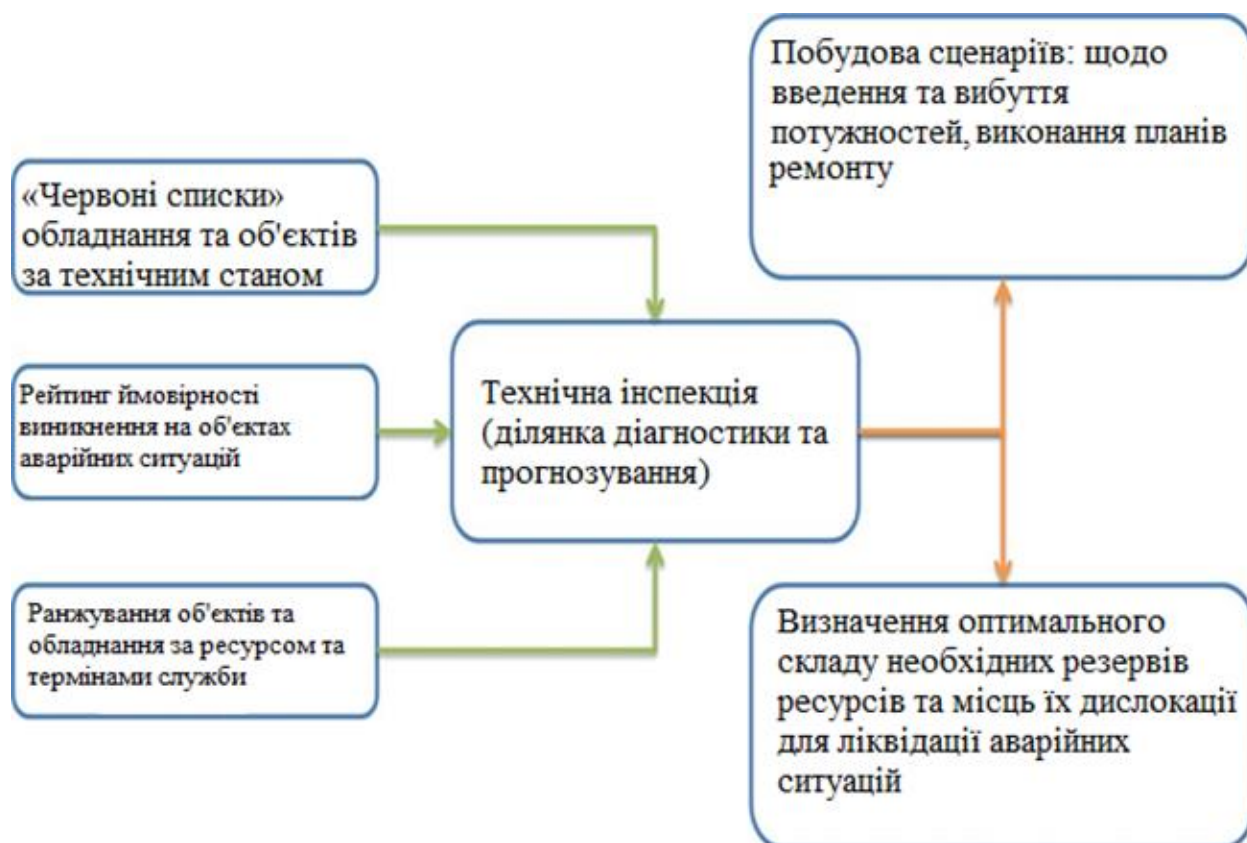


Рисунок 2.4 - Функціональна схема системи прогнозування стану електротехнічного обладнання

Недоліком таких систем є той факт, що функціональні залежності роботи моделей елементів електротехнічного обладнання та вимоги керівних документів та інструкцій, враховують роботу конкретних схемних рішень і конкретних власників такого обладнання та для впровадження такої системи на іншому об'єкті потребує доопрацювання і процедури дослідної експлуатації. Навіть точне налагодження системи діагностування електротехнічного обладнання не гарантує одержання адекватних управлінських рішень, оскільки всі системи, які експлуатують в енергетиці України.

При цьому слід зазначити, що експерту технічної інспекції електротехнічного обладнання буде очевидно, що список методів неруйнівного контролю може бути доповнено й іншими необхідними діагностиками. Керувальні впливи експерта, технічної інспекції, повинні реалізовуватися тільки на тих ділянках контролю, на яких відповідно до визначеної зони контролю повинні бути виконані діагностичні

заходи, при цьому не витрачати матеріальні та обчислювальні ресурси системи на розпізнавання дефектів на інших ділянках, оскільки це відноситься до зони відповідальності прогнозування сценаріїв достатності заходів з технічного обслуговування і ремонту.

Ідентифікація процесу розпізнавання дефекту відбувається : зафіксоване зображення дефекту зіставляють із наявною базою даних за видом обладнання, відповідно до регламенту.

## **2.2 Аналіз систем прогнозування стану електротехнічного обладнання з метою визначення його залишкового ресурсу**

Структурно-технологічна криза, в якій перебуває сучасна електроенергетика, вимагає якісно нових підходів та інфраструктури, що базуються на мережевій архітектурі, мультиагентному управлінні, самоорганізації, інтелектуальності, масштабованості, галузевої інтеграції, зручності та пов'язаності з глобальним інформаційним простором.

Ефективність функціонування електроенергетичних систем значною мірою залежить від інфраструктурного та технічного оснащення і потребує широкого впровадження інтелектуальних систем, що забезпечують необхідну для подальшого технологічного розвитку структуру. Одним із найперспективніших методів інтелектуалізації електроенергетики в частині прогнозування, управління, оптимізації та іншого є застосування штучних нейронних мереж. Збільшення доступних обчислювальних можливостей і цифрова трансформація суспільства зумовлюють зростаючу популярність використання інтелектуальних систем, що робить актуальним розгляд можливостей застосування цієї технології в електроенергетиці.

Достовірний прогноз відіграє велику роль у визначенні залишкового ресурсу електротехнічного обладнання. У питанні визначення залишкового ресурсу найперспективнішими є перевага інтелектуальних систем при діагностиці та локалізації аварійних ситуацій через їхню гнучкість за значних потоків даних та

інформаційного шуму. Водночас істотним недоліком таких систем є тривалий період навчання, для скорочення якого до прийнятних результатів можуть застосовуватися узагальнено-регресійні системи з схемою прямого передавання сигналу, ймовірнісні системи та адаптивні нечіткі системи. Також вкрай перспективним є застосування цих систем для прогнозування структурних катастроф, основний збиток від яких спричиняється каскадним руйнуванням зв'язків між елементами.

Оцінка надійності дає змогу розв'язати проблему експотенціального зростання даних і реалізувати ефективну схему ремонту електротехнічного обладнання за станом. Найоптимальнішою моделлю інтелектуальних систем для розв'язання цього завдання є багатопшарове у поєднанні з інтелектуальною системою Гопфілда, що прискорює роботу системи.

У загальному випадку система прогнозування стану містить у собі інформаційну, технічну та інформаційно-математичну складові, що забезпечують її роботу. Структурна схема прогнозування стану електротехнічного обладнання показана на рисунку 2.5.

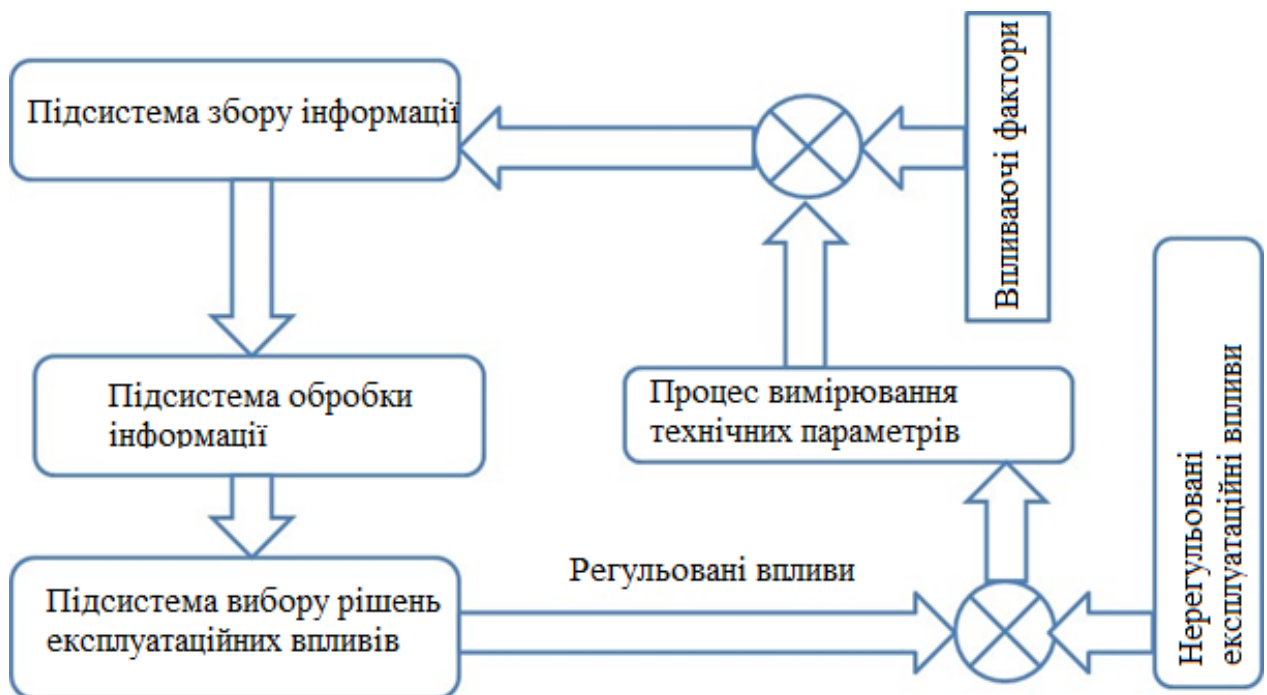


Рисунок 2.5 - Структурна схема системи прогнозування стану електротехнічного обладнання

Найбільшого поширення набули структурні методи розрахунку надійності. Розрахунок показників надійності за допомогою структурних методів включає:

- представлення об'єкта у вигляді структурної схеми;
- опис схеми за допомогою адекватної математичної моделі.

Як структурні схеми можуть розглядатися: блок-схеми надійності; дерева відмов; графи станів.

Для оцінювання величин імовірності сприйняття тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання та огорожувальних конструкцій розрахунковим методом встановлено коефіцієнти для перерахунку ймовірності сприйняття чутливим елементом. Згідно з дослідженнями Джонсона, діапазон значень критерію  $N$  залежно від типу задачі, що розв'язується, становить: режим "виявлення"  $N = 2 (+1 - 0.5)$  штрихів на висоту ділянки; режим "розпізнавання"  $N = 8 (+1.6 - 1.4)$  штрихів або напівперіодів еквівалентної міри на мінімальний розмір ділянки.

Величина критерію  $N$  визначає кількість періодів еквівалентної світи, розв'язуваних спостерігачем для даного рівня сприйняття з 50 %-вою ймовірністю. З вищесказаного випливає, що для ідентифікації об'єкта з імовірністю 0,95 необхідно, щоб на його критичному (мініальному) розмірі вклалося  $8 \cdot 2 = 16$  періодів еквівалентної світи. У звичайній практиці (з метою спрощення оцінки ефективності застосування тепловізора для розв'язання задач виявлення та розпізнавання) період еквівалентної світи, що складається з двох штрихів, для простоти оцінок замінюють на два пікселі, таким чином, приймають відмінність об'єкта з імовірністю 50 % за умови 8 пікселів на термограмі, розміщених на мініальному розмірі обстежуваної ділянки. Миттєве поле зору в цьому випадку визначає відстань, на якій критичний розмір об'єкта потрапить на необхідну кількість пікселів для забезпечення виявлення, розпізнавання та ідентифікації. Наприклад, під час проведення діагностики контактних з'єднань віддаленість точки зйомки не повинна перевищувати 30-40 метрів.

Розрахунок надійності в рамках структурних методів найчастіше проводять за допомогою блок-схем надійності. Така модель представляє взаємозв'язки між

компонентами з погляду надійності і не завжди відповідає реальному з'єднанню елементів. Схему алгоритму наведено на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 - Схема алгоритму логіко-імовірнісного методу прогнозування стану електротехнічного обладнання

Для розв'язання задачі прогнозування надійності електротехнічного обладнання використовуватимемо логіко- імовірнісний метод. Причини вибору цього методу - зручний опис логічної функції системи будь-якої структури з використанням засобів математичного апарату бінарної алгебри логіки і проста, порівняно з іншими структурними методами, програмна реалізація. Блок схема формування прогнозу про надійність системи и її взаємозв'язок із тепловізійною діагностикою показано на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 - Схема алгоритму формування прогнозу про надійність системи

Завданням системи прогнозування стану електротехнічного обладнання тепловими методами є забезпечення необхідного технічного стану, необхідної надійності елементів такого обладнання протягом терміну експлуатації за умови перебігу в ньому процесів термічної деструкції на підставі періодичної оцінки відповідності поточних значень критеріїв стану, зумовленими різними факторами. У деяких випадках критерії оцінки показника граничного стану електротехнічного обладнання визначаються за конструкторською документацією.

Для прикладу наведемо розрахунок залишкового ресурсу сухого трансформатора (до остаточного виведення з експлуатації). Залишковий ресурс визначається старінням ізоляції. Старіння ізоляції викликає зниження значення напруги пробою ізоляції. При цьому швидкість старіння істотно залежить від температури. Як критерій оцінки залишкового ресурсу обрано показники температурного режиму роботи. Максимальна температура обмоток

трансформаторів (клас ізоляції всіх обстежених трансформаторів - F) становить 155 °С. Температура обмоток трансформаторів у робочому режимі не перевищує 42 °С (за результатами тепловізійного контролю). Залишковий ресурс  $L_{\text{зал}}$  обчислюють за формулою:

$$L_{\text{вик}} = T_{\text{сл}} - K_{\text{вик}} (G_{\text{пот}} - G_{\text{вв}}) = 25 - 0,267(2025 - 2015) = 22,3 \quad (2.1)$$

де  $K_{\text{вик}}$  - коефіцієнт використання, що визначається за формулою:

$G_{\text{тек}}$  - поточний рік експлуатації (для розрахунку прийнято 2025 р.);

$G_{\text{вв}}$  - рік введення в експлуатацію (для розрахунку прийнято 2015 р.);

Таким чином, на момент проведення тепловізійної діагностики залишковий ресурс трансформатора за критерієм старіння ізоляції становить 22,3 року, що приводить загальний ресурс трансформатора до показника 33,3 року.

Провівши аналіз методів розв'язання задач прогнозування надійності систем електротехнічного обладнання, приймаємо логіко-імовірнісний метод прогнозування надійності електротехнічного обладнання, оскільки він може бути застосований до будь-якої схеми за будь-яких розподілів напрацювання на відмову. З погляду застосування в умовах планово-технологічних служб виробництва, має нескладну реалізацію на автоматизованих робочих місцях. Водночас слід зазначити, що виконання розрахунків для потреб організації технічного ремонту та обслуговування за технічним станом, без застосування спеціалізованих програм, є трудомістким і недоцільним.

Не дивлячись на всі недоліки, логіко-імовірнісний метод є ефективним методом аналізу надійності систем технічного обслуговування і ремонту в електроенергетиці, оскільки він дає змогу аналізувати надійність будь-якої структурно-складної технічної системи.

Для полегшення організації складових структурної схеми прогнозування електротехнічного обладнання рекомендується доповнювати стандартні форми електронних експлуатаційних справ, у складі експлуатаційної документації, такими даними:

- Показники надійності;
- Напрацювання на відмову, год;
- Призначений ресурс до капітального ремонту, год;
- Призначений термін служби, роки;
- Критерії відмов;
- Критерій граничного стану;
- Умови експлуатації.

Електронна експлуатаційна справа посідає провідну роль у підсистемі збору інформації та містить інформацію, що дає змогу виконати оцінку за алгоритмом формування прогнозу надійності електротехнічного обладнання.

Висновки з другого розділу:

### **2.3 Висновки до розділу**

Розглянуто типовий алгоритм тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання. Виконано аналіз організації системи тепловізійної діагностики електротехнічного устаткування під час технічного обслуговування, який дозволив скласти організаційну систему тепловізійної діагностики електротехнічного устаткування за функціями та функціональними підсистемами.

Визначено три функціональні підсистеми, спрямовані на підвищення ефективності технічного обслуговування та утворення стимулів для надання реальної інформації про стан електротехнічного обладнання.

На підставі аналізу системи прогнозування стану електротехнічного обладнання з метою визначення його залишкового ресурсу сформовано структурну схему прогнозування стану електротехнічного обладнання.

Визначено основну проблему, що існує при створенні сучасних систем прогнозування технічного стану електротехнічного устаткування, якою є складний математичний апарат, що враховує складні функціональні залежності роботи моделей елементів електротехнічного устаткування та вимоги керівних документів та інструкцій.

### 3. РОЗРАХУНКОВИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Структура і алгоритм тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання

Для найефективнішого діагностування стану електротехнічного обладнання на підприємстві необхідно виділяти підрозділ тепловізійного контролю. Практика показує, що виконання тепловізійних обстежень і аналіз їхніх результатів, які виконують фахівці з високовольтних випробувань або ремонтники, є недостовірними, через відсутність спеціальних знань або інших суб'єктивних причин.

Структурна схема тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання складається з комплексу технологічних операцій, показаних на рисунку 3.1.

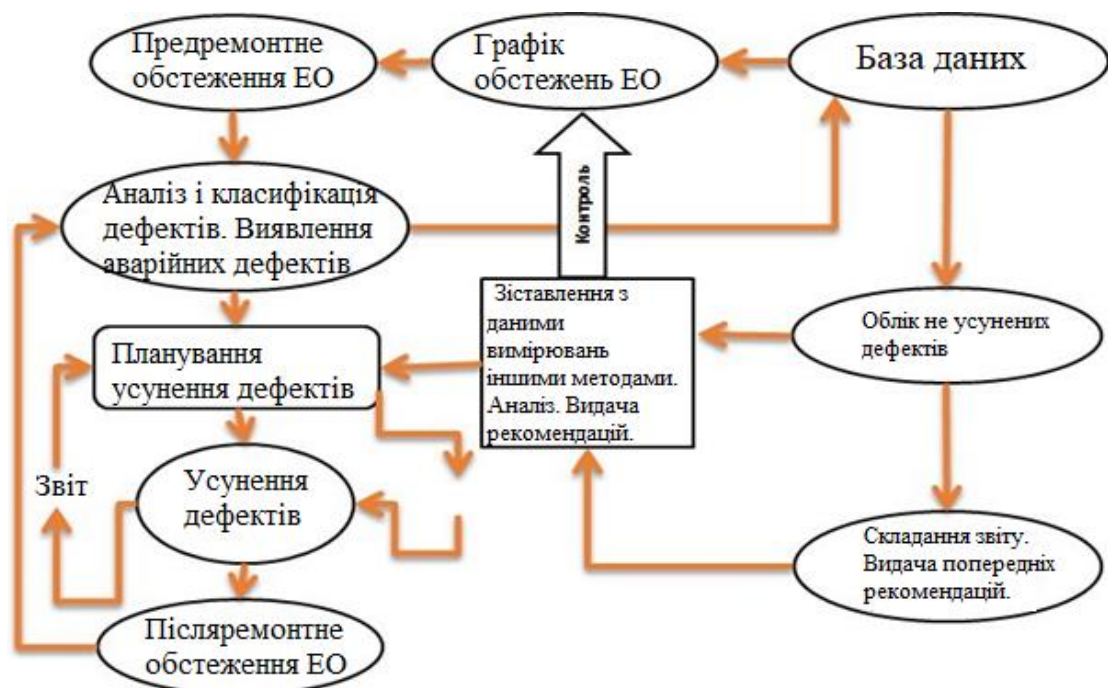


Рисунок 3.1 - Структурна схема тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання

Алгоритм проведення тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання показано на рисунку 3.2, основними методами реалізації якого є

порівняння, зіставлення температурних параметрів, а також перевірка працездатності складових елементів тепловим методом.

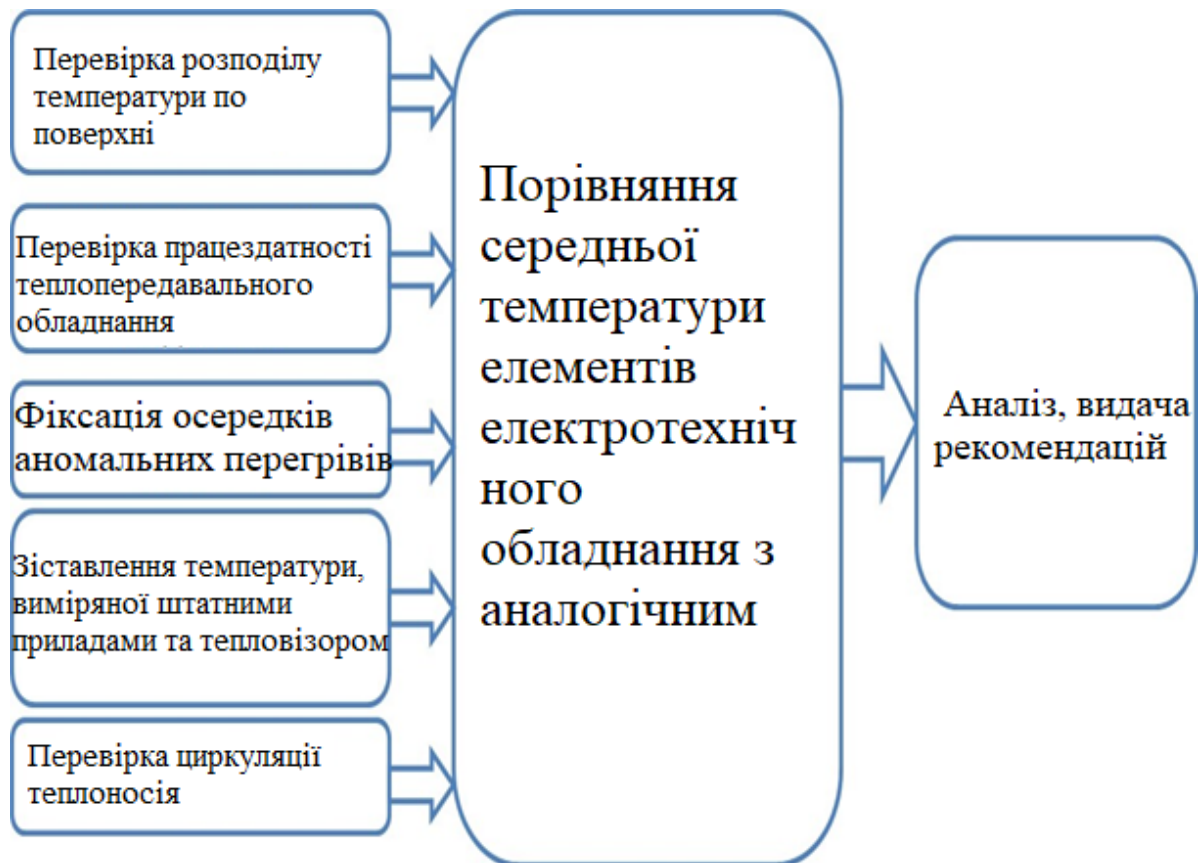


Рисунок 3.2 - Структурна схема алгоритму проведення тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання

База даних електротехнічного обладнання дає змогу здійснювати безперервне управління процесом моніторингу та контролю стану обстежуваного електротехнічного обладнання. Мінімальна інформація про обладнання, що міститься в базі даних, повинна відображати відомості про електротехнічне обладнання, що підлягає тепловізійної діагностики, а також дані про всі виконані раніше обстеження. Створення бази даних краще вести на основі програмного забезпечення виробника тепловізійного обладнання.

Недоліком використання програмного забезпечення виробника тепловізійного обладнання є те, що воно дає змогу оперувати тільки тими даними, які містяться у

складі звітів про тепловізійне обстеження. Побудова ж структури, що дає змогу аналізувати й управляти процесом тепловізійного обстеження, потребуватиме значних витрат часу та високої кваліфікації фахівців виконавців.

Графік проведення тепловізійної діагностики складається на основі графіків ремонтів електротехнічного обладнання, що складається ремонтним підрозділом підприємства. Інтервали між операціями діагностики можуть бути скорочені за необхідності, наприклад, для відстеження динаміки дефекту.

Рішення про скорочення інтервалів контролю стану електротехнічного обладнання ухвалює безпосередній керівник, у чиєму підпорядкуванні перебуває підрозділ тепловізійної діагностики.

З погляду безпечного виконання робіт в електроустановках, такий підрозділ має складатися не менше ніж із трьох осіб. Якщо в існуючій структурі підприємства наявний підрозділ, що виконує діагностику, вимірювання та випробування електротехнічного обладнання (лабораторія, дільниця, служба, цех), то такий підрозділ доцільно ввести до його складу.

Передремонтне і післяремонтне обстеження електротехнічного обладнання проводять відповідно до графіка за заздалегідь розробленими і затвердженими програмами і методиками.

Аналіз, під час якого визначають параметри дефектів, ступінь їхньої важливості та ґрунтуючись на практичному досвіді формують прогноз щодо якості або залишкового ресурсу елементів електротехнічного обладнання. Критерії та діагностичні параметри містяться в керівній і нормативній документації, так само за інформацією виробників електротехнічного обладнання.

Таким чином, процес аналізу дефектів елементів обладнання за результатами тепловізійної діагностики можна об'єднати у блок контролю стану обладнання, що включає в себе:

- визначення небезпеки ефекту за фіксованою граничною температурою нагрівання;
- визначення стану елементів з урахуванням похибок;
- визначення часу до настання відмови обладнання.

На цьому етапі необхідно виявити аварійні дефекти, які підлягають негайному усуненню. Цю інформацію має бути доведено до керівного персоналу ремонтної служби.

Облік не усунених дефектів здійснює персонал підрозділу тепловізійної діагностики. Неусувний дефект з погляду наслідків для електротехнічного устаткування - стан устаткування, за якого температурний градієнт залишився незнижуваним або став більш небезпечним. Інформацію про неусунуті дефекти в обов'язковому порядку включають до звіту про тепловізійну діагностику.

Складання звіту за результатами тепловізійної діагностики проводиться на підставі даних аналізу і класифікації виявлених дефектів. На цьому етапі проводиться зіставлення результатів з результатами контролю, виконаних іншими методами, наприклад, візуальному контролю в ультрафіолетовому спектрі.

Планування усунення дефектів проводиться на підставі звіту з урахуванням рекомендацій за результатами тепловізійної діагностики.

Для усунення аварійних дефектів має бути сформована аварійна заявка на виведення електротехнічного обладнання з роботи. За фактом усунення виявлених дефектів заповнюється ремонтна та експлуатаційна документація, дані з якої актуалізуються в базі даних.

Підготовка рекомендацій для експлуатуючої організації, на підставі визначення експертом небезпеки дефекту, технологічно належить до другої групи методів тепловізійного контролю.

Проблема в цій групі пов'язана з відсутністю даних про вироблений ресурс обладнання на етапі первинного тепловізійного контролю, і ухвалення рішення залишається за кінцевим користувачем або експлуатуючою організацією. Приклад термічної зйомки кабельних ліній наведено на рисунку 3.3.

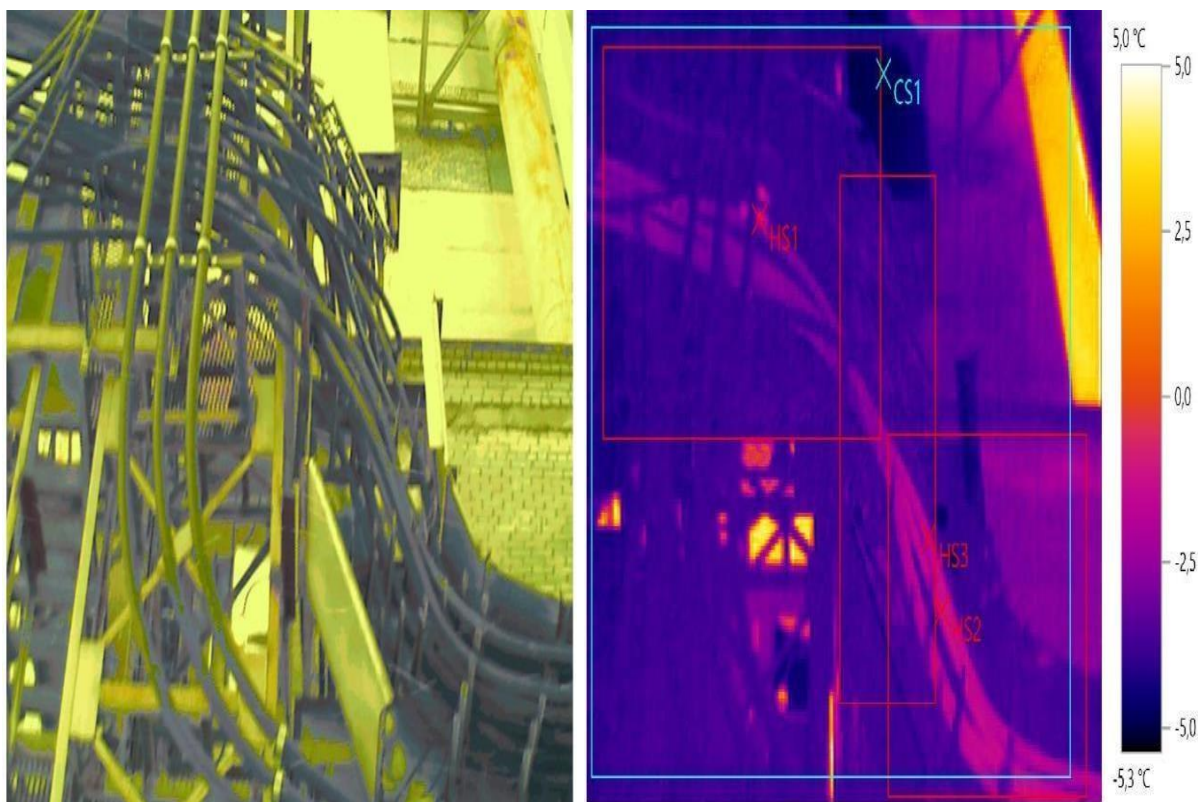


Рисунок 3.3 - Тепловізійне знімання кабельних ліній

Отже, для оцінки залишкового ресурсу можна застосувати методи моделювання, наприклад термічного старіння, до появи мікротріщин в ізоляції, які можна фіксувати під час тепловізійного дослідження при контролі високої роздільної здатності. Аналіз досліджень показує, що, наприклад, кабельна продукція, піддана термостарінню протягом 1500 годин, підтверджує свій 40-річний ресурс.

Процес діагностики електротехнічного обладнання можна умовно розділити на три етапи: підготовка, виконання технологічних операцій з діагностики та обробка результатів з видачею висновку. Етап підготовки до діагностики складається зі збору, вивчення та документування відомостей про електротехнічне обладнання та контактні з'єднання його елементів. Зібрані відомості доцільно заздалегідь включити в бланк діагностики, що оформляється в табличній формі і заповнюється в міру виконання діагностичних заходів.

З метою подальшого полегшення статистичного опрацювання й аналізу результатів діагностики та виконання техніко-економічних розрахунків необхідно скласти перелік обстежуваного електрообладнання, його розміщення на території,

включно з оперативними найменуваннями приєднань і електрообладнання. Перелік приєднань, що діагностуються, із зазначеннями приналежності до підрозділів, що експлуатують дані ділянки, із зазначенням контактних даних. Кількість елементів електрообладнання в межах цих приєднань.

Для розв'язання задачі з оцінки небезпеки дефекту за результатами діагностики (у разі роботи за неповного навантаження) виконуються розрахунки з переведення у відносні одиниці відносно номінального навантаження за  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і відсутності вітру, алгоритм програми перерахунку температурних перегрівів окремих елементів електротехнічного обладнання показано на рисунку 3.4.

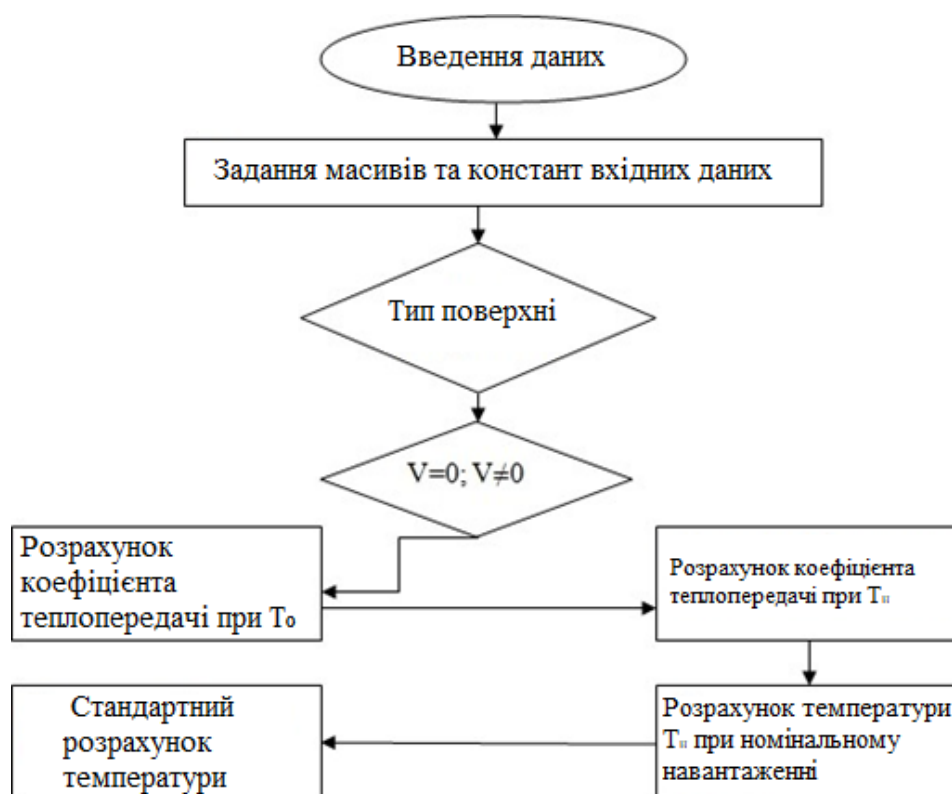


Рисунок 3.4 - Алгоритм перерахунку температури за різного вітрового навантаження

Паспортні або технологічні дані про обладнання, що діагностується, і контактні з'єднання, як-от: номінальні напруги та струми одиниць приєднання, коефіцієнт потужності навантаження, види контактних з'єднань (зварні, болтові, роз'ємні, нероз'ємні), матеріал контактних з'єднань (мідь, алюміній і сплави),

особливості режиму роботи: тривалий, короткочасний, з повним або частковим завантаженням.

Для оптимізації робочого часу при виконанні робіт в обстежуваному електрообладнанні необхідно отримати і вивчити електричні схеми електрообладнання - наявність і вид ізоляційного середовища, розташування і влаштування струмоведучих контурів, наявність і розташування частин з органічною ізоляцією (як найбільш схильною до повзучих розрядів), розташування шунтувальних опорів вентильних розрядників та інших елементах електрообладнання, що нагріваються в процесі роботи, з урахуванням їхніх конструктивних особливостей. Наприклад, схема заземлення і конструкція магнітної системи та обмоток силових трансформаторів дає змогу точніше виявити й локалізувати місця температурних аномалій.

Для визначення видів і типів електрообладнання та контактних з'єднань, які є найбільш критичними з погляду ушкоджуваності та на які слід звернути увагу під час проведення діагностики, необхідно мати відомості про дату введення в роботу та статистику ушкоджень діагностуемого електрообладнання та контактних з'єднань, що діагностується, - за якомога більший період, відомості про проведення капітальних та поточних ремонтів, модернізацію та реконструкцію.

Перед проведенням діагностики необхідно провести візуальний огляд місць установлення електрообладнання, ознайомиться з його розташуванням у межах енергооб'єкта, визначити ракурс і дистанцію зйомки, виявити об'єкти та чинники, які можуть спотворити результати діагностики.

Якщо електрообладнання містить у своєму складі елементи з невідомим коефіцієнтом випромінювання, то перед проведенням діагностичних заходів необхідно на аналогічній частині такого самого елемента, що напрацював такий самий термін експлуатації і в тих самих умовах, провести експериментальне визначення вищевказаного коефіцієнта.

З погляду забезпечення безпеки робіт діагностику виконують дві людини - керівник робіт, який контролює виконання правил охорони праці під час роботи в

електроустановках, і термографіст, який працює з тепловізійним обладнанням. Блок-схему організації групи термографічного контролю представлено на рисунку 3.5.



Рисунок 3.5 - Блок схема організації групи термографічного контролю Під час проведення обстеження бажано використовувати готові типові бланки.

Суттєве зростання споживання електричної енергії пов'язане з якісною зміною споживачів. Остання визначена введенням нових технологій і поглибленням електрифікації різних виробництв, що призводить до збільшення залежності нормального функціонування споживачів від надійності постачання електричної енергії.

Приклад реалізації виявлених дефектів методом тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання наведено на рисунках 3.6 - 3.7.

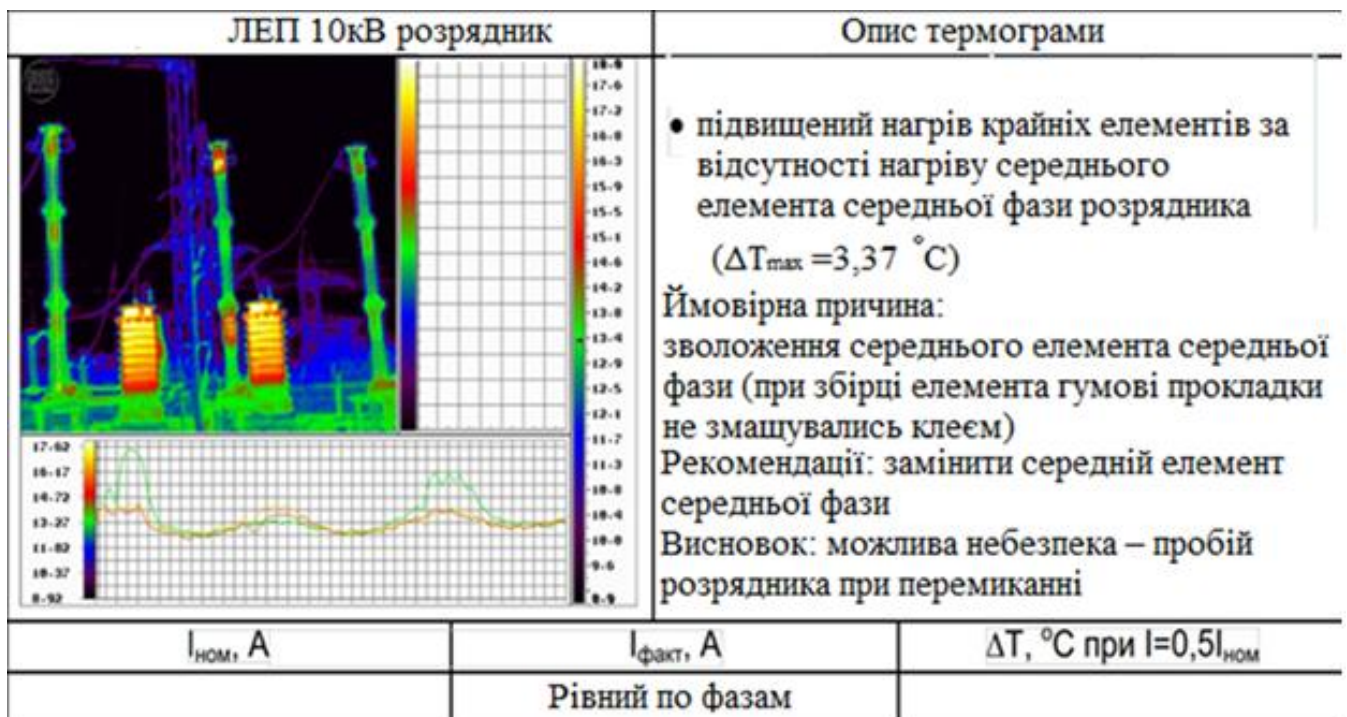


Рисунок 3.6 - Приклад температурного дефекту розрядника, виявленого методом тепловізійної зйомки

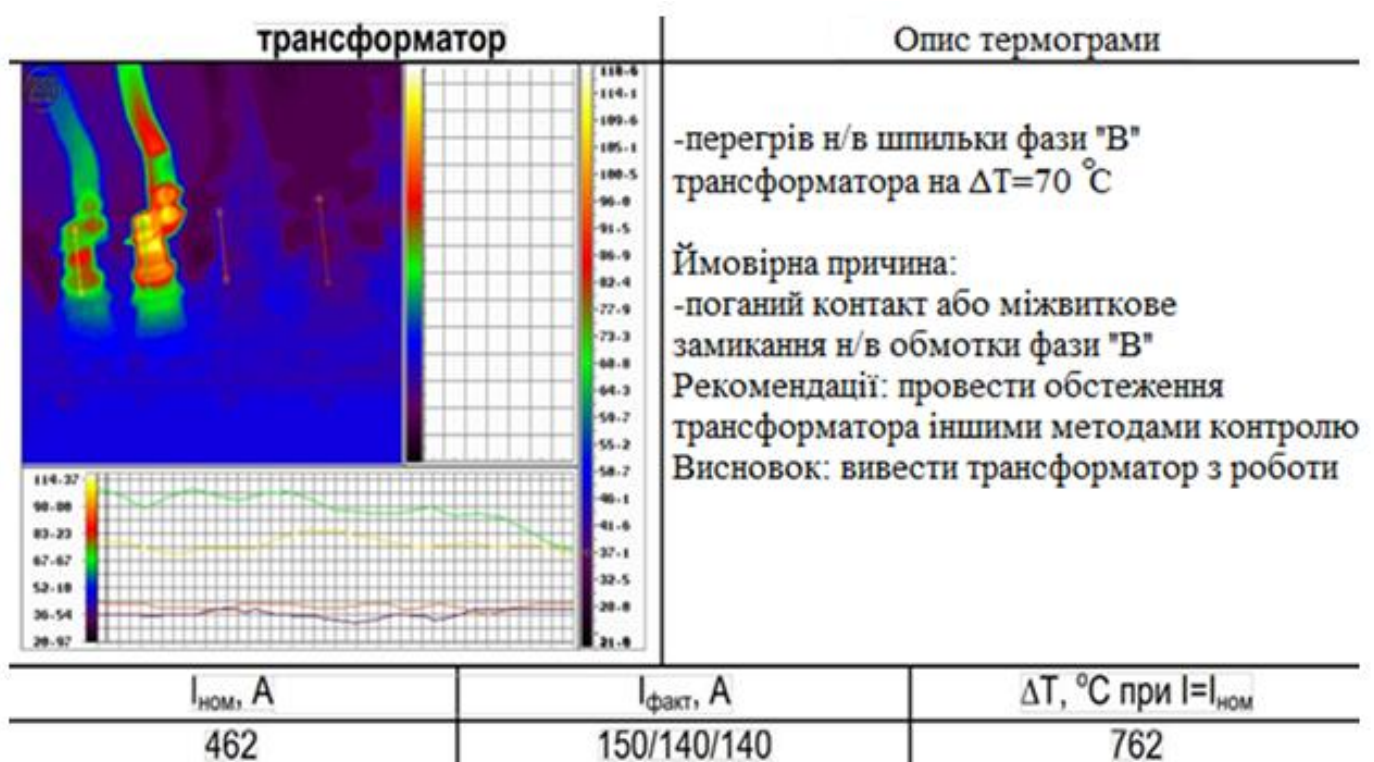


Рисунок 3.7 - Приклад температурного дефекту високовольтного вводу трансформатора, виявленого методом тепловізійної зйомки

Приклад термограми, коли тепловізійна діагностика ведеться в умовах відсутності видимості контактних з'єднань, показано на рисунку 3.8.

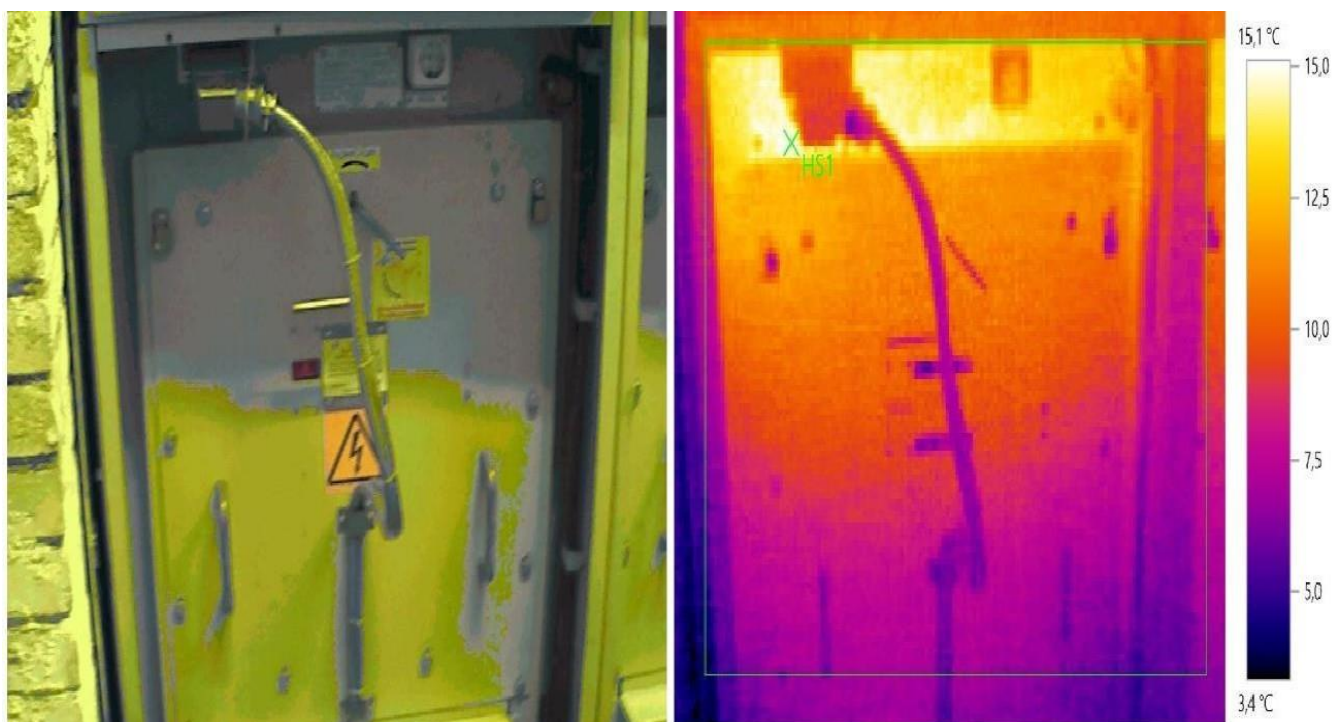


Рисунок 3.8 - Приклад діагностики методом тепловізійної зйомки РП10 кВ, через огорожувальні елементи комірки

У випадках, показаних на рисунках 3.6 - 3.7, і виявленні таких дефектів експерт оформляє в бланку звіту ймовірну причину температурної аномалії і дає висновок про небезпеку виявленого дефекту в процесі експлуатації електротехнічного обладнання. Робиться висновок про причини можливо неякісного ремонту. У випадку, показаному на рисунку 3.8, експерт має призначити повторне проведення тепловізійного обстеження, оскільки дані, отримані під час такої зйомки, є не достовірними.

### **3.2 Економічної ефективності інвестицій у заходи з оцінки стану електротехнічного обладнання**

Вкладення капіталу в заходи щодо підвищення ефективності з метою отримання економічного результату називаються інвестиціями. Вкладення

інвестицій передбачає вибір варіанта, який задовольняє основним критеріям оцінювання експлуатаційних витрат, з погляду виконання основних функцій електрообладнання.

Для вираження фінансової частини прибутку процесу експлуатації електрообладнання, показано на рисунку 3.9.

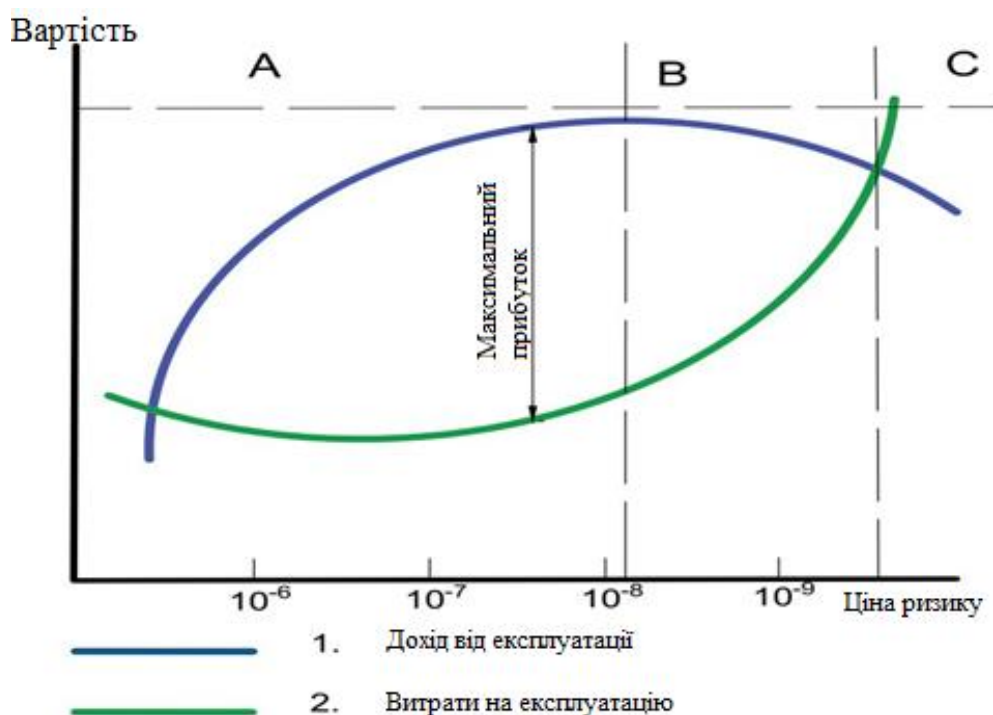


Рисунок 3.9 - Економічна ефективність інвестицій

На рисунку 3.9 відображено графік (крива 1) доходів від експлуатації електротехнічного обладнання, який зростає в інтервалі "А", що пояснюється високою надійністю і малим інтервалом часу на ліквідацію економічних наслідків відмов. Графік (крива 2), що показує додаткові експлуатаційні витрати, так само показує зростання в міру зменшення надійності електрообладнання, у процесі отримання прибутку. В інтервалах "В" і "С" прибуток помітно скорочується і навіть можливі збитки, зокрема пов'язані з людськими життями. Реалізація технічних заходів щодо оптимізації експлуатаційних витрат на кожному етапі життєвого циклу обладнання характеризується різницею доходів і витрат грошових коштів.

Статистичні дані та досвід експлуатації показує, що інтервал "А" має часову протяжність 10-15 років, отже, проведення економічно ефективних заходів в

інтервалах "В" і "С" можливе тільки на основі ретельного аналізу, в якому результати тепловізійного обстеження відіграють ключову роль.

Ефекти від впровадження показано на рисунку 3.10 і рисунку 3.11, залежно від методів їхнього досягнення їх підрозділяють:

- техніко-економічні ефекти;
- енерго-ресурсозберігаючі ефекти;
- організаційно-економічні ефекти;
- соціально-економічні ефекти.



Рисунок 3.10 - Техніко-економічна ефективність програмно- апаратного комплексу візуального огляду та спостереження за станом електрообладнання підстанцій



Рисунок 3.11 - Організаційно-економічна ефективність програмно- апаратного комплексу візуального огляду та спостереження за станом електрообладнання

На підставі аналізу пошкоджуваності та умовної оцінки фактичного стану електрообладнання у великих електромережевих компаніях, на рисунку 3.12 показано розподіл економічних ефектів залежно від умовної ймовірності пошкоджень електрообладнання.

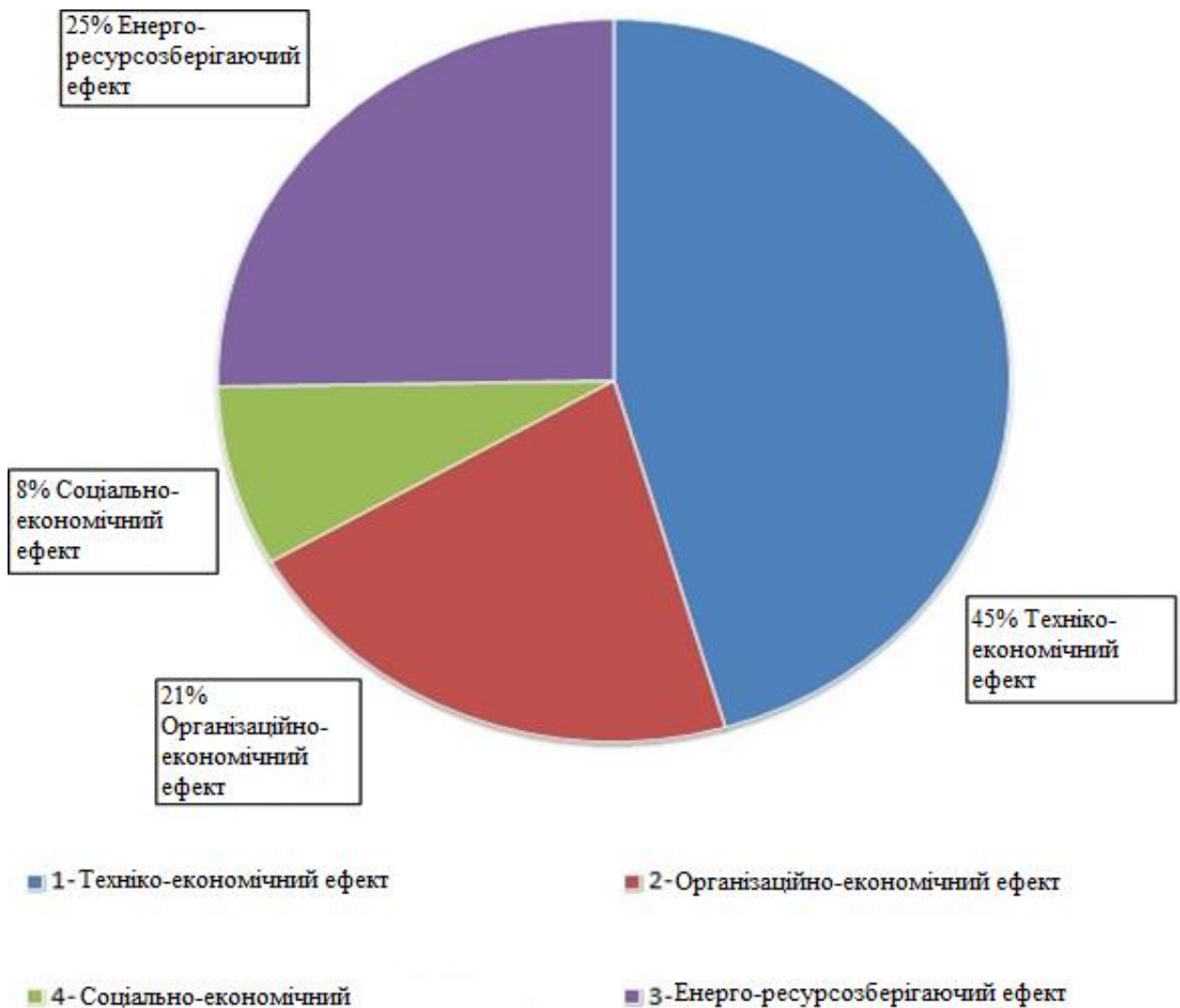


Рисунок 3.12 - Розподіл за видами економічних ефектів оцінки технічного стану електрообладнання

Якщо значення функції умовної ймовірності пошкодження електрообладнання  $R_{пе}$ , як цільову задачу прийняти за нуль, то час безвідмовної роботи  $T_{роб}$ , величина якого повинна бути якомога ближчою до терміну служби цього обладнання, то значення економічних ефектів зазначених на рисунку 3.9, перебувають у межах цих величин, що характеризують межі здійсненності умовної ймовірності пошкодження електрообладнання.

Величиною, яка є більш зручною для визначення економічних ефектів, є умовна ймовірність  $Q_{пе}$  виникнення зазначених на рисунку 3.9 характеристик у разі пошкоджень електрообладнання з подальшою їхньою фінансовою оцінкою та визначенням очікуваного ризику.

На сьогодні розроблено математичні моделі електрообладнання і використовуються універсальні алгоритми для визначення функцій розподілу відмов електрообладнання, які потребують великої бази статистичних даних і великої кількості припущень.

За нормального закону розподілу умовна ймовірність  $Q_{ne}$  за нормального закону розподілу пошкоджень електрообладнання визначається як

$$Q_{ne} = 0,5 + \Phi_0 \left[ \frac{m - \frac{m^*}{n}}{\sqrt{\delta^* + \frac{\delta^{*2}}{n^2}}} \right] \quad (3.1)$$

де  $\Phi_0$  - табульована функція Лапласа.

Для практичного використання, за відсутності статистичних даних тепловізійного контролю, умовну ймовірність  $Q_{ne}$  пошкоджень електрообладнання слід визначати за формулою

$$Q_{ne} = 1 - \sqrt[N]{1 - \delta} \quad (3.2)$$

де  $\delta$  - коефіцієнт довіри, N- кількість контрольованих елементів.

Очікуваний ризик визначається, як добуток максимально можливого збитку та ймовірності пошкодження електрообладнання

$$R = c \cdot Q_{ne} \quad (3.3)$$

де  $c$  - максимально можливий збиток.

Наприклад, задаючи коефіцієнт довіри 0,9 і максимально можливий збиток, що дорівнює  $c = 107$  грн на 300 контрольованих елементів електрообладнання підстанції, очікуваний ризик становитиме:

$$R = 10^7 (1 - \sqrt[300]{1 - 0.9}) = 10^7 \cdot 0.00764 = 76459 \text{ грн} \quad (3.4)$$

Тобто середня величина збитку становить 76459 грн, тоді як граничне значення збитку можливо більше на два порядки.

У випадку з граничною величиною збитку частка техніко- економічної складової є значною й інвестиції на утримання та комплектацію підрозділу тепловізійного контролю вважаються маловитратними та швидкоокупними.

Таким чином, розрахунок економічної ефективності оцінки технічного стану електрообладнання за допомогою тепловізійних обстежень зводиться до розрахунку можливих збитків, що виникають за відсутності належної уваги до результатів обстеження електрообладнання. Економічна оцінка може проводитися на етапі розроблення техніко-економічного обґрунтування заходів щодо оптимізації експлуатаційних витрат.

### **3.4 Висновки до розділу**

У третьому розділі проаналізовано структурну схему проведення тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання. Для складеної структурної схеми описано типовий алгоритм тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання. Розглянуто приклади висновку про залишковий ресурс або небезпеку виявленого дефекту.

Розглянуто сучасне розуміння оцінки економічної ефективності залежно від вкладень капіталу для реалізації технічних заходів щодо мінімізації експлуатаційних витрат. Проведено структурний аналіз за видами економічних ефектів. Виявлено, що частка енерго-ресурсозберігаючого ефекту та організаційно-економічного практично близька до техніко- економічного.

## 4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

Електробезпека – це система організаційних і технічних заходів, що забезпечують захист людей від небезпечної і шкідливої дії електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля, статичної електрики.

Основними заходами захисту від ураження електричним струмом є:

- забезпечення недоступності струмопровідних частин для випадкового дотику;
- застосування електроенергії з безпечними величинами напруги;
- усунення небезпеки ураження людей струмом у разі появи напруги на частинах конструкцій електроустаткування;
- застосування індивідуальних захисних засобів від ураження електричним струмом.

Недоступність струмопровідних частин для випадкового дотику досягається ізоляцією їх струмонепровідними матеріалами. Провідники електричного струму повинні мати робочу ізоляцію. Передбачено застосування в деяких випадках додаткової, підсиленої чи лінійної ізоляції.

Недоступність розташування струмопровідних частин досягається розміщенням їх на висоті, під підлогою чи приховано в стінах. Незахищені струмопровідні частини, до яких можливий дотик людей, надійно огорожують у всіх випадках, якщо напруга перевищує:

- 65 В – в приміщеннях без підвищеної небезпеки;
- 42 В – в приміщеннях з підвищеною небезпекою;
- 12 В – в приміщеннях особливо небезпечних.

У випадку напруги понад 250 В огорожують не тільки незахищені, але й ізольовані струмопровідні частини.

Застосування малих напруг – дуже ефективний захист від ураження електричним струмом. Для живлення кіл керування технологічним обладнанням,

встановленим в особливо небезпечних приміщеннях і приміщеннях з підвищеною небезпекою; кіл керування пересувного устаткування і для живлення ручного інструменту використовують напругу не вище 42 В. На шафах і пультах керування обладнанням розміщують штепсельні розетки з напругою не вище 12 В для включення переносних світильників, які використовуються під час періодичних оглядів наявних в них важкодоступних місць.

Захисне заземлення, занулення і відключення – основні заходи захисту людей від ураження електричним струмом у разі появи напруги на частинах конструкцій електроустаткування.

#### **4.1 Підвищення стійкості функціонування організації в надзвичайних ситуаціях**

Стійкість роботи організації в надзвичайних ситуаціях - це її здатність випускати встановлені види продукції в заданих обсягах і номенклатурі, або точно виконувати свої функціональні обов'язки.

Підвищення стійкості роботи починається з організації та проведення дослідження стійкості роботи організації. Головна мета дослідження - виявлення слабких місць у роботі і вироблення комплексу заходів щодо їх усунення.

Дослідження включає три етапи:

- організаційний етап;
- оцінку стійкості роботи організації;
- розробку заходів щодо підвищення стійкості роботи організації.

Оцінка стійкості роботи організації включає в себе оцінку:

- ймовірності виникнення зовнішніх і внутрішніх НС природного, техногенного, воєнного характеру та їх вплив на життєдіяльність організації;
- надійності системи захисту працівників організації від вражаючих факторів НС військового, техногенного та природного характеру;

- фізичної стійкості будівель, споруд, що забезпечують систем;
- стійкості матеріально-технічного постачання і виробничих зв'язків;
- стійкості системи керування, зв'язку та оповіщення;
- підготовленості організації до відновлення порушеної функції.

Заходи щодо підвищення стійкості роботи поділяють на: організаційні, інженерно-технічні та спеціальні.

Організаційні заходи включають в себе:

- прогнозування наслідків можливих надзвичайних ситуацій та розробку планів дій на мирний і воєнний час;
- підготовку керівного складу до роботи у надзвичайних ситуаціях;
- навчання працівників організації дотримання заходів безпеки і способам дій при виникненні надзвичайної ситуації;
- розробку інструкцій щодо зниження небезпеки виникнення аварійних ситуацій в організації, а також по безаварійної зупинки виробництва, локалізації аварій, ліквідації їх наслідків та організації відновлення порушеного виробництва;
- створення і організацію роботи комісії з підвищення стійкості роботи організації та чергово-диспетчерської служби організації;
- підготовку сил і засобів організації для проведення заходів з ліквідації наслідків аварійних ситуацій і відновлення виробничої діяльності;
- встановлення розмірів небезпечних зон навколо потенційно небезпечних об'єктів організації;
- підготовку до проведення евакуації працівників організації, населення, сільськогосподарських тварин з небезпечних зон;
- створення і підтримка в постійній готовності систем оповіщення та керування при надзвичайних ситуаціях та ін.

Інженерно-технічні заходи спрямовані на підвищення фізичної стійкості будівель, споруд, технологічного обладнання, інженерних комунікацій, а також на створення умов для швидкого проведення відновлювальних робіт, підвищення

захищеності працівників, сільськогосподарських тварин, рослин і продуктів сільськогосподарського виробництва.

Спеціальні заходи спрямовані на створення умов для переведення роботи організації на аварійний режим і на забезпечення захисту працівників у надзвичайних ситуаціях і на швидку ліквідацію наслідків цих ситуацій.

## **4.2 Заходи з електробезпеки**

До технічних засобів і заходів захисту від ураження електричним струмом належать:

- застосування малих напруг;
- ізоляція струмоведучих частин (робоча, додаткова, посилена, подвійна);
- забезпечення недосяжності неізольованих струмоведучих частин;
- захисне заземлення;
- занулення, захисне відключення;
- вирівнювання потенціалів;
- електричне розділення мереж;
- компенсація струмів замикання на землю;
- огорожувальні улаштування;
- попереджуюча сигналізація;
- блокування; знаки безпеки;
- засоби захисту і запобіжні пристосування та ін.

Мала напруга – це номінальна напруга, яка не перевищує 42 В і застосовується для зменшення небезпеки ураження електричним струмом. Нормативними документами передбачається у виробничих умовах застосовувати два значення малих напруг – 12 В і 42 В. У приміщеннях з підвищеною небезпекою і особливо небезпечних напруга для світильників місцевого, ремонтного освітлення і ручного інструменту не повинна перевищувати 42 В. Крім того, в особливо

небезпечних приміщеннях, за несприятливих умов (наприклад, робота сидячи або лежачи на струмопровідній підлозі) для живлення ручних переносних ламп потрібна ще більш низька напруга –12 В.

#### **4.3 Заходи протипожежної безпеки**

В приміщеннях встановити наступний протипожежний режим, яким передбачено:

- порядок паління цигарок. Паління в будинках і приміщеннях заборонено. Для паління на територіях об'єктів обладнані спеціальні місця, які позначені знаками пожежної безпеки або написами - "Місце для паління" та об лаштовані урнами для недопалків. На території об'єктів заборонено застосування відкритого вогню (розігрівання замерзлих труб опалення, спалювання відходів виробництва, сміття, сухого листя, тощо);

- порядок користування електронагрівальними приладами. Приго-тування кип'ятку, розігрівання та приготування їжі здійснюється в спеціально обладнаних для цих цілей місцях із застосуванням електрочайників з автоматичними пристроями відключення електронагрівальних елементів;

- порядок роботи з електроприладами. Забороняється залишати без нагляду увімкнені в електромережу електроприлади та оргтехніку - персональні ЕОМ, оргтехніку, радіоприймачі, електронагрівальні прилади, вентилятори, кондиціонери;

- порядок виконання вогнебезпечних робіт. Проведення вогневих та інших пожеже небезпечних робіт (газоелектрозварювальних, газорізальних, розігрів бітумів та смоли) дозволяється проводити після підготовки місця проведення цих робіт, узгодження з інженером з пожежної безпеки та виконання усіх передбачених заходів з пожежної безпеки; перевірка робочих місць та приміщень у кінці робочого дня. Перед закінченням роботи та закриттям приміщень особа, відповідальна за протипожежний стан приміщення, (працівник) зобов'язана перевірити протипожежний стан приміщень, відключити напругу з усіх електроустановок та

електроприладів (вимірювальних, електронно-обчислювальних, паяльників, кондиціонерів, вентиляторів, радіоприймачів, комп'ютерів тощо), а також з мереж їх живлення. Закрити вікна, квартирки. Виявлені порушення правил пожежної безпеки необхідно усунути до закриття приміщень.

Заходи пожежної безпеки в процесі роботи:

Дії персоналу в разі загрози винищення пожежі чи аварії. Правила вимкнення установок та агрегатів, порядок зняття напруги з електроустановок, виклику аварійної допомоги тощо.

Заходи пожежної безпеки, яких необхідно дотримуватися, приступаючи до роботи, у процесі роботи та після її закінчення з метою запобігання виникненню пожежі.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто критерії оцінки стану електротехнічного обладнання. Показано, що вид технічного впливу залежить від індексу технічного стану та середньої різниці температур, отриманої під час тепловізійного обстеження, з урахуванням чинників, що впливають на достовірність результатів діагностики. Представлено розрахунки оцінки впливу факторів на показники надійності електротехнічного обладнання методом рангової кореляції.

Розглянуто типовий алгоритм тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання. Виконано аналіз організації системи тепловізійної діагностики електротехнічного устаткування під час технічного обслуговування, який дозволив скласти організаційну систему тепловізійної діагностики електротехнічного устаткування за функціями та функціональними підсистемами.

Визначено три функціональні підсистеми, спрямовані на підвищення ефективності технічного обслуговування та утворення стимулів для надання реальної інформації про стан електротехнічного обладнання.

На підставі аналізу системи прогнозування стану електротехнічного обладнання з метою визначення його залишкового ресурсу сформовано структурну схему прогнозування стану електротехнічного обладнання.

Проаналізовано структурну схему проведення тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання. Для складеної структурної схеми описано типовий алгоритм тепловізійної діагностики електротехнічного обладнання. Розглянуто приклади висновку про залишковий ресурс або небезпеку виявленого дефекту.

Розглянуто сучасне розуміння оцінки економічної ефективності залежно від вкладень капіталу для реалізації технічних заходів щодо мінімізації експлуатаційних витрат. Проведено структурний аналіз за видами економічних ефектів. Виявлено, що частка енерго-ресурсозберігаючого ефекту та організаційно-економічного практично близька до техніко- економічного

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бабюк, С. М., Клебан, К. М., & Танасійчук, В. В. (2021). Шляхи підвищення надійності електропостачання. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 5-6.
2. Оробчук, Б. Я., & Сирота, С. В. (2024). Дослідження міжфазних замикань в мережі з резистивним заземленням нейтралі. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 275-276.
3. 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.
4. Митражик, І. І., & Буняк, О. А. (2024). Підвищення надійності електропостачання підприємства АПК. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 56-56.
5. Буняк, О. А., & Голумбйовський, Р. Б. (2023). Підвищення надійності розподільних мереж 10-35 кВ. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 234-234.
6. Буняк, О. А., Поперечний, А. Б., & Оболонін, О. С. (2023). Забезпечення надійності роботи високовольтних трансформаторів напруги в розподільних мережах. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 235-235.
7. 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.

8. Буняк, О. А., & Миколишин, В. В. (2022). Забезпечення ефективності роботи електричного обладнання ТЕЦ. Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 76-76.
9. Буняк, О. А., & Борисюк, Я. В. (2018). Розробка заходів зниження втрат електроенергії трансформаторної підстанції. Збірник тез доповідей VII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 3, 6-6.
10. Колівошко, А. М., Соловко, Д. Ю., & Філюк, Я. О. (2023). Електрична мережа з розподіленими відновлювальними джерелами енергії. Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“, 262-262.
11. Іванунь, В. В., & Філюк, Я. О. (2024). Шляхи підвищення енергоефективності та надійності автомобільної світлотехніки. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції „Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи“, 99-99.
12. 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.
13. 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.