

ЛУТ М.Т., НАЛИВАЙКО В.А., РАДЬКО І.П.

ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ



КИЇВ – 2014

Лут М.Т., Наливайко В.А., Радько І.П.

ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Київ - 2014

УДК 621.316.925: 62-192 (075.8)
ББК 30.82
Л82

Рекомендовано Міністерством освіти, науки, молоді та спорту України, як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, що навчаються за напрямом підготовки «Енергетика та електротехнічні системи в агропромисловому комплексі»(лист № №1/11-6820 від 09.04.13)

Рецензенти: Мунтян В.В. – д.т.н., професор, завідувач кафедри електропостачання сільського господарства Таврійського державного агротехнологічного університету;

Мірошник О.В. – к.т.н., професор, завідувач кафедри електропостачання і енергоменеджменту Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П.М.Василенка;

Коробський В.В. – к.т.н., доцент кафедри електричних машин і експлуатації електрообладнання Національного університету біотехнологій і природокористування України

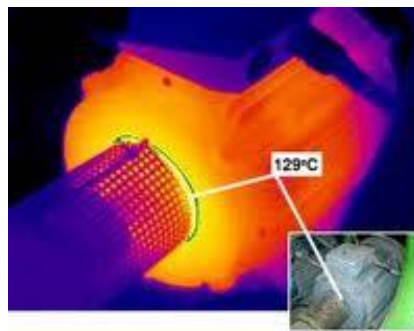
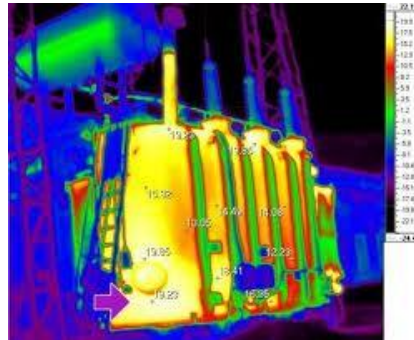
Лут М.Т., Наливайко В.А., Радько І.П.

Діагностування енергетичного обладнання: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – 2-е вид., перероб. і доп. К.: Вид – во ТОВ «Аграр Медіа Груп, 2014. – 590 с.

У навчальному посібнику викладено основні засади, описані технології і технічні засоби діагностування і контролю технічного стану енергетичного обладнання.

ISSBN 978-617-646-195-1 Лут М.Т., Наливайко В.А., Радько І.П.

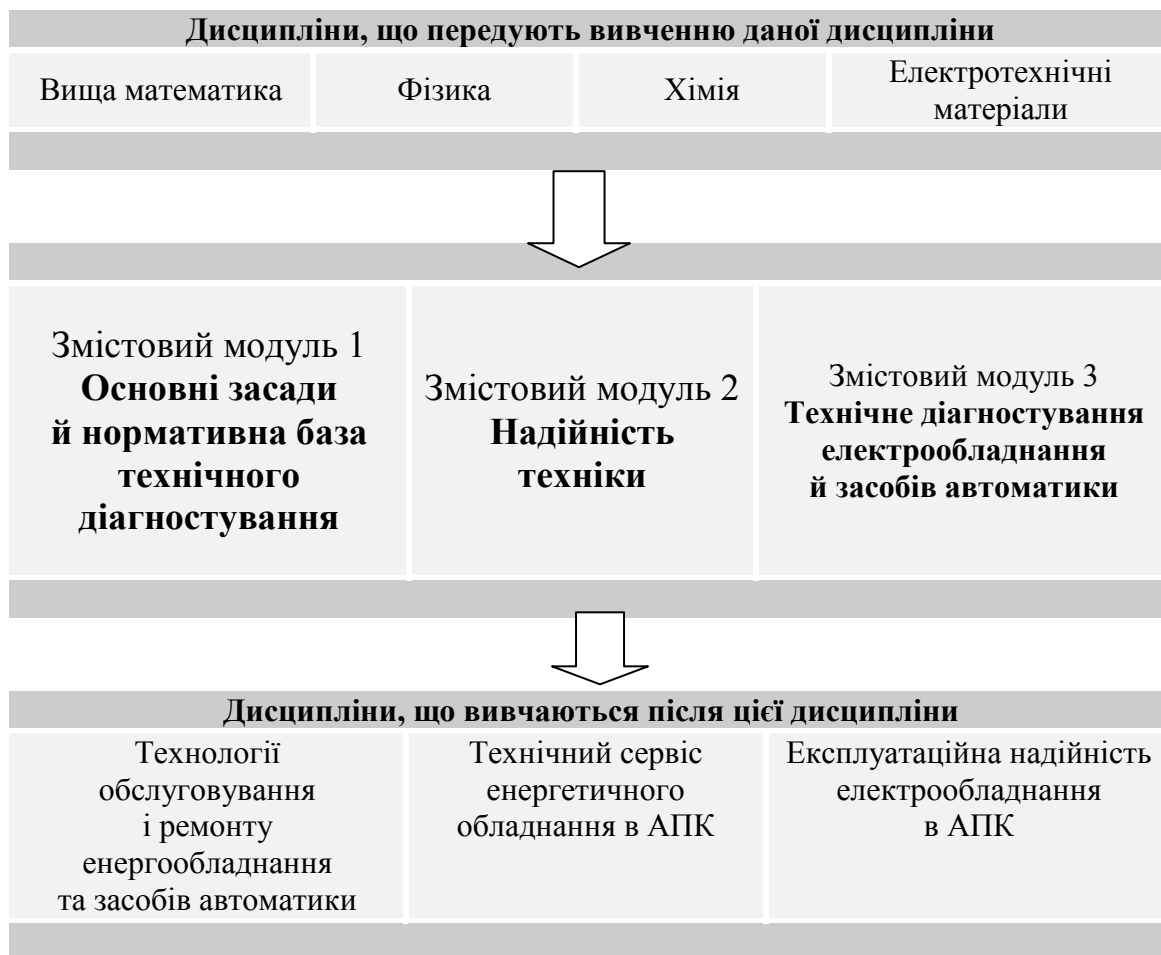
Технічне діагностування – визначення технічного стану об'єкта із заданою точністю



До завдань технічного діагностування відносяться:

- контроль технічного стану;
- пошук місця та визначення причин відмови або несправності;
- прогнозування технічного стану.

Структурно-логічна схема вивчення дисципліни
«ДІАГНОСТУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ»



ЗМІСТ

Вступ.....	10
Змістовий модуль 1. Основні засади і нормативна база технічного діагностування	11
1. ОСНОВНІ ЗАСАДИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ	12
1.1. Загальні положення.....	12
1.2. Завдання технічного діагностування.....	15
1.3. Концептуальні основи технічного діагностування.....	15
1.4. Прогнозування технічного стану об'єктів (систем)....	17
1.5. Ефективність технічного діагностування.....	23
Література.....	29
2. НОРМАТИВНА БАЗА ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ.....	30
2.1. Стандарти в галузі технічного діагностування.....	30
2.2. Діагностування технічного стану електроустановок за Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів.....	36
2.3. Технічне діагностування у системі ПЗР і ТО електрообладнання.....	38
2.4. Технічне діагностування під час експертизи електроустановок споживачів.....	39
Література.....	42
Додаток А.....	43
Додаток Б.....	44
Додаток В.....	45
3. ДАТЧИКИ ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ.....	58
3.1. Терміни та визначення стосовно датчиків.....	58
3.2. Класифікація датчиків.....	59
3.3. Фізичні основи дії, будова та характеристики датчиків.....	64
3.4. Вимоги до датчиків засобів технічного діагностування.....	84
Література.....	88
Змістовий модуль 2. Надійність техніки	90
1. НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІКИ.....	91
1.1. Загальні положення.....	91
1.2. Поняття, терміни та визначення в надійності	92
1.3. Стани, у яких може перебувати технічний об'єкт.....	95
1.4. Класифікація відмов технічних об'єктів.....	97

1.5.	Часові поняття у теорії надійності.....	100
1.6.	Технічне обслуговування і ремонт (термінологія).....	103
1.7.	Система показників надійності.....	104
1.8.	Нормування, забезпечення надійності й випробування на надійність.....	110
1.9.	Періоди роботи технічних об'єктів та заходи щодо їх забезпечення.....	112
1.10.	Фактори, що визначають надійність технічних об'єктів.....	114
1.11.	Резервування як спосіб забезпечення надійності технічних об'єктів.....	115
	Література.....	117
	Додаток А.....	120
	Додаток Б.....	121
	Додаток В.....	124
2.	СПРАЦЮВАННЯ, ПОШКОДЖЕННЯ І ДЕФЕКТИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.....	125
2.1.	Закономірності старіння ізоляції обмоток електричних машин і трансформаторів.....	125
2.2.	Механізм відмов підшипників електричних машин	136
2.3.	Дефекти та пошкодження апаратів керування і захисту.....	139
2.4.	Дефекти й пошкодження освітлювальних та опромінювальних пристроїв.....	140
2.5.	Дефекти й пошкодження електронагрівного обладнання.....	141
2.6.	Дефекти та пошкодження напівпровідникових приладів і мікросхем.....	142
2.7.	Пошук дефектів і пошкоджень технічних об'єктів.....	144
	Література.....	148
	Змістовий модуль 3. Технічне діагностування електрообладнання і засобів автоматики	149
1.	ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....	150
1.1.	Технічне діагностування силових трансформаторів.....	150
1.2.	Технічне діагностування комутаційних апаратів систем електропостачання.....	177
1.3.	Технічне діагностування ліній електропередавання.....	190
1.4.	Технічне діагностування розрядників та обмежувачів перенапруг.....	221
1.4.1.	Технічне діагностування вентильних розрядників...	221
1.4.2.	Діагностування обмежувачів перенапруг	224

1.4.3.	Тепловізійне обстеження обмежувачів перенапруг....	230
1.4.4.	Приладове забезпечення діагностування технічного стану розрядників та обмежувачів перенапруг	232
1.5.	Технічне діагностування заземлювальних пристроїв.....	234
1.6.	Діагностування технічного стану електрообладнання з використанням системи «Диагностика +».....	266
1.7.	Пересувні електротехнічні лабораторії для діагностування електрообладнання систем електропостачання.....	279
1.7.1.	Пересувна лабораторія для діагностування силових трансформаторів «МЕГА-СЕРИЯ-1».....	279
1.7.2.	Мобільна лабораторія для випробування і пошуку місць пошкоджень силових кабельних ліній «МЕГА-СЕРИЯ-2».....	282
1.7.3.	Пересувна лабораторія для діагностування високовольтних вимикачів та акумуляторних батарей « МЕГА-СЕРИЯ–3».....	289
1.7.4.	Пересувна лабораторія з повним оснащенням для діагностування електротехнічного устаткування і кабельних ліній «МЕГА-СЕРИЯ-4».....	290
1.7.5.	Мобільний діагностичний комплекс для діагностування трансформаторного масла.....	295
1.7.6.	Пересувна лабораторія для діагностування релейного захисту й автоматики «МЕГА-СЕРИЯ-5».....	296
1.7.7.	Мобільний діагностичний комплекс з повним оснащенням для контролю стану опор ліній електропередавання.....	298
	Література.....	299
2.	ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ.....	300
2.1.	Статистика та причини відмов асинхронних електродвигунів.....	300
2.2.	Обсяг і технології технічного діагностування асинхронних електродвигунів.....	305
2.3.	Прилад для діагностування обмоток електрообладнання ДО-1.....	312
2.4.	Автоматизована система захисту й діагностування асинхронних електродвигунів	315
2.5.	Мікроконтролерний блок захисту й діагностування агрегатів «електродвигун-механізм» МКЗид–0,4 кВ.....	319
2.6.	Обсяг і технології технічного діагностування занурювальних електродвигунів.....	322
	Література.....	328
	Додаток А.....	329
	Додаток Б.....	330

3.	ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ АПАРАТІВ КЕРУВАННЯ І ЗАХИСТУ.....	333
3.1.	Статистика та причини відмов апаратів керування і захисту.....	333
3.2.	Обсяг і технології технічного діагностування апаратів керування і захисту.....	334
3.3.	Тестовий контроль захисних апаратів.....	341
	Література.....	345
	Додаток А.....	346
4.	КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОНАГРІВНИХ ПРИСТРОЇВ, ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ ТА ОПРОМІНЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК.....	347
4.1.	Особливості експлуатації електронагрівного обладнання...	347
4.2.	Контроль технічного стану електрокалориферів.....	350
4.3.	Контроль технічного стану електроводонагрівників.....	351
4.4.	Особливості експлуатації освітлювальних та опромінювальних установок.....	352
4.5.	Контроль технічного стану освітлювальних та опромінювальних установок.....	356
4.6.	Стенд для перевірки люмінесцентних ламп і пускорегулювальних апаратів.....	361
	Література.....	362
5.	КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ ТА ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ	363
5.1.	Контроль технічного стану напівпровідникових діодів, тиристорів, симісторів.....	363
5.1.1.	Перевірка напівпровідникових діодів	363
5.1.2.	Перевірка диністорів.....	365
5.1.3.	Перевірка стабілітронів.....	366
5.1.4.	Перевірка тиристорів і симісторів.....	368
5.2.	Контроль технічного стану транзисторів.....	370
5.2.1.	Перевірка біполярних транзисторів.....	370
5.2.2.	Перевірка польових транзисторів.....	375
5.3.	Контроль технічного стану інтегральних мікросхем	382
5.3.1.	Тестування аналогових інтегральних мікросхем.....	382
5.3.2.	Тестування цифрових інтегральних мікросхем.....	384
5.4.	Спеціалізоване приладове забезпечення для тестування напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем...	394
	Література.....	403

6.	ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ДІАГНОСТУВАННЯ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ.....	404
6.1.	Особливості технічного діагностування засобів електронної техніки.....	404
6.2.	Діагностичні параметри засобів електронної техніки.....	406
6.3.	Діагностичні процедури для оцінки технічного стану засобів електронної техніки.....	409
6.4.	Структурно-функціональні моделі в діагностуванні засобів електронної техніки.....	411
6.5.	Труднощі та помилки під час діагностування засобів електронної техніки.....	414
6.6.	Автоматизована система діагностування електронних пристроїв «ТЕСТ-Д».....	417
	Література.....	441
7.	КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗАСОБІВ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ТЕХНІКИ.....	442
7.1.	Загальні засади застосування засобів інфрачервоної техніки в енергетиці.....	442
7.2.	Застосування пірометрів для контролю технічного стану енергетичного обладнання.....	444
7.3.	Застосування тепловізорів для контролю технічного стану енергетичного обладнання.....	483
7.3.1.	Принцип дії і будова тепловізорів.....	483
7.3.2.	Визначальні характеристики тепловізорів.....	489
7.3.3.	Особливості вибору тепловізорів.....	490
7.3.4.	Номенклатура тепловізорів.....	492
7.3.5.	Нормативні засади тепловізійного контролю технічного стану електрообладнання.....	538
7.3.6.	Об'єкти тепловізійного контролю в енергетиці.....	553
7.3.7.	Технології контролю технічного стану енергетичного обладнання із застосуванням тепловізорів.....	554
7.3.8.	Особливості тепловізійного контролю технічного стану контактних з'єднань.....	570
7.4.	Аналіз термограм електроустаткування.....	577
	Література.....	583
	Перелік стандартів України, СНД та Міжнародної електротехнічної комісії (ІЕС), використаних під час роботи над посібником.....	584
	Тестові завдання для контролю рівня засвоєння дисципліни.....	586

ВСТУП

Належна експлуатаційна надійність енергетичного обладнання забезпечується раціональною системою планово-запобіжного ремонту й технічного обслуговування, складовою частиною якої є діагностування технічного стану, що дозволяє своєчасно виявляти виникаючі дефекти й, усунувши їх в плановому порядку, запобігти аварійним пошкодженням та виходу з ладу обладнання.

Загалом система діагностування включає множину взаємозв'язаних елементів: комплекс контрольованих параметрів обладнання, комплекси методів і засобів контролю цих параметрів, а також методики оптимізації термінів діагностичних процедур.

Система планово-запобіжного ремонту й технічного обслуговування енергетичного (електротехнічного) обладнання, що розроблена для ряду галузей, включаючи сільське господарство, не враховує його реальний технічний стан, і часто вимагає виведення з експлуатації працездатного устаткування.

Більш ефективною є система обслуговування й ремонту за поточним станом, суть якої полягає в тому, що обслуговування й ремонт виконуються залежно від реального поточного технічного стану обладнання, контрольованого в процесі експлуатації без розбирань і ревізій, на базі контролю й аналізу відповідних параметрів. При цьому передбачається в процесі роботи енергетичного обладнання найбільшу увагу приділяти діагностуванню й вимірюванню його основних технічних параметрів, а виведення обладнання в ремонт здійснювати не за жорстко регламентованим графіком, що значно збільшує витрати на виконання ремонту, а лише тоді, коли технічні характеристики вийшли за нормально допустимі межі.

Система обслуговування й ремонту відповідно до поточного стану обладнання висуває додаткові вимоги щодо оснащення експлуатаційних служб підприємств сучасними засобами технічного діагностування електрообладнання, включаючи методи тепловізійного та віброакустичного контролю. Водночас за таких обставин набувають все більшої актуальності розвиток існуючих методів і засобів діагностування для отримання достовірної діагностичної інформації, а також розробка математичних моделей та алгоритмів оцінювання технічного стану енергетичного (електротехнічного) обладнання.

**Змістовий модуль 1.
Основні засади
й нормативна база
технічного діагностування**



1. ОСНОВНІ ЗАСАДИ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

1.1. Загальні положення

1.2. Завдання технічного діагностування

1.3. Концептуальні основи технічного діагностування

1.4. Прогнозування технічного стану об'єктів (систем)

1.5. Ефективність технічного діагностування

1.1. Загальні положення

Конструкційне ускладнення технічних об'єктів (систем) і широке впровадження автоматизації технологічних процесів надають все більшої актуальності питанням їх технічної експлуатації. При цьому значну увагу зосереджують на визначенні стану об'єктів, який з часом внаслідок впливу зовнішніх та внутрішніх факторів зазнає змін.

Маючи достовірну поточну інформацію щодо стану об'єкта, можна досягти доволі високої ефективності його використання, наближеної до оптимуму. Водночас, знаючи характер та момент настання змін всередині об'єкта, можна запобігти виходу його з ладу шляхом ремонту. Обидва вказані фактори разом суттєво підвищують впевненість виробничого персоналу в правильності своїх дій і рішень.

Встановленням та вивченням ознак, що характеризують стан технічних об'єктів (систем) з метою передбачення можливих відхилень їх параметрів, зокрема за межі допуску із виникненням відмов, займається окрема наука технічна діагностика¹.

Технічна діагностика як наука склалася порівняно недавно. В історії її становлення можна виділити три етапи:

- *перший* – створення перших машин, коли обслуговуючий їх персонал, орієнтуючись тільки на свої відчуття, перш за все слухові й зорові, став виявляти дефекти й відхилення в роботі машин. Точність діагнозу визначалася виключно досвідом обслуговуючого персоналу;

- *другий* почався з моменту появи перших вимірювальних приладів, характеристики яких стали перевищувати можливості органів чуття людини. Вартість цих приладів спочатку була достатньо високою, тому широкого впровадження вони не отримали. Найбільш глибокі дослідження в той період проводилися за замовленнями військової промисловості. Пік цих досліджень у колишньому СРСР припадає на 1970–80^{-і} роки. На цьому етапі сформувалися дві складові

¹**Технічна діагностика** – це розробка методів та засобів експериментального визначення стану технічних об'єктів (систем) з метою своєчасного запобігання виникненню порушень нормального режиму роботи.

діагностичного обслуговування машин: вимірювання параметрів машин та інтерпретація їх експертом;

- *третій* етап розпочався в 90^{-і} роки, характеризується широким розповсюдженням мікропроцесорної техніки та, як наслідок, зниженням вартості й розширенням можливостей вимірювального устаткування. Саме на цьому етапі з'явилася реальна можливість відмовитися від послуг експерта, замінивши його комп'ютерними програмами.

Аналізуючи історію розвитку діагностування, можна відзначити тенденції для кожного етапу:

- на першому етапі людина (оператор) сумішала в собі функції як вимірника, так і експерта;

- на другому етапі намітилося розмежування: функції вимірювання стали виконувати із застосуванням технічних засобів, а їх трактування виконували люди (експерти) з різним ступенем підготовки;

- третьому етапу властиве підвищення ступеня автоматизації діагностичних робіт, коли не тільки вимірювання, але і їх трактування доручені технічним засобам. Звичайно, такі системи сьогодні будуються так, щоб людина (експерт) у будь-який час могла узяти управління системою на себе. Найважливішою частиною підготовки такого експерта є освоєння фізичних основ діагностики та її математичного апарату.

Технічна діагностика як напрям науки й техніки знаходиться на стику багатьох галузей знань. Для грамотної експлуатації систем діагностування необхідно мати знання й практичні навички в таких галузях:

- *теорії машин і механізмів* – для можливості опису роботи об'єкта й вибору основних діагностичних ознак під час його роботи;

- *теорії сигналів і теорії інформації*, щоб отримати максимум інформації за мінімуму вимірювань;

- *теорії й техніки вимірювань та аналізу сигналів*, щоб оптимізувати якість діагностичних вимірювань;

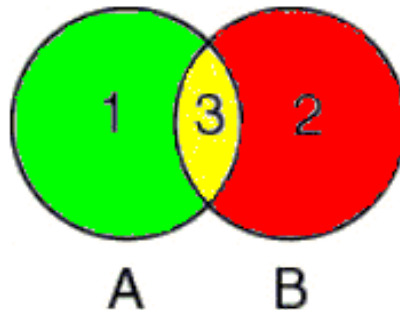
- *методів автоматизації процесів* – для автоматизації вимірювань, аналізу й складання звітної документації;

- *комп'ютерної техніки й операційних систем* – для ефективної експлуатації сучасних технічних засобів діагностування.

Орієнтація на вивчення методів, що визначають *реальний стан* технічних об'єктів (систем) принципово відрізняє *технічну діагностику* від *теорії надійності*, яка займається вивченням та використанням у розрахунках імовірнісних і статистичних показників надійності, що характеризують технічні об'єкти. Проте дані й

математичний апарат теорії ймовірності досить часто знаходять використання під час технічного діагностування.

Технічна діагностика містить припущення, що об'єкт (система) може перебувати в конечній множині станів n [1], яка складається із двох підмножин 1 та 2 (рис. 1.1).



Колу А відповідає підмножина працездатних об'єктів (систем), колу В – підмножина несправних об'єктів (систем), область 1 відображає підмножину справних об'єктів, область 2 – підмножину об'єктів, що відмовили, а область 3 – несправних, але працездатних об'єктів (систем).

Рис.1.1. Підмножини станів технічного об'єкта (системи)

Перша підмножина 1 об'єднує всі стани працездатності технічного об'єкта (системи), що відрізняються один від одного певним її запасом. Перехід всередині підмножини 1 із одного до іншого стану може бути пов'язаний із виникненням несправностей об'єкта, які не призводять до втрати працездатності.

Підмножина станів 2 включає всі стани, які відповідають виникненню відмов технічного об'єкта, що спричиняють втрату ним працездатності.

Наведена класифікація станів об'єкта дає можливість розділити процес діагностування на два етапи:

- 1) визначення працездатності об'єкта й прогнозування його стану;
- 2) виявлення відмови об'єкта (стосується ремонтпридатних об'єктів, а для не ремонтваних проводиться лише контроль працездатності).

Загалом визначення стану технічного об'єкта під час діагностування пов'язане із контролем його параметрів і характеристик (залежностей одного параметра від іншого чи зміни параметра в часі) та з оцінкою якості функціонування об'єкта.

1.2. Завдання технічного діагностування

Широке коло завдань технічного діагностування прийнято розділяти на дві групи:

- 1) ретельний аналіз технічного об'єкта (системи) й вибір методів перевірки для встановлення його реального стану;
- 2) створення технічних засобів для здійснення перевірок та їх практичне використання в процесі експлуатації технічних об'єктів (систем).

Стосовно засобів оцінки технічного стану об'єктів (систем) можна виділити такі три типи завдань:

- контроль вимірюваних параметрів;
- ідентифікація несправності об'єктів (систем);
- прогноз зміни їх технічного стану.

Під час контролю об'єктів (систем), як правило, достатньо інформації про величини вимірюваних параметрів і зони їх допустимих відхилень. Досконалішою мірою контролю є моніторинг контрольованих параметрів, для якого необхідна додаткова інформація про тенденції зміни в часі вимірюваних параметрів.

За ідентифікації несправностей об'єктів (систем) потрібен ще більший об'єм інформації та її аналізу, адже необхідно визначити місце виникнення дефекту й оцінити ступінь його розвитку.

Найбільш складним завданням є прогноз зміни технічного стану, що дозволяє визначити залишковий ресурс або період безаварійної роботи.

Нині під терміном «моніторинг технічного стану» розуміється комплекс процедур оцінки стану об'єктів (систем):

- захист від раптових пошкоджень;
- попередження про зміну технічного стану;
- виявлення дефектів на ранніх стадіях (дефектів, що зароджуються), визначення місця їх появи, вигляду й ступеня розвитку;
- прогноз зміни технічного стану устаткування.

1.3. Концептуальні основи технічного діагностування

Суть технічного діагностування складають оцінка й прогноз технічного стану об'єкта за результатами прямих або непрямих вимірювань параметрів стану (діагностичних параметрів). Слід зазначити, що одне лише значення діагностичного параметра не дає змогу оцінити технічний стан об'єкта. При цьому необхідно знати не лише фактичні, але й відповідні їм еталонні значення параметрів.

Різниця між фактичним ($A_{факт}$) та еталонним ($A_{етал}$) значеннями діагностичних параметрів називається діагностичним симптомом (Δ):

$$\Delta = A_{факт} - A_{етал}. \quad (1.1)$$

Таким чином, оцінка технічного стану об'єкта визначається відхиленням фактичних значень його параметрів від їх еталонних значень. Будь-яка система технічного діагностування працює за принципом відхилень (принцип Солсбері). Ступінь достовірності та якості діагнозу визначається похибкою, з якою оцінюється величина діагностичного симптому. Узагальнений алгоритм технічного діагностування наведений на рис. 1.2.

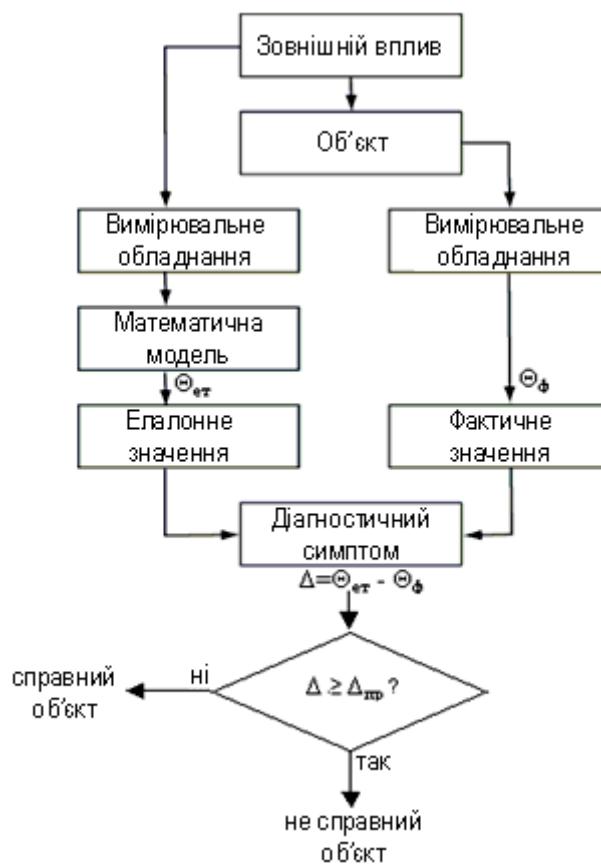


Рис. 1.2. Узагальнений алгоритм технічного діагностування

Еталонне значення діагностичного параметра вказує, яку величину матиме справний, добре відрегульований технічний об'єкт, що працює за такого ж навантаження й за таких же зовнішніх умов.

Зображена на рис. 1.2 математична модель об'єкта діагностування являє набір формул, за якими розраховуються еталонні значення всіх діагностичних параметрів. Кожна формула повинна враховувати умови навантаження об'єкта й найбільш істотні параметри зовнішнього середовища. Засоби вимірювальної техніки в

більшості випадків використовуються не лише для вимірювання діагностичного сигналу, але й для оцінювання зовнішніх дій.

Застосування методів і засобів технічного діагностування дозволяє вирішити ряд економічних і соціальних завдань у виробничій діяльності людини, а саме:

- знизити експлуатаційні витрати за рахунок зменшення трудомісткості й тривалості ремонту устаткування;
- запобігти виникненню аварій завдяки своєчасному виявленню дефектів;
- підвищити довговічність технічних об'єктів (систем) шляхом усунення дефектів на ранніх стадіях їх появи;
- зменшити кількість обслуговуючого персоналу;
- підвищити продуктивність праці;
- оптимізувати кількість запасних частин за рахунок прогнозування відмов.

1.4. Прогнозування технічного стану виробів

Прогнозування технічного стану може здійснюватися як у процесі розробки (конструювання) виробів, так і під час експлуатації. Воно має на меті передбачення технічних параметрів чи віднесення їх до певного класу й визначення ймовірності виходу цих параметрів за межі допустимих значень (настання відмов). А також це допоможе вирішити задачу *прогнозування надійності виробу* – передбачення кількісних показників надійності на основі прогнозування поступових і раптових відмов. Оцінка надійності стає прогнозуючою, коли на основі аналізу фізичних процесів, вивчення закономірностей, яким підпорядковані показники надійності, робиться висновок щодо очікуваного рівня надійності виробу.

На основі прогнозування технічного стану виробу в умовах експлуатації розробляються *напрямки підвищення його надійності*.

Серед *узагальнених принципів отримання достовірного прогнозу технічного стану об'єкта* слід назвати такі:

- прогнозування стану об'єкта спрямовується на одержання величини контрольованого параметру, що визначає стан чи ресурс, із дотриманням відомої розмірності;
- результат прогнозу визначається як імовірність виходу (чи невиходу) характеристик контрольованого параметра за визначені межі;
- за результатами прогнозування об'єкт має бути віднесений до того чи іншого класу наперед охарактеризованих процесів (об'єктів) за критерієм працездатності чи довговічності.

Можливість отримання прогнозу з певною достовірністю обумовлено тим, що *відмови виробу настають внаслідок поступового накопичення його пошкоджень, старіння та зношування*. Слід зазначити, що це стосується як поступових, так і раптових відмов, які виникають після поступової зміни в бік погіршення одного чи кількох параметрів виробу за відсутності належної інформації.

Застосування методів прогнозування в період експлуатації технічних об'єктів дозволяє:

- обґрунтувати терміни проведення профілактичних заходів, щоб запобігти відмові у прогнозований час;
- оптимізувати програму пошуку та локалізації несправностей;
- зменшити кількість обслуговуючого персоналу шляхом автоматизації процесу діагностування та прогнозування стану (ресурсу);
- визначити потребу в запасних частинах, одержавши інформацію про вузли чи блоки, вихід з ладу яких очікується найближчим часом;
- скоротити час відновлення шляхом виявлення найбільш ушкоджених блоків та підготовки для їх заміни запасних частин і матеріалів.

Прогнозування базується на використанні минулого досвіду експлуатації виробу, а накопичена інформація є головним фактором отримання прогнозу на майбутнє. Інформація дає можливість визначитися з *вибором моделі виробу – детермінованої чи стохастичної*².

Обчисленню прогнозованих параметрів виробу має передувати експеримент, результати якого розглядаються разом із інформацією з досвіду експлуатації.

Прогнозування може бути:

- *груповим*, коли вивчається група виробів;
- *індивідуальним*, коли в межах встановленого проміжку часу спостерігається зміна параметрів одного виробу із їх сукупності.

У процесі групового прогнозування одержують статистичну оцінку строку служби однотипних виробів на основі результатів випробувань.

Під час індивідуального прогнозування визначають надійність чи технічний стан кожного конкретного виробу.

²Детермінована модель виробу – така, в якій наступний стан його визначається попереднім. Стохастична модель виробу базується на теорії випадкових процесів і теорії ймовірності.

Задача прогнозування розв'язується за двома підходами – детермінованим та стохастичним.

Детермінований підхід полягає в пошуку апроксимуючої залежності, для чого використовують інтерполяційні поліноми – Лагранжа, Ньютона, тригонометричні поліноми та метод найменших квадратів. Указані методи є досить ефективними за наявності гіпотези про детермінований характер залежності й досить точного математичного виразу для цієї залежності. Сфера застосування детермінованого підходу обмежується із збільшенням інтервалу прогнозу, оскільки при цьому спостерігається різке зниження його точності за практичної неможливості визначити помилку.

Більш поширеним є *стохастичний підхід* – побудова стохастичної моделі виробу, що враховує випадковий характер змін, які в ньому відбуваються. При цьому в якості прогнозованої характеристики приймається зміна випадкової величини протягом часу від моменту початку контролю до моменту першого перетину поля допуску. Цей підхід дає умовну випадкову величину, імовірнісний опис якої є характеристикою прогнозованої якості виробу.

Унаслідок випадкового характеру процесу зміни обраного параметру (характеристики) в принципі можна отримати лише наближений розв'язок задачі.

Прогнозування може бути розділене на кілька етапів:

- 1) розробка (побудова) моделі досліджуваного процесу (виробу) та формування її математичного опису;
- 2) отримання даних контролю й використання їх для вивчення досліджуваного об'єкта чи процесу (побудова апостеріорного³ процесу);
- 3) визначення необхідних характеристик об'єкта (процесу).

Прогнозування може також здійснюватися за *методом розпізнавання образів*. У цьому випадку група виробів розбивається на кілька класів, між якими встановлюються чіткі межі. Процес створення образу складається із трьох етапів – «навчання», створення образу категорії та екзамену. Розпізнавання образу полягає у віднесенні його до одного із раніше виділених класів на підставі близькості його ознак до ознак певного класу. Індивідуальне прогнозування надійності методом розпізнавання образів зводиться до віднесення конкретного виробу на підставі критеріїв працездатності

³**Апостеріорний** (від лат. a posteriarі – із наступного) – отриманий із досвіду

до того чи іншого класу, для якого *апріорно*⁴ відомі показники надійності чи технічні характеристики.

Проблема прогнозування стану чи ресурсу на різних стадіях існування технічного об'єкта є комплексною й має значний *технічний* і *економічний ефект*. З іншого боку зазначена проблема має *різноманітні аспекти* – *філософський, фізичний, математичний* тощо, що різнопланово її характеризують та створюють певні передумови для успішного вирішення.

Філософський аспект. Прогнозування розглядається як *наукове передбачення* – екстраполяція (перенесення) відомих законів, матеріальних умов, типів взаємодії на певну сферу явищ, недоступних з якихось причин експериментальному дослідженню.

Слід вказати на існування трьох основних груп законів:

1) *специфічні закони*, що виражають відношення між конкретними властивостями матерії (сюди можна віднести багато законів фізики, хімії біології та інших наук, які виражають порядок стійких зв'язків між конкретними властивостями матеріальних тіл);

2) *загальні закони*, що характеризують великі групи якісно різнорідних явищ (це, скажімо, закони збереження енергії, маси, електричного розряду та інших загальних властивостей);

3) *універсальні закони*, що діють в усіх сферах матеріального світу (до цієї групи відносять закони причинності, єдності й боротьби протилежностей, переходу кількісних змін у якісні та ін.).

Точність передбачення залежить від того, який саме закон розглядається, наскільки повно та правильно він вивчений і чи достатньо враховані конкретні умови.

Слід також постійно мати на увазі існуючий взаємозв'язок законів. Скажімо із закону переходу кількісних змін у якісні випливає незворотність того, що врешті решт зазначений перехід настає для кожного технічного об'єкта чи виробу. Однак коли і в якій формі це станеться, можна певною мірою з'ясувати шляхом аналізу масиву додаткової інформації про характер явища, що перебуває в розвитку, його зовнішні умови, межі існування цієї якості. Поряд з цим результат прогнозування як передбачення залежить від того, проста чи складна система обрана для розгляду, підпорядковується вона закону розвитку, що однозначно детермінує її стан, чи ймовірнісному?

Фізичний аспект. Із початком експлуатації технічного об'єкта розпочинається процес поступової його деградації й відповідно зниження працездатності. Аналіз цього процесу можна зробити для кожного конкретного технічного об'єкта та його складових з

⁴ **Апріорно** (від лат. a priori – із попереднього) – знання, отримане до й незалежно від досвіду.

урахуванням умов експлуатації й режимів роботи. Однак конкретні механізми втрати працездатності визначаються загальними фізико-хімічними процесами змін структури, властивостей та параметрів елементів об'єкта. До того ж закономірності, що характеризують ці процеси, можуть бути власне *моделями відмов* чи основою загальних фізичних моделей виникнення й розвитку відмов.

Серед найбільш загальних фізико-хімічних процесів, що можуть спричинити втрату об'єктом працездатності, можна вказати такі⁵:

- дифузійні процеси в об'ємі та на поверхні твердих тіл;
- переміщення та накопичення точкових дефектів у кристалічних твердих тілах;
- флуктуаційні розриви міжатомних зв'язків у металах і сплавах;
- розриви хімічних зв'язків ланцюгів макромолекул полімерних матеріалів;
- сорбційні процеси;
- електролітичні процеси;
- дія поверхнево-активних речовин;
- сублимація⁶ матеріалів, зокрема випаровування металів чи сплавів у каналі електричної дуги;
- структурні перетворення в сплавах неметалів.

Фізичними моделями виникнення й розвитку відмов технічних об'єктів можуть бути:

- деформація й механічне руйнування конструкційних та електротехнічних матеріалів;
- електрична ерозія контактів комутаційних апаратів;
- зниження електричної міцності й пробій діелектриків;
- теплове руйнування матеріалів (згорання, плавлення тощо);
- електрохімічна корозія;
- радіаційне руйнування;
- зношування поверхонь деталей, зокрема контактів;
- зчеплення поверхонь деталей, що перебувають у дотику;
- засмічування поверхні й матеріалів елементів.

Прогнозування стану технічного об'єкта є тим складнішим, чим більше фізико-хімічних процесів є причиною його деградації, оскільки значно ускладнюється характер зміни працездатності.

⁵ Моламедов И.М. Физические основы надежности / И.М. Моламедов. – Л. : Энергия, 1970.- 152 с.

⁶ **Сублимація** – безпосередній перехід речовини із твердого до газоподібного стану, минаючи рідку фазу. Можлива за значень температури й тиску менших, ніж ті, що відповідають точці рівноваги усіх фаз речовини.

Одержання достовірного прогнозу все ж можливе завдяки наявності досить чіткого комплексу знань у галузі фізики відмов.

Математичний аспект. Успіх у прогнозуванні насамперед залежить від правильності формулювання та постановки задачі. Для цього слід чітко знати принципи (методи) її вирішення, зв'язок задачі із положеннями теорії прогнозування, а також вміти вибирати найбільш доцільний *математичний апарат*.

Мова йде про *математичний апарат прогнозування*, що включає:

- чисельний аналіз (теорія рядів, теорія наближення функцій);
- теорію ймовірностей;
- теорію випадкових функцій;
- математичну статистику.

Серед узагальнених принципів отримання достовірного прогнозу технічного стану об'єкта слід назвати такі:

- прогнозування стану об'єкта спрямовується на одержання величини контрольованого параметру, що визначає стан чи ресурс, із дотриманням відомої розмірності;
- результат прогнозу визначається як імовірність виходу (чи невиходу) характеристик контрольованого параметра за визначені межі;
- за результатами прогнозування об'єкт має бути віднесений до того чи іншого класу наперед охарактеризованих процесів (об'єктів) за критерієм працездатності чи довговічності.

*Евристичний аспект*⁷. Цей аспект є важливим щодо прогнозування, оскільки воно носить багато в чому прикладний характер. Зміну працездатності конкретного об'єкта спричиняють зміни його параметрів за певними й достатньо визначеними закономірностями, які діють і для партій об'єктів, що є однією із передумов ефективного прогнозування технічного стану об'єкта.

Безумовно, що в кожному конкретному випадку підхід до прогнозування буде принципово відрізнятися, об'єднуючи групу методів, що ґрунтуються на одному математичному апараті.

⁷**Евристика** – 1) наука, що вивчає продуктивне творче мислення; 2) спеціальні методи, що використовуються в процесі відкриття нового.

1.5. Ефективність технічного діагностування

Технічне діагностування, що пов'язане із значними матеріальними затратами на різних його стадіях, є доцільним лише за умови високого рівня ефективності⁸, оцінити який можна за певним *критерієм* (критеріями). Слід зауважити, що вибір того чи іншого критерію є справою складною, оскільки потребує одночасного врахування цілого ряду факторів – якості функціонування комплексу діагностичної апаратури, рівня кваліфікації оператора, техніко-економічних показників.

Зазвичай до критеріїв оцінки ефективності діагностування висуваються такі основні вимоги:

- обов'язкове врахування технічних показників об'єкта й засобів діагностування;
- можливість порівняння різних діагностичних засобів з метою визначення шляхів їх вдосконалення;
- відносна простота інженерних розрахунків.

Вплив усіх складових діагностичного комплексу (технічного об'єкта, діагностичних засобів, оператора) враховує *узагальнений критерій ефективності діагностування* – ймовірність $P_{ef.diag.}$ нормального функціонування об'єкта

$$P_{ef.diag.} = W_D \cdot P_1, \quad (1.2)$$

де W_D – ймовірність правильного визначення стану об'єкта діагностування; P_1 – ймовірність відсутності несправностей у неконтрольованій частині об'єкта діагностування протягом часу T_1 . У свою чергу

$$W_D = V_1 \cdot V_2, \quad (1.3)$$

де V_1 – ймовірність правильної оцінки стану об'єкта, що визначається засобами діагностування; V_2 – ймовірність правильної оцінки стану об'єкта, що визначається діяльністю оператора.

З іншого боку

$$V_1 = P_{diag} \cdot P_{зд}, \quad (1.4)$$

⁸Див. також тему 2 «Нормативна база технічного діагностування. 2.1 Стандарти в галузі технічного діагностування»

де P_{diag} – достовірність результату діагностування; $P_{зд}$ – ймовірність правильного функціонування діагностичних засобів у період контролю стану об'єкта.

Достовірність результатів діагностування

$$P_{diag} = D_{метод} \cdot D_{інструм}, \quad (1.5)$$

де $D_{метод}$ та $D_{інструм}$ – відповідно методична та інструментальна достовірності діагностування.

Методичну достовірність, що визначає повноту вихідної інформації про стан діагностованого об'єкта, слід розглядати через її складові:

$$D_{метод} = F_{алг} \cdot F_{метод}, \quad (1.6)$$

де $F_{алг}$ – достовірність алгоритму діагностування; $F_{метод}$ – достовірність методу діагностування.

Під час визначення величини $F_{алг}$ враховуються цінність отриманої під час діагностування за обраним алгоритмом інформації про стан об'єкта (група показників) та можливості реалізації алгоритму. Достовірність методу $D_{метод}$ може бути розрахована за відомими із теорії вимірювань формулами для оцінки похибок методу вимірювань.

Інструментальна достовірність ($D_{інструм}$) є величиною ймовірності правильного висновку щодо стану технічного об'єкта із припущенням, що засоби діагностування є абсолютно надійними.

У разі контролю n показників технічного об'єкта

$$D_{інструм} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - d_{2i}), \quad (1.7)$$

де d_{2i} – ймовірність правильного висновку за i -м показником.

Якщо $d_{2i} = d_2$, $i = 1, 2, \dots, n$, то

$$D_{інструм} = 1 - (1 - d_2)^n. \quad (1.8)$$

Можливим є також оцінювання інструментальної достовірності за величиною ймовірності помилкового висновку про наявність несправності технічного об'єкта.

Ймовірність правильного функціонування засобів діагностування ($P_{зд}$) визначається показниками їх надійності, зокрема показниками безвідмовності та комплексним показником – коефіцієнтом готовності. Розрахунок ймовірності правильного

функціонування діагностичних засобів $P_{зд}$ у формулі (1.4) може бути різним залежно від умов діагностування. При цьому засоби діагностування можуть розглядатися як *об'єкти безперервної дії* (технологічні процеси, бортове обладнання транспортних засобів, мобільної сільськогосподарської техніки тощо) або ж як *об'єкти періодичної дії* (приміром діагностування пересувних об'єктів перед використанням).

У разі використання діагностичних засобів як *об'єктів безперервної дії* величина $P_{зд}$ є *ймовірністю безвідмовної роботи* й може бути розрахована залежно від закону розподілу відмов у часі – експоненціального, Релея, Вейбулла та ін.:

$$P_{зд} = e^{-\lambda t} ;$$

$$P_{зд} = e^{-t^2 2\sigma^2} ;$$

$$P_{зд} = e^{-\lambda_0 t^k} .$$

Якщо засоби діагностування розглядаються як *об'єкти періодичної дії*, то величина $P_{зд}$ може бути розрахована через коефіцієнт готовності:

$$k_{гот} = \frac{T}{T + \tau_г} , \quad (1.9)$$

де T і $\tau_г$ – відповідно середні величини часу наробітку об'єкта на відмову та часу відновлення після відмови.

Тоді в найпростішому випадку, коли інтенсивності відмов і відновлення об'єкта є постійними,

$$P_{зд} = k_{гот} + (1 - k_{гот}) e^{-t / (k_{гот} t_{відмові})} . \quad (1.10)$$

Коли в засобах діагностування (їх комплексі) здійснене *резервування*, величина $P_{зд}$ може бути визначена із припущенням, що всі засоби (резервні й основні) є рівно надійними, а їх відмови є подіями незалежними за формулою

$$P_{зд} = 1 - (1 - P_{здо})^{m+1} , \quad (1.11)$$

де $P_{здо}$ – ймовірність безвідмовної роботи нерезервованих діагностичних засобів; m – кратність резервування.

Кількість показників та їх значення залежать від специфіки комплексу діагностичних засобів, однак застосування узагальненого критерію дозволяє в чіткій послідовності (рис. 1.3) оцінити

ефективність діагностування переважної більшості технічних об'єктів.

Окремого розгляду заслуговують *питання впливу діяльності оператора* в складі комплексу діагностичного забезпечення на ефективність діагностування. На стадії проектування (конструювання) діагностичної апаратури, що реалізує певний метод діагностування, підлягають вирішенню такі задачі:

- раціональний розподіл функцій між людиною-оператором і технічними засобами;
- визначення оптимальних умов діяльності оператора;
- раціональне інформаційне забезпечення оператора;
- встановлення вимог до технічних засобів діагностування з боку оператора (ергономічні вимоги, вимоги безпеки тощо).

Вирішити зазначені питання можна після ретельного аналізу надійності та ефективності діяльності оператора під час діагностування. З цією метою необхідно:

- встановити характерні показники оператора, що визначають надійність та ефективність його участі в процесі діагностування;
- визначити фактори, що впливають на показники надійності та ефективності роботи оператора;
- з'ясувати динаміку зміни показників надійності та ефективності роботи оператора під час діагностування;
- визначити ефективність роботи оператора в складних та екстремальних умовах.

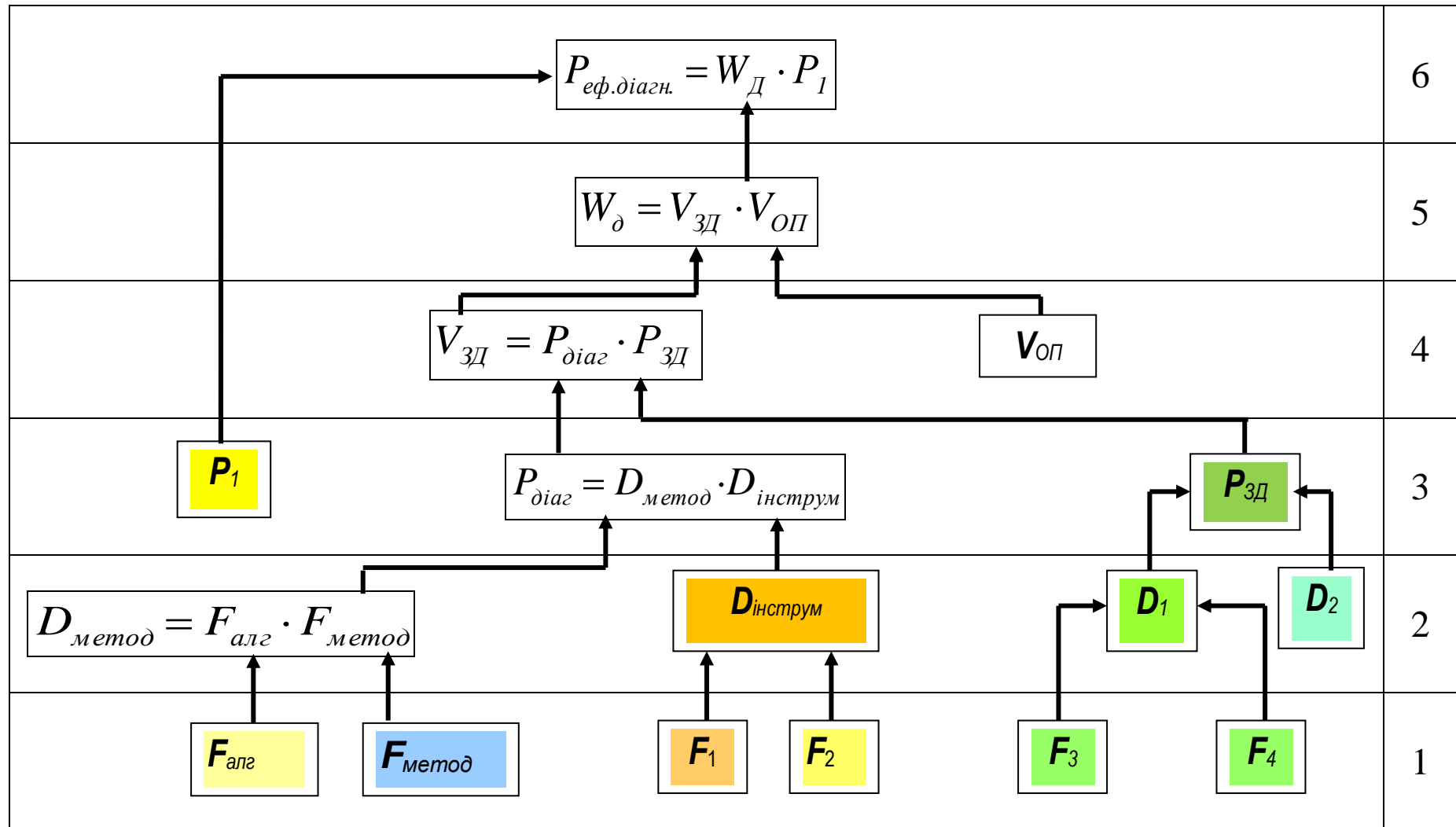


Рис. 1.3. Послідовність поетапного (1 ... 6) визначення узагальненого критерію ефективності технічного діагностування

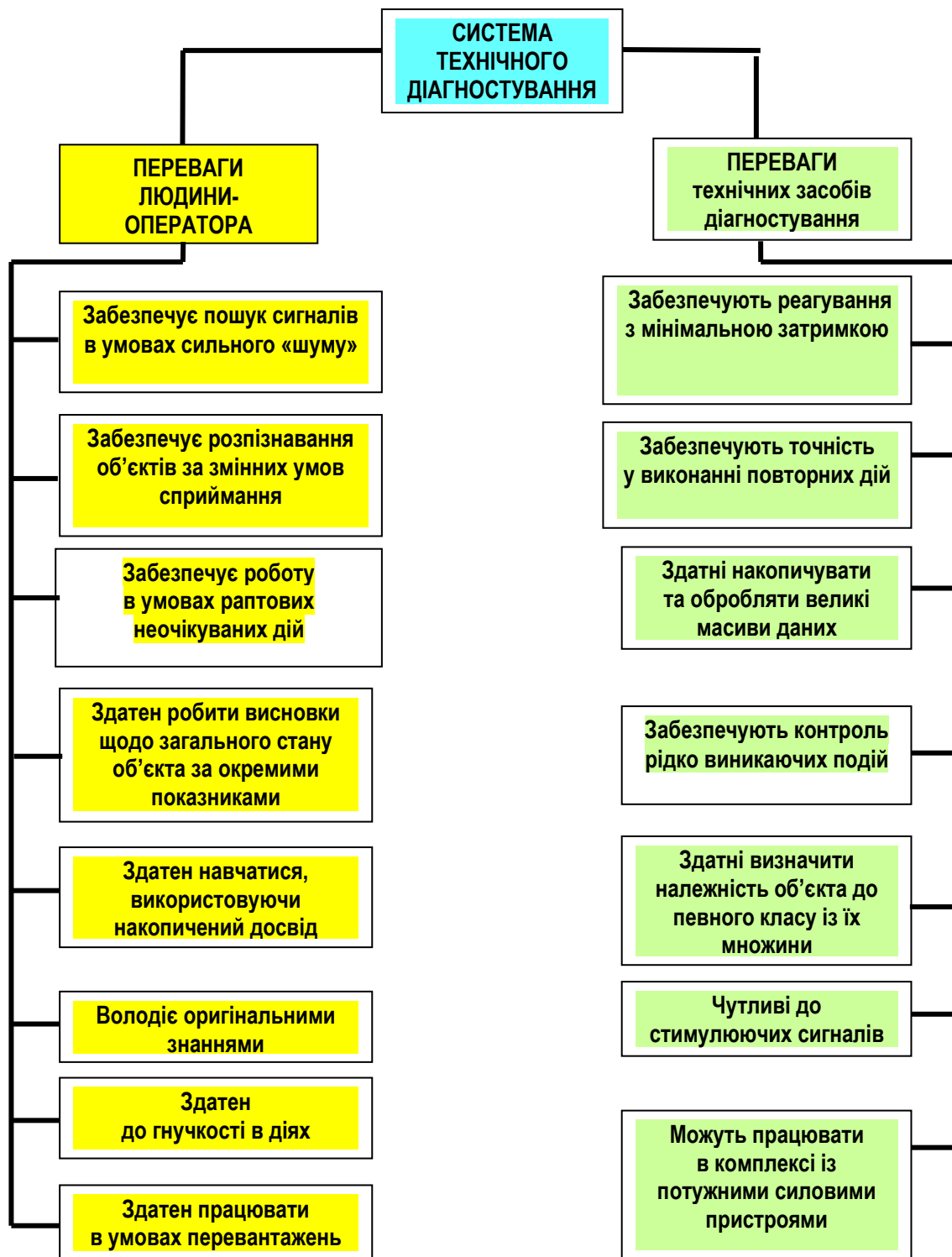


Рис. 1.4. Порівняння переваг людини-оператора й технічних засобів діагностування

Такий аналіз можна віднести до складу інженерно-психологічних проблем із сфери досліджень систем «людина – машина». Доречно зауважити, що функції оператора загалом зводяться до вмикання (вимикання) діагностичних засобів, їх настроювання, спостереження за показами приладів та фіксації отриманих результатів. У разі необхідності оператор може керувати процесом діагностування, вибираючи певні його режими.

Заслуговує на увагу, хоч і носить емпіричний характер, порівняння переваг технічних засобів і людини-оператора під час виконання різних дій у момент діагностування (рис. 1.4).

Кількісна оцінка надійності оператора визначається на основі аналізу експлуатаційних режимів комплексу діагностичних засобів (робочий, аварійний тощо), уточнення завдань оператора стосовно кожного із режимів, алгоритмізації їх в описовій і математичній формі, призначення кожній оперативній одиниці комплексу кількісних значень її показників, розрахунку таких показників для функціональних одиниць. Отримані числові дані є достатніми для розрахунку кількісного значення ймовірності виконання оператором свого завдання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мозгалевский А. В. Техническая диагностика (непрерывные объекты) : учеб. пособие для вузов / А. В. Мозгалевский, Д. В. Гаскаров. – М. : Высшая школа, 1975. – 207 с.
2. Мозгалевский А. В. Вопросы проектирования систем диагностирования / А. В. Мозгалевский, А. Н. Кайда. – Л. : Энергоатомиздат: Ленингр. отд-ние, 1985. – 112 с.
3. Электронные промышленные устройства : учеб. для студ. вузов спец. «Пром. электроника» / В. И. Васильев, Ю. М. Гучев, В. Н. Миронов и др. – М. : Высшая школа, 1988. – 112 с.
4. Григорьев В. И. Приборы и средства диагностики электрооборудования и измерений в системах электроснабжения : справ. пособие / В. И. Григорьев. – М. : Колос, 2006. – 272 с.

2. НОРМАТИВНА БАЗА ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

2.1. Стандарти в галузі технічного діагностування

2.2. Діагностування технічного стану електроустановок за Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів

2.3. Технічне діагностування в системі ПЗР і ТО електрообладнання

2.4. Технічне діагностування під час експертизи електроустановок споживачів

2.1. Стандарти в галузі технічного діагностування

Терміни та основні поняття в галузі технічного діагностування й контролю технічного стану об'єктів встановлені стандартом⁹, зокрема встановлюються ряд загальних понять, наведених нижче.

Технічне діагностування¹⁰ – визначення технічного стану об'єкта із заданою точністю; до завдань технічного діагностування відносяться:

- контроль технічного стану;
- пошук місця та визначення причин відмови або несправності;
- прогнозування технічного стану.

Щодо *видів технічного стану об'єкта*, то вони можуть бути такими: справний, несправний, працездатний, непрацездатний тощо.

Прогнозування має за мету визначення із заданою ймовірністю інтервалу часу чи ресурсу, протягом якого об'єкт буде знаходитись у працездатному (справному) стані. Може іти мова й про ймовірність збереження працездатного (справного) стану об'єкта протягом заданого інтервалу часу.

Діагностичне забезпечення – комплекс взаємоузгоджених правил, методів, алгоритмів і засобів, необхідних для здійснення діагностування на всіх етапах життєвого циклу об'єкта.

Алгоритм технічного діагностування (контролю технічного стану) – сукупність приписів, що визначають послідовність дій у процесі діагностування (контролю).

⁹ Технічне діагностування і контроль технічного стану. Терміни та визначення : ДСТУ 2389-94. – [Чиний від 01.07.1995. – К. : Держспоживстандарт України, 1994. – 75 с.

¹⁰ Термін «*технічне діагностування*» застосовується тоді, коли вирішувані завдання технічного діагностування є рівнозначними або основним його завданням є пошук місця та визначення причин відмови чи несправності об'єкта. Коли ж основним завданням технічного діагностування є визначення виду стану об'єкта в даний момент часу, застосовують термін «*контроль технічного стану*».

Система технічного діагностування – сукупність засобів, об'єкта та виконавців, необхідних для проведення діагностування чи контролю технічного стану за правилами, встановленими технічною документацією; система може бути автоматизованою (із частковою участю оператора) й автоматичною.

Діагностична модель – формалізований опис об'єкта, що потрібен для вирішення завдань діагностування (контролю технічного стану); може бути поданий в аналітичній, табличній або інших формах.

Сигнали, що мають місце під час діагностування, у стандарті розділено на:

- *стимульований*, який подається на вхід об'єкта, щоб отримати інформацію про його технічний стан;
- *контрольований*, який несе інформацію про технічний стан об'єкта до засобу діагностування чи контролю.

Параметр об'єкта, що використовується за його діагностування, носить назву *діагностованого (контрольованого) параметра*.

Діагностування класифіковане у стандарті за окремими видами:

- *робоче* – коли на об'єкт подаються робочі впливи;
- *тестове* – коли на об'єкт подаються тестові впливи;
- *оперативне* – коли інформація про технічний стан надходить у процесі його функціонування за певною стратегією;
- *безперервне* – коли інформація про технічний стан об'єкта надходить безперервно;
- *періодичне* – коли інформація про технічний стан об'єкта надходить через встановлені інтервали часу.

Особливості технології та порівняльна характеристика робочого й тестового діагностування наведені в додатках А та Б.

За наявності вмонтованих в об'єкт засобів діагностування або спеціальних програм (ПЕОМ) може здійснюватись *самодіагностування об'єкта*.

Засоби діагностування (контролю) поділяються на такі:

- автоматичні;
- автоматизовані;
- вмонтовані;
- зовнішні;
- бортові;
- наземні;
- спеціалізовані;
- універсальні;
- уніфіковані.

Для оцінки діагностування (контролю) в стандарті передбачена система його показників:

- *тривалість* – інтервал часу, що необхідний для проведення технічного діагностування (контролю) об'єкта;
- *повнота* – визначає можливість виявлення відмов або несправностей об'єкта за умови вибраного методу діагностування;
- *глибина пошуку місця пошкодження* – вказується складова частина об'єкта, з точністю до якої визначається місце відмови або несправності;
- *достовірність* – оцінка відповідності діагнозу реальному технічному стану об'єкта;
- *імовірність невиявленої відмови (несправності) й хибної відмови (несправності) під час діагностування* – імовірність того, що об'єкт може бути визначеним справним (працездатним) чи навпаки несправним (непрацездатним), хоча дійсно це не так.
- *ризик замовника й ризик виробника під час діагностування* – ризик того, що замовник одержить замість справного за результатами діагностування несправний (непрацездатний) об'єкт, а виробник – інформацію, що об'єкт несправний (непрацездатний), хоча дійсно це не так.

*Ефективність діагностування (контролю)*¹¹ забезпечити досить важко, оскільки вона залежить від ряду факторів, які носять випадковий характер:

- надійність об'єкта;
- пристосованість об'єкта до діагностування;
- досконалість і надійність засобів діагностування;
- правильний вибір та ефективність реалізації методів діагностування;
- рівень кваліфікації виконавця (оператора).

Водночас ефективність діагностування (контролю) багато в чому визначається тим, наскільки послідовно вирішується це завдання, починаючи з проектування й конструювання об'єкта (рис. 2.1).

Основні положення технічного діагностування, його показники та характеристики й вимоги до діагностичного забезпечення виробу поряд з ДСТУ 2389–94 встановлюють ще два стандарти – ГОСТ 20911–89 «Техническая диагностика. Термины и определения» та ГОСТ 27518–87 «Диагностирование изделий. Общие требования», які зокрема регламентують, що технічне діагностування має проводитися в процесі виробництва (за необхідності) й у процесі експлуатації та ремонту виробів.

¹¹ Див. тему 1 «Основні засади технічного діагностування»

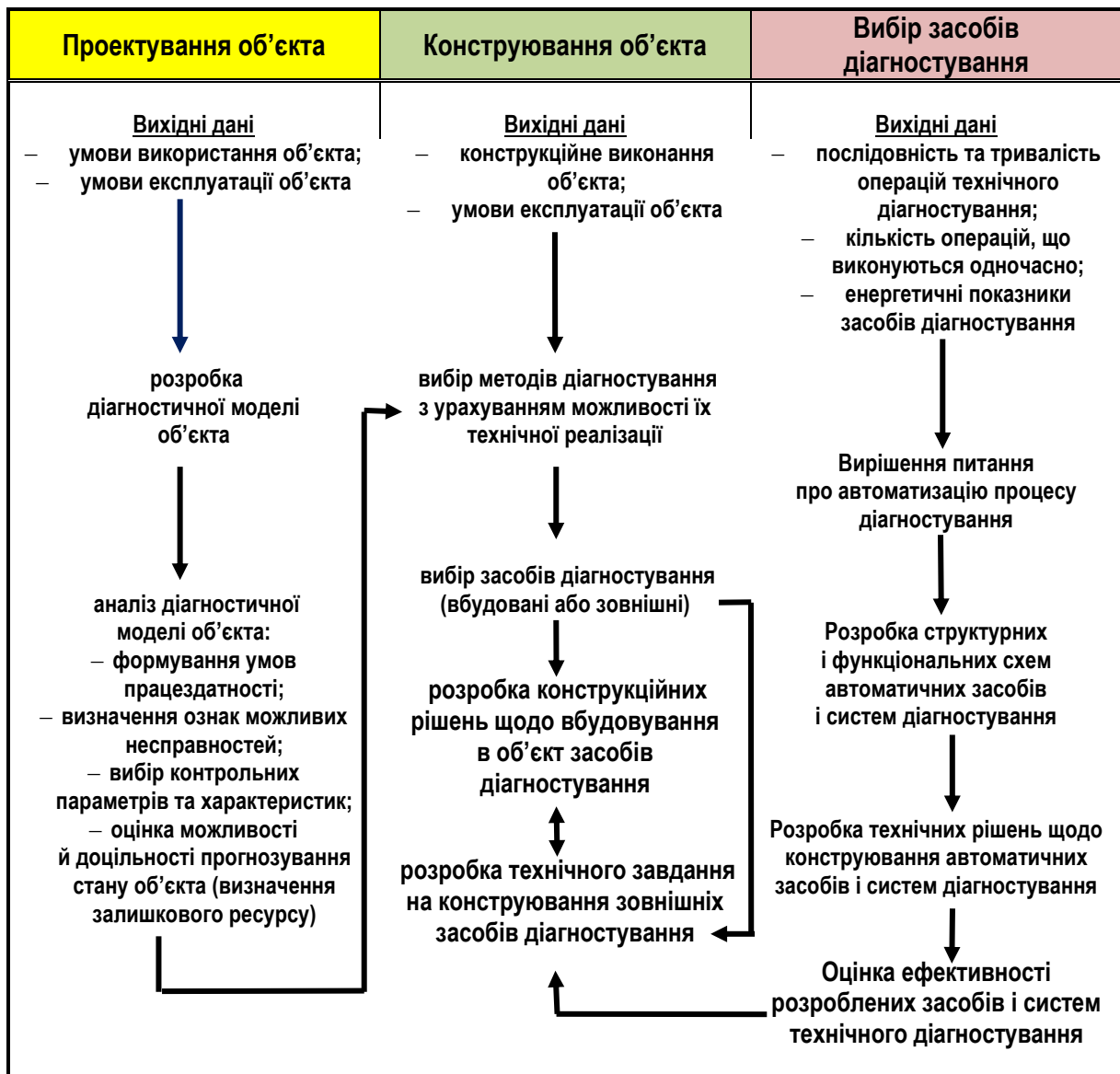


Рис. 2.1. Послідовність забезпечення придатності об'єкта до діагностування в умовах експлуатації

Мета технічного діагностування в стандартах визначена як підтримка встановленого рівня надійності, забезпечення вимог безпеки та ефективності використання виробів. Технічне діагностування виробів має спрямовуватися на визначення виду технічного стану, пошук місця відмови чи несправності та прогнозування технічного стану.

Власне технічне діагностування потребує попередньо:

- встановити показники й характеристики діагностування;
- забезпечити пристосованість виробу до технічного діагностування;
- розробити діагностичне забезпечення виробу.

Показники й характеристики діагностування, вимоги щодо пристосованості виробу до технічного діагностування та до його діагностичного забезпечення повинні включатися до технічних завдань, стандартів на окремі види продукції та документацію, що розробляється в процесі проведення дослідно-конструкторських робіт.

Стандарти встановлюють такі показники діагностування (рис. 2.2):

- показники достовірності й точності діагностування;
- техніко-економічні показники.

Серед показників достовірності й точності, встановлених стандартами є такі:

- 1) під час визначення виду технічного стану:
 - ймовірність того, що в результаті діагностування виріб визнається справним (працездатним) за умови, що він несправний (непрацездатний);
 - ймовірність того, що в результаті діагностування виріб визнається несправним (непрацездатним) за умови, що він справний (працездатний);
- 2) під час пошуку місця відмови чи несправностей:
 - ймовірність того, що в результаті діагностування приймається рішення про відсутність відмови (несправності) в даному елементі групи за умови, що дана відмова є;
 - ймовірність того, що в результаті діагностування приймається рішення про наявність відмови (несправності) в даному елементі групи за умови, що дана відмова відсутня;
- 3) під час прогнозування технічного стану:
 - середньоквадратичне значення прогнозованого параметра;
 - середньоквадратичне значення прогнозованого залишкового ресурсу;
 - ймовірність безвідмовної роботи;
 - показники зміни діагностованого параметра;
 - довірча ймовірність.

Техніко-економічні показники діагностування включають:

- питомі затрати на діагностування;
- середню оперативну трудомісткість діагностування;
- середню оперативну тривалість діагностування;
- періодичність діагностування.

Стосовно конкретного виробу за стандартами мають бути розроблені *характеристики діагностування*:

1) під час визначення технічного стану об'єкта – перелік параметрів виробу, що дозволяє визначити його технічний стан;

2) під час пошуку місця відмови чи несправності – глибина пошуку місця відмови або несправності, яка задається рівнем конструктивної складності частин виробу або переліком елементів, з точністю до яких має бути визначене місце відмови (несправності);

3) у разі прогнозування технічного стану – номенклатура параметрів виробу, що дозволяють прогнозувати його технічний стан.

Діагностичне забезпечення за стандартом має включати:

– номенклатуру діагностованих параметрів та їх характеристик (номінальні допустимі значення, точки контролю тощо);

– методи діагностування;

– засоби технічного діагностування.

Номенклатура діагностованих параметрів повинна задовольняти вимогам повноти, інформативності й доступності вимірювання за мінімальних затрат часу та вартості.

Методи діагностування мають відповідати поставленим завданням і поєднувати:

– діагностичну модель виробу;

– алгоритм діагностування та програмне забезпечення;

– правила вимірювання діагностованих параметрів;

– правила визначення структурних параметрів, зокрема робочих характеристик;

– правила аналізу та обробітку діагностичної інформації й прийняття рішень.

Засоби технічного діагностування повинні бути здатними забезпечити визначення (вимірювання) та контроль діагностичних параметрів в експлуатаційних режимах виробу.

Правила діагностування мають чітко визначати:

– послідовність виконання операцій діагностування;

– технічні вимоги щодо виконання операцій діагностування;

– вказівки щодо використання засобів діагностування та вимоги щодо їх метрологічного забезпечення;

– вказівки щодо режиму роботи виробу під час діагностування;

– вказівки щодо реєстрації та обробітку результатів діагностування й видачі висновку (діагнозу);

– вимоги безпеки під час проведення діагностування.

2.2. Діагностування технічного стану електроустановок за Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів¹²

Правила (п. 5.1.6) встановлюють, що особа, відповідальна за електрогосподарство (спеціалізована організація), повинна забезпечити розроблення й проведення організаційних і технічних заходів, що включають *проведення діагностування технічного стану електроустановок*. У споживача повинен бути організований постійний і періодичний контроль (огляди, діагностування) технічного стану електроустановок, обладнання, будівель і споруд. Періодичність контролю установлює особа, відповідальна за електрогосподарство. Результати контролю повинні фіксуватись у спеціальному журналі.

Контроль технічного стану електроустановок повинен проводитись оперативними й оперативно-ремонтними працівниками споживача. Обсяг контролю встановлюється відповідно до вимог нормативних документів (НД), інструкцій заводів-виробників електрообладнання та щорічних планів, які затверджує особа, відповідальна за електрогосподарство. *Із закінченням встановленого нормативно-технічною документацією терміну експлуатації технологічні системи та електроустановки повинні підлягати технічному діагностуванню.*

Діагностування технічного стану проводиться за програмою, погодженою Держенергонаглядом та комісією, очолюваною технічним керівником споживача (особою, відповідальною за електрогосподарство) або його заступником. До складу комісії включають керівників і спеціалістів структурних підрозділів споживача, осіб, відповідальних за електрогосподарство підрозділів, представників Держенергонагляду, Держгірпромнагляду, спеціалістів спеціалізованих організацій (за договором).

¹² Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС). Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 91 від 13.02.2012 та № 905 від 16.11.2012) Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 2 березня 2012 р. за № 350/20663.



Рис. 2.2. Показники діагностування (за ГОСТ 20911–89)

Завданням діагностування технічного стану електроустановок:

- визначити технічний стан електроустановок (справна, несправна, працездатна, непрацездатна);
- визначити місце пошкодження можливої відмови або несправності;
- спрогнозувати технічний стан електроустановки.

До обсягу проведення технічного діагностування на підставі діючих НД повинні бути включені:

- зовнішній і внутрішній огляди;
- перевірка технічної документації;
- питання організації експлуатації електричних установок;
- оперативне їх обслуговування та відповідність здійснюваних випробувань і вимірювань чинним НД тощо.

Для проведення технічного діагностування електроустановки споживач може використовувати наявні в нього системи й засоби технічного діагностування. Одночасно з діагностуванням технічного стану повинна здійснюватись перевірка виконання приписів наглядових органів і заходів, намічених за результатами розслідування порушень роботи електроустановок, а також заходів, розроблених за попереднім технічним діагностуванням.

Результати роботи комісії повинні бути оформлені актом та/або занесені в технічні паспорти устаткування з обов'язковим визначенням терміну наступного діагностування.

Експлуатація електроустановок з аварійно небезпечними дефектами, виявленими в процесі контролю та діагностування, забороняється.

2.3. Технічне діагностування в системі ПЗР і ТО електрообладнання

Система ПЗР і ТО електрообладнання сільськогосподарських підприємств передбачає *технічне обслуговування з періодичним контролем*, за якого контроль технічного стану здійснюється із встановленими періодичністю й обсягом, а обсяг інших операцій визначається технічним станом виробу в момент початку технічного обслуговування. Контроль у складі технічного обслуговування чи як окрема операція передбачає прогнозування технічного стану електрообладнання до наступного обслуговування й перевірку його працездатності.

Плановий поточний ремонт за системою ПЗР і ТО базується на контролі технічного стану електрообладнання з періодичністю та в

обсязі нею встановленими, а обсяг і момент початку ремонту визначається технічним станом виробу.

Необхідні матеріальні й трудові затрати на проведення діагностування окупаються за рахунок зменшення трудомісткості та затрат на проведення технічного обслуговування, поточного й капітального ремонтів.

Вихідними даними для планування робіт з технічного обслуговування й діагностування є інвентаризаційні документи – відомості, енергетичний паспорт підприємства, карта експлуатації тощо, а також річний план проведення цих заходів.

Технічне діагностування електрообладнання залежно від його кількості та умов підприємства може здійснюватися за такими варіантами:

- діагностування проводить окрема діагностична ланка чи бригада;
- діагностування проводить ремонтно-діагностична ланка чи бригада.

Виконавцями робіт з діагностування можуть бути інженери, бакалаври, молодші спеціалісти та досвідчені електромонтери, добре обізнані з правилами безпечної експлуатації електрообладнання. Керівник ланки чи бригади повинен мати кваліфікаційну групу з електробезпеки не нижче 4-ї, а інший персонал – не нижче 3-ї.

Результати вимірювань під час діагностування заносять до журналу, у якому кожній одиниці обладнання відводиться кілька сторінок з тим, щоб можна було аналізувати його стан та прогнозувати залишковий ресурс роботи.

Діагностування електрообладнання проводять з використанням переносних приладів та пристроїв. Для контролю технічного стану важкодоступного обладнання доцільно застосовувати автоматизовані діагностичні пристрої, зокрема для діагностування занурювальних електронасосних агрегатів.

2.4. Технічне діагностування при експертизі електроустановок споживачів

Основні засади експертизи електроустановок споживачів.
*Експертиза електроустановок*¹⁴ є офіційним підтвердженням фактичних значень параметрів безпеки, їх відповідності вимогам

¹⁴Порядок проведення експертизи електроустановок споживачів. Затверджено наказом Держнаглядохоронпраці від 30.12.99 №257

нормативних документів та визначення можливості безпечної експлуатації електроустановки.

Метою експертизи є визначення технічного стану електроустановок, встановлення можливості, доцільності умов і терміну подальшої їх безпечної експлуатації. Поряд з цим під час експертизи електроустановок має бути встановлена потреба проведення ремонту, модернізації, реконструкції чи заміни.

Експертиза електроустановок споживачів передбачає визначення:

- стану відповідності параметрів електрообладнання нормативним значенням;
- місць та причин псування електрообладнання;
- додаткового ресурсу експлуатації електроустановок до наступної експертизи або ресурсу експлуатації електроустановок до направлення на ремонт чи списання;
- можливості подальшої безпечної експлуатації електроустановок;
- електрообладнання, що не відповідає сучасним вимогам безпеки.

Експертизі підлягають електроустановки, що вичерпали свій ресурс, а також електроустановки, які на вимоги Держнаглядохоронпраці, за результатами аналізу електротравматизму визнані травмонебезпечними.

Залучені до проведення під час експертизи електричних випробувань та вимірювань фахівці, повинні пройти навчання й перевірку знань ПБЕЕС та мати посвідчення про присвоєння відповідної кваліфікаційної групи з електробезпеки.

Фахівці, яким належить провадити неруйнівний контроль механічного обладнання та будівельних конструкцій, повинні пройти спеціальну підготовку й бути атестованими згідно з вимогами чинних Правил атестації фахівців з неруйнівного контролю², мати відповідний сертифікат і кваліфікаційне посвідчення.

Порядок проведення й оформлення результатів експертизи електроустановок споживачів. Для проведення експертизи електроустановок заявник (споживач) подає до експертної організації – експертно-технічного центру Держнаглядохоронпраці чи уповноваженої ним спеціалізованої організації – заяву встановленої форми (додаток В).

Тривалість розгляду заяви не може перевищувати одного місяця, а за результатами розгляду заявникові повідомляється рішення експертної організації із зазначенням конкретного переліку робіт.

Водночас експертна організація готує проекти договору про виконання робіт із проведення експертизи електроустановок заявника, де зазначається обсяг і вартість робіт. На проведення експертизи відводиться не більше двох місяців від дня підписання договору сторонами.

До переліку робіт, виконуваних під час проведення експертизи електроустановок споживачів входять:

- ознайомлення з проектною, будівельно-монтажною та експлуатаційною документацією;
- зовнішній огляд діючої електроустановки;
- встановлення та фіксування режиму роботи електрообладнання;
- технічне діагностування електрообладнання;
- оформлення результатів експертизи.

Технічне діагностування включає оцінку параметрів окремих елементів електроустановки та її в цілому згідно із Переліком параметрів за видами електроустановок, що підлягають перевірці під час технічного діагностування електроустановок (додаток В). При цьому визначається, чи відповідає електроустановка вимогам Правил улаштування електроустановок (ПУЕ–85).

Електроустановка, що підлягає технічному діагностуванню за програмою експертизи, передається заявником (власником) експертній організації за актом (додаток В). Остання несе повну відповідальність за дотримання вимог електробезпеки під час випробувань і вимірювань у діагностованій електроустановці.

Допуск до електроустановки експертів здійснюється особою, відповідальною за електрогосподарство заявника (власника).

Експертиза припиняється в разі виявлення під час її проведення відступів від вимог чинних нормативних документів, а також дефектів і відмов, які впливають на безпечну експлуатацію електроустановки та загрожують безпеці експертів. Умовою проведення робіт з експертизи електроустановки є виконання заявником заходів щодо приведення її у відповідність до вимог нормативних документів за переліком, виданим експертною організацією.

За результатами технічного діагностування та випробувань електроустановок приймаються такі рішення:

- 1) про відповідність електроустановки нормам безпеки та про умови експлуатації;
- 2) про термін проведення чергової експертизи (не раніше, ніж через три роки).

Звітність за результатами експертизи електроустановок є такою:

- протоколи вимірювань та випробувань;
- розрахунки (якщо в цьому є потреба);
- експертний висновок у двох примірниках за формою, наведеною в додатку В.

Заявник має право на оскарження результатів експертизи електроустановок у Держнаглядохоронпраці, якому відводиться не більше одного місяця на розгляд скарги.

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Затверджено Наказом Міністерства палива та енергетики України за № 258 від 25.07.2006. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України за № 1143/13017 від 25.10.2006. К.:ДП НТУКЦ «АсЕлЕнерго», 2007.- 304 с.

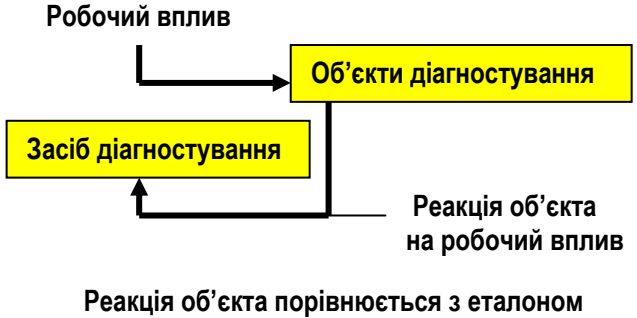
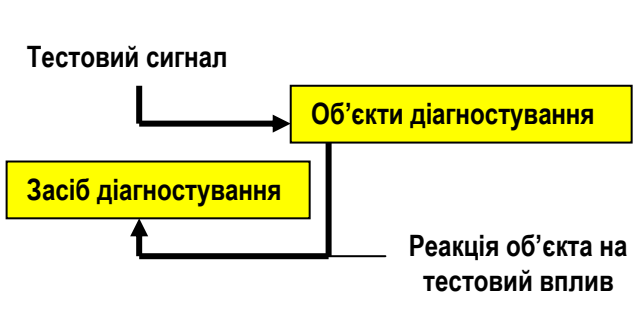
2. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий / Госагропром СССР. – М. : ВО «Агропромиздат», 1987. – 191 с.

3. ДНАОП 0.00–8.20–99. Порядок проведення експертизи електроустановок споживачів. Затверджено наказом Держнаглядохоронпраці від 30.12.99. № 257. Харків:Вид-во «Форт»,2000.- 94 с.

4. Рекомендации по организации ремонта и технического обслуживания электрооборудования. – М. : ГОСНИТИ, 1985. – 88 с.

Додаток А

Особливості технологій робочого й тестового діагностування

Вид діагностування	Завдання, що вирішується	Взаємодія засобів діагностування об'єкта
Робоче	<p>Одержати відповідь на питання:</p> <ul style="list-style-type: none"> – об'єкт справний? (так чи ні); – об'єкт працездатний? (так чи ні); – які саме й де має дефекти об'єкт? – які причини дефектів? 	 <p>The diagram shows a yellow box labeled 'Засіб діагностування' (Diagnostic tool) on the left and a yellow box labeled 'Об'єкти діагностування' (Objects of diagnosis) on the right. An arrow labeled 'Робочий вплив' (Working influence) points from the tool to the objects. A return arrow labeled 'Реакція об'єкта на робочий вплив' (Object's reaction to working influence) points from the objects back to the tool. Below the diagram, the text reads: 'Реакція об'єкта порівнюється з еталоном' (Object's reaction is compared with a standard).</p>
Тестове	<p>Одержати відповідь на питання:</p> <ul style="list-style-type: none"> – об'єкт справний? (так чи ні); – об'єкт працездатний? (так чи ні); – які саме й де має дефекти об'єкт? – які причини дефектів? 	 <p>The diagram shows a yellow box labeled 'Засіб діагностування' (Diagnostic tool) on the left and a yellow box labeled 'Об'єкти діагностування' (Objects of diagnosis) on the right. An arrow labeled 'Тестовий сигнал' (Test signal) points from the tool to the objects. A return arrow labeled 'Реакція об'єкта на тестовий вплив' (Object's reaction to test influence) points from the objects back to the tool. Below the diagram, the text reads: 'Використовується попередньо складена карта несправностей' (A pre-compiled fault map is used).</p>

Додаток Б

Порівняльна характеристика видів діагностування

Вид діагностування	Вид впливу, що подається на об'єкт діагностування	Можливості, що реалізуються під час діагностування	Область застосування
Робоче	<i>Робочі сигнали</i> від керуючих пристроїв об'єкта діагностування	<p>Оперативне реагування на порушення в роботі об'єкта.</p> <p>Заміна вузлів (блоків), що відмовили, резервними.</p> <p>Можливість побудови адаптивних систем.</p> <p>Можливість імітації дії об'єкта за його налагодження, проведення післяремонтної перевірки.</p>	У процесі експлуатації об'єкта
Тестове	<p><i>Тестові сигнали</i> від засобів діагностування:</p> <p>– <i>алгоритмічні тести</i> для перевірки правильності функціонування об'єкту (повільний чи швидкий темп подачі)</p>	Пошук катастрофічних (постійних) несправностей	Під час налагодження, виконання профілактичних робіт, за нормального функціонування об'єкта
	<p>– <i>параметричні тести</i> для перевірки режимів роботи електричних кіл</p> <p>– (оцінка амплітуди, частоти, гармонічного складу)</p>	Оцінка відповідності параметрів елементів значенням, що обумовлені в паспорті (технічній документації). Виявлення послідовних відмов, прогнозування технічного стану об'єкта	

Додаток В

Супровідні документи до проведення експертизи електроустановок за параметрами безпеки

_____ (найменування організації, що здійснює експертизу)

З А Я В А

про проведення експертизи електроустановок за параметрами безпеки

Заявник _____
(найменування підприємства)

адреса _____
(власник підприємства або уповноважений ним орган)

телефон _____ телекс _____ телефакс _____

номер рахунку та найменування відділення банку _____

просить провести експертизу електрообладнання _____

_____ (найменування обладнання або перелік, що додається до заяви)
у зв'язку із _____
(причина потреби в експертизі)

Додаток: протоколи неруйнівного контролю будівельної частини і електроустановки.

Власник підприємства
або уповноважений ним орган Підпис

Печатка підприємства
Дата

ПЕРЕЛІК ПАРАМЕТРІВ ЗА ВИДАМИ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК, ЩО ПІДЛЯГАЮТЬ ПЕРЕВІРЦІ ПІД ЧАС ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

1. ПОВІТРЯНІ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Найменування параметрів	Елементи електроустановки, які підлягають діагностуванню
1.1. Стріли прогину 1.2. З'єднання проводів 1.3. Опір блискавкозахисних тросів та опор, а також повторних заземлень нульового повода 1.4. Опір заземлювальних пристроїв 1.5. Опір та електрична міцність ізоляції 1.6. Розподіл робочої напруги за елементами 1.7. Захист лінії до 1000 В із заземленою нейтраллю від короткого замикання 1.8. Відхилення опор від вертикальної осі. Відхилення осі траверси від горизонтальної осі. Зміщення кінця траверси від лінії, перпендикулярної осі траверси. Розвертання траверси відносно осі	Проводи, троси Ізолятори Підвісні ізолятори

2. СИЛОВІ КАБЕЛЬНІ ЛІНІЇ

Найменування параметрів	Елементи електроустановки, які підлягають діагностуванню
2.1. Опір та електрична міцність ізоляції 2.2. Опір заземлення 2.3. Захисні до 1000 В з заземленою нейтраллю від короткого замикання 2.4. Осушення вертикальних ділянок 2.5. Струмозподіл 2.6. Блукаючий струм 2.7. Корозійна активність ґрунтів 2.8. Температура 2.9. Стумові навантаження	Кабелі 10–20 кВ Одножильні кабелі По трасі лінії

3. СИЛОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ, АВТОТРАНСФОРМАТОРИ. МАСЛЯНІ РЕАКТОРИ

Найменування параметрів	Елементи електроустановки, які підлягають діагностуванню
3.1. Опір та електрична міцність ізоляції	Обмотка; ярмові балки відносно активної сталі; стяжні шпильки; вводи з паперово-масляною ізоляцією; вбудовані трансформатори струму
3.2. Тангенс кута діелектричних утрат ізоляції	Обмотки трансформаторів (напругою 35 кВ, потужністю більше 10000 кВА; напругою 110 кВ і вище всіх потужностей у маслі); вводів з основною паперово-масляною, паперово-бакелітовою й паперово-епоксидною ізоляцією; вбудованих трансформаторів струму, з основною ізоляцією з паперу, бакеліту або бітумних матеріалів

3.3. Співвідношення C_2/C_{50}	Ізоляції обмоток у трансформаторному маслі Ізоляції обмоток трансформаторів 110 кВ і вище без масла Обмотки
3.4. Співвідношення $\Delta C/C$	
3.5. Опір постійному струму	
3.6. Коефіцієнт трансформації	
3.7. Колір силікагелю	
3.8. Параметри трансформаторного масла	
3.9. Опір заземлювальних пристроїв	
3.10. Система охолодження	
3.11. Рівень освітлення	
3.12. Послідовність роботи контактів РПН	

Діагностика параметрів із пунктів 3.2; 3.3; 3.4; 3.7; 3.8 для повітряних трансформаторів не проводиться.

4. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Найменування параметрів	Елементи електроустановки, які підлягають діагностуванню
4.1. Опір та електрична міцність ізоляції	Струмоведучі частини Силкові напівпровідники
4.2. Режими й характеристики	
4.3. Захист агрегату до 1000 В за системи живлення із заземленою централлю від короткого замикання	
4.4. Опір заземлювальних пристроїв	
4.5. Система охолодження	Силкові тиристори, вентиля
4.6. Параметри трансформатора агрегату	Див. розд. 3
4.7. Рівень освітлення	

5. СИЛОВІ КОНДЕНСАТОРИ

Найменування параметрів	Елементи електроустановки, які підлягають діагностуванню
5.1. Габарити	Між виводом і корпусом конденсатора Кожного конденсатора
5.2. Опір та електрична міцність ізоляції	
5.3. Ємність	
5.4. Захист конденсаторів до 1000 В за системи живлення із заземленою нейтраллю від короткого замикання	
5.5. Опір заземлюючих пристроїв	
5.6. Рівень освітлення	

6. ПІДСТАНЦІЇ, РОЗПОДІЛЬЧІ ПРИСТРОЇ, КОМПЛЕКТНІ РОЗПОДІЛЬЧІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ВНУТРІШНЬОГО Й ЗОВНІШНЬОГО ВСТАНОВЛЕННЯ (КРП І КРПЗ)

Найменування параметрів	Елементи електроустановки, які підлягають діагностуванню
6.1. Опір та електрична міцність ізоляції	Збірних шин; камер КРП і КРПЗ: масляних та електромагнітних вимикачів; повітряних вимикачів; вимикачів навантаження; роз'єднувачів; короткозамикачів; відокремлювачів: вентильних і трубчастих розрядників; повітряних реакторів; запобіжників напругою вище 1000 В; підвісних, опорних і прохідних ізоляторів; введів; вимірювальних трансформаторів, вторинних кіл релейного захисту, автоматики й телемеханіки, трансформаторів власних потреб
6.2. З'єднання проводів і шип	Збірні шини
6.3. Опір постійному струму	Ковзкі контакти вторинних кіл камер КРП і КРПЗ Масляні, електромагнітні й повітряні вимикачі: — контакти — шунтувальні резистори дугогасних пристроїв — обмотки вмикальних і вимикальних котушок Вимикачі навантаження: — контакти — обмотки вмикальних і вимикальних котушок
6.4. Сила натиску ламелів роз'єднувальних контактів первинних кіл	КРП і КРПЗ
6.5. Механічне блокування	КРП і КРПЗ
6.6. Час руху рухомих частин	Масляні й електромагнітні вимикачі; короткозамикачі; роз'єднувачі й відокремлювачі
6.7. Хід рухомих частин, стискання контактів під час вмикання, одночасність замикання й розмикання всіх контактів	Масляні й електромагнітні вимикачі
6.8. Напруга спрацьовування: — приводу — електромагнітів управління	Масляні й електромагнітні вимикачі; вимикачі навантаження Повітряні вимикачі
6.9. Напруга надійної роботи контакторів	Масляні й електромагнітні вимикачі

<p>6.10. Працездатність на багаторазові вмикання й вимикання</p> <p>6.11. Параметри трансформаторного масла</p> <p>6.12. Ємність конденсаторів-подільників напруги</p>	<p>Масляні й електромагнітні вимикачі; повітряні вимикачі; вимикачі навантаження</p> <p>Маслонаповнене електрообладнання</p> <p>Повітряні вимикачі</p>
<p>6.13. Тангенс кута діелектричних утрат</p> <p>6.14. Хід якоря електромагнітів управління</p> <p>6.15. Міра зносу дугогасних вкладників, міра обгорання контактів</p> <p>6.16. Розподіл робочої напруги на елементах багатоелементних ізоляторів</p> <p>6.17. Зусилля витягування ножа з нерухомого контакту</p> <p>6.18. Опір розрядника та його елементів. Опір ізоляції ізолювальних основ. Опір емітатора. Струм провідності. Пробійна напруга. Герметичність</p>	<p>Конденсатори — подільники напруги повітряних вимикачів; ізоляція вводів і прохідних ізоляторів; вимірювальні трансформатори напруги 35 кВ і вище; вимірювальні трансформатори струму з основною ізоляцією з паперу, бакеліту або бітумних матеріалів</p> <p>Повітряні вимикачі</p> <p>Вимикачі навантаження</p> <p>Роз'єднувачі; короткозамикачі; відокремлювачі; підвісні й опорні ізолятори</p> <p>Роз'єднувачі; відокремлювачі</p> <p>Вентильні розрядники</p>
<p>6.19. Внутрішній діаметр. Внутрішній і зовнішній проміжок. Розташування зон вихлопу</p> <p>6.20. Плавкі вставки й струмообмежувальні резистори</p> <p>6.21. Ущільнення</p> <p>6.22. Релейний захист, автоматика, телемеханіка</p>	<p>Трубчасті розрядники</p> <p>Запобіжники</p> <p>Маслонаповнені негерметичні вводи з паперово-масляною ізоляцією напругою 110 кВ і вище</p>

6.23. Напряга заземлювальних пристроїв; напруга дотику¹⁾
6.24. Рівень освітлення

¹⁾ Випробування проводяться в електроустановках напругою 110–220 кВ, виконаних за нормами на напругу дотику.

7. ЕЛЕКТРОДВИГУНИ ЗМІННОГО СТРУМУ Й МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Найменування параметрів	Елементи електроустановки, які підлягають діагностуванню
7.1. Опір та електрична міцність ізоляції 7.2. Опір постійному струму 7.3. Проміжок між сталлю ротора й статора	Електродвигуни змінного струму потужністю 100 кВт і більше
7.4. Проміжок у підшипниках ковзання 7.5. Амплітуда вібрації підшипників 7.6. Розбіг ротора вздовж осі	Електродвигуни з виносними підшипниками Електродвигуни змінного струму Електродвигуни змінного струму напругою 3000 В і вище
7.7. Повітряний проміжок між полюсами	Електродвигуни, які мають підшипники ковзання Машина постійного струму потужністю більше 3 кВт

8. СИНХРОННІ ГЕНЕРАТОРИ Й КОМПЕНСАТОРИ

Найменування параметрів	Елементи електроустановки, які підлягають діагностуванню
8.1. Опір ізоляції	Обмотки, підшипники генератора й сполученого з ним збуджувача, водневого ущільнення вала, ізольовані стяжні болти статора, термоіндикатори, кола збудження генератора й збуджувача
8.2. Електрична міцність ізоляції 8.3. Опір постійному струму 8.4. Опір обмоток ротора змінному струму промислової частоти 8.5. Електричні характеристики 8.6. Вібрація підшипників 8.7. Система охолодження 8.8. Система маслостачання 8.9. Індуктивний опір і постійна часу генератора	Обмотки, кола збудження, реостат збудження, резистор гасіння поля, заземлювальний резистор Обмотки, резистор гасіння поля, реостати збудження

9. ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ Й ЕЛЕКТРОПРОВОДКИ ДО 1000 В

Найменування параметрів	Елементи електроустановки, які підлягають діагностуванню
9.1. Опір та електрична міцність ізоляції 9.2. Границі спрацьовування максимальних і незалежних розчіплювачів 9.3. Пристрої захисного вимикання 9.4. Стан пробійних запобіжників 9.5. Опір заземлювальних пристроїв 9.6. Напруга дотику й кроку в штучно створеному аварійному режимі 9.7. Рівень освітленості	Електроустановки у тваринницьких комплексах, лазнях з електричним підігрівом та інших об'єктах, де для запобігання електротравматизму в підлозі встановлюються пристрої вирівнювання електричних потенціалів

Форма акта про передачу електроустановки
на проведення експертизи

А К Т №____
про передачу електроустановок на проведення експертизи

м. _____ "___" _____ 200__р.

Ми, що нижче підписалися, представник власника електроустановки _____

_____ (посада; назва організації; прізвище, ініціали)
і представник експертної організації _____

_____ (посада; назва організації; прізвище, ініціали)
згідно з договором від "___" _____ 200__р. №__ склали цей акт про передачу
електроустановки _____

на проведення експертизи, при цьому з "___" _____ 200__р. власник виводить
електроустановку з експлуатації.

Електроустановку здав _____
(посада; назва організації-власника; підпис; прізвище, ініціали)

Прийняв _____
(посада; назва організації-власника; підпис; прізвище, ініціали)

Акт складений у двох примірниках, по одному для кожної сторони.

З актом ознайомлений:

Відповідальний за організацію робіт з технічного обслуговування та ремонту
електроустановки _____

(посада; назва організації; підпис; прізвище, ініціали)

Форма експертного висновку за результатами експертизи

ЗАТВЕРДЖУЮ

(посада керівника й назва експертної організації)

(підпис, ініціали, прізвище)

ЕКСПЕРТНИЙ ВИСНОВОК № ___

за результатами експертизи

(назва електроустановки й місце розташування)

Цей експертний висновок необхідно
зберігати разом з паспортом
електроустановки

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРОУСТАНОВКУ

Назва електроустановки	
Підприємство-виробник	
Дата введення в експлуатацію	
Заводський номер	
Інвентарний номер	
Місце розташування (адреса, об'єкт)	
Причини проведення експертизи	

2. ВІДОМОСТІ ПРО ЕКСПЕРТНУ ОРГАНІЗАЦІЮ

Назва експертної організації	
Номер, дата видачі, термін дії дозволу	
Номер договору про проведення експертизи	

3. НОРМАТИВНА ДОКУМЕНТАЦІЯ ЩОДО ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРТИЗИ

Позначення	Назва
ДНАОП 0.00–1.21–98	Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів
ДНАОП 0.00–8.20–99	Порядок проведення експертизи електроустановок споживачів

4. ПАСПОРТНІ ДАНІ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК ЗА ЇХ ВИДАМИ. ПОВІТРЯНА ЛІНІЯ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Напруга	
Початок – кінець	
Довжина (км)	
Матеріал опор	
Марка й переріз проводів	
Марка й переріз блискавкозахисного троса	
Двоколова (одноколова) (для ПЛ 35–220 кВ)	
Поздовжній профіль (№ креслення)	
План траси (№ креслення)	
Дата введення в експлуатацію	

СИЛОВІ КАБЕЛЬНІ ЛІНІЇ

Напруга	
Початок - кінець	
Номер за кабельним журналом	
Марка кабелю	
Переріз	
Довжина	

План траси (№ креслення)	
Дата введення в експлуатацію	
Спосіб прокладки (повітря, ґрунт)	

СИЛОВІ ТРАНСФОРМАТОРИ

Тип	
Заводський номер	
Потужність кВ • А	
Напруга	
Найменування обмоток	
Струм	
U _к %	
Група з'єднання	
Охолодження	
Дата введення в експлуатацію	

НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

Тип	
Заводський номер	
Потужність	
Напруга (вхідна — вихідна)	
Охолодження	
Дата введення в експлуатацію	

КОНДЕНСАТОРНІ УСТАНОВКИ

Тип	
Заводський номер	
Потужність квар	
Напруга	
Охолодження	
Дата введення в експлуатацію	

ПІДСТАНЦІЇ. РОЗПОДІЛЬЧЕ УСТАТКУВАННЯ

Назва підстанції	
Напруга розподільчого устаткування	
РП відкритий/закритий	
Однолінійна схема (№ креслення)	
Дата введення в експлуатацію	

ПІДСТАНЦІЇ. КОМПЛЕКТНИЙ РОЗПОДІЛЬЧИЙ ПРИСТРІЙ

Назва підстанції	
Напруга розподільчого пристрою зовнішнього чи внутрішнього встановлення	
Підприємство-виробник	
Однолінійна схема (№ креслення)	
Дата введення в експлуатацію	

ЕЛЕКТРОДВИГУНИ ЗМІННОГО СТРУМУ Й МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Назва механізму	
Тип	
Підприємство-виробник	
Заводський номер	
Потужність	
Оберти на хвилину	
Напруга	
Номінальний струм	
Тип пускової апаратури	
Дата введення в експлуатацію	
Навколишнє середовище, у якому може експлуатуватися електрична машина (відносна вологість, насиченість пилом, агресивне, вибухонебезпечне, пожежонебезпечне)	

СИНХРОННИЙ ГЕНЕРАТОР

Тип	
Підприємство-виробник	
Заводський номер	
Потужність	
Дата введення в експлуатацію	

ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ Й ЕЛЕКТРОПРОВОДКИ НАПРУГОЮ ДО 1000 В

Назва електроустановки	
Ресстраційний номер	
Однолінійна схема (№ креслення)	
Кабельний журнал або план мереж (№ креслення)	
Клас приміщення, у якому розташована електроустановка, за вибухопожежонебезпечністю	
Дата введення в експлуатацію	

5. ВІДПОВІДНІСТЬ ФАКТИЧНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ ПАСПОРТНИМ ДАНИМ

Використання електроустановки за призначенням	
Режим навантаження	
Навколишнє середовище	

6. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРТИЗИ

Стан електроустановки (справний, несправний, працездатний, непрацездатний)	
Перелік дефектів, пошкоджень і відмов	
У тому числі	Усунуті до проведення технічного діагностування
	Усунуті під час проведення ремонту, реконструкції або модернізації
Дефекти, пошкодження й відмови під час випробувань	

7. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО РЕМОНТУ, МОДЕРНІЗАЦІЇ, РЕКОНСТРУКЦІЇ

8. ВИСНОВКИ КОМІСІЇ

Електроустановка перебуває в справному стані й може експлуатуватися в паспортному режимі з урахуванням рекомендацій, наведених у розділі 9	
Строк повторної експертизи	

9. РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВКИ

ДОДАТКИ:

1. Відомість дефектів, пошкоджень і відмов.
2. Протоколи випробувань і вимірювань.

Підписи експертів

_____ (прізвище, ініціали)

----- (прізвище, ініціали)

3. ДАТЧИКИ ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ

- 3.1. Терміни та визначення стосовно датчиків
- 3.2. Класифікація датчиків
- 3.3. Фізичні основи дії, будова та характеристики датчиків
- 3.4. Вимоги до датчиків засобів технічного діагностування

3.1. Терміни та визначення стосовно датчиків

Датчики неелектричних та електричних фізичних величин є *первинними носіями інформації про діагностований об'єкт* і значною мірою визначають структуру засобів технічного діагностування з урахуванням необхідної точності, надійності, стійкості проти перешкод та вартості. Слід зазначити, що датчики серед всіх складових комплексу діагностичної апаратури перебувають у найбільш важких експлуатаційних умовах, оскільки на них прямо впливають навколишнє середовище та середовище, яке контролюється.

До формулювання поняття «датчик» доцільно навести деякі аналогії із поведінкою людини, яка відчуває довкілля через своєрідні датчики: очі, вуха, язик, ніс, шкіру. Відчуття, як вхідні сигнали передаються до головного мозку, де аналізуються й спричиняють появу вихідних сигналів, що, у свою чергу, надходять до виконавчих органів – рук, ніг та ін. Мабуть, тому в зарубіжній літературі терміну «*датчик*» відповідає термін «*сенсор*» (від англ. *sense* – відчуття, почуття, відчувати, почувати).

У вітчизняній літературі зустрічається ціла множина понять «датчик» – чутливий елемент, реєстратор, перетворювач, вимірювач, первинний вимірювальний перетворювач тощо. Узагальнене поняття *датчик* означає пристрій, що сприймає вимірюваний (контрольований) параметр і перетворює його в сигнал, зручний для передачі по лініях зв'язку, подальшого перетворення, обробки або зберігання. Цей сигнал безпосередньо спостерігачем не сприймається.

У більшості випадків датчик об'єднує на єдиній конструктивній основі один чи кілька вимірювальних перетворювачів та додаткові елементи.

3.2. Класифікація датчиків

Під час створення датчиків використовуються багато явищ та ефектів, видів перетворення енергії й властивостей, частина яких перелічена в додатку А. Принцип дії датчиків як одна із ознак їх класифікації базується на перелічених явищах і властивостях (додаток Б).

Залежно від виду енергетичного носія інформації *вихідні сигнали датчиків* можуть бути електричними, пневматичними, гідравлічними тощо. У складі діагностичних засобів переважно використовуються *датчики з електричним вхідним сигналом* завдяки їх суттєвим перевагам, швидкодії, можливості автоматизації процесів вимірювання, представлення результатів діагностування у формі, що сприймається й обробляється ПЕОМ, багатofункціональності та гнучкості в роботі.

За принципом дії датчики поділяються на дві групи:

1) *генераторні*, у яких здійснюється перетворення вимірюваного (контрольованого) параметра безпосередньо в електричний сигнал (власне генерується електроенергія);

2) *параметричні*, у яких вимірювана (контрольована) величина перетворюється в параметр електричного кола – опір, індуктивність, ємність тощо; при цьому датчик живиться від зовнішнього джерела.

До генераторних датчиків відносяться такі:

- *індукційні (магнітоелектричні) датчики*, що використовують явище електромагнітної індукції – наведення е.р.с. у контурі, що перебуває в магнітному полі зі змінною індукцією;

- *п'єзоелектричні датчики*, які використовують п'єзоелектричний ефект, який виникає в деяких кристалах (кварц, турмалін та ін.) залежно від значень та характеру прикладених до кристала пружнодеформуючих зусиль;

- *фотоелектричні датчики*, які використовують фотоелектричний ефект – залежність е.р.с. фотоелемента із запірним шаром від освітленості;

- *термоелектричні датчики (термопари)* – використовують явище термоелектричного ефекту, який виникає в колі термопари залежно від різниці температур робочого й вільного спайів;

- *датчики електричних потенціалів*, які використовують залежність концентрації водних розчинів від концентрації іонів водню в розчині, яку можна визначити шляхом вимірювання потенціалів між зануреними в розчин електродами;

- *гальванічні датчики*, які використовують залежність е.р.с. гальванічного елемента від складу й концентрації розчинів електролітів;

- *електрокінетичні датчики*, які використовують явище електрокінетичного потенціалу, який виникає за вимушеного протіканні полярної рідини через пористу стінку;

- *датчики із часоімпульсним виходом*, у яких вимірюваний параметр перетворюється в пропорційний за тривалістю імпульсу струму;

- *частотні датчики*, у яких вимірюваний параметр перетворюється в зміну на виході датчика частоти змінного струму або в зміну частоти електричних імпульсів.

До параметричних датчиків відносяться такі:

- *ємнісні датчики*, які використовують залежність ємності конденсатора від розмірів та взаємного положення їх обкладинок у разі дії на нього вимірюваного (контрольованого) параметра;

- *електромагнітні й магнітоелектричні датчики* – сімейство індуктивних, трансформаторних і магнітопружних датчиків;

- *індуктивні датчики* реалізують залежність індуктивності дроселя від довжини й площі поперечного перерізу його осердя та від взаємного положення обмоток та осердя;

- *трансформаторні датчики* базуються на залежності взаємоіндуктивності обмоток перетворювача від переміщення феромагнітного осердя;

- *магнітопружні датчики* реалізують принцип зміни магнітної проникності (або індукції) феромагнітних тіл під дією прикладених до них механічних зусиль чи напружень;

- *електроконтактні датчики*, які комутують електричне коло під дією вимірюваного параметра;

- *потенціометричні (реостатні) датчики*, які використовують залежність опору реостата від положення його повзунка, який переміщується під дією вимірюваного параметра;

- *рідинні (електролітичні) датчики*, які реалізують залежність опору електропровідної рідини за взаємного переміщення електродів або ж зміні геометричної форми корпусу чутливого елемента;

- *механотронні датчики*, які базуються на перетворенні вимірюваного параметра в переміщення електродів механотронної лампи й відповідно в зміну струму в колі її анода;

- *тензорезисторні (тензометричні) датчики*, які використовують властивість тензоперетворювача змінювати свій опір під дією пружних деформуючих зусиль; можуть бути провідниковими (із дроту чи фольги) й напівпровідниковими;

- *датчики контактної опору*, які використовують залежність контактної опору між поверхнями двох твердих тіл від сил їх стискування;

- *магнітомодуляційні датчики*, які поєднують у собі магнітну систему й магнітометр, за взаємного переміщення яких внаслідок зміни напруженості магнітного поля змінюється вихідний сигнал магнітометра;

- *датчики термоопору, п'єзорезистори, фоторезистори тощо*, які змінюють свій опір залежно від температури, механічних зусиль, освітленості тощо, а також змінюють струм у колі, до якого вони увімкнені.

Із усієї множини датчиків, різноманітних за принципом дії, набули найбільшого поширення такі:

1) *потенціометричні або реостатні датчики* – застосовуються для вимірювання (контролю) абсолютних, надмірних тисків рідин, газів та їх сумішей, перепадів тисків; координат і відносних переміщень; лінійних прискорень; кутових швидкостей; швидкісного напору та ін.;

2) *тензорезисторні (тензометричні)* забезпечують вимірювання тиску, зусиль, обертових моментів відносних переміщень, лінійних прискорень та ін.;

3) *електроконтактні датчики* – забезпечують вимірювання часових інтервалів та фазових параметрів роботи двигуна;

4) *індуктивні датчики* – застосовуються для вимірювання тиску, лінійних переміщень тощо;

5) *трансформаторні датчики* забезпечують вимірювання лінійних переміщень, тиску, витрати матеріалу та ін.;

6) *магнітопружні датчики* придатні для вимірювання обертових моментів, зусиль тощо;

7) *індукційні датчики* застосовуються для вимірювання витрат рідини й газу, частоти обертання тощо;

8) *п'єзоелектричні датчики* забезпечують вимірювання тиску, вібрації, рівнів, витрати за рівнем та ін.;

9) *термоелектричні датчики (термопари)* застосовуються для вимірювання температури, зокрема температури під час випробовування двигунів внутрішнього згорання, сушіння ізоляції силових трансформаторів тощо;

10) *датчики термоопору (термометри опору)* придатні для вимірювання температури рідин, повітря, поверхні корпусних деталей, зокрема електродвигунів;

11) *фотоелектричні датчики* забезпечують вимірювання частоти обертання, обертового моменту, лінійних розмірів та ін.;

12) *механотронні датчики* знаходять застосування для вимірювання малих переміщень, зусиль, тиску тощо;

13) *частотні стробоскопічні датчики (стробоскопи)* поширені за вимірювання частоти обертання й фазових параметрів роботи двигуна внутрішнього згорання.

Будову датчиків пояснюють їх структурні схеми (рис. 3.1), що містять чутливий елемент вимірюваного (контрольованого) параметра й перетворює її в проміжну неелектричну величину та перетворювача останньої в електричний сигнал. Переважну більшість датчиків неелектричних величин відображає узагальнена структурна схема (рис. 3.1e).

Кожний датчик має основну характеристику – залежність вихідного (електричного) сигналу від вхідного (контрольованого чи вимірюваного) параметра, яка носить назву *градувальної характеристики* $U = f(x)$.

Градувальна характеристика датчика може бути *лінійною* або *нелінійною* залежно від властивостей конструктивних і схемних елементів або вузлів. *Переважає зазвичай датчикам із лінійною (практично лінійною) характеристикою*, особливо в разі вимірювання коливань чи інших динамічних вимірювань.

Слід мати на увазі, що за роботи датчиків можливі *відхилення значень вихідного сигналу*, що відповідає одному й тому ж значенню контрольованого параметра, за прямого й зворотного ходу (проявляється пружність чутливих елементів). Поряд із цим виникають *додаткові динамічні похибки* при вимірюванні повільно й швидкозмінних процесів і залежать вони як від динамічних параметрів цих процесів, так і від динамічних характеристик датчиків.

Динамічними вважаються також похибки, що виникають в умовах експлуатації внаслідок вібрації, тряски тощо. Щоб запобігти в таких випадках одержанню неправильних показів або ж затримці в роботі для заспокоєння власних коливань передбачають амортизатори й демпфери.

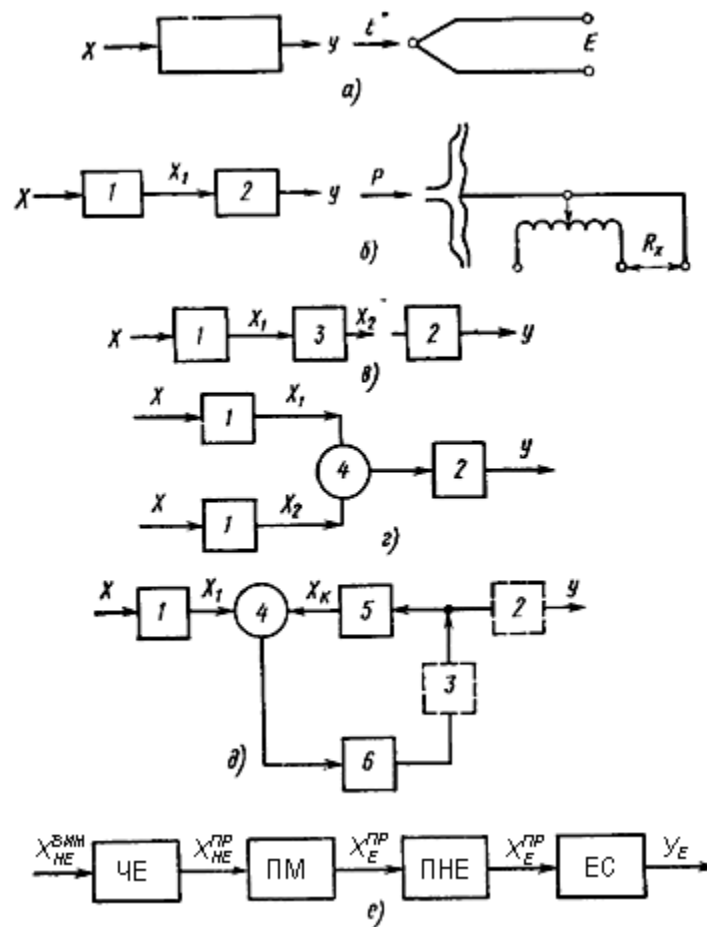


Рис. 3.1. Структурні схеми основних видів датчиків:

а) структурна схема й приклад датчика (термопара), що містить лише первинний перетворювач;

б) структурна схема й приклад датчика (потенціометричний датчик тиску), що містить чутливий елемент 1 та вихідний перетворювач 2;

в) структурна схема каскадного з'єднання елементів датчика (3 – проміжний перетворювач);

г) датчик, побудований за диференціальною схемою (4 – від'ємний елемент);

д) датчик, побудований за компенсаційною схемою (5 – підсилювач; 6 – генератор компенсуючої величини);

е) узагальнена структурна схема датчика неелектричної величини: ЧЕ – пружний чутливий елемент; ПМ – передавальний механізм (проміжний перетворювач); ПНЕ – перетворювач неелектричної величини в електричну (проміжний перетворювач); ЕС – електрична схема (вторинний перетворювач); $X_{ВНМ}^{НЕ}$, $X_{ПМ}^{ПНЕ}$, $X_{ПНЕ}^{ПНЕ}$, Y_E – відповідно вхідний неелектричний, вхідний електричний та вихідний електричний сигнали.

Перспективними напрямками розвитку датчиків є:

- *інтегральне виконання із поєднанням власне датчика й підсилювачів, аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) тощо; під час*

виготовлення датчиків набувають поширення технології мікроелектроніки;

- комбінування кількох датчиків в одному корпусі, що дозволяє за допомогою одного універсального датчика контролювати одночасно кілька фізичних величин;

- комбінування датчиків із виконавчими пристроями, зокрема шляхом використання сплавів з ефектом «пам'яті форми»;

- інтелектуалізація датчиків – об'єднання в одному корпусі датчиків і мікропроцесорів, що забезпечує попередній обробіток сигналів та їх контроль і виробіток рішення щодо них з урахуванням умов навколишнього середовища.

3.3. Фізичні основи дії та будова датчиків

Електростатичні ємнісні датчики – реалізує зміну електричної ємності або діелектричних втрат під дією вимірюваної величини. Ємність між двома обкладками перетворювача – плоского конденсатора визначається так:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S / \delta, \quad (3.1)$$

де ε_0 – діелектрична проникність вакууму $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; ε – відносна діелектрична проникність середовища між обкладками; S – площа обкладки; δ – повітряний зазор.

На рис. 3.2 наведені варіанти конструкції ємнісних перетворювачів – одинарного з однією переміщуваною обкладкою (пластиною); диференційного з однією рухомою та двома нерухомими пластинами.

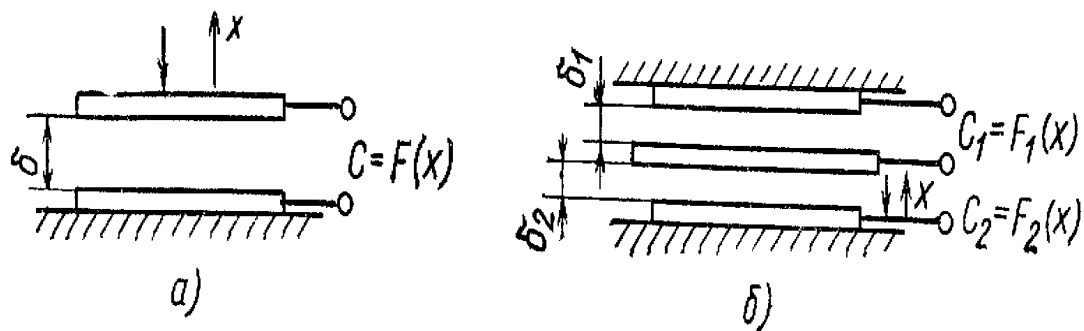


Рис. 3.2. Ємнісні перетворювачі: *a* – одинарний; *б* – диференціальний

Функція ємнісного перетворювача зі змінним повітряним зазором нелінійна

$$C = f(\delta), \quad (3.2)$$

що обмежує діапазон зміни повітряного зазору δ та обумовлює придатність такого перетворювача лише для вимірювання малих переміщень.

Для вимірювання великих лінійних (понад 1 см) та кутових (до 270°) переміщень застосовують перетворювачі із змінною площею пластин за функцією:

$$C = f(S). \quad (3.3)$$

Перетворювачі зі змінною відносною електричною проникністю із функцією:

$$C = f(\varepsilon). \quad (3.4)$$

застосовують для вимірювання рівня рідин, вологості речовин, товщини виробів із діелектриків тощо.

В одинарних ємнісних перетворювачах виникає сила притягання між пластинами. Цей недолік майже усунений у диференціальних перетворювачів, які до того ж мають більшу чутливість, меншу нелінійність функцій перетворення й стійкість до впливу температури, тиску, вологості повітря тощо.

Ємнісні перетворювачі використовують, як правило, у схемах неврівноважених мостів змінного струму із живленням від джерел струму підвищеної частоти (до десятків мегагерц) з тим, щоб підвищити потужність, що надходить до перетворювача й до мостової схеми:

$$W = U^2 \cdot \omega \cdot C = U^2 \cdot 2 \cdot \pi f \cdot C. \quad (3.5)$$

Ємнісні перетворювачі поряд із простотою конструкції, високою чутливістю, малою інерційністю мають і *недоліки*: незначну вихідну потужність, потребу в джерелі струму високої частоти та чутливість до паразитних ємностей

Потенціометричні датчики. Вихідний параметр потенціометричного датчика – опір реостата – змінюється під дією вхідного параметра, яким може бути лінійне переміщення повзунка реостата (безпосередній вплив) або ж зусилля, що передається від мембрани чи поршня як проміжних елементів.

Залежно від характеру зміни опору розрізняють лінійні та функціональні датчики.

За електричною схемою датчики виконуються як потенціометричні (рис. 3.3 а, б), так і мостові з неврівноваженим мостом (рис. 3.3 в).

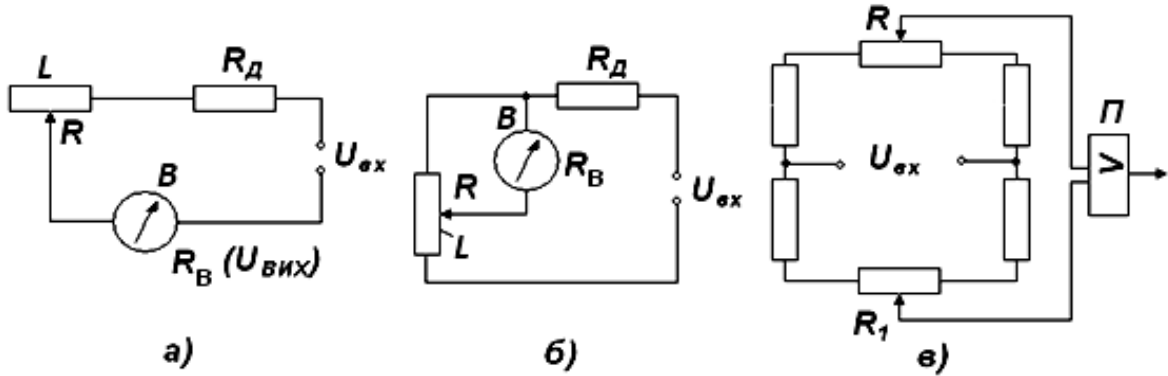


Рис. 3.3. Принципові електричні схеми потенціометричного датчика: а, б – потенціометрична; в – мостова (неврівноважений міст); $U_{\text{вх}}$ – напруга живлення; $U_{\text{вих}}$ – вимірювана(вихідна) напруга; l – переміщення повзунка реостата; R – опір обмотки потенціометра; $R_{\text{д}}$ – додатковий (регульовальний) резистор; B – вимірювач; $R_{\text{в}}$ – вимірюваний опір; Π – підсилювач; R_1 – реохорд

Вихідна напруга потенціометричних датчиків пропорційна переміщенню l повзунка реостата та напрузі живлення $U_{\text{вх}}$.

Попри простоти конструкції ці датчики мають значну *нелінійну характеристику* $U_{\text{вих}} = f(l)$, що стає лінійною лише під час значного вхідного опору схеми вимірювання (вимірювального приладу), до якої під'єднується датчик. Загалом же характер залежності $U_{\text{вих}} = f(l)$ залежить від опору потенціометра, опору додаткового резистора та згаданого вхідного опору вимірювальної схеми (вимірювача).

Мостові схеми завдяки незначній нелінійності вихідної характеристики набули переважного поширення.

Потенціометричні датчики є дискретними перетворювачами, оскільки їх опір змінюється ступінчасто за безперервної зміни контрольованого параметра. Це зумовлює появу додаткової похибки квантування, зменшити яку вдається збільшенням числа витків реостата на одиницю вимірюваної величини.

Потенціометричні датчики виготовляються, як правило, у вигляді реохорда. Матеріал використовуваного проводу: манганін, константан, фехраль у високоточних датчиках – сплав платини та іридію. Повзунок (щітка) реостата виготовляються із цього ж таки сплаву чи із срібла. Каркас датчика може бути металевим (з алюмінію) або пластмасовим.

Тензорезисторні (тензометричні) датчики. Фізичною основою дії цих датчиків є явище тензоефекту – зміни активного опору провідників (тензорезисторів) за їх механічного деформування. Тензорезистор характеризується коефіцієнтом тензочутливості $k_{m.ч.}$.

$$k_{m.ч.} = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad (3.6)$$

де $\Delta R/R$ – відносна зміна опору тензорезистора; $\Delta l/l$ – відносна деформація перетворювача.

Факторами, що визначають $k_{m.ч.}$ є матеріал тензорезистора, якість підкладки (основи) та вид клею, яким тензорезистор наклеєний на основу.

За електричною схемою тензодатчики виконуються у вигляді потенціометра або моста чи напівмоста (рис. 3.4).

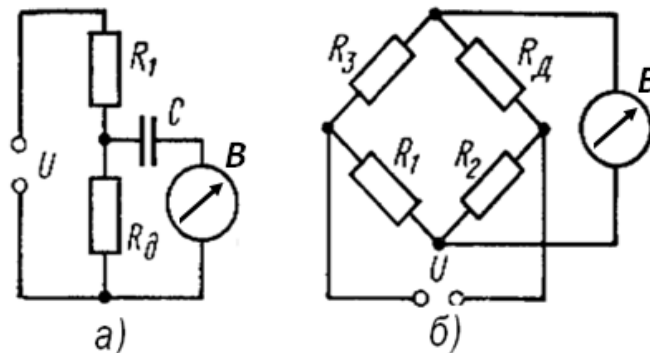


Рис. 3.4. Принципові електричні схеми тензометричного датчика:

a – потенціометрична; *б* – мостова; R_1, R_2, R_3, R_4 – опори тензорезисторів; U – напруга живлення; ΔU – зміна вихідної напруги; I_n – індикатор; C – конденсатор

Вихідним сигналом датчика є зміна напруги ΔU , що залежить від напруги живлення та відношення опорів тензорезисторів. У разі потенціометричної схеми:

$$\Delta U = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2}, \quad (3.7)$$

де R_1, R_2 – послідовно з'єднані резистори, один із яких є тензорезистором.

Для мостових схем діють такі залежності:

$$\Delta U = U \cdot \frac{\Delta R}{R} \text{ (схема повного моста),} \quad (3.8)$$

$$\Delta U = \frac{U}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R} \text{ (схема напівмоста).} \quad (3.9)$$

Потенціометричні схеми, що живляться постійним струмом, мають суттєвий недолік – наявність постійної складової на виході, яка ускладнює вимірювання малих значень ΔU . Цього недоліку не мають мостові схеми, оскільки вони балансуються з метою досягти рівності опорів діагоналей моста (рис. 3.4 б).

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3. \quad (3.10)$$

Балансування мостів постійного струму здійснюється за активним опором, а мостів змінного струму – за активною й реактивною складовими.

Набули поширення дротові, фольгові (рис. 3.5) та напівпровідникові тензорезисторні датчики. Дротові датчики є спіраллю (решіткою), що складається із кількох витків дроту й наклеюється на спеціальну паперову чи лакову (плівкову) основу. Зверху спіраль закривається матеріалом основи.

Матеріал дроту – константан, манганін, ніхром та інші метали й сплави, що мають високий коефіцієнт тензочутливості й малий температурний коефіцієнт опору.

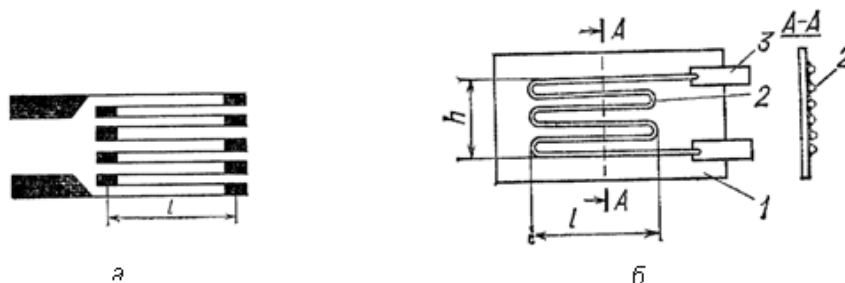


Рис. 3.5. Фольговий (а) та дротовий (б) тензорезистори:

1 – підкладка; 2 – дріт; 3 – виводи

Фольгові тензорезистори виконують із тонких стрічок фольги, наклеєних на лакову основу. Напівпровідникові тензорезистори виготовляються із германію, кремнію, арсеніду галію та інших матеріалів із значним тензоефектом. Ці датчики мають у 50–60 разів більший коефіцієнт тензочутливості ($k_{m.ч} = 100–120$), ніж у дротових та фольгових датчиків. Недоліками є мала механічна міцність та нелінійна характеристика.

Вид пружного елементу тензорезисторного датчика (балка, скоба, мембрана, пружина тощо) визначає його функціональне призначення – вимірювання переміщення, тиску, сили тощо. З іншого боку деформованість та частотні властивості пружного елементу визначають чутливість датчика та його придатність для контролю (вимірювання) статичних або динамічних процесів.

Слід зазначити, що під час конструювання тензорезисторних датчиків можна значно зменшити температурну й часову нестабільність їх оптимальною жорсткістю, а також шляхом поліпшення технології кріплення тензорезисторів на пружному елементі.

Електромагнітні датчики (індуктивні, трансформаторні, магнітопружні) реалізують залежності характеристик магнітного кола (магнітного опору, магнітної проникності, магнітного потоку тощо) від механічного впливу на елементи цього кола.

Індуктивні датчики (рис. 3.6 а, б, в) перетворюють переміщення в зміну індуктивності. Конструктивно індуктивні датчики є дроселем із змінним повітряним зазором (рис. 3.6 а) або ж із змінною площею поперечного перерізу магнітопроводу S (рис. 3.6 б). Вихідним параметром датчика є зміна індуктивності L або повного опору Z обмотки, розміщеної на осердді. Набули також поширення індуктивні датчики соленоїдного типу із розімкненим магнітним колом (рис. 3.6 в).

Особливостями індуктивних датчиків є:

- обмежений діапазон вимірювань 0,01–2 мм датчиків із змінним повітряним зазором (рис. 3.5 а), оскільки в разі великого зазору залежність $L = f(\delta)$ стає нелінійною;
- лінійність у діапазоні вимірювань 5–8 мм датчиків зі змінною площею поперечного перерізу магнітопроводу;
- придатність для вимірювання значних переміщень (до 50–60 мм) соленоїдних датчиків.

Суттєвий недолік індуктивних датчиків – наявність на виході постійної складової можна компенсувати застосуванням мостових або диференційних схем їх увімкнення.

Трансформаторні датчики складаються із магнітопроводу з двома обмотками (рис. 3.6 г, д) та феромагнітного осердя, під час переміщення якого змінюється взаємна індуктивність обмоток. Зниження постійної складової вихідного сигналу досягають зустрічним увімкненням обмоток (рис. 3.6 е) за диференційно-трансформаторною схемою.

Похибка трансформаторних датчиків залежить від температури, а також від показників якості електроенергії – коливань напруги й частоти.

Індуктивні й трансформаторні датчики вигідно вирізняють серед інших високий коефіцієнт перетворення (можна обійтися без підсилювача) та простота конструкції.

Магнітопружні датчики є феромагнітним магнітопроводом, за деформації якого (стиснення, розтягування або скручування) змінюється магнітна проникність та магнітний опір, що спричиняє зміну індуктивності обмотки, яка знаходиться на осерді (рис. 3.6 ж), або ж взаємної індуктивності між обмотками (рис. 4.5 и). Магнітопружні датчики *дросельного типу* (рис. 3.6 ж, з) перетворюють зміну магнітної проникності осердя на зміну повного електричного опору обмотки Z дроселя. Ці датчики є простими, малочутливими до коливань напруги та температури, а тому широко застосовуються для вимірювань, що не потребують високої точності. Магнітопружні датчики *трансформаторного типу* (рис. 3.6 и) за точністю й коефіцієнтом перетворення є кращими від дросельних.

Датчики термоопору (термометри опору) (рис. 3.7) реалізують залежність електричного опору металів від температури. Конструктивно термометр опору виконується у вигляді тонкого мідного чи платинового дроту, намотаного *біфілярно* на неелектропровідному термостійкому каркасі, що розміщений всередині захисного кожуха.

Мідні термометри опору працюють в межах температури до + 180 °С із лінійною характеристикою. Платинові термометри опору мають ширший діапазон вимірювань – до + 650 °С, але їх температурна характеристика дещо нелінійна.

Похибки термометрів опору можуть бути такі причини:

- відхилення їх опору за температури 0 °С;
- відхилення температурної характеристики від градууювальної таблиці;
- нестабільність опору з'єднувальних проводів;
- нагрів термоопору вимірювальним струмом.

Гранична довжина лінії зв'язку між термометрами опору та вимірювальною схемою при обмеженнях в опорі 2,5 Ом залежить від матеріалу проводу та площі його поперечного перерізу. Термометр опору вмикається до неврівноваженої мостової схеми, що живиться від стабілізованого джерела постійного струму.

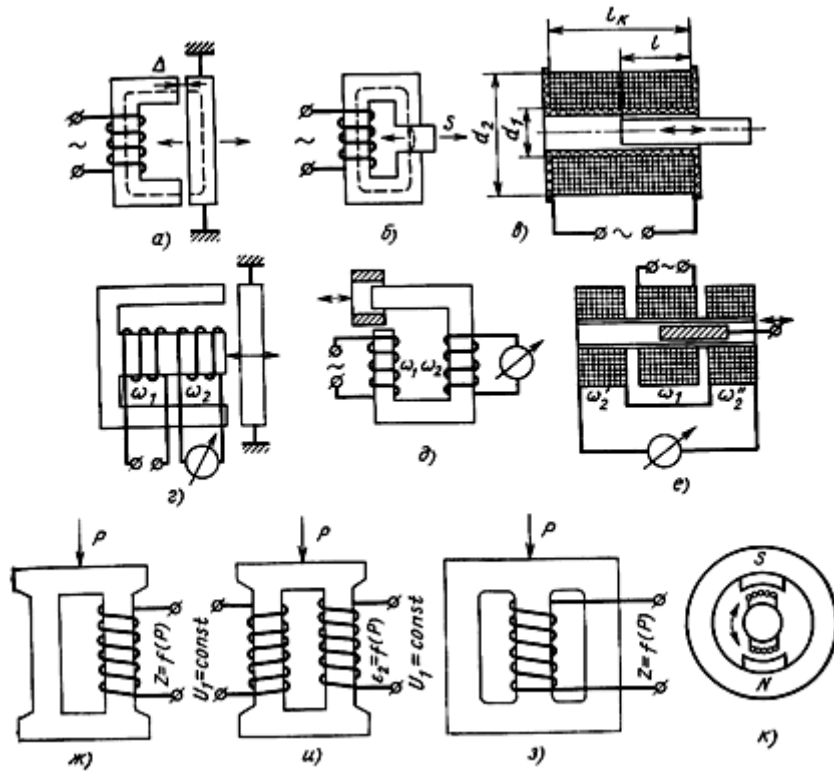


Рис. 3.6. Варіанти конструкції електромагнітних датчиків:

- a* – індуктивний датчик зі змінним повітряним зазором;
- б* – індуктивний датчик з регульованою площею поперечного перерізу магнітопроводу; *в* – індуктивний датчик соленоїдного типу;
- г* і *д* – трансформаторний датчик; *е* – диференціально-трансформаторний датчик із послідовним з'єднанням обмоток;
- ж* і *з* – магнітопружний датчик дросельного типу;
- и* – магнітопружний датчик трансформаторного типу;
- к* – індукційний датчик

З метою зменшення похибки термометр опору приєднується за трипровідною схемою: R_1 – R_2 – резистори моста; R_n – підгончні резистори, опір яких разом із опором лінії зв'язку встановлюють як правило рівним 2,5 Ом. Вихідним параметром мостової схеми є напруга U_x , значення якої змінюється із зміною опорів термодатчика.

Поряд із металевими термоопорами знаходять застосування напівпровідникові опори – *терморезистори*, які мають незначні габарити, високий температурний коефіцієнт, високу чутливість, але не позбавлені недоліків – нелінійна температурна характеристика, низька стабільність та взаємозамінність.

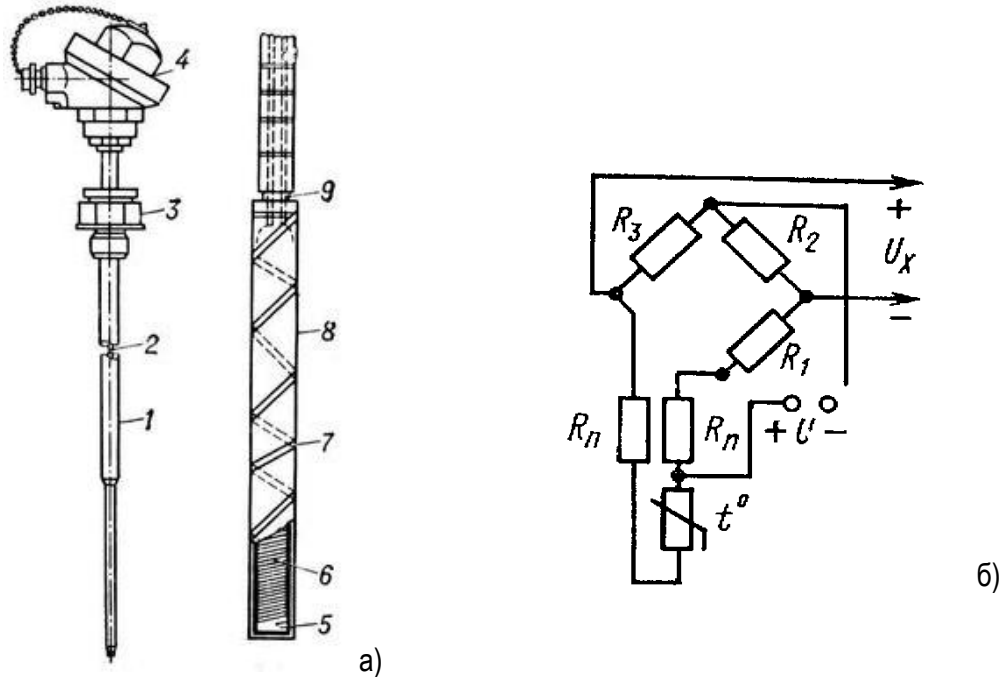


Рис. 3.7. Термометр опору: а) зовнішній вигляд та будова;

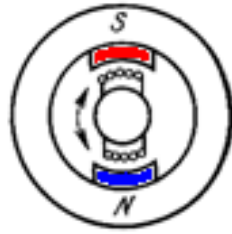
1 – сталевий чохол; 2 – чутливий елемент; 3 – штуцер для встановлення термометра; 4 – головка для приєднання термометра до електровимірювального приладу; 5 – слюдяний каркас; 6 – біфілярна обмотка з платинового дроту; 7 – срібна стрічка; 8 – слюдяна накладка; 9 – срібні виводи; б) увімкнення термометра опору t^0 у схему неврівноваженого моста

Індукційні датчики (рис. 3.8) під дією вхідної величини генерують електричну енергію, реалізуючи явище електромагнітної індукції. ЕРС, що наводиться в контурі, залежить не від абсолютного значення магнітного потоку, а від швидкості його зміни в контурі датчика. Конструктивно індукційні датчики виконують із постійним магнітом або ж електромагнітом, через обмотку якого пропускається постійний струм. Індукційні датчики застосовують лише для вимірювання швидкості кутових та лінійних переміщень

П'єзоелектричні датчики базуються на використанні явища п'єзоелектричного ефекту, що оцінюється п'єзомодулем K , який

зв'язує між собою силу F , що прикладається до певного матеріалу й електричний заряд Q , який виникає при цьому. Так,

$$Q = K \cdot F . \quad (3.11)$$



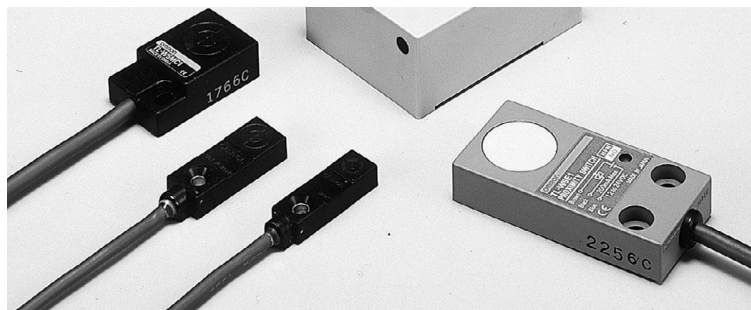
а)



б)



в)



г)

Рис. 3.8. Індукційний датчик: а) генераторний; б) квадратний датчик зазору; в) циліндричний датчик зазору; г) плоский датчик зазору

П'єзоелектричні властивості мають ряд природних кристалічних матеріалів (кварц, турмалін та ін.) і синтетичних кристалів (сегнетова сіль, дігідрофосфат амонію, титанат барію тощо). Сфера застосування п'єзоелектричних датчиків – вимірювання тиску, сили, віброприскорень тощо. Оскільки вихідна потужність датчиків дуже мала, їх використовують разом з підсилювачами з високим вхідним опором. На рис. 3.9. наведені повна й спрощена схеми вмикання п'єзоелектричного датчика.

Вихідним сигналом датчика є напруга $U_{вих}$:

$$U_{вих} = \frac{K \cdot P}{C_{\partial} + C_{каб} + C_{вимір}}, \quad (3.12)$$

де C_{∂} , $C_{каб}$, $C_{вимір}$ – відповідно ємності власне п'єзоелектричного перетворювача, з'єднувального кабелю та вхідна ємність вимірювального кабелю.

Похибки п'єзоелектричного датчика складаються із похибки від зміни ємності $C_{вх}$, температурної похибки, похибки від способу встановлення датчика на об'єкті та ін. Серед переваг п'єзоелектричних датчиків – простота конструкцій за малих габаритів, надійність та придатність для вимірювання швидкоплинних величин.

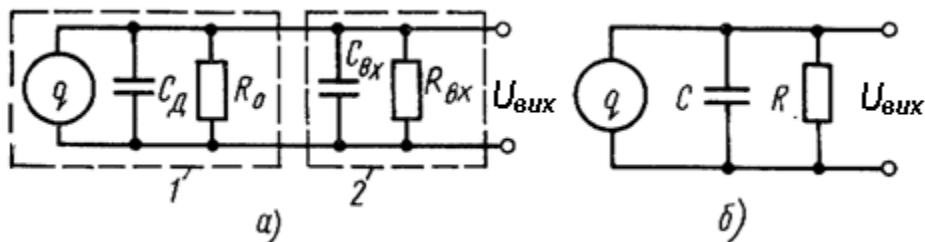


Рис. 3.9. Принципові електричні схеми: (а – повна, б – спрощена) увімкнення п'єзоелектричного датчика до вимірювального кола: C_D , R_D – ємність та опір п'єзоелектричного перетворювача; $C_{вх} > C_{каб} + C_{вк}$ – ємність кабелю й вхідна ємність вимірювального кола; q – п'єзоелектричний датчик; 2 – вимірювальне коло; $U_{вих}$ – вихідна напруга датчика

Термоелектричні датчики (термопари) базуються на явищі виникнення в спаяних чи зварених різнорідних провідниках термозалежної ЕРС. Значення електрорушійної сили залежить від різниці температур гарячого й холодного спаїв та матеріалу електродів.

Контрольовану температуру визначають за термоЕРС, виміряною за постійної температури холодного спаю ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) або ж вносячи відповідну поправку на існуюче відхилення від $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. З тим, щоб спростити введення цієї поправки, холодний спай термопары виносять із зони високих температур і наближають, використовуючи компенсаційні з'єднувальні проводи, до вимірювального приладу. Частіше поправка вводиться автоматично, скажімо під час використання спеціальних приладів – потенціометрів типу КСП. Похибки термопар спричиняються старінням електродів, що призводить до відхилень дійсної характеристики від градування, а також нелінійністю характеристики.

Як спосіб термокомпенсації холодного спаю використовують мостову схему, що вмикається послідовно із термопарою (рис. 3.10) і розміщується поблизу цього спаю. Термочутливість мосту надає те, що резистори R_1 – R_3 виконують із манганіну, а R_M – із міді (нікелю). Живлення мостової схеми здійснюється від стабілізованого джерела постійного струму. Міст врівноважений за температури $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а за змінної температури на його виході з'являється напруга U_K , що дорівнює ЕРС термопары за цієї температури. Компенсація забезпечується шляхом віднімання вказаної напруги із ЕРС термопары.

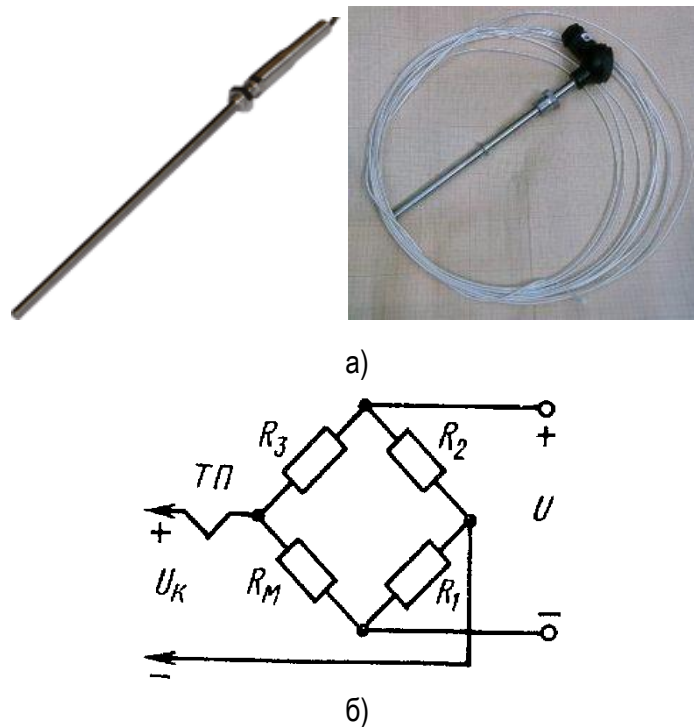


Рис. 3.10. Термоелектричний датчик (термопара): а) загальний вигляд; б) схема увімкнення термопары до мостової схеми

Фотоелектричні датчики – перетворюють оптичне випромінювання (енергію фотонів) в електричну енергію.

Такі пристрої можуть бути:

- із зовнішнім фотоелементом, коли випромінювання сприяє виходу електронів з поверхневого шару речовин (вакуумні й газонаповнені фотоелементи) (рис. 3.11);
- із внутрішнім фотоелементом, коли випромінювання призводить до зміни кількості вільних зарядів у речовині, змінюючи її провідність або ж збуджуючи внутрішню е.р.с. (фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори) (рис. 3.12).

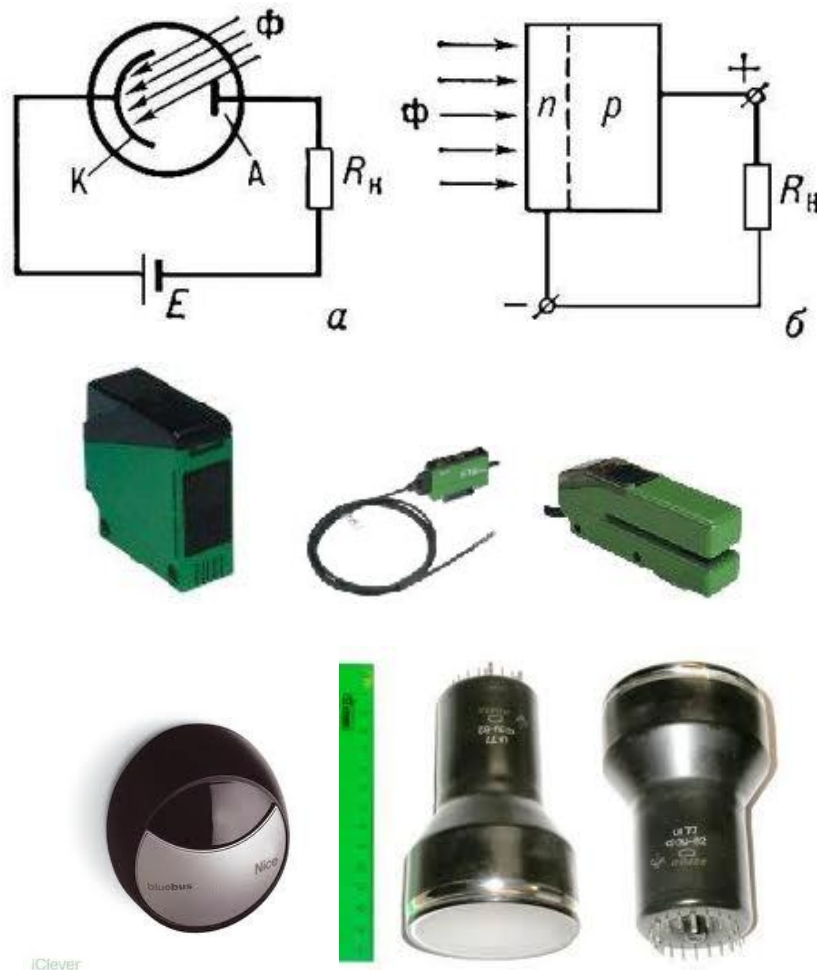


Рис. 3.11. Фотоелемент із зовнішнім (а) і внутрішнім (б) фотоелементом: К – фотокатод; А – анод; Φ – світловий потік; n і p – області напівпровідника з донорною й акцепторними домішками; E – джерело постійного струму, необхідне для створення в просторі між катодом К та анодом А електричного поля, яке прискорює фотоелектрони; R_н — навантаження; пунктирною лінією позначений p - n-перехід

Властивості фотоелементів оцінюються світловою, спектральною, вольтамперною та частотною характеристиками, що є залежностями фотоструму відповідно від світлового потоку (освітленості), довжини хвилі випромінювання, напруги та частоти.

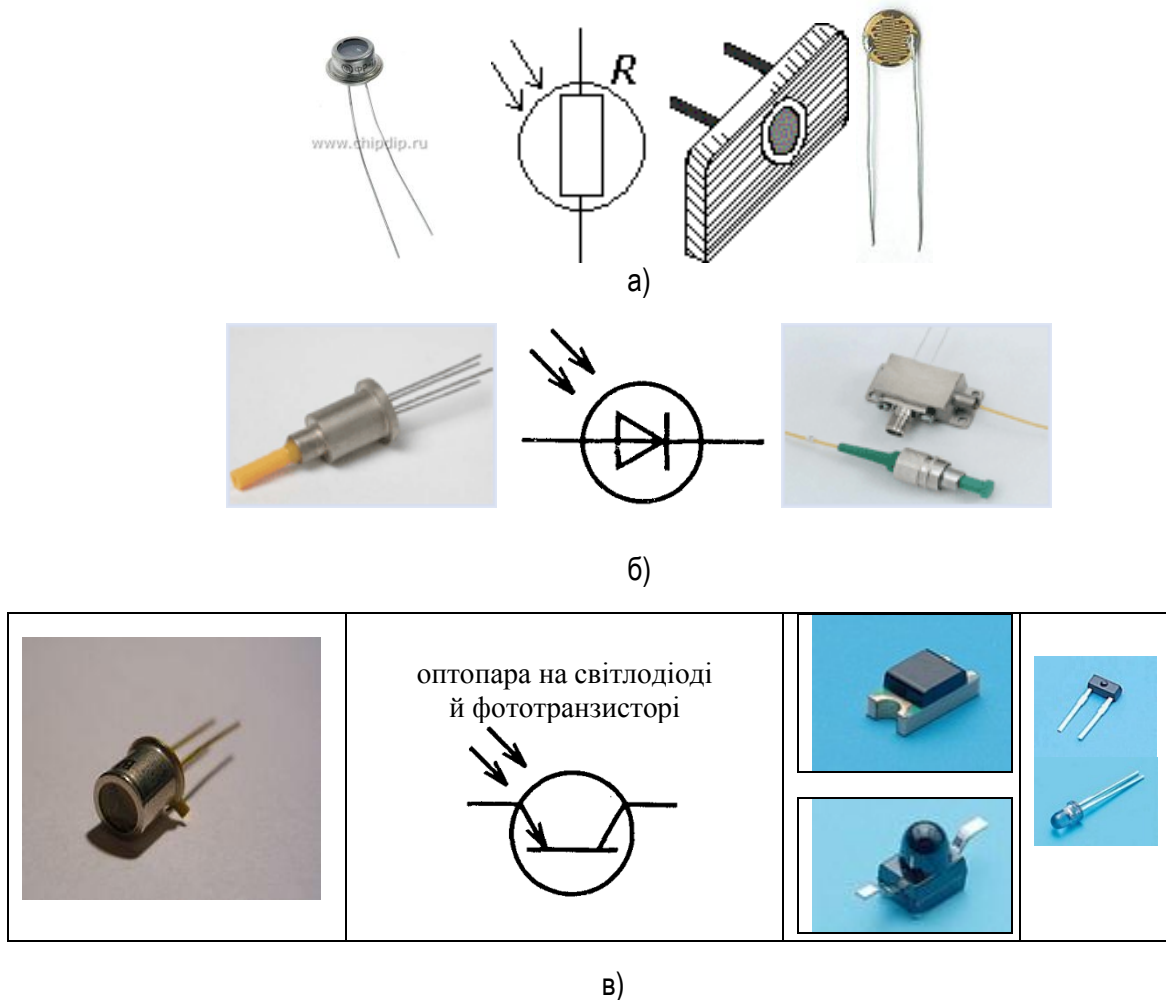


Рис. 3.12. Фоторезистор (а), фотодіод (б) і фототранзистор (в)

Механотронні датчики є електронною лампою із анодом, що може під дією зовнішнього впливу зміщуватися відносно катоду. Частіше це діод, анод якого переміщується паралельно нерухомому катоду. Із зменшенням зазору між анодом і катодом зростає анодний струм, тобто механічне переміщення перетворюється в електричний сигнал. Звідси й основні варіанти використання – вимірювання незначних лінійних переміщень, тиску.

Механотронний датчик оцінюється за чутливістю за струмом

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta l}, \quad (3.13)$$

де ΔI_a – зміна анодного струму, mA; Δl – переміщення анода, мм.

З метою підвищення чутливості в механотроні встановлюється симетрично катоду два рухомі аноди (рис. 3.13) або ж використовують тріоди із рухомим анодом чи сіткою.

Переваги механотронних датчиків – простота конструкції, висока чутливість за струмом (до 100 mA (мм) – дозволяє обійтися без підсилювача. Недоліками механотронів є значний вплив температури на точність вимірювань, недостатня лінійність характеристики, потреба у високостабільному джерелі живлення – допустима нестабільність анодної напруги становить $U_a \leq 0,1\%$.

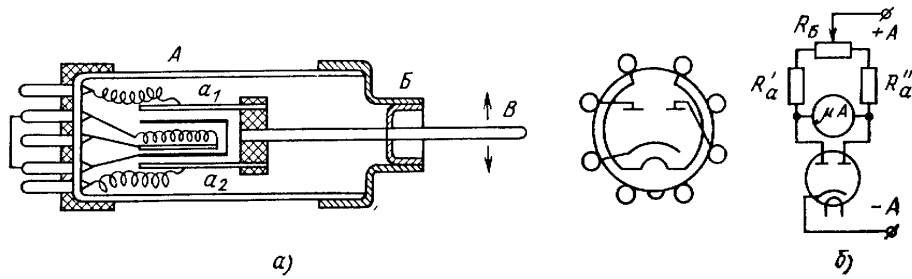


Рис. 3.13. Механотронний датчик лінійних переміщень:
а) загальний вигляд: a_1, a_2 – рухомі аноди; б) схема увімкнення

Датчики Холла. Інтегральні датчики магнітного поля переважно використовують ефект Холла, відкритий американським фізиком Едвіном Холлом (E. Hall) в 1879 р. Ефект Холла полягає в тому, що коли провідник із струмом поміщений у магнітне поле, то виникає електрорушійна сила (ЕРС), направлена перпендикулярно і струму, і полю (рис. 3.14).

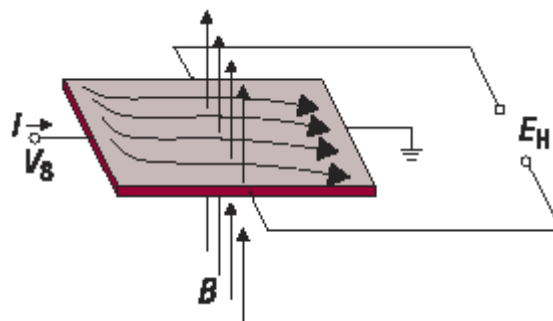


Рис. 3.14. Ілюстрація ефекту Холла

По тонкій пластині напівпровідникового матеріалу протікає струм I . За наявності магнітного поля на рухомі носії заряду (електрони) діє сила Лоренца, яка викривляє траєкторію руху електронів, що призводить до перерозподілу об'ємних зарядів у напівпровідниковій пластині. Внаслідок цього на краях пластини, паралельних напрямку протікання струму, виникає ЕРС, що отримала назву *ЕРС Холла*. Ця електрорушійна сила, пропорційна векторному добутку індукції \mathbf{B} на густину струму \mathbf{j} :

$$E_n = \frac{d}{q_n} \mathbf{B} \times \mathbf{j} \quad (3.14)$$

де d – ширина пластини; q – заряд частки-носія; n – концентрація носіїв.

За зниження концентрації носіїв ЕРС Холла зростає, оскільки в якості матеріалу для датчиків Холла переважно використовуються такі напівпровідники, як кремній, арсенід галію та ін.

Для прямокутної пластини з однорідними струмом і магнітним полем, направленими як показано на рис. 3.15, ця ЕРС рівна

$$E_n = k_n V_S B, \quad (3.15)$$

де k_n – постійна Холла; V_S – напруга, що створюється на струмопідвідних затискачах датчика Холла. Для кремнію k_n складає величину порядку 70 мВ/(В·Тл), тому, як правило, ЕРС датчика Холла потрібно підсилювати. До того ж кремній має тензорезистивний ефект, що полягає в зміні опору під час механічного напруження. Досягти бажаного зменшення цього впливу вдається відповідною орієнтацією елемента Холла на інтегральній схемі й використанням декількох елементів на кристалі. На рис. 3.15 показано два елементи Холла, розташовані поруч на кристалі інтегральної мікросхеми (ІМС), які позиціоновані таким чином, що випробовують практично однакове механічне напруження, яке викликає зміну опору R .

До елемента, який на рисунку показаний зліва, прикладена напруга збудження V_S , направлена по вертикальній осі, а до наведеного справа – по горизонтальній. Під час складання сигналів цих двох датчиків помилка, викликана деформацією кристалу, компенсується.

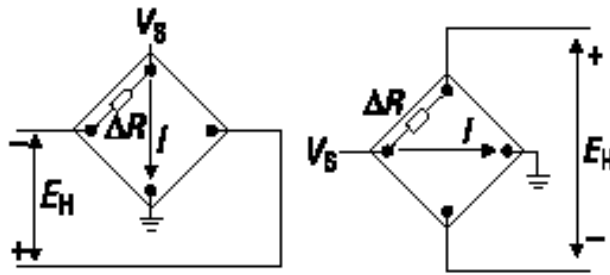


Рис. 3.15. Розташування двох елементів Холла на ІМС, що компенсує помилку, викликану механічною деформацією кристала

Датчики Холла є основою багатьох таких типів датчиків, як датчики лінійного або кутового переміщення, датчики магнітного поля, датчики струму, датчики витрати та ін. Зручність безконтактного спрацьовування (повна відсутність механічного зношування), невисока вартість, простота використання роблять їх незамінними в приладобудуванні, автомобільній, авіаційній та інших галузях промисловості. Інтегральні датчики Холла випускають такі фірми як Honeywell, Melexis, Allegro Microsystems, Micronas Intermetall, Siemens, Analog Devices та ін.

Перша група інтегральних датчиків Холла – це *лінійні датчики*, що застосовуються у вимірниках напруженості магнітного поля. Як правило, ці пристрої містять схеми підсилення сигналу датчика. Необхідна попередня обробка сигналу зазвичай полягає в його підсиленні й температурній компенсації. Може знадобитися також стабілізація напруги живлення. За відсутності магнітного поля вихідна напруга датчика має дорівнювати нулю, тому потрібен диференціальний підсилювач (рис. 3.16).

Сучасні технології дозволяють ввести до складу ІМС датчиків магнітного поля складні цифрові системи обробки інформації. Прикладом такої ІМС може служити HAL805 фірми Micronas Intermetall, що містить на кристалі в трьохвивідному корпусі ТО92 АЦП, ЦАП, ЦПС та незалежну пам'ять. Така структура дозволяє програмувати чутливість і зсув датчика, здійснювати фільтрацію перешкод і механічних обурень.

Друга група датчиків Холла включає мікросхеми компараторного типу з логічними рівнями напруги на виході. Група логічних датчиків Холла більш чисельна через більшу кількість варіантів можливих застосувань.

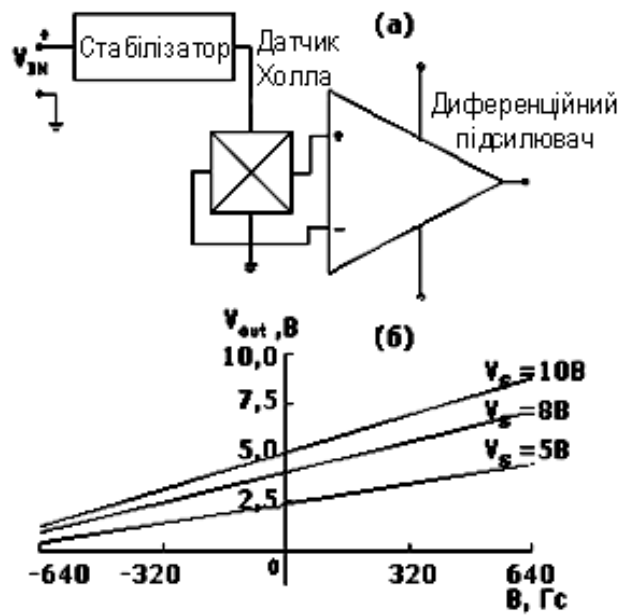


Рис. 3.16. Схема ІМС лінійного датчика Холла (а) та його характеристики перетворення (б)

Мікросхеми з логічним виходом (рис. 3.17 а) діляться на дві підгрупи: перемикачі й тригери. *Уніполярний перемикач* спрацьовує лише за наявності магнітного поля однієї полярності й гарантує вимкнений стан за відсутності магнітного поля; магнітне поле протилежної полярності не чинить на нього жодного впливу (рис. 3.17 б).

Біполярний тригер, навпаки, реагує на обидві полярності: включається під час наближення північного або південного полюсів магніту, вимикається лише в тому випадку, якщо поле з протилежним знаком досягне певного рівня. Термін «біполярний перемикач» зазвичай застосовується до тригерів, що реагують на зникнення поля. Такі перемикачі переходять у включений стан за наявності магнітного поля, а вимикаються під час зниження рівня поля тієї ж полярності, відсутності поля або за наявності поля з протилежним знаком (рис. 3.17 в). Наявність рівня гістерезису, який є різницею між величинами магнітного поля в точках включення й виключення, підвищує перешкодозахищеність пристрою.

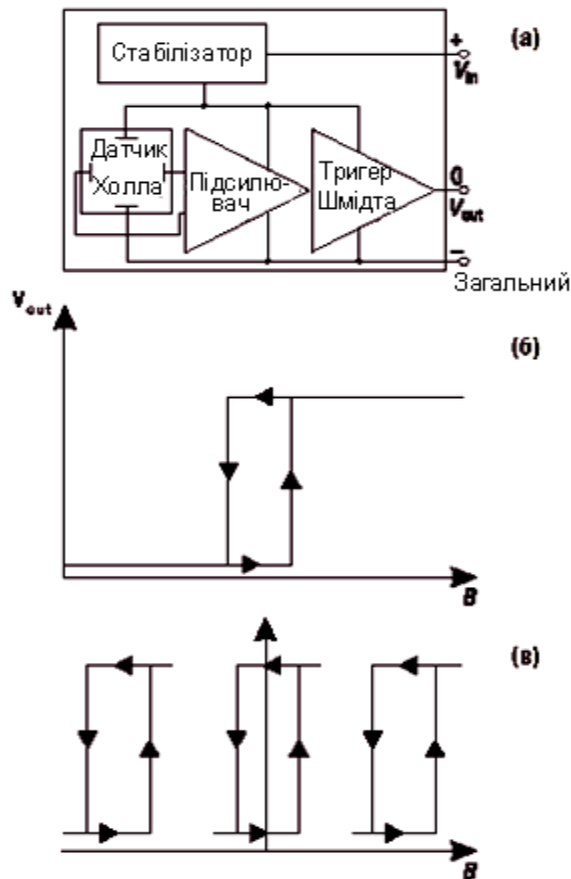


Рис. 3.17. Логічний датчик Холла

Застосування як лінійних, так і логічних, датчиків Холла є досить обширним. Лінійні датчики Холла застосовуються як:

- датчики струму;
- приводи змінної частоти обертання;
- схеми управління й захисту електродвигунів;
- датчики положення;
- датчики витрати;
- безколекторні двигуни постійного струму;
- безконтактні потенціометри;
- датчики кута повороту;
- детектори феромагнітних тіл;
- датчики вібрації;
- тахометри.

Логічні датчики Холла використовуються в:

- датчиках частоти обертання;
- пристроях синхронізації;
- датчиках систем запалювання автомобілів;

- датчиках положення (виявляють переміщення менше 0,5 мм);
- лічильниках імпульсів (принтери, електроприводи);
- датчиках положення клапанів;
- системах блокування дверей;
- безколекторних двигунах постійного струму;
- вимірниках витрати;
- безконтактних реле;
- детекторах наближення;
- зчитувальних пристроях магнітних карток або ключів;
- датчиках паперу (у принтерах).

Лінійні датчики Холла можуть бути використані в складі вимірників сили струму в межах від 250 мА до тисяч ампер. Найважливішою перевагою таких датчиків є повна відсутність електричного зв'язку з вимірюваним колом. *Лінійні датчики дозволяють вимірювати постійні й змінні струми, у тому числі струми досить високої частоти.* Якщо лінійний датчик Холла розташований поблизу провідника із струмом, то вихідна напруга датчика пропорційна індукції магнітного поля, що оточує провідник. Величина індукції, у свою чергу, пропорційна струму.

У простому випадку *датчик струму* є конструкцією, у якій датчик Холла встановлюється біля проводу, по якому тече вимірюваний струм (рис. 3.18 а). Такі датчики використовуються для вимірювання великих струмів, особливо в лініях електропередавання. При цьому магнітна індукція B визначається за формулою

$$B = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{r} \text{ [Тл]}, \quad (3.16)$$

де r – відстань від центру чутливої області датчика до осі симетрії провідника в метрах.

Чутливість датчика струму може бути значно збільшена шляхом використання концентратора магнітного потоку у вигляді магнітопроводу з прорізом, у який поміщається лінійний датчик Холла (рис. 3.18 б).

У цьому випадку індукція магнітного потоку, що проходить через датчик, визначається за формулою

$$B = 12,57 \cdot 10^{-7} \frac{IN}{d}, \quad (3.17)$$

де N – кількість витків котушки концентратора магнітного потоку;
 d – довжина прорізу в кільцевому магнітопроводі концентратора магнітного потоку.

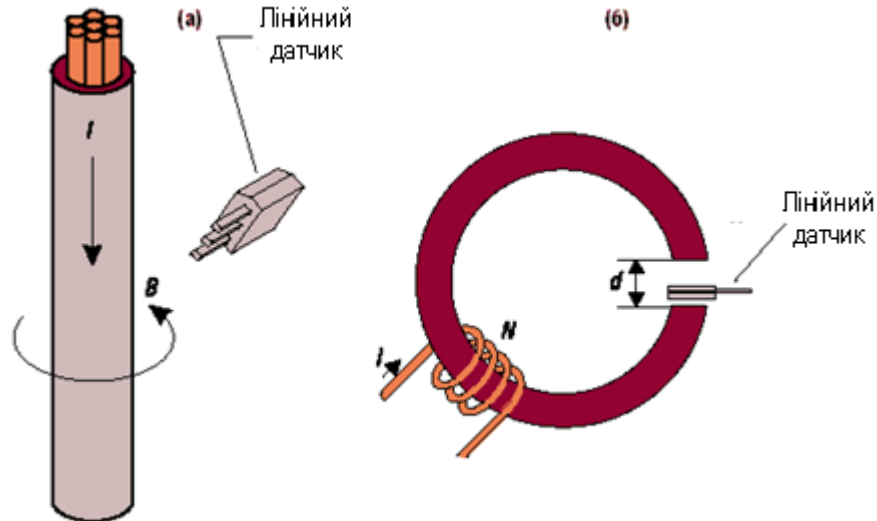


Рис. 3.18. Конструкція датчиків струму на базі лінійного датчика Холла

3.4. Вимоги до датчиків засобів технічного діагностування

Датчики як невід’ємна складова комплексу діагностичної апаратури перебувають у найбільш складних експлуатаційних умовах, оскільки на них безпосередньо впливають як об’єкт діагностування, так і контрольоване середовище. При цьому одержана інформація спотворюється залежно від принципу взаємодії датчика з об’єктом діагностування та характеру його взаємодії з навколишнім середовищем.

Аналіз впливу експлуатаційних факторів на характеристики датчиків та вимірюваного тракту засобів технічного діагностування загалом є підставою для визначення кількох груп вимог:

- вимоги до датчиків, залежні від умов експлуатації;
- вимоги до датчиків, обумовлені видом та характером змін вхідної (контрольованої) величини;
- вимоги до датчиків, обумовлені конструкційними особливостями;
- вимоги, обумовлені способом взаємодії датчика із робочим середовищем та об’єктом діагностування.

Вимоги до датчиків залежно від умов експлуатації. До датчиків під час конструювання висуваються особливі вимоги щодо механічної міцності, стійкості до механічних і температурних впливів. Пояснити це можна тим, що на датчик з боку об'єкта діагностування впливає комплекс експлуатаційних факторів і передусім механічних (ударні та вібраційні навантаження) і температурних (температура робочого середовища та об'єкта в місці встановлення датчика).

Залежно від режиму діагностування, місця встановлення та способу монтажу датчиків вони мають виготовлятися в одному із перелічених нижче виконань або їх комбінації.

Звичайне виконання – датчик не передбачений для роботи в умовах інтенсивних механічних і температурних впливів, підвищення концентрації пилу, бризок, вибухонебезпечного середовища.

Віброміцне (удароміцне) виконання – датчик здатний протидіяти руйнуючому впливу вібраційних (ударних) навантажень та зберігати працездатність після їх дії.

Граничні значення вібраційних навантажень – прискорення до $10 g$ у частотному діапазоні 10–300 Гц; амплітуди не більше 1,5 мм. Граничні значення ударних навантажень багатократної дії – прискорення до $15 g$; тривалість імпульсу 5–10 мс.

Вібростійке виконання – датчик передбачений виконувати свої функції та зберігати технічні характеристики в межах норм, зазначених у нормативно-технічній документації, в умовах дії вібрацій у заданому діапазоні частот, амплітуд і прискорень. Граничні значення вібрацій – прискорення до $10 g$, амплітуда не більше 1,5 мм у діапазоні частот 10–300 Гц.

Температуростійке виконання – датчик передбачений для виконання своїх функцій із збереженням характеристик за дії температур у заданому діапазоні.

Слід зазначити, що з боку об'єкта діагностування до датчика теж висуваються вимоги – вимоги щодо зручності монтажу, обслуговування й демонтажу. Досягти цього можна обґрунтованим спрощенням форми датчика, зменшенням габаритів і досконалим вирішенням способу кріплення. Безумовно, що встановлення датчика не повинне зашкодити об'єкту діагностування.

Поряд із факторами, що впливають на датчик з боку об'єкта діагностування, можна виділити три групи факторів навколишнього середовища:

- кліматичні (температура, вологість, атмосферні опади, сонячна радіація);
- засміченість та агресивність повітря;

- акустичні шуми;
- зовнішні електричні й магнітні поля.

Це обумовлює ряд спеціальних вимог до датчиків:

- щодо стійкості впливу підвищеної температури повітря (діапазон температур $-30\text{--}+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносна вологість до 80 % за температури $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ – група II за ГОСТ 12997-76 або діапазон температур $-10\text{--}+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ та відносна вологість до 90 % за температури $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ – група III за ГОСТ 9763-67);

- щодо захищеності від впливу навколишнього середовища – пилозахищене, бризкозахищене, вологозахищене виконання; герметичне виконання (допускає повне занурення у воду); виконання, призначене для використання у середовищі з вмістом сірчаных та вуглеводневих з'єднань, аміаку, окислів азоту тощо;

- щодо стійкості до впливу акустичних шумів та сонячної радіації акустичні шуми впливають переважно на датчики великих габаритів подібно до вібраційних навантажень, причому незалежно від ступеня й амортизації та способу кріплення; сонячна радіація спричиняє хімічний розклад або окислення ряду матеріалів, інтенсивне старіння пластмас, руйнування виробів із гуми тощо;

- щодо захищеності від впливу зовнішніх електричних і магнітних полів, які можуть спричинити перешкоди та спотворення інформації, що надходить від датчиків.

Вимоги до датчиків, обумовлені видом і характером контролюваного параметра. У разі контролю датчиком статичного процесу висуваються вимоги до таких його характеристик:

- *порогу чутливості* – мінімальної зміни контрольованої величини, що викликає зміну вихідного сигналу;

- *зони нечутливості* – максимальної зміни контрольованої величини, що не викликає зміни вихідного сигналу;

- *чутливості* – відношення зміни вихідного сигналу до зміни контрольованої величини, яка її викликала;

- *стабільності вихідної характеристики (вихідного сигналу)* – показника якості датчика, незмінності в часі його метрологічних властивостей (датчик не повинен «старіти» швидко);

- *варіації вихідного сигналу* – середньої різниці між значеннями вихідного сигналу, що відповідають даній точці діапазону вимірювання при двох напрямках повільної багатократної зміни інформативного параметра вхідного сигналу на підході до зазначеної точки, варіація вихідного сигналу за нормальних умов має не виходити за межі основної допустимої похибки.

У разі контролю *динамічного процесу* до датчиків висувається ряд специфічних вимог, що стосуються їх підвищеної механічної міцності за дії динамічних навантажень (цикломіцності). З метою запобігти виникненню частотних похибок частота власних коливань пружних елементів датчика має перевищувати частоту контрольованого процесу в 6–10 разів залежно від конкретних умов роботи.

У разі діагностування *статодинамічного процесу* важливою вимогою є вибір оптимального співвідношення чутливості датчика та смуги частот, які пропускає датчик (окрім частоти власних коливань пружних елементів). Цей вибір є непротим, оскільки із збільшенням чутливості більшості пружних елементів датчика пропорційно зменшується їх власна частота коливань і навпаки.

Отже, *узагальнені вимоги до датчиків засобів технічного діагностування*, що стосуються будь-якого процесу, такі:

- *однонаправленість дії* – датчик не повинен впливати на контрольований процес технічного об'єкта;
- *перевантажувальна здатність* – відношення гранично допустимого значення контрольованого параметра до його номінального значення (частіше у межах 1,5–2 робочих діапазонів);
- *селективність датчика* – здатність реагувати лише на зміну контрольованого параметра, ігноруючи інші та високочастотні пульсації «свого» параметра.

Вимоги до датчиків, обумовлені конструкційними особливостями:

- якомога менші габарити та маса датчиків;
- захищеність від механічних пошкоджень, попадання всередину води, пилу, мастила тощо;
- простота й технологічність конструкції;
- усунення можливості виникнення резонансу в робочому діапазоні частот вібрації контрольованого об'єкта та контрольованого середовища.

Висуваються також вимоги, що стосуються вартості датчика, у складі засобу діагностування. Безумовно, що датчик має бути надійною конструкцією – його безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність та можливість зберігання повинні бути в заданих межах.

Датчики переважно розглядають як невідновлювані елементи та вважають, що діє експоненціальний закон розподілу їх ресурсу:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3.18)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи датчика; λ – інтенсивність відмов датчика; t – заданий ресурс датчика.

Показники безвідмовності забезпечуються за довірчої ймовірності 0,8, при цьому в разі поступових відмов їх параметром є точність датчика (головна допустима похибка). Термін служби датчика має становити не менше 6 років, окрім окремих конструкцій.

Датчики мають бути стійкими до факторів впливу під час транспортування:

- транспортне зрушування із прискоренням до 300 м/с^2 за частоти ударів 80–120 протягом хвилини;
- коливання температури в діапазоні від мінус 50 до плюс $50 \text{ }^\circ\text{C}$;
- відносна вологість до 98 % за температури $+35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вимоги до датчиків, обумовлені способом взаємодії з робочим середовищем та об'єктом діагностування, що доповнюють групу експлуатаційних вимог, висуваються до датчиків у разі:

- контактного або безконтактного способу взаємодії датчика із робочим (контрольованим) середовищем;
- вбудовування (навішування) датчиків в об'єкт діагностування.

Тут йдеться про те, щоб ресурс датчика відповідав ресурсу об'єкта діагностування. Встановлення датчика має бути економічно доцільним, що визначається підвищенням якості, надійності, зниженням трудомісткості діагностування тощо.

Вимоги до датчиків засобів технічного діагностування базуються на комплексному підході до них, що передбачає врахування структури й особливостей умов їх експлуатації, а також особливостей об'єкта діагностування і, передусім, характеру зміни в часі контрольованих параметрів.

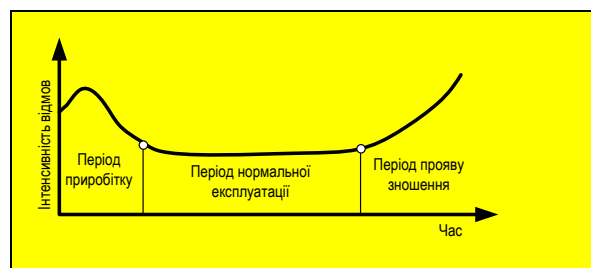
Такий підхід дозволяє запобігти неоправданому завищенню вимог щодо надійності, точності, стійкості до перешкод, а значить здоров'ю апаратури. Водночас це не означає відмову від використання прогресивних методів діагностування та новітніх технічних засобів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Колчин А. В. Датчики средств диагностирования машин / А. В. Колчин. – М. : Машиностроение, 1984. – 115 с.
2. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение / Г. Виглеб ; перевод с немецкого канд. физ.-мат. наук М. А. Хацериова. – М. : «Мир», 1989. – 196 с.

3. Фрайден Дж. Современные датчики : справочник / Дж. Фрайден. – М. : Техносфера, 2006. – 592 с.
4. Котюк А. Ф. Датчики в современных измерениях / А. Ф. Котюк. – М. : Радио и связь, горячая линия. Телеком, 2006. – 96 с.

Змістовий модуль 2.
Надійність техніки



1. НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІКИ

- 1.1. Загальні положення
- 1.2. Термінологія в галузі надійності
- 1.3. Стани, у яких може перебувати технічний об'єкт
- 1.4. Класифікація відмов технічних об'єктів
- 1.5. Часові поняття у теорії надійності
- 1.6. Технічне обслуговування і ремонт (термінологія)
- 1.7. Система показників надійності
- 1.8. Нормування, забезпечення надійності й випробування на надійність
- 1.9. Періоди роботи технічних об'єктів та заходи щодо їх забезпечення
- 1.10. Фактори, що визначають надійність технічних об'єктів
- 1.11. Резервування як спосіб забезпечення надійності технічних об'єктів

1.1. Загальні положення

У сучасному сільськогосподарському виробництві з високим рівнем насиченості різноманітним енергетичним, особливо електротехнічним обладнанням, значно підвищуються *вимоги до його якості, зокрема надійності*.

Вихід з ладу, наприклад, тільки одного електродвигуна в системах багатодвигунового електроприводу ліній кормоприготування й кормороздавання, доїння й обробітку молока на тваринницьких комплексах призводить до втрат, що значно перевищують ті, які могли б бути на фермах із звичайною маломеханізованою технологією утримання тварин. Це пояснюється відсутністю резервування обладнання й високою концентрацією тварин.

Слід підкреслити, що забезпеченню належного рівня надійності енергетичного обладнання, як і взагалі технічних об'єктів, приділяється досить велика увага, зокрема розроблена та впроваджена у виробництво *система стандартів з питань надійності*, до складу якої входить декілька класифікаційних груп за об'єктами стандартизації:

- 0 – загальні питання надійності (зокрема термінологія)
- 1 – нормування надійності;
- 2 – методи розрахунку надійності;
- 3 – методи забезпечення надійності;

- 4 – випробування та контроль надійності;
- 5 – Збір та обробіток інформації з надійності;
- 6–9 – резерв.

Приклади:

- ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения»

- ГОСТ 27.103-83 «Надежность в технике. Критерии отказов и предельных состояний»

- ГОСТ 27.503-81 «Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Методы оценки показателей надежности»

Показники надійності є складовою комплексу показників якості (додаток А) технічних об'єктів у широкому їх розумінні (рис. 1.1).

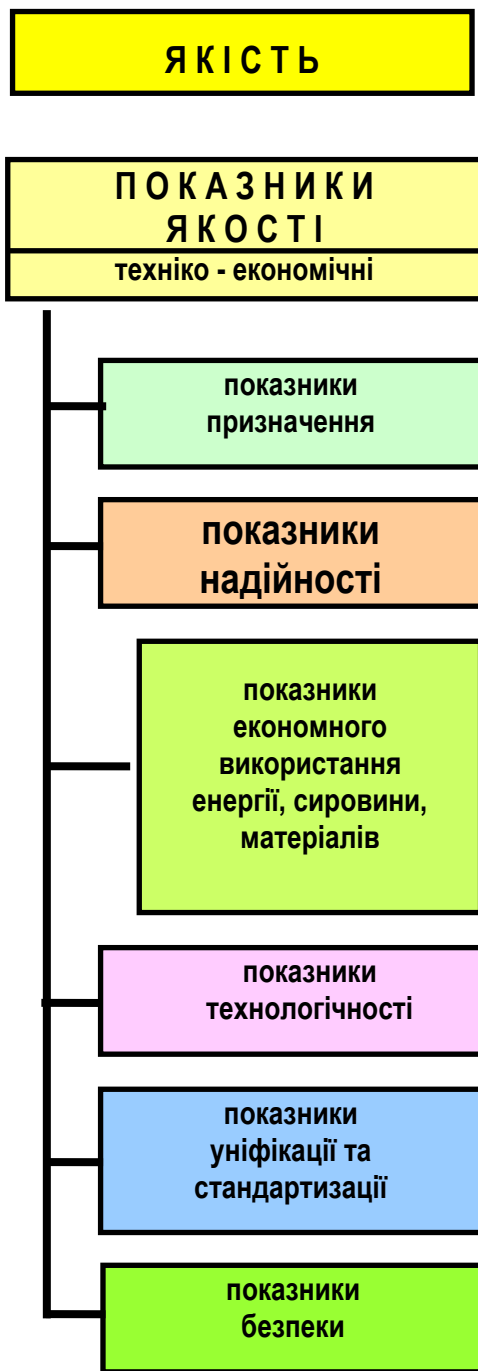
1.2. Поняття, терміни та визначення в надійності

Основні поняття, терміни та визначення в надійності встановлюють ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» та ДСТУ 2860-94 «Надійність техніки. Терміни та визначення».

Прийнято розглядати три види надійності технічних об'єктів: розрахунковим умовам відповідає розрахункова (конструкційна) надійність, умовам виробництва (стадії виробництва й монтажу технічних об'єктів) – *виробнича* й умовам експлуатації – *експлуатаційна* (рис. 1.2).

Відмінності, часто значні, реальних умов експлуатації від номінальних, встановлених технічними умовами чи стандартами, призводять, у кінцевому результаті до відмови виробу. Закономірності відмов технічних об'єктів (виробів чи пристроїв) у процесі їх експлуатації, питання аналізу й розрахунку надійності складають предмет науки – *теорії надійності*.

Усі технічні об'єкти (пристрої чи вироби) в теорії надійності прийнято поділяти на *елементи*, що виконують певні визначені функції, і *системи* – сукупність спільно функціонуючих елементів, призначених для виконання певних завдань. Наприклад, електродвигун в автоматизованому електроприводі можна розглядати як його елемент, а з іншого – його можна розглядати і як систему, що складається з елементів: статора, ротора, підшипників, коробки виводів тощо.



Якість технічного об'єкта розглядається як сукупність властивостей, що обумовлюють здатність до виконання функцій, визначених його призначенням за умов надійного функціонування, економічного використання енергоресурсів та сировини, дотримання вимог безпеки.

Поряд з цим висуваються вимоги щодо технологічності виготовлення, уніфікації та стандартизації.

Рис. 1.1. Показники надійності в комплексі показників якості

Надійність є комплексною властивістю технічного об'єкта й поєднує в собі такі властивості (рис. 1.3):

- безвідмовність;
- довговічність;
- ремонтпридатність;
- збереженість.

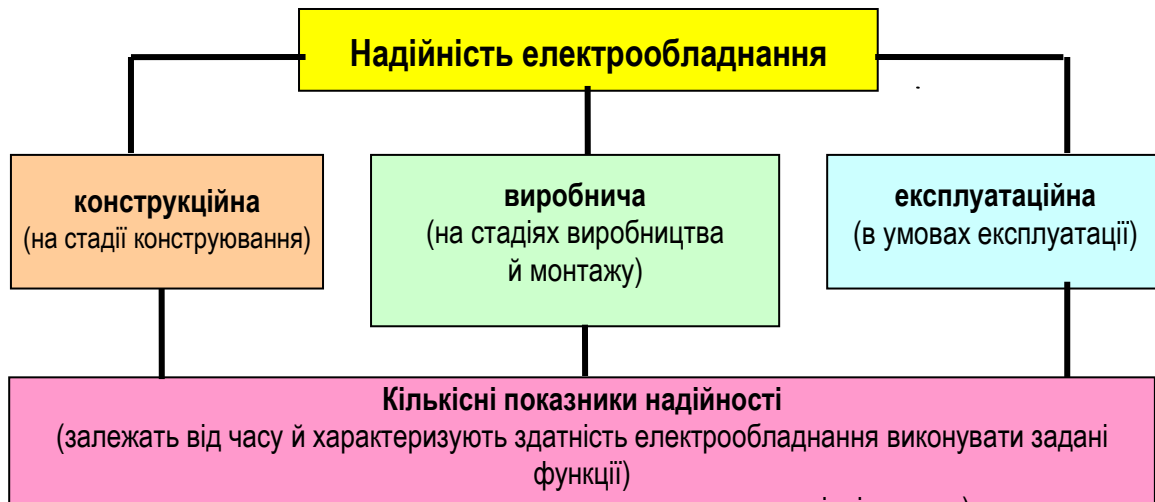


Рис. 1.2. Види надійності на різних стадіях життєвого циклу технічного об'єкта

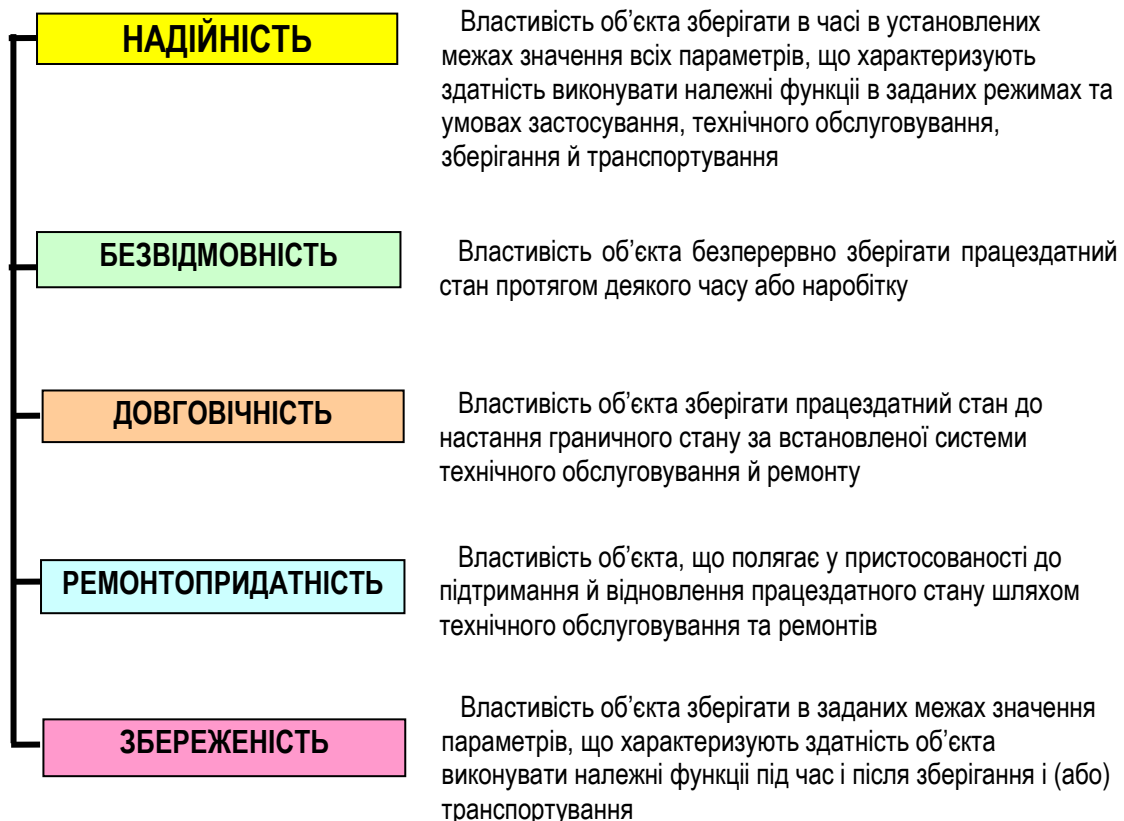


Рис. 1.3. Надійність як комплексна властивість об'єкта (за ГОСТ 27.002-89)

Коментарі до термінів

Термінологія з надійності стосується будь-яких технічних об'єктів – виробів, пристроїв, систем і споруд, а також їх підсистем – збірних одиниць, деталей, компонентів чи елементів. Об'єкти розглядаються на стадії виробництва (спорудження, монтажу), випробувань та експлуатації, що містить підготовку до використання за призначенням, технічне обслуговування, ремонт, зберігання й транспортування.

Безвідмовність розглядається переважно на стадії використання об'єкта за призначенням, хоча може виникнути необхідність оцінити безвідмовність також під час зберігання та транспортування.

Довговічність може скоротитися, а пов'язаний з нею граничний стан може настати коли об'єкт ще залишається працездатним, але застосовувати його далі недопустимо за вимог безпеки, економічності чи ефективності.

Ремонтопридатність у міжнародній практиці оцінюють як пристосовуваність до підтримання працездатного стану. Додатково можуть бути застосовані терміни – обслуговуваність, контролепридатність, пристосовуваність до діагностування, експлуатаційна технологічність тощо.

Здатність до зберігання (збереженість) можна характеризувати як здатність об'єкта протистояти негативному впливу умов та тривалості зберігання й транспортування.

Залежно від умов і режимів застосування об'єкта можуть ставитися такі вимоги:

- після зберігання стан об'єкта має бути таким, як і до початку зберігання (стосовно безвідмовності, довговічності, ремонтнопридатності);
- після зберігання чи транспортування об'єкт має знаходитися в працездатному стані (хоча й несправному).

Треба розрізняти збереженість об'єкта до вводу його в експлуатацію й безпосередньо під час експлуатації (термін зберігання входить до строку служби).

1.3. Стани, у яких може перебувати технічний об'єкт

Технічний об'єкт може перебувати в одному із можливих станів, у ньому можуть виникати пошкодження й відмови, що спричиняють переходи із справного до несправного стану та із працездатного до непрацездатного стану (рис. 1.4).

Окремо розглядається *граничний стан* об'єкта, за якого подальша експлуатація його є недопустимою чи недоцільною або ж відновлення його працездатного стану є неможливим чи недоцільним.

Критерії граничного стану ознаки або сукупність ознак граничного стану об'єкта, встановлюються нормативно-технічною і (або) конструкторською (проектною) документацією

(наприклад, ДСТУ 2365-94. «Машини електричні асинхронні потужністю 400 кВт включно. Двигуни. Загальні технічні умови»)¹³.

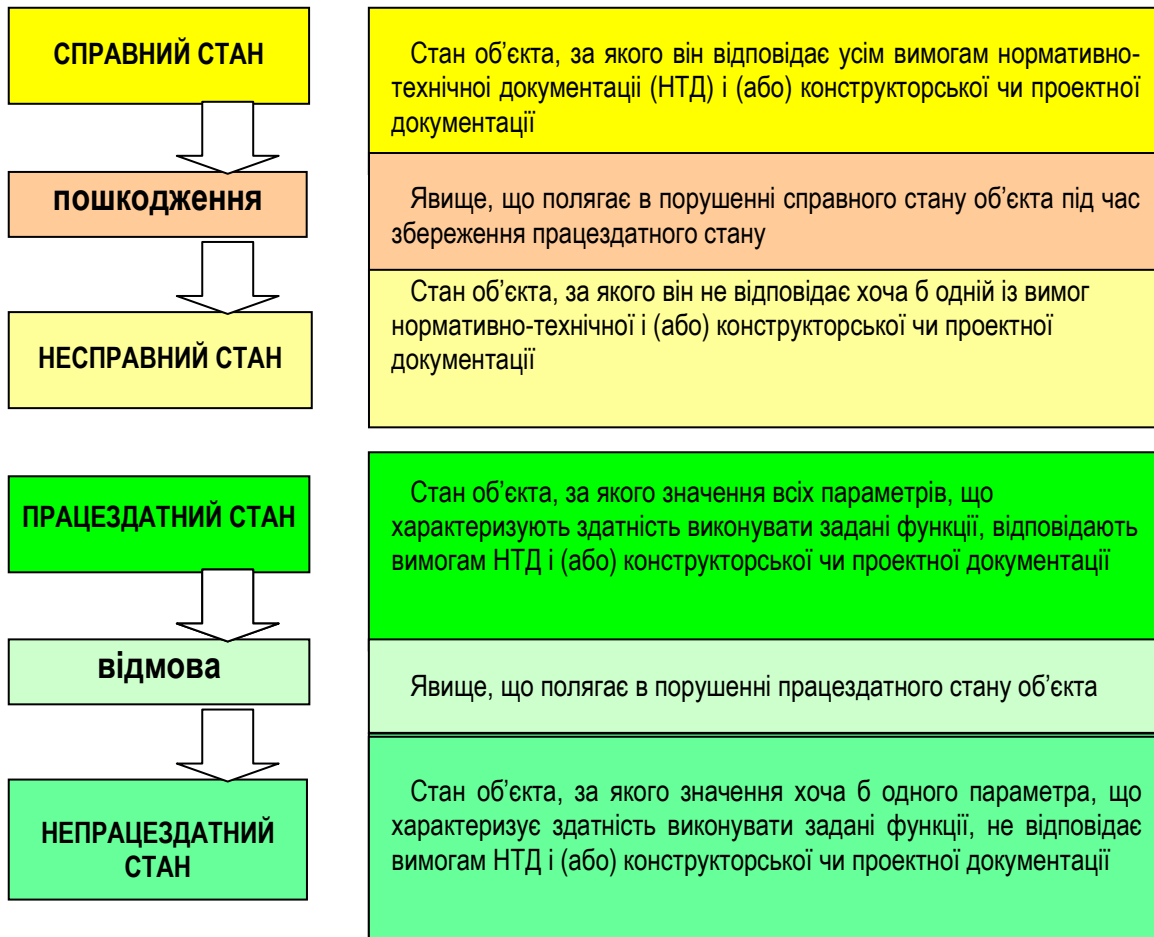


Рис. 1.4. Види та взаємозв'язок станів технічного об'єкта (за ГОСТ 27.002-89)

¹³Граничним станом двигунів вважається:

- 1) вихід із ладу обмотки, пробій ізоляції, порушення електричного кола обмотки, виткове замикання;
- 2) зниження опору ізоляції понад встановлені норми й не ліквідоване сушінням двигунів;
- 3) руйнування виступаючого кінця валу.

Коментарі до визначення станів об'єкта

Стан об'єкта описується сукупністю значень параметрів та якісних ознак, що не оцінюються кількісно.

Працездатний об'єкт може бути несправним, якщо, скажімо, він має поганий зовнішній вигляд чи втратив окремі деталі, але все ж може використовуватися за призначенням.

Складні об'єкти можуть перебувати в частково працездатному стані – виконувати свої функції не досить якісно або ж реалізовувати тільки частину передбачених функцій.

Перехід об'єкта із справного стану до несправного пов'язаний із пошкодженням, а від працездатного до непрацездатного – з відмовою.

У міжнародній практиці *працездатний стан* розділяють на «робочий стан» («operating state») і «неробочий стан» («nonoperating state»), коли об'єкт не використовується за призначенням. Останній стан підрозділяють ще на стан чергування «standby state» і стан планового простою («free state»). Поряд з цим розрізняють «внутрішньо» непрацездатний стан («internal disabled state»), причиною якого може бути відмова або незавершеність технічного обслуговування, і «зовнішньо» непрацездатний стан, обумовлений недоліками організаційного характеру.

Щодо *граничного стану*, то з його настанням об'єкт має бути або знятий з експлуатації й направлений на ремонт, або списаний, знищений чи переданий для використання не за основним призначенням. Для дотримання вимог безпеки під час зберігання чи транспортування об'єкта в разі настання його граничного стану ці процеси припиняють.

Для об'єктів, що не підлягають ремонту, граничний стан може бути двох видів:

- співпадає із непрацездатним станом;
- об'єкт ще в працездатному стані, однак його подальша експлуатація стає неможливою, оскільки є небезпечною і шкідливою.

Для об'єктів, що підлягають ремонту, можна виділити *кілька видів граничних станів*, критерії яких встановлюються нормативно-технічною документацією, зокрема для двох видів граничних станів потрібне направлення об'єкта на середній чи капітальний ремонт з тимчасовим припиненням використання за призначенням. Третій вид граничного стану пов'язаний із повним припиненням застосування об'єкта за призначенням.

1.4. Класифікація відмов технічних об'єктів

Стандарт дає чітку класифікацію відмов технічних об'єктів з визначенням кожного із її видів (рис. 1.5).

Критерій відмови – ознака чи сукупність ознак порушення працездатного стану об'єкта, що встановлюються НТД і (або) конструкторською (проектною) документацією; критерії відмов слід відрізнити від критеріїв пошкодження.

Класифікація відмов за критичністю, зокрема за рівнем прямих і непрямих затрат, спричинених відмовою або за трудомісткістю

відновлення після відмови, встановлюється НТД і (або) конструкторською чи проектною документацією за узгодженням із замовником на основі техніко-економічних розрахунків і міркувань безпеки.

Причина відмови – явища, процеси, події та стани, що викликають появу відмови.

Наслідки відмови – явища, процеси, події та стани, які обумовлені виникненням відмови.

Критичність відмови – сукупність ознак, що характеризують наслідки відмови.

Усунення відмов потребує певного часу (рис. 1.6), що залежить від кваліфікації персоналу, забезпеченості його інструментами та приладами, а також від рівня організації робіт.

Коментарі щодо класифікації відмов

Поняття «*критичність відмови*» дозволяє класифікувати відмови за їх наслідками, що необхідно під час нормування та встановлення гарантійних зобов'язань. За такою класифікацією можна ввести два, три й більше категорій відмов. У міжнародних документах ІСО, МЕК розрізняють *критичні (critical)* й *некритичні (non-critical)* відмови, причому останні ділять на *суттєві (major)* й *несуттєві (minor)*. Границі між категоріями досить умовні. Відмова одного й того ж об'єкта може вважатися суттєвою або несуттєвою залежно від того, розглядається власне сам об'єкт чи він у складі відповідального технічного об'єкта із важкими наслідками відмови.

Між раптовою і поступовою відмовами немає чіткої межі. Поступові відмови можна певною мірою попередити чи локалізувати їх наслідки. Класифікація відмов за причинами їх виникнення дозволяє встановити стадію життєвого циклу технічного об'єкта, на якій слід вжити заходів щодо усунення причин відмов – під час конструювання (проекткування), виготовлення чи експлуатації.

Щодо *деградаційних відмов*, то їх ділять на *ранні*, причиною яких є дефекти, не виявлені в процесі виготовлення, випробувань (приймального контролю), та на *пізні*, що виникають на заключній стадії експлуатації об'єкта внаслідок зношування, старіння. Ранніх відмов об'єкта можна позбавитися, якщо до вводу в експлуатацію здійснити приробіток, обкатування, прогін тощо.

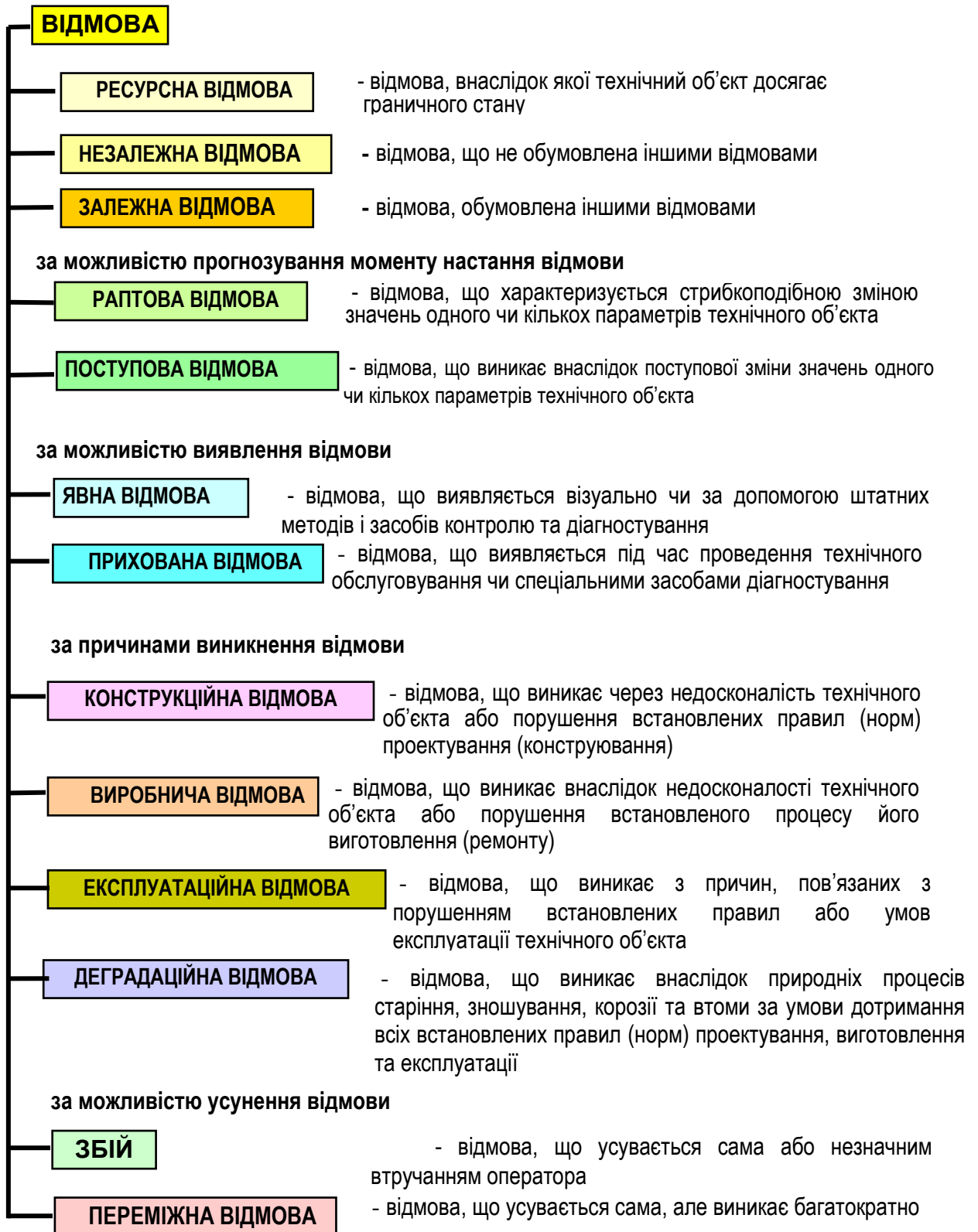


Рис.1.5. Класифікація відмов технічних об'єктів
(за ГОСТ 27.002-89)

Порядок регламентування критеріїв відмов і граничних станів стандартизований¹⁴. Ці критерії встановлюють у нормативно-технічній документації з тим, щоб міг бути достовірно визначений технічний стан об'єкта розробником, виробником чи замовником (споживачем).

Серед ознак, що входять до *критеріїв граничних станів* є такі, на основі яких подальше використання об'єкта є неможливим з причин:

- порушень вимог безпеки, які не можна усунути;
- виходу заданих параметрів за допустимі межі, який не можна усунути;
- недопустимого зниження ефективності експлуатації;
- необхідності проведення капітального ремонту.

Ознаками відмов і граничних станів об'єкта є:

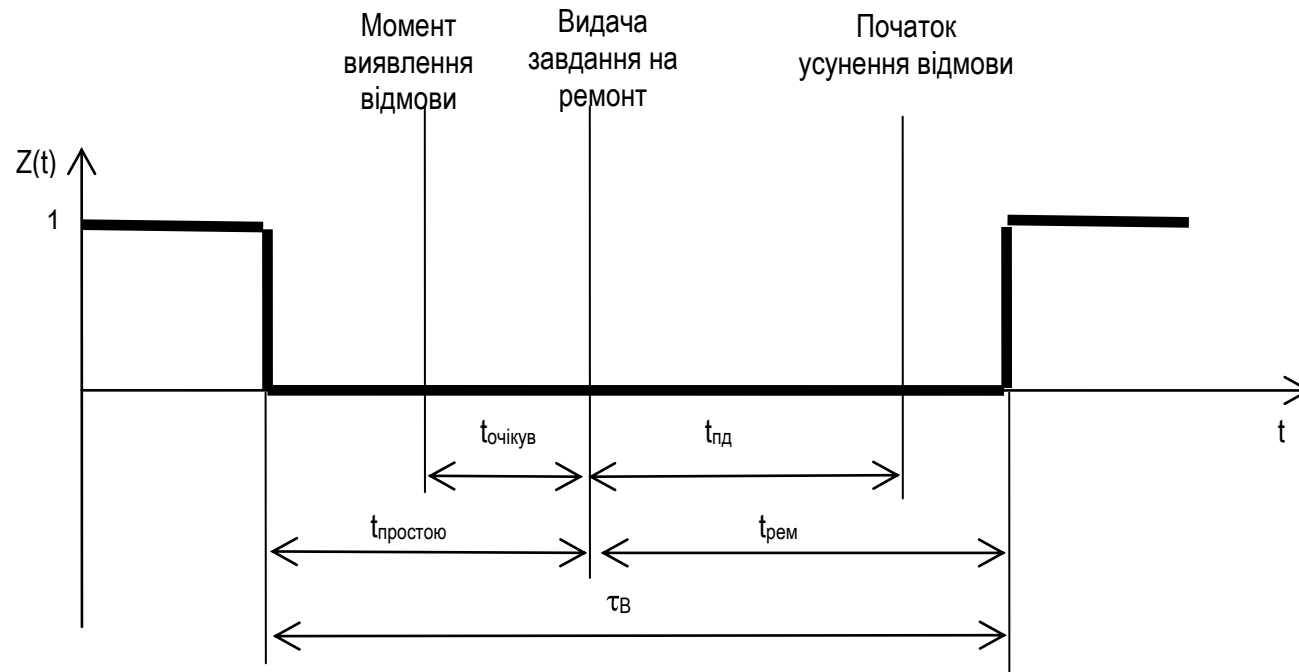
- повне чи часткове припинення виконання об'єктом своїх функцій;
- відхилення заданих показників якості за межі норми;
- відмови та граничні стани складових частин об'єкта, що припиняють чи порушують його функціонування або спричиняють вихід його показників якості за межі норм;
- виникнення процесів, які перешкоджають нормальному функціонуванню об'єкта;
- досягнення об'єктом призначеного ресурсу чи призначеного терміну служби;
- техніко-економічні фактори.

Класифікація відмов за причинами їх виникнення дозволяє встановити стадію життєвого циклу технічного об'єкта, на якій слід вжити заходів щодо усунення причин відмов – під час конструювання (проекткування), виготовлення чи експлуатації.

1.5. Часові поняття у теорії надійності

Наробіток – тривалість чи обсяг роботи об'єкта (годин, кілометрів, кількість циклів тощо). Розрізняють *наробіток до відмови* (першої з початку експлуатації) і *наробіток між відмовами* (від закінчення відновлення працездатного стану до наступної відмови).

¹⁴ГОСТ 27.103.83 «Надежность в технике. Критерии отказов и предельных состояний. Основные положения»



$$\tau_{в} = t_{простою} + t_{рем}$$

$$Z(t) = \begin{cases} 1 - \text{якщо виріб у працездатному стані;} \\ 0 - \text{якщо виріб у непрацездатному стані} \end{cases}$$

$\tau_{в}$ – тривалість відновлення (тривалість відмови);

$t_{ожидув}$ – час очікування до початку ремонту (відлік часу починається з моменту виявлення дефекту);

$t_{простою}$ – тривалість простою до початку ремонту;

$t_{пд}$ – тривалість пошуку дефекту (знаходиться в залежності від кваліфікації ремонтного персоналу й приладового забезпечення);

$t_{рем}$ – тривалість ремонту (включаючи тривалість пошуку дефекту).

Рис.1.6. Графік усунення відмови технічного об'єкта

Час відновлення – тривалість відновлення працездатного стану об'єкта.

Ресурс – сумарний наробіток об'єкта з початку експлуатації (чи її відновлення після ремонту) до переходу до граничного стану.

Строк служби – календарна тривалість експлуатації від її початку (чи відновлення після ремонту) до переходу до граничного стану.

ресурс < строк служби

Строк зберігання – календарна тривалість зберігання і (або) транспортування об'єкта, протягом якої зберігаються в установлених межах значення параметрів, що характеризують здатність об'єкта виконувати задані функції. Об'єкт наприкінці строку зберігання має відповідати вимогам безвідмовності, довговічності та ремонтпридатності, встановленим нормативно-технічною документацією.

Залишковий ресурс – сумарним наробіток об'єкта від моменту контролю його технічного стану до переходу до граничного стану. Поряд з цим діють поняття залишкового наробітку до відмови, залишкового строку служби, залишкового строку зберігання.

Призначений ресурс – сумарний наробіток, з досягненням якого експлуатація об'єкта має бути припинена незалежно від технічного стану.

Призначений строк служби – календарна тривалість експлуатації, з досягненням якої експлуатація об'єкта має бути припинена незалежно від технічного стану.

Коментарі до часових понять

Наробіток об'єкта до першої відмови чи наробіток між відмовами, ресурс тощо можуть бути визначені лише після виникнення відмови чи настання граничного стану. До цього вказані показники можна лише прогнозувати з певною достовірністю.

Величини, що визначаються часовими поняттями, знаходяться в залежності від цілого ряду факторів, частину яких взагалі не можна проконтролювати, а інші задаються з певною точністю. Серед цих факторів – якість сировини, матеріалів, заготовок, рівень технології та технічної дисципліни, виконання вимог щодо зберігання, транспортування та використання об'єкта за призначенням.

Наробіток, ресурс, строк служби мають *значний статистичний розкид*, який для особливо важливих об'єктів зменшують шляхом ретельної передексплуатаційної підготовки.

Напрацювання до відмови вводиться для об'єктів, що не підлягають ремонту й для тих, що підлягають ремонту (від $K_i \rightarrow (K+I)_i$ відмови).

Щодо ресурсу, то для першого виду об'єктів він дорівнює тривалості перебування в працездатному стані під час використання за призначенням.

Для виробів, які підлягають ремонту, розрізняють *доремонтний, міжремонтний, післяремонтний і повний (до списання) ресурс*. Приймається до уваги середній чи капітальний ремонт. Розрізняють також доремонтний, міжремонтний, післяремонтний і повний строк служби і строк зберігання.

Інтенсивність експлуатації визначає співвідношення між ресурсом і строком служби. Призначений строк служби й призначений ресурс є технікоексплуатаційними характеристиками та не відносяться до показників довговічності. Проте під час встановлення цих показників враховують як значення показників надійності, так і вимоги безпеки.

1.6. Технічне обслуговування і ремонт (термінологія)

Технічне обслуговування (за ГОСТ 18322-78) є комплексом операцій для підтримання справного чи працездатного стану технічного об'єкта за його використання за призначенням, зберіганням і транспортуванням. Під час обслуговування важливо своєчасно усунути дрібні неполадки, які можуть спричинити відмову об'єкта.

Відновлення – процес перевodu технічного об'єкта із непрацездатного до працездатного стану.

Види ремонтів (за ГОСТ 18322-78):

1. *поточний ремонт* – ремонт, що виконується для забезпечення чи відновлення працездатності об'єкта й полягає в заміні чи відновленні окремих його складових частин (недовговічних елементів);

2. *капітальний ремонт* – ремонт, що виконується для відновлення справного стану об'єкта й повного чи близького до повного відновлення ресурсу будь-яких його частин, зокрема базових.

Обслуговуваний об'єкт – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування передбачене нормативно-технічною і (або) конструкторською (проектною) документацією.

Необслуговуваний об'єкт – об'єкт, для якого проведення технічного обслуговування не передбачене нормативно-технічною і (або) конструкторською (проектною) документацією.

Відновлюваний і невідновлюваний об'єкти – об'єкти, для яких у ситуації, що розглядається, відновлення працездатного стану відповідно передбачене або не передбачене в нормативно-технічній і (або) конструкторській (проектній) документації.

Об'єкт, що підлягає ремонту, й об'єкт, що не підлягає ремонту – об'єкти, ремонт яких відповідно можливий і передбачений або ж

неможливий і не передбачений нормативно-технічною, ремонтною і (або) конструкторською (проектною) документацією.

Коментарі до термінів

Технічне обслуговування є сукупністю регламентованих у конструкторській (проектній) і (або) експлуатаційній документації технологічних операцій для підтримки працездатного та справного стану об'єкта. До цієї сукупності входять контроль технічного стану, очистка, змащування тощо.

Відновлення – сукупність послідовних операцій: ідентифікація відмови (місце й характер), налагоджування чи заміна елемента, що відмовив, регулювання, контроль технічного стану елементів об'єкта та заключний контроль працездатності об'єкта в цілому.

Ремонт є сукупністю операцій, окремі з яких виконуються й під час технічного обслуговування. Це зокрема розбирання, дефектування, заміна чи відновлення окремих блоків, деталей, збирання, змащування, контроль технічного стану (випробування) тощо. Обслуговуваними об'єктами, можуть бути й окремі об'єкти з тих, що не підлягають ремонту. З іншого боку об'єкт, що підлягає ремонту, може бути невідновлюваним у конкретній ситуації.

1.7. Система показників надійності

Окремий розділ стандарту (ГОСТ 27.002-89) присвячений розгляду системи показників надійності та її складових (рис. 1.7).

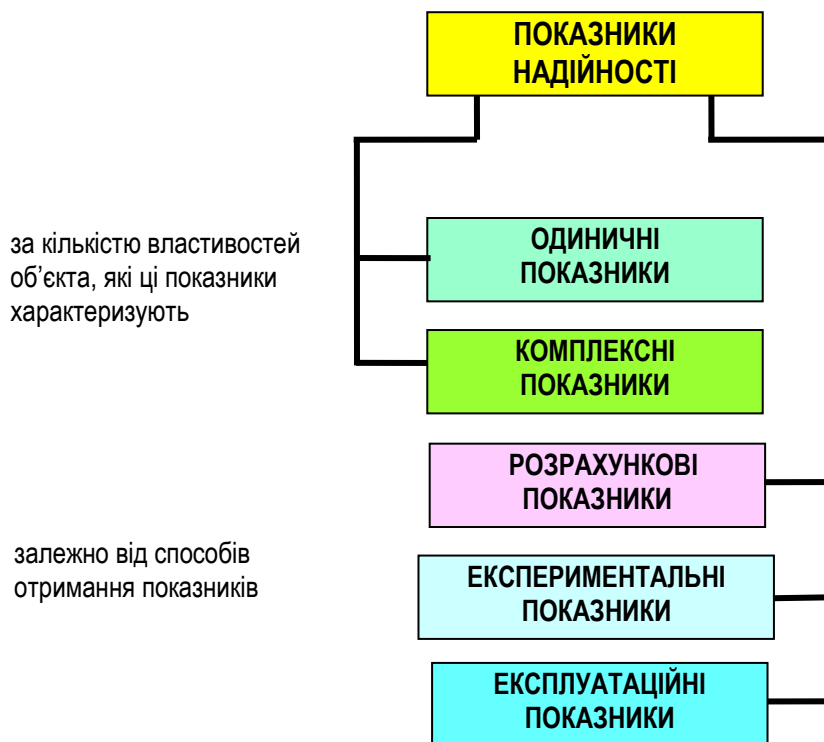


Рис. 1.7. Класифікація груп показників надійності (за ГОСТ 27.002-89)

Показники безвідмовності.

Кількісні показники безвідмовності (рис. 1.8) пов'язані із наробітком невідновлюваного технічного об'єкта до відмови та числом відмов відновлюваного об'єкта.

Ймовірність безвідмовної роботи визначають як функцію наробітку технічного об'єкта, вважаючи звичайно її неперервною й диференційованою:

$$P(t) = P\{\tau > t\}, \quad (1.1)$$

де $P\{\bullet\}$ – ймовірність події, поміщеної в дужки.



Рис. 1.8. Показники безвідмовності (за ГОСТ 27.002-89)

Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$ пов'язана із функцією розподілу $F(t)$ і густиною розподілу $f(t)$ наробітку до відмови:

$$F(t) = 1 - P(t); f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.2)$$

Очевидно, що $0 < P(t) < 1$, оскільки $P(0) = 1; P(\infty) = 0$.

Інша форма запису ймовірності безвідмовної роботи (статистична оцінка):

$$P(t) = \frac{N(t)}{N_0}, \quad (1.3)$$

де $N(t)$ і N_0 – кількість справних об'єктів у моменти часу t і $t = 0$.

Приклад: $N_0 = 1000; N(t) = 980$ $P(t) = \frac{980}{1000} = 0,98$ або 98 %

Імовірність відмов визначають за формулою

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t). \quad (1.4)$$

Інша форма запису ймовірності відмов (статистична оцінка)

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (1.5)$$

де $n(t)$ – кількість об'єктів, що відмовили до настання моменту часу t .

Приклад: $N_0 = 1000$ $Q(t) = \frac{20}{1000} = 0,02$ або 2 %;

$$n(t) = 20 \quad Q(t) = 1 - P(t) = 1 - 0,98 = 0,02.$$

Середній наробіток до відмови T_{cp} знаходять за формулою

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] \cdot dt, \quad (1.6)$$

Оскільки $F(t) = 1 - P(t)$, то

$$T_{cp} = \int_0^{\infty} P(t) \cdot dt. \quad (1.7)$$

Інша форма запису середнього наробітку до відмови (статистична оцінка)

$$T_{cp} = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_i + \dots + t_{N_0}}{N_0} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i, \quad (1.8)$$

де N_0 – кількість працездатних об'єктів у момент часу $t = 0$;
 t_i – наробіток до першої відмови кожного з об'єктів.

Інтенсивність відмов визначають за формулою

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.9)$$

Для високонадійних систем ймовірність безвідмовної роботи $P(t) \approx 1$, а тому інтенсивність відмов приблизно дорівнює густині розподілу наробітку до відмови.

Статистична оцінка для інтенсивності відмов має такий вигляд:

$$\lambda(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N_0 \cdot \Delta t} = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (1.10)$$

де $n(\Delta t)$ – кількість об'єктів, що відмовили за відрізок часу Δt (швидкість настання відмов).

Приклад: $N_0 = 100$; $\Delta t = 10$ років;

$$\lambda(t) = \frac{2}{100 \cdot 10} = 0,002 \frac{\text{ВІДМОВИ}}{\text{рік}}.$$

Через інтенсивність відмов можна визначити ймовірність безвідмовної роботи та ймовірність відмов:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}, \quad (1.11)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (1.12)$$

За умови, що $\lambda = \text{const}$ (для періоду нормальної експлуатації електротехнічних виробів)

$$P(t) = e^{-\lambda t};$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda t}.$$

Враховуючи, що при $\lambda = \text{const}$:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda};$$
$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t} = e^{-\frac{t}{T_{cp}}}. \quad (1.13)$$

Параметр потоку відмов для відновлюваних об'єктів можна визначити за формулою

$$\Delta(t) = \frac{\sum_{i=1}^N m_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N m_i(t)}{N_0 \cdot \Delta t}, \quad (1.14)$$

де $m_i(t + \Delta t)$ і $m_i(t)$ – кількість відмов i -го об'єкта станом на момент часу $(t + \Delta t)$ і t .

Показники довговічності

Гамма-процентний ресурс – сумарний наробіток, протягом якого технічний об'єкт не досягає граничного стану із ймовірністю γ , %.

Середній ресурс – математичне очікування ресурсу технічного об'єкта.

Гамма-процентний строк служби – календарна тривалість експлуатації, протягом якої технічний об'єкт не досягне граничного стану із ймовірністю γ , %.

Середній строк служби – математичне очікування строку служби технічного об'єкта.

Показники ремонтпридатності

Ймовірність відновлення – ймовірність того, що час відновлення працездатного стану технічного об'єкта не перевищить задане значення.

Гамма-процентний час відновлення – час, протягом якого відновлення працездатності технічного об'єкта буде здійснено із ймовірністю γ , %

Середній час відновлення – математичне очікування часу відновлення працездатного стану технічного об'єкта після відмови:

$$\tau_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^n \frac{\tau_{\text{ср}i}}{n}, \quad (1.15)$$

де n – кількість відмов; τ_i – час відновлення після $i^{\text{ї}}$ відмови; i – порядковий номер відмови.

Інтенсивність відновлення – умовна густина ймовірності відновлення працездатного стану технічного об'єкта для певного моменту часу за умови, що до цього моменту відновлення не було завершено.

Середня трудомісткість відновлення – математичне очікування трудомісткості відновлення технічного об'єкта після відмови.

Показники збереженості

Гамма-процентний строк зберігання – строк зберігання, який досягає об'єкт із заданою ймовірністю $\gamma, \%$.

Середній строк зберігання – математичне очікування строку зберігання.

Комплексні показники надійності

Коефіцієнт готовності – ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, окрім планових періодів, протягом яких не передбачається застосування об'єкта за призначенням:

$$K_{\text{гот}} = \frac{T_{\text{сп}}}{T_{\text{сп}} + \tau_{\text{в}}}, \quad (1.16)$$

де $T_{\text{сп}}$ – середній наробіток на відмову; $\tau_{\text{в}}$ – середня тривалість відновлення після відмови.

Коефіцієнт технічного використання – відношення математичного очікування часу перебування об'єкта в працездатному стані протягом деякого періоду експлуатації до математичного очікування сумарного часу перебування об'єкта в працездатному стані та простоїв, що обумовлені технічним обслуговуванням та ремонтом протягом того ж періоду:

$$K_{\text{ТВ}} = \frac{\sum t_{\text{роб}}}{\sum t_{\text{роб}} + \sum t_{\text{обсл}} + \sum t_{\text{рем}}}. \quad (1.17)$$

Коментарі до термінів «Показники надійності»

Показники надійності є кількісними й уводять їх відповідно до правил *статистичної теорії ймовірності*, що може застосовуватися переважно для багатосерійних об'єктів, умови виготовлення й експлуатації яких статистично однорідні. Це насамперед серійні вироби машинобудівної, електротехнічної й радіоелектронної промисловостей.

Теорія може застосовуватися й до малосерійних об'єктів, якщо вони складаються із об'єктів масового виробництва.

Статистична теорія використовується під час оцінки надійності технічних об'єктів, коли відмови розглядають як наслідок взаємодії об'єкта (фізичної системи) з іншими об'єктами та навколишнім середовищем. Визначення показників надійності на стадії конструювання (проектуювання) пов'язане з дослідженням характеристик імовірнісних чи напівімовірнісних математичних моделей об'єкта.

У процесі експериментальної довідки, випробувань та експлуатації роль показників надійності виконують статистичні оцінки відповідних ймовірнісних характеристик. Показники надійності вводять стосовно певних режимів та умов експлуатації, що встановлюються нормативно-технічною або конструкторською (проектною) документацією.

1.8. Нормування, забезпечення надійності та випробування на надійність

Нормування надійності здійснюється шляхом установлення в нормативно-технічній документації або конструкторській проектній документації кількісних і якісних вимог щодо надійності технічних об'єктів (додаток Б). Показники надійності, що регламентуються вказаною документацією, є нормованими (ГОСТ 27.003-90).

Забезпечення надійності здійснюється шляхом реалізації програми, яка передбачає комплекс взаємопов'язаних організаційно-технічних вимог і заходів стосовно певних стадій життєвого циклу технічного об'єкта.

Визначення надійності проводиться із застосуванням таких методів [4]:

- розрахункового – з використанням в основному довідкових даних;
- розрахунково-експериментального;
- експериментального.

Серед методів розрахунку кількісних показників² надійності найбільшого поширення набув *коефіцієнтний метод* [5], що базується на використанні не абсолютних значень інтенсивності відмов конкретних технічних об'єктів, а коефіцієнтів надійності,

$$k_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_{\text{баз}}}, \quad (1.18)$$

²Метод розрахунку за середньогруповими значеннями інтенсивності відмов
Метод розрахунку з використанням даних експлуатації
Коефіцієнтний метод

де λ_i і $\lambda_{баз}$ – інтенсивність відмов i -го технічного об’єкта та базового елемента (резистора).

Значення $\lambda_{баз}$, k_i , а також коефіцієнтів:

- електричного навантаження;
- режиму роботи й умов експлуатації;
- використання в часі наводяться в довідковій літературі.

Наприклад:

– коефіцієнт електричного навантаження для напівпровідникових діодів:

- за струмом $k_{нав}(i) = I_{факт} / I_{доп}$;
- за напругою $k_{нав}(u) = U_{звор.факт} / U_{звор.доп}$;
- коефіцієнт електричного навантаження резисторів:
- за потужністю розсіювання $k_{нав} = P_{факт} / P_{доп}$.

Як правило, застосовують окремі поправочні коефіцієнти лише для врахування домінуючих факторів – навантаження й температури навколишнього середовища.

Що ж до інших, менш радикально діючих дестабілізуючих факторів – вологості, запиленості, механічних навантажень тощо, то їх вплив на надійність виробів враховують введенням до розрахунків значення інтенсивності відмов базового елемента $\lambda'_{баз}$, що відповідає встановленим експлуатаційним умовам. Тоді інтенсивність відмов конкретного i -го елемента буде визначатися за формулою

$$\lambda'_i = \lambda'_{баз} \cdot k_i \cdot k_{нав} \cdot k_{\theta}, \quad (1.19)$$

де k_i , $k_{нав}$ і k_{θ} – коефіцієнти надійності, навантаження й поправочний коефіцієнт для врахування впливу температури навколишнього середовища.

Відношення $\lambda'_{баз} / \lambda_{баз.ном}$ залежно від умов експлуатації становить:

- для закритих опалюваних приміщень (лабораторні умови) – 1;
- для неопалюваних приміщень (зокрема виробничих, сільськогосподарських, електричних підстанцій, цехів) – 2,5;
- для відкритих установок – 10.

Випробування на надійність стандартизовані за такими видами:

- *визначальні* для визначення показників надійності із заданими точністю й достовірністю;
- *контрольні*;
- *лабораторні*, зокрема в заводських умовах;

- експлуатаційні;
- нормальні лабораторні (стендові) з максимальним наближенням методів та умов проведення до експлуатаційних (скажімо, випробування електромагнітних пускачів у кліматичних камерах);
- прискорені лабораторні (стендові), що забезпечують одержання інформації про надійність протягом короткого часу.

1.9. Періоди роботи технічних об'єктів та заходи щодо їх забезпечення

Прийнято розглядати декілька періодів роботи технічного об'єкта (виробу) під час оцінки його працездатності (рис. 1.9).

Період приробітку – початковий етап експлуатації виробу (пристрою) після його монтажу. Відмови, що виникають у період приробітку, обумовлюються короткочасним перевантаженням деталей, технологічними, виробничими й монтажними дефектами. З метою зниження числа відмов деталей (пристрою) в період приробітку під час збирання його в заводських умовах прагнуть до того, щоб не використовувалися дефектні або малонадійні елементи, здійснюючи їх попередній контроль в умовах, наближених до експлуатаційних. Проводиться також перевірка комплектуючих елементів і під час капітального ремонту виробу (пристрою).

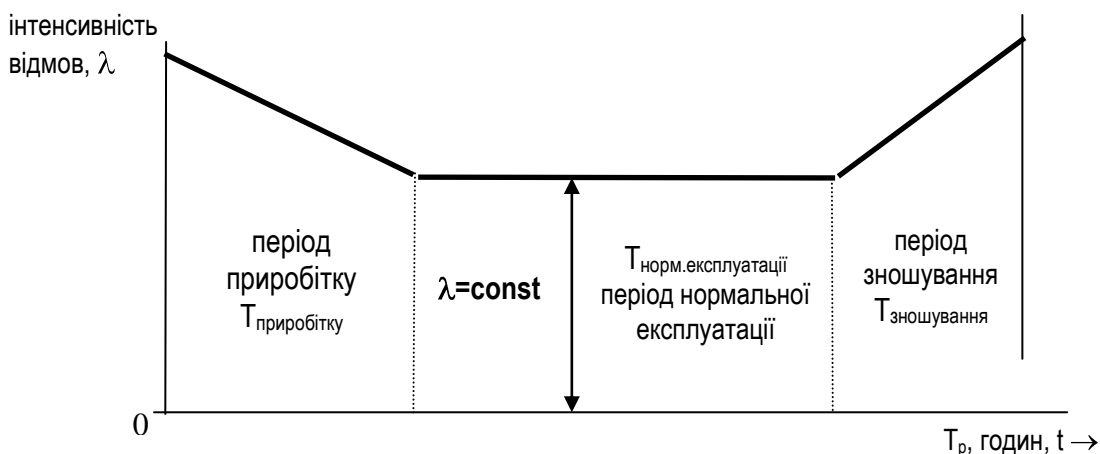


Рис. 1.9. Періоди роботи технічного об'єкта (виробу)

Період нормальної експлуатації – настає за періодом приробітку технічного об'єкта (виробу) й значно перевищує його за тривалістю ($T_{\text{приробітку}}$ становить декілька десятків годин, а

$T_{\text{норм.експл.}}$ – тисячі й десятки тисяч годин). У період нормальної експлуатації виробу (пристрою) виникають звичайно непередбачувані відмови, а рівень інтенсивності відмов є найбільш низьким і практично постійним протягом всього цього періоду. Тривалість періоду нормальної експлуатації обмежується зношуванням елементів та вузлів виробу (пристрою).

Період зношування технічного об'єкта виробу (пристрою) настає після періоду нормальної експлуатації. Поряд з непередбачуваними відмовами виникають постійні відмови, обумовлені зношуванням елементів, і тому інтенсивність відмов зростає.

Час T_p являє собою середнє значення довговічності виробу (пристрою) з урахуванням зношування або ж технічний ресурс за умови, що ремонт не передбачений. Якщо ж виріб підлягає ремонту, то строк служби можна значно продовжити.

Частіше всього для електротехнічних або радіоелектронних виробів (пристроїв) основним є *період нормальної експлуатації* – тривалої роботи за певних кліматичних та інших умов. Цей період має місце під час роботи виробів (пристроїв) одно- або багатократного використання, а період зношування відноситься тільки до пристроїв багатократного використання, що підлягають ремонту [3].

Види відмов, що виникають у період експлуатації виробів (пристроїв), визначають характер їх ремонту.

Раптові відмови усувають шляхом аварійного ремонту, який не може бути запланований наперед.

Поступові відмови частково попереджаються під час виконання планових ремонтів технічних об'єктів (виробів) відповідно до системи планово-попереджувального ремонту й технічного обслуговування (система ПЗР і ТО).

Існуючий рівень надійності енергетичного й електротехнічного обладнання в сільському господарстві є значним нижчим розрахункового (додаток В).

Так, *відмови асинхронних електродвигунів* настають частіше всього з таких причин [1]:

- невідповідність виконання двигуна умовам навколишнього середовища та номінальному режиму роботи;
- незадовільний стан захисту електродвигунів від аварійних режимів, а частіше його відсутність;
- понаднормативне відхилення напруги мережі живлення;
- низький рівень технічної експлуатації;

- конструктивні й виробничі недоліки, допущені під час виготовлення або капітального ремонту двигуна, зокрема приховані дефекти;

- електрична корозія в місцях нещільних з'єднань.

З метою підвищення експлуатаційної надійності енергетичного обладнання можна рекомендувати виконання комплексу таких заходів:

- забезпечення заданих умов експлуатації й, перш за все, нормованих параметрів мікроклімату у тваринницьких і птахівничих приміщеннях;

- переважне (наскільки можливо) використання обладнання спеціалізованого виконання для сільського господарства;

- модернізація обладнання (зокрема під час ремонту) з метою пристосування його для експлуатації у важких умовах навколишнього середовища;

- переважне встановлення обладнання в спеціально відведених місцях (щитових);

- регулювання (настроювання) захисних апаратів – електротеплових реле, розчіплювачів автоматичних вимикачів, спеціальних захисних пристроїв;

- впровадження високоефективних і надійних пристроїв захисту від аварійних режимів;

- підвищення якості електроенергії – передусім усунення асиметрії, відхилень і коливань напруги;

- організація своєчасного та якісного проведення технічного обслуговування й ремонту енергетичного обладнання;

- систематичний облік та аналіз відмов обладнання з метою виявлення й усунення їх причин;

- підвищення якості капітального ремонту електрообладнання.

1.10. Фактори, що визначають надійність технічних об'єктів

Прийнятий такий умовний поділ факторів (рис. 1.10), що впливають на надійність технічних об'єктів, виробів, пристроїв:

- *конструкційні фактори* – застосування у виробі (пристрої) елементів з низькою надійністю; недоліки схемних і конструктивних рішень, прийнятих під час розробки; використання комплектуючих елементів, що не відповідають умовам навколишнього середовища за ступенем захищеності;

– *технологічні фактори* – порушення технологічних процесів, важкі умови навколишнього середовища на місці виробництва або монтажу, недостатній контроль якості виготовлення або монтажу;

– *експлуатаційні фактори* – удари, вібраційні навантаження, перевантаження, умови навколишнього середовища (температура, вологість, сонячна радіація, пил, пісок, цвіль, корозійні гази й рідини, електричні й магнітні поля), рівень експлуатації.

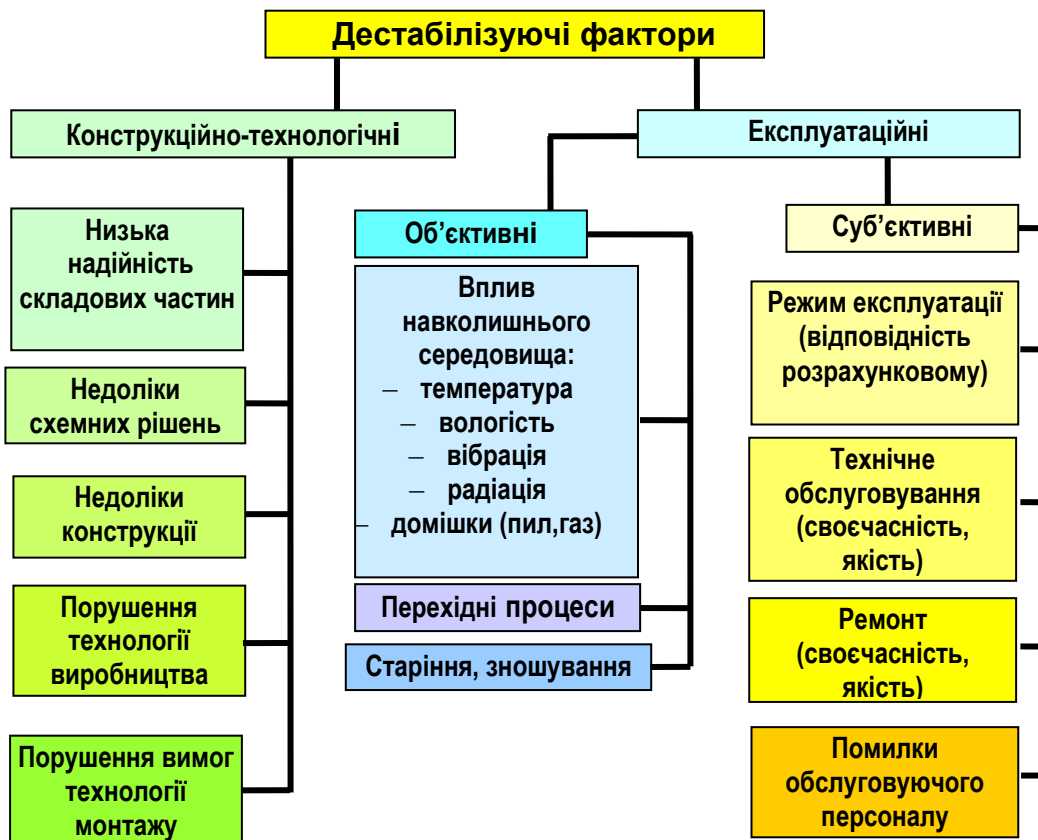


Рис.1.10. Класифікація факторів, що визначають стан технічних пристроїв

1.11. Резервування як спосіб забезпечення надійності технічних об'єктів

Одним із дійових заходів щодо підвищення надійності технічних об'єктів є резервування.

Резервування (за ГОСТ 27.002-89) – спосіб забезпечення надійності об'єкта за рахунок використання додаткових засобів або

можливостей (понад ті, що мінімально необхідні для функціонування об'єкта (рис. 1.11).

Резерв – сукупність додаткових засобів або можливостей, що використовуються для резервування.

У зв'язку з резервуванням об'єкт може містити:

- *основні елементи*, які потрібні для виконання належних функцій без використання резерву;

- *резервні елементи*, які призначені для виконання функцій основних, коли вони відмовлять;

- *резервовані елементи* – ті з основних елементів, на випадок відмови яких передбачене резервування.

Відношення кількості резервних елементів до кількості резервованих елементів є кратністю резерву. Резервування з кратністю 1/1 є дублюванням.

Резерв може бути:

- *навантаженим*, якщо містить один чи кілька резервних елементів, що знаходяться в режимі основного елемента («гарячий резерв»);

- *полегшеним*, якщо містить один або кілька резервних елементів, що знаходяться в менш навантаженому, ніж основний елемент, режимі («теплий резерв»);

- *ненавантаженим*, якщо містить один або кілька резервних елементів, ненавантажених до початку виконання ними функцій основного елемента («холодний резерв»), наприклад, резервна ДЕС.

Щодо резервування, то стандарт розділяє його на такі види (рис. 1.12):

- *загальне резервування* (всього об'єкта);

- *роздільне резервування* – резервуються окремі елементи чи їх групи;

- *постійне резервування* – використовується навантажений резерв, резервування здійснюється без перемикачів;

- *резервування заміщенням* – функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови першого;

- *резервування з відновленням* – відновлення основних елементів, що відмовили, чи резервних технічно можливе без порушення працездатності об'єкта й передбачене експлуатаційною документацією;

- *резервування без відновлення* – неможливе без порушення працездатності об'єкта й не передбачене експлуатаційною документацією.

ЛІТЕРАТУРА

1. Котеленец Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин : учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М. : Высш. шк. 1988. – 232 с.
2. Таран В. П. Диагностирование электрооборудования / В. П. Таран. – К. : Техніка, 1983. – 200 с.
3. Рипс Я. А. Анализ и расчет надежности систем управления электроприводами / Я. А. Рипс, Б. А. Савельев. – М. : Энергия, 1974. – 248 с.
4. Трифонюк В. В. Надійність пристроїв промислової електроніки : навч. посіб / В. В. Трифонюк. – К. : Либідь, 1993. – 64 с.
5. Козлов Б. А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики / Б. А. Козлов, И. А. Ушаков. – М. : Советское радио, 1975. – 472с.
6. Надежность электрооборудования станков/ З. В. Тевлин, М. А. Босинзон, Б. З. Брейтер и др. – М. : Машиностроение, 1980. – 168 с.

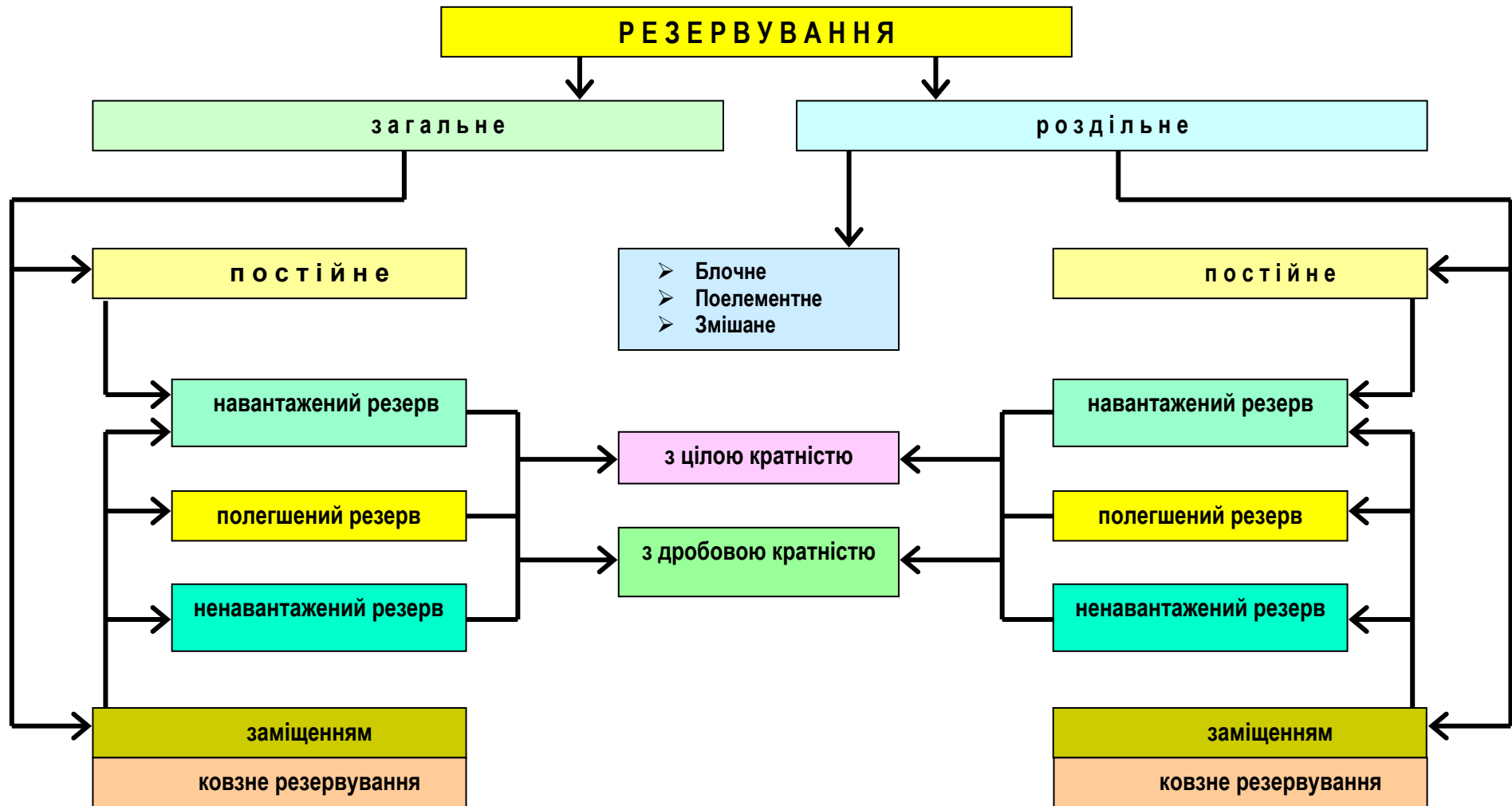


Рис. 1.11. Класифікація видів резервування за основними ознаками

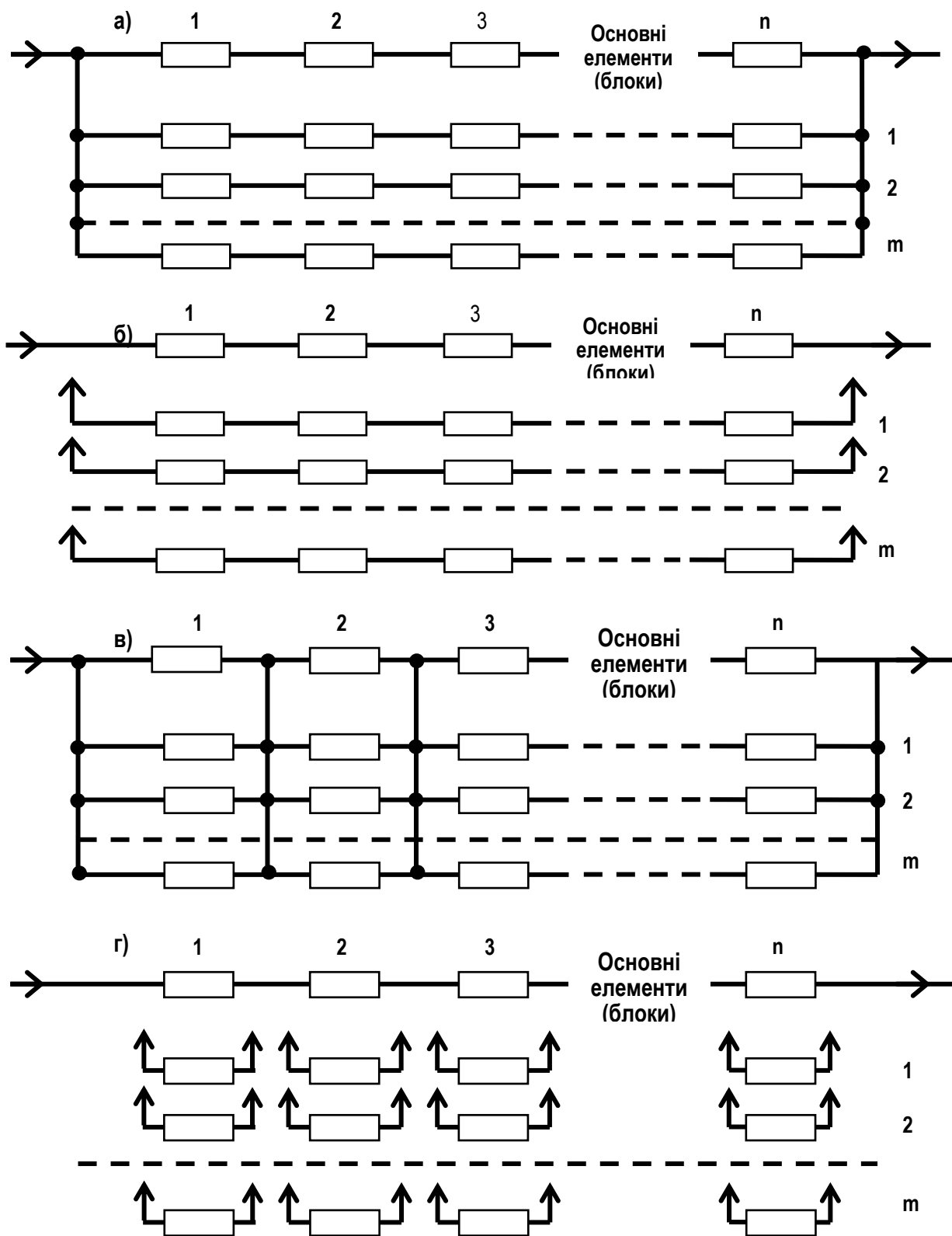


Рис. 1.12. Схеми резервування: а) загального постійного; б) загального заміщенням; в) роздільного постійного; г) роздільного заміщенням $1 \dots N$ – кількість елементів (блоків); $1 \dots m$ – кратність резервування

Додаток А

Проблема якості (на прикладі Японії)

У боротьбі за світовий ринок японці найголовнішу роль відводять якості своїх товарів, адже це неодмінна умова конкурентоспроможності й навіть життєздатності тієї чи іншої фірми. Так, *надійність вузлів, з яких комплектується побутовий телевізор, у них у сто разів вища, ніж обумовлено Британським стандартом на аналогічні вироби для військових потреб.*

Один-два дефекти виробів із ста – так передбачають стандарти в більшості європейських країн і в США. А в Японії вкладаються в інші рамки – один-два дефекти на мільйон виробів. Це дає значну перевагу над конкурентами.

Якщо на західноєвропейських підприємствах число перевіряючих нерідко сягає 15 % від загальної кількості працюючих, то в Японії не більше 5 %, а в багатьох фірмах лише 1 %.

На думку зарубіжних спеціалістів, у боротьбі за якість успіх справи на 80 % залежить від керівників найвищого рангу. А щоб вони повернулися лицем до цієї проблеми, їх треба навчати. Так, японська спілка інженерів і вчених витратила більше десяти років на навчання керівників вищої ланки за програмою якості. Для цього з кінця 50-х років було організовано читання лекцій, проведення семінарів і конференцій, перекладено на японську мову практично все, що опубліковано у світі з питань якості.

Можливості підвищення якості найкраще видно з конкретного робочого місця конструктора, технолога, робітника. Цю ідею вперше було реалізовано під час створення в 60-х роках у нашій країні *саратовської системи управління якістю*. Пізніше з'явилася схожа на неї американська система «*нуль дефектів*». Японці не пішли далі, але вони взяли від неї максимум.

Щоб навчити робітників і службовців порівнювати свої вироби з аналогічними, випущеними іншими підприємствами, що вимагає певного світогляду й знань, за ініціативою професора К. Ішикава в Японії з 1962 року почали створювати спеціальні *гуртки контролю якості*. Професор врахував національні особливості своїх співвітчизників і те, як кожен із них дорожить своєю роботою. Гуртки у складі 5–8 чоловік збираються у вільний від роботи час, на одну-дві години двічі на місяць. Обраний ними «лідер» виносить на обговорення ті чи інші питання поліпшення якості. Згодом у поле зору таких гуртків дедалі частіше стали потрапляти проблеми зменшення втрат, підвищення продуктивності праці.

Нині ця форма підвищення й використання активності працівників поширилася в багатьох країнах Південно-Східної Азії, Європи, Америки. Наприклад, у КНР у 1984 році налічувалося більше 400 тисяч гуртків, у США й Франції – по 150 тисяч.

У Японії таких гуртків нині близько двох мільйонів. *За підрахунками спеціалістів, вони щороку приносять фірмам від 20 до 25 мільярдів доларів прибутку.* В інших країнах ці гуртки не дають такого ефекту, багато з них розпадаються. Аналіз показав, що впровадження гуртків вимагає не лише великої підготовки, а й докорінної зміни організації та стилю управління.

Посилилася роль *міжопераційного контролю*, причому особлива увага приділяється автоматизації вимірювань.

Додаток Б

Показники надійності в стандартах на електротехнічне обладнання

ГОСТ 12434-83

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

АППАРАТЫ КОММУТАЦИОННЫЕ НИЗКОВОЛЬТНЫЕ ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Low-voltage switching devices. General specifications

2.5. Требования к надежности аппаратов

2.5.1. Показатели надежности аппаратов устанавливают следующие:

для невосстанавливаемых аппаратов:

– вероятность безотказной работы за коммутационную и (или) механическую износостойкость $P(t)$;

– установленная безотказная наработка T_y ;

– коммутационная износостойкость T_k ;

– механическая износостойкость T_m ;

– удельная суммарная продолжительность технического обслуживания (для обслуживаемых аппаратов) $S_{то}$;

– гамма-процентный срок сохраняемости $T_{сγ\%}$;

для восстанавливаемых аппаратов:

– наработка на отказ T_o ;

– установленная безотказная наработка $T_{yγ}$;

– установленный срок службы $T_{слγ}$;

– гамма-процентный ресурс за соответствующую коммутационную или механическую износостойкость $T_{pγ\%}$;

– гамма-процентный срок службы $T_{слγ\%}$;

– коммутационная износостойкость T_k ;

– механическая износостойкость T_m ;

– среднее время восстановления работоспособного состояния T_B ;

– гамма-процентный срок сохраняемости $T_{сγ\%}$.

Конкретные значения показателей должны устанавливаться в стандартах на виды аппаратов или технических условиях на конкретные серии и типы аппаратов.

2.5.2. Контрольный норматив числа циклов оперирования ВО, определяющего механическую износостойкость аппаратов, должны выбираться из ряда по п. 2.3.1.

2.5.3. Контрольный норматив числа циклов оперирования ВО, определяющего коммутационную износостойкость аппаратов, должен устанавливаться в стандартах на виды аппаратов или технических условиях на конкретные серии и типы аппаратов и выбираться в соответствии с п. 2.3.2.

2.5.1-2.5.3. (Измененная редакция, Изм. № 1).

2.5.4. Контрольный норматив вероятности безотказной работы должен выбираться из ряда: 0,85; 0,9; 0,91; 0,92; 0,93; 0,94; 0,95; 0,96.

Допускается устанавливать значение контрольного норматива вероятности безотказной работы 0,8 для аппаратов на номинальные токи 1000 А и более.

2.5.5. Значения вероятности в процентах γ для конкретного норматива гамма-процентного ресурса, гамма-процентного срока сохраняемости и гамма-процентного срока службы должны выбираться из ряда: 85, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96.

Допускается устанавливать значение вероятности в процентах γ 80 для контрольного норматива гамма-процентного ресурса, гамма-процентного срока сохраняемости и гамма-процентного срока службы для аппаратов на номинальные токи 1000 А и более.

2.5.6. Контрольный норматив установленного срока службы должен выбираться из ряда: 1,5; 2,0; 2,5; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5; 8,0; 8,5 лет.

2.5.7. Контрольный норматив гамма-процентного срока сохраняемости должен выбираться из ряда: 1, 2, 3, 5 лет.

2.5.8. Контрольный норматив гамма-процентного срока службы должен выбираться из ряда: 3,0; 5,0; 8,0; 10,0; 12,0; 15,0; 20,0 лет.

2.5.9. Контрольные нормативы удельной суммарной продолжительности технического обслуживания, среднего времени восстановления работоспособного состояния аппаратов и средней наработки на отказ должны выбираться из ряда R 40 ГОСТ 8032-84.

2.5.10. Контрольный норматив установленной безотказной наработки для невозстанавливаемых аппаратов должен выбираться из ряда: $12 \cdot 10^3$; $16 \cdot 10^3$; $20 \cdot 10^3$; $24 \cdot 10^3$; $28 \cdot 10^3$; $32 \cdot 10^3$; $36 \cdot 10^3$; $40 \cdot 10^3$; $44 \cdot 10^3$; $48 \cdot 10^3$; $52 \cdot 10^3$; $56 \cdot 10^3$; $60 \cdot 10^3$; $64 \cdot 10^3$; $68 \cdot 10^3$; $72 \cdot 10^3$ ч.

2.5.11. В стандартах на виды аппаратов или технических условиях на конкретные серии и типы аппаратов должна в качестве справочного материала указываться интенсивность отказов.

2.5.4-2.5.11. (Введены дополнительно, Изм. № 1).

2.6. Технические характеристики и значения параметров аппаратов, выбираемые или устанавливаемое в соответствии с настоящим стандартом, а также необходимые технические характеристики и параметры, не предусмотренные настоящим стандартом, должны быть установлены в стандартах на виды аппаратов или технических условиях на конкретные серии и типы аппаратов.

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ СОЮЗА ССР

ЭЛЕКТРОАГРЕГАТЫ И ПЕРЕДВИЖНЫЕ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ
С ДВИГАТЕЛЯМИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Требования к надежности и методы контроля

Electric generating sets and mobile electric power stations
with internal combustion engines.

Requirements for reliability and control methods

1. ТРЕБОВАНИЯ К ПОКАЗАТЕЛЯМ НАДЕЖНОСТИ

1.1. В стандартах, технических условиях, технических заданиях на разработку и модернизацию электроагрегатов и электростанций должны быть установлены следующие показатели надежности:

средняя наработка на отказ T_0 ;

среднее время восстановления работоспособного состояния T_B ;

коэффициент технического использования $K_{тх}$;

назначенный ресурс до капитального ремонта $R_{к.р}$;

гамма-процентный срок сохраняемости в упаковке и (или) консервации предприятия-изготовителя до первой переконсервации $S_{пкон}$;

90%-ный срок сохраняемости в эксплуатации S_{90} .

1.2. Показатели надежности электроагрегатов и электростанций должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 1.

Таблица 1

Вид двигателя внутреннего сгорания электроагрегатов и электростанций	Мощность, кВт	Средняя наработка на отказ, T_0 , ч, не менее	Среднее время восстановления, T_B , ч, не более	Коэффициент технического использования $K_{тх}$, не менее	90%-ный срок сохраняемости в эксплуатации S_{90} , год, не менее
Дизельный	Св. 200 до 500	1000 ----- 700	2 ----- 4	0,94 ----- 0,91	----- 3
	Св. 500 до 1000	1000 ----- 800		0,92 ----- 0,87	
	Св. 1000 до 5000	1500 ----- 1000	3 ----- 5		
Газотурбинный	До 5000	800	3	0,95	2

Примечание. Значения, приведенные в числителе, - для вновь разрабатываемых электроагрегатов и электростанций, в знаменателе - для серийно выпускаемых до 01.01.95 электроагрегатов и электростанций, разработанных до введения настоящего стандарта.

Додаток В

Відомості про експлуатаційну надійність електрообладнання в сільському господарстві

1) електродвигуни серії 4А

(розрахунковий строк служби $T \geq 15$ років при наробітку 40000 годин)

час безвідмовної роботи до капітального ремонту:

- у тваринництві 3,5 роки
- у рослинництві 4 роки
- у підсобних підприємствах 5 років
- вихід з ладу протягом кожного року..... 15–20 %

2) пускозахисні апарати

фактичний строк служби (95 % довірча ймовірність)

- електротеплові реле 4,2 року
- запобіжники НПН, ПРС, ПР-2 2,4 року
- пакетні вимикачі ПР, ПН, НПР 3,3 року
- кнопки керування 4,4 року
- рубильники 4,7 року
- автоматичні вимикачі й електромагнітні пускачі.... 3,5 роки

3) електронагрівне обладнання

середній наробіток на відмову:

- електрокалорифери 10 місяців
- електродні котли 11,5 місяця
- електроводонагрівачі:
 - ємнісні..... 12,3 місяця
 - проточні 19 місяців

4) світильники

ПГ-60, ПСХ-60, ПГМ-60:

– строк служби не більше 4,5 років (свинарники) і не більше 5,5 років
(корівники)

5) електропроводки – строк служби більшості видів проводок від 3 до 7 років

2. СПРАЦЮВАННЯ, ПОШКОДЖЕННЯ І ДЕФЕКТИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

- 2.1. Закономірності старіння ізоляції обмоток електричних машин і трансформаторів
- 2.2. Механізм відмов підшипників електричних машин
- 2.3. Дефекти та пошкодження апаратів керування і захисту
- 2.4. Дефекти й пошкодження освітлювальних та опромінювальних пристроїв
- 2.5. Дефекти й пошкодження електронагрівного обладнання
- 2.6. Дефекти та пошкодження напівпровідникових приладів і мікросхем
- 2.7. Пошук дефектів і пошкоджень технічних об'єктів

2.1. Закономірності старіння ізоляції обмоток електричних машин і трансформаторів [1]

Старіння ізоляції обмоток електричних машин. Надійність ізоляції обмоток електричних машин, зокрема асинхронних електродвигунів, визначається її станом, який внаслідок впливу цілого ряду факторів погіршується в умовах експлуатації.

Стан ізоляції характеризують такі її властивості: *електрична міцність, теплостійкість, нагрівостійкість, механічна міцність, хімічний склад, хімічна стійкість, морозостійкість, тропікостійкість* тощо. Основною є електрична міцність, що зберігається на належному рівні лише за умови наявності інших властивостей.

Руйнування ізоляції є наслідком її перегріву та дії тиску, вібрації, ударів, впливу вологи й агресивних середовищ, а також інших факторів (рис. 2.1). Ізоляція електричних машин високої напруги перебуває поряд з цим ще й в електричному полі, що теж негативно впливає на її стан. Поступове руйнування ізоляції завершується пробоем – різким зниженням електричної міцності.

Незворотні зміни структури й хімічного складу свідчать про старіння матеріалу ізоляції, а процес погіршення внаслідок цього її властивостей називається *зношуванням*, що власне стосується вже ізоляційної конструкції загалом.

Слід зауважити, що зношування може й не бути наслідком старіння ізоляції, як і пошкодження не завжди пов'язані зі зношуванням, а виникають після роздавлювання, прорізування ізоляції гострими краями металевих деталей, утворення тріщин тощо.

Ці дефекти можуть прискорити пробій ізоляції або ж розвиватися на фоні її загального старіння.

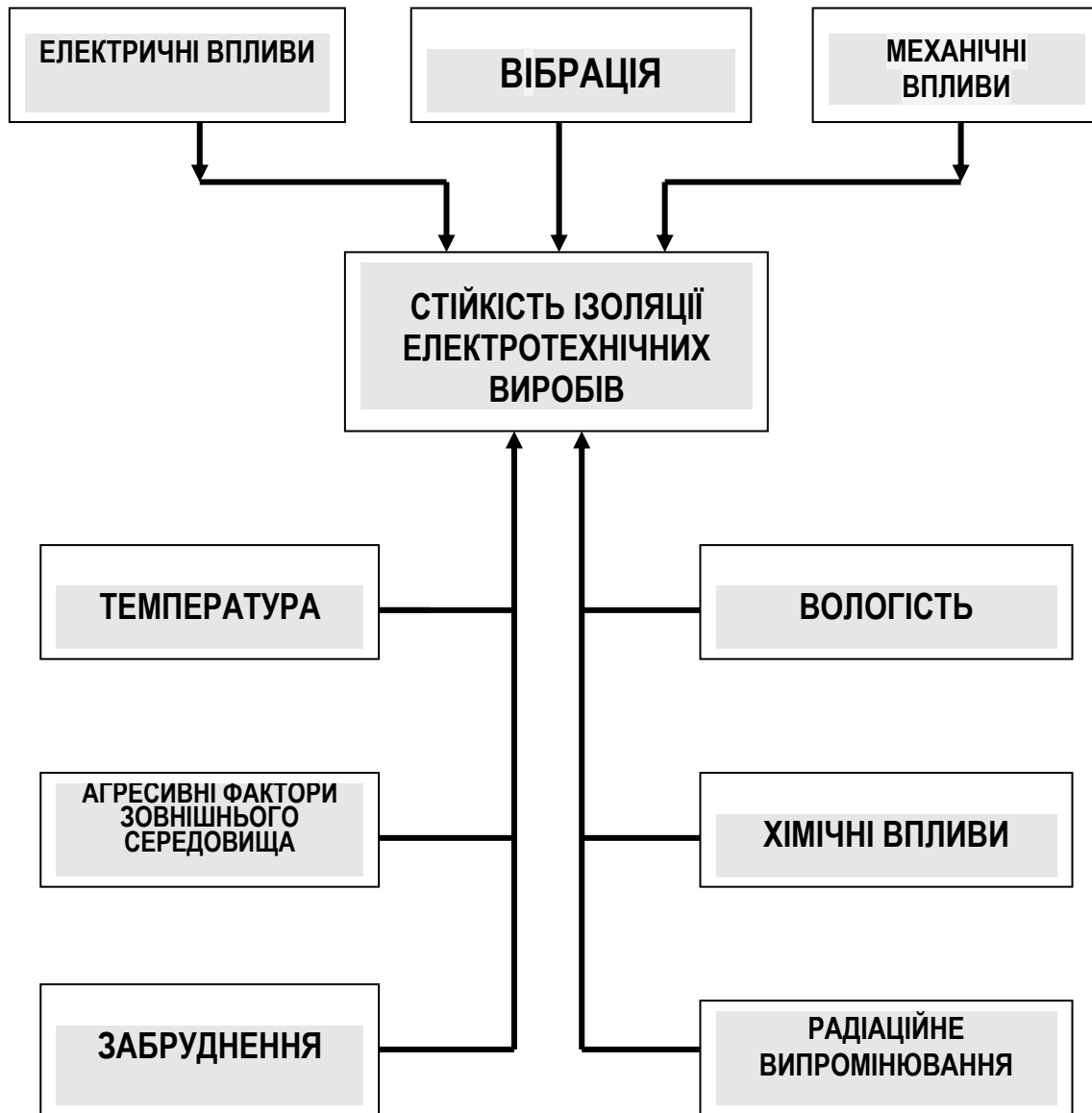


Рис. 2.1. Комплекс факторів, що впливають на стійкість ізоляції електротехнічних виробів (за ГОСТ 8865-93)

Виникнення місцевих дефектів пов'язане із недоліками, порушеннями технології виробництва, транспортування й монтажу електричних машин, тоді як старіння ізоляції обумовлено властивостями ізоляційних матеріалів та умовами експлуатації.

Серед факторів, що визначають строк служби ізоляційних матеріалів, виділяється теплове старіння, що пов'язане із теплостійкістю й нагрівостійкістю.

Теплостійкість – властивість електроізоляційного матеріалу зберігати свої властивості на певному рівні під час відносно нетривалого нагріву.

Нагрівостійкість – властивість електроізоляційного матеріалу без суттєвого погіршення витримувати вплив гранично допустимої для даного класу ізоляції температури протягом часу, що відповідає строку служби.

Нагрівостійкість покладена в основу класифікації електроізоляційних матеріалів (ГОСТ 8865-70), що включає 7 класів з відповідними граничними температурами (табл. 2.1).

2.1. Класи нагрівостійкості ізоляції

Позначення класу нагрівостійкості	Температура, °С
У	90
А	105
Е	120
В	130
F	155
Н	180
200	200
220	220
250	250

У складі системи ізоляції далеко не кожен ізоляційний матеріал буде мати нагрівостійкість відповідного класу. Рівень нагрівостійкості окремого електроізоляційного матеріалу у складі системи ізоляції може бути підвищений за рахунок запобіжного ефекту інших матеріалів, які є компонентами цієї системи. З іншого боку, несумісність ізоляційних матеріалів може знизити граничне значення температури системи ізоляції загалом порівняно з відповідними значеннями її складових.

Сумісність ізоляційних матеріалів, що мають створити систему ізоляції, і максимальну робочу температуру системи слід встановлювати під час функціональних випробувань або на підставі експлуатаційних даних. Значення температури для кожного із класів нагрівостійкості є фактичною температурою, а не перевищенням температури електротехнічного виробу над температурою

зовнішнього середовища (яка, до речі, унормовується цілим рядом стандартів)

Порядок випробувань ізоляційних матеріалів на нагрівостійкість встановлюють такі стандарти:

- ГОСТ 27905.1 Системи електричної ізоляції електрообладнання. Оцінка і класифікація.
- ГОСТ 27905.2 Системи електричної ізоляції. Оцінка експлуатаційних характеристик, механізму старіння і методи діагностики.
- ГОСТ 10518 Системи електричної ізоляції. Загальні вимоги до методів прискорених випробувань на нагрівостійкість

Оскільки нагрівостійкість ізоляції визначається швидкістю її старіння в умовах підвищення температури, то розрахунок цього параметру дає можливість визначити строк служби ізоляційної конструкції.

Першою із аналітичних залежностей, що зв'язують температуру і строк служби ізоляції є «правило восьми градусів»:

$$T = T_0 \cdot 2^{-\frac{\theta}{\Delta\theta}} = T_0 \cdot e^{-0,0866\theta}, \quad (2.1)$$

де T – строк служби ізоляції за температури нагріву θ , років; T_0 – строк служби ізоляції за $\theta=0$ (ця умовна величина, коли $T=7$ років і $\theta=105^\circ\text{C}$, складає $6,225 \cdot 10^4$ років); $\Delta\theta=8^\circ\text{C}$ – підвищення температури, що спричиняє скорочення строку служби ізоляції у 2 рази.

Як стало відомо величина $\Delta\theta=8^\circ\text{C}$ для ізоляції класу нагрівостійкості А, становить близько 10°C – для класу В, близько 12°C – для класу Н, тобто старіння ізоляції вищих класів нагрівостійкості проходить повільніше за однієї і тієї ж температури. Пояснити це можна тим, що матеріали класу А органічного походження більш втрачають від термоокислювального руйнування, ніж синтетичні матеріали класів В, Н, Ф.

«Рівняння восьми градусів» можна записати в логарифмічній формі (лінійна залежність):

$$\ln T = \ln T_0 - K \cdot \theta, \quad (2.2)$$

$$\text{де } K = \frac{\ln 2}{\Delta\theta} = \frac{0,693}{\Delta\theta}.$$

Емпіричний і формальний характер рівняння є причиною розкиду значень, невизначеності числових коефіцієнтів та невисокої достовірності результатів розрахунку строку служби ізоляції. Розрахунок однак знаходить широке застосування у випадках невеликих відрізків часу та невеликих змін температури.

Застосування до процесів старіння ізоляції загальних законів кінетики хімічних реакцій є більш строгим підходом. Стала швидкості реакції визначається за рівнянням Вант-Гоффа-Арреніуса:

$$\ln K = \frac{B}{\theta} + A, \quad (2.3)$$

де θ – абсолютна температура; A та B – постійні коефіцієнти.

Експериментальним шляхом доведено, що окислювальні мономолекулярні реакції в ізоляції мають сталу K , яку можна знайти за такою формулою:

$$K = \frac{1}{t} \cdot \ln \frac{C_0}{C}, \quad (2.4)$$

де C_0 – початкова концентрація молекул, що не прореагували; C – концентрація молекул у даний час; t – час, годин.

Звідси виходить, що стала швидкості хімічної реакції є відношенням логарифму відносної зміни концентрації молекул, що не прореагували до проміжку часу, протягом якого виникла ця зміна.

Коефіцієнти A та B мають певний фізичний сенс і зв'язані зі сталими, що характеризують хімічний склад і структуру речовини, яка бере участь у реакції, відношеннями:

$$\begin{aligned} A &= \ln \left(P \cdot Z \right) \\ B &= -\frac{E_a}{R}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

де $P = e^{\frac{\Delta\delta}{R}}$ – фактор імовірності належної орієнтації молекул під час зіштовхування; Z – кількість зіштовхувань між реагуючими молекулами за одиницю часу; E_a – енергія активації, яку повинна мати молекула, щоб подолати енергетичний бар'єр і стати здатною до даної хімічної взаємодії; $R = 8,317$ – універсальна газова

стала, Дж/(град·моль); $\Delta\delta$ – ентропія¹⁵ активації – величина, яка характеризує частку загального числа зіштовхувань, за яких молекули орієнтовані належним чином.

Величина A , що характеризує ефективність взаємодії молекул, входить до узагальненого рівняння Вант-Гоффа-Арреніуса:

$$K = A \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot \theta}}. \quad (2.6)$$

Таким чином, стала швидкості реакції є величиною, яка визначає відносне число ударів частинок, що завершуються хімічною взаємодією.

Спільний розв'язок рівнянь (2.4) і (2.6) дає таку нову залежність:

$$\ln T = \frac{E_a}{R \cdot \theta} - G, \quad (2.7)$$

яка дозволяє визначити вже не швидкість хімічних реакцій в ізоляції, а час, протягом якого ізоляція внаслідок старіння досягає граничного стану, що потрібно для практичних розрахунків.

$$G = \ln A - \ln \ln \frac{C_0}{C}. \quad (2.8)$$

Знаючи строк служби ізоляції T_1 за температури θ_1 , строк її служби за температури можна визначити за формулою

$$T_2 = T_1 \cdot e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{\theta_2} - \frac{1}{\theta_1} \right)}. \quad (2.9)$$

Значення постійних E_a , G і B визначаються експериментально й становлять у середньому для ізоляції різних класів нагрівостійкості (табл. 2.2).

Треба зазначити, що лінійне рівняння (2.3) є наближеною лінеаризацією гіперболічного рівняння (2.7) на відносно короткому діапазоні зміни температури. Тут можна знайти пояснення тому факту, що неможливо знайти точне значення «сталої» $\Delta\theta$, яка сама є функцією температури.

¹⁵Ентропія (від грец. *entropia* – поворот, перетворення) – функція аналізу термодинамічної системи, що характеризує напрям протікання процесу теплообміну між системою та зовнішнім середовищем, а також напрямом протікання самовільних процесів у загальній системі.

У високовольтних електричних машинах (переважно напругою понад 6 кВ) суттєво проявляється *електричне старіння ізоляції* під впливом електричного поля – робочої і випробувальної напруг, а також перенапруг різного характеру, джерела яких можуть бути як всередині, так і зовні машини.

2.2. Значення постійних E_a , G і B для ізоляції різних класів нагрівостійкості

Клас нагрівостійкості	E_a , Дж/моль	G	$B \cdot 10^{-4}$, °C
A	7,90	15,3	0,95
E	8,19	15,1	,985
B	8,48	15,5	1,02
F	10,55	19,7	1,27
H	12,89	24,2	1,55
C	12,89	21,8	1,55

Дуже повільно процес електричного старіння ізоляції протікає в новій доброякісній ізоляції, а з часом прискорюється із її руйнуванням внаслідок теплових, механічних, електричних та інших впливів, утворенням пор, пустот, газових включень, повітряних прошарків, тріщин.

Неоднорідності в ізоляції *спричиняють виникнення іонізаційних процесів і часткових розрядів*. Перші призводять до руйнування ізоляційного матеріалу ударами іонів, другі – руйнують шари ізоляції за рахунок теплового ефекту й окислення (пара азотної кислоти утворюється із озону та азоту повітря й вологи). Іонне бомбардування є руйнівним фактором, що викликає розклад полімерних діелектриків із наступним окисленням продуктів розкладу.

Часткові розряди інколи ініціюють незавершені пробої частин шарів ізоляції або у хвилястому каналі між шарами без виникнення стійкої дуги. Повному пробую, як правило, передує значна кількість незавершених пробів, оскільки ізоляція щоразу певною мірою самовідновлюється.

Виникають також *поверхневі розряди*, що руйнують зовнішні шари ізоляції. Запобігти виникненню ковзних розрядів і корони та зменшити їх дію можна за рахунок застосування спеціальних напівпровідникових покриттів і короностійких ізоляційних матеріалів.

Вплив електричного старіння на строк служби ізоляції з певною достовірністю описує залежність

$$T = A_e \cdot E^{-m} \quad (2.10)$$

або

$$\lg T = \lg A_e - m \cdot \lg E, \quad (2.11)$$

де E – напруженість електричного поля, кВ/мм; A_e – коефіцієнт (довідковий); m – показник, що залежить від типу ізоляційного матеріалу (для прикладу $m=9,7$ для лакотканини просоченої, $m=3,2$ для лавсану, $m=14$ для слюдотерму).

За рівнянням (2.11) будують графіки $E = f(\lg T)$, що отримали назву «*кривих життя ізоляції*» і за якими можна визначити час до пробою зразка ізоляції залежно від прикладеної напруги.

Значно прискорюють зношування і старіння електроізоляційних конструкцій *механічні й термомеханічні навантаження*.

До *механічних навантажень* відносяться статичний тиск на ізоляцію, згинальні та скручувальні зусилля, удари й вібрацію. Джерелами їх є електродинамічні та механічні зусилля, невідповідність ротора електричної машини, поштовхи й удари від машин чи механізмів, що агрегатовані.

Періодичні нагрівання та охолодження обмоток викликають *термомеханічні навантаження*. З нагрівом ізоляція швидко втрачає механічну міцність, особливо із термопластичних компаундів, а із зниженням температури стає крихкою.

Більш стабільними є механічні характеристики термореактивних діелектриків.

Електродинамічні зусилля, особливо під час пусків, реверсів (переважно в машин великої потужності) навантажують і руйнують пазову ізоляцію.

Інтенсивно руйнують ізоляцію *вібраційні (знакозмінні) навантаження*, призводячи до появи тріщин, розшарування (слюда тощо) та ін. Вібрації особливо шкідливі для ізоляції котушок чи стержнів на виході із пазів.

У всіх обмотках асинхронних електродвигунів під дією вібрації йде поступове руйнування плівки просочувального лаку, обмотка втрачає «монолітність», окремі провідники одержують свободу переміщення. У точках дотику сусідніх провідників такі переміщення призводять до перетирання міжвиткової ізоляції, що спричиняє виткові замикання – основну причину відмов асинхронних електродвигунів.

Як свідчать результати досліджень, вібрація скорочує строк служби обмоток у кілька разів. Водночас найбільш суттєвими

причинами руйнування ізоляції електричних машин напругою до 1000 В є механічні навантаження та дія хімічних реагентів навколишнього середовища поряд із впливом нагріву та певною мірою електричного поля.

До руйнування ізоляційних конструкцій призводять також явища, пов'язані із відмінностями коефіцієнтів теплового розширення ізоляції обмотувального проводу та інших ізоляційних матеріалів. При цьому ізоляція тріскає, розбухає й розшаровується, особливо в перехідних режимах роботи машини.

Згубно впливає на ізоляцію обмоток електричних машин *волога, особливо у поєднанні із хімічно активними реагентами*, що є у повітрі, зокрема тваринницьких та птахівничих приміщень. Зволоження ізоляції відбувається переважно в неробочий період машини, коли вона поступово охолоджується. Волога спричиняє зростання струмів спливу через ізоляцію, часткові розряди та ін.

Пил, яким насичене повітря, діє на ізоляцію як абразив, а в машин високої напруги може викликати поверхневі розряди, оскільки утворюються провідні містки.

Процеси старіння ізоляції підтримують та активізують один одного, наближаючи пробій причому *ініціююча роль належить процесам теплового старіння*.

Під дією температури ізоляція висихає, випаровуються летучі компоненти із зв'язуючих речовин, знижується еластичність і зростає крихкість. Крихка ізоляція втрачає механічну міцність, розвиваються тріщини, розшарування, виникають іонізаційні явища. *Ізоляція руйнується нерівномірно*, прискорюється цей процес впливом вологи, агресивних середовищ аж до настання пробою в найбільш слабкому місці.

Термічне зношення ізоляції обмоток силового трансформатора¹⁶. Ізоляція обмоток силового трансформатора поряд із дією інших малозначимих впливів зазнає термохімічного зношення, що являє собою кумулятивний процес і призводить до недопустимого її стану.

Згідно із законом Арреніуса період часу до досягнення критичного стану T (термін служби) залежно від швидкості хімічної реакції можна визначити за формулою

$$T = e^{(\alpha + \beta/T)}, \quad (2.12)$$

де α і β – сталі; T – абсолютна температура.

¹⁶ДСТУ 3463 – 96. «Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів»

З метою обмеження діапазону температури можна користуватися дещо простішим відношенням експоненціального характеру – відношенням Монтсінгера (спрощений варіант):

$$T = e^{-p\Theta}, \quad (2.13)$$

де p – стала; Θ – температура, °С.

За відсутності єдиного й простого критерію закінчення терміну служби, який міг би бути використаним для кількісної оцінки корисного терміну служби ізоляції обмоток трансформатора, можна зробити порівняння, що базуються на швидкості термічного зношення ізоляції. Ця величина ν є зворотною відносно терміну служби й визначається за рівнянням Монтсінгера:

$$\nu = A \cdot e^{-p\Theta}. \quad (2.14)$$

Значення сталої A в цьому рівнянні залежить від кількох чинників:

- початкового стану целюлозних продуктів (суміші вихідних матеріалів, хімічних добавок);
- параметрів охолодного середовища (вмісту вологи, вільного кисню в системі).

Однак незалежно від вказаних факторів у діапазоні значень температури від + 80 до +140 °С за коефіцієнт зміни температури допускається приймати сталі значення P . Визначають його за умови, що *швидкість зношення ізоляції подвоюється на кожні 6 °С підвищення температури*. Загалом швидкість зношення ізоляції визначається температурою найбільш нагрітої точки. Для трансформаторів, що виготовляються за вимогами ГОСТ 11677¹⁷, еталонне значення цієї величини за номінального навантаження до нормальної температури охолодного середовища приймається таким, що дорівнює +98 °С. Відносна швидкість зношення за такої температури приймається рівною одиниці.

Для трансформаторів, що відповідають вимогам ГОСТ 11677, відносна швидкість термічного зношення ізоляції приймається рівною одиниці для температури найбільш нагрітої точки +98 °С, що відповідає роботі трансформатора за температури охолодного середовища +20 °С і перевищенню температури найбільш нагрітої точки 78 °С. Відносну швидкість зношення ізоляції при цьому визначають за формулою

¹⁷ГОСТ 11677-85. «Трансформаторы силовые. Общие технические условия»

$$v = \frac{\text{швидкість} \dots \text{зношення} \theta_h}{\text{швидкість} \dots \text{зношення} \dots \text{при} \dots 98^\circ\text{C}} = 2^{(\theta_h - 98)/6}. \quad (2.15)$$

Розрахунки, виконані за цією формулою свідчать про значну залежність відносної швидкості зношення ізоляції від температури найбільш нагрітої точки (табл. 2.3).

Скорочення терміну служби ізоляції обмоток трансформатора, викликане місячним, добовим чи годинним навантаженням за температури найбільш нагрітої точки +98 °С, виражається «нормальними» місяцем, добою або годиною.

У разі, коли навантаження та температура охолодного середовища є сталими протягом певного періоду часу, відносне скорочення терміну служби ізоляції розраховується як добуток швидкості термічного зношення на значення проміжку часу, що розглядається.

2.3. Значення відносної швидкості зношення ізоляції від температури найбільш нагрітої точки

Значення температури, °С	Відносна швидкість зношення ізоляції обмоток трансформатора
1	2
+80	0,125
+85	0,25
+92	0,5
+98	1,0
1	2
+104	2,0
+110	4,0
+116	8,0
+122	16,0
+128	32,0
+134	64,0
+140	128,0

Те ж саме стосується й постійного режиму навантаження за змінної температури охолодного середовища, якщо при цьому використовується базове значення температури охолодного середовища.

Для сучасних силових трансформаторів із термічно високоякісною ізоляцією допустимі межі перевищення температури встановлюються за погодженням двох сторін – виробника й споживача. У переважній більшості випадків вважають, що нормальний передбачуваний термін служби таких трансформаторів може бути досягнутий за базової температури найбільш нагрітої точки +110 °С.

Відносна швидкість скорочення терміну служби ізоляції силового трансформатора в разі зміни режиму навантаження і температури охолодного середовища також змінюється в часі. Відносне зношення ізоляції (відносне скорочення терміну служби) протягом певного періоду часу становить

$$L = \frac{1}{t} \int_{t_1}^t v dt \quad \text{або} \quad L = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v \quad (2.16)$$

де n – порядковий номер інтервалу часу; N – загальна кількість однакових інтервалів часу.

2.2. Механізм відмов підшипникових вузлів електричних машин [1; 2]

У переважній більшості електричних машин підшипникові вузли – це друге після обмотки джерело відмов. Що ж до двигунів малої потужності та високошвидкісних електричних машин, то вони виходять з ладу переважно із-за пошкоджень та зношування підшипників.

Електродвигуни часто працюють в досить складних експлуатаційних режимах: високі й низькі температури, великі швидкості обертання й навантаження. При цьому до терміну служби висуваються підвищені вимоги. За таких обставин важливою стає надійність підшипникових вузлів електродвигунів з підшипниками кочення (рис. 2.2), на які діє велика частина навантажень, що виникають під час експлуатації.

Як встановили фахівці французької компанії SNR (світовий виробник підшипників), переважна більшість (біля 70 %) випадків виходу з ладу підшипників (не пов'язаних з монтажем і помилками в конструкції) спричинені застосуванням неякісного чи неправильно підібраного мастила. Помилки під час вибору мастила часто призводять до пошкоджень підшипника (рис. 2.3) і виходу його з ладу, що може викликати аварійну ситуацію, травматизм людей, простій устаткування, а також і матеріальні втрати.

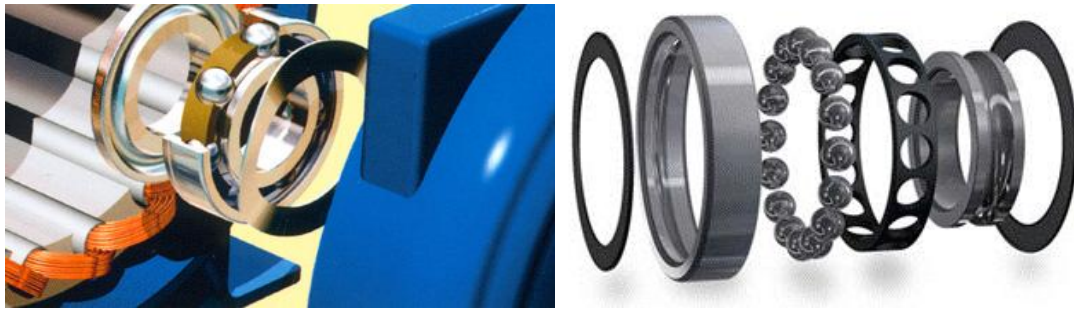


Рис. 2.2. Підшипниковий вузол електродвигуна з підшипником кочення



Рис. 2.3. Деякі пошкодження підшипників, викликані використанням неправильно підбраного мастила

Використання із-за їх відносної дешевизни багатоцільових мастил так само може привести до негативних наслідків, тому дуже важливим стає підбір такого змащувального матеріалу, який повністю задовольняв би умови роботи електродвигуна.

Ознаками ненормальної роботи підшипників є надмірне підвищення температури й шуму, витікання мастила, а також зростання опору під час пуску та в робочому режимі електричної машини.

Причиною відмови понад 80 % підшипників кочення є руйнування втомлювального характеру. Це руйнування (викришування робочих поверхонь кілець та тіла кочення) починається із поперечних тріщин, що виникають під дією значних місцевих змінних напруг. Із розвитком тріщин відшаровується шматочок металу, а згодом виникає раковина. Мастило при цьому відіграє подвійну роль:

- з одного боку сприяє зменшенню зусиль, що діють на деталі підшипника, і сприяє відведенню тепла;

– з іншого боку, попавши до тріщини, розклинює та розширює її.

Інтенсивність втомлювальних руйнувань зменшується із підвищенням чистоти обробітку робочих поверхонь підшипників (не нижче 10^{-70} класу чистоти обробітку).

Підшипники асинхронних електродвигунів та інших електричних машин загальнопромислового виконання здебільшого страждають від абразивного зношування, що спричиняє попадання до них пилю, дрібних твердих часток, продуктів корозії тощо. Дещо в кращому становищі перебувають робочі поверхні підшипників із двостороннім ущільненням типу 2R5, якими комплектуються переважно частина асинхронних електродвигунів серії 4A, АІР, 5A.

До відкритих підшипників сторонні частки можуть потрапити під час їх зберігання, під час монтажу, заправки брудним мастилом тощо. Надалі діють такі фактори, як невідповідність виконання машин умовам навколишнього середовища, порушення ущільнень або їх недосконала конструкція. Хоч у разі абразивного зношування дещо стримується поява тріщин і раковин у підшипниках, при цьому зростають зазори й вібрація аж до зачеплення ротора за розточку статора.

У результаті перевантажень, неоднорідності матеріалу деталей, порушення технологій термообробки та неякісного монтажу настають надломи деталей підшипників. Установлено, що збільшення навантаження на підшипник удвічі скорочує його строк служби приблизно в 10 разів.

Підшипник перебуває під надмірним навантаженням у разі перекосів і неспіввісності щитів і фланців, осьових зміщень підшипника, вібрацій ротора електричної машини.

Слаба посадка підшипника на вал призводить до прокручування внутрішнього кільця і, як наслідок, контактної корозії, зношування вала, зростання температури підшипникового вузла. Інша крайність – надмірний натяг під час посадки підшипників зменшує радіальні зазори, викликає защемлення тіл кочення та швидке зношування сепаратора. Збільшується навантаження на підшипник також у разі бокового биття заплечиків підшипника всередині підшипникового щита, особливо виготовленого із алюмінієвого сплаву.

Розрахункова довговічність підшипників кочення машин малої та середньої потужності складає в середньому 10–20 тисяч годин, зокрема підшипників із двостороннім ущільненням та постійно закладеним мастилом – 20 000 годин.

2.3. Дефекти та пошкодження апаратів керування і захисту [5]

Причинами відмов апаратів керування й захисту в умовах експлуатації можуть бути:

- перегрів котушок електромагнітних пускачів і контакторів;
- замикання котушок – міжвиткові й на корпус;
- зношування контактів та їх перегрів;
- пошкодження ізоляції;
- дефекти механічної частини.

Котушки апаратів змінного струму перегріваються у випадках заклинювання якоря електромагнітної системи і низькій напрузі живлення.

Порушення технології намотування котушок спричиняють міжвиткові замикання, виникнення яких прискорюється значними вібраціями сердечника.

Інтенсивне зношування контактів (рис. 2.4) спричиняється перевищенням струмового навантаження, дефектами механічної системи комутаційних та пристроїв гасіння дуги.



а) б)

Рис. 2.4. Контакти електромагнітного реле: а) умовне зображення замкнутих контактів електромагнітного реле; б) вигляд контактів реле, що працювали певний час

Ознакою несправності ізоляції є виникнення на її поверхні шляхів для протікання струмів спливу.

Поряд з цим ізоляція виходить з ладу при перезволоженні та внаслідок механічних пошкоджень під час транспортування і монтажу.

Значна кількість апаратів керування виходить з ладу внаслідок корозії, пошкоджень конструктивних елементів, зокрема із-за використання матеріалів недостатньої міцності.

2.4. Дефекти та пошкодження освітлювальних та опромінювальних пристроїв

У зв'язку із нерівномірним нагріванням спіралі лампи розжарювання найбільш дефектними її місцями є місця випадкових вкраплень чи стоншень. Оскільки опір холодної спіралі приблизно в 12 разів менший опору в робочому стані, кратність пускового струму лампи розжарювання сягає 12–13. Спіраль лампи витримує при цьому досить великі динамічні навантаження і врешті-решт руйнується у місці дефекту.

Поступове розпилювання спіралі лампи розжарювання протягом терміну служби спричиняє зменшення світлового потоку. Щоправда в галогенних лампах (з йодним циклом) досягають певного відновлення спіралі за таким механізмом: введений до колби лампи галоген (бромистий метил CH_3Br або метилен CH_2Br_2), випаровуючись за температури близько $300\text{ }^\circ\text{C}$, з'єднується із розпиленням на стінки колби вольфрамом, внаслідок чого утворюється летуче з'єднання, що веде до осаду вольфраму на спіраль, проте не тільки на її дефектні місця.

У процесі експлуатації люмінесцентних ламп витрачається оксидне покриття електродів, особливо в разі запалювання лампи без попереднього їх підігріву – «холодне запалювання». Розпилення оксидного покриття зростає також і внаслідок перегріву електродів, спричиненого підвищеною напругою в мережі живлення. Частими є пошкодження люмінофору люмінесцентних ламп поблизу ниток розжарювання (катодів), що викликані їх перегрівом (рис. 2.5).



Рис. 2.5. Люмінесцентні лампи з пошкодженнями люмінофору

Малонадійним елементом є також стартер, несправності якого, зокрема зварювання електродів, можуть призвести до виходу з ладу загалом пускорегулюючого апарату (ПРА) у схемі живлення люмінесцентної лампи.

2.5. Дефекти й пошкодження електронагрівного обладнання

Серед несправностей електродних котлів і водонагрівників домінують пошкодження пакету електродів внаслідок відкладення накипу та зношування. Дуже важливою в цьому випадку є водопідготовка, оскільки вода з питомим опором, більшим верхнього значення для певного котла, спричиняє зниження потужності.



Рис. 2.6. Відкладення накипу на термоелектронагрівнику (ТЕН)

Ще більш небезпечним є використання води із надміру низьким питомим опором (менше 800 Ом · м), наслідком чого є різке зростання густини струму на електродах, виникнення гримучого газу та пробою міжелектродних проміжків.

Якість води є визначальним фактором терміну служби елементних водонагрівників з термоелектронагрівниками (ТЕНи). Вода жорсткістю понад 18 °С може прискорити відкладення накипу на ТЕНах (рис. 2.6), їх перегрівання і вихід з ладу.

Чітко регламентовані вимоги щодо транспортування, зберігання, монтажу й експлуатації ТЕНів. Тара для зберігання їх повинна забезпечувати захист торців від попадання вологи. Зберігати ТЕНи слід у сухому опалюваному приміщенні за температури від +1 до +40 °С та відносній вологості повітря до 60 %. Граничний термін зберігання до експлуатації з моменту відвантаження ТЕНів заводом-виробником не більше року. Із-за паропроникності герметика

ТЕНів їх не можна зберігати як понад вказаний термін, так і в більш жорстких кліматичних умовах.

Перед вмиканням обов'язковим є вимірювання опору ізоляції ТЕНів і, коли $R_{i3} < 1$ МОм і не менше 0,7 МОм, їх просушують за температури 100–120 °С протягом 4–6 годин. Нагрівники з опором ізоляції менше 0,1 МОм до сушіння й менше 1 МОм після сушіння бракують.

2.6. Дефекти та пошкодження напівпровідникових приладів і мікросхем

Відмови напівпровідникових приладів (НПП), інтегральних цифрових та аналогових мікросхем розділяються, як і щодо інших технічних об'єктів, на дві групи:

- раптові (непрогнозовані) відмови;
- поступові (прогнозовані) відмови.

Цей поділ є умовним, оскільки в одних умовах відмова може бути прогнозованою, а в інших – непрогнозованою. Серед визначальних факторів при цьому – ступінь обізнаності в причинах відмов, розуміння закономірностей зміни основних параметрів НПП та мікросхем під час зміни властивостей діагностованого пристрою, де вони застосовані і, нарешті, рівень досконалості засобів діагностування.

Можна виділити три групи раптових відмов:

- відмови, пов'язані із недоліками конструкції НПП і технології їх виготовлення;
- відмови, пов'язані з короткочасними перевантаженнями за струмом, напругою та потужністю;
- відмови, пов'язані із недоліками проектування та конструювання пристроїв на НПП і мікросхемах.

До поступових відмов відносяться ті, які характеризуються поступовою зміною одного чи кількох заданих параметрів, що дозволяє прогнозувати ці відмови. Зміни параметрів пов'язані із змінами фізичних і хімічних властивостей напівпровідника, *p-n* переходів та оксидних шарів.

Відмови, пов'язані із явищами у внутрішньому об'ємі напівпровідника, з'являються під час виготовлення НПП, оскільки сучасні технології не дають можливості отримати високий рівень чистоти структури. У ній з'являються різноманітні дефекти, що суттєво змінюють механічні й електричні властивості кристалу, зменшуючи рухомість носіїв струму.

Діють певні закономірності зміни параметрів напівпровідникових приладів залежно від зміни концентрації дефектів. Науковцями встановлено [1],¹⁸ що явища у внутрішньому об'ємі напівпровідника суттєво впливають на параметри напівпровідникового приладу після наробітку $(5-7) \cdot 10^4$ годин. Ця обставина робить практично неможливим застосування зазначених вище закономірностей системи явища у внутрішньому об'ємі напівпровідника – параметри НПП для прогнозування відмов.

Відмови, пов'язані із станом контактних з'єднань, якими слугують металізована розводка між окремими елементами НПП та площадки із зовнішніми виводами, що проходять через стінки корпусу. *Металізовану розводку (доріжки) формують напилюванням алюмінію на поверхню окису кремнію й наступним впалюванням.*

Відмови цього різновиду контактних з'єднань можуть виникати внаслідок механічних з'єднань (замикань) доріжок або ж недостатньої товщини плівки алюмінію. В останньому випадку виникають локальні перегріви плівки і, як розвиток процесу, корозія чи розплавлення алюмінію. Поряд з цим можуть траплятися відмови внаслідок утворення на межі розділу Al-SiO₂ електроізоляційної плівки, що порушує цілісність електричного кола.

З'єднання металізованих площадок на структурі НПП із зовнішніми виводами корпусу виконують золотим дротом із застосуванням термокомпресорного зварювання. На стан контактних з'єднань у цьому випадку впливають інтерметалеві з'єднання Au₂Al та AuAl₂ та зміни їх складу під час експлуатації НПП.

Указані сполуки системи Au-Al виникають під час зварювання (+300 °C) лише в малих об'ємах на границі розділу металів. Спочатку з'єднання мають добрі механічні й електричні властивості, а з часом вони погіршуються, спричиняючи збільшення опору чи обрив одержаних термокомпресорним зварюванням контактів НПП.

Оскільки закономірності виникнення описаних відмов виявити важко, обґрунтувати ефективні методи прогнозування фактично неможливо.

Відмови, спричинені явищами на поверхні кристалу. Найбільш впливають на параметри напівпровідника фізико-хімічні зміни в його поверхневому шарі, що носять назву поверхневих станів – донорних і акцепторних, кількість яких значною мірою залежить від умов виготовлення НПП. Досягти високої стабільності параметрів під час

¹⁸Жердев Н. К. Контроль устройств на интегральных схемах / Н. К. Жердев, Б. Н. Креденцер, Р. Н. Белоконь ; под ред. Б. Н. Креденцера. – К. : Техніка, 1986.– 160 с.

зберігання та експлуатації НПП можна шляхом чіткого дотримання технологій у процесі виготовлення і, передусім, збирання. Волога й пил, які можуть потрапити всередину, хоч і на вже сформований захисний шар, врешті-решт досягають електронно-діркового переходу й призводять до появи нестабільності параметрів.

З іншого боку під час нагрівання НПП, що обтікається струмом, всередині його корпусу виділяється волога, яку увібрали його деталі та вологопоглинач (із переходом температури через точку роси). У разі значної кількості вологи це може призвести до раптової відмови НПП внаслідок пробою переходу.

Основним фактором, що визначає зміни параметрів НПП від часу наробітку, є підвищення концентрації носіїв. Виявивши закономірності цього процесу, можливо визначити досить інформативні параметри із наступним їх використанням у нових сучасних діагностичних процедурах та для прогнозування технічного стану напівпровідникових приладів.

2.7. Пошук дефектів і пошкоджень технічних об'єктів

Із встановленням наявності дефекту чи пошкодження технічного об'єкта проводиться його пошук, що об'єднує в собі ряд перевірок і вимірювань, які виконуються в певній послідовності. Ця послідовність називається *технологічним переходом* – *безпосереднім* чи *непрямим*. *Безпосередні технологічні переходи* дозволяють знайти дефекти шляхом вимірювання параметрів, визначення (знімання) характеристик. До таких переходів відносяться вимірювання, порівняння, перевірка електричних кіл. *Непрямі переходи* мають місце під час пошуку пошкоджень (дефектів) без вимірювання параметрів за ознаками, прямо не пов'язаними зі станом пристрою чи обладнання.

Відомі три основні методи пошуку дефектів – *комбінаційний*, *послідовний* та *евристичний*.

Комбінаційний метод відрізняється тим, що для визначення параметрів об'єкта чи окремих його складових частин технологічні переходи в процесі пошуку дефекту виконують у довільному порядку. Одержану інформацію аналізують шляхом порівняння із отриманою раніше (скажімо під час заводських, приймально-здавальних чи профілактичних випробувань). У результаті аналізу формують висновок про місце та причину дефекту.

Під час пошуку з метою одержання достатнього обсягу інформації вдаються до моделей, що замінюють реальний пристрій чи обладнання. Для простого технічного об'єкта в якості моделі можна

використати перелік його дефектів, що наводяться в заводській документації за схемою «*несправність, зовнішній прояв – ймовірна причина – метод усунення*».

Більш досконалою і такою, що доцільна для складних об'єктів, є блочна модель, що передбачає розподіл об'єкта на блоки. У цьому випадку пошук дефекту здійснюється за припущенням, що об'єкт справний, коли справні його складові й досить знайти несправний блок чи елемент, здійснюючи ряд переходів. Щоб зменшити кількість перевірок під час пошуку дефекта, застосовують дещо ускладнену модель, що враховує усі види зв'язку між блоками й здійснюють вимірювання вхідних сигналів, які надходять від попередніх елементів. Значне відхилення сигналу, що «видає» попередній елемент, від допустимого рівня на вході наступного елемента є підставою для висновку, що попередній елемент несправний.

Послідовний метод (метод послідовного наближення) – базується на виявленні зовнішніх ознак несправностей, подальшому пошуку несправної ділянки відповідно до зовнішніх ознак, наступному скороченні цієї ділянки шляхом виключення справних блоків (це прискорює пошук) і локалізації несправного елемента чи місця пошкодження. Виконавши кожен технологічний перехід у процесі пошуку, аналізують одержану інформацію і просуваються далі аж до виявлення дефекту.

Евристичний метод пошуку часто називають методом гіпотез, оскільки власне самому пошуку передують висунення гіпотез про причини та місцезнаходження дефекту. Метод доступний персоналові досить високої кваліфікації. Перевіряючи свої гіпотези, здійснюють ряд технологічних переходів, а потім висувають більш точну гіпотезу про причину дефекту та продовжують пошук аж до виявлення дефектного блока, елемента, деталі.

Проілюструвати кожен із методів пошуку дефектів можна на прикладі напівпровідникового мостового випрямляча, схема якого зображена на рис. 2.6.

Ознакою несправності випрямляча, скажімо, є відсутність напруги на його виході. *Застосовуючи комбінаційний метод*, слід розділити випрямляч на складові (елементи): запобіжник FU1, трансформатор T1, мостовий випрямляч UZ, конденсатори C1, C2 та дросель L. Послідовність технологічних переходів можна прийняти довільною, починаючи із запобіжника FU1. Результати перевірок вказаних елементів дозволяють виявити дефект, що показано в табл. 2.6.

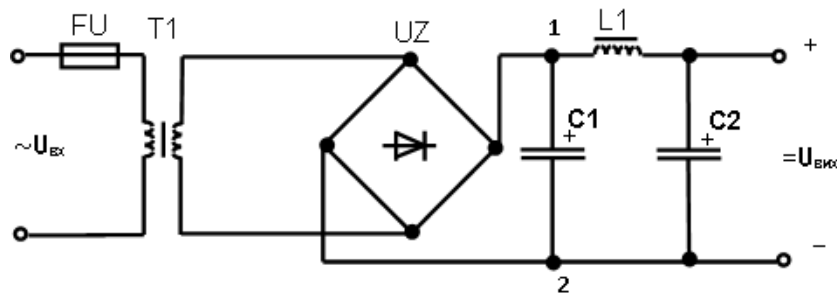


Рис. 2.6. Напівпровідниковий мостовий випрямляч змінного струму

2.6. Результати перевірок елементів напівпровідникового мостового випрямляча

Елементи пристрою (позначення за схемою)	FU	T1	UZ	C1	L	C2
Результати перевірки	+	+	+	+	-	+

знаком «+» відмічений справний елемент, знаком «-» – несправний

У результаті попередніх перевірок випрямляча виявлений дефект – обрив обмотки дроселя L.

За послідовного методу пошуку дефекту випрямляч розділяють на окремі функціональні блоки: блок подачі напруги однофазного змінного струму (FU1, T1); випрямляч, як перетворювач напруги (UZ), фільтр (C1, L, C2). Важливо те, що кожен з блоків легко перевірити (взагалі це одна із умов поділу на блоки). Пошук здійснюється шляхом послідовних вимірювань:

- напруги змінного струму на вході схеми (чи є і яка її величина);
- напруги після випрямляча (точки 1, 2), якщо вона є, то дефект знаходиться у фільтрі, а якщо немає, то несправність слід шукати в блоці подачі напруги (FU1, T1) або ж у випрямлячі UZ. Якщо точки першої перевірки вибрані вдало, пошук дефекту суттєво прискорюється.

Евристичний метод вимагає спочатку проаналізувати наявну інформацію про дефект у випрямлячі, а вона така:

- немає напруги на виході;
- візуально встановити місце дефекту не вдалося;
- запобіжник FU1 не спрацював, тобто коротких замикань у схемі випрямляча не було.

Можна зробити висновок, що дефект викликаний обривом чи в дроселі L, чи у випрямлячі UZ чи, нарешті, у трансформаторі T1. Далі слід виконати перевірки, рухаючись скажімо від виходу, а конкретно вимірявши напругу між точками 1 і 2 (коли вона є, то обрив у дроселі L). Усі три методи пошуку дефектів мають ряд спільних властивостей і можуть бути еквівалентними за результатами їх використання. Вибір методу пошуку дефектів залежить від складності технічного об'єкта, наявності запасних блоків та рівня кваліфікації персоналу.

Під час технологічних переходів у процесі пошуку дефектів набули поширення такі *основні способи перевірок*:

- зовнішній (візуальний) огляд об'єкта;
- заміна або вимикання окремого блока;
- вимірювання;
- спосіб характерних несправностей.

Зовнішній огляд дає можливість виявити не лише дефекти, але й пошкодження. Під час огляду звертають увагу на можливі обриви, механічні пошкодження деталей, місця пробоїв, підгорань, підтікання компаунду, потемніння резисторів, конденсаторів тощо. Перевіряють також ступінь нагріву напівпровідникових приладів, трансформаторів, дроселів, резисторів та конденсаторів. До недоліків цього способу слід віднести те, що пошкодження можна виявити лише в доступних для огляду місцях, і до того ж це досить важко зробити.

Спосіб заміни полягає в тому, що несправний блок чи елемент замінюють резервним, який завідомо справний і в разі необхідності відлагоджений. Перевірку можна здійснити таким чином досить швидко й легко, однак лише тоді, коли блоки чи деталі зйомні. Недоліком способу є те, що можна вивести з ладу під час перевірки об'єкта й новий блок (елемент). Поряд з цим, спосіб заміни можна реалізувати тільки на пристроях (обладнанні), які після пошкодження можна повторно вмикати. Причину пошкодження, як правило, вияснити не вдається.

Спосіб вимикання потребує вимикання всіх блоків та елементів, де за припущенням можуть бути пошкодження. При цьому одночасно спостерігають, з вимиканням якого саме блока чи елемента дефект щезає, а значить якраз цей блок і має дефект. Цей спосіб найбільш доцільно застосовувати під час пошуку пошкоджень у системах (блоках) живлення, коли спрацьовують захисні апарати. Недоліком способу є те, що треба неодноразово повторно вмикати живлення пристрою при ще не усуненому дефекті, а тому можна інколи викликати нові, може ще більш складні пошкодження. Щоб уникнути

цього, поступають дещо інакше: спочатку вимикають усі блоки (елементи), де може бути пошкодження, а потім їх по черзі вмикають і спостерігають за появою пошкодження.

Спосіб вимірювань дозволяє досить точно визначити місце й характер пошкодження шляхом виконання таких операцій, як «продзвонювання» електричних кіл, вимірювання напруг, опору, знімання осцилограм. При цьому використовують *контрольні точки та осцилограми чи рівні напруг*, вказані в заводській документації. Важливим є ретельний вибір вимірювальних приладів з урахуванням їх внутрішнього опору. Що ж до вимірювання опору резисторів, то їх по можливості вимикають чи втраховують у всякому разі наявність паралельних кіл.

Спосіб характерних несправностей полягає в тому, що за відомими ознаками визначають дефект. Такі таблиці за схемою «несправність, зовнішній прояв – ймовірна причина – метод усунення» містяться у заводській документації (як правило, в інструкціях з експлуатації технічних пристроїв або обладнання).

ЛІТЕРАТУРА

1. Ермолин Н. П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.
2. Куйбышев А. Б. Надежность асинхронных электродвигателей общепромышленного применения / А. Б. Куйбышев. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 104 с.
3. Котеленец Н. Ф. Испытания и надежность электрических машин : учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М. : Высш. шк., 1988. – 232 с.
4. Рекомендации по организации ремонта и технического обслуживания электрооборудования на основе диагностирования. – М. : ГОСНИТИ, 1985. – 88 с.
5. Таран В. П. Диагностирование электрооборудования / В. П. Таран. – К. : Техніка, 1983. – 200 с.

**Змістовий модуль 3.
Технічне діагностування
електрообладнання
і засобів автоматики**



1. ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

- 1.1. Технічне діагностування силових трансформаторів
- 1.2. Технічне діагностування комутаційних апаратів систем електропостачання
- 1.3. Технічне діагностування ліній електропередавання
- 1.4. Технічне діагностування розрядників та обмежувачів перенапруг
 - 1.4.1. Технічне діагностування вентильних розрядників
 - 1.4.2. Діагностування обмежувачів перенапруг
 - 1.4.3. Тепловізійне обстеження обмежувачів перенапруг
 - 1.4.4. Приладове забезпечення діагностування технічного стану розрядників та обмежувачів перенапруг
- 1.5. Технічне діагностування заземлювальних пристроїв
- 1.6. Діагностування технічного стану електрообладнання з використанням системи «ДІАГНОСТИКА +»
- 1.7. Пересувні електротехнічні лабораторії для діагностування електрообладнання систем електропостачання
 - 1.7.1. Пересувна лабораторія для діагностування силових трансформаторів «МЕГА-СЕРИЯ-1»
 - 1.7.2. Мобільна лабораторія для випробування і пошуку місць пошкоджень силових кабельних ліній «МЕГА-СЕРИЯ-2»
 - 1.7.3. Пересувна лабораторія для діагностування високовольтних вимикачів та акумуляторних батарей «МЕГА-СЕРИЯ-3»
 - 1.7.4. Пересувна лабораторія з повним оснащенням для діагностування електротехнічного устаткування і кабельних ліній «МЕГА-СЕРИЯ-4»
 - 1.7.5. Мобільний діагностичний комплекс для діагностування трансформаторного масла
 - 1.7.6. Пересувна лабораторія для діагностування релейного захисту й автоматики «МЕГА-СЕРИЯ-5»
 - 1.7.7. Мобільний діагностичний комплекс з повним оснащенням для контролю стану опор ліній електропередавання

1.1. Технічне діагностування силових трансформаторів

Загальні положення. Питання технічного діагностування силових трансформаторів, як і електрообладнання загалом, на сьогодні є надзвичайно актуальним, оскільки в експлуатації перебуває

значна кількість устаткування, яке виробило свій ресурс. При цьому слід зазначити, що в найближчі роки його масова заміна не може бути здійснена з цілого ряду причин. За таких обставин перехід на *систему обслуговування електрообладнання за технічним станом*, основою якої є оцінка його технічного стану шляхом діагностування, видається абсолютно очевидним.

Діагностуванню силових трансформаторів має надаватися особлива увага, що обумовлюється високою вартістю трансформатора, його значущістю в забезпеченні надійності електропостачання споживачів, а також складністю визначення пошкоджень і дефектів (рис. 1.1) на ранній стадії їх розвитку.

Склад робіт з технічного діагностування силових трансформаторів є таким:

- 1) діагностування силового трансформатора перед ремонтом:
 - візуальний огляд;
 - вимірювання втрат неробочого ходу (визначення стану сталі магнітопроводу, виявлення виткових замикань в обмотках);
 - вимірювання опору ізоляції обмоток ВН, СН, НН;
 - проведення досліду короткого замикання (визначення стану обмоток) під час введення трансформатора в експлуатацію;
 - вимірювання коефіцієнта трансформації;
 - вимірювання омичного опору обмоток ВН, СН, НН;
 - вимірювання опору ізоляції, тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta$, ємності C вводів (для силових трансформаторів напругою 35 кВ і вище);
 - вимірювання ємності C обмоток (для силових трансформаторів напругою 35 кВ і вище);
 - оформлення технічного звіту за результатами вимірювань і випробувань;
 - перевірка правильності роботи РПН (для силових трансформаторів напругою 35кВ і вище);

2) аналіз трансформаторного масла:

- аналіз трансформаторного масла з бака трансформатора;
- аналіз трансформаторного масла з бака РПН;
- видача протоколів аналізу трансформаторного масла.

Залежно від технічного стану, режимів і термінів міжремонтної експлуатації силових трансформаторів розділяють такі види робіт з їх обслуговування й ремонту:

- *технічне обслуговування трансформаторів* (проведення електричних вимірювань параметрів трансформатора, відбирання

проб і проведення фізико-хімічного аналізу трансформаторного масла, огляд трансформатора з метою виявлення протікань масла, забруднення ізоляторів, перевірка рівня масла за маслопоказником, усунення виявлених несправностей);

– *поточний ремонт трансформаторів (діагностування поточного стану трансформатора, відбирання проб і проведення фізико-хімічного аналізу трансформаторного масла, складання та узгодження із замовником кошторисів на проведення необхідного обсягу робіт. Виконання ремонту трансформатора. Післяремонтні випробування та оформлення технічного звіту про допуск трансформатора до експлуатації).* Як правило, виконується на місці встановлення трансформатора й пов'язаний з тимчасовим відключенням трансформатора, частковим розбиранням, заміною гумових ущільнень, заміною сорбенту в термосифонних фільтрах, доведення параметрів трансформаторного масла до експлуатаційних, перевіркою контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматики;

– *ремонт трансформаторів виведених з експлуатації через аварійний стан (діагностування поточного стану трансформатора, відбирання проб і проведення фізико-хімічного аналізу трансформаторного масла, складання та узгодження із замовником кошторисів на проведення необхідного обсягу робіт. Виконання ремонту трансформатора. Післяремонтні випробування та оформлення технічного звіту про допуск трансформатора до експлуатації).* Як правило, ці роботи вимагають ремонту в заводських умовах і пов'язані з повним розбиранням трансформатора, вийманням і подальшим сушінням активної частини, сушінням і регенерацією або повною заміною трансформаторного масла, відновленням або заміною ввводів, заміною гумових ущільнень, заміною сорбенту в термосифонних фільтрах, ревізією або заміною перемикальних пристроїв, ремонтом баків і замочної арматури, заміною або перевіркою контрольно-вимірювальних приладів і засобів автоматики;

– *капітальний ремонт трансформаторів пов'язаний із заміною однієї або декількох обмоток. Цей вид ремонту виконується лише в заводських умовах і передбачає повне розбирання трансформатора з розбиранням магнітопроводу, зніманням обмоток, виготовленням нових обмоток відповідних за електричними параметрами тим, що вийшли з ладу, а також повну заміну трансформаторного масла. За результатами дефектації обмоток трансформатора складається та узгоджується із замовником кошторис на виробництво робіт. Після закінчення ремонту проводяться*

післяремонтні випробування трансформатора й оформлення технічного звіту про допуск до експлуатації.

Потреба в надійних методах контролю й діагностування обумовила прагнення провідних експертів у цій області до вибору нових технологій, які дозволяють значно підвищити надійність та оптимізувати роботу кожного з елементів мережі.

У 1995 році фірмою «ЭЛЕНКОМ» (РФ) була розроблена й упроваджена комп'ютерна програма «Діагностика трансформатора», яка має вже кілька версій. Програма призначена для енергетичних підприємств, що експлуатують силові маслонаповнені трансформатори.

Програма в оперативному режимі відстежує технічний стан наявного парку експлуатованих підприємством трансформаторів і систематизує трансформатори за їх технічним станом. Вона дозволяє:

- автоматизовано створювати базу даних про технічний стан устаткування;
- автоматизовано обробляти результати вимірювань і порівнювати їх з нормативними значеннями;
- оцінювати стан устаткування за виміряними параметрами;
- створювати автоматизовану базу даних нормативно-технічних документів з питань діагностування.

Програма дає можливість експлуатаційному персоналу провести діагностування кожної одиниці устаткування, а саме:

- виявити початок виникнення пошкодження;
- показати динаміку розвитку процесу;
- комплексно розглянути результати всіх вимірювань з урахуванням впливу зовнішніх чинників;
- визначити характер можливого дефекту;
- прогнозувати можливий розвиток подій;
- виробити рекомендації щодо подальшої роботи з цим устаткуванням.

Вона містить кілька модулів, перелік яких і функціональне призначення наведені на рис. 1.2.

До параметрів та обладнання силових трансформаторів споживчих ТП, що підлягають перевірці під час технічного діагностування відповідно до Порядку проведення експертизи електроустановок споживачів¹⁹ віднесені:

¹⁹Порядок проведення експертизи електроустановок споживачів. Затверджено наказом Держнаглядохоронпраці від 30.12.99 № 257.

- опір та електрична міцність ізоляції (обмотка, балки відносно активної сталі, стяжні шпильки, вводи з паперово-масляною ізоляцією, вбудовані трансформатори струму);
- параметри трансформаторного масла;
- опір заземлювальних пристроїв;
- рівень освітлення;
- послідовність роботи контактів РПН.

За наявності на підстанції комплектних конденсаторних установок перевірі підлягають такі параметри силових конденсаторів:

- габарити;
- опір та електрична міцність ізоляції (між виводом і корпусом конденсатора);
- ємність кожного конденсатора;
- захист конденсаторів від короткого замикання в мережі напругою до 1 000 В із заземленою нейтраллю;
- опір заземлювальних пристроїв;
- рівень освітлення.

Фізико-хімічні методи оцінювання стану силових трансформаторів в умовах експлуатації. Показники стану трансформаторного масла. Під час експлуатації силових трансформаторів трансформаторне масло не лише виконує функції діелектрика й охолоджувального середовища, але і є *діагностичним середовищем*. Шляхом своєчасного контролю стану трансформаторного масла можуть бути виявлені більшість дефектів трансформатора, що розвиваються, зокрема:

- локальні перегриви;
- розряди в маслі та іскріння;
- забруднення і зволоження ізоляції;
- попадання до масла повітря;
- окислення та старіння масла й твердої ізоляції.

За таких обставин вдосконалення методів оцінювання різних показників трансформаторного масла безумовно є актуальним завданням. Значна частина існуючих методів оцінювання стану трансформаторного масла базується на контролі його фізико-хімічних показників. Частина методів дозволяє оцінювати стан ізоляції трансформаторів у процесі їх експлуатації.

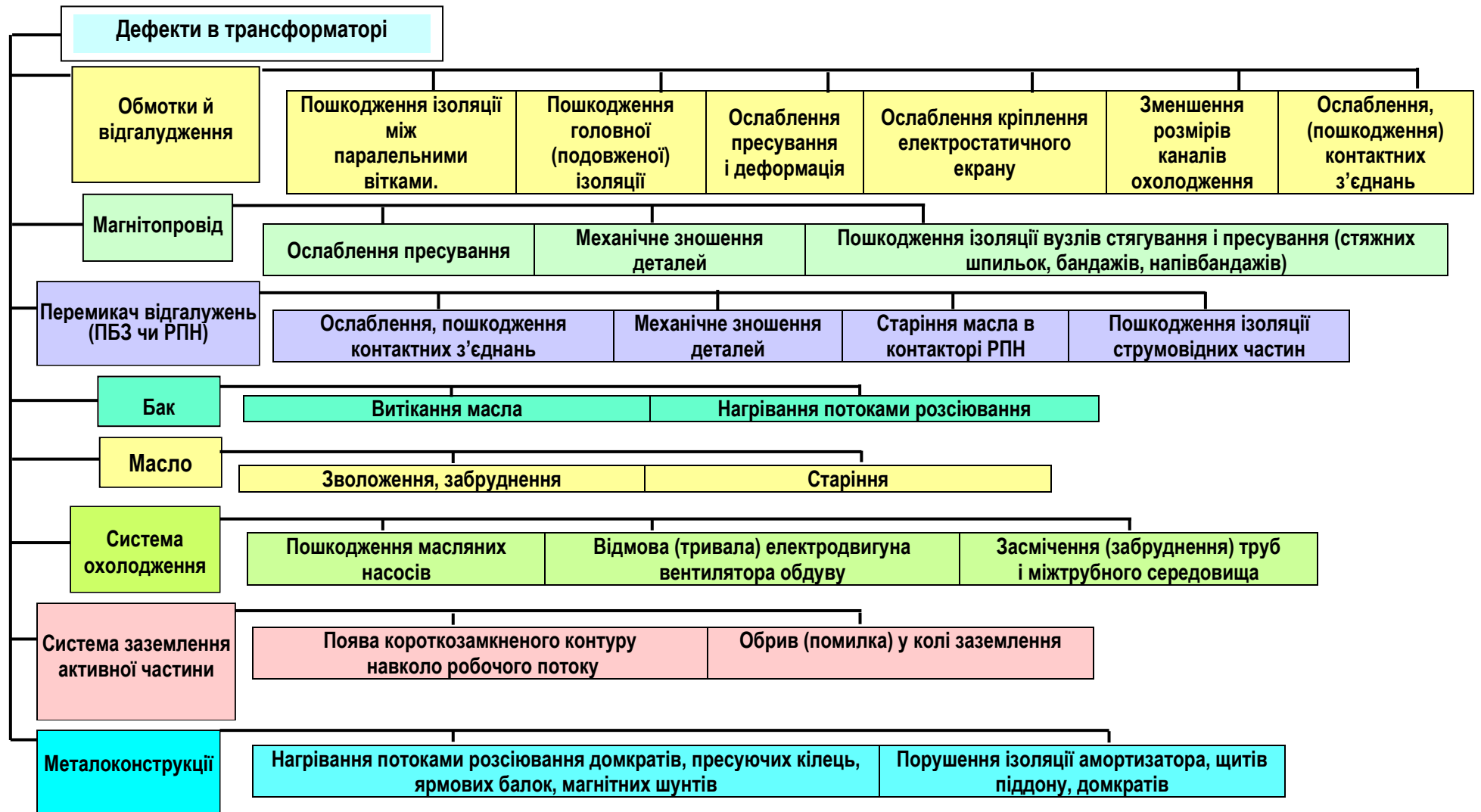


Рис. 1.1. Класифікація дефектів в силових трансформаторах

Модуль програми	Функціональне призначення модуля
1. Технічний стан трансформаторів	<p>Систематизація парку експлуатованих трансформаторів за технічним станом:</p> <ul style="list-style-type: none"> – трансформатори, що нормально працюють; – контрольна група трансформаторів; – забраковані трансформатори; – трансформатори, що експлуатуються понад 25 років.
2. База даних трансформаторів	<p>Створення пакету інформаційних документів про технічний стан трансформаторів:</p> <ul style="list-style-type: none"> – паспорт; – дефекти; – випробування, вимірювання; – ремонти.
3. Поточний стан трансформаторів	<p>Виявлення інформації про технічний стан устаткування на поточну дату в оперативному режимі</p>
4. Методики оцінки технічного стану трансформаторів	<p>Програмна реалізація методик оцінки технічного стану трансформатора:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Хімічний аналіз масла 2. Хроматографічний аналіз газів розчинних у маслі 3. Електричні вимірювання 4. <u>Тепловізійний контроль</u> 5. Оцінка стану трансформатора методом вимірювання опору короткого замикання 6. Аналіз газу з газового реле трансформатора 7. Візуальний огляд трансформатора
5. Аналіз пошкодженості трансформаторів	<p>Визначення ступеня вірогідності виникнення і розвитку конкретного дефекту шляхом комплексного розгляду результатів вимірювань на підставі методик оцінки стану трансформатора</p>
6. База нормативно-технічних документів	<p>Інформаційне забезпечення користувача нормативно-технічними документами з питань діагностування силових трансформаторів</p>

Рис. 1.2. Функціональне призначення модулів програми «Діагностика трансформатора» (фірма «ЭЛЕНКОМ», РФ)

Відповідно до чинних вимог²⁰ у процесі експлуатації силових трансформаторів передбачене вимірювання таких показників трансформаторного масла:

- пробивна напруга;
- вміст у маслі механічних домішок;
- тангенс кута діелектричних втрат масла;
- температура спалаху масла в закритому тиглі;
- кислотне число;
- вміст водорозчинних кислот і лугів;
- вологовміст;
- вміст антиокислювальної присадки;
- газовміст масла;
- хроматографічний аналіз розчинених газів;
- вміст фуранових похідних.

До наведеного переліку слід додати ще такі пояснення:

– *кислотне число* – це кількість їдкого калію (КОН) в міліграмах, яка необхідна для нейтралізації вільних кислот в 1 г масла. Цей показник свідчить про вміст у маслі будь-яких кислих речовин, а його збільшення – про окислення масла, що може викликати корозію конструкційних елементів, розвиток колоїдно-дисперсних процесів і зрештою призвести до зниження електричної міцності масла. Кислоти також можуть сприяти збільшенню поглинання води паперовою ізоляцією;

– *вміст водорозчинних кислот і лугів*, які можуть з'явитися як в процесі виробництва масла, так і утворитися в результаті його окислення в процесі експлуатації, свідчить про якість масла. Водночас зростання цього показника викликає розвиток корозії і старіння паперової ізоляції;

– *вологовміст* як показник стану масла контролюється у процесі експлуатації. Збільшення вологовмісту масла можливе під час попадання атмосферної вологи в масло із-за несправності або відсутності осушувачів у трансформаторів з вільним диханням, а також із-за всмоктування вологого повітря або дощової води в масло в трансформаторів з примусовою системою охолодження під час її негерметичності. Збільшення вологовмісту трансформаторного масла

²⁰ СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. Затверджено та надано чинності: наказ Міністерства палива та енергетики України від 15 січня 2007 р. № 13

призводить до зниження електричної міцності масла й маслобарерної ізоляції трансформатора в цілому;

– *газовміст масла* в процесі експлуатації також контролюється у трансформаторах з плівковим захистом масла від окислення для оцінювання його герметичності. Підвищення газовмісту масла сприяє інтенсивнішому його окисленню й погіршенню електричної міцності ізоляції активної частини трансформатора;

– *хроматографічний аналіз газів, розчинених у маслі*, дозволяє з високим рівнем достовірності діагностувати дефекти в трансформаторі, що розвиваються, і пов'язані з електричними розрядами в ізоляції та локальними перегрівками. З виникненням місцевих перегрівів або електричних розрядів масло й дотична паперова ізоляція розкладаються, а газоподібні продукти, що утворюються, розчиняються в маслі;

– *вміст фуранових похідних у трансформаторному маслі* побічно може свідчити про деструкцію паперової ізоляції. Термоліз, окислення і гідроліз ізоляції викликають часткове руйнування макромолекул целюлози, призводять до утворення компонентів фуранового ряду, які виділяються у трансформаторне масло.

Такі фізико-хімічні показники, як *кислотне число, вміст водорозчинних кислот і лугів, вологовміст і газовміст масла* є традиційними в практиці експлуатації силових трансформаторів упродовж багатьох років. Проведення хроматографічного аналізу газів²¹, розчинених у маслі, і показників оцінювання стану паперової ізоляції силових трансформаторів в експлуатації почалося порівняно недавно, однак вже накопичений чималий досвід такого аналізу газів, розчинених у маслі силових трансформаторів напругою 110–750 кВ, для виявлення їх дефектів в експлуатації.

За допомогою хроматографічного аналізу газів в силових трансформаторах можна виявити дві групи дефектів:

– перегріви струмовідних з'єднань і елементів конструкції остову;

– електричні розряди в маслі.

Для цього визначаються концентрації у маслі газів:

– водню H_2 ;

– метану CH_4 ;

– ацетилену C_2H_2 ;

²¹Львов М. Ю. Физико-химические методы в практике оценки состояния силовых трансформаторов в условиях эксплуатации : Учебно-методическое пособие / М. Ю. Львов, П. П. Кутлер. – М. : ИУЭ ГУУ, ВИПК-энерго, ИПК госслужбы, 2003. – 20 с.

- етилену C_2H_4 ;
- етану C_2H_6 ;
- оксиду вуглецю C ;
- діоксиду вуглецю CO_2 .

При цьому використовується поділ газів на *основні (ключові)* і *характерні (супутні)*. Під час перегріву струмовідних з'єднань та елементів конструкції остову трансформатора основним газом є C_2H_4 – в разі нагріву масла й паперово-масляної ізоляції понад $500\text{ }^\circ\text{C}$ – і C_2H_2 – під час дугового розряду. Характерними газами в обох випадках є H_2 , CH_4 , і C_2H_6 . За часткових розрядів у маслі основним газом є H_2 , а характерними газами з малим вмістом – CH_4 і C_2H_2 . За іскрових і дугових розрядах основними газами є H_2 або C_2H_2 , характерними газами з будь-яким вмістом – CH_4 і C_2H_4 . Під час перегріву твердої ізоляції основним газом є CO_2 . Слід також зазначити, що супутнім показником деструкції целюлозної ізоляції трансформатора є зростання вмісту оксиду й діоксиду вуглецю, розчинених у трансформаторному маслі. Наявність сумарної концентрації C і CO_2 понад 1 % може свідчити про деградацію целюлозної ізоляції.

Слід зауважити, що під час аналізу складу й концентрацій розчинених у маслі газів з метою діагностування експлуатаційного стану силових трансформаторів необхідно враховувати чинники, що викликають їх зміни.

До експлуатаційних чинників, які викликають підвищення концентрації розчинених у маслі газів, відносять:

- залишкові концентрації газів, що проникли під час ремонту трансформатора, якщо не була проведена дегазація масла;
- збільшення навантаження трансформатора;
- доливання масла, яке було в експлуатації і містить розчинені гази;
- проведення зварювальних робіт на баку трансформатора тощо.

До експлуатаційних чинників, які викликають зниження концентрації розчинених у маслі газів трансформаторів, відносять:

- зменшення навантаження трансформатора;
- дегазацію масла;
- доливання дегазованим маслом;
- заміну силікагеля тощо.

Для діагностування дефектів, що розвиваються в силових трансформаторах, використовують такі основні критерії:

- критерій граничних концентрацій;
- критерій швидкості наростання газів;
- критерій відношення парів характерних газів.

Суть методики критеріїв полягає в тому, що вихід значень параметрів за встановлені межі слід розглядати як ознаку наявності дефектів, які можуть призвести до відмови устаткування. Особливість методу хроматографічного аналізу газів полягає в тому, що нормативно встановлюються лише граничні концентрації газів, досягнення яких свідчить тільки про можливість розвитку дефектів у трансформаторі. Такі трансформатори слід брати під особливий контроль з прискореним відбиранням проб масла й проведенням хроматографічного аналізу.

Критерій граничних концентрацій дозволяє виділити із загальної кількості трансформаторного парку трансформатори з можливими дефектами, що розвиваються, а міра небезпеки розвитку дефекту визначається за відносною швидкістю наростання концентрації газу (газів). Якщо відносна швидкість наростання концентрації газу (газів) перевищує 10 % за місяць, то дефект вважається таким, що швидко розвивається. Характер дефекту, що розвивається, за результатами хроматографічного аналізу газів визначається за критерійними відношеннями концентрацій різних парів газів.

Прийнято розрізняти дефекти силових трансформаторів теплового й електричного характеру.

До *теплових дефектів* відносять: виникнення короткозамкнених контурів, підвищені нагріви ізоляції, контактів, відведень, шпильок та інших металевих конструкцій остову й бака трансформатора.

До *дефектів електричного характеру* відносяться розряди різної інтенсивності. Природно, що розвиток дефекту в трансформаторі може мати змішаний характер.

Аналіз існуючих методик оцінювання характеру дефектів (теплового або електричного характеру), що розвиваються, за результатами хроматографічного аналізу газів свідчить, що в них є значні відмінності як за виглядом, так і за кількістю використовуваних відношень парів газів. Нижче наведені використовувані поєднання парів характерних газів основних існуючих методик: Дорненбурга (Dornenburg's method), Мюллера (Mailier's method), Роджерса (CEGB/Rogers Ratios), МЕК (IEC 60599), BEI:

- методика Дорненбурга: CH_2/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$, $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$;

- методика Мюллера: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$, CO/CO_2 , $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$;
- методика Роджерса: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$;
- методика МЕК: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$;
- методика ВЕІ: CH_4/H_2 , $\text{C}_2\text{H}_4/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$, $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$, $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$, $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$.

Отримувані за відношенням концентрацій газів ознаки мають досить умовну діагностичну цінність, оскільки вони орієнтовані на визначення характеру дефекту, що розвивається, після перевищення встановлених граничних концентрацій хоча б одного вуглеводневого газу або водню. Статистичний аналіз свідчить, що найбільшу діагностичну цінність має методика МЕК (ГЕС 60599), яка й ми рекомендуємо застосовувати.

Результати хроматографічного аналізу розчинених газів у маслі силового трансформатора є свідченнями для проведення позачергових вимірювань опору ізоляції обмоток, тангенса кута діелектричних втрат обмоток, опору обмоток постійному струму, втрат холостого ходу, тепловізійного контролю поверхонь бака трансформатора й системи охолодження, а також проведення хроматографічного аналізу розчинених газів у маслі бака контактора. За сукупністю результатів вимірювань приймається рішення про проведення подальших заходів з цим трансформатором (залишити трансформатор у роботі з прискореним контролем, провести дегазацію масла, вивести трансформатор у ремонт тощо).

Приладове забезпечення діагностування технічного стану силових трансформаторів. Прилад IDAX-206 (рис. 1.3 а) для діагностування ізоляції силових трансформаторів забезпечує визначення вологості ізоляції силових трансформаторів з метою оцінювання їх технічного стану. Прилад IDAX підвищує ефективність технічного обслуговування трансформаторів, забезпечуючи оптимізацію навантаження і терміну служби устаткування.

IDAX-206 реалізує метод *діелектричної спектроскопії*, який протягом ряду десятиліть був доступний лише в лабораторних умовах. Цей випробуваний у польових умовах прилад визначає стан ізоляції всередині трансформатора під час розгортки за частотою, що забезпечує можливість чіткого визначення проблем, пов'язаних з вологістю, забрудненням твердої ізоляції й обмоток, введів або ж із провідністю масла.

Одним із найважливіших застосувань IDAX є визначення старіння або вмісту вологи в ізоляції трансформаторів, оскільки

наявність вологи в ізоляції значно прискорює процес її старіння. IDAX забезпечує можливість достовірного оцінювання вмісту вологи за одне випробування, яке може бути виконане за будь-якої температури.

Оцінювання вмісту води в ізоляції силових трансформаторів (маслі й папері), що базується на тестуванні зразків масла, є дуже складним, оскільки має місце перехід вологи з твердої ізоляції в масло й у зворотному напрямку за змінної температури. Будь-який зразок (проба) масла має бути взятий за відносно високої температури, коли трансформатор знаходиться у рівноважному стані. На жаль, це є незвичайним станом трансформаторів, залишаючи, таким чином, можливість отримання недостовірної оцінки.

Підготовка до випробувань і процедура випробувань подібна до стандартної процедури тестування коефіцієнта потужності, тобто трансформатор має бути відключений від мережі та від'єднаний від всього комутаційного устаткування.

Програмне забезпечення приладу IDAX спрямовує користувача відповідно до шаблону випробувань. Випробування може бути запущене відразу ж після під'єднання тестових кабелів. Повідомлення про помилки на екрані інформуватимуть користувача, якщо в з'єднаннях допущені які-небудь помилки. Аналіз на екрані може виконуватися паралельно активному тестуванню.

Нова модернізована версія системи IDAX-206 функціонує під операційною системою Windows XP і підтримує всі мережеві можливості та USB-зв'язок.

Прилад для автоматичного вимірювання тангенса кута діелектричних втрат і питомого електричного опору DTL (рис. 1.3 б) розроблений для визначення тангенса кута діелектричних втрат, відносної діелектричної проникності й питомого електричного опору (МОм) електроізоляційних рідин з метою оцінювання ступеня їх старіння. Прилад DTL призначений для контролю якості масла в технологічних установках, зокрема в установках для очищення і дегазації масла. Під час використання разом із відповідним програмним забезпеченням фірми «BAUR», прилад дозволяє істотно спростити процедуру керування технологічним процесом. У прилад вбудовані процедури випробувань за всіма існуючими стандартами (IEC 247, VDE 0370, BS 148, ASTM 924, і т.д.), які вибирають за допомогою програмного забезпечення. Додатково можна задати два призначені для користувача цикли випробування.

Функціональні особливості приладу DTL є такими:

- автоматичне калібрування порожньої вимірювальної комірки за допомогою високоточного зразкового конденсатора;

- вимірювання опору в діапазоні 2,5 МОм – 20 ТОм шляхом прикладення напруги до 500 В постійного струму;
- вимірювання опору до 100 ТОм (опція);
- вимірювання тангенса кута діелектричних втрат до 1×10^{-6} ;
- вимірювання відносної діелектричної проникності;
- високочастотний індукційний нагрів вимірювального вічка: короткочасний рівномірний нагрів;
- дружній інтерфейс користувача: вимірювання тангенса кута діелектричних втрат і питомого опору виконуються автоматично, відповідно до вибраного стандарту;
- безпосереднє вимірювання температури з використанням датчика, розташованого усередині вимірювального електроду;
- вбудований інтерфейс RS232 для зв'язку з персональним комп'ютером.

Прилад має триелектродну випробувальну комірку МС 2А, виготовлену з хромо-нікелевої сталі, що відповідає вимогам ІЕС 60247. За запитом може бути поставлена вимірювальна комірка проточного типу для безперервного моніторингу значення тангенса кута діелектричних втрат.

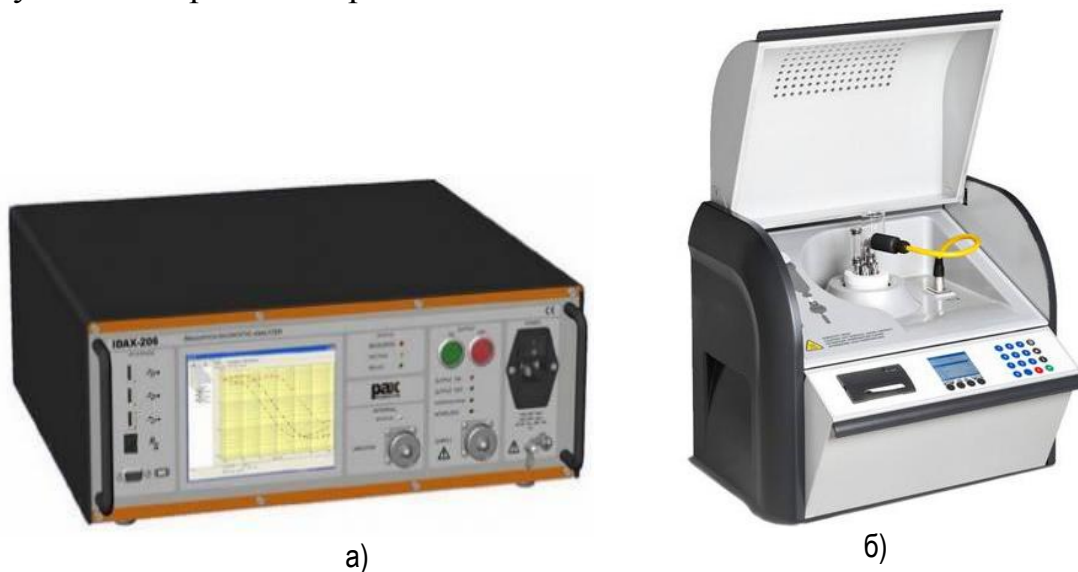


Рис. 1.3. Прилади для діагностування ізоляції силових трансформаторів: а) прилад IDAX-206 для діагностування ізоляції силових трансформаторів; б) установка для автоматичного вимірювання тангенса кута діелектричних втрат і питомого електричного опору DTL

Автоматичний тестер трансформаторного масла DPA 75 (рис.1.4 а) використовують для вимірювання електричної міцності електроізоляційних рідин на пробій. Система контролю пробою RBM (Real Breakdown Monitoring) забезпечує отримання результатів з високою точністю за допомогою спеціальної функції, яка дозволяє виключити помилкове детектування (встановлення) пробою. Напряга пробою разом із тангенсом кута діелектричних втрат і відносною діелектричною проникністю є критичним параметром, що визначає якість електроізоляційних рідин. Напряга пробою відображає міру забрудненості рідини різними домішками, зокрема целюлозними волокнами й водою.

Особливостями тестера DPA 75 є:

- випробувальна напруга в діапазоні 0–75 кВ (еф). Завдяки малому часу відключення на пробій (< 1 мс) і наявності обмежувача струму можливе проведення багаточисельних вимірювань для однієї і тієї ж проби силіконового (кремнійорганічного) масла;
- чітке детектування пробою за допомогою системи контролю пробою RBM;
- точне встановлення зазору між електродами за допомогою вбудованого відкаліброваного верньєра;
- електроакустичний контроль встановлення нульового зазору між електродами;
- очищення судини для випробувань відповідно до заданої процедури;
- вбудований датчик для вимірювання температури електроізоляційної рідини;
- вбудований принтер для автоматичного виведення на друк результатів і параметрів випробувань (опція);
- захисна кришка з пристроєм блокування;
- маслонепроникна клавішна панель і легкий для читання графічний дисплей;
- ергономічна конструкція;
- компактний дизайн, мала маса;
- скляна посудина для випробувань з кришкою для запобігання попаданню вологи;
- зручність транспортування за допомогою наплічного паска або ручки (опція);
- можливість роботи від мережі або від акумуляторних батарей (опція).

Автоматичний прилад для випробувань трансформаторного масла DTA 100 (рис. 1.4 б) забезпечує випробування напругою до 100 кВ (табл. 1.1). Усі необхідні дані відображаються на великому дисплеї з високим дозволом. Спеціалізоване програмне забезпечення має спливаючі меню і доступне в роботі. Захисна кришка приладу забезпечена блокуванням, що відключає високу напругу під час її відкриття. У процесі роботи на дисплей виводиться інформація про потрібні від оператора дії (своєрідна підказка), наприклад, про необхідність перевірки відстані між електродами.

1.1. Технічні характеристики приладу DTA 100

Тестова напруга	Швидкість підйому напруги		Температура зразка
0–100 кВ	0,5/ 1/ 2/ 3/ 4/ 5 кВ/с		0–99 °С
Струм відключення	Час відключення	Живлення	Маса
4 мА	< 1 мс	мережа	37 кг

Прилад має такі особливості:

- можливе проведення кількох випробувань на пробах кремній-органічного (силіконового) масла внаслідок короткого часу пробою (< 1 мс) та обмеження струму;
- результати вимірювань можуть передаватися до персонального комп'ютера для зберігання й обробки;
- автоматичне самотестування приладу забезпечує виключно високу точність вимірювань;
- наявність вбудованого датчика для збирання даних про температуру електроізоляційної рідини.

Прилад, вирізняється функціональною, ергономічною конструкцією і містить:

- вбудований принтер для друкування на звичайному папері, що дозволяє автоматично отримати звіт за даними випробування;
- перемикач з блокуванням від неправильного спрацьовування для захисної кришки;
- маслостійку індикаторну панель з сенсорним управлінням і легкий для читання графічний дисплей.

Система моніторингу трансформаторного масла HYDRAN M2 (рис. 1.4 в) забезпечує моніторинг вмісту газів і вологи в електроізоляційній рідині. За використання цієї системи контроль масла на працюючому трансформаторі (реакторі тощо) здійснюється безперервно, записування даних здійснюється із заданою періодичністю у внутрішню пам'ять або надсилається диспетчерові.

Прилад встановлюється на один патрубок діаметром 1,5 дюйма.

HYDRAN M2 не має насосів, а тому для підключення до системи циркуляції масла потрібна одна точка. Циркуляція масла здійснюється конвекційним способом за допомогою спеціального часо-імпульсного нагрівача. Прилад не вимагає додаткових виводів патрубків маслосистеми й не має деталей, що обертаються і труться. Така конструкція спрощує встановлення, підвищує надійність вузлів приладу й значно подовжує термін служби (не обмежений).

Розрахунок тренду (зміни величини за певний період часу) дозволяє виявити швидкість зміни концентрації води або газів у маслі. Поступове збільшення вимірюваної величини викликає зростання тренду, при цьому годинний тренд дозволяє оцінити швидкі зміни величини (за кілька годин), а денний тренд відображає тривалі процеси (до місяця). На швидкість зміни волого- й газовмісту масла налаштовується сигналізація (рівні «тривога», «аварія»), що дозволяє не пропустити зростання швидкості росту величини (тобто якісно оцінити вміст води й газів) та своєчасно відреагувати. Кожен рівень сигналізації можна настроїти індивідуально для таких контрольованих параметрів:

- вміст газів у маслі;
- поточні й усереднені (фільтровані) значення відносної вологості та вологовмісту;
- годинний і денний тренд цих величин;
- температура (висока, низька);
- рівні аналогових входів (високі, низькі).

Розчинність води в маслі залежить від температури, тому за такої ж відносної вологості масла вологовміст варіюється в широких межах. Мікропроцесор дозволяє розрахувати як абсолютну (за масою, г/т), так і відносну (%) вологість масла для подальшого оцінювання ступеню старіння твердої ізоляції.

Отримані дані обробляються й оцифровуються мікроконтролером і записуються у незалежну пам'ять. Одночасно ведеться два види запису даних:

- короткострокова історія (інтервал опитування датчиків – від 5 секунд до 360 хвилин);
- довгострокова історія (від 1 до 4 разів за добу).

Поряд із цим фіксуються історія подій (включення, зміна будь-яких налаштувань, виникнення і підтвердження тривоги) та історія сервісу (дані калібрування і стани датчиків).

Прилад має гнучке налаштування рівнів сигналізації по всіх входах. Забезпечується самодіагностування датчиків і системи (двічі на місяць процесор виконує перевірку справного функціонування всіх

систем і калібрування датчиків), можливе віддалене або місцеве керування приладом. Прилад може працювати повністю незалежно від комп'ютера. Усі розрахунки й операції з даними здійснюються мікропроцесором.

Керування і налаштування приладу здійснюється за допомогою вбудованої клавіатури (8 клавіш) і 7-рядкового дисплея (128x64 точки) з підсвічуванням. Відсутність живлення не впливає на збереження даних і налаштувань. Термін служби елемента живлення – 10 років.



Рис. 1.4. Прилади для контролю трансформаторного масла:
а – автоматичний тестер трансформаторного масла DPA 75;
б – автоматичний прилад для випробувань трансформаторного масла DTA 100; в – система контролю трансформаторного масла HYDRAN M2

Прилад не вимагає жодних витратних або допоміжних матеріалів. Активними елементами датчика-вимірника є мембрана й електрохімічні перетворювачі, що знаходяться за нею. П'ять «сухих»

контактів приладу використовують для індикації, сигналізації та захисту. П'ять внутрішніх реле працюють під керуванням контролера й дозволяють реалізувати нормально замкнені/нормально розімкнені кола сигналізації і захисту. При цьому чотирі реле настроюються користувачем, а п'яте є механічним індикатором нормального функціонування приладу.

Переносний аналізатор розчинених газів TRANSPORT X (рис. 1.5) використовує нову технологію, що базується на принципі фотоакустичної спектроскопії, для отримання точних і достовірних результатів про стан силових трансформаторів безпосередньо на об'єкті протягом кількох хвилин.

Прилад TRANSPORT X мінімізує ризик перенесення домішок між послідовними вимірюваннями, забезпечує можливість переходу від аналізу проб з високою концентрацією газів (як в разі перемикачів відгалужень) до проб з низькою концентрацією (для основних резервуарів) без «забруднення» результатів. Таким чином, користувач може з упевненістю перевіряти маслонаповнене устаткування всіх типів.



Рис. 1.5. Переносний аналізатор розчинених газів TRANSPORT X

Вбудоване діагностичне програмне забезпечення допомагає перевести дані з ppm²² в зручну для користувача форму. Реалізовані основні методики оцінювання характеру дефектів, що розвиваються, допомагають оперативно оцінити стан трансформатора. Комплектне

²² parts per million (частин на мільйон) – одиниця вимірювання концентрації.

програмне забезпечення для персонального комп'ютера TransportPro дозволяє користувачеві легко завантажувати записи для аналізу трендів і подальшого діагностування.

TRANSPORT X є новим портативним приладом, що базується на аналізі газів, розчинених у маслі, що забезпечує точність вимірювань за простоти у використанні.

Тепловізійний контроль силових трансформаторів. Тепловізійний контроль щодо силових трансформаторів є допоміжним методом діагностування, що дає можливість разом із традиційними методами (вимірювання характеристик ізоляції, струму неробочого ходу, хроматографічного аналізу складу газів у маслі тощо) отримати додаткову інформацію про стан об'єкта.

Досвід проведення ІЧ-діагностування силових трансформаторів переконує, що за його допомогою можна виявити такі несправності:

- виникнення магнітних полів розсіювання в трансформаторі внаслідок порушення ізоляції окремих елементів магнітопроводу (консолі, шпильки тощо);
- порушення у роботі системи охолодження (маслонасосів, фільтрів, вентиляторів тощо);
- зміна внутрішнього циркулювання масла в баку трансформатора (утворення застійних зон) у результаті шламоутворення, конструкційних прорахунків, розбухання або зсуву ізоляції обмоток (особливо в трансформаторах з великим терміном служби);
- нагріву внутрішніх контактних з'єднань обмоток з виводами трансформатора;
- виткове замикання в обмотках вбудованих трансформаторів струму;
- погіршення контактної системи деяких виконань РПН тощо.

Можливості ІЧ-діагностування стосовно трансформаторів недостатньо вивчені. Складнощі полягають у тому, що, по-перше, тепловиділення під час виникнення локальних дефектів у трансформаторі «заглушуються» природними тепловими потоками від обмоток і магнітопроводу, а, по-друге, робота охолоджувальних пристроїв, яка сприяє прискореному циркулюванню, масла певною мірою згладжує температури, що виникають у місці дефекту.

Під час аналізу результатів ІЧ-діагностування необхідно враховувати конструкцію трансформаторів, спосіб охолодження обмоток і магнітопроводу, умови й тривалість експлуатації, технологію виготовлення та ряд інших чинників.

Оскільки оцінювання внутрішнього стану трансформатора тепловізором здійснюється шляхом вимірювання значень температури на поверхні його бака, необхідно зважати на характер теплопередачі магнітопроводу й обмоток.

Поряд із цим джерелами тепла є:

- масивні металеві частини трансформатора, у тому числі бак, пресуючі кільця, екрани, шпильки тощо, у яких тепло виділяється за рахунок додаткових втрат від вихрових струмів, що наводяться полями розсіювання;

- струмовідні частини введень, де тепло виділяється за рахунок втрат власне в струмовідній частині й у перехідному опорі з'єднувача відведення обмотки;

- контакти перемикачів РПН.

Умови теплопередачі, характер розподілу температур у трансформаторах різного конструкційного виконання детально висвітлені в технічній літературі. Стосовно найбільш поширеної конструкції трансформаторів із природною циркуляцією масла (системи охолодження М і Д) характер зміни температури по висоті трансформатора й у горизонтальному перерізі наведений на рис. 1.6.

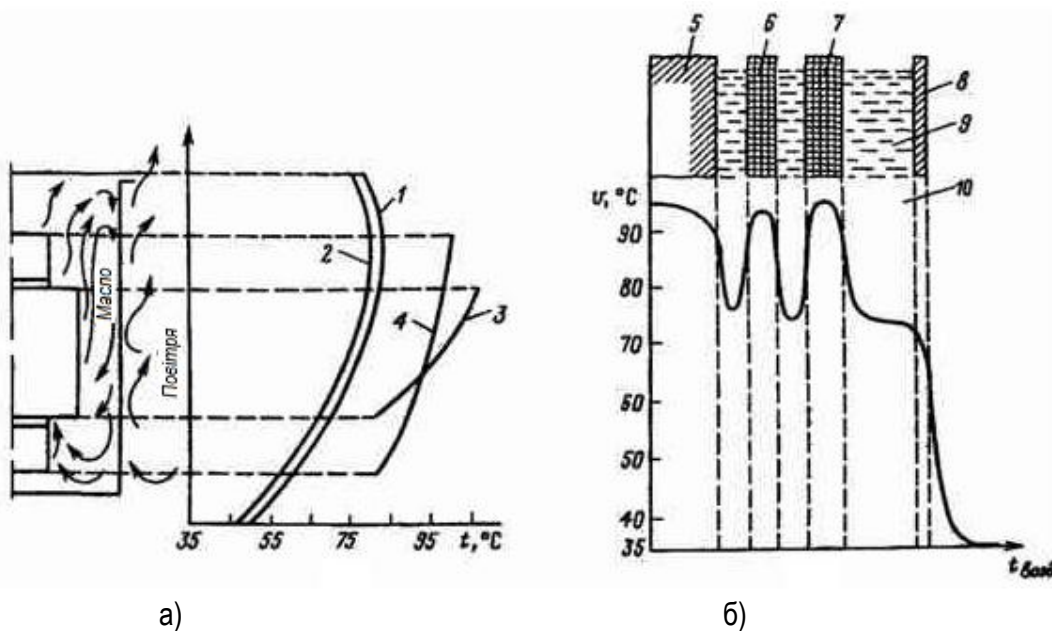


Рис. 1.6. Характер зміни температури в силовому трансформаторі: а) зміна температури по висоті; б) розподіл температури в горизонтальному перерізі (1 – температура масла; 2 – температура стінок бака; 3 – температура обмотки; 4 – температура магнітопроводу; 5 – магнітопровід; 6 – обмотка НН; 7 – обмотка ВН; 8 – стінка бака; 9 – масло; 10 – повітря)

Відведення теплових втрат від магнітопроводу й обмоток до масла й від останнього до системи охолодження здійснюється шляхом конвекції. Зони інтенсивного руху масла є лише в поверхонь бака трансформатора, де відбувається теплообмін. Останнє масло в баку трансформатора знаходиться у відносному спокої і приходить у рух під час зміни навантаження або температури повітря, що охолоджує.

Відповідно до п. 5.3.13 ПТЕ температура верхніх шарів масла за номінального навантаження трансформатора має бути не вищою:

- 75 °С у трансформаторів і реакторів з охолодженням ДЦ;
- 95 °С у трансформаторів з природним масляним охолодженням та охолодженням Д;
- 70 °С у трансформаторів з охолодженням Ц (на вході в маслоохолоджувач).

Згідно* з рекомендаціями в трансформаторах із системами охолодження М і Д різниця між максимальною та мінімальною температурами по висоті трансформатора складає 20–35 °С.

Перепад температур масла по висоті бака в трансформаторах з системами охолодження ДЦ та Ц знаходиться в межах 4–8 °С, проте, не дивлячись на таке вирівнювання температур масла по висоті бака, тепловіддача від обмоток все ж здійснюється шляхом природної конвекції масла. Це означає, що температура котушок у верхній частині обмоток буде значно вища, ніж у нижній.

Таким чином, якщо в трансформаторах з природною циркуляцією масла температура верхніх шарів масла й температура у верхніх каналах обмотки приблизно однакові, то в трансформаторах з примусовою циркуляцією масла в баку матиме місце значний перепад між температурою масла у верхніх каналах обмоток і температурою верхніх шарів масла в баку. Тому в трансформаторах з природною і примусовою циркуляцією масла найбільш нагрітими є верхні котушки обмоток, ізоляція яких старіє швидше, ніж нижніх котушок.

У документі²³ наголошується, що під час оцінки нагрівання масла в трансформаторах слід зважати на можливість застою верхніх шарів масла та його підвищеного нагрівання, якщо відстань між кришкою бака й патрубками радіаторів або охолоджувачів велика (понад 200–300 мм).

Наведені вище значення температур для окремих конструкцій трансформаторів характерні для сталого режиму роботи. Під час

²³ Рекомендации по проведению тепловых испытаний силовых масляных трансформаторов (и автотрансформаторов) на месте их установки. – М. : Энергия, 1972.

проведення ІЧ-діагностування трансформаторів необхідно враховувати те, що постійна часу обмоток відносно мала й у різних виконань трансформаторів знаходиться у межах 4–7 хв, а постійні часу всього трансформатора – в межах 1,5–4,5 години. Сталий тепловий режим трансформатора по обмотках настає приблизно через 20–30 хв, а по маслу – через 10–20 годин. Під час проведення ІЧ-діагностування з урахуванням розглянутих вище температурних режимів роботи трансформаторів є можливість визначити умови оцінювання їх стану.

Визначення місця розташування дефектів у магнітопроводах трансформаторів. Як відомо, стан магнітопроводу трансформатора досить ефективно оцінюється за результатами хроматографічного аналізу складу газів, розчинених у маслі. За складом і вмістом газів у маслі визначається вид дефекту (див. п. 1.1.2) трансформатора. Наприклад за наявності пошкодження в магнітопроводі трансформатора, обумовленого перегрівом, основними під час аналізу розчинених у маслі газів є етилен (C_2H_4) або ацетилен (C_2H_2). Характерні гази: водень (H_2), метан (CH_4) і етан (C_2H_6). Утворення вказаних газів у маслі може бути обумовлене: порушенням ізоляції стяжних шпильок, ярмових балок, амортизаторів, пресуючих кілець, місцевими нагрівом від магнітних полів розсіювання у ярмових балках, бандажах, пресуючих кільцях, неправильним заземленням магнітопроводу та ін. Інфрачервоне обстеження трансформаторів, за висновками багатьох науковців, свідчить, що, будучи допоміжним засобом контролю, воно дозволяє за наявності газоутворення у трансформаторі оцінити зону утворення дефекту в магнітопроводі, а за наявності заводської технологічної документації звизити місце пошуку дефекту.

Для здобуття повніших даних про характер розвитку дефекту доцільно проводити ІЧ-контроль за неробочого ходу трансформатора й додатково під час двох – трьох рівнях навантаження.

Визначення внутрішніх дефектів обмоток. Експерименти, проведені на моделях, показали, що під час інфрачервоного контролю у багатьох випадків можуть виявлятися:

- локальні нагриви в баку трансформаторів, пов'язані з місцевим перегрівом окремих котушок обмотки;
- перегриви контактних з'єднань відведень обмоток;
- утворення застійних зон масла, викликаних розбуханням паперової ізоляції витків, утворенням шламу або помилками під час конструювання.

Перегрів котушок (як правило, крайніх) обумовлені наявністю в трансформаторах полів розсіювання, залежних від номінальної потужності трансформатора, втрати від яких досягають 30–50 % основних втрат. За наявності значних полів розсіювання, перевищення температури крайніх котушок або витків окремих обмоток над температурою масла можуть бути в 1,5–2 рази вище розрахункових.

Статистикою наголошується, що 22 % загальної кількості відмов обумовлено порушенням ізоляції й пошкодженням обмоток, причому за останні роки почастишали пошкодження старих трансформаторів, що мають характерні конструктивні дефекти. Виявлення внутрішніх дефектів у трансформаторах шляхом вимірювання температури на поверхні їх баків є трудомісткою операцією, залежить від багатьох чинників (конструкції обмоток, навантаження, способу охолодження, зовнішніх кліматичних чинників, стану поверхні трансформатора тощо) і дозволяє розпізнавати несправності лише на пізніх стадіях їх розвитку.

Істотний вплив на розподіл температури по поверхні бака трансформатора справляють заходи конструкційного характеру, вжиті заводом-виготівником із вирівнювання втрат в обмотках трансформаторів. Нерівномірність розподілу цих втрат по обмотці може бути однією з причин виникнення місцевих перегрівів, що викликають прискорене старіння ізоляції окремих котушок або витків обмоток, а також виникнення локальних нагрівів на стінках бака трансформатора.

Визначення працездатності пристроїв системи охолодження трансформатора. Знімання термограм пристроїв системи охолодження трансформаторів (дугтьових вентиляторів, маслонасосів, фільтрів, радіаторів трансформаторів з природним циркулюванням масла тощо) дозволяє оцінити їх працездатність і за необхідності вжити оперативних заходів щодо усунення неполадок.

Маслонасоси. Температура нагріву на поверхні корпусу маслонасоса й трубопроводів працюючого трансформатора практично однакова. Під час появи несправностей у маслонасосі (тертя крильчаток, виткове замикання в обмотці електродвигуна тощо) температура на поверхні його корпусу повинна підвищитися й перевищити температуру на поверхні маслопроводу.

Дугтьові вентилятори. Оцінка теплового стану електродвигунів вентиляторів здійснюється зіставленням вимірних значень температур нагріву. Причинами підвищення нагріву електродвигунів можуть бути: несправність підшипників кочення,

неправильно вибраний кут атаки крильчатки вентилятора, виткове замикання в обмотці електродвигуна тощо.

Термосифонні фільтри. За даними ІЧ-контролю можна говорити про працездатність термосифонних фільтрів трансформаторів. Як відомо, термосифонний фільтр призначений для безперервної регенерації масла в процесі роботи трансформатора. Рух масла через фільтр з адсорбентом відбувається під дією тих же сил, які забезпечують рух масла через радіатори, що охолоджують, тобто під дією різниці щільності гарячого й холодного масла.

Термосифонний фільтр приєднаний паралельно трубам радіатора системи охолодження, тому в працюючого фільтру температури на вході й виході, якщо трансформатор навантажений, повинні відрізнятися між собою. У налагодженому фільтрі матиме місце плавне підвищення температури по його висоті. Під час використання дрібнозернистого силікагелю, шламоутворення у фільтрі, випадкового закриття засувки на трубопроводі фільтру чи роботи трансформатора в режимі неробочого ходу циркуляція масла у фільтрі буде незначною або може бути відсутньою взагалі. У таких випадках температура на вході й виході фільтру буде практично однакова.

Перемикальні пристрої серії РНТ і подібні до них, вбудовувані в трансформатори, складаються з перемикача й реактора, розташованих у баку трансформатора, а також контактора. Контактор перемикального пристрою розміщується в окремому кожусі, розташованому на стінці бака трансформатора й залитому маслом.

Контроль стану контактів перемикача, зважаючи на його глибинне розташування у баку трансформатора, дуже проблематичний. Під час перегріву контактів контактора із-за невеликого об'єму залитого в нього масла на стінках бака контактора мають місце локальні нагриви.

Радіатори. Несправність плоского крану радіатора або помилкове його закриття наводить до перекриття протікання масла через радіатор. У цьому випадку температура труб радіаторів істотно нижча, ніж у працюючого радіатора. З часом поверхні труб радіаторів піддаються дії іржі, на них осідають продукти розкладання масла й паперу, що деколи призводить до зменшення перерізу для протікання масла або повного його припинення. Труби з подібними відхиленнями холодніші за останніх.

Датчик температури. Практично єдиним критерієм оцінки ефективності роботи системи охолодження є температура верхніх шарів масла трансформатора, вимірювана за допомогою термометрів,

або термометричних сигналізаторів з електроконтактним манометром, або дистанційних термометрів опору, що встановлюються в гільзах кришки бака трансформатора. Контроль температури масла в цих випадках може бути пов'язаний з істотними похибками, які обумовлені інструментальною точністю вимірювань, місцем розміщення гільзи та іншими чинниками. Тому під час термографічного обстеження трансформатора необхідно також порівнювати значення температур на кришці бака, виміряні тепловізором, з даними датчика температури.

Поверхні бака трансформатора. Знімання температурних профілів бака трансформатора в горизонтальному й вертикальному напрямках і зіставлення їх з конструкційними особливостями трансформатора (розташування обмоток, відведень, елементів охолодження тощо), пофазне порівняння отриманих даних залежно від тривалості експлуатації й режиму роботи дозволяють отримати додаткову інформацію про характер протікання теплових процесів в баку трансформатора. За термографічного обстеження трансформатора необхідно оцінювати як значення температур, так і їх розподіл по фазах. Термограма силового трансформатора наведена на рис.1.7.

Маслорозширники. Як відомо, під час зміни теплового стану трансформатора відбувається обмін масла між його об'ємами, що знаходяться в баку трансформатора й маслорозширнику. Під час стабілізації теплового стану теплообмін між цими об'ємами масла відбувається в основному за рахунок теплопередачі. Так, оглядаючи трансформатор за допомогою тепловізора вихлопної труби, видно рівень масла, що знаходиться в ній, і характер зміни температури по висоті труби. Під час роботи трансформатора з навантаженням є видимим також і рівень масла в його маслорозширнику.

Проте в окремих випадках у маслопроводі, що сполучає кришку трансформатора з маслорозширником, може відбуватися різке падіння температури на поверхні маслопроводу безпосередньо після газового реле або відсічного клапана. Причина такої аномалії має бути вивчена з урахуванням конструкції трансформатора, діаметру маслопроводу, навантаження та інших чинників і може бути обумовлена дефектом плоского крану, розташованого в газовому реле.

Термографічне обстеження трансформатора. Термографічне обстеження трансформатора багато в чому є допоміжним засобом оцінювання його теплового стану й справності в роботі пов'язаних з ним систем і вузлів. Термографічному обстеженню трансформатора повинне передувати ознайомлення з конструкцією обмоток, системою

охолодження, результатами роботи трансформатора, об'ємом і характером ремонтних робіт, що виконувалися, тривалістю експлуатації, аналізом пошкоджень трансформаторів ідентичного виконання (якщо вони відбувалися), результатами експлуатаційних випробувань і вимірів тощо.

Поверхні бака трансформаторів, термосифонних фільтрів, систем охолодження мають бути оглянуті, і з них, за можливості, необхідно видалити бруд, сліди масла, очистити й зафарбувати ділянки, покриті іржою, тобто створити умови для забезпечення однакової випромінювальної здатності поверхонь трансформатора. Тепловізійне обстеження слід переважно проводити вночі (перед сходом сонця), при відключеному штучному освітленні трансформатора, у безвітряну, недощову погоду, при максимально можливому навантаженні й у режимі неробочого ходу. Тепловізор або його сканер повинен розташовуватися на штативі, якомога ближче до трансформатора, на осі середньої фази, з використанням об'єктива 7–12° і забезпечувати можливість як відео-, так і аудіозапису.



Рис. 1.7. Термограма силового трансформатора(бак і радіатори)

Після налаштування постійного температурного режиму запису тепловізора ведеться покадрова реєстрація термозображень, починаючи з верхньої частини крайньої фази (наприклад А) у напрямку до фази С, з накладенням кадрів один на одного близько 10 % розміру кадру. Досягнувши поверхні бака фази С, об'єктив сканера опускається нижче, і далі покадрова зйомка продовжується у протилежному напрямі, і таким чином, процес зйомки ведеться, поки не буде записана вся поверхня бака, включаючи розташовані під його днищем маслonaсоси, маслопроводи та інші вузли.

Термографічній зйомці піддається вся доступна для цього поверхня бака по периметру. Тепловізор в усіх точках зйомки, повинен знаходитися на однаковій відстані від трансформатора. Мінімальна кількість точок зйомки – чотири, максимальна залежить

від розташування й типу системи охолодження. Так, встановлюючи виносну систему охолодження, кількість точок зйомки збільшується до шести.

Термографічну зйомку доцільно супроводжувати мовними коментарями, що дозволяють ряд тепловізорів. У коментарях повинні відбиватися режим роботи трансформатора, хід ведення обстеження, опис явищ, що фіксуються тепловізором, та інші події, пов'язані з відеозаписом. У подальшому здійснюється покадрове поєднання результатів зйомки в єдиний розгорнутий «тепловий» план. Аномальні температури нагріву ділянок плану повинні зіставлятися з даними технічної документації на трансформатор, у якій вказано конструктивне розташування відведень обмоток, котушок, зон циркуляції масла, магнітопроводу та його елементів тощо. При цьому фіксується робота систем охолодження, оцінюється зона циркулювання масла, що створюється кожною з них.

Необхідно звертати увагу на утворення аномальних зон нагріву на поверхні бака в результаті зсуву потоків масла.

1.2. Технічне діагностування комутаційних апаратів систем електропостачання

Основні засади технічного діагностування комутаційних апаратів систем електропостачання. Однією з головних проблем, з якими доводиться стикатися вітчизняним енергетичним і промисловим підприємствам, є морально й фізично застаріле електротехнічне обладнання, оновлення парку якого навряд чи слід очікувати найближчим часом.

Особливо гострою є проблема діагностування і планового ремонту комутаційних апаратів у системах електропостачання. Адже для того, щоб просто перевірити високовольтний вимикач, необхідно на деякий час вивести його з роботи, розібрати, злити масло – при цьому вимикач може виявитися сповна працездатним і не потребувати ремонту.

Високовольтні вимикачі є одним з найважливіших елементів, що забезпечують нормальне функціонування будь-якої системи електропостачання. Вимикач – це активна ланка, функція якої – швидке відключення лінії в разі неполадок або аварії. Вимикач повинен зберігати свої параметри протягом місяців і навіть років незалежно від числа спрацьовувань за цей період. З тих пір, як стратегія обслуговування за потребою стала стандартом для багатьох операторів систем електропостачання, назріла необхідність у точному

й надійному інструменті для польових випробувань високовольтних вимикачів.

Старі методики контролю стану вимикачів не зручні, займають багато часу й не забезпечують достатньої точності. Для вирішення цих питань і виявлення дефектів високовольтних вимикачів були розроблені методика й апаратура, що зароджується і наявна в механізмах високовольтних вимикачів. Одним з найпопулярніших приладів для такого діагностування є прилад ПКМ/М6Н, який дозволяє контролювати привід вимикача, механізм передачі руху від приводу до рухомих контактів, демпфери, контактну систему, кола керування та інші вузли вимикача.

В експлуатації у системах електропостачання перебувають комутаційні апарати різних видів і типів – масляні вимикачі, елегазові вимикачі, вакуумні вимикачі, віддільники, короткозамикачі, розеднувачі, реклоузери²⁴. Під час експлуатації можуть виникнути такі дефекти масляних вимикачів (МВ):

- нагрів зовнішніх контактних з'єднань кріплення шлейфів до вводів вимикача;
- перегрів контактів дугогасильної камери;
- порушення в роботі системи підігріву бака;
- знижений рівень масла у вводах;
- погіршення ізоляційних характеристик масла (бак більш нагрітий порівняно із сусідніми фазами).

У маломасляних вимикачів (серії ВМТ) на напругу 110–220 кВ усередині колонок є рухомі й нерухомі контакти, роликові струмозйоми та інші вузли з болтовими з'єднаннями. З часом відбувається ослаблення кріплення болтів, що викликає нагрів (наприклад, між рухомих і нерухомих контактами), який може бути видний тільки з одного боку вимикача. Такий дефект легко пропустити, тому огляд ВМТ треба проводити з усіх боків.

Застосування тепловізійного обстеження для виявлення дефектів високовольтних маслonaповнених вводів вимикачів під робочою напругою дозволяє не тільки виявити вводи, яким потрібен прискорений контроль, але й виявити приховані дефекти вводів, які неможливо виявити традиційними методами випробувань. Останнім часом все частіше виявляються дефекти, пов'язані з порушенням

²⁴ Реклоузер – малогабаритний автоматичний пристрій зовнішнього встановлення на базі вакуумного вимикача для захисту й секціонування ліній електропередавання (ЛЕП) різної структури номінальною напругою 6(10) кВ. Реклоузер поєднує в собі функції захисту, вимірювання, протиаварійної автоматики, дистанційного й місцевого керування та контролю.

заземлення вимірювального виводу вводу масляного вимикача, що може привести до його пошкодження. На початковій стадії розвитку цього дефекту видно нагрів кришки вимірювального виводу, який може бути виявлений тепловізором, а потім з'являється видимий візуально дуговий розряд.

За наслідками обстеження можна виконати розрахунок значення тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції вводу (за відповідною методикою), не проводячи високовольтних вимірювань мостом Р5026. Суттєво, що отримані результати розрахунку є достатньо точними.

Під час ІЧ-контролю масляних вимикачів перевіряється стан контактної системи вимикача, верхньої частини маслонаповнених вводів, вбудованих трансформаторів струму й пристроїв підігріву бака. Оцінка контактів дугогасильних камер (ДК) проводиться на підставі вимірювання температури нагріву поверхонь бака вимикача в зоні розташування камер. На ранній стадії розвитку дефекту в ДК, бак вимикача виглядатиме світліше, ніж баки решти фаз. Аварійні перегріву контактів ДК характеризуються появою на поверхні баків масляних вимикачів локальних теплових «плям». Отримавши незадовільні результати тепловізійного контролю контактів дугогасильних камер, потрібно провести позачергове вимірювання перехідного опору всього струмовідного кола кожного полюса вимикача й залежно від його значення провести ревізію ДК або встановити прискорену періодичність ІЧ-контролю.

Вакуумні вимикачі. Останнім часом широкого розповсюдження набули вакуумні вимикачі, які випускаються як вітчизняною промисловістю, так і західними виробниками. У зв'язку з цим виникає питання про можливість діагностування стану їх дугогасильних камер. І хоча герметизація дугогасильного середовища у вакуумній камері від навколишнього середовища проводиться високоякісною аргоновою зваркою, яка не втрачає своїх ущільнюючих властивостей протягом всього експлуатаційного періоду, проте вакуумний вимикач є електроустаткуванням, яке необхідно контролювати, щоб запобігти виходу його з ладу. Для оцінки можливості контролю за допомогою тепловізора стану вакуумних вимикачів, групою фахівців з Санкт-Петербурга були проведені експериментальні дослідження методу контролю, що базується на вимірюванні температури. Суть його полягала в тому, що через контакти вимикача пропускався струм 0,5Ін. Температура камер була значно нижчою, ніж температура струмовідних частин із-за аксіального відведення тепла від контактів. Потім була здійснена розгерметизація однієї з фаз. Повторні

вимірювання показали, що температура камери, яка втратила вакуум, вища від інших приблизно на 2 градуси, а це достатньо для виявлення дефекту. Проведений експеримент засвідчив принципову можливість контролю стану дугогасильних камер вакуумних вимикачів на основі вимірювання температури, тобто із застосуванням тепловізійної техніки.

Приладове забезпечення контролю технічного стану вимикачів систем електропостачання.

Прилад контролю високовольтних вимикачів ПКВ/М6Н (рис.1.8):

- призначений для контролю без розбирання масляних, вакуумних та елегазових вимикачів всіх типів і класів напруги, що мають від одного до трьох розривів на полюс;
- контролює характеристики в простих операціях і в усіх складних циклах;
- автоматично розпізнає вид складного циклу й вимірює характеристики як циклу в цілому, так і простих операцій у його складі;
- у простих операціях визначає тривалість командних імпульсів, що дозволяє перевіряти правильність роботи блокувальних контактів вимикача.

Часові характеристики вимикача контролюються або одночасно по всіх трьох полюсах, що мають по одному розриву, або по черзі по кожному полюсу, але з трьома розривами на полюс.

Характеристики ходу і швидкісні характеристики контролюються за допомогою датчиків кутового (ДП21) або лінійного (ДП12) переміщень, що закріплюються, відповідно, на валу або тримачі траверси вимикача.

Вимірюються такі характеристики:

- *часові* (власний час увімкнення/вимкнення кожного полюса, повний час руху траверси, різночасність спрацьовування між полюсами, час брязкоту контактів). Похибка вимірювання $\pm 0,1$ мс;
- *швидкісні* (швидкість у момент увімкнення/вимкнення, максимальна швидкість) у діапазоні 0,002–20 м/с для масляних і елегазових вимикачів. Максимальна похибка вимірювання швидкості не перевищує ± 4 %;
- *характеристики ходу* (повний хід, хід до моментів увімкнення/вимкнення, втискування, різночасність спрацьовування по ходу, хід брязкоту контактів, відскік, переліт) у діапазоні 0–900 мм з дозволом 0,5 мм для масляних та елегазових вимикачів.



Рис. 1.8. Прилад ПКВ/М6Н

Для вакуумних вимикачів, відповідно до інструкцій заводів-виготівників, у процесі експлуатації потрібно проводити контроль лише часових характеристик. Швидкісні характеристики оцінюються за часом проходження рухомим контактом певної ділянки ходу. Цей час задається спеціальним контактним датчиком, наявним у комплекті з вимикачами. Датчик же можна підключити на будь-який із трьох каналів полюсів.

Часові характеристики контролюються як у простих операціях «Увімкнено» й «Вимкнено», так і в складних циклах. Прилад ПКВ/М6Н не має вбудованого комутатора. Для задавання складних циклів і простих операцій він може додатково комплектуватися пультами керування ПУВ–50 і ПУВ–10.

Особливістю ПКВ/М6Н є наявність вбудованого термопринтера для роздрукування протоколів і графіків, що істотно спрощує роботу з приладом, і контролю, що підвищує оперативність. Прилад надійний, зручний і простий в експлуатації.

Використання ПКВ/М6Н дозволяє:

- у півтора рази знизити витрати підприємства на обслуговування високовольтних вимикачів;
- значно скоротити час діагностування вимикача;
- у ряді випадків використання приладів ПКВ призводило до повної відмови від проведення планового ремонту, зважаючи на нормальний стан вимикачів.

Мікроомметр МОМ200А (рис. 1.9) призначений для вимірювання опору контактів вимикачів, роз'єднувачів, віддільників, запобіжників з ножовими контактами, шинних з'єднань, лінійних з'єднань тощо на струмах 200 А і 600 А. Прилад має вбудований мікропроцесор, що забезпечує вимірювання, зберігання і представлення результатів. Внутрішня програма (програмне

забезпечення MOMwin) дозволяє виконати окремий тест або цілу серію тестів і зберігати отримані результати. Вихід змінного струму використовується для швидкого й зручного розмагнічування трансформаторів струму. Технічні характеристики мікроомметра наведені в табл. 1.2.

1.2. Технічні характеристики мікроомметра MOM200A

Показник	Значення показника
Випробувальний струм, А	0–200
Напруга, В (випробувальний струм, А)	4 (100); 3 (200)
Час випробувань (випробувальний струм, А)	15 хв (100); 30 с (200)
Опір	30 мОм – 100 А; 6 мОм – 200 А
Діапазони вимірювань опору, мкОм	0–1999; 0–19,99
Роздільна здатність, мкОм	1
Захист	вбудований термозапобіжник
Живлення	джерело змінного струму напругою 220 В, 50–60 Гц
Маса, кг	14,6
Габаритні розміри, мм	282 x 178 x 250

Мікроомметр MOM200A (рис. 1.9) дозволяє вимірювати опір контактної системи вимикачів, роз'єднувачів, віддільників на струмах 200 А і 600 А.



Рис. 1.9. Мікроомметр MOM200A

Промисловий мікроомметр МИКО-1 (рис. 1.10) призначений для вимірювання перехідного опору контактів, у тому числі контактів і контактних груп високовольтних вимикачів.



Рис. 1.10. Промисловий мікроомметр МИКО–1

Промисловий мікроомметр МИКО–1 спеціально розроблений для експлуатації в умовах дії потужних перешкод промислової частоти й забезпечує їх ефективне подавлення (не менше ніж в мільйон разів для частот 49,7–50,3 Гц).

Відповідно до вимог ГОСТ 12997-84 мікроомметр МИКО–1 захищений від електромагнітних полів напруженістю до 400 А/м шляхом екранування, а також схемними рішеннями: генератором струму, фільтрами на вході й цифровими фільтрами високого порядку під час цифрової обробки. Завдяки цьому показники приладу залишаються стабільними і в умовах підстанції напругою 500–750 кВ.

Вбудований акумулятор забезпечує автономність і портативність мікроомметра, повністю вирішуючи проблему електробезпеки під час експлуатації. Ємності акумулятора вистачає для виконання не менше 100 вимірювань. Заряджання акумулятора здійснюється від вбудованого зарядного пристрою, що живиться від мережі постійного або змінного струму.

Невелика маса приладу та спеціальний кейс роблять зручним його перенесення і дозволяють підніматися з ним на будь-який вимикач. Завдяки цьому відпадає необхідність у довгих приєднувальних кабелях великого перерізу, що додатково зменшує масу.

Вимірювання опорів виконується за 4-провідною схемою: два струмові провідники, якими подається струм на вимірюваний опір, і два потенціальні провідники, по яких падіння напруги на опорі передається у прилад. Силіконова ізоляція провідників дозволяє їм залишатися гнучкими й за мінусової температури, на відміну від провідників у полівінілхлоридній ізоляції, які стають жорсткими вже за температури 0 °С.

Робочий струм через вимірюваний опір складає 45 А за величини опору до 2000 мкОм і рівний 5 А за величини опору в діапазоні 2000–20000 мкОм. Стабільний генератор, що задає робочий струм, виключає похибку вимірювань, викликану індуктивністю вимірюваного опору.

Мікроомметр МИКО–1 простий в експлуатації та обслуговуванні, тому участь користувача у вимірювальному процесі мінімальна. Мікропроцесор приладу разом із іншими вимірювальними вузлами забезпечує його тестування на справність, коригування нуля та автокалібрування, автоматичний вибір діапазону вимірювань, усунення впливу термоелектрорушійної сили в контактах, цифрове фільтрування перешкод та обчислення величини вимірюваного опору. Контроль за рівнем розрядження акумулятора під час вимірювання також здійснюється автоматично, а для виконання вимірювань достатньо лише приєднати провідники, включити живлення мікроомметра й натискувати кнопку «ИЗМЕР». Через 3 с на рідкокристалічному індикаторі відобразиться значення вимірюваного опору.

Для економії енергії акумулятора мікроомметр забезпечений таймером, що відключає живлення тоді, коли приладом не користувалися (не натискувалася кнопка «ИЗМЕР») протягом однієї хвилини після включення або після останнього проведеного вимірювання. Технічні характеристики мікроомметра наведені в табл. 1.3

1.3. Технічні характеристики промислового мікроомметра МИКО–1

Показник	Значення показника
Діапазон вимірюваних опорів R_x , мкОм	0–20000
Межа абсолютної основної похибки вимірювань, мкОм	$\pm(1+0,01 \cdot R_x)$
Робочий діапазон температур, °С	Від мінус 20 до плюс 50
Маса, кг	3,5
Габаритні розміри, мм	210x235x75

Вимірник часового циклу вимикача ТМ1600/МА61 (рис. 1.11) призначений для вимірювання часового циклу вимикача (напругою до 800 кВ). Канали часу записують час увімкнення і вимкнення головних контактів, контактів з передвключеними резисторами та інших допоміжних контактів. Канали незалежні, а тому можна вимірювати часові характеристики контактів, послідовно сполучені камери вимикача, не роз'єднуючи їх. Блок ТМ1600 забезпечує до 24 вимірювальних каналів, а за необхідності можуть використовуватися

один або декілька додаткових блоків ТМ1600, що забезпечують синхронізовані вимірювання. Є можливість вибору між різними послідовностями імпульсів, що управляють. Установлюється час затримки між імпульсами. Блок може бути оснащений функцією тривалого контролю, за якої ТМ1600 запускається, як тільки змінюється стан одного з каналів або розпізнається подача напруги на незалежний вхід імпульсів запуску.

Що вставляється у ТМ1600 модуль МА61 може знімати до 6 аналогових сигналів: хід контактів, швидкість, струми, напруга, вжим, переліт і так далі. Можливий вимір, аналіз динамічного опору контактів і вібрації. Вбудований в ТМ1600 принтер роздруковує результати у вигляді таблиць і графіків через декілька секунд. Можливе підключення зовнішнього принтера формату А4. Для детальнішого аналізу можна збільшити ту або іншу ділянку кривої. Вимірник ТМ1600 має 10 елементів пам'яті, до кожного, для подальших порівнянь, можна занести установки й результати тесту. Також ТМ1600 має порт для зв'язку з комп'ютером – програмне забезпечення САВА дозволяє тестувати вимикачі швидше й надійно.

Максимальна конфігурація: 24 часових каналів (6 часових модулів по 4 канали) або 16 часових каналів і 6 аналогових входів (4 часових модулі й один модуль МА61). Технічні характеристики вимірника наведені в табл. 1.4.

1.4. Технічні характеристики вимірника ТМ 1600

Часові параметри	Діапазон – від 0 до 6,5 с (від 200 мс з САВА)
	Точність – 0,1 мс
	Похибка – 0,01 %
Операції з вимикачем	Цикли – ВКЛ, ОТКЛ, ВКЛ-ОТКЛ, ОТКЛ-ВКЛ, ОТКЛ-ВКЛ-ОТКЛ
	Максимальний струм котушки – 50 А
	Максимальна напруга – 250 В
	Різниця часу між початком тесту та включенням таймера: менше 0,1 мс
	Інтервал вимірювань – 10 мс
Принтер	Вбудований (можливе підключення зовнішнього принтера (А4))
	Дозвіл – 150 dpi
	Розмір паперу – 114 мм
Живлення	Джерело змінного струму (мережа) напругою 95–265 В
Вбудований акумулятор	Для відновлення працездатності після розрядження необхідно менше години

Модуль для знімання часових характеристик	Тестування основних контактів: <ul style="list-style-type: none"> – опір – 0–250 Ом; – напруга 25 В, – максимальний струм 150 мА
	Тестування контактів з передвключеними резисторами: <ul style="list-style-type: none"> - опір – 0,25–3 кОм, - напруга 50 В, - максимальний струм 30 мА



Рис. 1.11. Вимірник часового циклу вимикача ТМ1600/МА61

Прилад для перевірки вимикачів EGIL (рис. 1.12) призначений для тестування вимикачів на середню напругу до 130 кВ з одним контактом на фазу. Якщо основні контакти оснащені паралельними передвключеними резисторами, EGIL автоматично здійснює запис різниці між основними контактами й резистивними контактами. Записуються також значення часу увімкнення і вимкнення допоміжних контактів та струми котушок. Додатково прилад EGIL може бути укомплектований модулем для записування ходу та швидкості, а також інтерфейсом для зв'язку з персональним комп'ютером.

Сфери застосування приладу EGIL:

- вимірювання часових характеристик контактів вимикачів;
- автоматичне вимірювання струму котушок вимикачів;
- вимірювання характеристик ходу вимикачів.

Особливості вимірювання часових характеристик є такими:

- існує два способи з'єднань для вимірювання часових характеристик;
- вимірювання часових характеристик проводиться з використанням трьох часових каналів;

– сигнали можливо виміряти на основних контактах і контактах передвключених резисторів на тому ж каналі. При цьому прилад EGIL автоматично визначає чи підключений резистор.

– використовуються канали AUX 1 і 2 з двома незалежними входами. Ці канали можуть використовуватися для визначення характеристик контактів або вимірювання напруги. Час при роботі з контактами, вимірюється для різних послідовностей (увімкн./вимкн.).



Рис. 1.12. Прилад для перевірки вимикачів EGIL

Автоматичне вимірювання струму котушок вимикачів здійснюється за допомогою вбудованого й повністю ізольованого струмового шунта в процесі виконання послідовності вимірювань. Вбудований прилад встановлення послідовності роботи автоматично задає засіб вимірювань для наступної операції вимикача. Оператор може вибрати інші послідовності операцій за допомогою клавіш із стрілками на панелі інструментів. Поряд із цим панель інструментів використовується для введення параметрів керування через меню. У вікні дисплея відбиваються установки й вікно може використовуватися для зчитування результатів. Результати тестування роздруковуються після кожної послідовності вимірювань.

Прилад EGIL може бути укомплектований аналоговим каналом вимірювання ходу (з використанням датчиків), що дає можливість вимірювання ходу або вимірювання напруги й струму.

Тестер вакуумних камер вимикача. VIDAR (рис. 1.13) призначений для перевірки стану вакуумної камери вимикача. В основі роботи тестера є співвідношення між напругою пробою і рівнем вакууму. Під час вимірювань подається одне із шести значень напруги постійного струму, при цьому одна напруга настраюється під час замовлення приладу користувачем.



Рис. 1.13. Тестер вакуумних камер вимикача VIDAR

Прилад дуже простий у застосуванні – зелена лампа показує, що камера справна, а червона – що ні.

Прилад забезпечує на виході напруги постійного струму 10, 14, 25, 40, 60 кВ.

Тестер налаштований на струм 0,3 мА, під час перевищення цього значення струму у вакуумній камері в момент тестування, спалахує червона лампа – камера несправна.

Прилад захищений вбудованим термозапобіжником.

Напруга живлення – джерело змінного струму напругою 115/220 В \pm 10%, частотою 50–60 Гц.

Маса приладу – 6,9 кг (10,7 кг із транспортною валізою).

Габарити – 250 x 210 x 125 мм.

Система аналізу характеристик вимикачів TM1800 (рис. 1.14) призначена для вимірювання параметрів і знімання характеристик високовольтних вимикачів будь-якого типу й виробника.



Рис. 1.14. Система аналізу характеристик вимикачів TM1800

Система має модульну архітектуру для підвищення гнучкості побудови системи (до 48 блоків + 48 часових каналів). Завдяки модульній конструкції система легко налаштовується під будь-яке завдання. Це дозволяє оновлювати існуючі модулі й доповнювати прилад новими модулями.

Особливості системи TM1800:

- забезпечується повне й незалежне функціонування – система дозволяє виконувати всі види тестів без додаткових приладів;
- може проводитися тестування вимкненого/увімкненого (під напругою) вимикача;
- використовуються аналогові або цифрові датчики ходу контактів;
- використовується модуль калібрування – для збереження точності вимірювань;
- у прилад закладені шаблони тестування з метою автоматизації вимірювань;
- розширені часові діапазони;
- активне продавлення перешкод (запатентоване рішення);
- інтегрований механізм вимірювання статичного опору контакту;
- автоматичне вимірювання струмів і напруги котушок вимикачів;
- автоматичне вимірювання стану додаткових контактів;
- функція швидкого тестування вимикача;
- вимірювання вібрації;
- вимірювання температури;
- зворотна сумісність з програмним забезпеченням «САВА»;
- надійне й міцне виконання для «польового» використання приладу;
- багатомовний людино-машинний інтерфейс;
- розширені можливості створення звітів та архівації даних вимірювань.

Верхня панель спеціально проектувалася під модульну конструкцію. Ви можете вибрати необхідні для ваших потреб модулі, а за потреби додати або замінити. У порожньому вічку завжди повинен знаходитися спеціальний фіктивний блок.

Система має інтерфейси зв'язку (USB, Ethernet тощо)

Налаштування системи TM1800 легко проводиться за допомогою напередвстановленого програмного забезпечення – САВА

Local. Керування програмою виконується за допомогою функціональних кнопок і вбудованої клавіатури. TM1800 також комплектується трек-болом і 8-дюймовим висококонтрастним дисплеєм, розрахованим на комфортну роботу навіть в умовах прямих сонячних променів.

1.3. Технічне діагностування ліній електропередавання

Пошкодження повітряних ліній електропередавання.

Причини пошкодження повітряних ліній електропередавання в основному пояснюються такими чинниками: перенапругами (атмосферними й комутаційними), змінами температури навколишнього середовища, дією вітру, утворенням ожеледі на проводах, вібрацією, «танцями» проводів, забрудненням навколишнього повітря.

Атмосферні перенапруги на лініях електропередавання виникають із-за грозових явищ. За таких короточасних перенапруг часто виникають пробої ізоляційних проміжків, зокрема перекриття ізоляції, а інколи і її руйнування або пошкодження. Перекриття ізоляції зазвичай супроводжується виникненням електричної дуги, яка підтримується і після перенапруги, тобто під час робочої напруги. Утворення дуги означає коротке замикання, тому місце пошкодження треба автоматично відключити.

Комутаційні (внутрішні) перенапруги виникають під час увімкнення й вимкнення вимикачів, а дія їх на ізоляцію мережевих пристроїв аналогічна дії атмосферних перенапруг. Місце перекриття теж треба відключати.

У мережах напругою до 220 кВ зазвичай небезпечніші атмосферні перенапруги, а у мережах напругою 330 кВ і вище – небезпечніші комутаційні перенапруги.

Зміни температури повітря навколишнього середовища досить великі, інтервал їх може бути від -40 до +40 °С, крім того, провід повітряної лінії електропередавання нагрівається струмом і за економічно доцільної потужності температури проводу на 2–5 °С вищої, ніж повітря. Зниження температури повітря збільшує допустиму за нагрівом температуру й струм проводу. Одночасно з цим під час зниження температури зменшується довжина проводу, що підвищує механічну напругу в проводі, коли точки закріплення фіксовані.

Підвищення температури проводів призводить до їх відпалу й зниження механічної міцності. Окрім того, через підвищення

температури проводу подовжуються і збільшуються стріли провисання, у результаті чого можуть бути порушені габарити лінії та ізоляційні відстані, тобто знижені надійність і безпека роботи повітряної лінії електропередавання.

Дія вітру призводить до появи додаткової горизонтальної сили до додаткового механічного навантаження на проводи, троси й опори лінії електропередавання. При цьому збільшуються натяги проводів і тросів та механічна напруга їх матеріалу. З'являються також додаткові вигинаючі зусилля, що діють на опори. Під час сильного вітру можливі випадки одночасного руйнування цілого ряду опор лінії.

Утворення ожеледі на проводах виникає в результаті попадання на них крапель дощу й туману, а також снігу, паморозі та інших переохолоджених часток. Утворення ожеледі призводить до появи значного механічного навантаження на проводи, троси й опори у вигляді додаткових вертикальних сил. Це знижує запас міцності проводів, тросів та опор ліній електропередавання. На окремих прольотах ліній змінюються стріли провисання проводів, внаслідок чого вони зближуються й скорочуються ізоляційні відстані. У результаті утворення ожеледі виникають обриви проводів і руйнування опор, зближення і схльостування проводів із перекриттям ізоляційних проміжків не лише під час перенапруг, але й за нормальної робочої напруги.

Вібрація – коливання проводів з високою частотою (5–50 Гц), малою довжиною хвилі (2–10 м) та незначною амплітудою (2–3 діаметри проводу) відбуваються майже постійно й викликаються слабким вітром, через що з'являються завихрення потоку повітря, що оточує поверхню проводу. Із-за вібрацій настає «втома» матеріалу проводів і відбуваються розриви окремих дротів біля місць закріплення проводу поблизу затискачів та біля опор. Це призводить до ослаблення перерізу проводів, а інколи й до їх обриву.

«Танці» проводів – це їх коливання з малою частотою (0,2–0,4 Гц), великою довжиною хвилі (порядка одного – двох прольотів) та значною амплітудою (0,5–5 м і більше). Тривалість цих коливань, як правило, невелика, але інколи досягає кількох діб. «Танці» проводів зазвичай спостерігаються під час порівняно сильного вітру й ожеледі, частіше на проводах великих перерізів. При цьому виникають значні механічні зусилля, що діють на проводи й опори, і часто викликають обриви проводів, а інколи й руйнування опор. Через «танці» проводів скорочуються ізоляційні відстані, із-за великої амплітуди коливань у деяких випадках проводи схльостуються, через що можливі перекриття під час робочої напруги

лінії. «Танці» проводів спостерігаються порівняно рідко, але призводять до найбільш важких аварій повітряних ліній електропередавання.

Небезпечним для роботи повітряних ліній електропередавання є *забруднення повітря*, що спричиняється наявністю часток золи, цементного пилу, хімічних сполук (солей) тощо. Осадження цих часток на вологій поверхні ізоляції лінії та електротехнічного устаткування призводить до появи провідних каналів і до ослаблення ізоляції з можливістю її перекриття не лише під час перенапруг, але й за нормальної робочої напруги. Забруднення через велику кількість солей у повітрі на побережжі моря може привести до активного окислення алюмінію та порушення механічної міцності проводів.

На пошкоджуваність повітряних ліній електропередавання, виконаних на дерев'яних опорах, впливає загнивання їх деревини.

Ультразвукове й вібраційне діагностування ліній електропередавання та підстанцій²⁵. Нормативні терміни експлуатації переважної частини електромережових об'єктів – повітряних ліній електропередавання та електричних підстанцій – вичерпалися, а з ряду причин реконструкція об'єктів електроенергетики впродовж останніх 10–15 років явно затягується. За таких обставин у галузі виникла вкрай серйозна проблема: з одного боку, є величезний об'єм об'єктів, що вимагають негайного відновлення, виходячи з нормативних термінів служби, а з іншої – не вистачає не лише необхідної кількості фінансових коштів для таких робіт, але й можливостей будівельно-монтажних організацій для виконання реконструкції у таких об'ємах.

Енергетикам доводиться робити непростий вибір: відмовлятися від «наскрізної реконструкції» на користь адресно-відновного ремонту й адресної заміни електромережевого устаткування та конструкцій. Лише такий підхід дозволяє в рамках наявних фінансових і технологічних ресурсів забезпечити економічно доцільний рівень надійності електропостачання споживачів.

При цьому виникає потреба в ретельному діагностуванні енергетичних об'єктів, метою якого є ранжирування устаткування та конструкцій за їх залишковими експлуатаційними характеристиками з виділенням їх у такі групи:

²⁵ Гунгер Ю. Група компаній «ЭЛСИ», г. Новосибирск; Научно-производственное предприятие «ЭЛЕКТРОКОРР» [Электронный ресурс] / Ю. Гунгер, А. Тарасов, В. Чернев. – Режим доступа : <http://www.proelectro.info>

1) *групу продовження ресурсу*, яка включає об'єкти з нормальними залишковими експлуатаційними характеристиками, не дивлячись на вироблення їх нормативного терміну служби;

2) *групу «адресно-відновного ремонту»*, що об'єднує об'єкти, залишкові експлуатаційні характеристики яких можуть бути відновлені в результаті виконання поточного або капітального ремонтів;

3) *групу «адресної заміни»* – об'єкти, залишкові експлуатаційні характеристики яких нижче нормованих значень і не можуть бути відновлені в результаті виконання ремонту.

Для перших двох груп в обов'язковому порядку мають бути призначені терміни наступного обстеження.

Слід зазначити, що останнім часом широкого розповсюдження набули різноманітні *методи діагностування* найбільш вартісних і відповідальних елементів електричних мереж. Розроблені й впроваджуються в експлуатаційну практику методи діагностування електричної частини повітряних ліній (ПЛ) і підстанцій (ПС) – проводів, контактних з'єднань та ізоляції. При цьому практично не розвиваються методи діагностування механічної частини ПЛ і ПС – опор і фундаментів. Щоправда, є регламентовані чинними нормативними документами зовнішні огляди електроустановок, які не можуть розглядатися як серйозний спосіб діагностування, оскільки разом з видимими дефектами конструкції можуть мати приховані вади.

Зверхне відношення діагностичних служб до механічної частини ПЛ і ПС, вочевидь, виникає із-за їх зовнішньої конструктивної простоти й незначної вартості конструкцій. Проте, враховуючи масовість цих елементів у складі будь-якої електричної мережі, вірогідність виникнення аварій із-за пошкодження механічної частини окремих конструкцій достатня висока. Зважаючи на це, проблемі діагностування механічної частини ПЛ і ПС, що знаходяться у тривалій експлуатації, слід приділяти набагато серйознішу увагу. Передусім діагностуванню повинні піддаватися залізобетонні конструкції – фундаменти, стійки під устаткування й опори повітряних ліній як найбільш схильні до руйнувань у процесі експлуатації.

Експерти відзначають багатопараметричність деструктивних процесів, що знижують здатність залізобетонних фундаментів і несучих стійок опор ПЛ, впродовж терміну експлуатації – дія ґрунтово-кліматичних чинників зовнішнього середовища, вплив вібрацій від дії вітрових навантажень, інші специфічні (наприклад,

електрофізичні) умови функціонування електричної мережі. Саме тому в основу обстеження технічного й корозійного стану залізобетонних конструкцій ПС і ПЛ напругою 110–500 кВ покладені ультразвукові методи визначення міцності бетону, вібраційні методи оцінки механічних властивостей залізобетонних стійок і фундаментів, а також електрохімічні методи визначення корозійного стану арматури й голих металоконструкцій, розташованих у ґрунті.

Застосування *ультразвукових методів* оцінювання міцності бетону ґрунтується на існуванні стійкої залежності параметрів поширення ультразвукових коливань у бетоні від стану його структури, наявності й накопичення у ньому тих або інших дефектів і пошкоджень. З появою вказаних дефектів не лише зменшується міцність бетону, але й змінюється швидкість (час) поширення ультразвуку.

Поява з тих чи інших причин тріщин у бетоні може викликати корозію арматури й ослаблення здатності несучих конструкцій зсередини. Оцінювання корозійного стану арматури проводиться електрохімічними методами шляхом її поляризації від зовнішнього джерела струму. Опори анодній і катодній поляризації арматури в неушкодженому й пошкодженому бетоні мають істотні відмінності, які несуть інформацію про корозійний стан арматури.

Використання *вібраційних методів діагностування* залізобетонних фундаментів і стійок опор дозволяє проводити оцінювання технічного стану всієї конструкції. Діагностичне оцінювання цих методів ґрунтується на аналізі декрементів загасання механічних коливань низької і високої частоти, що штучно збуджуються у залізобетонній конструкції. З появою тріщин на бетоні або корозії арматури їх взаємодія порушується, що призводить до зниження несучої здатності конструкції, яка може бути чітко зафіксована за допомогою відповідного приладу.

Експерти вважають, що методи оцінювання технічного стану залізобетонних електромережевих конструкцій, пропонувані в нормативних документах (молоток Кашкарова або Фізделя, мікроскоп Брінеля або лупа Польді), не забезпечують виявлення дефектів у бетоні на ранній стадії їх появи й не дозволяють отримати кількісних оцінок розвитку цих дефектів у часі із-за великої похибки отриманого результату.

Порівняння результатів вимірювання міцності бетону, отриманих на реальних залізобетонних конструкціях різної дефектності за допомогою ультразвуку й молотка Кашкарова, показали, що їх збіжність спостерігається лише для конструкцій, що

мають істотні видимі руйнування. Під час оцінки міцності бетону нормальних конструкцій традиційний метод дає більшу похибку у вимірюваннях, чим за використання ультразвукового приладу.

Примітно, що переважна частина обстежуваних стійок опор ВЛ 110 кВ має достатній ресурс за міцністю бетону й арматури, що обумовлюється відмінною від виготовлення фундаментів технологією виготовлення – центрифугований бетон має велику щільність і, відповідно, менше водопоглинання та велику стійкість до процесів карбонізації.

Проведені обстеження показали, що порівняно з діагностуванням залізобетонних конструкцій опор, що виконується традиційними методами, ультразвукові й вібраційні методи мають значно більшу чутливість.

Характерні дефекти окремих центрифугованих стійок опор або фундаментів, виявлені під час обстеження, часто викликані різними поєднаннями заводських, монтажних та експлуатаційних причин. Наприклад, для центрифугованих залізобетонних стійок СЦ або СК такими причинами є:

- нещільно притиснуті краї опалубки під час виготовлення центрифугованих стійок. Наслідком є швидке руйнування швів напівформ в експлуатації, що призводить до утворення великих наскрізних дір, оголення арматури й утворення значних тріщин уздовж шва півформ;

- пошкодження (сколи), отримані під час транспортування і встановлення опор;

- застосування крупного наповнювача (призводить до осипання або вифарбовування);

- вплив на стійки опор ґрунтово-кліматичних чинників (утворення на стійці опори дрібних і крупних тріщин). Ці дефекти за тривалий термін експлуатації також сприяли зниженню здатності несучих конструкцій, що підтверджується даними вібродіагностування.

Для залізобетонних фундаментів металевих опор ліній електропередавання причинами дефектів є:

- низька вихідна міцність бетону;

- незахищеність оголовника фундаменту від механічних пошкоджень під час монтажу, від впливу дощової вологи, що стікає із стійки, від дії процесів заморожування і відтавання;

- недовговічність застосовуваної гідроізоляції.

Загалом можна констатувати, що *ультразвукове й вібраційне діагностування можуть служити надійним інструментом*

оцінювання залишкового експлуатаційного ресурсу залізобетонних електромережевих конструкцій. Застосування цих методів дозволяє визначити елементи й конструкції, що вимагають термінової заміни або ремонту, і сформувані обґрунтовані плани проведення ремонтів і реконструкції механічної частини електромережевих об'єктів.

Головною умовою ефективного вирішення завдання мінімізації витрат на капітальний ремонт виявленого дефектного високовольтного устаткування є облік результатів прогнозування його працездатності:

- прогнозування працездатності з прийнятною точністю (5–6 років) стає можливим під час використання достатнього об'єму репрезентативної статистики, отриманої у результаті багатолітнього моніторингу експлуатаційного стану (ЕС) основних елементів ліній електропередавання;

- проведення моніторингу ЕС, можливо, доцільно лише на базі достовірних кількісних оцінок експлуатаційного стану всіх елементів і вузлів ліній електропередавання, отриманих з необхідною точністю у результаті вживання сучасного діагностичного інструментарію;

- кількісні оцінки експлуатаційного стану всіх елементів і вузлів ліній електропередавання доцільно отримувати за допомогою ультразвукової, вібро- й електрохімічної діагностики стану залізобетонних і металевих стійок опор і фундаментів повітряних ліній електропередавання, що дозволяє створити інформаційну базу для вирішення завдання мінімізації витрат у процесі планування ремонтної кампанії.

Пошкодження кабельних ліній електропередавання. Як свідчить досвід експлуатації, багато дефектів кабелів не визначаються під час профілактичних випробувань підвищеною напругою постійного струму. До таких недоліків, які значно знижують надійність кабелів, відносяться: осушення ізоляції із-за переміщення або стікання просочувального складу, електричне старіння ізоляції, висихання ізоляції кабелів, що працюють у важких теплових режимах, часто пов'язане з розкладанням просочувального складу (кристалізація) тощо.

Не лише старіння, але й крупні дефекти, не завжди виявляються під час профілактичних випробувань. Не визначаються пошкодження в оболонках кабелів, якщо ізоляція не зволожилася. Пошкодження і місцеві дефекти в ізоляції можуть бути виявлені під час випробування лише в тому випадку, якщо неушкоджена ділянка ізоляції, що залишилася, не перевищує 15–20 % її товщини.

У момент аварії кабель часто отримує вторинні пошкодження (обпалюється дугою, деформується внутрішнім тиском, поглинає вологу через пошкоджене місце тощо).

Оболонка кабелю є одним із найважливіших конструкційних елементів силового кабелю. Його ізоляція може залишити високі діелектричні властивості лише в тому випадку, якщо відсутня можливість проникнення у неї повітря або вологи. Свинцева або алюмінієва оболонки є герметизуючим покривом кабелю.

Тривале допустиме механічне навантаження для свинцю $0,1 \text{ кг/мм}^2$, для алюмінію $0,8 \text{ кг/мм}^2$. На відміну від свинцю алюміній є вібростійким матеріалом, але набагато поступається йому в стійкості до дії ґрунтової корозії.

Окрім заводських дефектів до пошкоджень кабелів приводять:

- механічні пошкодження, які були нанесені під час прокладання або подальших розкопок та інших будівельних роботах, що виконуються у зоні кабельних трас;

- спіралеподібні спучування (інколи тріщини) як результат тривалої дії циклів нагрівання й охолодження або значних перевантажень кабелю понад допустимі норми;

- міжкристалічні руйнування свинцевої оболонки під дією струсів і вібрацій;

- ґрунтова, хімічна корозія під впливом всіляких хімічних реагентів, які містяться у ґрунті;

- руйнування оболонок кабелів блукаючими струмами електрифікованого транспорту.

Місцеві механічні пошкодження оболонок легко встановлюються на вигляд, оскільки вони супроводяться пошкодженням джутового обплетення і сталевій броні кабелю. У більшості випадків виявляється пошкодженою також ізоляція кабелю. Механічні пошкодження носять локальний характер і після усунення пошкодженої ділянки й монтажу вставки кабельна лінія може продовжувати бути в роботі.

Міжкристалічне руйнування свинцевої оболонки – це рекристалізація свинцю, зростання кристалів і втрата зв'язку між кристалами. На вигляд у початковій стадії на оболонці з'являється сітка дрібних тріщин. У подальшому тріщини збільшуються і розтріскування оболонки супроводиться випаданням з неї груп кристалів або навіть окремих шматків оболонки.

Масштаб міжкристалічних руйнувань (довжина пошкодженої ділянки кабелю) залежить від характеру впливу, що викликає струси й вібрацію кабелю. Найчастіше це вертикальна ділянка кабелю під час

переходу кабельної лінії у повітря, де струси утворюються проводами повітряної лінії. Це можуть бути ділянки кабелів на підходах до машин, що обертаються, що створюють значні вібрації, переходи кабельних ліній під залізничними коліями або шосе, місця прокладання кабелів по мостах, де вібрацію і струси створює транспорт, що рухається.

Наявність у продуктах корозії перекису (двоокиси) свинцю вказує на її електричне походження від блукаючих струмів. Характерним є колір продуктів корозії. Двоокис свинцю, що утворюється під час протікання блукаючих струмів має коричневий колір (бурий осад). Продукти хімічної корозії найчастіше мають білий колір, інколи з блідо-жовтим або блідо-рожевим відтінком.

Через багатократні вигини кабелю, зв'язаних з розмотуванням, прокладанням, протяганням у трубах тощо, у цих місцях гофр алюмінієва оболонка дає поздовжню тріщину або підрізається сталеву бронестрічкою.

Під час встановлення муфт необхідно звертати увагу на стан висихання ізоляції, розкладання просочувального матеріалу й випадання каніфолі. У кабелів на напругу 10 кВ і вище необхідно звертати увагу на електричне старіння ізоляції та наявність у неї шляхів іонізації і часткових розрядів (гіллясті пагони, присутність воскоподібних речовин).

Повітряні включення – найбільш слабкий елемент ізоляції: у них починають розвиватися небезпечні іонізаційні процеси й часткові розряди. Чим більші повітряні зазори (особливо в радіальному напрямі), тим вони небезпечніші. У зв'язку з цим жорстко регламентована кількість допустимих збігів паперових стрічок. Через велику кількість збігів шар ізоляції стає нестійким до вигинань. На паперових стрічках, розташованих під співпадаючими зазорами (розташованих нижче стрічок), утворюються поздовжні складки, які під впливом теплових деформацій (нагрівання й охолодження кабелю) перетворюються на поздовжні тріщини, – такий же небезпечний дефект, як і збігання паперових стрічок. Подовжня складка часто перетворюється на суцільну тріщину, і під час розбирання ізоляції кабелю замість однієї стрічки змотуються дві. Найчастіше це спостерігається за тієї величини перекриття стрічок, яка близька до 50 %.

За протікання струмів короткого замикання на дуже короткий час (секунди) допускається підйом температури жил (а, отже, і прилеглих шарів ізоляції) до $+125^{\circ}$ або $+200^{\circ}$ відповідно для кабелів напругою 20–35 кВ і 1–10 кВ. Це обумовлено тим, що під час

температур понад +135–140 °С у паперовій просоченій ізоляції швидко розвиваються процеси безповоротного старіння паперової основи ізоляції (руйнування волокна целюлози, з якої складається папір).

Настільки ж небезпечні й тривалі аварійні перевантаження кабелів, коли нагрівання жил та ізоляції істотно перевищує тривалодопустимі за нормами.

Під час розкривання таких кабелів (після аварійного або профілактичного пробою) особливу увагу слід звертати на стан фазної ізоляції і паперових стрічок, що безпосередньо примикають до жили.

Небезпечні місцеві перегрівання кабелів можливі в місцях, де кабелі прокладені в землі з порушенням основних норм прокладання: з примиканням одного до іншого або за виконання у землі «запасів» у вигляді кілець (заборонено правилами). У цих випадках, як встановлено, кабелі можуть нагріватися до температур, що перевищують 100 °С.

У кабелях на напругу 20–35 кВ розрахункові електричні градієнти приблизно в два рази вище, ніж у кабелях на 6 кВ, тому вже за незначного осушення, особливо на вертикальних ділянках, у них починається іонізація повітряних включень і починаються часткові електричні розряди. Необхідність заміни вертикальних ділянок кабелів повинна підтверджуватися результатами розтину, розбирання та оглядів зразків кабелів. Небезпечний рівень електричного старіння підтверджується наявністю чорних гіллястих пагонів на паперових стрічках.

Під час огляду струмопровідних жил кабелю необхідно звертати увагу на наступні дефекти, що найбільш часто зустрічаються:

- неправильну форму круглої або секторної жили (наприклад, один кут сектора гостріший, ніж інший);
- випинання або западання окремих проволікань, пілкоподібний профіль жили;
- наявність задирок на жилах.

Ці дефекти призводять до викривлення електричного поля, утворення місцевих підвищених напруженостей, що особливо небезпечно для кабелів на напругу 10 кВ і вище. Жили з окремо випинаючими проволіканнями або із задирками небезпечні тому, що під час вигинів кабелю або теплових деформацій може бути зім'ята, продавлена або розрізана паперова ізоляція, що примикає до жили кабелю. Наявність таких дефектів, що значно знижують надійність кабелю, є недопустимою.

Можливі й грубіші дефекти в жилах. Наприклад, пересічення окремих дротин. У цьому випадку жила набуває неправильної форми, а в шарі ізоляції утворюються глибокі складки. Кабелі з такими дефектами не придатні для прокладання.

Під час розтину кабелів після аварійних пробоїв слід враховувати ряд інших змін, пов'язаних з горінням дуги й утворенням у кабелі значних внутрішніх тисків. Великий тиск може істотно деформувати свинцеву оболонку кабелю, можуть бути зміщені й навіть викинуті (разом з газами) заповнювачі, зміщені бронестрічки. Під час профілактичних випробувань і пробоїв, із-за малої потужності випробувальних установок, такі деформації не виникають (пропалювальна й ударна установки не враховуються).

Випробування і визначення місця пошкодження кабельних ліній електропередавання напругою 0,38, 6–10 кВ. Для знаходження місця пошкодження кабельних ліній електропередавання необхідно розробити практичний, найбільш ефективний метод та отримати кінцевий алгоритм для реалізації цього методу.

Перед початком випробувань кабельних ліній високою напругою згідно з нормами випробування електроустаткування необхідно виконати вимірювання опору ізоляції мегаомметром на напругу 2,5 кВ впродовж 1 хвилини. Доречно спочатку зробити ехограму, для отримання інформації стосовно кабелю перед виконанням вимірювань і випробувань та занести її у пам'ять локаційного пристрою (якщо є така можливість). Якщо під час вимірювання опору ізоляції мегаомметром визначено, що опір ізоляції нижче нормованого значення, то здійснюється локалізація місця пошкодження, а саме виконується випробування ізоляції кабельної лінії підвищеною напругою. Випробування виконуються напругою постійного струму. Величина випробувальної напруги для кабелів різного класу напруги регламентована в чинних нормативних документах.

Якщо під час випробування було виявлено пошкодження ізоляції кабелю, то наступним етапом є локалізація місця пошкодження, яка починається із зняття ехограми методом відбитого імпульсу. При цьому визначити відстань до місця пошкодження можна лише в разі низькоомного пошкодження. Якщо пошкодження низькоомне, то за допомогою пошукової електромагнітної котушки й генератора високої частоти й (або) акустичного пристрою та установки «удару» виконується пошук місця пошкодження на місцевості.

За високоомного пошкодження необхідно перетворити його на низькоомне, створивши струм пропалювання ізоляції такої величини, аби в місці пошкодження виникла струмовідна доріжка з малим значенням опору. Це необхідно для того, щоб можна було локалізувати місце пошкодження за методом віддзеркалення імпульсу (найбільш зручний метод). Під час високоомних пошкоджень цим методом цього зробити неможливо тому, що при цьому використовується мала напруга (декілька вольт). Перетворивши високоомне пошкодження на низькоомне пошук точного місця пошкодження виконується так само, як було вказано раніше.

Якщо цього досягти не вдається, то локалізувати місце пошкодження можна за допомогою методу «імпульсної (ударної) локалізації» або методом «локалізації перекриттям дугою». Цей метод складніший і потребує більшої витрати часу. Якщо за допомогою цих методів вдається це зробити, то надалі, знову таки, потрібно точніше визначити місце пошкодження. Це можна зробити за допомогою «ударної» установки й пошукової електромагнітної котушки та акустичного пристрою. Якщо цими двома методами визначити відстань до місця пошкодження не вдається, потрібно знову спробувати перетворити високоомне пошкодження на низькоомне. Алгоритм випробування і пошуку місць пошкодження на кабельних лініях матиме вигляд, наведений на рис. 1.15.

Спираючись на практичні дані, можна сказати, що частіше зустрічаються пошкодження кабельних ліній «жила-оболонка», рідше – «жила-жила». Отже, для випробування кабельних ліній можна застосовувати такі схеми випробування:

- 1) три жили разом і заземлена оболонка (рис.1.16 – 1);
- 2) дві жили разом із заземленою оболонкою та іншою жилою (два випробування (рис. 1.16 – 2, 3).

Для пошуку місця пошкодження кабельних ліній електродо передавання пропонується використовувати такі засоби:

- 1) *під час низькоомних пошкоджень*:
 - генератор високої частоти й пошукова електромагнітна котушка;
 - ударна установка й акустичний прилад;
 - локаторна установка (метод відбиття імпульсу);
- 2) *під час високоомних пошкоджень*:
 - ударна установка й пошукова електромагнітна котушка;
 - ударна установка й акустичний прилад;
 - локаторна установка (метод «імпульсної (ударної) локалізації» або метод «локалізації перекриттям дугою»).

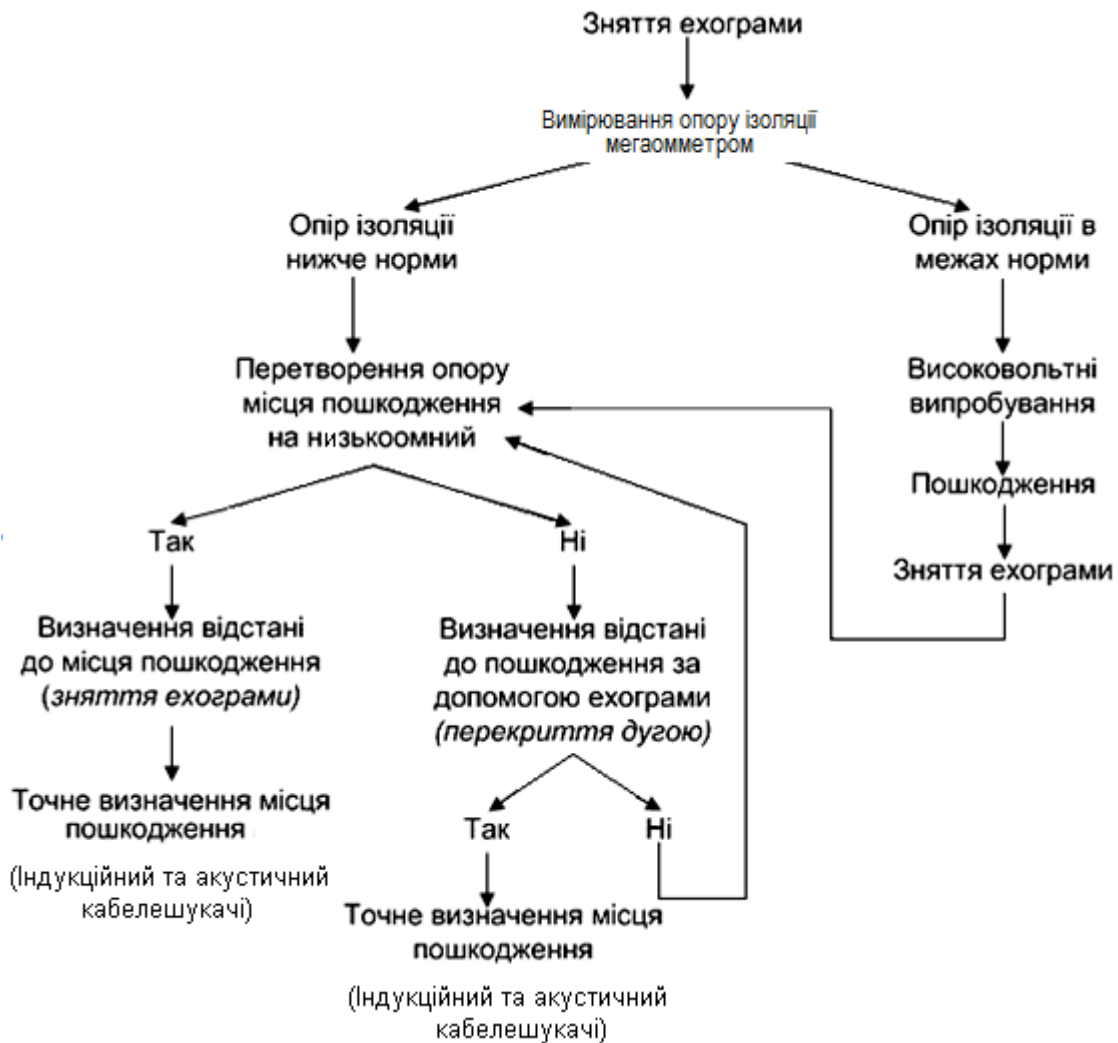


Рис. 1.15. Алгоритм випробування і пошуку місць пошкоджень кабельних ліній електропередавання

Під час підключення ударної установки до кабелю, процес пошуку місця пошкодження ґрунтується на прослухуванні звуку, який виникає під час пробою ізоляційного матеріалу кабелю в місці пошкодження. У пересувній електролабораторії встановлені конденсаторні батареї, які заряджаються від джерела струму, а потім короткочасно підключаються до струмовідних частин пошкодженої ділянки й розряджаються, пробиваючи пошкоджену ділянку ізоляції кабелю. Коли персонал знаходиться у допустимому районі пошкодження кабелю, за допомогою кристалічного (п'єзоелектричного) мікрофону й навушників (рідкокристалічне табло), акустичного приладу знаходиться місце з найбільш потужним

сигналом від пробую ізоляції кабелю навіть під час прокладання його в землі.

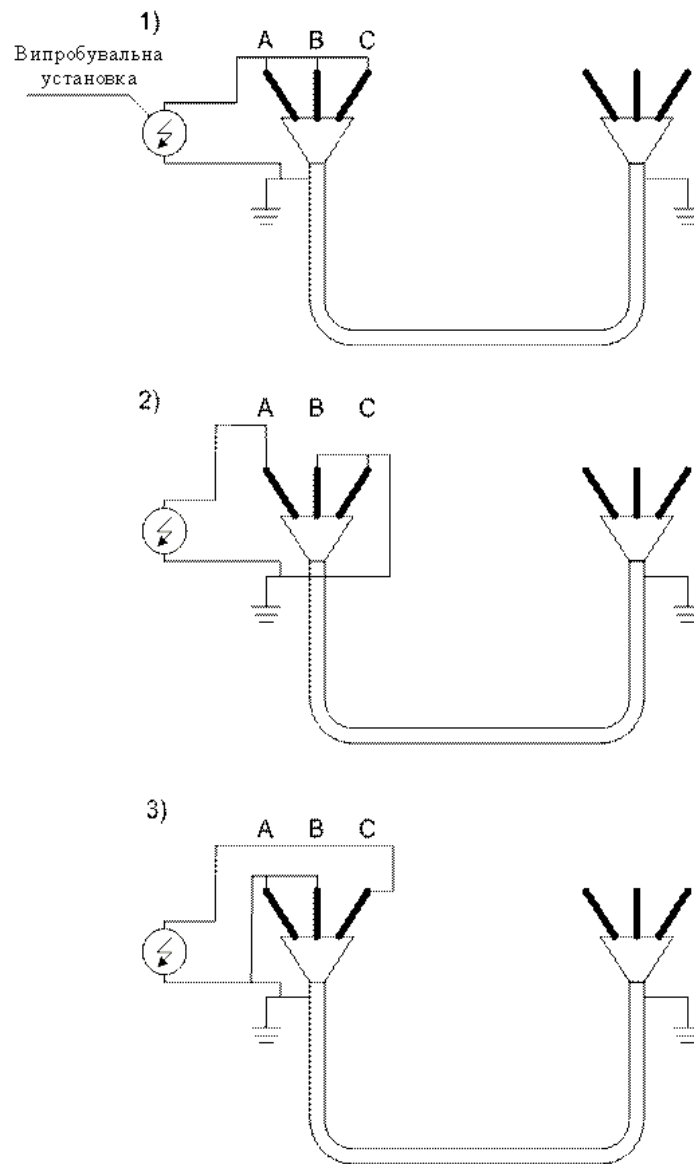


Рис. 1.16. Схеми підключення випробувальної установки під час випробування кабельної лінії електропередавання підвищеною напругою

Діагностування кабельних ліній електропередавання. Оцінка стану ізоляції і гарнітур кабельних ліній є основою для ухвалення рішень щодо продовження їх експлуатації, ремонту або заміни.

Стан ізоляції кабельних ліній можна визначити:

– випробуванням підвищеною напругою відповідно до чинних нормативів;

– одноразовим випробуванням діагностичними методами.

З практики експлуатації високовольтних кабельних ліній відомо, що позитивні результати випробувань підвищеною напругою не гарантують подальшої безаварійної роботи електрообладнання. Так, після успішних випробувань підвищеною напругою кабельних ліній доволі часто вони виходять з ладу протягом найближчих місяців. Встановлено, що причина цього криється в інтенсивному руйнуванні ізоляції частковими розрядами в проблемних місцях, що призводить до скорочення терміну служби кабельних ліній. Найбільш небезпечні випробування підвищеною напругою для кабельних ліній з великим терміном служби або низькою якістю монтажу, які вже мають високий рівень часткових розрядів у проблемних місцях.

Скорочення терміну служби кабелю, що перебуває в експлуатації (робоча напруга 12 кВ), під час випробування підвищеною напругою ілюструє рис. 1.17.

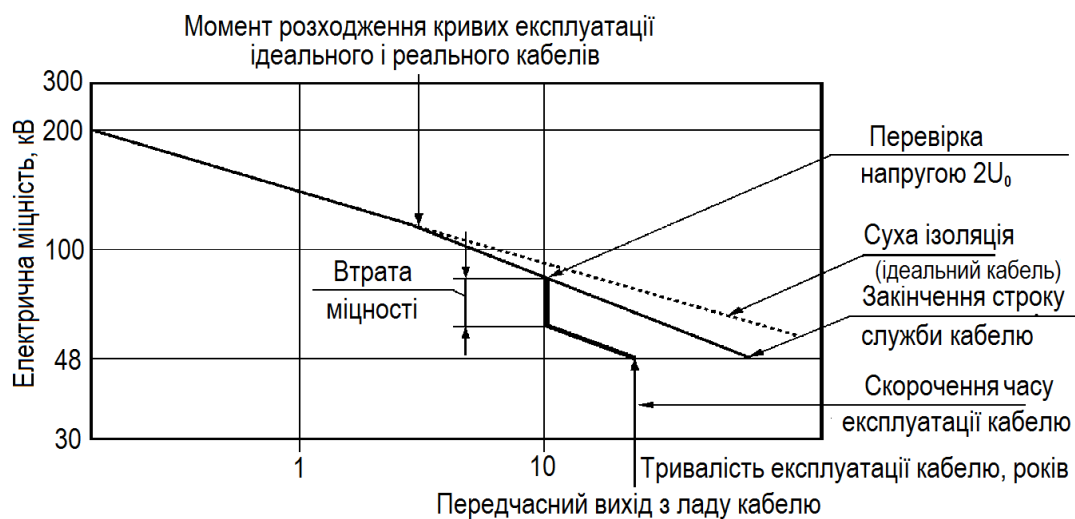


Рис. 1.17. Скорочення терміну служби кабелю, що перебуває в експлуатації, під час випробування підвищеною напругою

Об'єктивні дані про технічний стан електроустаткування можна отримати сучасними діагностичними методами (рис. 1.18), які, не травмуючи ізоляцію, дозволяють визначати не лише технічний стан об'єкта, але й локалізувати наявні в ній проблемні місця. Комплексні діагностичні випробування різними методами неруйнівного контролю дають можливість також оцінити міру старіння ізоляції і залишковий ресурс кабелю.

Оптимальним з точки зору отримання найбільш достовірної й повної інформації про стан ізоляції кабелів і гарнітур є поєднання методів інтегрального й локального діагностування.

Перевірка працездатності кабельної лінії шляхом прикладання підвищеної напруги постійного струму обґрунтована після монтажу або ремонту й за відсутності технічної можливості застосування діагностичних неруйнівних методів.

У процесі експлуатації кабельних ліній електропередавання виникає ряд проблем, виявлення яких потребує застосування спеціальних методів.

Проблеми кабелів з просоченою паперовою ізоляцією такі:

– *вода в кабелі.* Внаслідок пошкодження оболонки кабелю (отвір із-за корозії; тріщини із-за переміщення кабелю) та обумовленого старінням розпаду целюлози підвищується вміст вологи в ізоляції. При цьому електрична міцність ізоляції поступово продовжує знижуватися, доки не досягне величини робочої напруги, тоді кабель стає вже ненадійним в експлуатації. Термін служби таких кабелів залежить від якості виготовлення та умов прокладання, тому на підставі технічного ресурсу кабелю не можна дати яку-небудь інформацію про якість ізоляції. Для визначення вологості необхідне діелектричне діагностування. Часткові розряди, як показує досвід, не з'являються у вологій паперовій масляній ізоляції;

– *висихання ізоляції.* Витікання маси й недостатнє просочення призводять до висихання цих місць та утворення поорожнин, наповнених газом, в ізоляції кабелю. Із-за зниженої електричної міцності в цих місцях з'являються часткові розряди (ЧР), які можуть викликати карбонізацію паперу й зруйнувати ізоляцію. Такі ЧР можна виявити й локалізувати за допомогою їх діагностування. Часто локалізація таких ЧР не показує локальних концентрацій, і в той же час немає безпосередньої загрози пошкодження, а є розподіл по протяжніших ділянках кабелю.

Проблеми кабелів з ізоляцією з поліетилену (PE) і зшитого поліетилену (VPE). Значний ефект старіння кабелів з ізоляцією з PE/VPE викликають водяні триїнги (watertrees). Вони виникають під впливом води, тепла й напруженості електромагнітного поля, поступово розростаються і через утворення електричних триїнгів призводять до короткого замикання і виходу з ладу кабелю. Інші ефекти старіння з'являються за термічного перевантаження ізоляції з PE/VPE. Волога в кабелях з дефектами оболонки особливо сприяє розростанню водяних триїнгів. Оскільки водяні триїнги, обумовлені фізичними законами, не показують часткових розрядів, то описані процеси старіння можна виявити й оцінити лише за допомогою діелектричного діагностування.

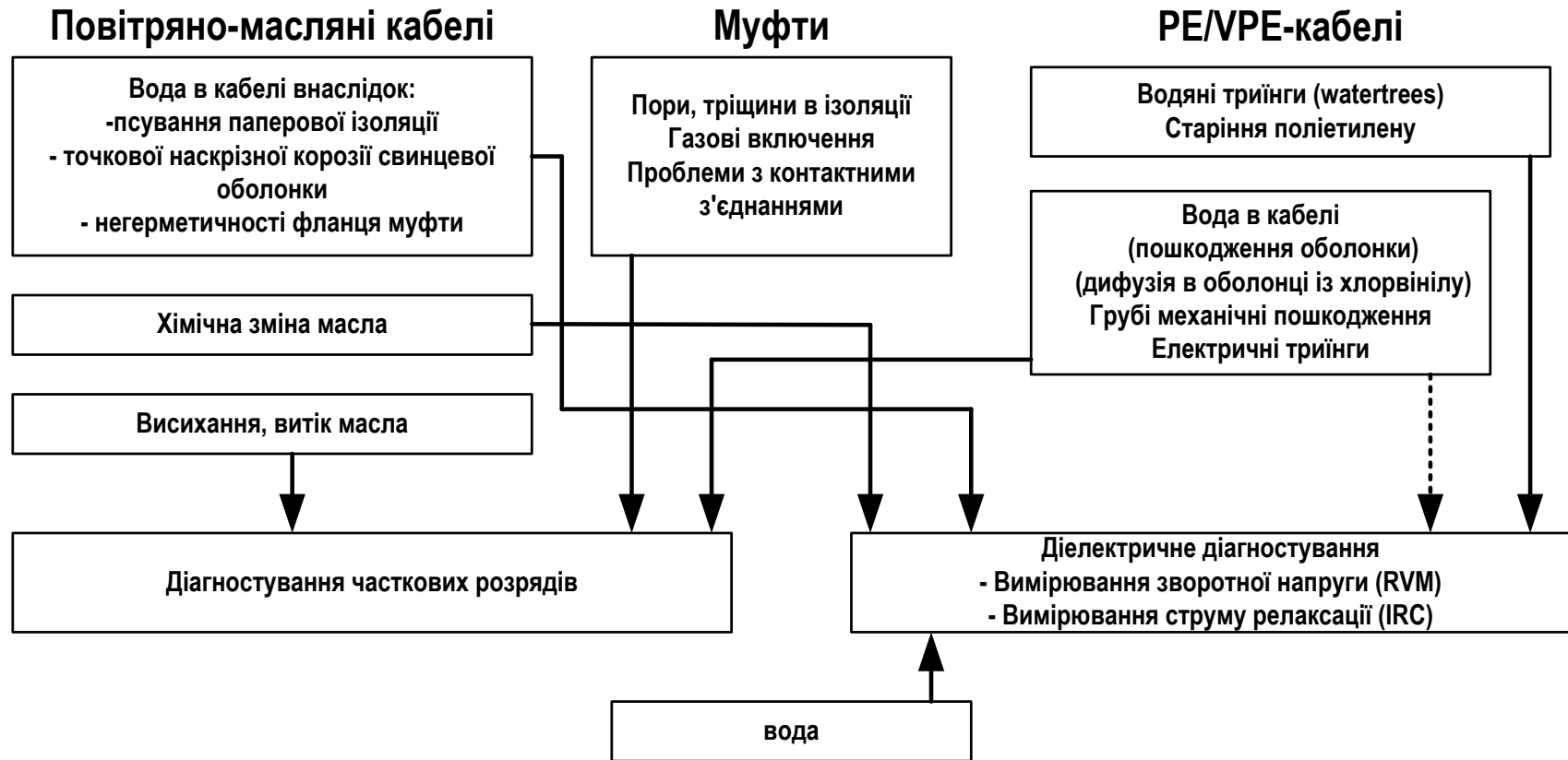


Рис. 1.18. Проблеми, що виникають у процесі експлуатації кабельних ліній електропередавання і методи їх виявлення

Проблеми в муфтах і кінцевих заробках такі:

– *пошкодження частковими розрядами.* Внаслідок неправильного монтажу в муфтах і кінцевих заробках виникають порожнини, що іонізуються, наповнені газом, і зазори, а також ділянки з підвищеною напруженістю електромагнітного поля, які інколи вже за номінальної напруги призводять до часткових розрядів. Потім термічні процеси деградації в муфтах з неналежним чином виконаними з'єднаннями жил можуть також впливати на ділянки, де можуть утворитися ЧР. Такі пошкоджені частковими розрядами місця можна виявити й локалізувати шляхом діагностування ЧР;

– *вода в муфтах.* Виявлення вологих муфт не є первинним завданням діагностування. Однак під час його виконання ця інформація часто є допоміжною. Вологі муфти не викликають ЧР, але звертають на себе увагу підвищеним і нестабільним зарядним струмом під час діелектричного діагностування ділянок кабелю. Як правило, у такому разі рекомендується провести випробування на наднизькій частоті з подальшою локалізацією рефлектметром.

Діелектричне діагностування силових кабелів. До проведення діелектричного діагностування (рис. 1.19) кабелі мають бути відключені й повністю розряджені. Поряд із цим перед початком діагностування необхідно забезпечити заземлення за допомогою кабелю заземлення або вимірювального кабелю з боку вимірювань. Мінімальний час заземлення і короткого замикання повинен складати 30 хв. За несприятливих обставин можливий триваліший час короткого замикання. Необхідно також від'єднати перетворювачі напруги, почистити забруднені кінцеві заробки.

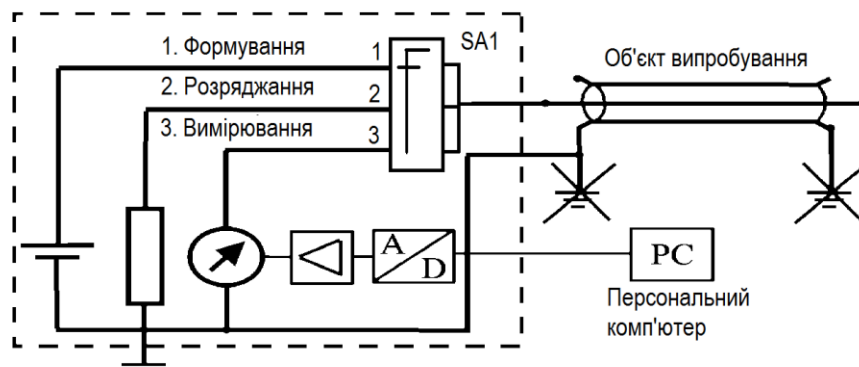


Рис. 1.19. Схема установки для вимірювання зворотної напруги під час проведення діелектричного діагностування силових кабелів

Кабелі з просоченою паперовою ізоляцією. Для проведення діагностування жили кабелю мають бути повністю відключені з обох кінців від розподільного пристрою. У місці вимірювання залишаються підключеними або металева оболонка, або заземлення підстанції. На іншому кінці кабелю це підключення за можливості треба відключити від розподільного пристрою, аби виключити вплив перешкод на результати вимірювань.

PE/VPE кабелі. Змішані лінії з ділянок PE і VPE кабелів можна діагностувати разом. Для проведення діагностування основна жила й екран кабелю мають бути повністю відключені з обох кінців від розподільного пристрою, щоб гарантовано виключити перешкоди й ефекти поляризації розподільного пристрою.

Змішані лінії з ділянок з просоченою паперовою ізоляцією та PE/VPE кабелями. Згідно з фізичними законами на змішаних кабелях у результаті діагностування можна отримати інформацію лише про кабель з просоченою паперовою ізоляцією. Зрозуміло, що кабельна лінія більшою частиною повинна складатися з кабелю з просоченою паперовою ізоляцією, а доля PE/VPE кабелів максимально може складати 20 % всієї довжини кабелів. Часто це має місце під час ремонту окремих ділянок і введів на підстанціях. Підготовчі роботи під час дігностування за таких обставин такі ж, як для кабелів з просоченою паперовою ізоляцією.

Діагностування часткових розрядів. Для проведення діагностування часткових розрядів (рис. 1.20) кабелі мають бути відключені й розряджені. За наявності елегазових установок перемикання треба заздалегідь підготувати вимірювальні адаптери. Для точної локалізації місць пошкодження ЧР особливо важливими є точні схеми кабельних ліній і муфт.

На характеристики часткових розрядів (ЧР) впливають: тип, розмір і місце розташування дефекту, ізоляційний матеріал, прикладена напруга, температура кабелю, окрім того, вони змінюються з часом.

Пошкодження із-за ЧР залежать від ряду чинників і можуть мінятися у діапазоні від незначних до небезпечних, що призводять до відмов у терміни від найближчих днів до декількох років. Правила інтерпретації результатів ЧР діагностування силових кабелів наведені на рис. 1.20.

Методи випробування і діагностування кабельних ліній, виконаних кабелями з ізоляцією із зшитого поліетилену. Кабельні лінії безпосередньо після їх спорудження і в процесі експлуатації піддаються різноманітним випробуванням, за допомогою яких

виявляються ослаблені місця або дефекти в ізоляції і захисних оболонках кабелів, у сполучній і кінцевій арматурі та інших елементах кабельних ліній.

Для забезпечення надійної роботи силових кабельних ліній (КЛ) у сучасних умовах застосовується система планово-профілактичних випробувань, за яких кабелі періодично піддаються випробуванням напругою постійного струму досить високого рівня з вимірюванням струмів витоку. Практика свідчить, що такі випробування, навіть за їх успішності, не лише не гарантують безаварійну подальшу роботу КЛ, але й у багатьох випадках призводять до скорочення терміну служби лінії. Особливо небезпечні такі випробування для КЛ з тривалими термінами експлуатації або із дуже старою ізоляцією. Окрім того, випробування підвищеною напругою постійного струму силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену, які, зважаючи на свої високі експлуатаційні характеристики, знаходять усе більш широке застосування, не лише не ефективні, оскільки зшитий поліетилен має високу електричну міцність і малі струми витоку, але й чинять негативну дію на поліетиленову ізоляцію.

Стосовно силових кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену, згідно із міжнародними нормами, набагато ефективнішим та економічнішим є *метод випробувань напругою наднизької частоти 0,1 Гц*, яка за величиною не повинна перевищувати номінальну напругу (U_0) КЛ більше ніж у 3 рази згідно МЭК 60502 і DIN VDE 0276. Випробування за дуже низьких частот із зміною полярності напруги дозволяє виявляти дефекти в ізоляції без формування об'ємних зарядів у її структурі, на відміну від того, як це відбувається за прикладення до ізоляції кабелю напруги постійного струму. Тому за рубежом кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену, згідно із чинними міжнародними стандартами, випробують виключно напругою наднизької частоти. Застосування випробування силових кабелів з паперовою просоченою ізоляцією дозволяє значно знизити випробувальну напругу порівняно з випробуваннями напругою постійного струму.

Одним з лідерів у розробці методу випробувань напругою наднизької частоти, а також установок для проведення випробувань силових КЛ в умовах експлуатації, є *фірма Seba KMT* (Німеччина).

Запатентований фірмою Seba KMT принцип коливань за напруги косинусоїдально-прямокутної форми в поєднанні з повторним використанням збереженої у кабелі енергії обумовлює, порівняно з іншими методами випробувань, невелику масу установок, а також низькі витрати енергії при одночасно високій допустимій

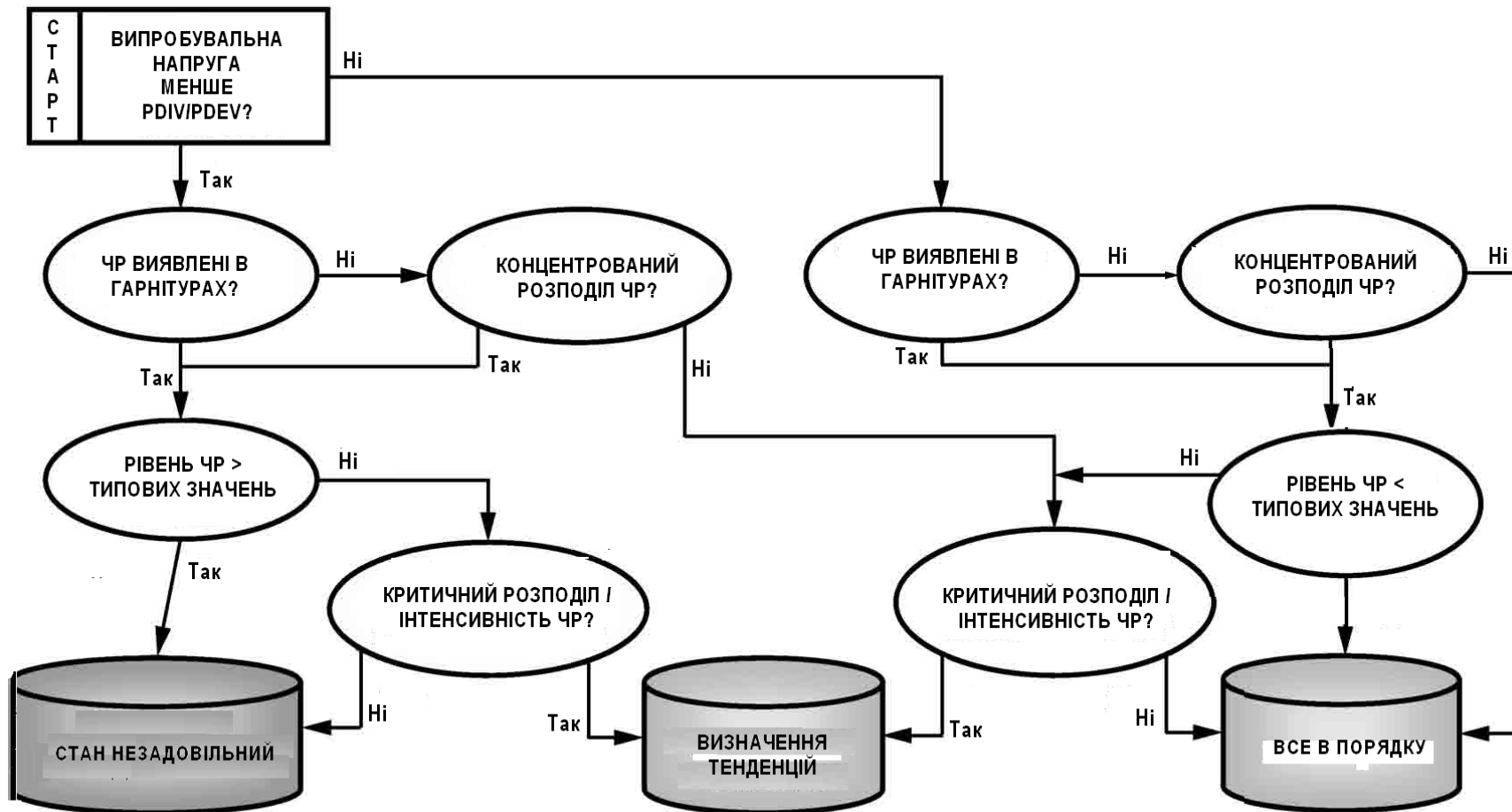


Рис. 1.20. Правила інтерпретації результатів ЧР діагностування силових кабелів: PDIV, PDEV – напруга виникнення і гасіння часткових розрядів відповідно

ємності випробовуваного об'єкта. Фірмою SebaKMT випускається серія випробувальних установок VLF 20, VLF 28, VLF 40, VLF 54, VLF 60 і VLF 80 кВ (рис. 1.21), призначених для проведення випробувань напругою наднизької частоти 0,1 Гц силових КЛ номінальною напругою від 6 до 35 кВ включно.

Метод випробування напругою косинусоїдально-прямокутної форми відрізняється від інших тим, що фронт хвилі в цьому випадку збігається з фронтом хвилі змінної напруги частотою 50 Гц. Поряд із цим форма випробувальної напруги дозволяє точніше вимірювати струм витоку. Для підвищення надійності електропостачання за рахунок зменшення кількості аварійних ситуацій і для виключення витрат на проведення необґрунтованих ремонтів КЛ набагато переважає застосування неруйнівних методів діагностування силових КЛ.

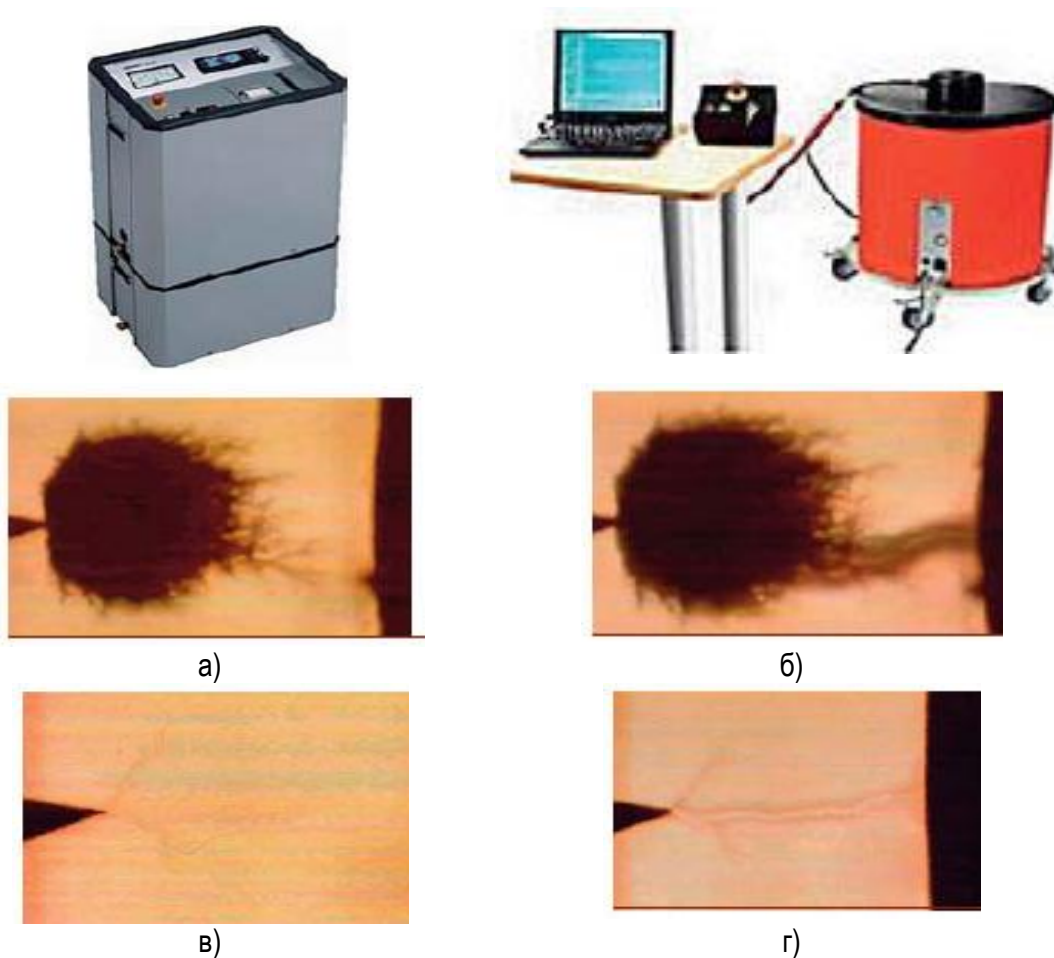


Рис. 1.21. Випробувальні установки VLF 60 і OWTS 28 та ілюстрації розвитку дефекту в кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену під час його випробування напругою змінного струму промислової частоти (а, б) та струму наднизької частоти 0,1 Гц (в,г)

З розроблених методів можна виділити такі *неруйнівні методи діагностування силових КЛ напругою до 35 кВ*, які широко використовуються за кордоном:

- метод вимірювання і локації часткових розрядів у силових КЛ (з використанням діагностичної системи OWTS);
- метод вимірювання та аналізу зворотної напруги в ізоляції силових кабелів (з використанням діагностичних систем CD 31 і CDS);
- метод вимірювання струму релаксації в ізоляції СПЭ-кабелей (з використанням діагностичних систем CDS);
- метод вимірювання діелектричних характеристик ізоляції кабелів (з використанням діагностичних систем OWTS тощо);
- метод імпульсної рефлектометрії для попередньої локалізації низькоомних пошкоджень у силових КЛ (з використанням рефлектометрів Teleflex тощо);
- метод попередньої локалізації високоомних пошкоджень у КЛ (з використанням рефлектометрів і пристроїв стабілізації дуги);
- метод контролю цілісності оболонки силових кабелів і визначення місць несправності в оболонках (з використанням приладів MFM 5–1, MVG 5 тощо).

У силових КЛ напругою до 35 кВ включно основними причинами зниження електричної міцності ізоляції у процесі тривалої експлуатації (тобто старіння ізоляції) є дія часткових розрядів (ЧР) і підвищених температур.

Фізичні процеси в ізоляції силових кабелів під впливом ЧР (тобто мікророзрядів, що виникають у місцях неоднорідності ізоляції за дії робочої напруги) вивчені недостатньо. Розроблені також різні методи вимірювання характеристик ЧР у силових КЛ, які реалізовані у вітчизняних і зарубіжних приладах та установках різних конструкцій.

Однією із найбільш сучасних та ефективних діагностичних систем для оцінювання стану ізоляції усіх типів кабелів напругою до 35 кВ методом контролю характеристик ЧР є система OWTS (Oscillating Wave Test System) розроблена фірмою Seba KMT. Система OWTS, у якій реалізований метод вимірювання ЧР осцилюючою затухаючою напругою, дозволяє визначати величину й місце їх розташування, кількість ЧР у локальних місцях КЛ, напругу виникнення і гасіння ЧР, а також тангенс кута діелектричних втрат в ізоляції, ємність і ряд інших величин. За сукупністю цих параметрів може бути зроблений обґрунтований висновок про технічний стан і проблемні місця діагностованої кабельної лінії.

Системи OWTS останніх розробок (OWTS M 28 і OWTS M 60) складаються з високовольтного блока, блока обробки сигналу й ноутбука з адаптером для безпроводного зв'язку з високовольтним блоком. Високовольтний блок також складається із джерела постійної напруги й резонансної котушки з інтегрованим високовольтним перемикачем для створення змінної випробувальної напруги. Туди ж вбудовані високовольтний подільник і контролер для цифрової обробки даних і сигналів ЧР. Керування системою, збереження, аналіз та оцінка результатів виміру характеристик ЧР здійснюється за допомогою ноутбука шляхом використання спеціального програмного забезпечення.

Діагностування за допомогою системи OWTS виконується на від'єднаній з двох сторін кабельній лінії. Перед початком діагностування проводиться калібрування системи з метою уточнення довжини кабельної лінії і визначення очікуваної амплітуди ЧР. Після калібрування кожна фаза КЛ послідовно заряджається протягом кількох секунд напругою постійного струму до вибраної величини, що не перевищує амплітуду номінальної лінійної напруги КЛ. Після заряджання фаза КЛ за допомогою електронного перемикача підключається через резонансну котушку до заземленого екрана кабелю.

У процесі розряджання кабелю виникають затухаючі синусоїдальні коливання, частота яких залежить від ємності об'єкта, що діагностується. Набігаюча хвиля ініціює ЧР в ізоляції кабельної лінії, які фіксуються і зберігаються у пам'яті комп'ютера системи OWTS для подальшої обробки з метою визначення амплітуди й місця розташування ЧР по довжині КЛ. Оскільки амплітуда випробувальної напруги є затухаючою, то можна точно визначити напругу, за якої виникають і згасають ЧР. Коливальна напруга прикладається до об'єкту протягом декількох сотів мілісекунд, тому не навантажує кабель і не ушкоджує його. Локалізація ЧР у кабельній лінії здійснюється з використанням методу рефлектометрії за результатами реєстрації двох імпульсів від одного й того ж ЧР – первинного імпульсу та імпульсу, відбитого від кінця кабельної лінії.

Під час обробки записаних у пам'яті комп'ютера даних діагностування виділяються і враховуються первинні й відбиті імпульси ЧР на тлі можливих перешкод і шумів. При цьому амплітуда ЧР визначається за первинним імпульсом, а відстань до місця виникнення ЧР к КЛ визначається за проміжком часу між первинним імпульсом і його віддзеркаленням.

Оброблені та враховані імпульси ЧР представляються на карті розподілу ЧР різної величини по довжині кабельної лінії (на карті дефектних місць) як для всіх трьох фаз кабельної лінії, так і для кожної фази КЛ окремо. Одним з найбільш важливих і складних етапів під час проведення діагностування з використанням системи OWTS є оцінка результатів діагностування і формулювання висновку за результатами вимірювання та локації ЧР. Через новизну цієї методики досі відсутні загально визнані нормативи й критерії оцінювання стану кабельної лінії за результатами вимірювання характеристик ЧР з використанням системи OWTS. Із-за особливостей схеми вимірювань ЧР амплітуда вимірюваних ЧР з використанням системи OWTS значно більше, ніж амплітуда ЧР під час вимірювання на заводах-виготівниках, де використовують інший метод.

Своєчасне й достовірне діагностування стану ізоляції силових кабельних ліній із використанням неруйнівних методів дає змогу відмовитися від профілактичних випробувань ізоляції руйнівними методами, які в багатьох випадках пошкоджують ізоляцію і призводять до зниження залишкового ресурсу ізоляції силових кабельних ліній. Випробування ізоляції силових кабельних ліній підвищеною напругою доцільно проводити під час введення нових КЛ в експлуатацію, після їх ремонту, а також у разі відсутності можливості застосування засобів технічного діагностування силових КЛ неруйнівними методами.

Приладове забезпечення технічного діагностування повітряних і кабельних ліній електропередавання. Прилад сигналізації замикань на землю ліній напругою 0,4–35 кВ «КВАНТ» (рис. 1.22) призначений для визначення місця однофазного замикання на землю в мережах 6–35 кВ з ізолюваною і компенсованою нейтраллю. Прилад «КВАНТ» також може використовуватися для пошуку обривів, пошкодження ізоляції опор і дистанційного контролю струму навантаження й напруги в мережах 0,4 кВ, що дозволяє виявити розкрадання електроенергії у побути безконтактним способом.

Прилад «КВАНТ» має кілька меж вимірювання, а також режим контролю цілісності запобіжників. Він живиться від вбудованих акумуляторів і призначений для роботи в польових умовах.

Прилад «КВАНТ» забезпечує:

- контроль струму навантаження на повітряних лініях електропередавання напругою 0,4–35 кВ;
- контроль наявності напруги на повітряних лініях електропередавання напругою 0,4–35 кВ;

- визначення місця однофазного замикання на землю у мережах напругою 6–35 кВ;
- визначення місця обриву проводу в мережах 6–35 кВ;
- визначення опори, що знаходиться під напругою, на повітряних лініях електропередавання напругою 0,4–35 кВ;
- перевірку справності знеструмлених запобіжників або цілісності електричного кола.



Рис. 1.22. Прилад сигналізації замикань на землю ліній електропередавання напругою 0,38–35 кВ «КВАНТ»

Рефлектометр IRG 3000 (рис. 1.23 а) призначений для проведення попередньої локації місць пошкодження у кабельних лініях усіх типів. Принцип роботи рефлектометра полягає в аналізі відображених сигналів від неоднорідностей у кабельній лінії.

Особливості приладу:

- зручний інтерфейс із простим меню;
- можливість повністю автоматизованого вимірювання;
- автотмасштабування вимірюваних параметрів і автоматичний вибір положення курсорів.

Рефлектометр дозволяє вести базу даних з інформацією про кабельні мережі підприємства. За спільного використання з генератором високовольтних імпульсів і системою високовольтних випробувань реалізує весь спектр методів попередньої локації пошкоджень.

Методи вимірювань:

- рефлектометричний метод;
- метод вторинного імпульсу (SIM) з блоком SA 32;

- метод вторинного імпульсу з додатковою стабілізацією дуги (SIM DC) з блоком SA 32;
- імпульсний метод (MIM) – вдосконалений SIM з блоком SA 32;
- диференціальний метод вторинного імпульсу з блоком SA 32;
- імпульсний ефект метод (ICM) з блоком SK 1D;
- метод відображеної хвилі напруги з блоком CC 1.

Радари (рефлектометри) TDR 1150 і 1170 для виявлення місця пошкодження кабелю (рис. 1.23 б) забезпечують виконання таких операцій:

- попередня локація;
- остаточне визначення місця пошкодження;
- діагностування дефекту.

Особливості приладу:

- автоматична ідентифікація ключових параметрів кабелю (довжина кабелю і відстань до пошкодження);
- швидке визначення місця пошкодження;
- збереження у власній пам'яті даних про 32 пошкодження;
- автоматичне встановлення частоти вибірки, коефіцієнта підсилення і тривалості імпульсу;
- покрокові інструкції на дисплеї (10,4" VGA кольоровий) для оператора.



а



б

Рис. 1.23. Рефлектометр IRG 3000(а) і радар (рефлектометр) TDR 1150 (б) для виявлення місця пошкодження кабелю

Радар сумісний із будь-яким стандартним високовольтним блоком з'єднання. Наявність програмного забезпечення і серійного порту дають можливість збереження даних у пам'яті зовнішнього комп'ютера, оцінки результатів вимірювання та складання звіту про вимірювання

Комплект пошукової апаратури КПА-1 (рис. 1.24) призначений для пошуку трас залягання та визначення місць пошкодження силових кабелів і кабелів зв'язку індукційним та акустичним методом.



Рис. 1.24. Комплект пошукової апаратури КПА-1

До складу комплекту пошукової апаратури КПА-1 входять:

- генератор звукової частоти ГЗЧ-М;
- кабелешукач КАИ;
- пошукові рамки;
- акустичний датчик.

Технічні характеристики генератора й кабелешукача наведені в табл. 1.5.

1.5. Технічні характеристики генератора звукової частоти ГЗЧ-М і кабелешукача КАИ

Показник	Значення показника
<i>Генератор звукової частоти ГЗЧ-М</i>	
Вихідна потужність, Вт	150
Найбільша вихідна напруга, В	100
Кількість ступенів регульованої вихідної напруги: - на частоті 1 кГц	9
- на частоті 10 кГц	9x2
Номінальний струм, А	15
Робочі частоти, кГц	1
	10
Тривалість безперервної роботи, год	8

Діапазон регулювання частоти, Гц – на межі 1 кГц – на межі 10 кГц	950–1200 9500–10500
Напруга мережі живлення змінного струму частотою 50Гц	220 В ±10 %
Маса, кг, не більше	20
<i>Кабелешукач КАИ</i>	
Чутливість приймача, А/м, не менше – на частоті 1 кГц – на частоті 10 кГц	3×10^{-3} 3×10^{-4}
Напруга виходу, В, не менше	1,0
Напруга живлення (акумулятор або батарея типу «Крона»)	9
Маса, кг, не більше	1,4

Універсальний локатор *UL 30* (рис. 1.25) у комбінації з передавачем сигналів звукової частоти (TG), котушкою (SP 30) і геомікрофоном (BM 30) локатор *UL 30* використовується для трасування маршрутів, оцінки глибини залягання і пошуку місць пошкоджень на кабельних лініях, зокрема запливаючих пробоїв.

Особливості приладу:

- вбудований гучномовець;
- водонепроникна конструкція;
- великий рідко-кристалічний дисплей з підсвічуванням;
- підстроюваний фільтр для оптимізації акустичного сигналу;
- вбудовані засоби вимірювання часу розповсюдження акустичного сигналу;
- точне трасування маршруту прокладання кабелю;
- локалізація дефектів в оболонках кабелів;
- мала маса.



Рис. 1.25. Універсальний локатор *UL 30*

Система моніторингу кабельних і повітряних ліній OVM-3 (рис. 1.26) призначена для організації моніторингу стану ізоляції, а також грозових і комутаційних перенапруг розподільчих кабельних і повітряних ліній. Оскільки всі лінії електропередавання є трифазними, економічно ефективно для цього використовувати спеціальну версію приладу реєстрації ЧР і перенапруг – OVM-3.

Відмінністю трьохканальної версії OVM-3 від одноканальної полягає в наявності додаткових засобів синхронізації та обміну інформацією між приладами, розташованими на кінцях контрольованої лінії.



Рис. 1.26. Система моніторингу кабельних і повітряних ліній OVM-3

Для цілей синхронізації в OVM-3 використовується оптична лінія зв'язку між приладами, якщо довжина контрольованої лінії електропередавання не перевищує декількох кілометрів. Точність діагностування місця дефекту в кабельній (повітряній) лінії складає у цьому випадку декілька метрів. Якщо довжина контрольованої лінії більша, то для синхронізації використовуються сигнали глобальної системи GPS, що дозволяють синхронізувати внутрішній годинник приладів, віддалених один від одного на сотні кілометрів. При цьому точність діагностування підвісної ізоляції лінії електропередавання зменшується до значення «До однієї опори», чого сповна вистачає для практичних цілей.

На базі приладів OVM-3 і спеціалізованого програмного забезпечення можуть створюватися системи моніторингу цілих ділянок енергосистеми, що займаються передачею енергії, мають різну конструкцію і різну напругу (рис. 1.27).

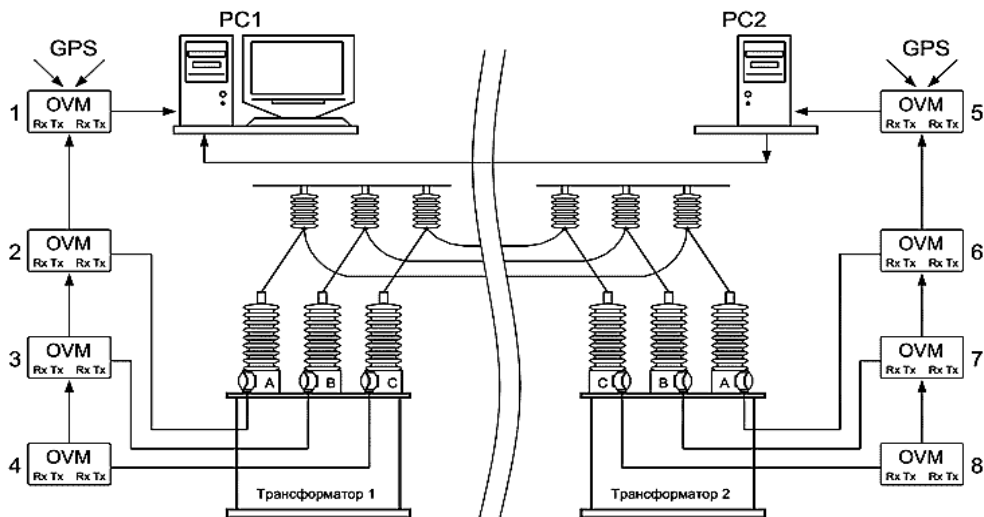


Рис. 1.27. Система моніторингу ділянок енергосистеми на базі приладів OVM-3

Переносна система марки CPDA (Cable PD-Analyzer)(рис. 1.28) призначена для діагностування стану високовольтної ізоляції методом Oscillating Wave Test System (OWTS) – реєстрація часткових розрядів у кабельних лініях з різним типом ізоляції, що виникають під впливом змінної напруги із затухаючою амплітудою.

Перед проведенням випробувань кабель заряджає постійним невеликим струмом до напруги, близької до номінального значення. Після цього кабель замикається на землю через індуктивність, приблизно рівну, 0,5–1,0 Гн. У коливальному контурі, що складається з паралельно включених ємності кабелю та індуктивності котушки, виникає резонанс з частотою у діапазоні 50–1000 Гц.

За допомогою вимірювального приладу системи CPDA реєструються часткові розряди, що виникають під впливом змінної синусоїдальної напруги з амплітудою, що зменшується. Тривалість процесу загасання коливань у кабелі не перевищує однієї секунди. На підставі аналізу отриманої інформації за допомогою вбудованої експертної системи «PD-Expert» визначається інтенсивність часткових розрядів в ізоляції кабельної лінії, тип дефекту в ізоляції та місце виникнення дефекту з точністю 1 % від довжини кабельної лінії.

Цей метод може бути застосований і для діагностування стану статорів генераторів та електродвигунів. Завдяки проведенню вимірювань у режимі «off-line», але під робочою напругою, достовірність таких вимірювань зазвичай виходить істотно вищою, ніж у режимі «on-line». Це пояснюється нижчим рівнем шумів в ізоляції контрольованого устаткування, відключеного від зовнішніх ліній.



Рис. 1.28. Переносна система марки CPDA

На сьогодні доступна версія системи CPDA з робочою напругою до 30 кВ. У розробці знаходяться версії системи з робочою напругою до 154 кВ. Відмінність між ними полягає у конструкції джерела живлення, котушки індуктивності й ключа, що замикає заряджений кабель на землю через котушку. Вимірювальний прилад системи CPDA залишається незмінним.

1.4. Технічне діагностування розрядників та обмежувачів перенапруг

1.4.1. Технічне діагностування вентильних розрядників

Останніми роками в енергосистемах країни вентильні розрядники (рис. 1.29) активно замінюються більш досконалыми нелінійними обмежувачами перенапруг (ОПН). Проте до сьогодні в енергосистемах кількість експлуатованих вентильних розрядників значно перевищує кількість ОПН. Підприємства, що експлуатують вентильні розрядники, зацікавлені в продовженні їх терміну служби, оскільки вони зарекомендували себе високонадійними пристроями. Хоча велика частина вентильних розрядників експлуатується від 10 до 20 років, а деякі – близько до граничного терміну служби, вочевидь, що оновлення або заміна вентильних розрядників відбуватиметься протягом довгого часу, який визначається економічними можливостями, інтенсивністю пошкоджень і результатами відбракування. Отже, своєчасне виявлення дефектів засобів захисту від перенапруг (ЗЗВП), якість роботи яких гарантує надійність роботи дорогого електроустаткування, є актуальною проблемою енергетики.



Рис. 1.29. Вентильні розрядники

До методів діагностування, що дозволяють своєчасно виявити дефекти засобів захисту від перенапруг, відносяться:

- тепловізійне обстеження (за допомогою приладів інфрачервоної техніки з високою роздільною здатністю за температурою (не нижче 0,5 °С);
- вимірювання опору ізоляції;
- вимірювання пробивної напруги ($U_{пр}$) промислової частоти 50 Гц;
- вимірювання струмів провідності ($I_{пр}$) у розрядників з шунтуючими опорами, які повинні відповідати нормативним значенням.

Методика тепловізійного контролю високовольтних вентильних розрядників у робочому стані досить добре розроблена й висвітлена в багатьох роботах. Завдяки її застосуванню можна виявити такі види несправностей в елементах вентильних розрядників, що призводять до їх аномальних нагрівів:

- порушення герметичності;
- обрив або зволоження шунтуючих резисторів;
- замикання іскрових проміжків;
- порушення заводської комплектації елементів.

Чинні нормативні документи пропонують вважати справним розрядник, «верхні елементи якого в місці розташування шунтуючих резисторів нагріті однаково». Проте досвід експлуатації показує, що температури однаковими на всіх верхніх елементах фаз розрядника одного приєднання практично ніколи не бувають (несиметрія фазної напруги, неідентичне розташування різних фаз розрядників відносно точки зйомки, різна міра забрудненості елементів розрядника тощо) і завжди відрізняються (навіть, коли справні елементи) на долі, а інколи й на цілі градуси. За різниці перепаду температури верхніх елементів

розрядника відносно сусідніх у 2–3 °С можна з упевненістю стверджувати, що елемент розрядника дефектний і його рекомендується негайно вивести в ремонт. Якщо відмінність температур аналогічних елементів різних фаз розрядника в межах від 2 до 5 °С, то доцільно провести додаткові випробування. Після аналізу всіх результатів діагностування остаточне рішення про ремонт зазвичай залишається за персоналом, у чиєму веденні знаходиться засіб захисту від перенапруг. Тут доречно відзначити, що аналогічних рекомендацій дотримуються і за рубежом, наприклад, відповідно до американського стандарту.

Важливим параметром і надійним показником, що характеризує працездатність розрядників, є значення його пробивної напруги. Це вимірювання на практиці часто виконується у тих випадках, коли справність того або іншого елемента розрядника викликає певні сумніви за отриманими термограмами тепловізійного контролю і даними вимірювань струмів провідності.

Загалом вимірювання пробивної напруги вентиляльних розрядників виконуються з метою визначення стану їх іскрових проміжків і відповідності захисних характеристик необхідним нормам. Випробування на пробій дозволяють ефективно виявити дефекти розрядників, що з'явилися у результаті неправильного транспортування, розгерметизації у процесі експлуатації або в результаті зниження ними пропускну здатності.

Слід зауважити, що пробивною напругою елементів вентиляльних розрядників прийнято вважати середнє значення не менше трьох вимірів для розрядників РВС, п'яти вимірів для розрядників РВРД, десяти вимірів для розрядників РВМ, РВМГ і РВМК.

Оцінювання стану вентиляльних розрядників виконується шляхом зіставлення вимірних значень пробивної напруги з гранично допустимими значеннями, наведеними в паспорті розрядника або в чинних нормах випробування електроустаткування. Після закінчення вимірювань пробивної напруги додатково мають бути виміряні струми провідності розрядників за випрямленої напруги для контролю цілісності шунтуючих резисторів.

Вимірювання пробивної напруги вентиляльних розрядників з шунтуючими резисторами можуть виконуватися лише за обов'язкового дотримання певних вимог (наприклад, час підйому напруги частотою 50 Гц на елементі розрядників серії РВС, РВМ, РВРД, РВМГ, РВМК–330, РВМК–500 до пробивного не повинен перевищувати 0,5 с, а розрядників серії РВМК–400В, РВМК–750, РВМК–1150 – 1,0 с). Перевищення допустимого часу підйому напруги

може привести до перегріву й руйнування шунтуючих резисторів розрядника, а з іншого боку, час підйому напруги має бути не меншим 0,1 с. Інтервал між окремими вимірюваннями має бути не менше 10 с і не більше 1 хв, а тривалість протікання струму через розрядник після пробою його іскрових проміжків не повинна перевищувати 0,5 хв; струм потрібно обмежувати, наприклад, додатковим резистором до 0,7 А.

1.4.2. Діагностування обмежувачів перенапруг

За більш ніж двадцятирічну історію існування обмежувачі перенапруг (ОПН) набули досить широкого застосування в енергосистемах і гідно проявили себе в експлуатації. Негативний досвід їх використання пов'язаний в основному з тим, що фахівці не враховують різницю у застосуванні ОПН і розрядників, які виконують ті ж функції.

У результаті з'являлися і з'являються проекти, у яких вказуються характеристики ОПН, неадекватні умовам експлуатації. Через це апарати піддаються діям, які перевищують допустимі для цього типовиконання, і пошкоджуються. Разом з грамотним вибором характеристик важливою проблемою застосування ОПН залишається їх коректне діагностування в процесі експлуатації. Сенс діагностування устаткування взагалі й ОПН зокрема полягає в тому, щоб виявити на ранніх стадіях виниклі дефекти, розвиток яких може привести до аварії.

Як відомо, ОПН являє собою колонку послідовно включених нелінійних опорів – варисторів (або декілька таких колонок, включених паралельно для збільшення допустимих навантажень ОПН за струмом, власне пропускну здатність). Колонка варисторів розміщується у герметичному корпусі, що запобігає дії несприятливих атмосферних чинників на варистори. Як матеріал для виготовлення корпусу використовуються як фарфор, так і композитні полімерні матеріали. Основні розміри корпусу ОПН вибирають, виходячи з необхідної електричної міцності й довжини шляху витоку зовнішньої ізоляції. Під час прикладання до ОПН напруги через нього протікає струм провідності, що має активну (АС) і ємнісну (ЄС) складові. Ємнісна складова є головною складовою, а активна складова за амплітудою зазвичай не перевищує 10–15 % значення повного струму провідності. Наявність активної складової струму провідності призводить до виділення в обмежувачі перенапруг тепла, яке через його корпус віддається у навколишній простір. Збільшення активної

складової струму понад нормальну величину призводить до додаткового розігрівання колонки варисторів і, як наслідок, корпусу.

За чималого збільшення активної складової струму, коли корпус виявляється нездатним відводити все тепло в навколишній простір, варистори ОПН розігріваються, внаслідок чого може виникнути тепловий пробій варисторів, тобто пошкодження апарату. Вочевидь, що основним завданням діагностування обмежувача перенапруги є визначення того, чи зросла величина активної складової струму й чи не досягла вона в конкретному обстежуваному ОПН значення, перевищення якого може викликати виникнення аварійної ситуації. На практиці це вирішується або безпосереднім вимірюванням струмів провідності, або побічно – контролем температури поверхні корпусу ОПН шляхом тепловізійного обстеження, або шляхом послідовного використання обох методів. У цьому випадку вимірювання струму провідності проводиться лише на апаратах, у яких під час тепловізійного обстеження виявлена аномальна температура поверхні корпусу.

У нормативній документації [1] вказано на необхідність проводити в процесі експлуатації перед початком грозового сезону періодичне обстеження стану ОПН (у мережах напругою 110 кВ і вище) шляхом вимірювання струму провідності. Окрім вимірювання струму провідності допускається проводити тепловізійне обстеження, причому в разі його задовільних результатів, згідно з В. П. Калявиним та Л. М. Рибоковим [1], інше випробування не потрібне. Окрім цих двох основних методів, необхідно не рідше ніж 1 раз у 6 років проводити вимірювання опору під час проведення планових робіт на устаткуванні, що захищається.

У процесі вирішення завдання діагностування технічного стану ОПН необхідно зробити чотири кроки:

- 1) вибрати адекватний метод контролю;
- 2) коректно виконати вимірювання відповідно до вибраного методу контролю і занести всі необхідні дані в протокол;
- 3) провести аналіз отриманих результатів, у тому числі оцінити достовірність отриманих результатів;
- 4) зробити на основі результатів аналізу висновок про стан обстежуваного апарату або про необхідність проведення додаткових випробувань.

За очевидної послідовності дій у проведенні діагностування, що здається на перший погляд, у повному об'ємі ці чотири кроки виконуються далеко не завжди, тому висновки в протоколах не підтверджуються наведеними результатами вимірювань.

Вимірювання опору обмежувачів перенапруги. Найпростішим із передбачених чинними нормативними документами²⁶ випробувань обмежувачів перенапруги є вимірювання їх опору. ГКД 34.20.302–2002 встановлює, що «у розрядниках на номінальну напругу 3 кВ і вище опір вимірюється мегаомметром на напругу 2,5 кВ, у розрядниках на номінальну напругу менше ніж 3 кВ – мегаомметром на напругу 1,0 кВ. Значення опору розрядників РВН, РВП, РВО повинні бути не менше декількох тисяч мегаом, а елементів розрядників РВС – від декількох сотень до декількох тисяч мегаОм».

Відповідно до прийнятої термінології, «номінальна напруга ОПН» – це напруга, яку ОПН повинен витримувати протягом не менше 10 с під час проведення випробувань у робочому режимі.

Як правило, для ОПН вітчизняних виготівників номінальна напруга приблизно в 1,25 раза більша найбільшої допустимої напруги апарату (що можна перевірити в каталогах будь-яких компаній). Таким чином, вимога ГКД поширюється на апарати з найбільшою робочою напругою не більше 2,4 кВ, а фактично – на апарати для мереж 220/380/600 В. Однак прикладення до ОПН для мереж напругою 220/380/600 В протягом 1 хвилини напруги 1000 В (згідно з методикою вимірювання опорів мегаомметром) неминуче призведе до пошкодження варисторів ОПН, що легко перевірити за залежностями «напруга–час», що наводяться виготівниками для цих апаратів. Єдиним виходом з ситуації, враховуючи обов'язковість вимог галузевого керівного документу, є коригування цього пункту.

Вимірювання струму провідності обмежувачів перенапруги. Помітно складнішим, ніж попереднє вимірювання є вимірювання струму провідності обмежувачів перенапруги. Зазвичай ці вимірювання виконують на місці експлуатації за дії на ОПН фактичної напруги мережі (без відключення устаткування). Для вимірювання величини струму в коло заземлення ОПН включають вимірювальний пристрій. Використовувані при цьому засоби вимірювання струму провідності можна умовно розділити на три основні групи:

1) міліамперметри, що вимірюють амплітудне або діюче значення повного струму провідності;

²⁶ СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. Затверджено та надано чинності: наказ Міністерства палива та енергетики України від 15 січня 2007 р. № 13

2) пристрої, що дозволяють реєструвати, окрім повного струму, струми 1-ої і вищих гармонік (зазвичай – 3^{-i} , 5^{-i} , 7^{-i});

3) пристрої, що забезпечують вимірювання не лише характеристик 2-ої групи, але й АС повного струму провідності.

Група 1 – засобів вимірювання струму провідності.

Широке застосування під час обстежень вимірювальних пристроїв 1-ої групи обумовлене їх істотно меншою вартістю порівняно з приладами останніх груп. По суті, в 1-ій групі йдеться про звичайні мікроамперметри (міліамперметри) з межами вимірювань 1–5 мА (залежно від характеристик обстежуваного апарату). За допомогою мікроамперметра виявити зміни характеристик варисторів практично неможливо, оскільки навіть значну (у рази) зміну величини активної складової (через її відносну дрібноту) не призводить до скільки-небудь помітних змін повного струму. Збільшення повного струму внаслідок збільшення АС (що виник, наприклад, через зміну характеристик варисторів ОПН) могло б бути відміченим лише під час значного зростання активної складової. Проте за настільки великої величини активної складової струму внаслідок теплового пробою ОПН неминуче протягом годин (або навіть хвилин) буде пошкоджений. Як видно, періодичний контроль повного струму в ОПН не дозволяє прогнозувати пошкодження ОПН.

Реєстровані під час обстеження зміни повного струму провідності в ОПН слід зв'язувати:

- із змінами умов вимірів (величина й синусоїдальність прикладеної до апарату напруги, температура довкілля);

- із змінами в стані ізоляції ОПН;

- із зміною робочої висоти колонки варисторов в апараті (наприклад, унаслідок пробою частини варисторов або втрати електричного контакту в колонці).

Група 2 – засобів вимірювання струму провідності.

Поява в різних виготівників декількох типів вимірювальних пристроїв 2-ої групи була обумовлена низькою інформативністю результатів вимірювань за допомогою пристроїв 1-ої групи, що не дозволяють виявити процес деградації варисторів, що розпочався.

Пристрої 2-ої групи – це прилади, що вже здатні виділити із струму гармонійні складові й виміряти їх значення. В основі діагностування ОПН за допомогою таких приладів лежать два основні чинники. По-перше, наявність в електричному колі нелінійного елементу призводить до появи в ній сигналів із ширшим спектром частот, чим вихідний синусоїдальний. По-друге, нелінійність ОПН неоднакова в різних областях вольт-амперної характеристики,

причому в області робочої напруги нелінійність мала, а в міру зростання прикладеної напруги вона зростає. Таким чином, зростання струмів вищих гармонік у колі заземлення ОПН за незмінного повного струму свідчить про зміну характеристик нелінійного елемента. Під час використання пристроїв 2-ої групи слід мати на увазі:

- нелінійними властивостями в ОПН володіють не лише варистори, що буде показано нижче;

- поява вищих гармонійних складових у мережевій напрузі (тобто прикладеному до ОПН) в значно більшій мірі позначається на величинах струмів відповідних гармонік, чим на величині повного струму.

Група 3 засобів вимірювання струму провідності.

Вимірювання струмів вищих гармонік дозволяє виявити наявність змін у вольт-амперній характеристиці ОПН, але не дає можливості виміряти власне активну складову струму провідності, яка й визначає стан варисторів. Отже, як і раніше залишається відкритим питання, що з'явилося причиною зростання струму вищих гармонійних складових (деградація варисторів, поява вищих гармонік у мережі тощо).

Пристрої, що відносяться до 3-ої групи, вимірюють безпосередньо активну складову струму провідності й лише почали з'являтися на вітчизняному ринку вимірювальної техніки. Але досвід застосування дослідних зразків таких пристроїв дуже успішний.

Результати практичних вимірювань. Слід звернути увагу на те, що вимірювальний пристрій, до якої з трьох перерахованих груп він би не відносився, включається в коло заземлення всього ОПН, а не лише колонки варисторів. Іншими словами, через вимірювальний пристрій проходить сумарний струм, що протікає як по колонці варисторів, так і по корпусу, у тому числі по його зовнішній поверхні.

Сумарний струм через ОПН під час приймальних випробувань на заводі-виготівнику вимірюється на апараті з чистою поверхнею, коли значення струму витоку по поверхні корпусу несумірно менше, ніж струм через колонку варисторів. Інша справа – величина струму по поверхні із зволеним шаром забруднень на апараті, що відстояв в умовах експлуатації рік і більше. Публікацій, присвячених дослідженням струмів витоку по поверхні ізоляції, що знаходиться під робочою напругою, мало, оскільки дослідників більше цікавили питання розрядних характеристик.

Згідно з М. А. Яцуном [2] видно, що під час прикладення синусоїдальної напруги до забрудненого ізолятора по його поверхні

починає протікати помітно несинусоїдальний струм. Фахівцями ВАТ «НІІПТ» експертно вказувався можливий діапазон величин струмів витоку по поверхні 0,4–1,0 мА.

У лабораторії ЗАТ «Завод енергозахисних пристроїв» була проведена серія експериментів з ОПН 110 кВ після його річної експлуатації на одній з підстанцій ВАТ «Вологдаенерго». За можливості, оберігаючи від пошкоджень шар природного забруднення на поверхні корпусу, апарат помістили на 1 годину у ванну з водою, після чого перенесли на випробувальний стенд, де виміряли сумарний струм з боку фланця, що заземлявся, за дії робочої напруги. Діюче значення струму склало 1,5 мА, що помітно перевищує значення бракування для типу ОПН, що випробовувався. Після витримки протягом доби в сухому приміщенні сумарний струм через апарат склав вже 0,4 мА, що відповідало результатам вимірювань під час приймально-здавальних випробувань, наведених у паспорті на ОПН. Після повторного зволоження водопровідною водою поверхні корпусу (за допомогою побутового обприскувача) реєстрована величина струму знову виросла, але вже до 1,1 мА. Потім поверхня ОПН була вимита за допомогою м'якої щітки із застосуванням звичайного миючого засобу й з подальшим обполіскуванням водопровідною водою. Після обмивання, незалежно від того, чи застосовувалося зволоження поверхні корпусу, сумарний струм через ОПН склав 0,4 мА.

Отриманий результат підтверджує давно відомі факти: забруднена поверхня ізолятора, якщо вона зволожена, є провідником, причому нелінійним, а струм витоку по ній може складати міліампери, тобто стосовно ОПН буде порівнянний або навіть перевершувати струм провідності через колонку варисторів. Нині в конструкціях ОПН практично всіх виготівників відсутній спеціальний, ізолюваний від нижнього фланця, що заземляється, ОПН вивід, приєднаний до колонки варисторів. Такий вивід (невеликий прохідний ізолятор), що ізолює колонку варисторів від нижнього фланця ОПН, був лише в апаратах виробництва Корніловського заводу. Через відсутність цього виводу в більшості сучасних ОПН струми через колонку варисторів і струми по поверхні корпусу ОПН замикаються на фланці апаратів, тобто одночасно протікають у вимірювальних приладах. Тому виділити під час вимірювання лише струм через колонку варисторів неможливо.

Отже, перед вимірюванням струму через ОПН для оцінювання стану варисторів необхідно звести до мінімуму струм витоку по поверхні апарату, тобто проводити вимірювання за сухого шару забруднень на поверхні ОПН або після ретельного попереднього обмивання поверхні.

У лабораторних умовах для визначення долі струму витоку в сумарному струмі в колі заземлення ОПН можна провести нескладні вимірювання. На ОПН необхідно надіти металеве кільце, розмістивши його поблизу від нижнього фланця (наприклад, між першим і другим ребрами, рахуючи від нижнього фланця). Між кільцем і нижнім фланцем необхідно прикласти напругу, значення якої має бути в стільки раз менше нормальної, що впливає на весь ОПН, у скільки

разів довжина шляху витоку від кільця до нижнього фланця менше довжини шляху витоку ізоляції цілого ОПН.

Якщо зареєстрована в цих умовах величина струму витоку істотно менше очікуваного струму провідності варисторів ОПН, можна вважати, що під час вимірювань на повному ОПН струм витоку по поверхні апарату помітного впливу не надасть.

1.4.3. Тепловізійне обстеження обмежувачів перенапруг

Поява дефектних областей в апараті призводить, як правило, до зміни (зазвичай підвищення) температури в зоні дефекту, що змінює температуру зовнішньої оболонки апарату. Зростання температури може бути зафіксоване в процесі тепловізійного обстеження, яке останнім часом набуває усе більш широкого застосування.

Під час обстеження обмежувачів перенапруги інтерес представляє температура варисторів, тобто температура поверхні тіла ОПН (його циліндровій частині), а не ребер. Справа у тому, що температура ребер обмежувачів перенапруги, тим більше полімерних, мало залежить від температури тіла апарату, що виходить з багаточисельних опублікованих робіт В. В. Тіткова, присвячених тепловим процесам в обмежувачах перенапруги. Оскільки тепловізор – це оптичний прилад, за його допомогою можна виміряти температуру лише тих поверхонь, які видно. Ребра, що є на ОПН, частково закривають собою тіло апарату, причому різною мірою для різних по висоті частин апарату (рис. 1.30). Створювані ребрами перешкоди такі, що багатьох випадках тіла ОПН не видно зовсім (як правило, у частині, що примикає до нижнього фланця). У кожному конкретному випадку перешкоди від ребер залежать:

- від положення спостерігача;
- від кута нахилу й вильоту ребер (а ці параметри в кожного виготівника свої).

Під час тепловізійного обстеження часто не беруть до уваги те, що отримувана «фотографія» не має чітких контурів об'єктів (рис. 1.30 а). У той же час відсутність чіткості зображення свідчить про те, що вимірюванню піддалася не конкретна точка на об'єкті, а декілька точок, за якими оператор може визначити лише усереднену температуру. Неточне налаштування тепловізора, його недостатня роздільна здатність призводять до того, що часто вимірюється не температура тіла ОПН, а щось усереднене між температурами тіла й ребер (і навколишніх предметів), тоді як інформативною є лише температура тіла.

Термограма (рис. 1.30 а) принципово не може бути використана для оцінювання стану ОПН, проте часто саме за такими термограмами проводиться діагностування стану ОПН експлуатуючими організаціями.

На термограмі, наведеній на рис. 1.30 б, на відміну від рис. 1.30 а, видно контури апарату й можна легко відрізнити фрагменти тіла ОПН і ребер його корпусу, а отже, і їх температури.

У протоколі обстеження вказана максимальна температура на поверхні ОПН, але не відмічено, що ця температура відноситься до поверхні ребер, а не тіла апарату. Але якщо уважніше розглянути термограму на рис 1.30 б, то видно, що найбільш нагріті частини знаходяться на ребрах ОПН, а зовсім не на тілі апарату. Отже, головним джерелом тепла, яке реєструє тепловізор, є не нагрів варисторів ОПН, а струм витоку по поверхні забрудненої зволоженої ізоляції.

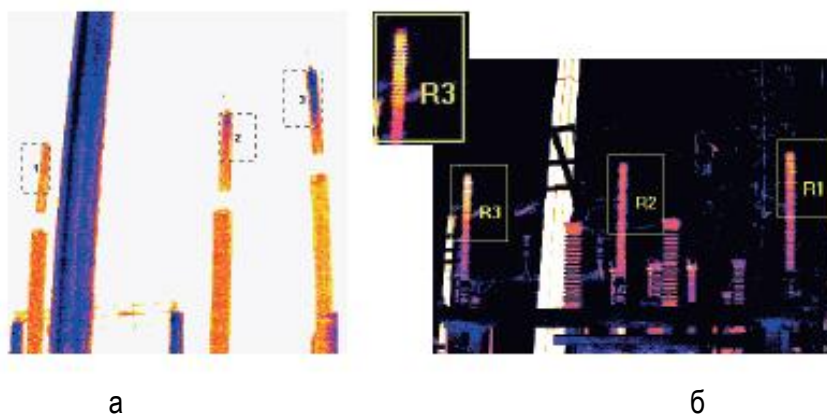


Рис. 1.30. Термограми ОПН: а) із розмитими контурами обстежуваного об'єкта; б) з чіткими контурами обстежуваного об'єкта

Оскільки нагрівання поверхні струмами витоку ніхто не бере до уваги, а верхня частина ОПН, як усім відомо, є більш перегрітою, то верхні варистори «постаріли» й ОПН необхідно виводити з експлуатації. Проте нагрівання ОПН струмом витоку по поверхні забрудненої ізоляції не є показником бракування. Це нормальний розрахунковий режим обмежувача перенапруг, тобто підстав для виводу ОПН з експлуатації немає. Більш того, внаслідок нерівномірної провідності шару забруднень на поверхні корпусу (різна забрудненість, зволоження, провідність) і різної густини струму (на тілі апарату й ребрах) нагрів різних частин апарату струмом витоку може істотно відрізнятись.

Таким чином, обстеження ОПН, що знаходяться в експлуатації, згідно з нормами має проводитися щороку перед початком грозового

сезону (березень – квітень). Цей час характеризується різкими змінами температури й підвищеною вологістю забрудненої поверхні ізоляції. У подібних умовах оцінка стану ОПН повинна виконуватися лише після ретельного аналізу достовірності отриманих результатів.

Слід пам'ятати, що наявність струму витoku позначається як на результатах вимірювання струму через ОПН за робочої напруги, так і на тепловій картині апарату, що отримується за допомогою тепловізора. Об'єктивне оцінювання стану варисторів ОПН може бути виконане лише тоді, коли величина струму витoku не перевершує 10–15 % повного струму через апарат (тобто порівняна з активною складовою струму провідності варисторів).

Критерієм бракування є підвищений струм у варисторах, а не струм витoku по поверхні забрудненого корпусу.

Під час тепловізійного обстеження необхідно переконатися в тому, що вимірюється температура тіла ОПН (а не ребер) і що реєстрований нагрів обумовлений в основному нагрівом варисторів, а не сторонніми причинами (наприклад, струмом поверхні ОПН).

Під час діагностування обмежувачів перенапруг рекомендується звернути увагу на таке:

- ОПН досить чутливий до прикладеної напруги, тому для коректного оцінювання стану ОПН, у тому числі за результатами тепловізійного обстеження, необхідно знати величину напруги на апараті під час вимірювань і вказувати її у протоколі;

- впливаюча на ОПН в експлуатації фазна напруга, як правило, визначається не прямими вимірюваннями, а діленням на величини лінійної напруги, що фіксується. Точне визначення фазної напруги через лінійну напругу неможливе, оскільки завжди має місце несиметрія по фазах параметрів мережі й режиму.

1.4.4. Приладове забезпечення діагностування технічного стану розрядників та обмежувачів перенапруг

Система моніторингу стану обмежувачів перенапруг OPN-Monitor (рис. 1.31) призначена для постійного контролю технічного стану до 4 обмежувачів перенапруг (ОПН) у високовольтних мережах. Дозволяє без участі обслуговуючого персоналу проводити діагностування ОПН і планувати терміни проведення ремонтних робіт. Оцінювання технічного стану ОПН виконується комплексно: за величиною струму витoku ОПН і за його спектральним складом. Включення тривожної та аварійної сигналізації здійснюється приладом автоматично за перевищенням струмом витoku порогового

значення або під час зростання у струмі витоку амплітуд третьої і п'ятої гармонік.



Рис. 1.31. Система моніторингу стану обмежувачів перенапруг OPN-Monitor

За допомогою системи контролюються такі параметри ОПН:

- повний струм провідності ОПН, активна складова;
- вміст 1, 3 і 5 гармонік у повному струмі провідності.

Прилад здійснює підрахунок кількості спрацьовувань ОПН з розбиттям імпульсів по амплітуді на 4 діапазони й фіксацією часу спрацьовування. На лицьовій панелі приладу стан всіх параметрів можна контролювати за допомогою цифрового індикатора. Вбудована в прилад пам'ять дозволяє зберігати результати вимірювань. За допомогою порту зв'язку RS-485 інформація про стан контрольованих ОПН з приладу може передаватися в систему АСУ–ТП підстанції більш високого рівня.

OPN-Monitor складається із стаціонарно змонтованих вимірювального приладу й датчиків, включених у ланцюг заземлення ОПН. Прилад і датчики розраховані на експлуатацію в розширеному температурному діапазоні. Технічні характеристики системи наведені в табл. 1.6.

1.6. Технічні характеристики системи OPN-Monitor

Показник	Значення показника
1 Кількість контрольованих ОПН	до 4
2 Робоча напруга ОПН, кВ	35–500
3 Діапазон робочих температур	від мінус 40 до плюс 70
4 Габаритні розміри приладу, мм	171 x 121 x 55
5 Габаритні розміри датчика (без урахування кабельних вводів і кріплення), мм	171 x 121 x 55

1.5. Технічне діагностування заземлювальних пристроїв

Загальні положення. Характеристики заземлювального пристрою (ЗП) повинні відповідати вимогам забезпечення електробезпеки обслуговуючого персоналу й забезпечувати в нормальних та аварійних умовах такі експлуатаційні функції електроустановки:

- дію релейних захистів від замикання на землю;
- дію захисту від перенапруг;
- відведення в ґрунт струмів блискавки;
- відведення робочих струмів (струмів несиметрії тощо);
- захист ізоляції низьковольтних кіл та устаткування;
- зниження електромагнітних впливів на вторинні кола;
- захист підземного устаткування і комунікацій від струмових перевантажень;
- стабілізацію потенціалів відносно землі й захист від статичної електрики;
- забезпечення вибухо- й пожежебезпечності.

Основними параметрами, що характеризують стан заземлювального пристрою (ЗП), є:

- опір розтіканню струму;
- напруга на ЗП під час стікання з нього струму замикання на землю;
- напруга дотику (для електроустановок вище 1 кВ з ефективно заземленою нейтраллю, окрім опор повітряних ліній електропередавання).

Додатковими характеристиками заземлювальних пристроїв, за допомогою яких виконується оцінювання його стану в процесі експлуатації, є якість і надійність з'єднання елементів заземлювальних пристроїв, відповідність перерізу й провідності елементів вимогам ПУЕ та проектним даним, інтенсивність корозійного руйнування.

ПТЕЕС²⁷ встановлюють, що для визначення технічного стану заземлювального пристрою має періодично здійснюватися такий комплекс цілеспрямованих заходів:

²⁷ Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС). Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 91 від 13.02.2012 та № 905 від 16.11.2012) Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 2 березня 2012 р. за № 350/20663.

- зовнішній огляд видимої частини заземлювального пристрою;
- огляд з перевіркою кола між заземлювачем і заземлювальними елементами (відсутність обривів і незадовільних контактів у заземлювальному провіднику, надійність з'єднань природних заземлювачів;
- вимірювання опору заземлювального пристрою;
- вибіркове розриття ґрунту для огляду елементів заземлювального пристрою, що знаходяться у землі;
- вимірювання питомого опору ґрунту для опор ліній електропередавання напругою понад 1000 В;
- вимірювання напруги дотику в електроустановках, заземлювальний пристрій яких виконано за нормами на напругу дотику;
- перевірка пробивних запобіжників в електроустановках до 1000 В з ізольованою нейтраллю;
- вимірювання повного опору петлі «фаза–нуль» або струму однофазного замикання на корпус, або на нульовий провідник в електроустановках до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю.

За необхідності мають вживатися заходи для доведення параметрів заземлювальних пристроїв до нормативних. Випробування та вимірювання заземлювальних пристроїв проводяться відповідно до вимог Норм²⁸. Періодичність перевірки параметрів заземлювальних пристроїв, встановлена Нормами, та вимоги до їх проведення наведені в табл. 1.7, а нормативні значення параметрів заземлювальних пристроїв – у табл. 1.8 і 1.9.

Під час виникнення на території об'єкта короткого замикання або пов'язаних з ним аварійних ситуацій необхідно провести обстеження заземлювальних пристроїв у зоні аварії і на прилеглих до неї ділянках заземлювального пристрою.

Рекомендується проводити перевірку стану заземлювальних пристроїв після реконструкції, особливо під час встановлення на об'єкті електронних і мікропроцесорних пристроїв (приміром пристроїв релейного захисту).

Для вимірювання опору заземлювальних пристроїв і визначення напруги дотику багато років використовується ряд приладів, що

²⁸Норми і методи випробувань та вимірювань параметрів електрообладнання та апаратів електроустановок споживачів” (ПТЕ-2006, додаток 1).

Основні нормативно-технічні показники, які використовуються при проведенні випробувань та вимірювань параметрів електрообладнання та апаратів електроустановок споживачів” (ПТЕ-2006, додаток 2).

відрізняються сферою застосування, діапазонами вимірюваних значень, схемами, перешкодостійкістю, частотою вимірювального струму тощо. Характеристики ряду приладів наведені в п 1.5.5.

На кожен заземлювальний пристрій, що знаходиться в експлуатації, повинен бути заведений паспорт, склад якого наведений на рис. 1.32.

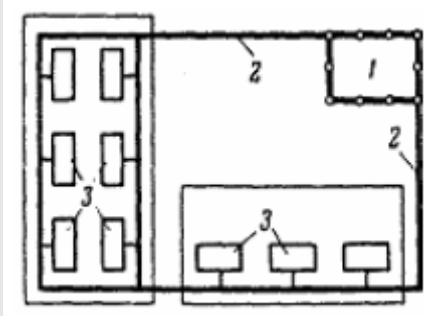
Дата введення в експлуатацію	
Виконавча схема заземлення	
 <p>1 – заземлювач; 2 – заземлювальні провідники; 3 – заземлюване обладнання</p>	
Основні технічні характеристики	
Дані про результати перевірок стану заземлювального пристрою	
Відомість оглядів і виявлених дефектів	
Характер ремонтів і змін, внесених до заземлювального пристрою	

Рис. 1.32. Склад паспорта заземлювального пристрою

Візуальний огляд видимої частини заземлювального пристрою повинен проводитись за графіком огляду електрообладнання, встановленим особою, відповідальною за електрогосподарство.

1.7. Періодичність проведення перевірок заземлювальних пристроїв

К, П, М – провадяться у терміни, встановлені системою ТОР, але П – не рідше, ніж один раз на 3 роки

Найменування перевірки	Вид перевірки	Нормативне значення	Вказівки
1. Перевірка наявності та стану кіл між заземлювачами й елементами, що заземлюються, з'єднань природних заземлювачів із заземлювальним пристроєм	К, П	Не повинно бути обривів і незадовільних контактів у проводі, що з'єднує елементи або нульовий провід із заземлювачами.	Необхідно перевіряти після монтажу, переобладнання, ремонтів. Для заземлювальних пристроїв, що експлуатуються до 25 років – не рідше, ніж один раз на 12 років, понад 25 років – не рідше, ніж один раз на 6 років У кранів перевірку наявності кола необхідно здійснювати не рідше, ніж один раз на рік
2. Перевірка корозійного стану елементів заземлювального пристрою: а) повітряних ліній;	К, М	Елемент заземлювача слід замінити, якщо його переріз зруйнований більше, ніж на 50 %	Огляд з розриттям ґрунту слід здійснювати вибірково на 2 % від загальної кількості опор із заземлювачами в населеній місцевості, на ділянках ПЛ з найбільш агресивними, зсувними, видувними або погано провідними ґрунтами – після монтажу, переобладнання, ремонтів, а також в експлуатації, не рідше, ніж один раз на 12 років. За рішенням особи, відповідальної за електрогосподарство, вибірково перевірку корозійного стану заземлювачів можна здійснювати частіше Після осідання, зсувів або видування ґрунту в зоні заземлювального пристрою повинні проводитися позачергові огляди з розриттям ґрунту

Найменування перевірки	Вид перевірки	Нормативне значення	Вказівки
б) електроустановок (крім повітряних ліній електропередавання)	К, П, М	Елемент заземлювача слід замінити, якщо його переріз зруйнований більше, ніж на 50 %	Вибіркову перевірку елементів, що знаходяться у землі, з розриттям ґрунту слід здійснювати в місцях, де заземлювачі найбільше піддаються корозії, а також поблизу нейтралей силових трансформаторів, автотрансформаторів, короткозамикачів, заземлювальних введів дугогасних реакторів, розрядників, обмежувачів перенапруг – не рідше, ніж один раз на 12 років. У ЗРУ огляд елементів заземлювачів слід виконувати згідно з рішенням особи, відповідальної за електрогосподарство
3. Вимірювання опору заземлювального пристрою: а) повітряних ліній напругою вище 1000 В;	К, П	Допустиме значення опору заземлювальних пристроїв наведене в табл. 40 додатку 2 ПТЕ–2006	Вимірювання слід проводити на всіх опорах з розрядниками, захисними проміжками, електрообладнанням, з повторними заземлювачами нульових проводів – після монтажу, переобладнання, ремонтів, в експлуатації не рідше, ніж один раз на 6 років; на тросових опорах ліній напругою 110–150 кВ у разі виявлення на них слідів перекриття або руйнування ізоляторів електричною дугою. На інших опорах вимірювання слід проводити вибірково на 2 % від загальної кількості опор із заземлювачами в населеній місцевості й на ділянках з найбільш агресивними, зсувними ґрунтами й такими, що видуваються або мають погану провідність, після монтажу, переобладнання, ремонтів, в експлуатації не рідше, ніж один раз на 12 років

Найменування перевірки	Вид перевірки	Нормативне значення	Вказівки
б) повітряних ліній напругою до 1000 В;	К, П	Допустиме значення опору наведене в табл. 40 додатку 2 ПТЕ–2006	Вимірювання слід проводити на всіх опорах із заземлювачами грозозахисту та повторними заземленнями нульового проводу – після монтажу, переобладнання, ремонтів, в експлуатації не рідше, ніж один раз на 6 років. Для решти опор слід здійснювати вимірювання вибірково на 2 % від загальної кількості опор з заземлювачами в населеній місцевості, на ділянках ПЛ з найбільш агресивними, зсувними, видувними або погано провідними ґрунтами після монтажу, переобладнання, ремонтів, в експлуатації не рідше, ніж один раз на 12 років
в) електроустановок (крім повітряних ліній)	К, П, М	Допустиме значення опору наведене в табл. 41 додатку 2 ПТЕ–2006	Вимірювання слід проводити після монтажу, переобладнання, ремонтів цих пристроїв, але не рідше, ніж один раз на 12 років, а в умовах підвищеної небезпеки (ліфтів, пралень, лазень тощо) – не рідше, ніж один раз на рік

Продовження табл. 1.7

Найменування перевірки	Вид перевірки	Нормативне значення	Вказівки
4 Вимірювання напруги дотику	К, М	<p>Допустимі значення напруги дотику:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 500 В – за тривалості впливу напруги до 0,1 с; - 400В– до 0,2 с; - 200В– до 0,5 с; - 130В– до 0,7 с; - 100 В – до 3 с <p>Проміжні допустимі напруги інтервалом від 0,1 до 1 с слід визначати інтерполяцією.</p> <p>Залежність напруги дотику від допустимої тривалості її дії показана на рис. 2.1 додатку 2 ПТЕ–2006</p>	Вимірювання слід проводити в електроустановках напругою 110–150 кВ, виконаних згідно з нормами на напругу дотику, після монтажу, переобладнання, ремонтів заземлювального пристрою, але не рідше, ніж один раз на 6 років. Вимірювання слід проводити під час під'єднаних природних заземлювачів і тросів ПЛ. Напругу дотику слід вимірювати в контрольних точках, визначених проектом
5 Перевірка стану пробивних запобіжників в установках напругою до 1000 В	К, П	Запобіжники повинні бути справними	Перевірку слід проводити не рідше одного разу на 6 років, а також у випадку їх спрацювання

1.8. Найбільший допустимий опір заземлювальних пристроїв повітряних ліній електропередавання

Характеристика установки, заземлювальний пристрій якої перевіряється	Питомий опір ґрунту ρ , Ом·м	Опір заземлювального пристрою, Ом
<p>1. Лінії напругою вище 1000 В</p> <p>1.1. Опори залізобетонні, металеві та дерев'яні, на яких підвішено трос або встановлено пристрої захисту від блискавки; опори залізобетонні та металеві ліній напругою 35 кВ та ліній 3–20 кВ у населеній місцевості, а також заземлювачі електроустановок, встановленого на опорах ліній напругою 110 кВ і вище</p> <p>1.2. Електроустановки на опорах ліній напругою 3–35 кВ</p> <p>1.3. Залізобетонні і металеві опори ліній напругою 3–20 кВ у ненаселеній місцевості</p> <p>1.4. Розрядники і захисні проміжки на підходах ліній до підстанцій з обертовими машинами</p>	<p>До 100 Понад 100 до 500 ”500” 1000” 1000” 5000 Понад 5000 –</p> <p>До 100 Понад 100 –</p>	<p>10 * 15 * 20 * 30* 0,006 ρ * 250/I_p **, але не більше, ніж 10</p> <p>30 0,3 ρ 5</p>
<p>2. Лінії напругою до 1000 В***</p> <p>2.1. Опори з повторними заземлювачами нульового проводу в мережах із заземленою нейтраллю для лінійної напруги:</p> <p>– 660/380 В</p> <p>– 380/220 В</p> <p>– 220/127 В</p>	<p>До 100 Понад 100</p> <p>До 100 Понад 100</p> <p>До 100 Понад 100</p>	<p>15 0,15 ρ</p> <p>30 0,3 ρ</p> <p>60 0,6 ρ</p>

Продовження табл. 1.8

Характеристика установки, заземлювальний пристрій якої перевіряється	Питомий опір ґрунту ρ , Ом·м	Опір заземлювального пристрою, Ом
2.2. Залізобетонні та металеві опори в мережі з ізольованою нейтраллю	–	50
2.3. Заземлювачі, призначені для захисту від грозових перенапруг	–	30

* Для опор висотою більше, ніж 40 м на ділянках ПЛ, захищених тросом, опір заземлювача повинен бути в 2 рази меншим від наведеного в таблиці.

** I_p – розрахунковий струм замикання на землю:

- у мережах без компенсації ємнісного струму – струм замикання на землю;
- у мережах з компенсацією ємнісного струму для електроустановок, до яких під'єднані компенсуючі апарати, – струм, що дорівнює 125 % номінального струму найбільш потужного з цих апаратів, а для електроустановок, до яких не під'єднані компенсуючі апарати, – струм замикання на землю, що протікає у цій мережі під час відключення найбільш потужного з компенсуючих апаратів.

*** Для питомого еквівалентного опору ґрунту більше, ніж 100 Ом·м, допускається збільшення наведених значень у 0,01р раз, але не більше, ніж десятикратно.

1.9. Найбільший допустимий опір заземлювальних пристроїв електроустановок (окрім повітряних ліній електропередавання)

Характеристика електроустановки й заземлювального об'єкта	Питомий опір ґрунту ρ , Ом·м	Опір заземлювального пристрою, Ом
1	2	3
1. Електроустановки напругою 110–150 кВ, заземлювальний пристрій яких виконано за нормами на опір	До 500 Понад 500	0,5 $0,001 \rho$
2. Електроустановки напругою понад 1000 В у мережі з ізолюваною нейтраллю: 2.1. У разі використання заземлювального пристрою одночасно для електроустановок напругою до 1000 В	До 500 Понад 500	$125/I_p^*$, де I_p – розрахункове значення струму замикання на землю, А $0,25 \rho / I_p$
2.2. У разі використання заземлювального пристрою тільки для електроустановок напругою понад 1000 В	До 500 Понад 500	$250/I_p$ $0,5 \rho / I_p$
3. Електроустановки напругою до 1000 В 3.1 Штучний заземлювач з від'єднаними природними заземлювачами, до якого приєднані нейтралі генераторів і трансформаторів, а також повторні заземлювачі нульового проводу (у тому числі на вводах у приміщення) у мережах із заземленою нейтраллю на напругу, В: – 660/380 – 380/220 – 220/127 3.2. Нейтралі генераторів та трансформаторів з урахуванням використання природних заземлювачів, а також повторних заземлювачів нульового проводу повітряних ліній напругою до 1000 В за кількістю відхідних ліній не менше двох на напругу, В:	До 100 Понад 100 До 100 Понад 100 До 100 Понад 100	15^{**} $0,15 \rho$ 30^{**} $0,3 \rho$ 60^{**} $0,6 \rho$ $250/I_p$ $0,5\rho/I_p$

Продовження табл. 1.9

Характеристика електроустановки й заземлювального об'єкта	Питомий опір ґрунту ρ , Ом·м	Опір заземлювального пристрою, Ом
1	2	3
– 660/380	До 100 Понад 100	2 $0,02 \rho$
– 380/220	До 100 Понад 100	4 $0,04 \rho$
– 220/127	До 100 Понад 100	8 $0,08 \rho$
3.3. Заземлювальний пристрій у мережі з ізольованою нейтраллю: – у стаціонарних мережах;	До 500 Понад 500	10 $0,02 \rho$
– у пересувних електроустановках у разі живлення від пересувних джерел енергії	–	Визначається за значенням напруги на корпусі під час однополюсного замикання. У разі пробою ізоляції напруга повинна бути не вище таких значень: 650 В за тривалості дії до 0,05 с; –500 В – 0,1 с; 250 В – 0,2 с; –100 В – 0,5 с; –75 В – 0,7 с; 50 В – 1 с; –36 В – 3 с; 12 В – більше 3 с

* I_p – див. пояснення у табл. 1.5

** опір заземлювального пристрою з врахуванням повторних заземлень нульового проводу повинен бути не більшим, ніж 2, 4 і 8 Ом для лінійних напруг, відповідно 660, 380 і 220 В джерела трьохфазного струму й напругах 380, 220 і 127 В джерела однофазного струму

Особлива відповідальність заземлювальних пристроїв вимагає їх ретельної перевірки й оцінювання того, наскільки вони задовольняють технічні вимоги безпеки. Під час виконання пусконаладжувальних робіт оцінюється якість виконання ЗП, що характеризується опором розтіканню струму, тобто опором ґрунту довкола заземлювача.

Перевірка наявності електричного кола між заземлюваним електрообладнанням та елементами заземлювального пристрою. Перевірка наявності електричного кола між заземлюваним електрообладнанням та елементами заземлювального пристрою (перевірка металозв'язку) виконується під час проведення приймально-здавальних випробувань електроустановки й протягом її експлуатації у терміни, що встановлюються системою планово-запобіжних ремонтів.

Чинними ПТЕ–2006 встановлюється, що за результатами перевірки «не повинно бути обривів і незадовільних контактів у проводі, що з'єднує елементи або нульовий провід із заземлювачами». Контактні з'єднання перевіряються оглядом, простукуванням, а також шляхом вимірювання перехідних опорів мостами, мікроомметрами й за методом амперметра-вольтметра.

Значення опору контактів не нормується, але практикою встановлено, що якісне приєднання до заземлювального пристрою (заземлювача) забезпечується за перехідного опору не більше 0,05 Ом.

Перевірка корозійного стану елементів заземлювального пристрою. Заземлювальні пристрої піддаються спільній дії ґрунтової корозії та струмів короткого й подвійного замикання на землю. Дія великих струмів прискорює руйнування природних і штучних заземлювачів.

При цьому, як правило, руйнуються:

- трубопроводи господарського водопостачання та аварійного пожежогасіння;
- заземлювальні провідники в місцях входу в ґрунт, безпосередньо під поверхнею ґрунту;
- зварні з'єднання в ґрунті;
- горизонтальні заземлювачі;
- нижні кінці вертикальних електродів.

Руйнування бувають локальні, місцеві й загальні. Локальні корозійні пошкодження заземлювальних провідників виявляються під час оглядів (в основному з розкопуванням ґрунту), а також під час вимірювань напруги дотику й перевірки металозв'язку. Місцева

корозія характеризується появою на поверхні провідника окремих, інколи множинних, пошкоджень у формі виразок або кратерів, глибина й поперечні розміри яких співрозмірні та знаходяться у межах від долей міліметра до кількох міліметрів. Загальна корозія виникає в ґрунтах з великою корозійною активністю.

Для суцільної поверхневої корозії характерне рівномірне по всій поверхні провідника проникнення в глиб металу з відповідним зменшенням розмірів поперечного перерізу елементу заземлювального пристрою. Після механічного видалення продуктів корозії поверхня металу виявляється шорсткою, але без очевидних виразок, точок корозії або тріщин. Кількісна оцінка ступеню корозійного зношування виконується вибірково на ділянках контрольованого елементу заземлювальних пристроїв шляхом вимірювання характерних розмірів, залежних від дії корозії. Ці розміри визначаються після видалення з поверхні елементу продуктів корозії.

За суцільної поверхневої корозії характерними розмірами є лінійні розміри поперечного перерізу провідника (діаметр, товщина, ширина), вимірювані штангенциркулем. За місцевої – вимірюється глибина окремих виразок (наприклад, за допомогою штангенциркуля), а також площа виразок на контрольованій ділянці.

Елемент заземлювальних пристроїв має бути замінений, якщо зруйновано більше 50 % його перетину.

Для виявлення тенденції корозії та прогнозування терміну служби заземлювачів рекомендується виконати вимірювання електрохімічного окислювально-відновного потенціалу, питомого опору ґрунту й визначити наявність блукаючих струмів у землі.

Вимірювання опору розтікання струму заземлювального пристрою. Вимірювання опору розтікання струму заземлювального пристрою (заземлювача) r_{zn} виконується вимірювачем опору заземлення з використанням допоміжного електроду (струмовий електрод Т) і зонду (потенціальний електрод П), наведених на рис. 1.33. За допомогою вбудованого джерела струму вимірювача й допоміжного електроду Т через електрод (заземлювач), що перевіряється та опір розтікання струму якого визначається, пропускається струм $I_{розтік}$. Вимірюваний опір розтікання струму заземлювального пристрою R_{zn} , ом становить:

$$R_{zn} = U_{розтік} / I_{розтік} \quad (1.1)$$

Шкала вимірювача проградуєвана в омах.

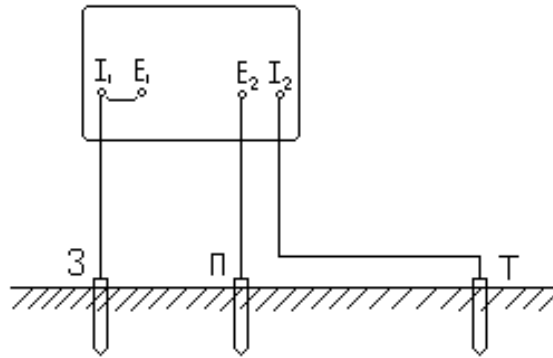


Рис. 1.33. Схема вимірювання опору розтікання струму заземлювача (З)

Вимірювання повинні виконуватися у періоди найбільшого висихання ґрунту. Під час проведення вимірювань в умовах, що відрізняються від вказаних, необхідно застосовувати сезонний коефіцієнт K_c ²⁹ і тоді опір R_{zn} визначається за формулою

$$R_{zn} = K_c R_{zn.вим.} \quad (1.2)$$

де $R_{zn.вим.}$ – значення опору заземлювального пристрою, отримане під час вимірювань.

Струмівий і потенційний електроди слід розташовувати на одній лінії по території, вільній від ліній електропередавання і підземних комунікацій. Відстані від заземлювального пристрою до струмового й потенційного електродів вибираються залежно від розмірів заземлювальних пристроїв і характерних особливостей навколишньої території.

Якщо заземлювальний пристрій має невеликі розміри, а довкола нього є обширна площа, вільна від ліній електропередавання і підземних комунікацій, то відстані L (м) до електродів (струмових і потенційних) вибираються таким чином:

$$L_{струм} = 5D;$$

$$L_{потенц} = 0,5 L_T,$$

де D – найбільший лінійний розмір заземлювального пристрою, (для ЗП у вигляді багатокутника – його діагональ, для глибинного заземлювача – довжина глибинного електроду, для променевого заземлювача – довжина променя).

²⁹Якобс А.И. Электробезопасность в сельском хозяйстве / А. И. Якобс, А. В. Луковников. – М. : Колос, 1981. – 239 с.

Схеми увімкнення поширених вимірювачів опору заземлення М416 і Ф4103-М1 для вимірювання опору розтікання струму заземлювальних пристроїв наведені на рис. 1.34.

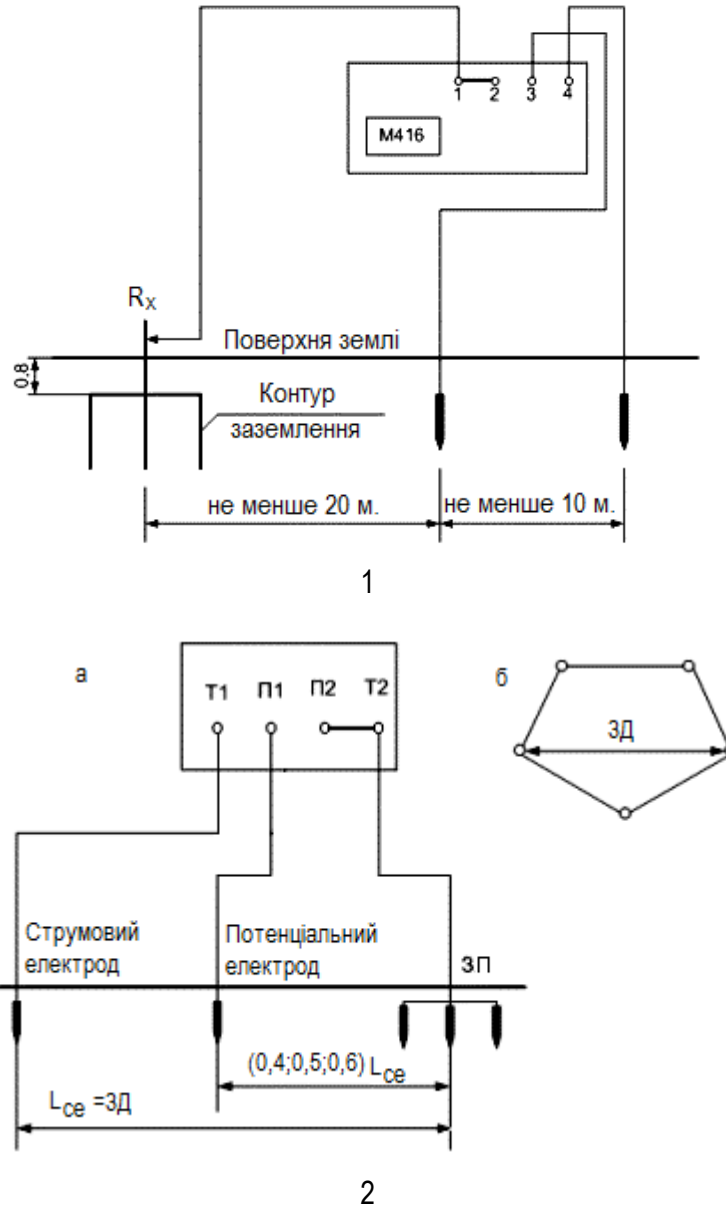


Рис. 1.34. Схеми увімкнення вимірювачів опору заземлення М416 (1) і Ф4103-М1 (2): а) для вимірювання опору розтікання струму заземлювальних пристроїв; б) конфігурація заземлювального пристрою

Вимірювання напруги дотику. Напруга дотику $U_{\text{дот}}$ визначається за формулою

$$U_{\text{дот}} = I_3 \frac{U_{\text{вим}}}{I_{\text{вим}}} \cdot \frac{R_{\text{люд}}}{R_{\text{люд}} + R_{\text{осн.мін}}}, \quad (1.3)$$

де I_z – значення струму замикання на землю в місці вимірювання;
 $\frac{U_{\text{вим}}}{I_{\text{вим}}}$ – опір, вимірний приладом; $R_{\text{люд}}$ – опір тіла людини (для установок понад 1000 В з ефективно заземленою нейтраллю $R_{\text{люд}} = 1$ кОм); $R_{\text{осн.мін}}$ – мінімальне зі всіх вимірних на об'єкті значень опору основи.

Принципові схеми вимірювань напруги дотику представлені на рис. 1.35 (до робочих відносяться місця, на яких під час виконання оперативних перемикань можуть виникнути КЗ і які доступні для дотику персоналу, що виконує перемикання).

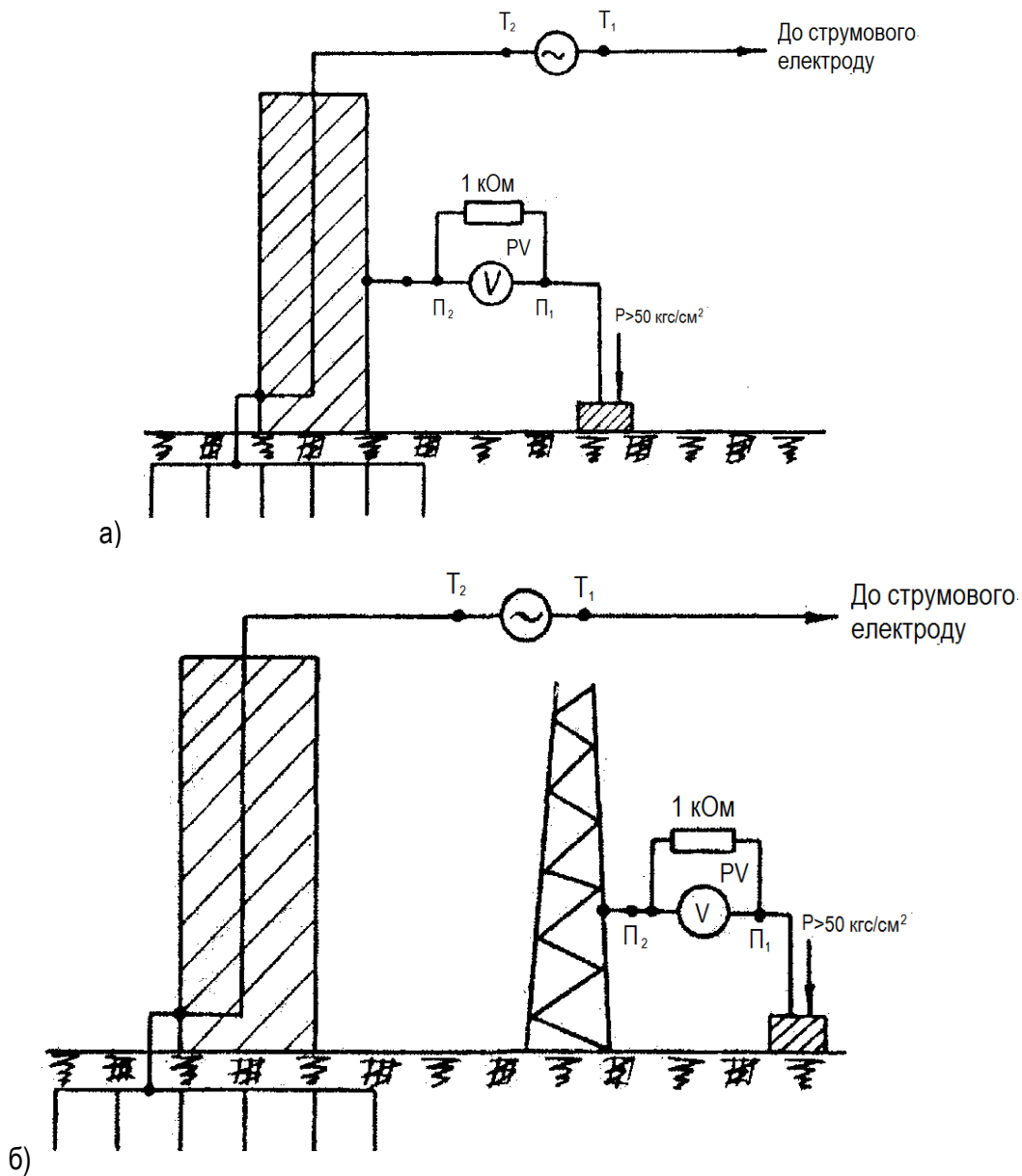


Рис. 1.35. Схеми вимірювань напруги дотику:
 а) на робочому місці; б) на неробочому місці

Як вимірювальні прилади можна використовувати ПИНП, АНЧ-3, ЭКЗ-01, КДЗ-1 або ОНП-1.

Струмівий електрод розміщується таким чином, щоб якомога точніше імітувати струмове коло, що виникає при замиканні на землю.

Під час вимірювання напруги дотику на території ВРП 110 кВ і вище, живлення якого здійснюється від однієї або декількох повітряних ліній електропередавання (ПЛ), струмівий електрод переноситься від краю заземлювача не менше ніж на 2D. Якщо підстанція розташовується на території промислового підприємства або на забудованій території, то для зменшення наведення напруги на струмове коло робочим струмом ПЛ струмівий електрод переноситься не менше ніж на 200 м від підстанції і приблизно на 100 м убік від живлячих ПЛ.

Якщо вимірювання виконуються на ВРП 110 кВ, із шин якого здійснюється живлення навантаження, а живлення шин здійснюється від автотрансформатора з вищою напругою 220–1150 кВ, струмівий електрод можна приєднувати до нейтралі живлячого автотрансформатора.

Провідники струмового й потенційного кіл повинні підключатися до заземленого устаткування окремими струбцинами, при цьому провідник струмового кола приєднується до заземлювального провідника. Провідник потенційного кола може бути приєднаний до цього ж заземлювального провідника або до будь-якої точки металоконструкції, тобто до місця можливого дотику.

Під час вимірювання на неробочому місці струмівий вивід T_2 приладу приєднується до заземлювальної шинки корпусу найближчого устаткування, якою може протікати струм короткого замикання.

Потенційне коло від виводу P_1 приладу під'єднується до пластини, що імітує стопи ніг людини, розміром 25 см, яка розташовується приблизно на відстані 1 м від устаткування. Основа під пластиною має бути вирівняна й зволожена водою (250 мл води). Пластина має бути виконана так, щоб під час вимірювань на ній могла розташовуватися людина, що створює необхідний тиск, який має бути не менше 50 кгс/см².

Напругу дотику необхідно вимірювати в контрольних точках, у яких ці значення визначені розрахунком під час проектування. Окрім того рекомендується виконувати вимірювання на всіх робочих і неробочих місцях. Проводячи вимірювання на підстанціях напругою 110 кВ і вище, виводи P_1 і P_2 вимірювального приладу мають бути

шунтовані резистором 1 кОм, як це показано на рис. 1.35 (у приладах ПИНП і АЧ–200 цей резистор вбудований).

Основні засади технічного діагностування заземлювальних пристроїв. Як зазначалося, періодичний контроль стану заземлювальних пристроїв здійснюється відповідно до вимог чинних нормативних документів³⁰. Через істотні відмінності у кваліфікації персоналу, в оснащеності технічними засобами, а також у методиках проведення вимірювань та аналізу результатів, якість контролю заземлювальних пристроїв часто невисока. Тому є потреба у встановленні чітких вимог до діагностування заземлювальних пристроїв, включаючи перелік контрольованих параметрів, методики проведення вимірювань і розрахунків, характеристики технічних засобів, застосовуваних під час вимірювань, методи аналізу й форми представлення результатів діагностування.

Слід зауважити, що метою діагностування заземлювальних пристроїв є не лише виявлення недоліків, але й розроблення заходів щодо їх усунення.

Висновок про стан заземлювального пристрою ґрунтується на зіставленні визначених під час діагностування контрольованих параметрів з їх допустимими значеннями.

Під час проведення діагностування ЗП на електричних станціях і підстанціях повинні виконуватися вимірювання:

- напруги дотику на устаткуванні при імітації КЗ на землю;
- опору ЗП для струмів промислової частоти (напруга на ЗП);
- опору з'єднань заземлювача з елементами, що заземляються;
- розподілу потенціалів і струмів заземлювальним пристроєм при імітації КЗ на землю й удару блискавки в блискавковідводи.

При цьому проводяться вимірювання для визначення виконавчої схеми заземлювального пристрою: трас прокладання заземлювачів і заземлювальних провідників (штучних і природних),

³⁰ Глава 1.7 ПУЕ:2011. Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом
Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТТЕС). Затверджено наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 91 від 13.02.2012 та № 905 від 16.11.2012) Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 2 березня 2012 р. за № 350/20663.

глибини залягання, типу й площі поперечного перерізу й заземлювачів.

Додатково виконується вимірювання питомого опору ґрунту: залежність питомого опору ґрунту від глибини. Також визначається ступінь корозії заземлювачів і заземлювальних провідників методом вибіркового розкопування ґрунту.

За результатами вимірювань мають бути визначені найбільші можливі значення контрольованих параметрів, щоб порівняти їх із допустимими значеннями. Усі результати вимірювань мають бути перераховані до реальних струмів короткого замикання, нормованих струмів блискавки, а також до найбільш несприятливих кліматичних умов.

На підставі досвіду діагностування заземлювальних пристроїв електричних станцій і підстанцій (понад 500 об'єктів класу напруги від 6 кВ до 750 кВ) можна стверджувати, що вимірювання на об'єкті дозволяють лише якісно оцінити стан заземлювальних пристроїв (відносно більшості контрольованих параметрів). Достовірні чисельні результати діагностування виходять під час застосування розрахунково-експериментальної методики. Причому вимірювання переважно використовуються для тестування розрахунків.

Для проведення розрахунків застосовуються спеціальні комп'ютерні програми, а вихідними даними є:

- результати вимірювань на об'єкті, розрахункові струми короткого замикання (з урахуванням розвитку енергосистеми);
- час відключення короткого замикання (основний, резервний захисти, час роботи пристрою резервування під час вимкнення вимикача в мережах напругою 110–220 кВ);
- відомості про кліматичні умови й геологічні розрізи ґрунту;
- оперативна схема первинних ланцюгів;
- характеристики силового устаткування.

За допомогою програм виконують розрахунок перехідних процесів у розгалуженій 3-мірній схемі заземлювального пристрою електромережевих об'єктів, що включає систему провідників у повітрі й у ґрунті, під час коротких замикань на землю й ударах блискавки.

Під час проведення розрахунків повинні враховуватися:

- питомий опір ґрунту;
- матеріал і площа поперечного перерізу провідників і заземлювачів;
- складові струму КЗ на землю;
- кабелі з екраном, бронею або оболонкою;

- трубопроводи різного перерізу.

У результаті розрахунків отримують розподіл потенціалів і струмів елементами заземлювального пристрою, і визначають:

- опір заземлювального пристрою (напругу на ЗП);
- напругу дотику й кроку;
- напругу, що впливає на вторинні кабелі й устаткування;
- струми в екранах, броні й оболонках кабелів.

Для розрахунку напруги й струмів, що впливають на вторинне устаткування, можуть застосовуватися, наприклад, програми ОРУ–М, Parsiz, Контур, KWIK GRID, «Расчет заземляющих устройств» фірми Safe Engineering Services technologies ltd. Для розрахунку імпульсних перешкод можуть застосовуватися програми: Interferences, ЕМТР–RV, PisPice. MICROCAP.

За допомогою програм виконують розрахунок перехідних процесів при КЗ і комутаціях у первинних колах. У результаті розрахунків визначають імпульсні струми в первинних ланцюгах та імпульсну напругу (струми) у вторинних колах.

Комплексне діагностування заземлювальних пристроїв. Комплексне діагностування заземлювального пристрою передбачає контроль його параметрів, проведення вимірювань, розрахунків та імітаційних випробувань.

Основними параметрами, що характеризують стан ЗП і підлягають контролю, є:

- опір заземлювального пристрою – $R_{зп}$ (можливий діапазон вимірювань від 0 до 100 Ом);
- опір металевого зв'язку – $R_{мтзв}$ (нормована величина – не більше 0,05 Ом);
- напруга дотику – $U_{пр}$ (діапазон вимірів 0–500 В);
- питомий опір ґрунту – $R_{пит}$ (діапазон вимірів 1–20000 Ом·м);
- розподіл струмів і потенціалів на заземлювальному пристрої під час імітації короткого замикання.

Вимірювання вказаних параметрів здійснюються на частоті струму, близькій до 50 Гц. Під час діагностування також визначається реальна схема заземлювального пристрою: траси штучних (підземні провідники) і природних (кабелі, труби, металоконструкції тощо) провідників ЗП без розкопування ґрунту.

На сьогодні існує досить широкий спектр засобів вимірювальної техніки різних виробників, призначених для виконання вимірювальних процедур під час діагностування заземлювальних пристроїв (табл. 1.10). Переважна частина їх дає змогу контролювати

лише окремі параметри заземлювального пристрою, а не їх сукупність. Виключенням є вимірювальні комплекси КДЗ–1, КДЗ–2 виробництва російської фірми ТОВ НПФ «ЕЛНАП», розроблені за участю ТОВ «Компанія ЕМС» на основі багаторічного практичного досвіду роботи у сфері дослідження стану заземлювальних пристроїв.

1.10. Прилади й комплекси для діагностування заземлювальних пристроїв

Найменування параметра	Прилади (аналоги комплексу КДЗ–2)			КДЗ–2 (ЕЛНАП, Росія)
	MRU–101 (Sonel, Польща)	MI–2124 (Metrel, Словенія)	С.А6450 (Chauvin Arnoix Group, Франція)	
Опір заземлювальних пристроїв	+	+	+	+
Опір металевого зв'язку	+	+	+	+
Напруга дотику до 500 В	-	-	-	+
Питомий опір ґрунту	+	+	+	+
Вимірювання розподілу потенціалів і струмів заземлювальним пристроєм при імітації КЗ на землю	-	-	-	+
Визначення трас залягання заземлювачів	-	-	-	+
Частота вимірювального сигналу, Гц	128	125/150	41–512	57
Незалежна пам'ять, кількість результатів, що зберігаються	400	1000	512	1120
Експорт даних до ПК	+	+	+	+

Приладове забезпечення технічного діагностування заземлювальних пристроїв. *Вимірювач опору заземлення М416* (рис. 1.36 а) призначений для вимірювання опору заземлювальних пристроїв, активних опорів і може бути використаний для визначення питомого опору ґрунту. Діапазон вимірювання приладу становить від 0,1 до 1000 Ом і має чотири діапазони вимірювань: 0,1–10 Ом; 0,5–50 Ом; 2,0–200 Ом; 100–1000 Ом. Джерелом живлення служать три з'єднані послідовно сухі гальванічні елементи напругою по 1,5 В.

Вимірювач опору заземлення Ф4103–М1 (рис. 1.36 б) призначений для вимірювання опору заземлювальних пристроїв, питомого опору ґрунтів та активних опорів як за наявності перешкод,

так і без них з діапазоном вимірювань від 0–0,3 Ом до 0–15 кОм (10 піддіапазонів).

Під час роботи з вимірювачем у мережах з напругою вище 36 В необхідно виконувати вимоги безпеки, встановлені для таких мереж. Клас точності вимірювального приладу Ф4103 – 2,5 і 4 (залежно від діапазону вимірювань). Живлення – елементи (R20, RL20) – 9 шт. Частота оперативного струму – 265–310 Гц. Час встановлення робочого режиму – не більше 10 секунд. Час встановлення показів у положенні «ИЗМ I» – не більше 6 с, у положенні «ИЗМ II» – не більше 30 с. Тривалість безперервної роботи не обмежена. Норма середнього напруцювання на відмову – 7250 годин. Середній термін служби – 10 років. Умови експлуатації – від -25 °С до +55 °С. Габарити, мм – 305 x 125 x 155. Маса, кг, не більш – 2,2.

Перед проведенням вимірювань вимірювачем Ф4103 необхідно, за можливості, зменшити кількість чинників, що викликають додаткову похибку, наприклад, встановити вимірник практично горизонтально, далеко від потужних електричних полів, використовувати джерела живлення $12 \pm 0,25$ В, індуктивну складову враховувати лише для контурів, опір яких менше 0,5 Ом, визначати наявність перешкод тощо. Перешкоди змінного струму виявляються за коливаннями стрілки під час обертання ручки ПДСТ у режимі «ИЗМ I». Перешкоди імпульсного (стрибкоподібного) характеру й високочастотні радіоперешкоди виявляються за постійними неперіодичними коливаннями стрілки.

Вимірювач опору заземлення Metrel SMARTEC Earth/Clamp (MI 3123) (рис. 1.36 в) призначений для вимірювання опору всіх видів систем заземлення і підтримує:

- 4-провідний метод вимірювань;
- 4-провідний метод вимірювань з використанням одних кліщів;
- метод двох кліщів, за якого не вимагається роз'єднання заземлювальних електродів;
- 4-провідний метод вимірювань питомого опору ґрунту.

Поряд із цим прилад забезпечує:

- вимірювання струму витoku за допомогою кліщів;
- вимірювання діючого значення струму (TRMS) за допомогою кліщів.

Запатентована методика вимірювань забезпечує точні результати й виключає вплив блукаючих струмів.

Прилад забезпечений великим дисплеєм з підсвічуванням, а також двома світлодіодними індикаторами, які за кольором

дозволяють користувачеві здалека швидко оцінювати результати вимірювань у вигляді «відповідає» / «не відповідає». Він також забезпечений магнітом, який дозволяє прикріплювати його до металевих поверхонь, що значно полегшує роботу. Прилад вирізняється високою точністю і перешкодостійкістю, має програмовані межі вимірювань, сигналізує про наявність перешкод (блукаючих струмів), а також про дуже високий опір між вимірювальним штирем і ґрунтом. У прилад вбудований зарядний пристрій.

Вимірювач опору заземлення і питомого опору ґрунту С.А6470 (рис. 1.37) об'єднує у собі три прилади, оскільки призначений для:

- оцінювання діючих пристроїв заземлення, що діють;
- визначення найкращого положення нових електродів заземлювального пристрою;
- перевірки електричних з'єднань.

Вимірювання провідності, опору заземлювального пристрою, коефіцієнта зв'язку заземлювачів, опору ґрунту – усі види вимірювань вибираються за допомогою поворотного перемикача режимів.

Вимірювач С.А 6470 забезпечує надійні вимірювання завдяки:

- використанню традиційних методів вимірювання за допомогою допоміжних електродів-штирів;
- автоматичному діагностуванню перед початком вимірювання і повідомленню про наявність несправностей (погані з'єднання або електричні перешкоди);
- широкому діапазону вимірювань від 0,01 Ом до 100 кОм.

Для підвищення точності й зменшення впливу сигналів перешкод передбачений ручний або автоматичний вибір частоти тестового сигналу в діапазоні від 41 до 512 Гц.

Прилад забезпечує покращувані розрахункові функції:

- для обчислення зв'язку між заземлювачами необхідно виконати послідовно 3 виміри, після чого прилад обчислює коефіцієнт зв'язку автоматично;
- питомий опір ґрунту обчислюється автоматично за методом Венера (Venner) або Шлюмберже (Schlumberger) відразу після введення відстані між електродами.



а)



б)



в)

Рис. 1.36. Вимірювачі опору заземлення: а) М416;б) Ф4103–М1; в) Metrel SMARTEC Earth/Clamp (MI 3123)



Рис. 1.37. Вимірювач опору заземлення і питомого опору ґрунту С.А.6470

Прилад призначений для робіт в польових умовах, для чого поміщений у міцний, вологонепроникний, компактний і зручний корпус. Результати вимірювань відображаються на великому РК-дисплеї з підсвічуванням. Прилад живиться від внутрішнього акумулятора, який заряджають через зовнішній зарядний пристрій від побутової електромережі або прикурювача автомобіля. Тестер дозволяє впорядковано запам'ятовувати результати вимірювань і має вихід для експорту даних і подальшої обробки.

Для зручності виводи приладу для підключення чотирьох штирів позначені різними кольорами. Штирі й дроти також забарвлені у відповідні кольори. Є сумка для перенесення, у відсіки якої поміщаються прилад і все приладдя.

Вимірювач опору заземлення із вбудованим мультиметром DT–5300 (рис. 1.38 а) призначений для контролю заземлювальних кіл, а також може бути використаний для вимірювання опору та напруги постійного/змінного струму.

Технічні характеристики приладу наведені в табл. 1.11.

1.11. Технічні характеристики вимірювача опору заземлення із вбудованим мультиметром DT–5300

Показник	Значення показника
Діапазон вимірювання опору землі, Ом	0–1000
Частота випробувального струму, Гц	300
Діапазон вимірювання опору, кОм	0–200
Діапазон вимірювання напруги, В:	
– змінного струму	0–1000
– постійного струму	0–750
Автоматичне вимкнення	після 15 хв бездіяльності
Живлення	6 елементів типу АА

Мікропроцесорні вимірювачі MRU–100 та MRU–101 (рис. 1.38 б) призначені для вимірювання опору заземлення і питомого опору ґрунту. У приладах застосований технічний метод вимірювання опору заземлення: вимірюється напруга на затискачах приладу після створення вимірювального струму, а потім вимірювач обчислює значення опору.

Вимірювання також можуть проводитися чотирьополісним методом, що дає змогу значно обмежити вплив опору проводів на результат вимірювання. Якщо вимірювання відноситься до багатократного заземлення, то за допомогою кліщів вимірюється струм, що протікає через досліджуваний елемент заземлення (без роз'єднання вимірювального кола).

Функціональні можливості приладів наведені в табл. 1.12.



а



б

Рис. 1.38. Вимірювач опору заземлення із вбудованим мультиметром DT-5300 (а) і мікропроцесорні вимірювачі MRU-100 і MRU-101 (б)

1.12. Функціональні можливості мікропроцесорних вимірювачів MRU-100 та MRU-101

Найменування	MRU-100	MRU-101
Вимірювання опору заземлення три- й чотирьополосним методом	+	+
Вимірювання питомого опору ґрунту методом Веннера з можливістю вибору відстані між вимірювальними електродами (автоматичний розрахунок та індикація питомого опору в омах)	+	+
Можливість вимірювань багатократних заземлень триполосним методом без роз'єднання вимірюваних заземлювачів (із застосуванням вимірювальних кліщів)	+	+
Контроль умов вимірювання (наявність напруги завад, вплив опору вимірювальних електродів і стану батарей)	+	+
Автоматичний вибір діапазону вимірювань	+	+
Великий рідкокристалічний дисплей з можливістю підсвічування	+	+
Сигналізація ступеня заряду батареї	+	+
Висока стійкість до напруги завад	+	+

Продовження таблиці 1.12

Автоматичне вимкнення приладу у випадку перерви в роботі (AUTO OFF)	+	+
Запам'ятовування 300 результатів вимірювань і можливість передавання записаних у пам'яті даних до комп'ютера		+
Вбудований пристрій заряджання акумулятора		+

Джерело живлення: а) пакет акумуляторів NiCd SONEЛ;
 б) 5 лужних (алкалінових) батарей R14.

Стандарт інтерфейсу – RS 232.

Маса приладу, кг:

- MRU–100 з батареями – 1,6;
- MRU–101 з акумуляторами – 1,7.

Габарити, мм – 295 x 222 x 95.

Вимірювачі опору заземлення Fluke серії 1620 GEO (рис. 1.39 а) є тестерами для перевірки заземлення, за допомогою яких можна виконувати вимірювання опору заземлювальних пристроїв за всіма всіма чотирма методами:

1) *методом падіння напруги* на 3 й 4 електродах – стандартний спосіб вимірювання опору заземлення з використанням двох заземлюючих електродів;

2) *методом чотириполюсного вимірювання опору ґрунту*: опір ґрунту визначається за допомогою чотирьох заземлюючих електродів;

3) *методом вибіркового вимірювання* – заземлюючі стержні не від'єднуються, фахівець може виміряти опір заземлення, використовуючи поєднання стержнів і струмових кліщів;

4) *методом безелектродного вимірювання* – нове рішення для вимірювання опору заземлювального пристрою, у якому замість заземлюючих електродів використовуються лише кліщі.

Модель Fluke 1625 має також новітні функції:

- автоматичне регулювання частоти (AFC) – визначає існуючі перешкоди й підбирає частоту для зниження їх дії, забезпечуючи точне значення опору заземлювального пристрою;

- режим R* – призначений для розрахунку повного опору заземлення на частоті 55 Гц, щоб визначити величину опору під час короткого замикання на землю;

- регулювання меж вимірювання для швидкої перевірки результатів.

Вимірювач опору заземлення ИС–10 (рис. 1.39 б) забезпечує:

- вимірювання опору елементів заземлення трьох- або чотирипровідним методом;
- вимірювання опору металозв'язку струмом понад 200 мА за опору від 1 мОм (дозвіл 1 мОм);
- вимірювання змінного струму частотою 50 Гц (за комплектації кліщами КТИ–10);
- визначення цілісності захисних провідників;
- обчислення питомого опору ґрунту в Ом/м;
- якісне оцінювання стану одиничних заземлювачів у багатоелементному заземленні шляхом визначення процентного розподілу струмів між елементами без розриву кола заземлювачів.

Особливостями приладу є:

- мікропроцесорне керування;
- автоматичний вибір діапазонів вимірювань;
- можливість калібрування приладу на опір вимірювальних провідників довільної довжини під час вимірювання за двопровідною схемою;
- високоінформативний рідкокристалічний дисплей,
- вбудована пам'ять на 40 вимірювань;
- автоматичне відключення живлення;
- індикація стану внутрішнього джерела живлення;
- система захисту акумулятора від перезаряджання;
- захист від неправильного включення;
- удароміцний, пило- й вологозахищений корпус (IP42).



Рис 1.39. Вимірювачі опору заземлення:
а) Fluke серії 1620 GEO; б) ИС–10

Портативний тестер опору заземлення Fluke 1621 (рис. 1.40) для мобільного застосування призначений для вимірювання опору заземлювальних пристроїв, включаючи триполюсний метод вимірювання падіння напруги й двополюсний метод вимірювання опору.

Особливостями приладу є:

- простота отримання результатів вимірювань натисненням однієї кнопки;
- підвищена точність вимірювань, завдяки функції автоматичного виявлення напруги «шумів»;
- сигналізація небезпечної напруги підвищує міру захисту користувача;
- чітка індикація і реєстрація показів на великому РК-дисплеї з підсвічуванням;
- попереджувальна сигналізація під час перевищення граничних значень вимірюваного параметра, що встановлюються користувачем;
- міцна конструкція і захисний чохол для використання у важких робочих умовах;
- зручні розміри й портативність.



Рис. 1.40. Портативний тестер опору заземлення Fluke 1621

Вимірювальний комплекс ГИК-1 для визначення імпульсного опору контурів заземлення (рис. 1.41 а) призначений для виконання таких операцій:

- тестування систем блискавкозахисту об'єктів (вимірювання розподілу потенціалів і струмів);
- вимірювання опору розтікання струму заземлювальних пристроїв опор ліній електропередавання і блискавковідводів без урахування комунікацій, що відходять.

Комплекс забезпечує проведення вимірювань з метою визначення імпульсного опору контурів заземлення опор

високовольтних ліній електропередавання і блискавковідводів, що стоять окремо. Він є переносним устаткуванням, яке генерує імпульси напруги аперіодичної форми із заданими амплітудно-часовими параметрами й вимірює амплітудні значення імпульсів напруги та струму на об'єктах випробувань.

Комплекс ГИК–1 обладнаний блоком автономного живлення. Основні технічні характеристики комплексу наведені в табл. 1.13.

1.13. Технічні характеристики вимірювального комплексу ГИК–1 для визначення імпульсного опору контурів заземлення

Показник	Значення показника
Форма імпульсу напруги, що генерується	аперіодична
Тривалість фронту імпульсів напруги, що генеруються, мкс у режимі неробочого ходу (за рівнями 0,1–0,9 від амплітуди)	2,5 ± 0,5; 4 ± 0,6; 8 ± 0,8
Тривалість фронту імпульсів напруги, що генеруються, мкс у режимі неробочого ходу (за рівнем 0,5 від амплітуди)	20 ± 4
Полярність імпульсів напруги, що генеруються	позитивна
Максимальна амплітуда імпульсів напруги, що генеруються (В) в режимі неробочого ходу: – під час живлення від мережі – під час живлення від автономного блока живлення	220± 22 220
Верхня межа вимірювання амплітуди імпульсів струму, що генеруються в зовнішньому індуктивному навантаженні з імпедансом не менше 25 Ом, А	10
Приведена похибка вимірювання амплітуди імпульсів струму за температури 22 ± 5 °С, %, не більше	10
Діапазони вимірювання амплітуд імпульсів напруги, В – діапазон 20 – діапазон 200	Від 1 до 19,99 від 20 до 199,9
Приведена похибка вимірювання амплітуди імпульсів напруги за температури 22± 5 °С, %, не більше	15
Час встановлення показів під час вимірювання амплітуди імпульсів напруги й струму, с, не більше	5
Температурна нестабільність відношення виміряної амплітуди імпульсів напруги до виміряної амплітуди імпульсів струму в робочому діапазоні температур, %, не більше	3
Живлення	від мережі напругою 220В, частотою 50 Гц; від блока автономного живлення, напругою 12 В
Споживана потужність, ВА, не більше	12
Кількість акумуляторів, шт.	2

Вимірювальний комплекс КДЗ–2 для діагностування якості контурів заземлення (рис. 1.41 б) призначений для виконання таких операцій:

- вимірювання напруги й струмів номінальною частотою 50 Гц, а також для вимірювання й розрахунку основних характеристик заземлювальних пристроїв (ЗП):
- вимірювання опору металевого зв'язку устаткування із ЗП;
- вимірювання питомого опору ґрунту за методом ВЕЗ;
- вимірювання опору розтікання струму;
- вимірювання напруги дотику;
- вимірювання розподілу напруги й струму заземлювальним пристроєм при імітації короткого замикання.

Сфера застосування – заземлювальні пристрої в електроустановках напругою до й вище 1кВ.

Селективний вольтамперметр для контролю і діагностування заземлювальних пристроїв КДЗ–2 є переносним приладом, зібраним у діелектричному пластиковому корпусі й містить дві лати друкованого монтажу як основні вузли. На верхній панелі комплексу розташовані рідкокристалічний індикатор, плівкова клавіатура, клавішний перемикач діапазонів струму, два движкові перемикачі живлення і підсвічування шкали. На одній з торцевих частин корпусу розташовані вхідні гнізда підключення вимірюваної напруги й струму та перемикач режиму вхідного кола. На іншій торцевій частині розташовані роз'єм для підключення RS–232, гніздо підключення мережевого адаптера для заряджання акумуляторної батареї і запобіжник у колі вимірювання струму. На нижній стороні панелі корпусу є відсік з кришкою, що закривається, для розміщення чотирьох акумуляторів.

Комплекс КДЗ–2 виконаний за одноканальною схемою з комутатором. Вихід каналу підключений до АЦП, що має у своєму складі вибірковий смуговий фільтр на частоту 57 Гц, режекторний фільтр на частоту 50 Гц і схеми масштабування. Керування роботою каналу вимірювання, розрахунок параметрів, зберігання результатів і керування індикатором здійснюються вбудованим мікроконтролером.

Селективний вольтамперметр КДЗ–2 може бути підключений до персонального комп'ютера через кабель RS–232 для передавання даних. Живлення комплексу КДЗ–2 здійснюється від чотирьох вбудованих акумуляторів номінальною напругою 1,2 В. Ємність акумуляторів забезпечує роботу КДЗ–2 без підсвічування шкали протягом 16 годин. Метрологічні характеристики селективного вольтамперметра КДЗ–2 наведені в табл. 1.14.

1.14. Метрологічні характеристики КДЗ–2

Вимірювана величина	Діапазон вимірювань
Напруга змінного струму частотою (50 ± 0,5) Гц	(1,00–5,00) мВ
	(5,00–50,0) мВ
	(5,00–40,0) В
	(50,0–500) мВ
Сила змінного струму частотою (50 ± 0,5) Гц	500 мВ – 5,00 В
	(1,00–5,00) мА
	500 мА – 5 А
	(5,00–50,0) мА
	(50,0–500) мА

Межі значень додаткових температурних похибок, що допускаються, у робочих умовах застосування складають 0,5 межі основних допустимих похибок.



а)



б)

Рис. 1.41. Вимірювальний комплекс ГИК–1 для визначення імпульсного опору контурів заземлення (а) і вимірювальний комплекс КДЗ–2 для діагностування якості контурів заземлення (б)

Загальні технічні характеристики є наступними:

- тривалість одного вимірювання струму й напруги, математичної обробки даних і виведення на індикацію – не більше 10 с;
- вхідний опір каналу вимірювання напруги – не менше 1 МОм;

- вхідний опір каналу вимірювання струму на межі (1–50) мА – не більше 5 Ом;
 - вхідний опір каналу вимірювання струму на межі 50 мА – 5 А – не більше 0,05 Ом мА;
 - діапазон обчислюваних опорів, що виводяться на індикатор – $0,1-4 \cdot 10^4$ Ом.
- Маса приладу – 12,0 кг. Габарити КДЗ–2 – 185 x 135 x 65 мм.
Середній термін служби – не менше 5 років.

1.6. Діагностування технічного стану електрообладнання з використанням системи «ДІАГНОСТИКА +»

Система «Діагностика+» складається з двох основних підсистем: паспортизації й експертизи.

Підсистема паспортизації дозволяє налаштуватися на інфраструктуру підприємства за допомогою ієрархічного відображення зв'язків між окремими його об'єктами. У ній же забезпечуються введення і збереження основних даних обладнання (паспортних даних, результатів випробувань тощо), формування різних запитів, виведення графічних залежностей та інші маніпуляції з інформацією.

Підсистема експертизи містить базу знань і, так названу, «машину виведення». У базі знань зосереджуються відомості з чинних нормативних документів, а також інформація з досвіду кваліфікованих фахівців. Для формалізації цієї інформації розроблена спеціалізована мова Z+, доступна для розуміння і практичного використання користувачем системи «Діагностика+». Призначення машини виведення полягає у формуванні з наявного набору правил (їх кількість для окремих видів устаткування сягає кількох сотень) конкретного алгоритму, вид якого ще визначається вихідними даними.

Реалізація сформованого алгоритму завершується виведенням відповідного протоколу, у якому містяться основні відомості про випробовуваний об'єкт і проведені випробування, а також оцінка стану об'єкта й рекомендації щодо його подальшої експлуатації.

Система «Діагностика+» дозволяє:

- зберігати паспортні дані устаткування, результати вимірювань і випробувань, а також дані про всі істотні події у «житті» об'єкта;
- забезпечувати швидкий пошук актуальної інформації в базах даних за запитом користувачів;

- проводити оцінку стану функціонуючого електроустаткування на основі результатів вимірювань і випробувань (за даними конкретного випробування або комплексну оцінку за всіма наявними даними);

- видавати рекомендації щодо подальшої експлуатації об'єкта, а також щодо складу й термінів проведення наступних вимірювань і випробувань;

- протоколювати результати випробувань і запропоновані рекомендації;

- графічно інтерпретувати «історію життя» об'єкта, а також динаміку зміни стану об'єкта й контрольованих параметрів;

- формувати й додавати в базу знань нові правила, підвищуючи тим самим «рівень інтелектуальності» системи.

Для оцінки стану силових трансформаторів, автотрансформаторів і масляних реакторів використовуються такі випробування:

- хроматографічний аналіз газів, розчинених у трансформаторному маслі;

- вимірювання втрат неробочого ходу;

- вимірювання втрат короткого замикання;

- випробування трансформаторного масла;

- вимірювання опору ізоляції;

- вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ізоляції обмоток;

- вимірювання опору обмоток постійному струму;

- випробування ізоляції разом із вводами підвищеною напругою промислової частоти;

- перевірка групи з'єднання обмоток;

- перевірка коефіцієнта трансформації;

- тепловізійний контроль стану трансформатора;

- оцінка стану паперової ізоляції за наявністю фуранових з'єднань у трансформаторному маслі;

- періодичний і позачерговий огляд;

- визначення вмісту кисню в азотній подушці.

Програмний комплекс «Діагностика+» дозволяє:

- зберігати паспортні дані устаткування, дані вимірів і випробувань, а також дані про всі істотні події у «житті» об'єкта (рис.1.32);

- забезпечувати швидкий пошук актуальної інформації в базах даних за запитом користувачів;

- проводити оцінку стану функціонуючого електроустаткування на основі результатів різних випробувань і вимірів (за даними конкретного випробування або комплексну оцінку за всіма наявними даними);
- видавати рекомендації щодо подальшої експлуатації об'єкта, а також щодо складу й термінам проведення наступних випробувань і вимірів;
- протоколювати результати випробувань і запропоновані рекомендації;
- графічно інтерпретувати «історію життя» об'єкта, а також динаміку зміни стану об'єкта й контрольованих параметрів;
- формувати й додавати в базу знань нові правила, підвищуючи тим самим «рівень інтелектуальності» системи;
- використовувати альтернативні методики випробувань під час оцінки стану об'єкта (зокрема ХАРГ);
- виводити на друк паспортні дані устаткування, журнали відключень із зазначенням причин тощо;
- формувати зведений протокол за конкретними випробуваннями протягом вказаного часу;
- формувати комплексний протокол за всіма видами випробувань;
- планувати проведення ремонтів і протоколювати їх зміст;
- контролювати регламентні заходи: заміну комплектуючих і силікагелю, доливання і змішування масла тощо;
- визначати граничні значення контрольованих параметрів на основі статистичної обробки результатів.

Для оцінки стану електротехнічного обладнання використовується перелік випробувань, наведений в табл. 1.15.

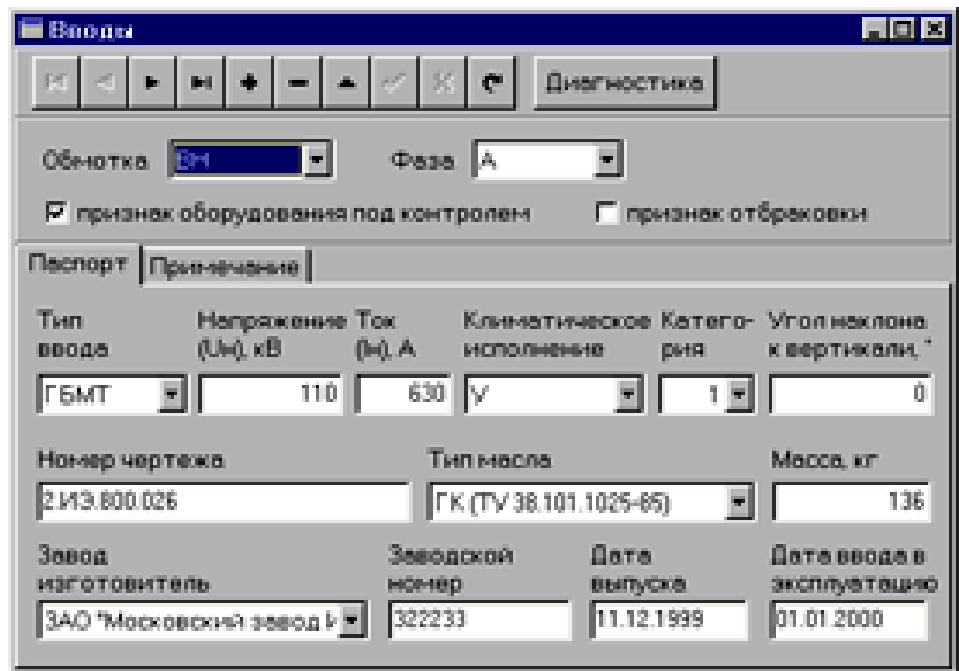
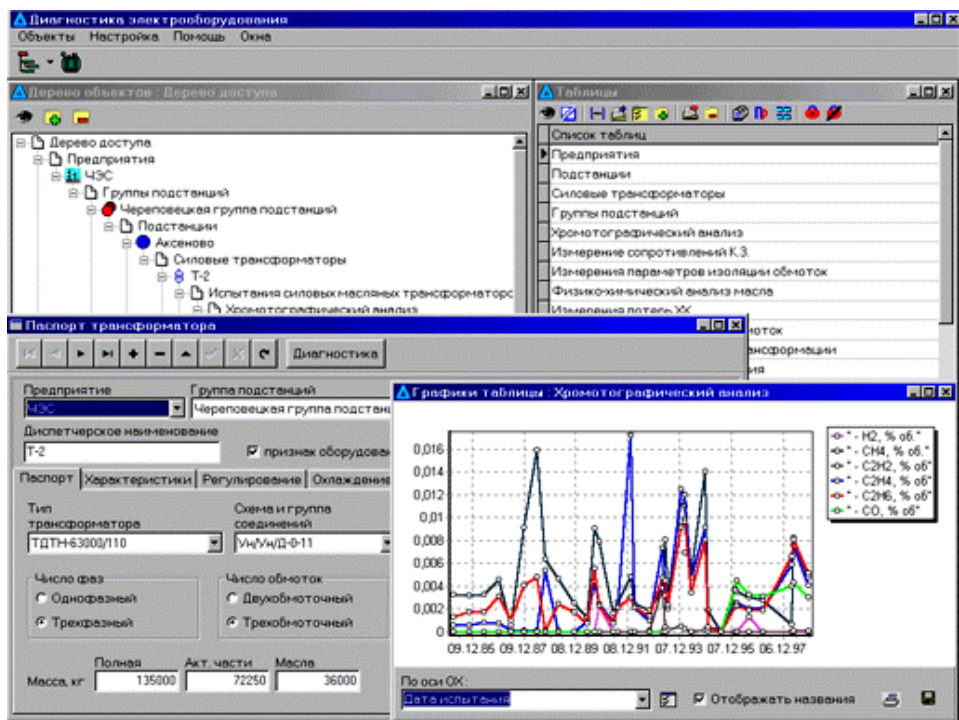


Рис. 1.32. Вікна програмного комплексу «Диагностика+» з накопиченою інформацією про електроустаткування (приклад)

1.15. Перелік випробувань електротехнічного обладнання за системою «Диагностика+»

**Силові трансформатори,
автотрансформатори,
масляні реактори**

- хроматографічний аналіз газів, розчинених у маслі;
- вимірювання втрат холостого ходу; вимірювання опору короткого замикання;
- випробування трансформаторного масла;
- вимірювання опору ізоляції;
- вимірювання тангенса кута діелектричних втрат ізоляції обмоток;
- вимірювання опору обмоток постійному струму;
- випробування ізоляції разом із введеннями підвищеною напругою частоти 50 Гц;
- перевірка групи з'єднання обмоток; перевірка коефіцієнта трансформації;
- тепловізійний контроль стану трансформатора;
- оцінка стану паперової ізоляції за наявності фуранових з'єднань у маслі;
- періодичний і позачерговий огляд;
- визначення вмісту кисню в азотній подушці

The screenshot shows a software window titled "Силовые трансформаторы" with a standard Windows-style title bar and navigation icons. The main area contains a form with the following fields and sections:

- Подстанция:** Центральная ГПП-500
- Присоединение:** AT-2
- Диспетчерское наименование:** AT-2
- Состояние:** Пригодно
- Статус:** В работе
- Паспорт:** AT ДЦТН-125000/220/110
- Схема и группа соединения:** Ун/авто/Д-0-11
- Климатическое исполнение:** УХЛ
- Категория:** 1
- Завод изготовитель:** ЗТЗ
- Заводской номер:** 156804
- Дата выпуска:** 01.01.01
- Дата ввода:** 13.05.02
- Число фаз:** однофазный, трехфазный
- Число обмоток:** двухобмоточный, трехобмоточный
- Даты проведения:**

испытания	последнего	очередного
ремонта		
- Масса, кг:**

полная	активн. части	масла

Трансформатори струму

- вимірювання опору ізоляції;
- вимірювання $\text{tg } \delta$ ізоляції;
- випробування ізоляції підвищеною напругою;
- вимірювання опору обмоток постійному струму;
- знімання характеристик намагнічування;
- вимірювання коефіцієнта трансформації;
- випробування трансформаторного масла;
- тепловізійний контроль;
- вимірювання похибок.

Трансформаторы тока

Подстанция: Агадырь-500
 Присоединение: 2ВВ-530-500
 Диспетчерское наименование: ТТ-500кВ '2ВВ-530'-А
 Состояние: [dropdown]
 Статус: В работе

Паспорт | Характеристики | Вторичная нагрузка | Эксплуатационная документация | Примечание

Тип: [dropdown] Фаза: А Заводской номер: 3324 Завод изготовитель: 33ВА
 Дата выпуска: 01.01.1982
 Марка масла: [dropdown] Дата ввода в эксплуатацию: [dropdown]
 Масса масла, кг: [input] Дата испытания: [input] последнего: [input] очередного: [input]
 Общая масса, кг: [input] Дата ремонта: [input] [input]

Трансформатори напруги

- вимірювання опору ізоляції;
- випробування ізоляції підвищеною напругою частоти 50 Гц;
- вимірювання опору обмоток постійному струму;
- випробування трансформаторного масла;
- вимірювання струму та втрат неодруженого струму;
- тепловізійний контроль.

Трансформаторы напряжения

Подстанция: Агадырь-500 | Присоединение: АТ-3 | Диспетчерское наименование: ТН-110кВ АТ-3

Состояние: | Работа: В работе | Признак отбраковки | Под контролем

Паспорт | Характеристики | Эксплуатационная документация | Примечание

Тип: НКФ-110-57 У1 | Фаза: А | Заводской номер: 38354

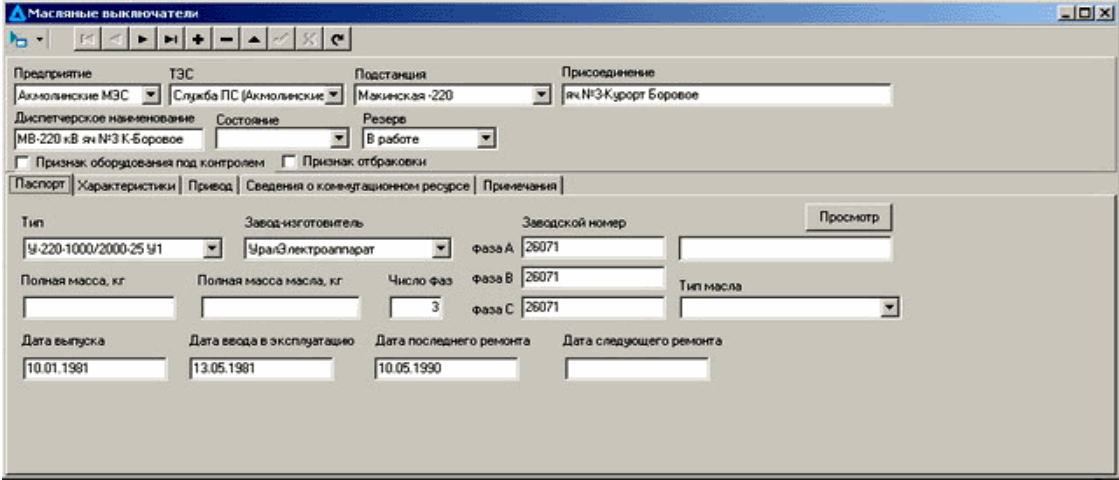
Завод изготовитель: ЗЗВА | Дата выпуска: 01.01.1987

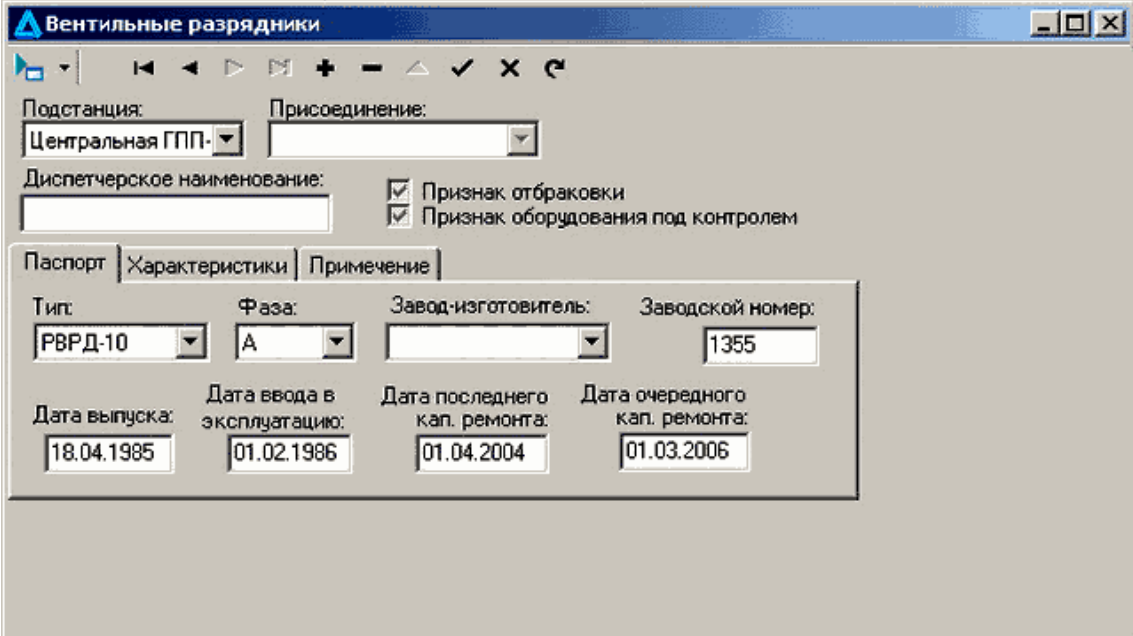
Число блоков: | Дата ввода в эксплуатацию: |

Марка масла: | Дата испытания: | последнего: | очередного:

Масса масла, кг: | Дата ремонта: |

Полная масса, кг: |

<p>Масляні вимикачі</p>	<ul style="list-style-type: none"> – вимірювання опору ізоляції; – випробування ізоляції підвищеною напругою частоти 50 Гц; – вимірювання опору постійному струму; – вимірювання швидкісних і тимчасових характеристик; – вимірювання ходу рухомих частин, втискування контактів під час увімкнення, одночасного замикання й розмикання контактів; – випробування трансформаторного масла; – тепловізійний контроль. 
<p>Елегазові вимикачі</p>	<ul style="list-style-type: none"> – випробування ізоляції вторинних ланцюгів і обмоток електромагнітів управління; – вимірювання опору постійному струму; – перевірка мінімальної напруги спрацьовування; – перевірка характеристик; – перевірка вмісту вологи в елегазі; – тепловізійний контроль.

Вакуумні вимикачі	<ul style="list-style-type: none"> – випробування ізоляції підвищеною напругою частоти 50 Гц; – вимірювання опору струмовідного контуру; – вимірювання часових характеристик; – вимірювання ходу рухомих частин та одночасності замикання контактів; – тепловізійний контроль.
Вентильні розрядники	<ul style="list-style-type: none"> – вимірювання опору; – вимірювання струму провідності за випрямленої напруги; – вимірювання пробивної напруги; – тепловізійний контроль. 

Обмежувачі перенапруг

- вимірювання опорів;
- вимірювання струму провідності;
- тепловізійний контроль.

Ограничители перенапряжения

Подстанция: Metallurgicheskaya-220 Присоединение: AT-2

Диспетчерское наименование: Признак оборудования под контролем
 Признак отбраковки

Паспорт Характеристики Примечание

Номинальное напряжение, кВ: Амплитуда расчетного тока коммутационного перенапряжения (1,2/2,5 мс), А:

Наибольшее рабочее напряжение, кВ:

Напряжение 50 Гц на ограничителе, кВ, допустимое в течение: 20 мин. 20 с. 3,5 с. 1 с. 0,15 с. 0,05 с. Длина пути утечки внешней изоляции, см:

Остающееся напряжение, кВ, при импульсном токе с фронтом 8 мкс с амплитудой: 3000 А 5000 А 7000 А 10000 А 15000 А 30000 А Масса, кг: Высота, см:

Високовольтні вводи

- вимірювання параметрів ізоляції під робочою напругою;
- вимірювання параметрів ізоляції на відключеному введенні;
- випробування підвищеною напругою частоти 50 Гц;
- хроматографічний аналіз масла;
- випробування масла;
- тепловізійний контроль.

The screenshot shows a software window titled "Трансформаторный ввод" (Transformer Input) with the following fields and values:

Трансформатор		Обмотка	Фаза		
ΔТ-З, фА		ВН	А		
Состояние		Резерв			
		В работе			
Характеристики		Примечание			
Тип ввода	Напряжение (Un), кВ	Ток (In), А	Климатическое исполнение	Категория размещения	Максимальный угол наклона к вертикали, °
БМТ	500	600			
Заводской номер	Завод изготовитель	Дата изготовления	Дата ввода		
С16495	ЗАО "Московский завод Изолятор"	27.06.69	28.04.05		
Тип масла	Номер чертежа	Масса ввода, кг	Масса бака, кг		
Т-750*	2.ИЗ.800.011.	3116			
Расстояние от манометра до крышки бака, м				Угол наклона к вертикали, °	
				15	

Акумуляторні батареї

- перевірка щільності електроліту;
- вимірювання напруги елементів батареї;
- хімічний аналіз електроліту;
- вимірювання опору ізоляції батареї;
- вимірювання висоти осаду в елементах.

Паспортные данные

Подстанция: Макинская -220

Диспетчерское наименование: []

Данные аккумулятора | Примечания

Дата ввода в эксплуатацию: 03.11.04	Дата выпуска: 03.11.04
Дата последнего ремонта: 12.12.2012	Дата очередного ремонта: 12.12.2000
Заводской номер: 6545646	Завод изготовитель: 1187549
Тип наполнителя ак-ра: Серная кислота	Состояние: Под контролем
Количество банок: 20	Присоединение: []
Название предприятия: Фирма	Резерв: В работе

**Асинхронні
електродвигуни**

- вимірювання опору ізоляції обмоток;
- випробування підвищеною напругою промислової частоти обмоток;
- вимірювання опору постійному струму обмоток;
- вимірювання зазорів у підшипниках ковзання;
- вимірювання вібрації в підшипниках ковзання;
- вимірювання розгону ротора;
- гідравлічні випробування повітроохолоджувача;
- перевірка справності стрижнів короткозамкненого ротора.

Асинхронные двигатели

Подстанция: Присоединение: Диспетчерское наименование:

Резерв: Состояние оборудования:

Паспорт | Характеристики | Эксплуатационная документация | Примечание

Тип (серия): Заводской номер: Инвентарный номер:

Дата выпуска: Завод изготовитель:

Дата ввода в эксплуатацию:

Дата испытания: Последнего: Очередного:

Дата ремонта: Очередного:

1.7. Пересувні електротехнічні лабораторії для діагностування електрообладнання систем електропостачання

1.7.1. Пересувна лабораторія для діагностування силових трансформаторів «МЕГА-СЕРИЯ–1»

Пересувна електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–1» (рис. 1.43) призначена для проведення повного комплексу робіт з діагностування силових трансформаторів, вимірювання діелектричних характеристик ізоляції трансформатора й високовольтних введень і вимірювання параметрів масла.

Основні функції лабораторії:

- вимірювання опору ізоляції обмоток і введень силових трансформаторів;
- вимірювання діелектричних характеристик ізоляції обмоток і введень силових трансформаторів;
- вимірювання опору обмоток силових трансформаторів постійному струму;
- вимірювання втрат холостого ходу силових трансформаторів;
- вимірювання опору короткого замикання силових трансформаторів;
- вимірювання коефіцієнта трансформації силових трансформаторів;
- випробування ізоляції обмоток трансформатора підвищеною напругою 50 Гц;
- випробування устаткування розподільних пристроїв підвищеною напругою 50 Гц.
- визначення пробивної напруги трансформаторного масла;
- вимірювання діелектричних характеристик трансформаторного масла;
- визначення вологовмісту трансформаторного масла;
- аналіз газів, розчинених в трансформаторному маслі.

Для обробки результатів вимірювань використовується персональний комп'ютер типу Notebook із спеціальним програмним забезпеченням, що реалізовує функції запису, обробки й зберігання результатів випробувань і діагностування з наданням протоколів вимірювань і діагностичною оцінкою міри дефектності високовольтного устаткування.

Під час виготовлення лабораторій використовуються такі типи шасі:

– автомобілі підвищеної прохідності: КАМАЗ, МАЗ, УРАЛ, ГАЗ–3308, SCANIA, IVECO Strali, Mercedes-Benz UNIMOG U 1150;

– суцільнометалеві фургони: ГАЗель2705 як стандартного виконання, так і з високим дахом, ГАЗ–2752 «Соболь», FORD Transit VAN, Volkswagen LT–35, Mercedes-Sprinter, Mercedes Vito, IVECO Daily, УАЗ–39629.

Фургон лабораторії конструкційно розділений на два відсіки: відсік оператора й апаратний відсік. Лабораторне устаткування виготовлене з термо-водостійкого матеріалу. Вбудовані системи життєзабезпечення дозволяють проводити роботи в автономному режимі в будь-яких природно-кліматичних умовах. У лабораторії забезпечені комфортні умови перевезення і перебування в польових умовах бригади фахівців.



Рис. 1.43. Пересувна електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-1»

Модифікації лабораторії:

1. «МЕГА-СЕРИЯ-1» *Transformer 70* пересувна лабораторія для діагностування силових трансформаторів номінальною напругою до 10 кВ.

Електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-1» призначена для проведення таких робіт:

- випробування силових кабелів високовольтного устаткування підвищеною напругою до 70 кВ змінного струму промислової частоти 50 Гц;
- вимірювання опору ізоляції мегаомметром напругою до 5000 В;
- вимірювання параметрів трансформаторів:
 - втрати холостого ходу;
 - втрати короткого замикання;
 - опір короткого замикання;
 - коефіцієнт трансформації;
 - вимірювання тангенса кута діелектричних втрат;
 - вимірювання опору обмоток постійному струму;
- вимірювання опору заземлювальних пристроїв;
- тестування вимикачів, контроль тимчасових і швидкісних характеристик високовольтних вимикачів;
- тестування акумуляторних батарей;
- безконтактні вимірювання температури струмовідних частин.

Устаткування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ-1» умовно підрозділяється на основне (вмонтоване) й додаткове (не вмонтоване). Компонування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ-1» дозволяє надалі забезпечувати розширення її функцій, замінювати застаріле устаткування на нове, а також в разі ремонту не виводити з роботи лабораторію в цілому, а ремонтувати по блочно.

2. «МЕГА-СЕРИЯ-1» *Transformer 150* – пересувна лабораторія для діагностування силових трансформаторів номінальною напругою до 35 кВ і вище.

Електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-1» призначена для проведення діагностування силових трансформаторів і розподільних пристроїв:

- випробування силових трансформаторів, високовольтного устаткування та апаратів підвищеною напругою промислової частоти до 100 кВ;
- вимірювання опору ізоляції, напругою до 5000 В;

- вимірювання параметрів трансформаторів:
 - втрати холостого ходу;
 - втрати короткого замикання;
 - опір короткого замикання;
 - коефіцієнт трансформації;
 - вимірювання тангенса кута діелектричних втрат;
 - вимірювання опору обмоток постійному струму;
 - вимірювання опору заземлюючих пристроїв;
- неконтактні вимірювання температури струмовідних частин;
- випробування трансформаторного масла на пробій;
- вимірювання тангенса діелектричних втрат і питомого опору трансформаторного масла;
- вимірювання вологовмісту в трансформаторному маслі;
- хроматографічний аналіз трансформаторного масла.

Устаткування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ–1» умовно підрозділяється на основне (вмонтоване) і додаткове (не вмонтоване). Компонування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ–1» дозволяє забезпечувати нарощування і розширення функцій лабораторії.

Лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–1» має автоматизовану систему управління процесами збирання кіл вимірювань, проведення випробувань та обробки результатів і забезпечує:

- управління випробуваннями підвищеною напругою;
- відображення на дисплеї пульта управління інформації про поточний стан системи з текстовими поясненнями;
- складання звітів і протоколів випробувань;
- зберігання даних про випробування і вимірювання;
- обмін інформацією через USB порт з периферійними пристроями.

1.7.2. Мобільна лабораторія для випробування і пошуку місць пошкоджень силових кабельних ліній «МЕГА-СЕРИЯ–2»

Пересувна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–2» (рис. 1.44) призначена для високовольтних випробувань силових кабельних ліній і устаткування розподільних пристроїв, а також для визначення місця пошкодження силових кабелів напругою до 10 кВ.

Основні функції:

- випробування ізоляції силових кабелів підвищеною напругою постійного струму з контролем струму витoku;

- випробування устаткування розподільних пристроїв підвищеною напругою 50 Гц;
- випробування кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену підвищеною напругою частотою 0,1 Гц;
- вимірювання опору ізоляції кабелю та устаткування розподільних пристроїв;
- пропалювання ізоляції кабелю;
- визначення місця пошкодження акустичним методом;
- визначення місця пошкодження електромагнітним методом;
- визначення місця пошкодження оболонки кабельної лінії;
- визначення траси кабельної лінії;
- визначення глибини прокладання кабельної лінії;
- визначення шуканого кабелю в пучку кабелів.

Для обробки результатів вимірювань використовується персональний комп'ютер типу Notebook із спеціальним програмним забезпеченням, що реалізовує функції запису, обробки й зберігання результатів випробувань і діагностування з наданням протоколів вимірювань і діагностичною оцінкою міри дефектності високовольтного устаткування.

Під час виготовлення лабораторій використовуються такі типи шасі:

- *автомобілі підвищеної прохідності*: КАМАЗ, МАЗ, УРАЛ, ГАЗ–3308, SCANIA, IVECO Strali, Mercedes-Benz UNIMOG U 1150;
- *суцільнометалеві фургони*: ГАЗель2705 як стандартного виконання, так і з високим дахом, ГАЗ–2752 «Соболь», FORD Transit VAN, Volkswagen LT–35, Mercedes-Sprinter, Mercedes Vito, IVECO Daily, УАЗ–39629.

Фургон лабораторії конструкційно розділений на два відсіки: відсік оператора й апаратний відсік. Лабораторне устаткування виготовлене з термо-водостійкого матеріалу. Вбудовані системи життєзабезпечення дозволяють проводити роботи в автономному режимі в будь-яких природно-кліматичних умовах. У лабораторії забезпечені комфортні умови перевезення і перебування в польових умовах бригади фахівців.

Модифікації лабораторій:

1. «МЕГА-СЕРИЯ–2» Compact 2000 пересувна лабораторія на базі компактних систем.

Електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–2» призначена для проведення таких робіт:

- випробування силових кабельних ліній підвищеною напругою постійного струму до 60 кВ;
- випробування силових кабельних ліній підвищеною напругою наднизької частоти 0,1 Гц до 40 кВ;
- вимірювання опору ізоляції, напругою до 5000 В;
- попереднє визначення місця пошкодження кабелю з використанням таких методів:
 - метод рефлектометрії TDR, 60 В;
 - імпульсно-дуговий ударний метод SIM, 16 кВ;
 - вдосконалений імпульсно-дуговий ударний метод SIM-MIM, 16кВ;
 - метод розв'язки по струму в ударному режимі SIM, 16 кВ;
 - точне визначення місця пошкодження кабельної лінії за допомогою ударного генератора й акустичного приладу пошуку місць пошкоджень з вимірюванням швидкості поширення електромагнітної хвилі й визначення відстані до місця пошкодження в метрах;
 - точне визначення місця пошкодження індукційним методом;
- визначення траси кабельної лінії;
- точне визначення місця пошкодження оболонки кабелю;
- селекція кабелю (визначення кабелю або жили з пучка).

Устаткування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ–2» Compact складається з компактного не вмонтованого устаткування. Компонування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ–2» дозволяє забезпечувати нарощування і розширення функцій лабораторії, застосовувати сучасні методи діагностування – вимірювання часткових розрядів із локалізацією джерела ЧР.

2. «МЕГА-СЕРИЯ–2» *TransCable 3000 System 70–3/S* – пересувна лабораторія для випробування і пошуку місць пошкодження високовольтних кабельних ліній номінальною напругою до 10 кВ.

Електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–2» *TransCable 3000 System 70–3/S* 3-х фазного виконання призначена для проведення таких робіт:

- випробування силових кабельних ліній підвищеною напругою постійного струму до 70 кВ;
- вимірювання опору ізоляції, напругою до 5000 В;



Рис. 1.44. Пересувна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-2»

- попереднє визначення місця пошкодження кабелю з використанням таких методів:
 - метод рефлектометрії TDR, 160 В;
 - імпульсно-дуговий ударний метод SIM, 32 кВ;
 - вдосконалений імпульсно-дуговий ударний метод SIM-MIM, 32 кВ;
 - метод розв'язки за струмом в ударному режимі SIM, 32 кВ;
 - метод затухаючих коливань, 70 кВ;
- точне визначення місця пошкодження кабельної лінії за допомогою ударного генератора й акустичного приладу пошуку місць пошкоджень з виміром швидкості поширення електромагнітної хвилі й вказівки відстані до місця пошкодження в метрах;
- точне визначення місця пошкодження індукційним методом.
- визначення траси кабельної лінії;

- точне визначення місця пошкодження оболонки кабелю;
- селекція кабелю (визначення кабелю або жили з пучка).

Устаткування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ-2» умовно підрозділяється на основне (вмонтоване) і додаткове (не вмонтоване). Компонування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ-2» дозволяє забезпечувати нарощування і розширення її функцій, застосовувати сучасні методи діагностування – вимірювання тангенса діелектричних втрат і часткових розрядів з локалізацією джерела часткових розрядів.

Лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-2» має автоматизовану систему управління процесами збирання кіл вимірювань, проведення випробувань та обробки результатів і забезпечує:

- підключення до об'єкта виміру одночасно до трьох фаз;
- перемикання з фази на фазу з місця оператора;
- управління випробуваннями підвищеною напругою;
- вибір методів визначення місць пошкодження кабельних ліній;
- управління процесами пошуку місць пошкодження кабельних ліній;
- відображення на дисплеї пульта управління інформації про поточний стан системи з текстовими поясненнями;
- складання звітів і протоколів випробувань;
- зберігання даних про випробування і виміри;
- обмін інформацією через USB порт з периферійними пристроями.

3. «МЕГА-СЕРИЯ-2» *TransCable 3000 System 150-1/S* пересувна лабораторія для випробування і пошуку місць пошкодження високовольтних кабельних ліній номінальною напругою до 35 кВ і вище.

Електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-2» призначена для проведення таких робіт:

- випробування силових кабельних ліній підвищеною напругою постійного струму до 150 кВ;
- вимірювання опору ізоляції, напругою до 5000 В;
- попереднє визначення місця пошкодження кабелю з використанням різних методів, а саме:
 - метод рефлектметрії TDR, 160 В;
 - імпульсно-дуговий ударний метод SIM, 32 кВ;
 - вдосконалений імпульсно-дуговий ударний метод SIM-MIM, 32 кВ;

- метод розв'язки по струму в ударному режимі SIM, 32 кВ;
- метод затухаючих коливань, 150 кВ;
- точне визначення місця пошкодження кабельної лінії за допомогою ударного генератора й акустичного приладу пошуку місць пошкоджень з виміром швидкості поширення електромагнітної хвилі і вказівки відстані до місця пошкодження в метрах;
 - точне визначення місця пошкодження індукційним методом;
 - визначення траси кабельної лінії;
 - точне визначення місця пошкодження оболонки кабелю;
 - селекція кабелю (визначення кабелю або жили з пучка).

Устаткування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ–2» умовно підрозділяється на основне (вмонтоване) і додаткове (не вмонтоване). Компонування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ–2» дозволяє забезпечувати нарощування і розширення функцій лабораторії, застосовувати сучасні методи діагностики – вимірювання тангенса діелектричних втрат і часткових розрядів з локалізацією джерела часткових розрядів.

Лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–2» має автоматизовану систему управління процесами збирання кіл вимірювань, проведення випробувань та обробки результатів і забезпечує:

- управління випробуваннями підвищеною напругою;
- вибір методів визначення місць пошкодження кабельних ліній;
- управління процесами пошуку місць пошкодження кабельних ліній;
- відображення на дисплеї пульта управління інформації про поточний стан системи з текстовими поясненнями;
- складання звітів і протоколів випробувань;
- зберігання даних про випробування і виміри;
- обмін інформацією через USB порт з периферійними пристроями.

4. «МЕГА-СЕРИЯ–2» *TransCable 3000 System PHG–3/S* – пересувна лабораторія для випробування, діагностування і пошуку місць пошкодження високовольтних кабельних ліній, у тому числі з ізоляцією із зшитого поліетилену.

Електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–2» *TransCable 3000 System PHG–3/S* 3-х фазного виконання призначена для проведення таких робіт:

- випробування силових кабельних ліній підвищеною напругою постійного струму до 80 кВ;
- випробування силових кабельних ліній підвищеною напругою синусоїдальною формою хвилі наднизької частоти 0,1 Гц до 57 кВ;
- випробування силових кабельних ліній підвищеною напругою косинусно-прямокутною формою хвилі наднизької частоти 0,1 Гц до 80 кВ;
- вимірювання опору ізоляції, напругою до 5000 В;
- попереднє визначення місця пошкодження кабелю з використанням наступних методів:
 - метод рефлектметрії TDR, 160 В;
 - імпульсно-дуговий ударний метод SIM, 32 кВ;
 - вдосконалений імпульсно-дуговий ударний метод SIM-MIM, 32 кВ;
 - метод розв'язки по струму в ударному режимі SIM, 32 кВ;
 - метод затухаючих коливань, 80 кВ;
 - точне визначення місця пошкодження кабельної лінії за допомогою ударного генератора й акустичного приладу пошуку місць пошкоджень з виміром швидкості поширення електромагнітної хвилі й вказівки відстані до місця пошкодження в метрах;
 - точне визначення місця пошкодження індукційним методом;
 - визначення траси кабельної лінії;
 - точне визначення місця пошкодження оболонки кабелю;
 - селекція кабелю (визначення кабелю або жили з пучка).

Устаткування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ-2» умовно підрозділяється на основне (вмонтоване) і додаткове (не вмонтоване). Компонування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ-2» дозволяє забезпечувати нарощування і розширення функцій лабораторії, застосовувати сучасні методи діагностування – вимірювання тангенса діелектричних втрат і часткових розрядів з локалізацією джерела часткових розрядів.

Лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-2» має автоматизовану систему управління процесами збирання кіл вимірювань, проведення випробувань та обробки результатів і забезпечує:

- підключення до об'єкта виміру одночасно до трьох фаз;
- перемикання з фази на фазу з місця оператора;
- управління випробуваннями підвищеною напругою;

- вибір методів визначення місць пошкодження кабельних ліній;
- управління процесами пошуку місць пошкодження кабельних ліній;
- відображення на дисплеї пульта управління інформації про поточний стан системи з текстовими поясненнями;
- складання звітів і протоколів випробувань;
- зберігання даних про випробування і виміри;
- обмін інформацією через USB порт з периферійними пристроями.

1.7.3. Пересувна лабораторія для діагностування високовольтних вимикачів та акумуляторних батарей «МЕГА-СЕРИЯ-3»

Пересувна електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-3» (рис. 1.45) призначена для проведення діагностичних робіт, оцінювання залишкового ресурсу високовольтних вимикачів і для тестування акумуляторних батарей.



Рис. 1.45. Пересувна електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-3»

Основні функції:

- вимірювання тимчасових характеристик вимикачів за різних рівнів напруги на електромагнітах увімкнення і вимкнення;
- оцінка наявності вакууму в камерах вакуумних вимикачів;
- вимірювання перехідного опору контактів вимикача;
- вимірювання опору й випробування ізоляції вторинних кіл вимикачів;
- вібромоніторинг процесів увімкнення і вимкнення;
- діагностування стану акумуляторних батарей методом контрольного розрядження із заданим профілем навантаження;
- вимірювання напруги, температури й густини електроліту елементів акумуляторної батареї як у процесі розрядження/зарядження, так і в режимі підзарядження батареї.

Для обробки результатів вимірів використовується персональний комп'ютер типу Notebook із спеціальним програмним забезпеченням.

Під час виготовлення лабораторій використовуються такі типи шасі:

- *автомобілі підвищеної прохідності:* КАМАЗ, МАЗ, УРАЛ, ГАЗ–3308, SCANIA, IVECO Strali, Mercedes-Benz UNIMOG U 1150;
- *суцільнометалеві фургони:* ГАЗель2705 як стандартного виконання, так і з високим дахом, ГАЗ–2752 «Соболь», FORD Transit VAN, Volkswagen LT–35, Mercedes-Sprinter, Mercedes Vito, IVECO Daily, УАЗ–39629.

Фургон лабораторії конструкційно розділений на два відсіки: відсік оператора й апаратний відсік. Лабораторне устаткування виготовлене з термо-водостійкого матеріалу. Убудовані системи життєзабезпечення дозволяють проводити роботи в автономному режимі в будь-яких природно-кліматичних умовах, у тому числі в районах Півночі. У лабораторії забезпечені комфортні умови перевезення і перебування в польових умовах бригади фахівців.

1.7.4. Пересувна лабораторія з повним оснащенням для діагностування електротехнічного устаткування і кабельних ліній «МЕГА-СЕРИЯ–4»

Мобільна електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–4» (рис. 1.46) призначена для проведення повного комплексу робіт із діагностування трансформаторів, а також для високовольтних випробувань силових кабельних ліній та устаткування розподільних

пристроїв, і для визначення місця пошкодження силових кабелів напругою до 110 кВ.

Основні функції:

- вимірювання опору ізоляції обмоток і введень;
- вимірювання діелектричних характеристик ізоляції обмоток і введень;
- вимірювання опору обмоток постійному струму;
- вимірювання втрат холостого ходу;
- вимірювання опорів короткого замикання;
- вимірювання коефіцієнта трансформації;
- випробування ізоляції обмоток трансформатора підвищеною напругою 50 Гц;
- випробування ізоляції силових кабелів з контролем струму витоку;
- випробування устаткування розподільних пристроїв;
- вимірювання опору ізоляції кабелю та устаткування;
- пропалювання ізоляції кабелю;
- визначення місця пошкодження акустичним методом;
- визначення траси кабельної лінії;
- визначення глибини прокладки кабельної лінії;
- визначення шуканого кабелю в пучку кабелів;
- визначення пробивної напруги трансформаторного масла;
- вимірювання діелектричних характеристик трансформаторного масла;
- визначення вологовмісту трансформаторного масла;
- аналіз газів, розчинених у трансформаторному маслі.

Для обробки результатів вимірювань використовується персональний комп'ютер типу Notebook зі спеціальним програмним забезпеченням, що реалізовує функції запису, обробки й зберігання результатів випробувань та діагностування з наданням протоколів вимірювань і діагностичним оцінюванням міри дефектності високовольтного устаткування.

Під час виготовлення лабораторій використовуються такі типи шасі:

- *автомобілі підвищеної прохідності:* КАМАЗ, МАЗ, УРАЛ, ГАЗ–3308, SCANIA, IVECO Strali, Mercedes-Benz UNIMOG U 1150;
- *суцільнометалеві фургони:* ГАЗель2705 як стандартного виконання, так і з високим дахом, FORD Transit VAN, Volkswagen Crafter, Mercedes-Benz Sprinter.

Фургон лабораторії конструкційно розділений на два відсіки: відсік оператора й апаратний відсік. Лабораторне устаткування виготовлене з термо-водостійкого матеріалу. Убудовані системи життєзабезпечення дозволяють проводити роботи в автономному режимі в будь-яких природно-кліматичних умовах. У лабораторії забезпечені комфортні умови перевезення і перебування в польових умовах бригади фахівців.



Рис. 1.46. Мобільна електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-4»

Модифікації лабораторії:

1. «МЕГА-СЕРИЯ-4» *TansStation 70* мобільний комплекс з повним оснащенням для діагностування електротехнічного устаткування і кабельних ліній напругою до 35 кВ і вище.

Електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-4» призначена для проведення таких робіт:

1. Діагностування кабельних ліній:

- випробування силових кабельних ліній підвищеною напругою постійного струму до 70 кВ;
- вимірювання опору ізоляції, напругою до 5000 В;
- попереднє визначення місця пошкодження кабелю з використанням різних методів, а саме:
 - метод рефлектометрії TDR, 160 В;
 - імпульсно-дуговий ударний метод SIM, 32 кВ;
 - вдосконалений імпульсно-дуговий ударний метод SIM-MIM, 32 кВ;
 - метод розв'язки по струму в ударному режимі SIM, 32 кВ;
 - метод затухаючих коливань, 70 кВ;
 - точне визначення місця пошкодження кабельної лінії за допомогою ударного генератора й акустичного приладу пошуку місць пошкоджень;
- визначення місця пошкодження оболонки кабелю;
- визначення траси кабельної лінії;
- селекція кабелю (визначення кабелю або жили з пучка);

2. Діагностування силових трансформаторів і розподільних пристроїв:

- випробування силових трансформаторів, високовольтного устаткування та апаратів підвищеною напругою промислової частоти до 55 кВ;
- вимірювання параметрів трансформаторів:
 - втрати холостого ходу;
 - втрати короткого замикання;
 - опір короткого замикання;
 - коефіцієнт трансформації;
 - вимірювання тангенса кута діелектричних втрат;
 - вимірювання опору обмоток постійному струму;
- вимірювання опору заземляючих пристроїв;
- неконтактний вимірювання температури струмоведучих частин.

Устаткування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ-4» умовно підрозділяється на основне (вмонтоване) й додаткове (не вмонтоване). Компонівка лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ-4» дозволяє забезпечувати нарощування і розширення функцій лабораторії, застосовувати сучасні методи діагностування – вимірювання тангенса діелектричних втрат і часткових розрядів з локалізацією джерела часткових розрядів.

Лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–4» має автоматизовану систему управління процесами збирання кіл вимірювання, проведення випробувань та обробки результатів і забезпечує:

- управління випробуваннями підвищеною напругою;
- вибір методів визначення місць пошкодження кабельних ліній;
- управління процесами пошуку місць пошкодження кабельних ліній;
- відображення на дисплеї пульта управління інформації про поточний стан системи з текстовими поясненнями;
- складання звітів і протоколів випробувань;
- зберігання даних про випробування і вимірювання;
- обмін інформацією через USB порт з периферійними пристроями.

2. «МЕГА-СЕРИЯ–4» TansStation 150 мобільний комплекс з повним оснащенням для діагностики електротехнічного устаткування і кабельних ліній напругою до 110 кВ і вище.

Електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–4» призначена для проведення таких робіт:

- випробування високовольтного устаткування підвищеною напругою 100 кВ промислової частоти 50 Гц;
- випробування силових кабельних ліній підвищеною напругою постійного струму до 80 кВ;
- випробування силових кабельних ліній підвищеною напругою наднизької частоти 0,1 Гц до 57 кВ;
- оцінка й локалізація часткових розрядів (ЧР) в ізоляції кабелів;
- проведення низьковольтних вимірів параметрів силових трансформаторів і вимір опору постійному струму;
- вимірювання опору ізоляції, напругою до 5000 В;
- попереднє визначення місця пошкодження кабелю з використанням таких методів:
 - метод рефлектометрії TDR, 160 В;
 - імпульсно-дуговий ударний метод SIM, 32 кВ;
 - вдосконалений імпульсно-дуговий ударний метод SIM-MIM, 32 кВ;
 - метод розв'язки по струму в ударному режимі SIM, 32 кВ;
 - метод затухаючих коливань, 80 кВ;

- точне визначення місця пошкодження кабельної лінії за допомогою ударного генератора й акустичного приладу пошуку місць пошкоджень;

- визначення траси кабельної лінії;
- випробування ізоляційних масел;
- визначення електричної міцності масла, до 70 кВ;
- вимірювання параметрів трансформаторів:

- втрати холостого ходу;
- втрати короткого замикання;
- опір короткого замикання;
- коефіцієнт трансформації;
- вимірювання ємкості й тангенса кута діелектричних втрат високовольтної ізоляції по «прямій» і «перевернутою» схемам.

Устаткування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ-4» умовно підрозділяється на основне (вмонтоване) і додаткове (не вмонтоване). Компонування лабораторії «МЕГА-СЕРИЯ-4» дозволяє забезпечувати нарощування і розширення функцій лабораторії, застосовувати сучасні методи діагностування – вимірювання тангенса діелектричних втрат і часткових розрядів з локалізацією джерела часткових розрядів.

Лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ-4» має автоматизовану систему управління процесами збирання кіл вимірювання, проведення випробувань і обробки результатів і забезпечує:

- управління випробуваннями підвищеною напругою;
- вибір методів визначення місць пошкодження кабельних ліній;
- управління процесами пошуку місць пошкодження кабельних ліній;
- відображення на дисплеї пульта управління інформації про поточний стан системи з текстовими поясненнями;
- складання звітів і протоколів випробувань;
- зберігання даних про випробування і виміри;
- обмін інформацією через USB порт з периферійними пристроями.

1.7.5. Мобільний діагностичний комплекс для діагностування трансформаторного масла

Мобільний діагностичний комплекс призначений для діагностування трансформаторного масла:

- визначення пробивної напруги трансформаторного масла;
- вимірювання діелектричних характеристик трансформаторного масла;

- визначення вмісту вологи трансформаторного масла;
- аналіз газів, розчинених у трансформаторному маслі.

Устаткування для визначення характеристик трансформаторного масла адаптує для розміщення у складі мобільної діагностичної лабораторії

Для обробки результатів вимірювань використовується персональний комп'ютер типу Notebook зі спеціальним програмним забезпеченням, що реалізовує функції запису, обробки й зберігання результатів випробувань і діагностування з наданням протоколів вимірювань і діагностичною оцінкою міри дефектності високовольтного устаткування.

Під час виготовлення лабораторій використовуються такі типи шасі:

- *автомобілі підвищеної прохідності*: КАМАЗ, МАЗ, УРАЛ, ГАЗ–3308, SCANIA, IVECO Strali, Mercedes-Benz UNIMOG U 1150;

- *суцільнометалеві фургони*: ГАЗель2705 як стандартного виконання, так і з високою покрівлею, ГАЗ–2752 «Соболь», FORD Transit VAN, Volkswagen LT–35, Mercedes-Sprinter, Mercedes Vito, IVECO Daily, УАЗ–39629.

1.7.6. Пересувна лабораторія для діагностування релейного захисту й автоматики «МЕГА-СЕРИЯ–5»

Мобільна електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–5» (рис. 1.47) призначена для проведення діагностичних робіт у пристроях релейного захисту й автоматики об'єктів електропостачання.

Основні функції:

- вимірювання параметрів спрацьовування і налаштування електромеханічних і цифрових реле;

- знімання векторних і кругових діаграм захистів направленої дії;

- визначення порядку чергування фаз мережі;

- прогрузка захисту прямої дії первинним струмом до 22 кА;

- вимірювання опору ізоляції і випробування кіл РЗіА;

- побудова кривої намагнічування трансформаторів струму;

- вимірювання навантажень вторинних кіл трансформаторів струму й напруги;
- вимірювання параметрів спрацьовування пристроїв захисного відключення (ПЗВ);
- вимірювання опору петлі «фаза–нуль» та «фаза–фаза» й розрахунок струму короткого замикання;
- вимірювання рівня напруги струму навантаження в мережах до 1000 В.

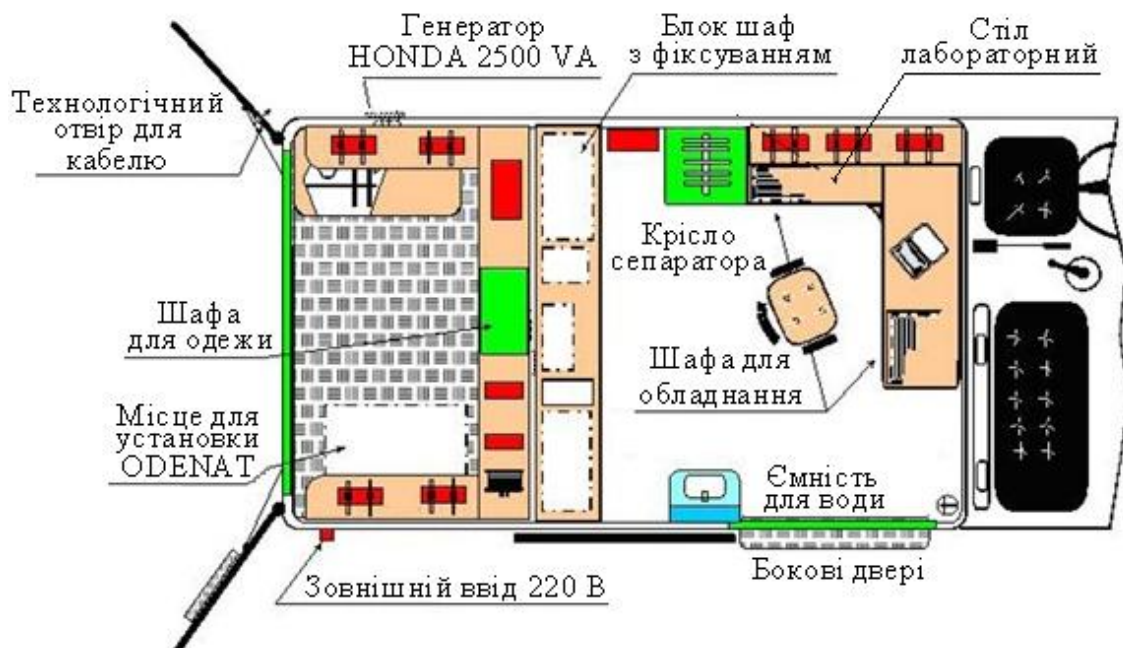


Рис. 1.47. Мобільна електротехнічна лабораторія «МЕГА-СЕРИЯ–5» для діагностування пристроїв релейного захисту й автоматики об'єктів електропостачання

Для обробки результатів вимірів використовується персональний комп'ютер типу Notebook зі спеціальним програмним забезпеченням.

Під час виготовлення лабораторій використовуються такі типи шасі:

- *автомобілі підвищеної прохідності*: КАМАЗ, МАЗ, УРАЛ, ГАЗ–3308, SCANIA, IVECO Strali, Mercedes-Benz UNIMOG U 1150;
- *суцільнометалеві фургони*: ГАЗель2705 як стандартного виконання, так і з високим дахом, ГАЗ–2752 «Соболь», FORD Transit VAN, Volkswagen LT–35, Mercedes-Sprinter, Mercedes Vito, VECO Daily, УАЗ–39629.

Фургон лабораторії конструкційно розділена на два відсіки: відсік оператора й апаратний відсік. Лабораторне устаткування виготовлене з термо-водостійкого матеріалу. Убудовані системи життєзабезпечення дозволяють проводити роботи в автономному режимі в будь-яких природно-кліматичних умовах. У лабораторії забезпечені комфортні умови перевезення і перебування в польових умовах бригади фахівців.

1.7.7. Мобільний діагностичний комплекс з повним оснащенням для контролю стану опор ліній електропередавання

Мобільний діагностичний комплекс (рис. 1.48) призначена для діагностування стану опор ліній електропередавання:

- візуально-вимірювальний контроль;
- капілярна дефектоскопія з використанням пенетрантів;
- ультразвуковий контроль;
- магнітопорошковий контроль;
- рентгенографічний контроль;
- тепловізійний контроль.

Устаткування для визначення характеристик зварних і болтових з'єднань опор ліній електропередавання адаптує для розміщення у складі мобільної діагностичної лабораторії.

Для обробки результатів вимірювань використовується персональний комп'ютер типу Notebook зі спеціальним програмним забезпеченням, що реалізовує функції запису, обробки й зберігання результатів випробувань і діагностування з наданням протоколів вимірювань і діагностичною оцінкою міри дефектності високовольтного устаткування.



Рис. 1.48. Мобільний діагностичний комплекс для діагностування стану опор ліній електропередавання

ЛІТЕРАТУРА

1. Калявин В. П. Надежность и диагностика элементов электроустановок : учебное пособие / В. П. Калявин, Л. М. Рыбаков. – СПб : Элмор, 2009. – 336 с.
2. Яцун М. А. Експлуатація та діагностування електричних машин і трансформаторів : навч. посібник / М. А. Яцун. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 180 с.
3. Григорьев В. И. Приборы и средства диагностики электрооборудования и измерений в системах электроснабжения : справ. пособие / В. И. Григорьев. – М. : Колос, 2006. – 272 с.
4. Бажанов С. А. Тепловизионный контроль электрооборудования в эксплуатации. Ч. 2 / С. А. Бажанов. – М. : НТФ «Энергопрогресс», 2005. – 80 с.
5. Бажанов С. А. Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств / С. А. Бажанов. – М. : НТФ «Энергопрогресс», 2000. – 76 с.

2. ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

- 2.1. Статистика та причини відмов асинхронних електродвигунів
- 2.2. Обсяг і технології технічного діагностування асинхронних електродвигунів
- 2.3. Прилад для діагностування обмоток електрообладнання ДО–1
- 2.4. Автоматизована система захисту й діагностування асинхронних електродвигунів
- 2.5. Мікроконтролерний блок захисту і діагностування агрегатів «електродвигун-механізм» МКЗид-0,4 кВ
- 2.6. Обсяг і технології технічного діагностування занурювальних електродвигунів

2.1. Статистика та причини відмов асинхронних електродвигунів

Надійність асинхронних електродвигунів визначається надійністю його складових – статора, ротора, підшипникових вузлів, вентилятора й коробки виводів. Забезпечення надійності роботи електродвигуна є багатофакторною проблемою (рис. 2.1), яка має вирішуватися як під час їх конструювання та виготовлення, так і безпосередньо в умовах експлуатації.

Множина факторів, що можуть спричинити відмови, розподіляється на три групи:

- 1) *фактори, що не залежать від споживачів* – конструкція та якість виготовлення електродвигуна;
- 2) *фактори, що лише частково залежать від споживачів* – режими експлуатації електродвигуна та якість експлуатаційних матеріалів, зокрема якість електроенергії;
- 3) *фактори, що повністю залежать від споживачів* – організація та якість обслуговування і ремонту електродвигунів, умови зберігання і транспортування.

Друга й третя групи факторів разом характеризують культуру (рівень) експлуатації електродвигунів. Майже всі із зазначених факторів є взаємозалежними. Експлуатаційні відмови асинхронних електродвигунів (АД) настають переважно внаслідок надмірно тривалої роботи без належних профілактичних заходів та їх низької якості, а також із-за порушень умов експлуатації і режимів роботи (рис. 2.2).

Дефекти (помилки) конструювання електродвигунів, що спричиняють у подальшому їх відмови, пов'язані головним чином із надмірним використанням електротехнічної сталі, провідникових, ізоляційних і конструкційних матеріалів [1].

Розробники електродвигунів серед першочергових вирішують проблему підвищення використання машини, передусім шляхом збільшення коефіцієнта заповнення паза міддю. Досягають цього застосуванням нових ізоляційних матеріалів (тонкі синтетичні плівки, емаль високої міцності, ізоляція пазів вихровим напиленням тощо), збільшенням щільності укладання провідників обмотки, а також впорядкуванням їх розміщення в пазах. Використання активної частини двигуна збільшується в середньому на 0,75 % на кожен відсоток підвищення заповнення паза міддю, однак це може спричинити суттєве зниження надійності обмотки.

Спроби досягти збільшення об'єму провідників у пазу, як правило, призводять до місцевих механічних пошкоджень ізоляції і наступних міжвиткових замикань. Як свідчать дослідження науковців, кількість пробіїв виткової ізоляції зменшується приблизно вдвоє під час зниження коефіцієнта заповнення паза на 4 % (з 0,82 до 0,79), що обумовлює необхідність належного обґрунтування вибору способу підвищення використання машини.

Коли під час конструювання не закладений належний запас теплостійкості ізоляції, перевантаження електродвигуна в умовах експлуатації може викликати його відмову. Вибір ізоляційних матеріалів більш високого класу нагрівостійкості, щоб досягти вищого рівня використання машини, має здійснюватися з урахуванням можливого зниження її експлуатаційної надійності. До того ж вихід з ладу машини з дорогими нагрівостійкими ізоляційними матеріалами приносить значні збитки споживачеві.

Слід мати також на увазі, що застосовувані методи теплового розрахунку асинхронних електродвигунів мають невисоку точність, мало враховують додаткові втрати й часто дають занижені значення температури нагрівання обмотки.

Під час розробки серій електродвигунів прагнуть добитися якомога меншого струму неробочого ходу та високого коефіцієнта потужності, що цілком зрозуміло. Однак, досягаючи цього зменшенням повітряного зазору, можна водночас знизити надійність електродвигуна в умовах експлуатації. Внаслідок появи з часом нерівномірності зазору (спрацювання підшипників, деформація посадкових місць, прогин валу тощо) прискорюється зношування

підшипникових вузлів, виникає вібрація, а потім зачеплення ротора за статор.

Причиною відмов двигуна під час експлуатації може бути також недостатня жорсткість конструкції, що допускає її значні деформації і, як наслідок, взаємні зміщення та аномальні умови роботи деталей і вузлів.

Окремого розгляду заслуговує ще один важливий фактор, що є причиною міжвиткових замикань обмотки статора електродвигуна – низька якість ізоляції обмотувального проводу та його надмірна жорсткість. А також низька якість підшипників – дефекти в металі кілець і кіл кочення, порушення технології термообробки, низька точність виготовлення. Ці та інші дефекти підшипників проводять до зниження її строку служби й спричиняють підвищений шум та надмірне нагрівання підшипникових вузлів.

Загалом понад третина відмов АД виникає внаслідок низької якості виготовлення. Поява дефектної продукції спричиняється відхиленнями від усталених технологій, недосконалістю та невідповідністю верстатного устаткування, пристосувань, інструменту, недостатньою кваліфікацією робітників, низьким рівнем виробничої культури тощо. Відмови, що викликані порушеннями технології виробництва, відносяться до групи відмов періоду приробітку. Домінують серед них допущені виробничниками пошкодження ізоляції під час деформації обмотки, ударів, дотикань гострих кромek інструменту, попадання провідного пилю, тирси, стружки, мастила, емульсії тощо. Досить велику кількість відмов спричиняє недосконала технологія обмотувальних робіт, зокрема під час механізованого укладання обмотки, дефекти з'єднань, особливо «мідь–алюміній» у двигунах з алюмінієвою обмоткою. Поряд з цим трапляються випадки неохайного пакетування магнітопроводів статора й ротора, а також неякісного його балансування.

Але навіть за умови високотехнологічного виробництва надійна робота асинхронних електродвигунів може бути забезпечена лише за їх правильного вибору та застосування. При цьому обов'язково мають бути враховані режими роботи двигуна, умови навколишнього середовища та якість електроенергії в мережі живлення.

Відмови електродвигунів під час експлуатації пов'язані як із природнім старінням ізоляційних матеріалів, підшипників і підшипникових вузлів, так і з пошкодженнями та руйнуваннями, спричиненими низьким рівнем обслуговування, ремонту, а також

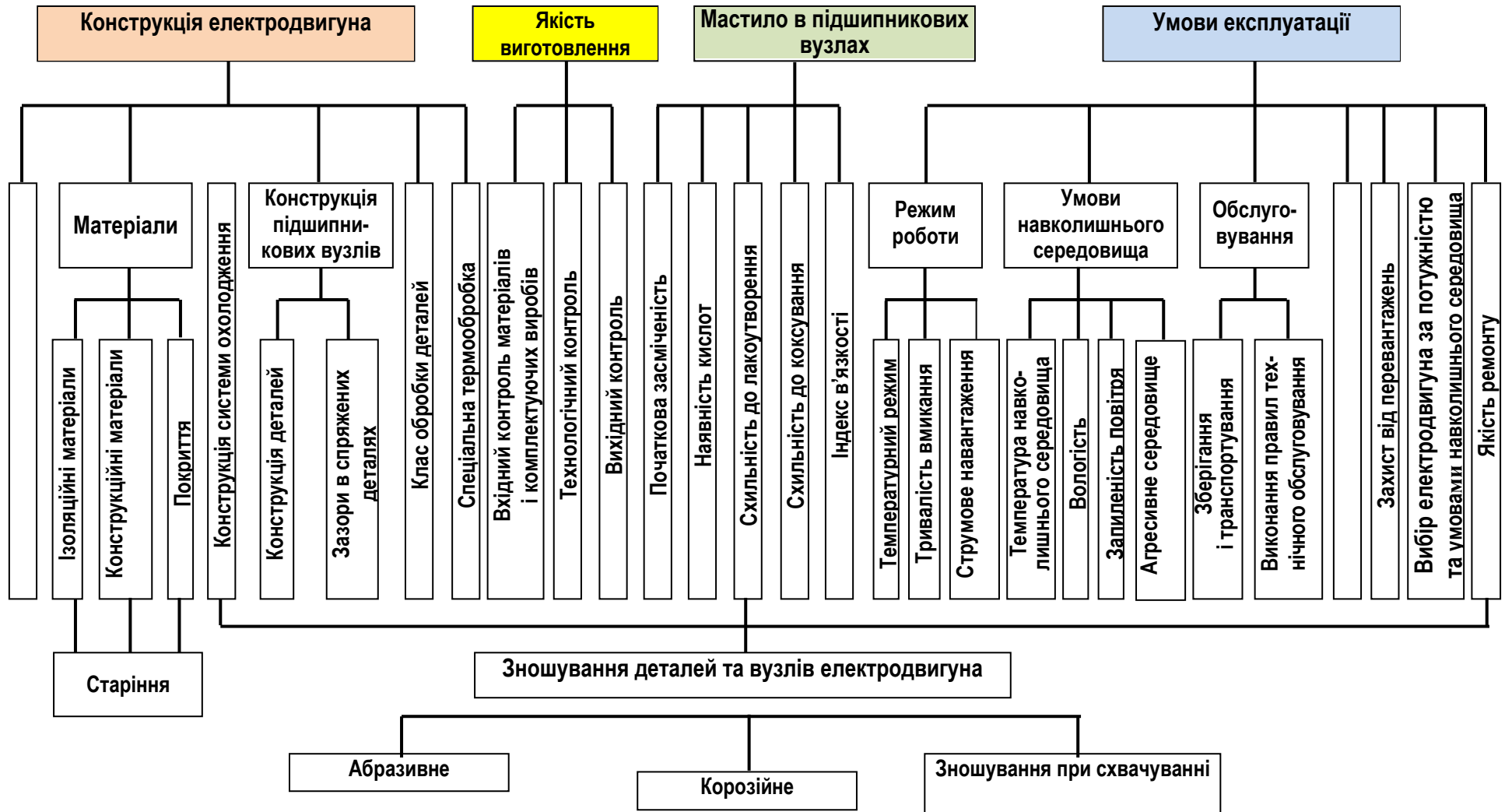


Рис. 2.1. Фактори, що визначають надійність роботи електродвигуна



Рис. 2.2. Класифікація причин відмов електродвигунів в умовах експлуатації

порушеннями умов зберігання і транспортування. Як надійно працюватиме вже встановлений двигун, залежить від своєчасного та якісного виконання профілактичних робіт, зокрема передбачених «Системою планово-запобіжного-ремонтну і технічного обслуговування електрообладнання сільськогосподарських підприємств».

Статистику відмов асинхронних електродвигунів розглядають як з точки зору часу й місця їх виникнення, так і за безпосередніми причинами.

Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов³¹ наводять такі дані у відсотках до загального числа відмов:

- 1) відмови, пов'язані із неправильним застосуванням електродвигунів (15–35 %);
- 2) відмови, пов'язані із недоліками та порушеннями технології виробництва електродвигунів (30–35 %);
- 3) експлуатаційні відмови, викликані головним чином незадовільним захистом електродвигунів (35–50 %);
- 4) відмови внаслідок природного старіння і зношування (10–12 %).

Що ж до причин відмов, то їх своєрідний рейтинг є таким:

- 1) міжвиткові замикання типові для всипних обмоток – близько 93 %;
- 2) пробій пазової (корпусної) ізоляції – близько 2 %;
- 3) пробій міжфазової ізоляції – близького 5 %;
- 4) дефекти підшипникових вузлів – орієнтовно 5–8 %.

Незначний відсоток відмов приходить на порушення контактних з'єднань у лобових частинах обмоток, у коробці виводів, а також обриви стержнів ротора та прокручування валу.

2.2. Обсяг і технології технічного діагностування асинхронних електродвигунів

Обсяг технічного діагностування асинхронних електродвигунів визначається кількістю операцій з вимірювання (контролю) діагностичних параметрів (рис. 2.3), перелік яких можна скласти за концепцією діагностування електрообладнання у складі системи планово-запобіжного ремонту й технічного обслуговування.

³¹ Котеленец Н. Ф. Испытание и надежность электрических машин : учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика»/ Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М. : Высш. шк., 1988. – 232 с.

До параметрів електродвигунів змінного струму, що підлягають перевірці під час технічного діагностування відповідно до Порядку проведення експертизи електроустановок споживачів віднесені:

- 1) опір та електрична міцність ізоляції обмоток;
- 2) опір обмоток постійному струму.

З урахуванням інформації про стан електродвигуна, отриманої під час його діагностування, має проводитися заміна зношених вузлів і деталей, а також визначаються терміни ремонтів та оцінюється залишковий ресурс до ремонту. До способів діагностування технічного стану асинхронних електродвигунів висувається ряд вимог (рис. 2.4).

Широке коло питань технічного діагностування асинхронних електродвигунів протягом багатьох років активно вивчали науковці Всесоюзного науково-дослідного інституту відновлення зношених деталей (інститут технічного сервісу УААН). Лабораторія експлуатації і ремонту силового електрообладнання, яку до 1986 року очолював к. т. н. Таран В. П., нагромадила значну кількість розробок із технічного діагностування, зокрема щодо забезпечення цих робіт приладами. Запропоновані примірні технології діагностування конкретних видів електрообладнання, зокрема електродвигунів (рис. 2.5), якими передбачаються його зовнішній огляд та вимірювання окремих діагностичних параметрів.

Серед параметрів, що підлягають вимірюванню і наступному аналізу є такі:

1) опір обмотки статора постійному струму дозволяє виявити обриви, дефекти в з'єднаннях тощо; вимірювання проводиться омметром (для попередньої оцінки), методом амперметра-вольтметра та одинарними й подвійними мостами (якщо опір обмотки становить менше 1 Ом); у разі необхідності результати вимірювання можна привести до заданої температури за формулою:

$$R_{зад} = \frac{R_{вим}}{1 + \alpha \cdot (\theta_{вим} - \theta_{зад})}, \quad (2.1)$$

де $R_{зад}$ – опір обмотки за заданої температури приведення, Ом; $R_{вим}$ – виміряний опір, Ом; $\theta_{вим}$ і $\theta_{зад}$ – відповідно температура обмотки під час вимірювання і та, до якої треба привести результати, °С; α – температурний коефіцієнт опору провідникового матеріалу (мідь – 0,004 1/град; алюміній – 0,00385 1/град);

Вид діагностування	Цільове призначення діагностування	Діагностичний параметр
1. Діагностування під час технічного обслуговування	<ul style="list-style-type: none"> – визначення необхідності заміни вузлів (деталей) електродвигуна – визначення необхідності заміни чи поповнення мастила – встановлення необхідності та визначення термінів ремонтів 	<ul style="list-style-type: none"> 1.1. Опір ізоляції обмотки статора. 1.2. Амплітуда вібрації корпусу та підшипникових щитів у зоні розміщення підшипників. 1.3. Струми фаз обмотки статора.
2. Планове діагностування	<ul style="list-style-type: none"> – визначення залишкового ресурсу роботи окремих вузлів і деталей – визначення термінів заміни зношених вузлів і деталей – визначення необхідності і термінів проведення поточного(ПР) та капітального(КР) ремонтів 	<ul style="list-style-type: none"> 2.1. Струм витікання (спливу) корпусної та міжфазової ізоляції обмотки статора: <ul style="list-style-type: none"> – абсолютна величина за напруги 1200 і 1500 В; – відносний приріст за підвищеної напруги від 1200 до 1800 В; – величина несиметрії у фазах обмотки статора; – стабільність за підвищеної напруги до 1800 В (відсутність коливань та кидків). 2.2. Рівень електричної міцності міжвиткової ізоляції обмотки статора під час подавання напруги високої частоти (до 1500 В) 2.3. Величина зазору в розмірному ланцюзі “вал–корпус” за затягнутих та відпущених болтах кріплення підшипникових щитів. 2.4. Величина відносної зміни струму у фазі обмотки статора під час прокручування ротора (визначення технічного стану обмотки ротора) $\gamma = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \cdot 100\%$.
3. Діагностування під час поточного ремонту	<ul style="list-style-type: none"> – визначення обсягу ремонту та деталей, що підлягають заміні або відновленню – забезпечення міжопераційного контролю під час ремонту – проведення післяремонтних випробувань – установа необхідності та визначення терміну КР 	<ul style="list-style-type: none"> 3.1. Струм витікання (спливу) корпусної та міжфазової ізоляції обмотки статора: <ul style="list-style-type: none"> – абсолютна величина за напруги 1200 і 1500 В; – відносний приріст за підвищеної напруги від 1200 до 1800 В; – величина несиметрії у фазах обмотки статора; – стабільність за підвищеної напруги до 1800 В (відсутність коливань та кидків) 3.2. Рівень електричної міцності ізоляції під час подачі напруги високої частоти (до 1500 В) 3.3. Радіальний зазор у підшипниках 3.4. Величина паралельного та кутового зміщення валу

Рис. 2.3. Діагностичні параметри асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором

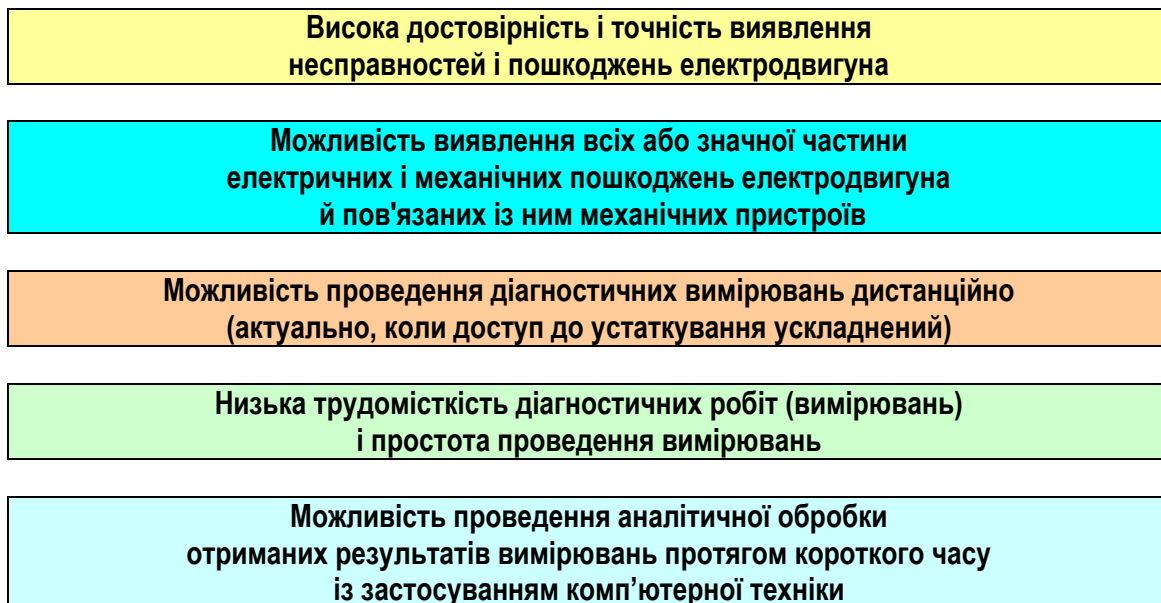


Рис. 2.4. Вимоги до способів діагностування технічного стану електродвигунів

2) *опір ізоляції* – дозволяє визначити стан ізоляції, що значно погіршується за її пошкодження, забруднення або зволоження; приведення результатів вимірювання до заданої температури проводиться за формулою

$$R = R_{\theta_{вим}} \cdot 10^{\frac{(\theta_{зад} - \theta_{вим})}{K}}, \quad (2.2)$$

де $R_{\theta_{вим}}$ – опір ізоляції за температури вимірювання, МОм; $\theta_{вим}$ і $\theta_{зад}$ – температура під час вимірювання і та, до якої треба привести результати, °С; K – температурний коефіцієнт; для класу нагрівостійкості А – $K=40$; класу В – $K=60$.

Мінімально допустиме значення опору ізоляції за температури $\theta < \theta_{роб}$ можна визначити за формулою [3]

$$R_{\min \theta} = R_{\min \theta_{роб}} \cdot 2^K, \quad (2.3)$$

де $\theta_{роб}$ – температура, що відповідає класу нагрівостійкості ізоляції електродвигуна (за ГОСТ 183-94) (табл. 2.1). $K = \frac{\theta_{роб} - \theta}{20}$ з округленням до більшого цілого числа.

$$R_{\min \theta_{роб}} = \frac{U_{л}}{1000 + 0,01 \cdot P_{2ном}} \geq 0,5 \text{ МОм}. \quad (2.3)$$

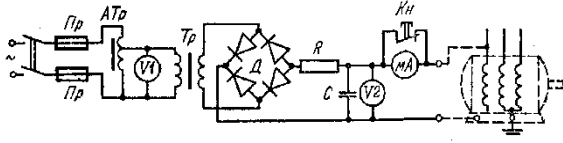
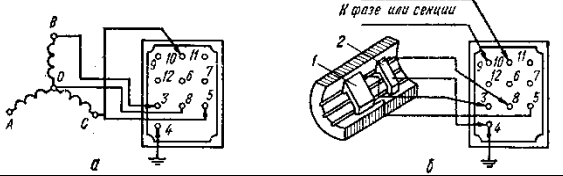
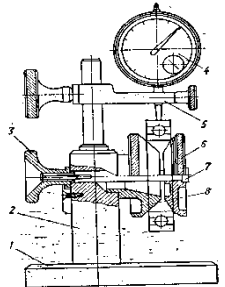
Назва операції		Приладове забезпечення	
1	Підготовчі роботи	Компресор, набір слюсарного інструменту	
2.	Визначення технічного стану корпусної і міжфазової ізоляції обмотки статора	Мегаомметр, прилад для вимірювання струмів витікання	
	Визначення технічного стану міжвиткової ізоляції обмотки статора	Прилади ВЧФ-5-3; ЕЛ-15	
3.	Визначення зазорів у підшипниках	Прилад для вимірювання зазорів у підшипниках	
4.	Визначення технічного стану ротора	Прилад для визначення обривів стержнів ротора	
5.	Аналіз результатів діагностування		
6.	Оцінка технічного стану електродвигуна. Визначення залишкового ресурсу. Видача розпорядження на ремонтні роботи (за необхідності)		

Рис. 2.5. Технологічна схема технічного діагностування асинхронних електродвигунів із короткозамкненим ротором

2.1. Температура, що відповідає класу нагрівостійкості ізоляції електродвигуна

Клас нагрівостійкості ізоляції	B	F	H
Робоча температура під час вимірювання методом термометра, °C	110	125	145

Водночас за вимогами стандарту² опір ізоляції обмоток асинхронних електродвигунів потужністю до 400 кВт має бути не меншим:

- 10 МОм – у практично холодному стані (температура окремих частин машини відрізняється від температури навколишнього середовища не більш ніж на 3 К);
- 3 МОм – за температури обмоток, близькій до робочої;
- 0,5 МОм – за верхнього значення вологості повітря;

3) *струм витікання (спливу)* – дозволяє виявити зволоження ізоляції, тріщини, зсув, електричний пробій. Важливою передумовою ефективного діагностування електродвигунів, як і технічних об'єктів загалом, є правильний вибір діагностичних параметрів та відповідних методів діагностування.

Одним із прикладів вирішення цієї проблеми є метод діагностування технічного стану асинхронних електродвигунів шляхом оцінки несиметрії струмів фаз обмотки статора. З цією метою в коло живлення обмотки статора вмикається трансформаторний датчик струму (рис. 2.6). Для виявлення та ідентифікації несправності електродвигуна використовується абсолютна величина вихідного сигналу датчика, що дозволяє обійтися без обчислень і тим самим значно спростити обробку результатів вимірювання. Як свідчать результати вимірювань, під час змінного струму первинної обмотки датчика в межах 1–7 А (відповідає потужності електродвигуна 2–15 кВт) за величиною вихідного сигналу можна в більшості випадків досить точно визначити характер несправності. Достовірність при цьому є вищою, ніж за результатами вимірювання струму нульової послідовності (табл. 2.2).

Під час розробки технології діагностування доцільно скласти *мінімальний діагностичний тест*, що визначає мінімальну кількість перевірок, які забезпечили б достовірність встановлення реального стану електродвигуна (обладнання) і дали змогу прогнозувати його надалі [5].

²ДСТУ 2365-94. Машини електричні асинхронні потужністю до 400 кВт включно. Двигуни. Загальні технічні умови.

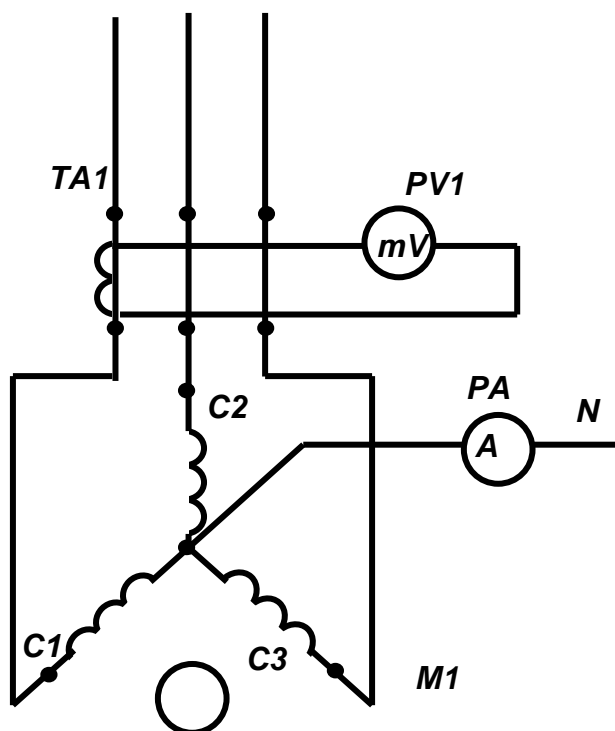


Рис. 2.6. Схема технічного діагностування асинхронного електродвигуна шляхом оцінки несиметрії струмів фаз обмотки статора

2.2. Результати вимірювання струму нульової послідовності

Режим живлення, модельована несправність	Напруга на виході датчика, мВ (вольтметр PV1)	Струм нульової послідовності, А (амперметр PA1)
Симетричне трифазне живлення	31–38	0,12–0,16
Обрив фази	280–312	3,1–6,2
Асиметрія опору фаз обмотки статора	25–48	0,88–2,0
Значне зменшення опору фази статора	275–280	2,7–2,8
Міжфазне замикання	28–61	0,18–0,22
Асиметрія в обмотці ротора	45–65	0,18–0,25

Такий тест потребує попередньої побудови *діагностичної матриці – таблиці функцій несправностей* (рис. 2.7.). За матрицею мінімальну кількість перевірок вибирають так, щоб у кожному стовпці результати вимірювань під час діагностування технічного стану асинхронного електродвигуна з використанням трансформаторного датчика струму було не менш, ніж одне позначення «+», що показує зв'язок між діагностичним параметром і технічним станом

діагностованого елемента чи вузла. Має бути обов'язково врахована оптимальна послідовність діагностування і далі використані критерії мінімальної вартості чи питомої вартості діагностування на одиницю наробітку електродвигуна.

Наступним етапом є складання *матриці режимів діагностування* (рис. 2.8), у якій діагностичні параметри класифікують за групами з метою оптимізації алгоритму діагностування. При цьому на перше місце висувається група параметрів, вимірюваних у практично холодному стані електродвигуна, потім ті, що вимірюються під час пуску й прогрівання і в останню чергу – група параметрів, що мають вимірюватися у номінальному режимі роботи.

Для подальшого зниження трудомісткості вимірювань діагностичні параметри в групах ділять на підгрупи, об'єднані загальними характеристиками або ж вимірювані одним приладом (наприклад вимірювання струмів спливу й перевірка рівня електричної міцності міжвиткової ізоляції). Значно прискорює діагностування і підвищує його результативність належне забезпечення приладами (додаток Б), зокрема мікропроцесорна техніка та персональні ЕОМ.

2.3. Прилад для діагностування обмоток електрообладнання ДО–1

Прилад (рис. 2.9) дозволяє здійснювати діагностування обмоток (наявність міжвиткових замикань, замикань на корпус, обривів, випробування ізоляції) в одно- і трифазних електродвигунах, генераторах та іншому електрообладнанні.



Рис. 2.9. Прилад для діагностування обмоток електрообладнання ДО–1

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1			+	+	+	+	+	+	
2			+	+	+	+	+	+	
3			+	+	+				
4						+	+		
5									+
6	+	+							
7	+	+	+						
8						+			
9							+		

а

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	+	+							
2	+	+	+						
3			+	+	+				+
4						+			
5									+
6				+					+
7									
8									
9									

б

Рис. 2.7. Діагностична матриця асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором:
а) перевірка парцездатності; б) визначення залишкового ресурсу

Стовпці матриці (вузли та елементи електродвигуна)	
1 – корпусна ізоляція; 2 – міжфазна ізоляція; 3 – міжвиткова ізоляція; 4 – обмотка статора; 5 – обмотка ротора; 6 – підшипникові вузли; 7 – вал; 8 – активна сталь статора; 9 – контакти коробки виводів.	
Рядки матриці (діагностичні параметри електродвигуна)	
<p>а) перевірка парцездатності</p> <ul style="list-style-type: none"> * 1 – вібрація електродвигуна; * 2 – шум під час роботи електродвигуна; * 3 – споживаний струм (пофазно); * 4 – момент опору за провертання валу; * 5 – сліди перегрів контактних поверхонь; * 6 – струми витікання; 7 – електрична міцність ізоляції; 8 – радіальне переміщення валу; 9 – биття виступаючого кінця валу 	<p>б) визначення залишкового ресурсу</p> <ul style="list-style-type: none"> * 1 – струми витікання (спливу); * 2 – електрична міцність ізоляції; * 3 – споживаний струм (пофазно); * 4 – радіальне переміщення валу; * 5 – сліди перегріву контактних поверхонь; 6 – опір обмотки статора постійному струму;

* – діагностичні параметри, що входять до мінімального діагностичного тесту

	1	2	3	4	5	6	7	8
1				+	+			
2	+	+	+					

а

	1	2	3	4	5	6	7	8
1				+	+	+	+	+
2	+	+	+					

б

Рис. 2.8. Матриця режимів діагностування асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором:
а) перевірка працездатності; б) визначення залишкового ресурсу

Стовпці матриці (діагностичні параметри мінімального діагностичного тесту)	
1 – споживаний струм; 2 – вібрація електродвигуна; 3 – шум під час роботи двигуном; 4 – момент опору за прокручування валу; 5 – сліди перегріву контактних поверхонь; 6 – струм витікання; 7 – електрична міцність ізоляції; 8 – радіальне переміщення валу.	
Рядки матриці (режими електродвигуна під час діагностування)	
а – перевірка працездатності: 1 – електродвигун не працює; 2 – режим неробочого ходу або режим навантаження.	б – визначення залишкового ресурсу: 1 – електродвигун не працює і перебуває практично в холодному стані; 2 – режим неробочого ходу або режим навантаження.

Робота приладу базується на аналізі перехідних процесів в обмотках з використанням еталонних кривих затухаючих коливань, записаних у пам'ять приладу. Методики, що програмно реалізуються, забезпечують виявлення і візуалізацію на дисплеї різницевого сигналу кривих затухаючих коливань за відсутності й за наявності короткозамкненого контуру. Це значно підвищує чутливість та інформативність приладу, оскільки дозволяє кількісно аналізувати сигнал, безпосередньо обумовлений короткозамкненим контуром в ділянці максимальної чутливості перехідних процесів до впливу короткозамкненого контуру.

Прилад не потребує використання фізичних еталонів, може бути використаний для діагностування обмоток у виробках широкої номенклатури. Результати діагностування відображаються на дисплеї приладу, який має вбудовану клавіатуру для керування. Забезпечується зв'язок приладу з ПЕОМ через інтерфейс RS232.

Основні технічні характеристики приладу:

Чутливість -	до одного короткозамкненого витка
Тривалість одного випробування -	не більше 10 с
Споживана потужність -	не більше 50 ВА

2.4. Автоматизована система захисту й діагностування асинхронних електродвигунів³²

Сучасні стандарти більшості країн світу висувають все більш високі вимоги до підвищення безпеки роботи персоналу й підвищення економічної ефективності в усіх галузях промисловості. Ці чинники визначають потребу в захисті й спостереженні за устаткуванням і механізмами з асинхронними електродвигунами. Ігнорування вказаними вимогами призводить до непередбачених і значних збитків від зниження терміну служби устаткування до підвищення ймовірності травмування персоналу.

Для підвищення ефективності й зниження вартості кінцевого продукту фахівці підприємств різних галузей промисловості реалізують проекти, направлені на модернізацію електроприводу машин і механізмів. Найраціональніше ці цілі можуть бути досягнуті шляхом застосування електронних систем захисту, у побудові яких найбільшого поширення набули дві ідеології: куто-фазовий метод, що

³²Каргапольцев Василий Петрович, директор ООО "ИТЦ Промавтоматика"(г.Киров, РФ)
Симахин Иван Яковлевич, директор ЗАО «Энергис»(г.Киров, РФ)

реалізований у більшості імпортованих дорогих пристроїв, і контроль параметрів двигуна за діючим значенням струму в кожній із фаз.

Саме другий метод покладений в основу роботи монітора струму двигуна (МТД), розробленого кіровським підприємством «Енергіс» (Російська Федерація) (рис. 2.10 а). Наявність функції автоматичного настроювання дозволяє простим і доступним способом отримати високоефективний захист асинхронного електродвигуна від недовантаження або перевантаження внаслідок заклинювання, обриву пасу або ланцюга, у разі пошкодження підшипників, а також від роботи електронасосного агрегату в режимі «сухого» ходу.

Можливості МТД включають:

- затримку при реверсі двигуна від 1 до 99 секунд;
- затримку вимкнення двигуна під час перевантаження (недовантаження) від 1 до 99 секунд;
- відображення поточного струму будь-якої фази на дисплеї.

Діюче значення струму навантаження в кожній фазі вимірюється за допомогою трьох гальванічно ізольованих датчиків струму.

Просте й зручне меню дозволяє запрограмувати *параметри спрацьовування МТД:*

- перевантаження відносно номінального струму;
- недовантаження відносно номінального струму;
- час затримки перед увімкненням двигуна в протилежному напрямі (реверс);
- час затримки вимкнення за 4-кратного перевантаження;
- час затримки вимкнення під час перевантаження;
- час затримки вимкнення під час недовантаження.

За активації режиму автоматичного настроювання, зазвичай під час першому пуску, пристрій МТД через 15 с записує номінальний струм двигуна й встановлює параметри захисту. Наявність можливості встановлення величини перевантаження і недовантаження, а також тривалості затримки спрацьовування захисту під час аварії дозволяє реалізувати в одному приладі функції моніторингу недоавантаження і перевантаження електродвигуна.

МТД захищає електроустаткування від таких аварійних ситуацій:

- перевищення номінального струму в 4 рази;
- перевантаження;
- недовантаження;
- обрив будь-якої із фаз.

Монітор струмів двигуна реалізує його захист у повнішому об'ємі, ніж застосовувані раніше пристрої ФУЗ–МУ, АЗДМ, УЗД, БТЗ.

Новим функціональним рішенням є монітор струму МТД–RS (рис. 2. 10 б), що забезпечує приймання і передавання даних моніторингу. При цьому з'являється додаткова можливість контролювати працездатність та економічність електроустаткування, збираючи часові графіки величин струму, напруги, повної спожитої потужності.

Монітор струму двигуна з функцією обміну даними й керуванням по інтерфейсу RS–485 (МТД–RS) у комплекті з первинними перетворювачами – датчиками струму – забезпечує вимірювання струму й захисне відключення навантаження в мережах змінного струму частотою 50 Гц, напругою 220/380 В і номінальними струмами навантаження від 1 до 250 А. Для місцевого візуального контролю застосований дворядковий 16-міліметровий РКІ-індикатор з постійним підсвічуванням. Монітор МТД–RS може бути використаний у системах контролю, керування і захисту під час виконання технологічних процесів у різних галузях промисловості, сільського господарства й житлово-комунальної сфери.

Монітор МТД–RS забезпечує вирішення таких завдань:

- захисне відключення навантаження під час виникнення аварійних ситуацій у мережі живлення і в колі навантаження;
- захист трифазних асинхронних двигунів приводу насосів, вентиляторів, компресорів, конвеєрів, млинів;
- захист нагрівального устаткування (ТЕНи);
- захист освітлювального устаткування.

Виконувані пристроєм МТД–RS функції:

- активація функцій і зміна заводських уставок споживачем;
- захисне відключення електроустановок у мережах змінного струму;
- контроль та індикація струму, напруги, потужності й частоти в кожній із фаз;
- передавання інформації через послідовний стик RS–485 на ЕОМ верхнього рівня за спеціальним протоколом, що забезпечує захист інформації від спотворення і втрат;
- дистанційне встановлення налаштувань самого приладу й налаштувань на навантаження:
 - допустимих меж струму, напруги, частоти мережі живлення;
 - часу тривалого перевантаження,

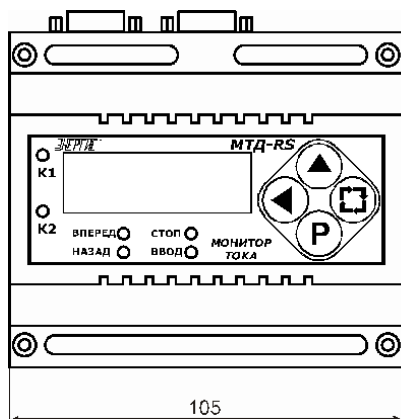
- часу спрацьовування захисту перевищення допустимих параметрів,
- часу спрацьовування захисту обриву фази, захисного часу перемикання реверсу живлячих фаз;
- дистанційне діагностування функцій приладу.

Живлення монітора МТД–RS здійснюється від однієї фази трифазної електричної мережі напругою 220 В +10–15 %, частотою 50 Гц ± 1 Гц. Номінальна потужність захищеного монітором навантаження повинна знаходитися в межах 1–110 кВт.

Монітор МТД– RS містить два вбудовані реле змінного струму (4 А; 220 В). Довжина лінії, що сполучає монітор з датчиками струму – не більше 30 м.



а



б

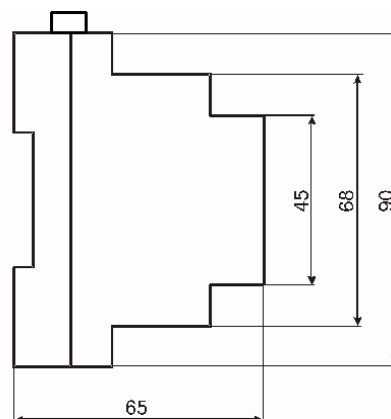


Рис. 2.10. Зовнішній вигляд: а) монітора струму двигуна й датчиків струму; б) монітора струму двигуна МТД–RS

В основному режимі роботи програми на екрані монітора ПЕОМ відображається у вигляді таблиці зведена інформація моніторингу

стану контрольованих об'єктів (рис. 2.11 а). Поле «Состояние» може приймати такі значення:

- «Нет связи» – немає зв'язку з контролером;
- «Выключен» – двигун (контрольований об'єкт) вимкнений;
- «Вперед» – двигун обертається вперед;
- «Назад» – двигун обертається назад;
- «Авария» – монітором виявлений аварійний стан електродвигуна.

За нормального функціонування двигуна відповідна клітка поля «Состояние» підсвічується зеленим кольором. Під час вимкненого двигуна виділення кольором не здійснюється. Коли виявлено проблеми, то поле стану відповідного об'єкта й проблемні поля параметрів («Ua», «Ub», «Uc», «Ia», «Ib», «Ic», «F», «S») підсвічуються червоним кольором. Окрім стану в кожному рядку таблиці виводяться значення струму й напруги для кожної фази, значення частоти струму в мережі живлення, повна потужність.

Після завдання часового періоду на екрані відображається графік контрольованої величини (рис. 2.11 б).

На рис. 2.12 наведено як приклад застосування монітора струмів двигуна МТД–RS схема керування трьома насосними агрегатами, що забезпечує реалізацію таких функцій:

- захист двигунів приводу насосів від аварійних режимів роботи (перевантаження за струмом, обрив фази, перекид фаз, порушення чергування фаз);
- обмеження пікового споживання електроенергії шляхом блокування одночасного включення насосів;
- ведення статистики роботи насосів;
- пуск/зупинка насосів за графіком, заданим користувачем.

2.5. Мікроконтролерний блок захисту і діагностування агрегатів «електродвигун-механізм» МКЗид-0,4 кВ

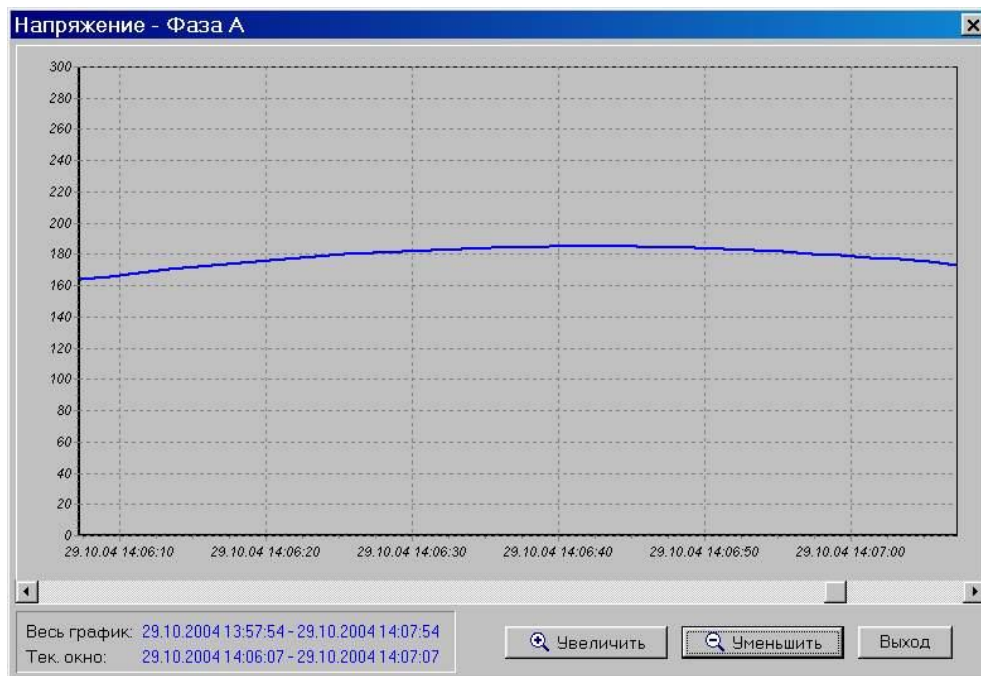
Блок захисту і діагностування (рис.2.13) призначений:

- для захисту від міжфазних і однофазних коротких замикань в електродвигуні, його введеннях і кабелі живлення;
- попередження пошкодження електродвигуна при його роботі в аномальних режимах;
- безперервного контролю рівня ізоляції обмотки статора відносно корпусу відключеного електродвигуна і попередження його включення в роботу при зниженому рівні ізоляції;

- - діагностування робочих механізмів шляхом аналізу електричних параметрів електродвигуна.

Управление МТД									
Работа Графики Помощь									
Адрес	Состояние	Ua	Ia	Ub	Ib	Uc	Ic	F	S
0100	Вперед	215	2.7	216	2.6	218	2.7	49	1.73
0101	Нет связи								
0102	Вперед	221	4.0	210	3.5	221	3.6	50	2.415
0103	Назад	224	18.6	214	2.3	215	2.3	52	4.967
0104	Выключен	0	0	0	0	0	0	0	0
0105	Выключен	0	0	0	0	0	0	0	0

а



б

Рис. 2.11. Основне вікно програмного забезпечення монітора струмів двигуна МТД–RS (а) і графік зміни напруги фази А на моніторі ПЕОМ, що працює разом із пристроєм МТД–RS (б)

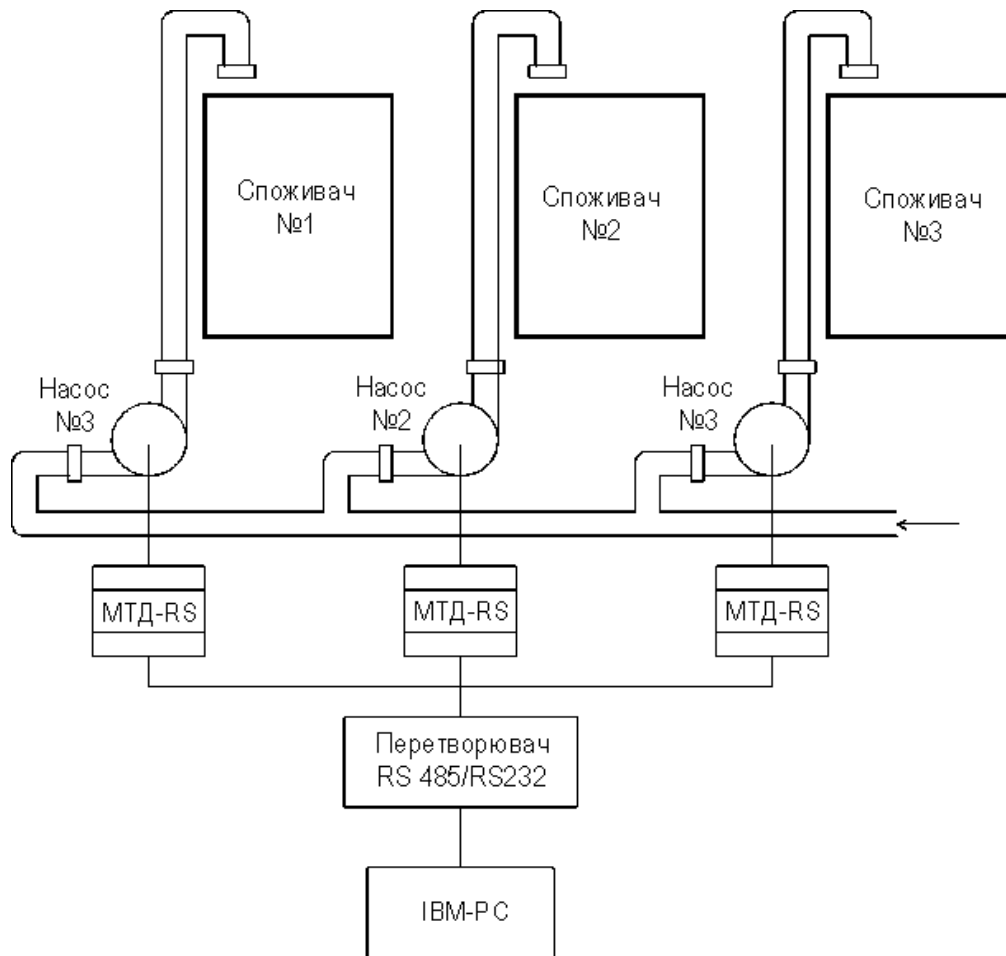


Рис. 2.12. Схема керування трьома електронасосними агрегатами із застосуванням моніторів струму двигуна МТД–RS



Рис.2.13 - Мікроконтролерний блок захисту і діагностування електродвигуна МКЗиД-0,4 кВ

2.6. Обсяг і технології технічного діагностування занурювальних електродвигунів [4; 5]

Занурювальні електродвигуни в складі електронасосних агрегатів (рис.2.14) набули широкого розповсюдження в сільському господарстві – у системах водопостачання, зрошення, на дренажних спорудах.



Рис.2.14. Занурювальні електронасосні агрегати

Конструктивно занурювальний електронасосний агрегат об'єднує в собі багатоступінчатий відцентровий насос, вал якого безпосередньо з'єднаний з ротором водозаповненого електродвигуна типу ПЭДВ (АДП, ЭЦВ). Обмотка статора електродвигуна виконується мідним дротом марки ПЭВВП з двошаровою ізоляцією (нижній шар ізоляції товщиною 0,05 мм являє собою покриття з лаку вініфлекс, верхній – з полівінілхлоридного пластику ПХВ-489). Будучи водостійкою, ізоляція в той же час дуже чутлива до теплового впливу – гранична температура нагріву сягає всього лише +70 °С. До того ж через особливості конструкції електродвигуна (малий діаметр і значна порівняно з ним довжина) нагрів його є нерівномірним – зона найбільш високих температур знаходиться посередині статора.

Указані обставини обумовлюють те, що занурювальні електродвигуни погано витримують перевантаження та часті пуски – допускається не більше трьох пусків протягом години. Є малонадійними й підшипники ковзання, що застосовуються в занурювальних електродвигунах.

Як дуже відповідальний електроприймач занурювальний електронасосний агрегат вимагає чітко регламентованого технічного обслуговування та ремонту. Однак, враховуючи значні затрати праці на підйом агрегату зі свердловини, проведення ремонту має бути достатньо обґрунтованим. Таке обґрунтування можливе з використанням результатів оцінки технічного стану агрегату й електродвигуна.

Перелік діагностичних параметрів занурювального електродвигуна є досить обширним, однак реалізувати програму технічного діагностування досить складно, оскільки агрегат недоступний для огляду. Вирішенням цієї проблеми є технічне діагностування занурювальних електродвигунів без підйому їх зі свердловини за допомогою пристрою КИ-6301, розробленого свого часу у ВНИИВИД (нині ІМЕСГ УААН). Цей пристрій дозволяє контролювати технічний стан ізоляції обмотки статора електродвигуна (за струмом витікання), а за умови дообладнання двигуна спеціальним датчиком – і зношування радіального та упорного підшипників.

Пристрій КИ6301 встановлюється поряд зі станцією керування електронасосним агрегатом і з'єднується з нею п'ятижильним кабелем. Від пристрою до електродвигуна прокладати додаткові провідники чи кабель непотрібно, оскільки достатньо для цього проводів, що живлять електродвигун. Вбудований в електродвигун датчик спрацьовує в результаті граничного зношування опорного і (або) радіального підшипників ковзання.

Датчик (рис. 2.15) складається з двох відрізків проводу ПЭВВП діаметром 2,0 мм (з ізоляцією), діода Д223Б та резистора МЛТ-1 опором 2–3 кОм. Між коротким, довжиною приблизно 0,5 м, та довгим, довжиною 3–4 м (у залежності від розмірів електродвигуна), відрізками проводу знаходяться з'єднані послідовно діод і резистор. Місце пайки, діод та резистор ретельно ізолюються поліхлорвініловою ізоляційною стрічкою ПХЛ-20-0,2 і створюють капсулу датчика. Замість стрічки може бути використана епоксидна смола чи компаунд. Капсула датчика розміщується всередині електродвигуна, при цьому короткий відрізок проводу датчика під'єднується до нульової точки обмотки статора електродвигуна. Довгий відрізок проводу вкладається в пази статора електродвигуна (1-й, 9-й, 17-й) і закріплюється там на заданій висоті від внутрішньої поверхні розточки статора за допомогою спеціальних рознімних тримачів. Залишок проводу кріпиться спеціальним утримним пристроєм на нижньому підшипниковому щиті двигуна, забезпечуючи

контроль технічного стану опорного підшипника. Особливості встановлення датчика до занурювальних електродвигунів детально викладені в інструкції заводу-виробника пристрою КИ-6301.

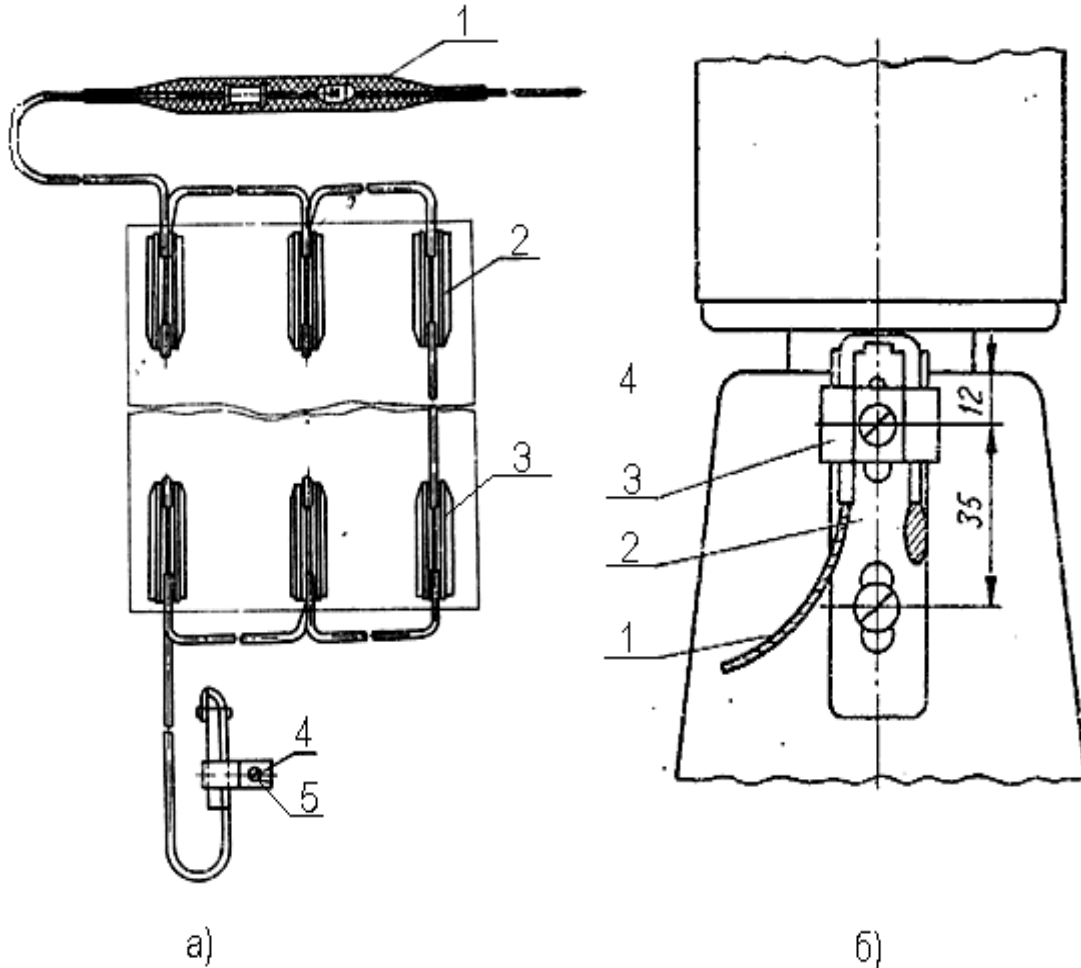


Рис. 2.15. Датчик контролю стану ізоляції обмотки статора та зношування підшипників занурювального електродвигуна:
 а) загальний вигляд датчика : 1 – датчик контролю стану ізоляції обмотки статора; 2, 3 – датчик контролю зношування осьового й упорного підшипників; 4, 5 – кріпильні деталі;
 б) кріплення петлі датчика для контролю зношування упорного підшипника: 1 – провідник датчика; 2 – тримач; 3 – фіксуєча накладка

Принципова електрична схема пристрою КИ-6301 наведена на рис. 2.16 разом із силовими колами станції керування занурювальними електронасосними агрегатами. Слід зауважити, що схеми під'єднання пристрою КИ-6301 до окремих типів станцій

керування дещо відрізняються одна від одної, проте доступні для складання електротехнічним персоналом сільськогосподарських підприємств.

Пристрій працює таким чином, що під час подачі команди на вмикання електродвигуна насосного агрегату (вручну, від датчиків рівня чи тиску води, від пристроїв телемеханіки) на затискачі 1, 4 пристрою КИ–6301 поступає напруга живлення.

Якщо ізоляція обмотки статора й підшипникові вузли знаходяться у доброму стані, спрацьовує реле KV1, яке вмикає своїми контактами реле KV2. Останнє своїм контактом KV2.2 розмикає коло, що з'єднує пристрій з електродвигуном, контактом KV2.5 від'єднує сигнальну лампу HL1 (лампа під час увімкнення електродвигуна короткочасно спалахує). Контакт KV2.4 самоблокує живлення котушки реле KV2, а контакт KV2.1 вмикає котушку магнітного пускача електродвигуна (можливо через проміжне реле). Таким чином запускається в роботу електронасосний агрегат і працює до його вимикання вручну чи автоматично.

Через пошкоджену ізоляцію обмотки статора електродвигуна виникає коло для струму витікання: затискач 1 пристрою КИ–6301, кнопка SB1, діод VD1, резистори R1, R2, контакт KV2.3, резистор R3, контакт KV2.2, затискач 2 пристрою, місце пошкодження ізоляції електродвигуна – корпус двигуна, що з'єднаний з нульовим проводом мережі. Унаслідок цього шунтується коло живлення реле KV1, воно не спрацьовує (не виконується команда на вмикання електронасосного агрегату).

Якщо в процесі експлуатації електродвигуна настає граничне зношування радіального підшипника (чи прогин валу ротора), з'являється ексцентриситет ротора. Внаслідок цього ротор протирає ізоляцію «струн» датчика, прокладених у пазах статора й замикає датчик на корпус. За граничного зношування опорного підшипника ротор «просідає» і з протиранням ізоляції петлі датчика знову ж таки виникає замикання на корпус. Як у першому, так і в другому випадку створюється коло для струму витікання: затискач 1 пристрою КИ–6301, кнопки SB1, діод VD1, резистори R1, R2, контакт KV2.3, резистор R3, контакт KV2.2, затискач 2, місце замикання проводу датчика на корпус. Реле KV1 не спрацьовує, оскільки коло живлення його катушки шунтується.

В обох описаних випадках загориться сигнальна лампа HL1. Щоб уточнити, з якої саме причини пристрій КИ–6301 «заборонив» пуск електронасосного агрегата, слід натиснути на кнопку SB1. Коли лампа HL1 тухне – пошкоджені підшипники, коли ж продовжує

горіти, то це пошкодження ізоляції обмотки статора електродвигуна. Змінним резистором R4 можна налагодити схему пристрою КИ–6301 таким чином, щоб обслуговуючий персонал мав інформацію про пошкодження, коли до виходу електродвигуна з ладу залишається ще 100–200 годин роботи. За цей час можна підготуватися до підйому агрегата зі свердловини на поверхню – забезпечити резервне водопостачання, знайти заміну агрегату чи вирішити питання з його ремонтом.

Пристрій КИ–6301 здійснює самоконтроль справності схеми й у разі виникнення в ній неполадок пуску агрегата не буде, тобто він не залишається без контролю його технічного стану.

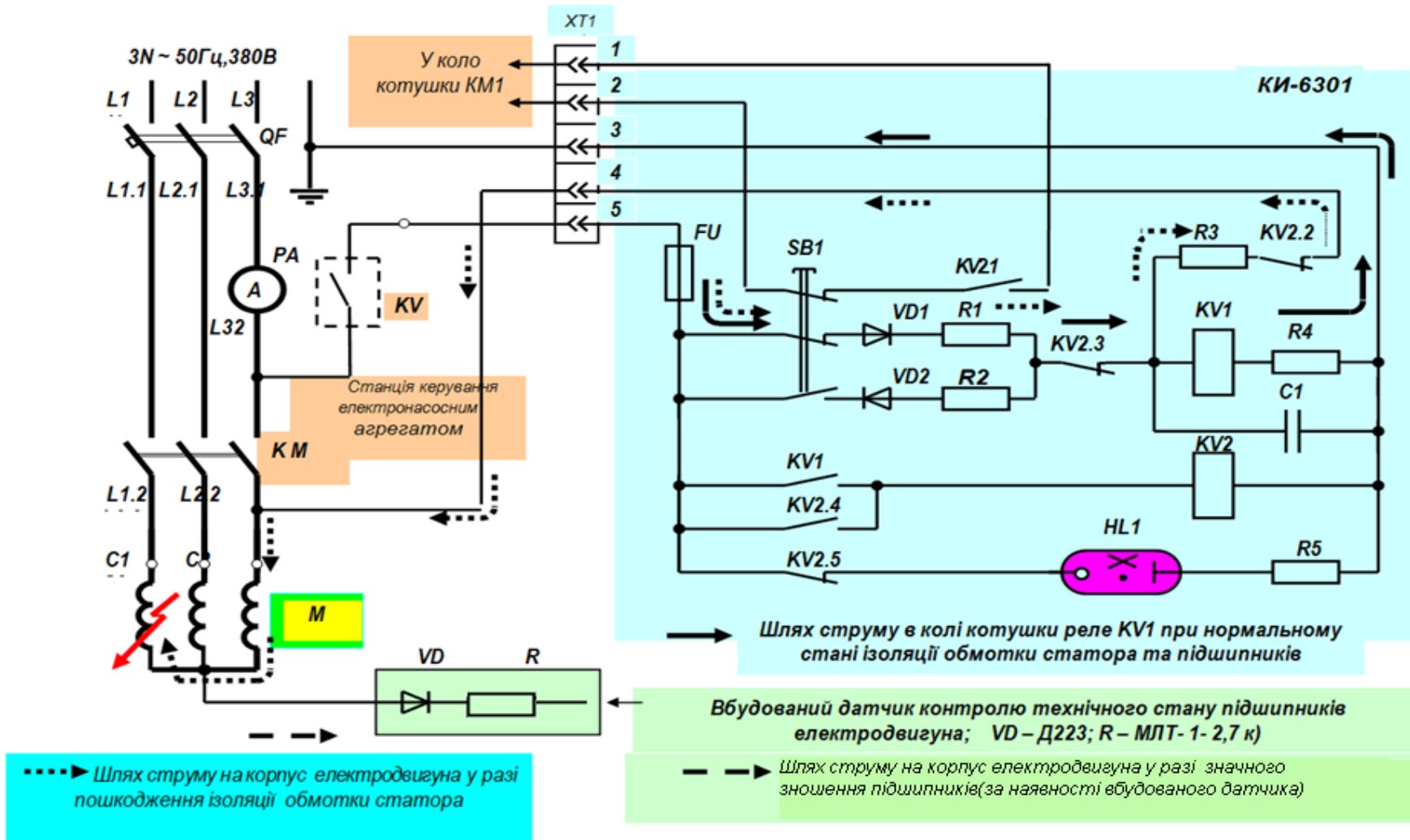


Рис. 2.16. Пристрій діагностування технічного стану занурювальних електродвигунів КИ-6301.
Схема електрична принципова

ЛІТЕРАТУРА

1. Ермолин Н. П. Надежность электрических машин / Н. П. Ермолин, И. П. Жерихин. – Л. : Энергия, 1976. – 248 с.
2. Куйбышев А. Б. Надежность асинхронных электродвигателей общепромышленного применения / А. Б. Куйбышев. – М. : Изд-во стандартов, 1972. – 104 с.
3. Котеленец Н. Ф. Испытание и надежность электрических машин : учеб. пособие для вузов по спец. «Электромеханика» / Н. Ф. Котеленец, Н. Л. Кузнецов. – М. : Высш. шк., 1988. – 232 с.
4. Рекомендации по организации ремонта и технического обслуживания электрооборудования на основе диагностирования. – М. : ГОСНИТИ, 1985. – 88 с.
5. Таран В. П. Диагностирование электрооборудования / В. П. Таран. – К. : Техніка, 1983. – 200 с.
6. Яцун М. А. Експлуатація та діагностування електричних машин і трансформаторів : навч. посібник / М. А. Яцун. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 180 с.

Додаток А

Методика повузлового діагностування асинхронних електродвигунів

Вузол електродвигуна	Діагностичний параметр	Метод діагностування
1. Обмотка статора	1.1. Опір ізоляції 1.2. Коефіцієнт абсорбції 1.3. Тангенс кута діелектричних втрат 1.4. Перевищення температури 1.5. Спектральний склад струму 1.6. Спектр вібрації елементів обмотки	1.1. Вимірювання опору ізоляції 1.2. Абсорбційний 1.3. Діелектричних втрат 1.4. Температурний 1.5. Спектральний 1.6. Віброакустичний
2. Ротор	2.1. Струм статора (живлення пониженою напругою і поворот ротора)	2.1. Повороту ротора
3. Підшипникові щити	3.1. Амплітуда віброприскорення 3.2. Опір постійного струму шару мастила між тілами ковзання і доріжкою 3.3. Температура зовнішніх кілець підшипника 3.4. Час вибігу ротора 3.5. Радіального переміщення ротора 3.6. Гармоніки струму статора 3.7. Повітряний зазор між статором і ротором	3.1. Вібраційний 3.2. Опору шару мастила 3.3. Температурний 3.4. Часу вибігу ротора 3.5. Переміщення ротора 3.6. Гармонічного аналізу 3.7. Вимірювання повітряного зазору

Додаток Б

Приладове забезпечення діагностування технічного стану асинхронних електродвигунів

Б.1. Індикатор дефектів обмоток електричних машин ИДО–05



Індикатор ИДО–05 забезпечує виявлення без демонтажу й розбирання електричної машини:

- міжвиткових замикань;
- обриву провідників;
- неправильного з'єднання схеми обмотки;
- незадовільного стану ізоляції обмоток щодо корпусу машини й між обмотками.

Принцип роботи індикатора:

– під час перевірки обмотки на наявність міжвиткових замикань, обриву провідників і на правильність з'єднання схеми порівнюються повні опори двох фаз обмотки під час підключення до них генератора височастотного стабілізованого струму. За наявності дефектів повні опори фаз обмотки й відповідно струми в них будуть різними;

– під час перевірки стану ізоляції обмоток щодо корпусу машини й між обмотками на обмотку подається напруга постійного струму й контролюється струм витoku.

Технічні характеристики:

1. Контрольовані параметри:
 - під час перевірки обмотки на наявність міжвиткових замикань, обриву провідників і на правильність з'єднання схеми *коефіцієнт несиметрії фазних струмів K_n* ;
 - під час перевірки стану ізоляції обмоток щодо корпусу машини й між обмотками *опір ізоляції $R_{із}$* ;
2. Діапазон вимірювання K_n , % 0–99;
3. Параметри вихідного змінного струму під час вимірювання K_n :
 - діюче значення, мА $1,5 \pm 0,15$;
 - частота, кГц 10 ± 1 ;
4. Чутливість (величина K_n під час замикання одного витка у фазі) не менше 5%;
5. Вихідна напруга постійного струму під час перевірки стану ізоляції обмоток щодо корпусу машини і між обмотками, В 1000 ± 100 ;
6. Індикація – світлодіодна й світлодіодна алфавітно-цифрова трирозрядна;
7. Живлення – автономне або від зовнішнього блока живлення $(7-1,2 + 1,6 \text{ В})$;
8. Споживана потужність не більше 3 Вт;
9. Маса не більше 0,5 кг;
10. Габарити 205x80x50 мм.

Б.2. Індикатор дефектів підшипників електричних машин ИДП-03



Індикатор ИДП-03 забезпечує виявлення:

- ступеню зношування доріжок і тіл кочення підшипників;
- режиму змащування доріжок і тіл кочення підшипників;

- теплового стану підшипника.

Індикатор дозволяє якісно оцінити стан підшипників кочення навантаженої електричної машини потужністю 400 кВт з частотою обертання до 6 000 об/хв.

Принцип роботи індикатора:

- під час перевірки доріжок і тіл кочення підшипників на зношування і режиму їх змащування порівнюються миттєві значення віброприскорення підшипникового щита навантаженої машини в місці, яке жорстко дотикається до зовнішнього кільця підшипника, з пороговими значеннями в двох найбільш інформативних для електричних машин діапазонах частот. При цьому факт досягнення відповідного порогового значення встановлюється за числом імпульсів віброприскорення щодо цього порогового значення за встановлений час вимірювання.

- під час перевірки теплового стану підшипника порівнюються значення температури підшипникового щита в місці встановлення підшипника з пороговими значеннями.

Технічні характеристики:

1. Контрольовані параметри:
 - під час перевірки доріжок і тіл кочення підшипників на зношування – віброприскорення;
 - під час перевірки режиму змащування доріжок і тіл кочення підшипників – віброприскорення;
 - під час перевірки теплового стану підшипника – температура;
2. Динамічний діапазон, дБ:
 - під час перевірки доріжок і тіл кочення підшипників на зношування: 63–90;
 - під час перевірки режиму змащування доріжок і тіл кочення підшипників: 3–80;
3. Контрольований діапазон частот, Гц:
 - під час перевірки доріжок і тіл кочення підшипників на зношування: 500–1200;
 - під час перевірки режиму змащування доріжок і тіл кочення: 8000–8500;
4. Індикація - світлодіодна й звукова;
5. Живлення - автономне або від зовнішнього блока живлення (7,2 (-1,2 + 1,6) В);
6. Споживана потужність не більше 1 Вт;
7. Маса не більше 0,5 кг;
8. Габарити 205x80x50 мм.

3. ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ АПАРАТІВ КЕРУВАННЯ І ЗАХИСТУ

- 3.1. Статистика та причини відмов апаратів керування і захисту
- 3.2. Обсяг і технології технічного діагностування апаратів керування і захисту
- 3.3. Тестовий контроль захисних апаратів

3.1. Статистика та причини відмов апаратів керування і захисту

Відмови апаратів керування і захисту можна розділити на дві групи:

- 1) *раптові* – виникають переважно за стрибкоподібної зміни одного чи кількох параметрів;
- 2) *поступові* – настають внаслідок зношування і старіння.

Найбільш уражуваними є контакти, обмотки котушок і механічна частина апаратів.

Відмови контактів є наслідком впливу комплексу експлуатаційних факторів – струму, напруги, частоти й характеру комутації, величини навантаження, умов навколишнього середовища, вібрації тощо. Вони становлять близько 40–60 % усіх відмов залежно від виду апарата. Найбільш прискорює зношування контактів *електрична дуга*, що супроводжує їх розмикання і призводить до оплавлення та випаровування контактних матеріалів. Поряд із цим електричне зношування контактів відбувається під час *підскакування* рухомих контактів від нерухомих під час їх з'єднання. Механічне зношування контактів спричиняється ударами й тертям контактних поверхонь. Відмови контактів апаратів з малим струмом часто настають внаслідок появи поверхневих окисних плівок.

Відмови обмоток котушок пов'язані з обривами та міжвитковими замиканнями. Обриви проводу виникають у місцях не якісно пропаяних з'єднань унаслідок вібрації та механічного впливу. Низька якість ізоляції обмоткового проводу в поєднанні зі струмовим перевантаженням (заклинювання, нещільне прилягання поверхонь осердя магнітопроводу) провокує міжвиткові замикання в обмотках. Ізоляція пошкоджується також за комутаційних перенапруг на затискачах котушок. Рідше виникає пробій ізоляції безкаркасних котушок на корпус апарата. За результатами досліджень різних науковців, встановлена лінійна залежність інтенсивності відмов котушок апаратів керування і захисту від напруги живлення, а також

чіткий зв'язок кількості відмов із збільшенням кількості циклів «увімкнення – вимикання» та з тривалістю роботи.

Відмови механічних систем апаратів (до 20 % усіх відмов) настають із зношуванням та руйнуванням деталей і вузлів, а також у разі перекосів, застрявань і заклинювань рухомої частини. В основному це поступові відмови за винятком незначної кількості раптових відмов у період приробітку.

У процесі експлуатації трапляються також обриви коротко замкнених витків на осерді апаратів змінного струму, а також послаблення чи руйнування пружин. Не досить довговічними є деталі апаратів керування і захисту, виготовлювані із широко застосовуваної пластмаси. Металеві ж деталі й вузли страждають від корозії, особливо в умовах високої вологості повітря та наявності в ньому хімічно активних реагентів.

3.2. Обсяг і технології технічного діагностування апаратів керування і захисту

Технічне діагностування апаратів керування і захисту включає себе такі операції:

- контроль технічного стану контактних систем;
- діагностування ізоляції котушок апаратів;
- перевірка напруги втягування та відпускання рухомих частин магнітопроводів електромагнітних апаратів;
- перевірка роботи розчіплювачів автоматичних вимикачів та електротеплових реле;
- тестовий контроль електронних захисних пристроїв.

Контроль технічного стану контактних систем. Стан контактних систем апаратів керування характеризують такі параметри:

- перехідний опір;
- розхил контактів;
- провал контактів;
- зусилля натискання контактів.

Перехідний опір залежить від струму, характеру навантаження, зусилля натискання контактів, навколишнього середовища тощо. На практиці рідше вдаються до вимірювання безпосередньо перехідного опору контактів, а оцінюють їх стан за величиною спаду напруги під час пропускання постійного струму від джерела живлення з напругою 3–6 В. Таке вбудоване джерело зокрема мають універсальні стенди сільського електрика конструкції МІІСП, УІССЭ, ІЗУН тощо.

Протікання через контакти випробувального струму, рівного номінальному, не має викликати на них спад напруги значенням понад:

- 110 мВ в автоматичних вимикачів та електромагнітних пускачів з номінальним струмом до 50 А;
- 70 мВ – відповідно в зазначених апаратах з номінальним струмом до 50 А;
- 10–20 мВ у апаратів із ковзними контактами (рубильники, пакетні вимикачі, перемикачі).

В апаратів, номінальний струм, яких перевищує 200 А, допускається вимірювати спад напруги під час пропускання через них струму, що становить не менше 20 % номінального. У такому разі для порівняння з допустимими значеннями виміряний спад напруги необхідно привести до номінального струму апарата за формулою

$$\Delta U_{\text{ном}} = \Delta U_{\text{вимір}} \cdot \frac{I_{\text{ном}}}{I_{\text{відм}}}, \quad (3.1)$$

де $\Delta U_{\text{вимір}}$ – виміряний спад напруги під час пропускання через контакти струму $I_{\text{вимір}}$.

Розхил контактів є найкоротшою лінією відходу А рухомого контакту 2 від нерухомого 1 (рис. 3.1). Розхил вимірюють шаблоном або металевою лінійкою. Нормальний розхил контактів захищає від підгоряння неробочу поверхню в момент замикання і розмикання.

Провал контактів (рис. 3.1) – це відстань, на яку зміститься замкнутий рухомий контакт при видаленні нерухомого контакту. Нормальний провал забезпечує надійну роботу контактів під час зношення губок. Провал регулюється положенням шпильок нерухомих контактів.

Провал контактів є параметром, що характеризує їх зношування – зменшення товщини контакту чи напайки, втрата форми контактної поверхні. У зношених контактів значно зменшується зусилля їх натискання, а це призводить до погіршення умов контактування і підвищення температури контактного з'єднання. В умовах експлуатації провал контактів може зменшуватися аж до виникнення відмов контактних систем. Значення провалу контактів у заданий момент часу з певною точністю можна розрахувати за формулою

$$P_t = P_0 - v \cdot t \quad (3.2)$$

де P_0 – початкове значення провалу контактів, мм;
 v – швидкість зміни провалу, мм/тис. годин (мм/тис. циклів);
 t – наробіток, тис. годин (тис. циклів).

Технології визначення провалу контактів для кожного із конструктивних виконань апаратів керування і захисту мають певні особливості, потребують застосування щупів та складання схем контролю моменту початку замикання контактів. Виміряні значення провалу порівнюються із допустимими, що наводяться в технічних умовах, каталогах тощо.

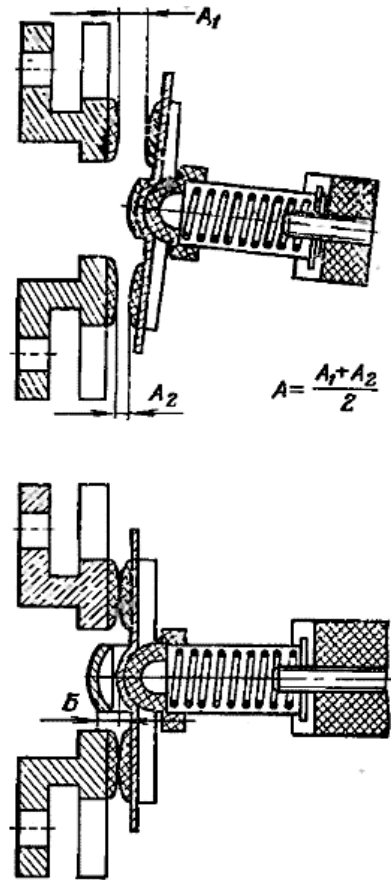
Зусилля натискання контактів (рис. 3.1) в умовах експлуатації апаратів керування є параметром, зменшення якого свідчить як про їх зношування, так і про погіршення стану контактних пружин. Відомо, що зменшення провалу контактів, яке характеризує їх зношування, завжди супроводжується зменшенням зусилля кінцевого натискання, що теж скорочує термін служби контактних систем. Втрата контактними пружинами пружних властивостей спричиняє невелике зменшення провалу контактів за значного зменшення зусилля кінцевого натискання. Зусилля початкового й кінцевого натискання контактів вимірюють динамометром за технологіями, розробленими з урахуванням конструктивних особливостей контактних систем, а регулюють його підкладанням шайб під контактну пружину.

Момент розмикання контактів визначають за допомогою сигнальної лампочки (світлодіода) з батарейкою. Початкове зусилля натискання контактів визначають також у такий спосіб (рис.3.2):

- між рухомим контактом та його упором закладають смужку цигаркового паперу, на контактні відмічають місце початкового зіткнення, а на рухомий контакт одягають петлю з ізоляційної стрічки.

- петлю зачіпають пружинним динамометром і відтягують у напрямку, перпендикулярному до поверхні контактів у місці початкового зіткнення доти, доки можна буде посунути папір, затиснений між рухомим контактом і його упором. Показання динамометра в цей момент є початковим зусиллям натискання контакту.

Занадто сильне натискання викликає підвищене зношування контактів і втрату їхньої швидкодії, а слабке не забезпечує надійного електричного з'єднання, що призводить до обгорання контактів.



a) б)

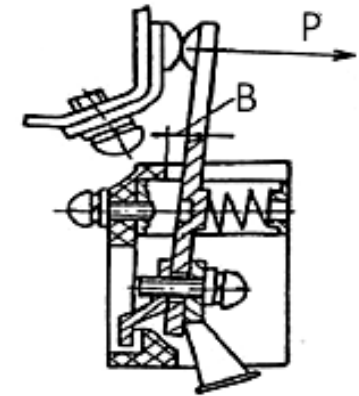
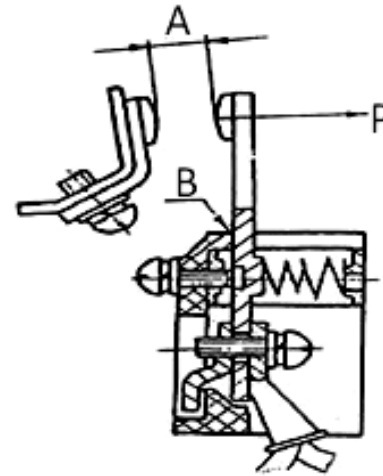


Рис. 3.1. Розхил (A), провал (B) і зусилля (P) натискання контактів електромагнітного пускача (а) із контактами мостикового типу та контактів електромагнітного контактора (б)

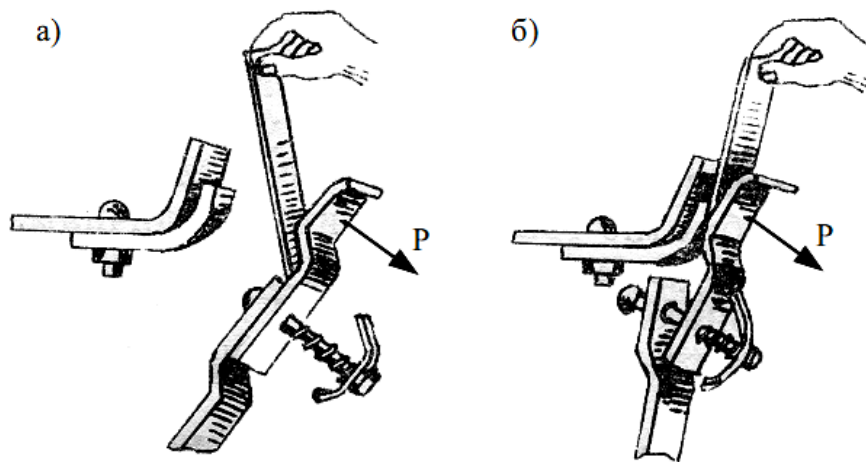


Рис. 3.2 Визначення початкового (а) та кінцевого (б) зусилля натискання головних контактів електромагнітного контактора

Працездатність апаратів керування, особливо застосовуваних у трифазних колах змінного струму, характеризує також неодночасність замикання контактів.

Діагностування ізоляції котушок апаратів. Однією із важливих діагностичних операцій є діагностування ізоляції котушок комутаційних апаратів, що зводиться до вимірювання опору ізоляції котушок відносно магнітопроводу чи заземлених частин апаратів та виявлення *міжвиткових замикань*. При цьому застосовуються мегаомметри й багато інших спеціальних пристроїв та схем, а також апарати ВЧФ-5-3 та ЕЛ-15.

Пристрій, зображений на рис. 3.3, є магнітною системою з двома розімкнутими магнітопроводами, які не мають магнітного зв'язку й розділені немагнітною прокладкою.

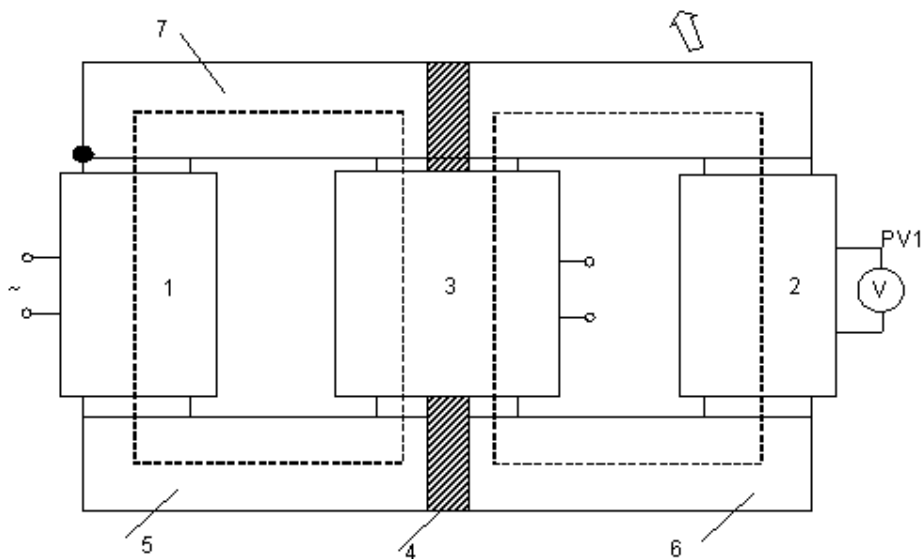


Рис. 3.3. Пристрій для виявлення короткозамкнених витків в обмотках котушок комутаційних апаратів: 1 – намагнічувальна котушка; 2 – вимірювальна котушка; 3 – котушка, що перевіряється; 4 – немагнітна прокладка; 5,6 – магнітопроводи; 7 – відкидний ярмір магнітопроводів

Котушку, яку діагностують, одягають на середній стержень магнітопроводу, а до вимірювальної котушки приєднують аналоговий чи цифровий вольтметр. Після замикання магнітопроводу подається напруга змінного струму на намагнічувальну обмотку і якщо в діагностованій котушці є короткозамкнені витки, у них під дією магнітного потоку індукуються електрорушійна сила й протікає струм. Створений цим струмом магнітний потік наводить у вимірювальній котушці ЕРС, яка фіксується вольтметром. У разі, коли діагностована котушка не має короткозамкнених витків, покази вольтметра будуть нульовими.

Універсальний пробник, схема якого наведена на рис. 3.4, дозволяє виявити короткозамкнені витки в котушках індуктивністю від 200 мкГн до 2 Гн, а також перевірити *p-n* переходи напівпровідникових приладів, резистори та конденсатори.

Під час перевірки котушок індуктивності, зокрема котушок електромагнітних пускачів і реле, перемикач SA1 встановлюють у положення «Пробник», а SA2 – в положення «2». Коли підключити справну котушку й встановити движок R1 у певне положення, миготить світлодіод HL1. Якщо в котушці, що перевіряється, є короткозамкнені витки, то світлодіод світиться постійно, а якщо є обрив, то не світиться.

Із застосуванням апарата ВЧФ–5–3 можна поряд із виявленням виткових замикань у котушках комутаційних апаратів провести випробування міжвиткової ізоляції напругою високої частоти.

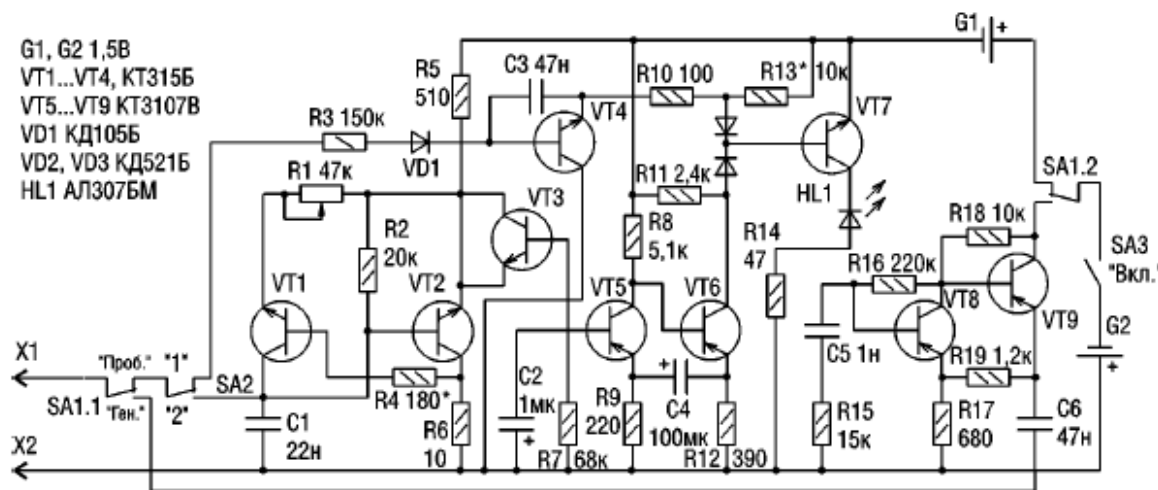


Рис. 3.4. Універсальний пробник для виявлення обривів і короткозамкнених витків у котушках

Перевірка напруги втягування та відпускання рухомої частини магнітопроводу. У електромагнітних реле, пускачів та контакторів проводиться контроль значень *напруги втягування та відпускання рухомої частини магнітопроводу*. Під час переміщення від руки рухома частина повинна мати вільний хід без застрявань, а з подачею на котушку номінальної напруги апарат повинен миттєво вмикатися.

Напругу втягування перевіряють, подаючи на котушку напругу, що становить 80 % номінальної. Після чіткого вмикання пускача (контактора) допускається помірний шум магнітної системи, що не переходить у дрижання.

Напругу відпускання перевіряють, знижуючи її від номінального значення до моменту відпускання рухомої частини магнітопроводу, значення напруги відпускання має бути не вищим 70 % номінальної напруги котушки комутаційного апарату. Водночас електромагнітний пускач, реле чи контактор не повинні вмикатися за напруги 60 % номінальної.

3.3. Тестовий контроль захисних апаратів

Перевірка роботи розчіплювачів автоматичних вимикачів та електротеплових реле. Перевірка роботи електромагнітних розчіплювачів полягає у визначенні струму їх спрацювання та порівнянні його з каталожними значеннями. Під час перевірки теплових розчіплювачів визначають час, за який вони спрацьовують при пропусканні більшого, ніж номінальний струму навантаження, користуючись *часострумовими (амперсекундним) характеристиками* конкретного типу вимикача (рис. 3.5, додаток А).

Зазначені перевірки відносяться до *методу фіктивних навантажень* і реалізуються із застосуванням універсальних стендів сільського електрика конструкції МИИСП, УИССЭ, 13УН. Ці ж стенди, а також спеціальні пристрої (рис. 3.6), застосовуються під час перевірки й регулювання електротеплових реле, час спрацювання яких має відповідати часострумовим захисним характеристикам.

Поряд із універсальними стендами сільського електрика, застосовуваними під час перевірки й налаштування розчіплювачів автоматичних вимикачів та електротеплових реле, розроблені спеціалізовані стенди, зокрема для випробування і регулювання фазочутливих пристроїв захисту ФУЗ.

Стенд, схема якого наведена на рис. 3.7, дозволяє моделювати навантажувальні та аварійні режими електродвигунів і, окрім випробувань працездатності та регулювання пристроїв ФУЗ, дає можливість визначити їх інерційність і час спрацювання. Схема контролю часу спрацювання містить секундомір Pt, керований виконавчим реле KV1, один із контактів якого KV1:3 шунтує накопичувальний конденсатор у схемі випробовуваного пристрою фазочутливого захисту ФУЗ–М. Для пуску схеми натискають кнопку S3, що вмикає реле KV1, яке своїми контактами KV1:2 вмикає секундомір, а контактами KV1:3 розшунтовує накопичувальний конденсатор. Із заряджанням конденсатора спрацьовує випробуваний пристрій захисту ФУЗ–М, а зупинений секундомір (напруга із схеми керування буде знята контактами ФУЗ–М, позначеними *p-p*) покаже час спрацювання пристрою. Випробування пристрою ФУЗ–М під час обриву фаз проводиться почерговим розмиканням вимикачів SA2–SA4.

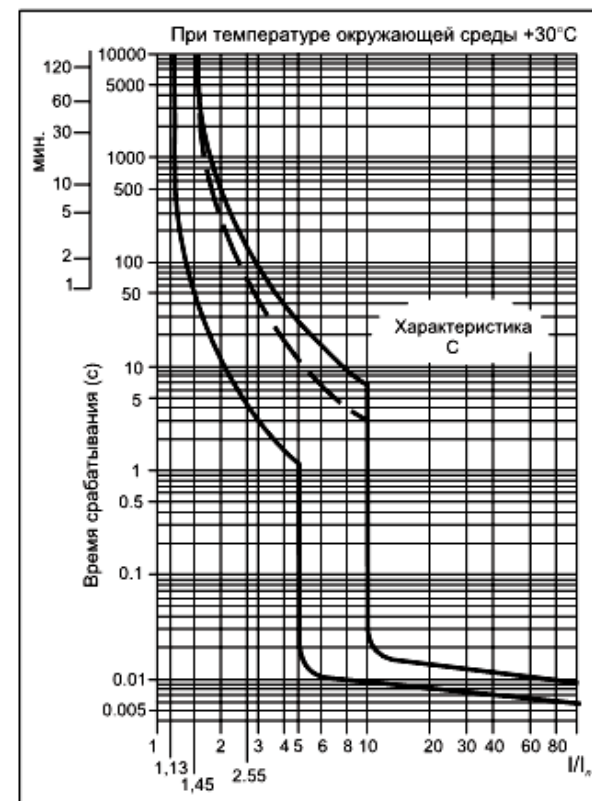
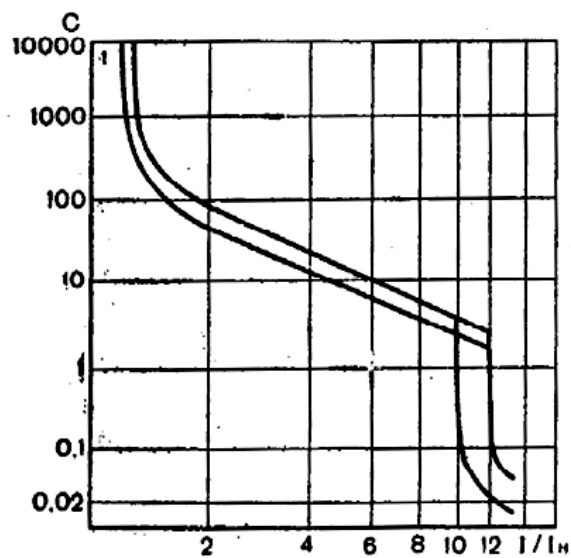
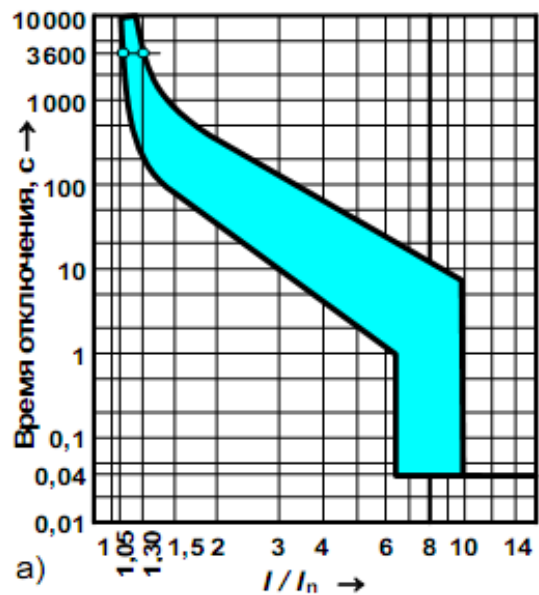


Рис. 3.5. Захисні часострумові характеристики автоматичних вимикачів:
а) ВА57–35; б) ВА 47; в) АЕ 20 (за документацією виробників)



Рис. 3.6. Модернізований універсальний стенд сільського електрика 13УН

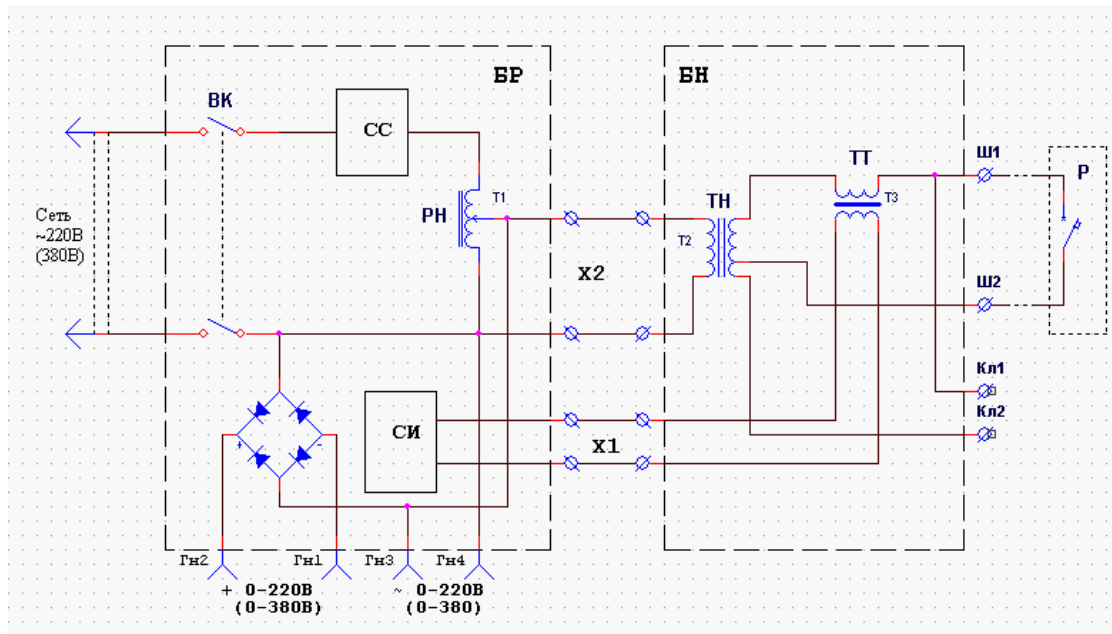


Рис. 3.7. Пристрій для перевірки струмових розчіплювачів автоматичних вимикачів УПТР–МЦ. Схема електрична принципова

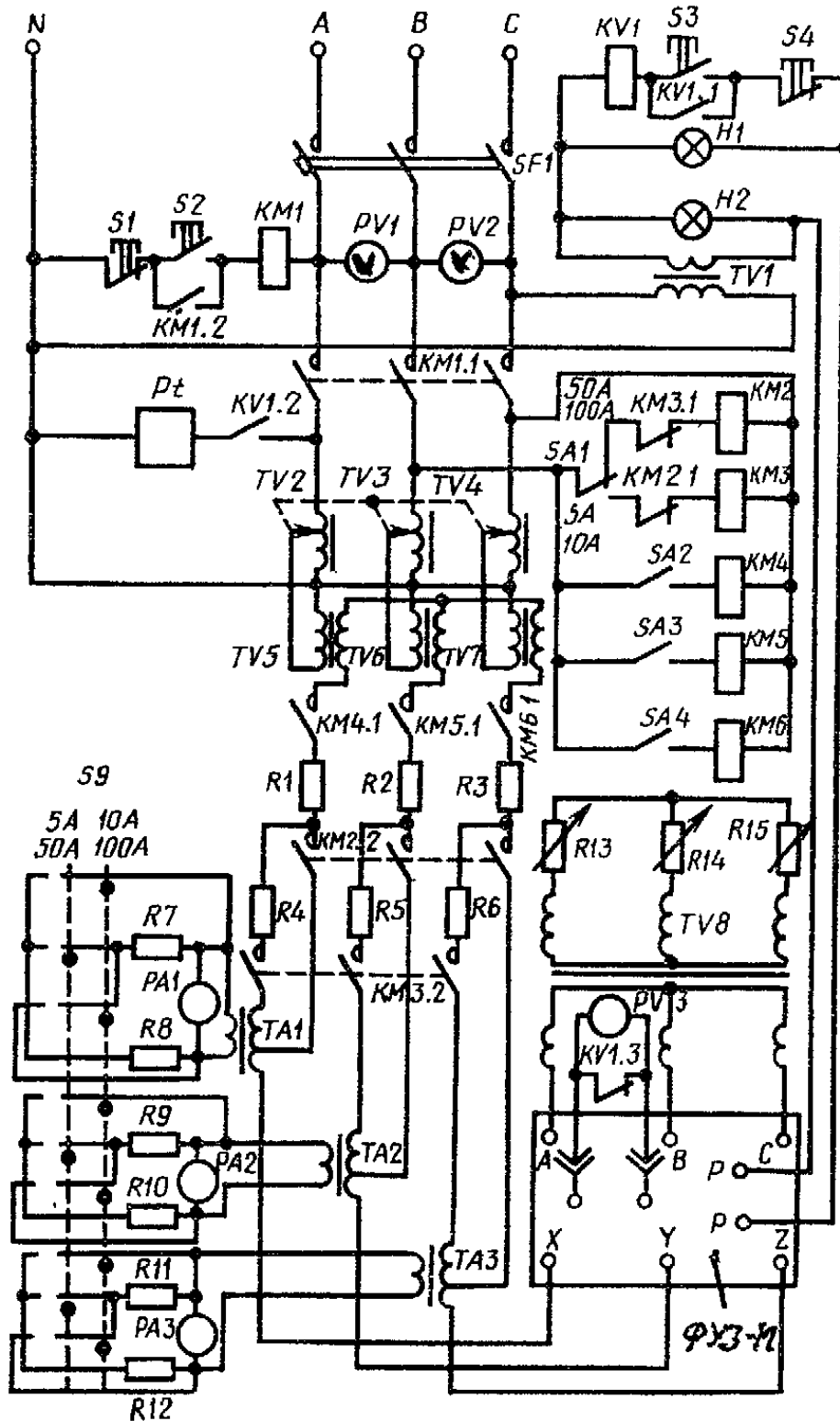


Рис. 3.7. Стенд для випробувань та регулювання фазочутливого пристрою захисту ФУЗ-М. Схема електрична принципова

ЛІТЕРАТУРА

1. Таран В. П. Диагностирование электрооборудования / В. П. Таран. – К. : Техніка, 1983. – 200 с.
2. Справочник по эксплуатации электрооборудования / В. П. Таран, В. К. Андриец, Н. А. Корчемный, А. В. Синельник ; под ред. В. П. Тарана. – К. : Техніка, 1985. – 184 с.
3. Новодворец Л. А. Проверка, регулировка, настройка контакторов переменного тока / Л. А. Новодворец. – М. : Энергия, 1979. – 96 с.
4. Новодворец Л. А. Регулировка и настройка магнитных пускателей переменного тока / Л. А. Новодворец. – М. : Энергия, 1974. – 88 с.
5. Клименко Б. В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навчальний посібник / Б. В. Клименко. – Харків : Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
6. ГОСТ 14312-79. Контакты электрические. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1980.-11 с.
7. ГОСТ 10434-82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования. М.: ФГУП «Стандартинформ», 1990.-14 с.

Додаток А

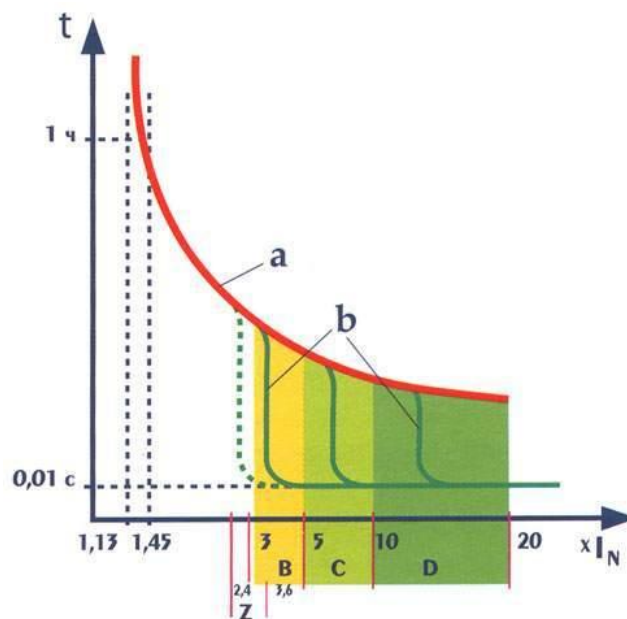
РОЗЧІПЛЮВАЧІ АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ

За стандартом EN 60898 захисна характеристика *теплого розчіплювача* автоматичного вимикача має відповідати таким вимогам (за умовної температури + 30 °С)

Струм, А	Час неспрацювання	Час спрацювання
$1,13 I_{ном}$	Не більше 1 години	
$1,45 I_{ном}$		Не більше 1 години
$2,55 I_{ном}$		1–60 с

За стандартом EN 60898 захисна характеристика *електромагнітного розчіплювача* автоматичного вимикача має відповідати таким вимогам (за умовної температури + 30 °С)

Тип захисної характеристики	Кратність струму спрацювання	Сфера застосування вимикача
Z	$(2,4-3,6) I_{ном}$	Електропроводки значної протяжності, напівпровідникові пристрої
B	$(3-5) I_{ном}$	Електроустановки, що не мають значних пускових струмів, зокрема електропроводки жилих будинків
C	$(5-10) I_{ном}$	Електроустановки з пусковими струмами, що перевищують номінальний струм у 5–10 разів
D	$(10-20) I_{ном}$	Електроустановки зі значними пусковими струмами



Захисні характеристики теплового (а) й електромагнітного (б) розчіплювачів

4. КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕКТРОНАГРІВНИХ ПРИСТРОЇВ, ОСВІТЛЮВАЛЬНИХ ТА ОПРОМІНЮВАЛЬНИХ УСТАНОВОК

- 4.1 Особливості експлуатації електронагрівного обладнання
- 4.2 Контроль технічного стану електрокалориферів
- 4.3 Контроль технічного стану електроводонагрівників
- 4.4 Особливості експлуатації освітлювальних
і опромінювальних установок
- 4.5 Контроль технічного стану освітлювальних
і опромінювальних установок
- 4.6 Стенд для перевірки люмінесцентних ламп
і пускорегулювальних апаратів

4.1 Особливості експлуатації електронагрівного обладнання

4.1.1 Загальні відомості

Питання обслуговування електронагрівного обладнання регламентовані комплексом таких документів:

- ПТЕ електроустановок споживачів;
- Система ПЗР і ТО електрообладнання сільськогосподарських підприємств;
- галузеві і нормативні документи;
- інструкції заводів-виробників.

Система ПЗР і ТО встановлює стосовно електронагрівного обладнання:

1) періодичність проведення ТО (3 місяці) і поточного ремонту (12 місяців);

2) трудомісткість одного технічного обслуговування і одного поточного ремонту залежно від:

- місткості бака для елементних ємнісних водонагрівників;
- продуктивності, л/годину для елементних водонагрівників;
- потужності кВт електродних водонагрівників та електродних парових котлів;
- потужності, кВт електрокалориферних установок.

Встановлені також типові обсяги робіт для ТО і ПР; норми витрат матеріалів і запасних частин на технічне обслуговування і поточний ремонт.

До робіт, що мають обов'язково виконуватися як під час обслуговування, так і ремонту відноситься вимірювання опору ізоляції. Система ПЗР і ТО встановлює його граничні значення:

1) для елементних ємнісних і проточних водонагрівників $R_{iz} > 1$ МОм;

2) для електродних водонагрівників $R_{iz} \geq 0,5$ МОм;

3) для електрокалориферних установок $R_{iz} \geq 1$ МОм;

У разі отримання менших значень опору ізоляції слід замінити пошкоджені деталі, висушити ізоляцію та герметизувати вивідні затискачі.

Під час експлуатації елементних водонагрівників особливу увагу слід приділяти нагрівним елементам - ТЕН'ам, що у переважній більшості випадків виходять з ладу з таких причин:

- із-за «сухого ходу», що може виникнути при несправному чи відсутньому зворотному клапані ємнісних нагрівників (або якщо розбірний кран встановлений на виході з бака); "сухий хід" у проточних нагрівників можливий якщо їх увімкнути при закритому вентилі живильного водопроводу;

- внаслідок появи накипу, що призводить до перегрівання ТЕН'а; накип інтенсивно відкладається за температури води понад 60 °С, а тому не слід занадто завищувати межі її регулювання; не рідше 2-х разів протягом року слід очищати ТЕН'и від накипу до залишкової товщини близько 2 мм; очищення проводиться: щіткою із сталюого дроту, 5 % розчином соляної кислоти і гасом; знайшла поширення ефективна технологія очищення ТЕН'ів за допомогою спеціальної установки, що має три місткості:

1) із 8 % розчином HCl;

2) із 10 % розчином каустичної соди CaCO₃;

3) із чистою водою.

Спочатку ТЕН на 15...20 хвилин занурюється у розчин соляної кислоти, далі на 2...3 хвилини у розчин каустичної соди, а потім ретельно промивається у воді.

Досить ефективним є застосування на живильних трубопроводах спеціальних протинакипних пристроїв, що випускаються промисловістю.

Пошкоджену поронітову прокладку між фланцем ТЕН'а і корпусом нагрівника можна замінити виготовленою із просоченого оліфою картону та рівномірно затягнути кріплення ТЕН'ів.

Слід періодично контролювати рівень напруги на затискачах ТЕН'ів та перевіряти роботоздатність регуляторів температури.

ТЕН'и не підлягають ремонту, а мають бути замінені новими (розрахунковий ресурс роботи становить 10000 годин).

Експлуатація електродних водонагрівників, електродних котлів та парогенераторів пов'язана із необхідністю реалізації режиму їх роботи із найменшим утворенням накипу та підтримання належного значення питомого опору води у замкнутому контурі. Категорично забороняється відбирання води безпосередньо із контуру (системи опалення), з цією метою мають бути встановлені теплообмінники.

Номінальний режим роботи електродних водонагрівників розрахований за умови певної температури води та її питомого опору (для електродного котла ЕПЗ-100И2 $\theta = 70...95$ °С; $\rho=20$ Ом·м).

4.1.2 Особливості експлуатації електрокалориферів

При роботі електрокалорифера (повітронагрівача) мають бути дотримані наступні вимоги:

- не допускається увімкнення електрокалорифера (повітронагрівача) при вимкненому вентиляторі, відповідне блокування необхідно перевіряти перед кожним увімкненням після простою більше доби;

- не допускається робота електрокалорифера (повітронагрівача) при температурі на поверхні оребрення електронагрівача вище 190°С;

- не рідше одного разу протягом місяця необхідно перевіряти стан контактів на виводах;

- контактні поверхні мають бути чистими, неокисленими, щільність контактних з'єднань має бути такою, аби не виникало іскріння;

- не рідше одного разу протягом місяця перевіряти опір ізоляції секції нагрівачів відносно корпусу електрокалорифера (повітронагрівача), цю перевірку слід виконувати перед кожним увімкненням після тривалого простою (більше 15 днів). Якщо опір ізоляції секції нагрівачів буде менше 0,5 МОм, необхідно підсушити ТЕНи. Бажано підсушування ТЕНів виконувати перед кожним увімкненням електрокалорифера (повітронагрівача) після тривалого простою (більше 3 місяців);

- не рідше одного разу протягом місяця необхідно перевіряти стан захисного заземлення;

- при профілактичному огляді електрокалорифера (повітронагрівача) не рідше одного разу протягом місяця, в міру

забруднення ТЕНів, необхідно виконувати їх механічне очищення або продування.

4.2 Контроль технічного стану електрокалориферів

Обсяг діагностування електрокалориферів у складі комплексу профілактичних заходів системи ПЗР і ТО електрообладнання визначається інформативними для оцінювання технічного стану діагностичними параметрами та відповідними контрольно-вимірювальними роботами(табл.4.1).

4.1. Діагностичні параметри для оцінювання технічного стану електрокалориферів

Вид контрольно-вимірювальних робіт	Діагностичний параметр
<i>Діагностування під час технічного обслуговування</i>	
Контроль технічного стану електрокалорифера	1.Опір ізоляції електронагрівних елементів 2.Температура повітря на виході із калорифера
<i>Планове діагностування</i>	
Контроль технічного стану електронагрівних елементів	1.Опір електронагрівних елементів 2.Опір ізоляції електронагрівних елементів 3.Струм, споживаний електронагрівними елементами
Контроль технічного стану регулятора температури	1.Температура спрацювання регулятора температури
Контроль технічного стану електродвигуна приводу вентилятора	За програмою планового діагностування асинхронних електродвигунів
<i>Діагностування при поточному ремонті</i>	
Контроль технічного стану електронагрівних елементів	1.Опір електронагрівних елементів 2.Опір ізоляції електронагрівних елементів
Контроль технічного стану регулятора температури	1.Температура спрацювання регулятора температури
Контроль технічного стану електродвигуна приводу вентилятора	За програмою діагностування асинхронних електродвигунів

Слід зазначити, що діагностування електрокалориферів потребує виявлення несправностей як електронагрівників(ТЕНів) у його складі, так і електродвигуна приводу вентилятора, зокрема схеми його керування.

У таблиці 4.2 наведені можливі несправності електрокалориферів і способи їх усунення.

4.2. Можливі несправності електрокалориферів і способи їх усунення

Найменування несправності, зовнішній її прояв і додаткові ознаки	Ймовірна причина несправності	Спосіб усунення несправності
Електрокалорифер (повітронагрівач) увімкнений, повітря нагрівається недостатньо	Порушений контакт в електричному колі термоелектронагрівників (ТЕНів). Перегоріли ТЕНи.	Вимкнути електрокалорифер з мережі, знайти ТЕНи, що перегоріли, і замінити їх
Електрокалорифер вмикається при вимкненому вентиляторі	Не спрацьовує блокування увімкнення електро-калорифера при вимкненому вентиляторі	З'ясувати несправність у схемі керування, усунути її і перевірити дію блокування

4.3 Контроль технічного стану електроводонагрівників

Обсяг діагностування електроводонагрівників стосується його основних конструктивних частин – електронагрівних елементів і терморегулятора і потребує визначення діагностичних параметрів під час виконання контрольно-вимірювальних робіт(табл.4.3).

4.3. Діагностичні параметри для оцінювання технічного стану електроводонагрівників

Вид контрольно-вимірювальних робіт	Діагностичний параметр
Діагностування під час технічного обслуговування	
Контроль технічного стану електроводонагрівника	<ol style="list-style-type: none"> 1. Перехідний опір між корпусом електроводонагрівника і шиною контуру заземлення 2. Опір ізоляції між корпусом електроводонагрівника (ізольованим) і контуром заземлення 3. Споживаний струм

Планове діагностування	
Контроль технічного стану електронагрівних елементів	1. Опір електронагрівних елементів 2. Опір ізоляції електронагрівних елементів 3. Опір ізоляції між корпусом електроводонагрівника (ізольованим) і контуром заземлення 4. Споживаний струм
Контроль технічного стану регулятора температури	1. Температура води на виході 2. Температура спрацювання регулятора
Діагностування при поточному ремонті	
Контроль технічного стану електронагрівних елементів	1. Опір електронагрівних елементів 2. Опір ізоляції електронагрівних елементів
Контроль технічного стану регулятора температури	Температура води на виході Температура спрацювання регулятора

4.4 Особливості експлуатації освітлювальних і опромінювальних установок

Обслуговування та ремонт освітлювальних та опромінювальних установок повинні здійснюватись з дотриманням вимог ПТЕ-2006 (п.6.11 «Електричне освітлення») і Системи ПЗР і ТО електрообладнання сільськогосподарських підприємств, що регламентують періодичність проведення обслуговування та поточного ремонту, а також за рекомендаціями заводів-виробників.

Встановлення та очищення світильників мережі електричного освітлення, заміну ламп, ремонт та огляд мережі електричного освітлення повинні виконувати за графіком оперативні, оперативно-ремонтні або спеціально навчені працівники.

Періодичність робіт з очищення світильників і перевірки технічного стану освітлювальних установок підприємства (наявність і цілість скла, ґраток і сіток, справність ущільнення світильників спеціального призначення тощо) повинна бути встановлена особою, відповідальною за електрогосподарство підприємства, з урахуванням місцевих умов. На ділянках, що піддаються підвищеному забрудненню, очищення світильників повинно виконуватись за окремим графіком.

Заміна ламп може виконуватись груповим або індивідуальним способом, який встановлюється конкретно для кожного підприємства у залежності від доступу до ламп і потужності освітлювальної

установки. У разі групового способу термін чергового очищення арматури повинен бути узгоджений з терміном групової заміни ламп.

Люмінесцентні лампи, що вийшли з ладу, лампи ДРЛ та інші, що містять ртуть, повинні зберігатися у спеціальному приміщенні. Їх необхідно періодично вивозити для подальшої демеркурізації до спеціальних організацій.

Огляд і перевірка мережі освітлення повинні проводитись у наступні терміни:

- перевірка дії автоматичного вимикача аварійного освітлення – не рідше, ніж один раз на місяць в денні години;
- перевірка справності аварійного освітлення у разі вимкнення робочого освітлення – два рази на рік;
- вимірювання освітленості робочих місць – під час вводу мережі в експлуатацію і в подальшому за потреби, а також після зміни технологічного процесу або переобладнання;
- випробування ізоляції стаціонарних трансформаторів місцевого і ремонтного освітлення із вторинною напругою 12 – 42 В – один раз на рік, переносних трансформаторів і світильників із вторинною напругою 12 – 42 В – два рази на рік.

Виявлені під час перевірки та огляду дефекти повинні бути усунені в найкоротші терміни.

Перевірка стану стаціонарного обладнання й електропроводки аварійного, евакуаційного та робочого освітлення, випробування та вимірювання опору ізоляції проводів, кабелів і заземлювальних пристроїв треба проводити під час введення в експлуатацію мережі електричного освітлення, в подальшому не рідше ніж один раз на три роки, а надалі - згідно з графіком, затвердженим особою, відповідальною за електрогосподарство підприємства, відповідно до додатку А(витяг із).

Система ПЗР і ТО встановлює періодичність технічного обслуговування(ТО) і поточного ремонту(ПР) освітлювальних і опромінювальних установок(таблиця 4.4)

Поряд з цим Система ПЗР і ТО встановлює нормативні значення трудомісткості виконання ТО і ПР залежно від умов навколишнього середовища та виду джерела світла і випромінювання. Наводяться також типові обсяги робіт з ТО і ПР та усереднені норми витрат матеріалів і запасних частин.

4.4. Періодичність технічного ТО і ПР освітлювальних і опромінювальних установок

Характеристика освітлювальної чи опромінювальної установки	Періодичність, місяців	
	ТО	ПР
1 Світильники у сухих та вологих приміщеннях	6	24
2 Світильники у сирих та особливо сирих приміщеннях	3	24
3 Світильники та опромінювачі у сирих та особливо сирих приміщеннях з хімічно-активним середовищем	3	12
4 Опромінювачі тепличні	6	12

Специфічною роботою у освітлювальних та опромінювальних установках є очищення світильників та опромінювачів, що має виконуватись як під час технічного обслуговування та ремонту, так і за необхідністю:

- у запилених приміщеннях не рідше 4-х разів протягом місяця;
- у приміщеннях із середнім виділенням пилу (майстерні, ферми) не рідше 3-х разів протягом місяця;
- в адміністративних приміщеннях, клубах, школах не рідше 2-х разів протягом місяця;
- в установках зовнішнього освітлення не рідше 3-х разів протягом року.

Не слід встановлювати до світильників лампи розжарювання більшої, ніж передбачено, потужності. У разі недотримання цієї вимоги світильники та проводи будуть перегріватися, що може призвести до короткого замикання та пожежі.

В установках з люмінесцентними лампами потрібно перевіряти як запалюються лампи. Напруга запалювання ламп з часом підвищується, а напруга запалювання стартерів знижується, що спричиняє тривале “блимання” ламп аж до виходу з ладу.

У процесі експлуатації освітлювальних та опромінювальних установок необхідно час від часу проводити контрольні вимірювання:

- освітленості за допомогою люксометрів (Ю – 116; Ю – 117 та ін.). Для газорозрядних ламп вводяться поправочні коефіцієнти: люмінесцентні лампи ЛБ - 1,1; ЛД - 0,9; ДРЛ - 1,2;
- ультрафіолетової опроміненості за допомогою уфиметрів УФМ - 71; УФ 73;
- фітоопроміненості за допомогою фітофотометрів ФФМ-71 чи фарометрів ФАР-75.

Слід зауважити, що рівень освітленості та опромінюваності значною мірою залежить від чистоти джерел оптичного випромінювання, а також деталей світильників та опромінювачів - відбивачі (рефлектори), захисне скло, екрани, решітки.

Поточний ремонт освітлювальних та опромінювальних установок за обсягом вміщує роботи з технічного обслуговування і додатково:

- заміну пошкодженої освітлювальної арматури;
- формування корпусів світильників та опромінювачів.

Під час експлуатації мають проводитись профілактичні випробовування освітлювальних та опромінювальних установок і, зокрема, вимірювання опору ізоляції $R_{із}$ - 1 раз протягом 2-х років за нормальних умов навколишнього середовища та щороку при важких умовах.

Особливої уваги заслуговує питання дотримання режимів опромінювання, що обумовлюються зооветеринарними та агротехнічними вимогами. У стаціонарних опромінювальних установках, виходячи із вказаних вимог, встановлюється висота підвішування, кількість і тривалість вмикань опромінювачів; у пересувних - висота підвішування та кількість послідовних проходів опромінювачів над тваринами чи рослинами.

Всі операції щодо увімкнення і вимикання опромінювальних установок (і тільки це) може здійснювати неелектротехнічний персонал, якому присвоєна 1-ша кваліфікаційна група з електробезпеки. Обслуговування і ремонт мають виконувати електромонтери (спеціально підготовлені) з кваліфікаційною групою не нижче III-ої.

Експлуатація освітлювальних та опромінювальних установок потребує суворого дотримання правил техніки безпеки. Світильники та опромінювачі повинні бути заземлені (занулені) і під'єднані до мережі через штепсельні розетки із заземлюючим контактом. Обов'язково мають бути розроблені і вивішені на видному місці правила безпечної експлуатації установок та інструкції для обслуговуючого персоналу.

При роботі з УФ-опромінювачами слід обов'язково застосовувати спеціальні захисні окуляри з увіолевим склом з метою запобігти кон'юктивіту очей. Для видалення озону та окисів азоту, що виділяються при роботі УФ-опромінювальних установок, приміщення слід ретельно провітрювати.

Заміна ламп, ремонт арматури мають проводитися тільки після повного зняття напруги.

У тепличних опромінювальних установках слід запобігати руйнуванню гарячих колб лампи бризками води при поливанні рослин. Лампу із пошкодженою колбою слід відразу замінити, оскільки без неї кварцева горілка дає небезпечний для людини потік ультрафіолетового випромінювання.

4.5 Контроль технічного стану освітлювальних і опромінювальних установок

Контроль технічного стану освітлювальних і опромінювальних установок спрямовується на виявлення та усунення несправностей застосовуваних світильників апаратів керування та захисту і освітлювальної електропроводки.

У таблиці 4.5 наведені можливі несправності освітлювальних установок з лампами розжарювання, їх причини та способи усунення, а у таблиці 4.6 подібні відомості стосовно установок з люмінесцентними лампами.

У таблиці 4.7 наведені вольт-амперні характеристики (ВАХ) дроселів, застосовуваних із люмінесцентними лампами.

4.5. Можливі несправності освітлювальних установок з лампами розжарювання, їх причини та способи усунення

Найменування несправності, зовнішній її прояв і додаткові ознаки	Ймовірна причина несправності	Спосіб усунення несправності
Освітлення не вмикається	1. Спрацьовує автоматичний вимикач при увімкненні: а) несправний автоматичний вимикач; б) коротке замикання в освітлювальній електропроводці або у світильнику 2. Лампа не торкається контактів у патроні: а) контакти відігнулись; б) контакти обгоріли або відломались 3. Несправна лампа 4. Несправний вимикач, що вмикає одну або кілька ламп	Відремонтувати або замінити автоматичний вимикач Знайти і усунути причину замикання Підігнути контакти Замінити патрон Замінити лампу Замінити вимикач

	5. Вискочили із затискачів або обгоріли провідники у патроні, вимикачі, автоматичному вимикачі, розподільчій коробці 6. Обрив кола в автоматичному вимикачі	Усунути несправність Замінити автоматичний вимикач
Лампа не запалюється	На патроні світильника з боку мережі живлення немає напруги, низька напруга мережі	Перевірити індикатором або тестером наявність і значення напруги живлення Відновити живлення

4.6. Можливі несправності освітлювальних установок з люмінесцентними лампами, їх причини та способи усунення

Найменування несправності, зовнішній її прояв і додаткові ознаки	Ймовірна причина несправності	Спосіб усунення несправності
Лампа не запалюється	1. На вході світильника немає напруги, або напруга є, але занадто низька	1. Перевірити мультиметром або індикатором наявність і значення напруги мережі З'ясувати причини відсутності напруги чи її занадто низького значення
При увімкненні світильника спрацьовує захист	1. Пробій конденсатора на вході світильника 2. Замикання в електричному колі за апаратом захисту 3. Лампа замкнула контакти в патроні своїм цоколем 4. Доторкання провідників у місці їх приєднання до патрона лампи	1. Замінити конденсатор 2. Виявити та усунути замикання 3. Відігнути контакти 4. Усунути несправність

Продовження таблиці 4.6

При увімкненні світильника перегорають спіральні нитки розігріву(катоди) лампи	1. Несправність дроселя (пошкоджена ізоляція або міжвиткове замикання в обмотці)	1. Перевірити дросель, зокрема виміряти опір ізоляції У разі виявлення несправностей замінити дросель
Лампа не запалюється, на її кінцях немає свічіння	1. Поганий контакт між штирками лампи і контактами патрону або між штирками стартера і контактами його тримача 2. Несправна лампа (обрив або перегорання спіральних ниток розігріву(катодів)) 3. Несправність стартера - стартер не замикає коло спіральних ниток розігріву(катодів) лампи 4. Несправність в електричній схемі світильника 5. Несправний дросель	1. Поворухити лампу і стартер для відновлення контакту 2. Встановити завідомо справну лампу 3. Якщо відсутнє свічіння в стартері, замінити стартер 4. Перевірити всі з'єднання в електричній схемі та відновити несправні 5. Перевірити і у разі несправності замінити дросель
Лампа не запалюється, кінці лампи світяться (нагріваються спіральні нитки розігріву(катоди))	1. Несправний стартер(злиплися (зварилися) контакти) або пробив конденсатор ³³ стартера 2. Замикання провідників, що йдуть до стартеротримача, або в самому тримачі	1. Замінити стартер 2. Перевірити наявність замикання та усунути у разі виявлення

³³ Конденсатор, включений паралельно стартеру, і конденсатори на вході схеми світильника призначені для зниження рівня радіоперешкод. Конденсатор, включений паралельно стартеру, крім того, сприяє збільшенню терміну служби стартера і впливає на процес запалювання люмінесцентної лампи, сприяючи значному зниженню імпульсу напруги в стартері (з 8000 -12 000 В до 600 - 1500 В) при одночасному збільшенні енергії імпульсу (за рахунок збільшення його тривалості).

Продовження табл иці 4.6

<p>Лампа блимає, але не запалюється, є червоне свічіння на одному кінці</p>	<p>1. Помилки в електричній схемі 2. Замикання в електричному колі або патроні, яке може закорочувати лампу</p> <p>3. Замикання виводів електродів лампи</p>	<p>1. Лампу вийняти і вставити, помінявши місцями її кінці. Якщо світиться спіральна нитка розігріву (катод), який раніше не світився, то лампа справна, а відсутній контакт у патроні 2. Якщо свічіння відсутнє на тому ж кінці лампи, перевірити, чи є замикання в патроні з боку спіральної нитки розігріву(катода), що не світиться 3. Якщо замикання є, замінити лампу 4. Якщо замикання не виявлене, перевірити схему з'єднань у світильнику</p>
<p>Лампа блимає, але не запалюється Тривале блимання лампи призведе до псування її або стартера і дроселя, а також може спричинити пожежу</p>	<p>1. Несправний стартер 2. Несправна лампа 3. Помилки в електричній схемі світильника 4. Занижена напруга мережі живлення</p>	<p>1. Перевірити стартер і у разі несправності замінити 2. Перевірити лампу. Несправну лампу замінити 3. Перевірити схему 4. Перевірити мультиметром напругу мережі</p>
<p>1. Ослабли або окислились затискачі в колах живлення світильника, затискачі дроселя, патронів світильника, контакти стартеротримача 2. Обрив у дроселі або в конденсаторі баластного опору 3. Несправний стартер</p>		<p>1. Перевірити затискачі і контакти та відновити їх нормальний стан 2. Замінити дросель чи конденсатор 3. Перевірити стартер і у разі несправності замінити</p>

<p>4. Несправна лампа Цілісність її спіральних ниток розігріву(катодів) можна перевірити, глянувши на її торець через скло балону. Чорний наліт на кінцях трубки лампи свідчить про витрати активного шару катодів</p> <p>5. Вплив низької температури навколишнього повітря</p>		<p>4 Замінити несправну лампу</p> <p>5. Якщо температура навколишнього повітря нижче допустимої для люмінесцентної лампи, встановити світильник з іншим джерелом світла(лампа розжарювання, світлодіодна лампа)</p>
<p>При увімкненні світильника на кінцях лампи спостерігається помаранчеве свічіння, яке через деякий час зникає і лампа далі не запалюється</p>	<p>1. Несправна лампа, (всередину лампи попало повітря)</p>	<p>1. Замінити лампу</p>
<p>Лампа поперемінно запалюється і гасне</p>	<p>1. Несправна лампа</p>	<p>1.Замінити лампу Якщо блимання продовжується, то замінити стартер</p>
<p>Лампа запалюється, але через декілька годин роботи з'являється почорніння її кінців</p>	<p>1. Несправність дроселя Передчасне потемніння кінців лампи може бути викликане низькою якістю її катодів</p>	<p>1. Тестером перевірити величину пускового і робочого струму, якщо ці величини перевершують нормовані значення(табл.4.5), замінити дросель</p>
<p>Лампа запалюється, але при її горінні починається обертання розрядного шнура та з'являються спіральні і рмієподібні смуги, що переміщуються (явище «шнурування» розряду)</p>	<p>1. Несправність дроселя: струм лампи занадто великий</p>	<p>1. Кілька разів запалити і погасити лампу, обернути її в патронах довкола її осі на 180° і ще раз кілька разів запалити і погасити. Якщо «шнурування» розряду не зникає, замінити дросель</p>

Продовження табл иці 4.6

Зміна кольору свічення лампи	1. Зміна складу люмінофору при великому терміні служби лампи	1. Замінити лампу
Гудіння світильника	1. Вібрація пластин магнітопроводу дроселя	1. Замінити дросель
Нагрівання спалимих поверхонь, на яких кріпиться світильник	1. Нагрівання дроселя	1. Встановити азбестові підкладки під світильник або залишити повітряний проміжок під світильником

4.7. Вольт-амперні характеристики(ВАХ) дроселів³⁴

Номинальна потужність лампи, Вт	Напруга лампи, В			Робочий струм лампи, А			Пусковий струм лампи, А	
	мін.	номін.	макс.	мін	номін.	макс.	номін.	макс.
15	55	57	62	0,28	0,3	0,31	0,43	0,49
20	59	63	68	0,32	0,35	0,37	0,54	0,6
30	105	110	120	0,3	0,32	0,34	0,44	0,5
40	110	115	125	0,39	0,41	0,44	0,57	0,65

3.6 Стенд для перевірки люмінесцентних ламп і пускорегулювальних апаратів

Стенд дозволяє перевіряти люмінесцентні лампи потужністю 18(20)Вт, 36(40)Вт, а також пускорегулювальні апарати, зокрема дроселі і стартери.

Принципова електрична схема стенду наведена на рис. 3.1.

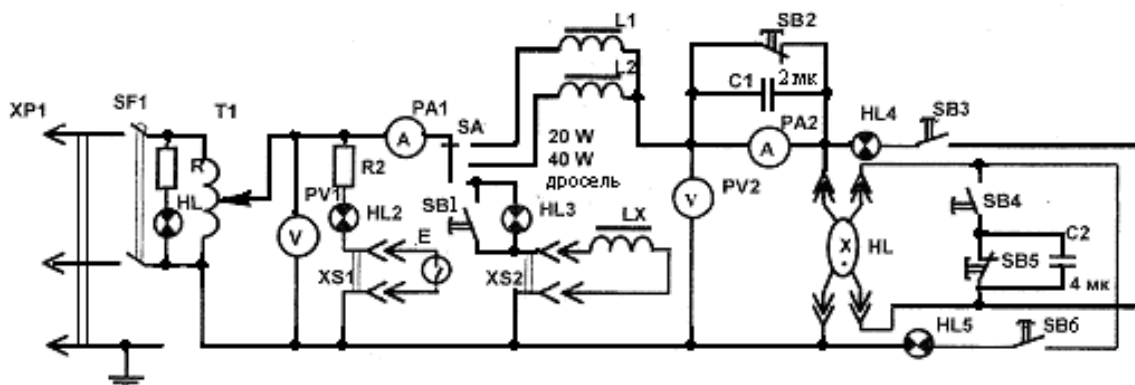


Рис.3.1. Стенд для перевірки люмінесцентних ламп і пускорегулювальних апаратів

³⁴ Для люмінесцентних ламп іншої потужності ВАХ дроселів слід шукати у документації виробників та в довідковій літературі, використовуючи зокрема ресурси мережі Internet

Принцип дії універсального стенду ілюструється принциповою електричною схемою і полягає у виконанні таких операцій:

- перевірка цілісності ниток розжарювання люмінесцентних ламп потужністю 18 (20) Вт і 36 (40) Вт;
- пробне запалювання люмінесцентних ламп із дроселями, вмонтованими в стенд;
- вимірювання споживаного лампою струму і напруги на лампі в момент запалювання та в робочому режимі;
- форсоване запалювання люмінесцентних ламп;
- перевірка наявності випрямляючого ефекту люмінесцентних ламп;
- перевірка справності стартерів;
- перевірка цілісності обмотки дроселів;
- вимірювання опору ізоляції дроселів з використанням струмовимірювальних кліщів з мегометричною приставкою (можлива заміна на мегаомметр);
- перевірка придатності до використання за спеціальними схемами живлення люмінесцентних ламп з обірваними (перегорілими) нитками розжарювання.

ЛІТЕРАТУРА

1 Кнорринг Г.М. и др. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г.М.Кнорринг, И.М.Фадин, В.Н.Сидоров. – 2 – е изд., перераб. и доп. СПб,: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отд-ние, 1992.- 448 с.

2 Кнорринг Г.М. Осветительные установки. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981.- 288 с.

3 Лурье М.Г. и др. Устройство, монтаж и эксплуатация осветительных установок. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.:Энергия, 1976.- 264 с.

4 Давиденко Ю.Н. Настольная книга домашнего электрика: люминесцентные лампы. – СПб.: Наука и техника, 2005.- 224 с.

5 Федоров В.В. Люминесцентные лампы. –М.: Энергоатомиздат, 1992.- 128 с.

5. КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ ТА ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМ

- 5.1. Перевірка напівпровідникових діодів, диністорів, стабілітронів, тиристорів і симісторів
 - 5.1.1. Перевірка напівпровідникових діодів
 - 5.1.2. Перевірка диністорів
 - 5.1.3. Перевірка стабілітронів
 - 5.1.4. Перевірка тиристорів і симісторів
- 5.2. Перевірка транзисторів
 - 5.2.1. Перевірка біполярних транзисторів
 - 5.2.2. Перевірка польових транзисторів
- 5.3. Контроль технічного стану інтегральних мікросхем
 - 5.3.1. Контроль аналогових інтегральних мікросхем
 - 5.3.2. Контроль цифрових інтегральних мікросхем
- 5.4. Спеціалізоване приладове забезпечення для тестування напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем

5.1. Перевірка напівпровідникових діодів, диністорів, стабілітронів, тиристорів і симісторів

5.1.1. Перевірка напівпровідникових діодів

Напівпровідникові діоди характеризуються різко нелінійною вольтамперною характеристикою, а тому їх прямий і зворотний струми за однакової прикладеної напруги різні. На цьому базується перевірка діодів омметром – вимірюються прямий і зворотній опори діода. Прямий опір вимірюється підключенням позитивного й негативного затискачів омметра (мультиметра в режимі вимірювання опору), заздалегідь встановленого на шкалу $R \times 100$, відповідно до позитивного (анод) і негативного (катод) виводів діода. Вимірний опір повинен становити від 500 до 600 Ом для звичайних кремнієвих діодів і від 200 до 300 Ом для германієвих діодів, а для випрямних діодів (германієвих або кремнієвих) через їх великий розмір опір нижчий, ніж у відповідних звичайних діодів. Високовольтні діоди складаються з декількох діодів, сполучених послідовно, тому під час вимірювання їх опір виявляється вищим.

Для вимірювання зворотного опору діода (перевірки на коротке замикання або струм витікання) потрібно перемкнути омметр на високоомну шкалу й поміняти місцями його виводи. Низький опір вкаже на коротке замикання або підвищений струм витікання діода. У

германієвих діодів зворотний опір складає від 100 кОм до 1 МОм, кремнієві діоди мають вищий зворотний опір, який може досягати 1000 МОм. У випрямних діодів, які мають р-п переходи великої площі, струми витоку більші. У пробитого діода прямий і зворотний опір дорівнює нулю. Якщо діод обірваний, обидва опори нескінченно великі.

Вказати заздалегідь значення прямого й зворотного опорів або їх співвідношення не можна, оскільки вони залежать від прикладеної напруги, а ця напруга в різних омметрів (авометрів, мультиметрів) і на різних межах вимірювання різна. Проте в справного діода зворотний опір має бути більшим прямого. Відношення зворотного опорю до прямого в діодів, розрахованих на низьку зворотну напругу, велике (може бути більше 100). У діодів, розрахованих на велику зворотну напругу, це відношення виявляється незначним, оскільки зворотна напруга прикладена до діода омметром, мала порівняно з тією зворотною напругою, на яку він розрахований. Оскільки напівпровідникові діоди не є підсилювальними приладами, простої перевірки омметром на коротке замикання, обрив або підвищений струм витікання цілком достатньо, аби судити про їх працездатність.

Цифровим приладом у режимі омметра перевірити р-п перехід не вдасться. Тому в більшості сучасних цифрових мультиметрів є спеціальний режим перевірки р-п переходів (на перемикачі режимів він відмічений знаком « \rightarrow »). У цьому режимі цифровий мультиметр працює як джерело стабільного струму величиною 1 мА (такий струм проходить через контрольоване коло), що абсолютно безпечно для р-п переходу, що перевіряється. Під час підключеного перевірного діода прилад показує напругу на відкритому р-п переході в мілівольтах: для германієвих діодів у межах 200–300 мВ, а для кремнієвих – 550–700 мВ. Виміряне значення може бути не більше 2000 мВ.

Високовольтні діодні стовпи в такий спосіб перевірити неможливо, оскільки вони складаються з багатьох послідовно включених діодів. Сумарне падіння напруги на переходах може складати десятки вольт. Для їх контролю буде потрібне джерело живлення з більшою напругою, ніж падіння напруги на переходах (зазвичай досить джерела напругою 30–40 В) (рис. 5.1).

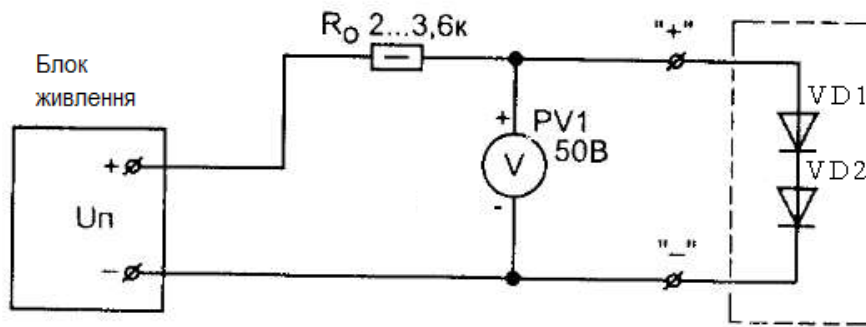


Рис. 5.1. Схема підключення високовольтних діодів для перевірки

5.1.2. Перевірка диністорів

Диністори (некеровані тиристори)³⁵ можуть бути перевірені так, як і діоди, якщо напруга відкриття диністора менша напруги на затискачах омметра. Якщо ж вона більша, диністор під час підключення омметра не відкривається й омметр в обох напрямках показує дуже великий опір. Проте, якщо диністор пробитий, омметр це реєструє нульовими значеннями прямого й зворотного опорів.

Більш повну інформацію про справність диністора можна отримати, застосувавши схему, наведену на рис. 5.2. Перевірку диністорів за цією схемою проводять так: поступово збільшуючи напругу, визначають напругу відкриття диністора V_{S1} , а, поступово зменшуючи, – напругу його закриття.

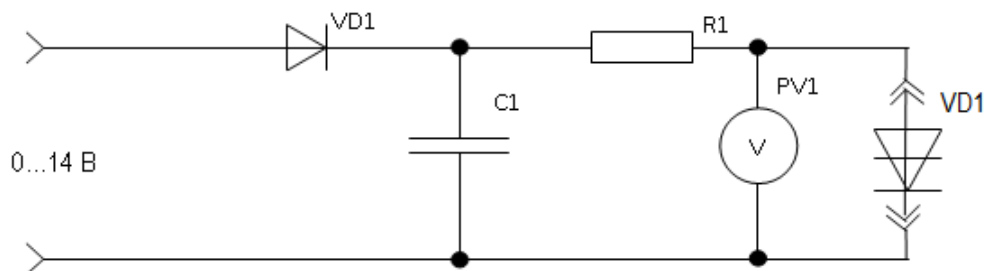


Рисунок 5.2 – Принципова електрична схема перевірки диністорів

³⁵ Диністори є чотиришаровими напівпровідниковими приладами із структурою p-n-p-n. Він працює як пара взаємозв'язаних транзисторів p-n-p і n-p-n провідностей.

Як і всі тиристори, диністори мають тенденцію до того, щоб залишатися в одному з двох станів: у включеному стані – після того, як транзистори починають проводити – або вимкненому – після того, як транзистори переходять в стан відсічки. Для того, щоб диністор почав проводити струм необхідно підняти напругу «анод–катод» до рівня напруги включення або ж має бути перевищена критична швидкість наростання напруги «анод–катод». Для виключення диністора, необхідно зменшити його струм до рівня, нижчого за його поріг напруги виключення.

5.1.3 Перевірка стабілітронів

Для того, щоб оперативно визначити обрив, коротке замикання або підвищений струм витікання стабілітрона, потрібно підключити омметр у прямому напрямі, як для звичайного діода (п. 5.1.1). Проте така перевірка, хоч і є корисною, не дає головної інформації про стабілітрон, а саме: чи стабілізує він напругу на заданому рівні? Перевірка стабілізуючої функції стабілітрона виконується за допомогою регульованого джерела живлення, доповненого вольтметром і міліамперметром для вимірювання напруги стабілізації і струму, що протікає через стабілітрон (рис. 5.3). Для перевірки слід приєднати до виходу джерела живлення випробовуваний стабілітрон послідовно із струмообмежувальним резистором і повільно підвищувати вихідну напругу, поки через стабілітрон не потече заданий струм.

Примітка. Максимальний струм стабілізації можна дізнатися за довідником – його перевищувати не можна. Більшість поширених стабілітронів мають номінальний струм стабілізації 1–30 мА, але починають стабілізувати напругу вже за мінімального струму в 0,5–1 мА.

Далі, підключивши вольтметр паралельно стабілітрону, потрібно виміряти напругу стабілізації. Змінюючи струм через стабілітрон в один і в інший бік від заданого значення, можна переконатися в тому, чи нормально працює стабілітрон – тоді напруга повинна залишатися постійною.

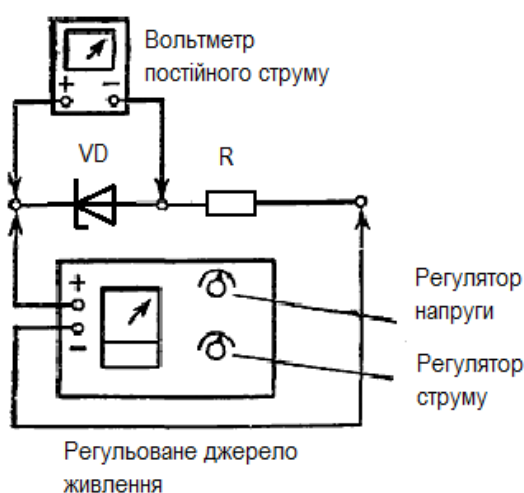


Рис. 5.3. Схема перевірки стабілітронів

Найзручніше перевіряти стабілітрони, якщо є джерело зі стабілізованим струмом – потрібно всього 1–10 мА. Під час струму 1 мА можна перевіряти практично будь-який стабілітрон. У цьому випадку стабілітрон або стабістор підключається безпосередньо до джерела струму (додатковий резистор не ставиться) – на справному елементі буде номінальна напруга стабілізації, яку краще вимірювати цифровим вольтметром.

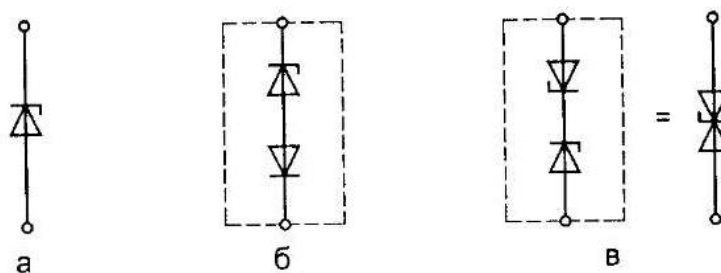


Рис. 5.4. Внутрішня будова стабілітронів: а) звичайного; б) прецизійного; в) симетричного

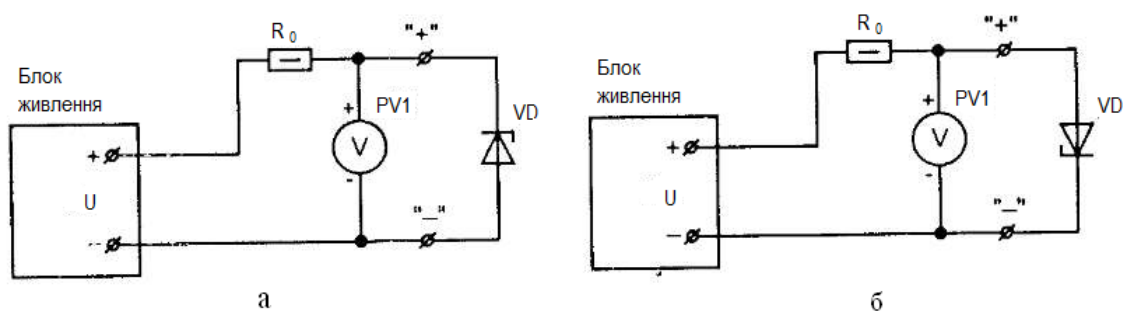


Рис. 5.5. Схема підключення для перевірки: а) стабілітрона; б) стабістора³⁶

Як відомо, стабілітрон – це той же діод, але з точнішою (нормованою) зворотною характеристикою, тому його можна

³⁶Стабістор – напівпровідниковий діод, у якому для стабілізації напруги використовується пряма гілка вольт-амперної характеристики (тобто в ділянці прямого зсуву напруга на стабісторі мало залежить від струму). Відмінною особливістю стабісторів порівняно із стабілітронами є менша напруга стабілізації, яка складає приблизно 0,7 В. Послідовне з'єднання двох або трьох стабісторів дає можливість отримати подвоєне або потроєне значення напруги стабілізації. Деякі типи стабісторів – це єдиний набір з послідовним з'єднанням окремих елементів.

Стабісторам властивий негативний температурний коефіцієнт опору, тобто напруга на стабісторі за незмінного струму зменшується із збільшенням температури. У зв'язку з цим стабістори використовують для температурної компенсації стабілітронів з позитивним коефіцієнтом напруги стабілізації.

перевіряти як звичайні діоди. Але не всі справні стабілітрони вдається продзвонити омметром (мультиметром). Наприклад, прецизійні й симетричні стабілітрони мають особливості внутрішньої будови, які показані на рис. 5.4, що не дозволяють це зробити. Для їх перевірки потрібне джерело напруги, рівень якої перевищує напругу стабілізації хоч би на 1/3 її значення. Стабілітрон підключається до джерела через додатковий струмообмежувальний резистор (R_0) номіналом 1–2 кОм (рис. 5.5).

5.1.4. Перевірка тиристорів і симісторів

Для перевірки тиристорів³⁷ плюсовий вивід омметра (мультиметра в режимі вимірювання опору) слід підключити до його анода, а мінусовий – до катода (рис. 5.6). Вимірювальний прилад при цьому повинен показувати дуже великий опір, майже рівний безкінечності (частіше понад 1 МОм). Малий або нульовий опір вказує на замикання (пробій) тиристора. Потім потрібно замкнути виводи анода й управляючого електрода триністора, що має викликати різке зменшення опору, оскільки триністор при цьому відкривається. Якщо після цього відключити управляючий електрод від анода, не розриваючи кола, що сполучає триністор з омметром, для багатьох типів триністорів омметр продовжуватиме показувати низький опір відкритого триністора. Це відбувається в тих випадках, коли анодний струм триністора виявляється більшим так званого струму утримання. Триністор залишається відкритим обов'язково, якщо анодний струм більший гарантованого струму утримання. Ця вимога є достатньою, але не необхідною. Окремі екземпляри тиристорів одного й того ж типу можуть мати значення струму утримання значно менше гарантованого. У цьому випадку триністор під час відключення управляючого електрода від анода залишається відкритим. Але якщо при цьому він закривається та омметр показує великий опір, не можна вважати, що триністор несправний.

³⁷Тиристор – напівпровідниковий прилад, який виконаний на основі монокристала напівпровідника з трьома або більше р-п переходами й має два стійкі стани: закритий стан, тобто стан низької провідності, і відкритий стан, тобто стан високої провідності. Тиристор можна розглядати як електронний вимикач (ключ). Основне застосування тиристорів – керування потужним навантаженням за допомогою слабких сигналів, а також перемикальні пристрої. Існують різні види тиристорів, які підрозділяються, головним чином, за способом управління і за провідністю. Відмінність за провідністю означає, що бувають тиристори, які проводять струм в одному напрямі (триністори) й у двох напрямках (симістори, симетричні диністори).

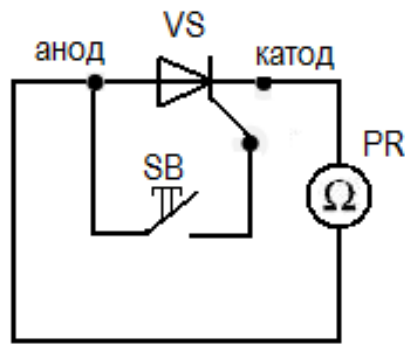


Рис. 5.6. Схема перевірки тиристорів за допомогою омметра

Якщо від'єднати від омметра (мультиметра) анод або катод тиристора, а потім знову підключити виводи омметра до анода й катода, він не повинен показувати жодного кінцевого опору, поки управляючий електрод знову не буде з'єднаний з анодом.

Серед багатьох способів перевірки працездатності тиристорів набув також поширення спосіб із застосуванням двох стрілочних тестерів, що працюють у режимі омметра. Вимірювальні прилади підключаються до тиристора, як це показано на рис. 5.7. Опір між анодом і катодом тиристора має бути безкінечно великим до моменту, доки не буде підключений провідник від другого омметра до управляючого електроду (із дотриманням полярності, вказаної на рисунку). За рахунок напруги, що надходить з омметра, справний тиристор відкривається і його опір між анодом і катодом з нескінченності різко зменшується до десятків Ом.

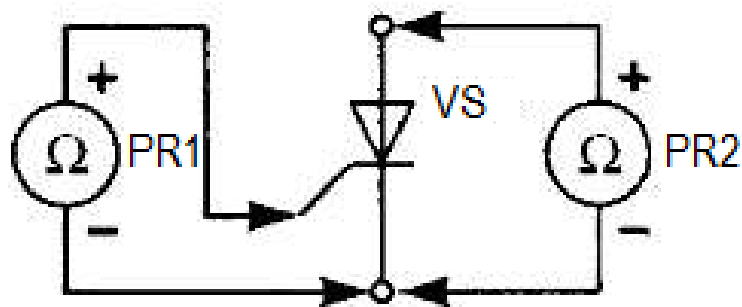


Рис. 5.7. Схема для перевірки тиристорів за допомогою двох омметрів (використовуються прилади на межах вимірювання $\times 10$ кОм або $\times 100$ кОм)

Слід зазначити, що для описаних перевірок не обов'язково випаювати тиристор (симістор) із схеми (якщо він там вже встановлений), а досить відключити від кіл схеми лише управляючий

електрод. Це особливо зручно, коли треба перевіряти силові ключі у складі промислового устаткування – там, аби дістатися до елементів, потрібно зняти потужні радіатори й ряд інших вузлів, що заважають проведенню перевірки.

5.2. Контроль технічного стану транзисторів

5.2.1. Перевірка біполярних транзисторів

Еквівалентна схема біполярного транзистора – це два діоди, включених назустріч один одному. Для р-п-р транзисторів ці еквівалентні діоди сполучені катодами, а для п-р-п транзисторів – анодами (рис. 5.8).

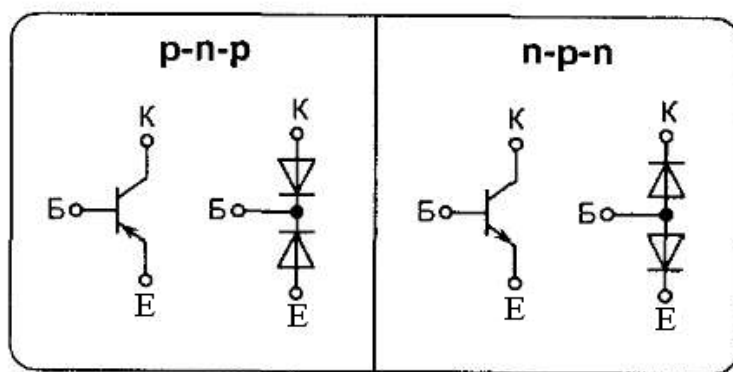


Рис. 5.8. Діодні еквіваленти переходів біполярних транзисторів різної провідності

Таким чином, перевірка транзистора омметром зводиться до перевірки обох р-п переходів транзистора: колектор – база й емітер – база (табл. 5.1).

Для перевірки прямого опору переходів р-п-р транзистора мінусовий вивід омметра (мультиметра в режимі вимірювання опору) підключається до бази, а плюсовий по черзі до колектора й емітера. Для перевірки зворотного опору переходів р-п-р транзистора до бази підключається плюсовий вивід омметра. Під час перевірки п-р-п транзисторів підключення виконується навпаки: прямий опір вимірюється під час з'єднання з базою плюсового виводу омметра, а зворотний опір – під час з'єднання з базою мінусового виводу.

У справного транзистора прямі опори переходів складають 30–50 Ом, а зворотні 0,5–2 МОм. За значних відхилень цих величин транзистор можна вважати несправним. Якщо у справних малопотужних транзисторів зворотні опори переходів у багато разів більші їх прямих опорів, то в потужних транзисторів це відношення не настільки велике, проте омметр дозволяє їх розрізнити.

Під час пробою переходу транзистора його прямий і зворотний опори виявляються рівними нулю. Під час обриву переходу його прямий опір нескінченно великий.

Якщо назва транзистора, нанесена на його корпусі, стерлася або її немає, тоді для визначення цоколівки й типу провідності транзистора можна скористатися омметром. Спочатку потрібно визначити базовий вивід транзистора, для цього плюсовий щуп приладу (у положенні вимірювання малих опорів) підключають до одного з виводів транзистора, а мінусовий – по черзі до двох інших. Якщо прилад в обох випадках показує високий опір або в одному низький, а в іншому високий, то його плюсовий щуп потрібно підключити до іншого виводу й знову виміряти опір між ним та іншими двома виводами, поки не вдасться знайти вивід, що має малий опір порівняно з двома іншими виводами. Знайдений таким чином вивід є базовим, а транзистор має провідність типу n-p-n. Якщо знайти базовий вивід не вдається, необхідно змінити полярність підключення приладу, щоб знайти базовий вивід транзистора типу p-n-p.

Для визначення виводів емітера й колектора малопотужних транзисторів плюсовий щуп приладу підключають до орієнтовного виводу колектора, а мінусовий – до орієнтовного виводу емітера n-p-n транзистора. Між орієнтовним виводом колектора й базовим виводом включають резистор опором 1 кОм і вимірюють величину опору колектор–емітер. Після цього міняють місцями виводи емітера й колектора та знову вимірюють опір. Плюсовий щуп приладу буде з'єднаний з колектором для випадку, коли опір між емітером і колектором виявиться меншим.

Омметр допомагає визначити якість (ефект підсилення) транзистора. Для цього один щуп омметра поміщають на емітер, а інший – на колектор. Омметр покаже деяке значення опору. Під час закорочування бази на емітер вимірюваний приладом опір має зрости, а під час замикання бази на колектор – зменшитись (рис. 5.9).

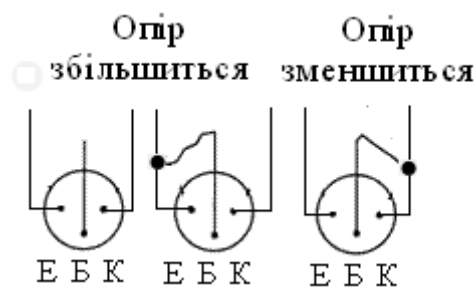


Рис. 5.9. Перевірка транзистора на «псевдо підсилення»

Якщо під час перевірки зворотного колекторного переходу його значення змінюється, то такі транзистори «пливуть», тобто їхні параметри нестабільні в процесі роботи й до використання вони не рекомендуються.

Одним із широко застосовуваних способів перевірки біполярних транзисторів без випаювання їх зі схеми є вимірювання омметром опору між виводами емітера й колектора при з'єднанні бази з колектором і з емітером. При цьому джерело колекторного живлення відключається від схеми. За справного транзистора в першому випадку омметр покаже малий опір, в другому – порядку декілька сотень тисяч або десятків тисяч Ом.

Звичайно виявлений у пасивному режимі перевірки факт наявності двох справних переходів і відсутність пробою між емітером і колектором не гарантує, що такий транзистор буде здатен підсилювати сигнал (два діоди, сполучені за еквівалентною схемою, це робити не можуть), але вірогідність того, що транзистор справний, досить велика. За статистикою найчастіше несправність біполярного транзистора викликана або коротким замиканням між виводами або ж обривом.

Для перевірки транзисторів в активному режимі можна зібрати спеціальну схему з використанням трививідного п'єзовипромінювача, застосовуваного в простих телефонних апаратах. Власне схема (рис. 5.10) – це автогенератор, у якому зворотний зв'язок з виходу підсилювального елемента на його вхід здійснюється через п'єзовипромінювач.

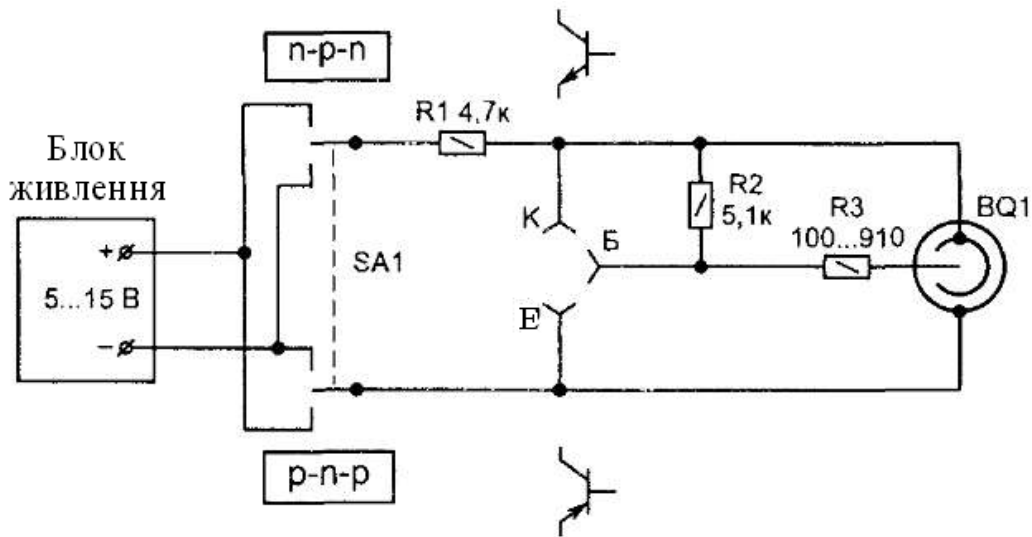





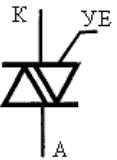

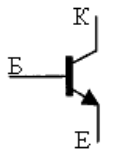

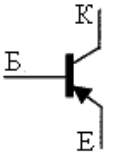


Рис. 5.10. Тестер для перевірки біполярних транзисторів малої потужності в активному режимі

5.1. Перевірка діодів, стабілітронів і тиристорів за допомогою омметра (мультиметра в режимі вимірювання опору)

Тип приладу	Зовнішній вигляд	Зображення на схемі	Контакти для приєднання тестера	Вимірний опір	
				прямий	зворотній
Діод			Анод – Катод	Малий	Великий
Стабілітрон			Анод – Катод	Малий	Великий
Симістор			Анод Катод	∞	∞
			Анод – управляючий електрод	∞	∞
			Катод – управляючий електрод	Близько 0	Близько 0

5.2. Перевірка біполярних транзисторів за допомогою омметра (мультиметра в режимі вимірювання опору)

Транзистор n-p-n			База – Колектор	Малий	Великий
			База – емітер	Малий	Великий
			Колектор – емітер	∞	∞
Транзистор p-n-p			База – Колектор	Великий	Малий
			База – емітер	Великий	Малий
			Колектор – емітер	∞	∞

Якщо транзистор несправний, звукового сигналу не буде. Окрім простоти, перевага цієї схеми полягає в тому, що вона дозволяє перевіряти біполярні транзистори будь-якої провідності – для цього досить поміняти полярність подавання живлення від джерела за допомогою здвоєного трипозиційного тумблера SA1. Помилкове подавання живлення не приведе до пошкодження транзистора.

Для контролю будь-яких біполярних транзисторів середньої і великої потужності можна скористатися схемою, показаною на рис. 5.11, яка також є схемою типового автогенератора, що працює у звуковому діапазоні. Оскільки в цій схемі позитивний зворотний зв'язок, необхідний для самозбудження, отримується за рахунок фазового зсуву напруги у вторинній обмотці трансформатора, важливо дотримуватися фазування підключення обмоток. Якщо генерації немає, то слід поміняти місцями виводи в одній з обмоток трансформатора.

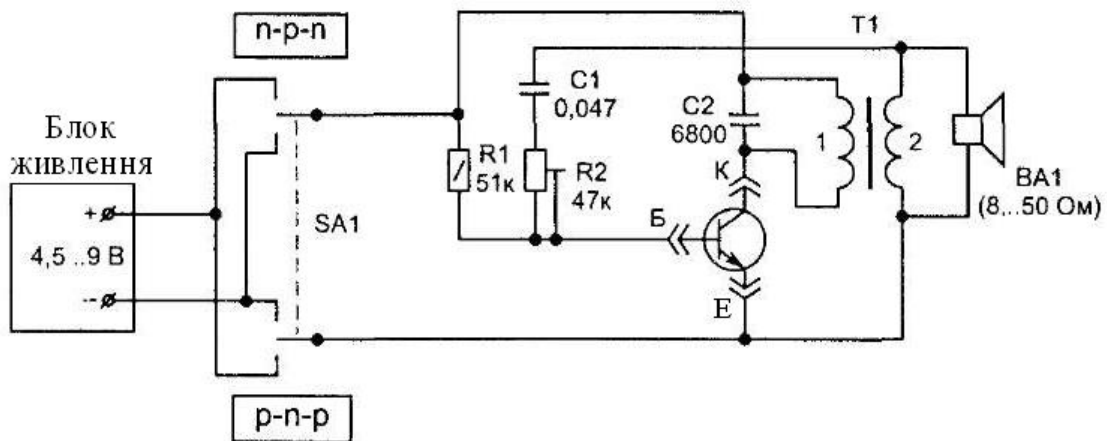


Рис. 5.11. Тестер для перевірки потужних біполярних транзисторів в активному режимі

Під час збирання схеми номінали елементів не критичні. Резистор R2 повинен мати шкалу – це дозволить проводити підбір транзисторів за максимальним коефіцієнтом підсилення (підсилення тим більше, чим при більшому опорі відбувається зрив генерації).

5.2.2. Перевірка польових транзисторів

Під час перевірки *польових транзисторів*³⁸ треба враховувати, до якого саме їх видів відноситься перевірюваний напівпровідниковий прилад. Так, для перевірки транзисторів, що мають затвор на основі замочного шару р-n переходу, можна скористатися еквівалентною схемою, наведеною на рис. 5.12.

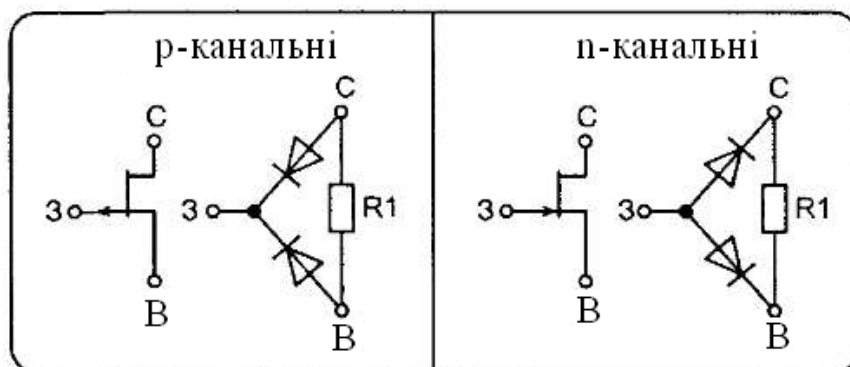


Рис. 5.12. Діодно-резистивний еквівалент п-каналних і р-каналних польових транзисторів

Польовий транзистор з управляючим р-n переходом можна перевірити за допомогою омметра аналогічно біполярному транзистору, причому необхідно перевірити лише один р-n перехід між затвором і витоком або між затвором і стоком. Для перевірки підійде звичайний стрілочний омметр (мультиметр), але з цифровим приладом у режимі контролю р-n переходів працювати зручніше.

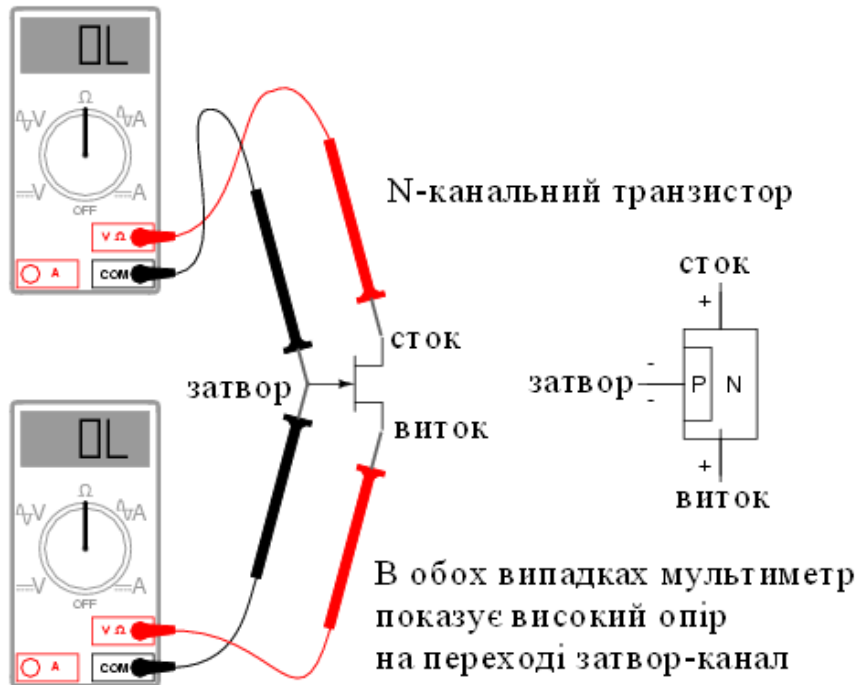
Прямий опір польового транзистора може бути вимірний низьковольтним омметром на шкалі $R \times 100$. При цьому необхідно приєднати мінусовий вивід омметра до затвору, а плюсовий до стоку

³⁸Польовий транзистор – напівпровідниковий прилад, у якому струм змінюється в результаті дії перпендикулярного струму електричного поля, що створюється вхідним сигналом. Протікання в польовому транзисторі робочого струму обумовлене носіями заряду лише одного знаку (електронами або дірками), тому такі прилади часто включають у ширший клас уніполярних електронних приладів (на відміну від біполярних). Від біполярного транзистора польовий транзистор відрізняється, по-перше, принципом дії: у біполярному транзисторі керування вихідним сигналом здійснюється вхідним струмом, а в польовому транзисторі – вхідною напругою або електричним полем

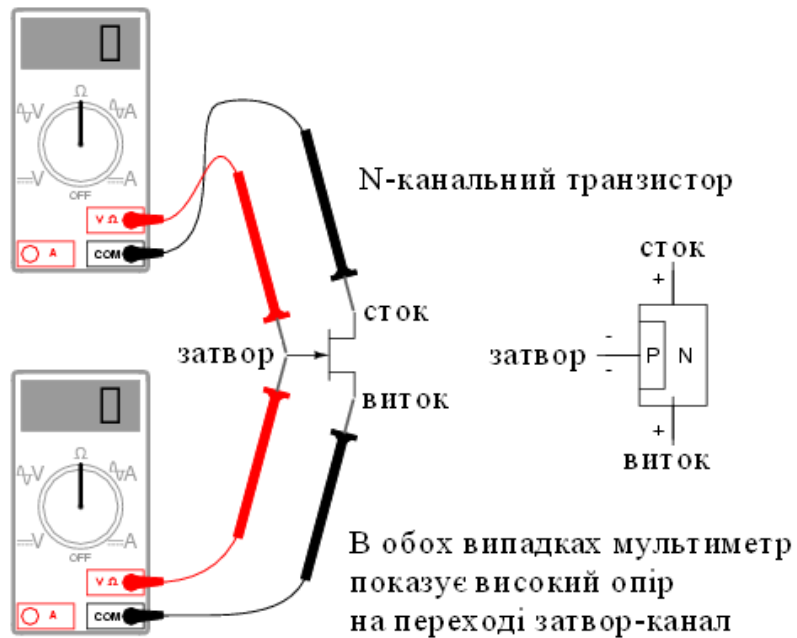
Польовий транзистор з управляючим р-n переходом – це польовий транзистор, затвор якого ізолюваний (тобто відокремлений в електричному відношенні) від каналу р-n переходом, зміщеним у зворотному напрямі.

Польовий транзистор з ізолюваним затвором (МДП-транзистор) – це польовий транзистор, затвор якого відокремлений в електричному відношенні від каналу шаром діелектрика.

або витоку, якщо перевіряється транзистор з каналом n-типу. Якщо ж перевіряється транзистор з каналом р-типу, то слід змінити полярність.



а



б

Рис. 5.13. Перевірка польового транзистора n-канального типу

Для того, щоб виміряти *зворотний опір* польового n-канального транзистора, потрібно приєднати плюсовий вивід омметра до затвору,

а мінусовий до витоків або стоку. Прилад повинен показати майже безкінечний опір. Низький опір свідчить про витік або коротке замикання у транзисторі. Для перевірки р-канального транзистора необхідно змінити полярність.

Омметр (на шкалі $R \times 100$) покаже результати, аналогічні вимірюванням під час перевірки діода (великий/малий опір) між стоком і затвором. Подібним же чином перевіряється перехід витік–затвор. Великі величини опору, виміряні омметром, в обох випадках вказують на обрив у транзисторі, а малі – на замикання (рис. 5.13).

Під час перевірки опору між витком і стоком слід обов'язково зняти заряд із затвора транзистора, накопичений після попередніх вимірювань (короткочасно замкнути затвор із витком), а то можна отримати результат, що не повторюється. У справного транзистора омметр під час включення між витком і стоком показує малий опір за будь-якої полярності. Слід пам'ятати про те, що статична електрика може пошкодити під час перевірки якийсь із переходів польового транзистора.

Багаточисельний клас MOSFET-транзисторів³⁹ (призначених для роботи в ключовому режимі) не має р-п-переходів між електродами (польові транзистори з ізолюваним затвором). Із-за великого опору діелектричного шару в затворі, якщо транзистор явно не пробитий (для виявлення цього продзвонювання все ж не завадить), переконатися у його працездатності не вдасться – прилад покаже нескінченно великий опір. Для перевірки таких транзисторів можна скористатися однією з приставок, показаних на рис. 5.14.

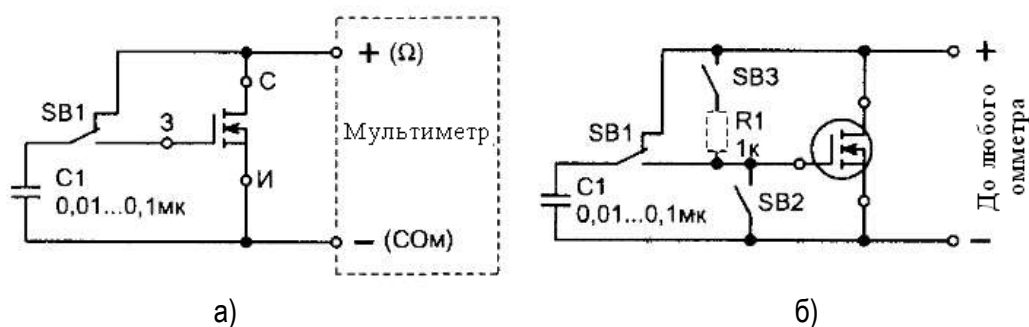


Рис. 5.14. Приставки для перевірки MOSFET-транзисторів (польових транзисторів з ізолюваним затвором): а) цифровим мультиметром у режимі продзвонювання діодів; б) стрілковим омметром (тестером)

³⁹ Міжнародний термін – MOSFET (metal-oxide-semiconductor field effect transistor) щодо польових МОП (метал-оксид-напівпровідник) транзисторів (МОПТ), як економічніших в порівнянні з біполярними транзисторами напівпровідникових приладів. Інколи вживається назва МДП (метал-діелектрик-напівпровідник) – транзистори.

Для зручності підключення до виводів транзистора можна скористатися гніздами контактної колодки типу СНП64–96Р (або СНП34С–135Р) і будь-якими мініатюрними кнопками. Схема може підключатися до цифрового мультиметра в режимі перевірки діодів або ж до будь-якого іншого джерела з вихідною напругою не вище 9 В (в останньому випадку в коло затвора транзистора включається світлодіод АЛ307БМ (або подібний) і струмообмежувальний резистор опором 200–560 Ом). Можна використовувати також і стрілочний омметр у режимі вимірювання опору в кілоомах.

У схемі (рис. 5.14 а), поки кнопка SB1 не натиснута, на конденсаторі С1 відбувається накопичення заряду – справний транзистор у цей час має бути закритий – мультиметр покаже нескінченність. Натиснення на кнопку призводить до відкривання транзистора за рахунок напруги з конденсатора С1, що відразу буде видно за показами приладу (або світінням світлодіода). Причому через наявність у польового транзистора з ізолюваним затвором своєї значної вхідної ємності й дуже малого витоку він залишиться відкритим і після того, як буде відпущена кнопка (порогова напруга відкривання транзисторів зазвичай складає 2–4 В). Але в цьому випадку конденсатор С1 тепер уже підключиться до малої напруги, яка діє на стоці відкритого транзистора, і розрядиться до рівня менше 1 В. Під час повторного натиснення на кнопку цієї напруги буде вже недостатньо для підтримання транзистора у відкритому стані. Наявний заряд затвора буде знятий, і транзистор закриється. Таким чином, власне перевірка здійснюється із застосуванням тригера, керованого перемиканням від однієї кнопки, який дозволяє перевірити роботу польового транзистора в ключовому режимі.

Схема на рис. 5.14 б більш універсальна й містить другу кнопку SB2, яка під час натиснення розряджає ємність затвора, замикаючи його на загальний провідник, що дозволяє вимкнути транзистор (тобто повністю закрити), незалежно від положення кнопки SB1. Така можливість може знадобитися під час перевірки цифрових польових ключів (у них порогова напруга близько 1 В).

У багатьох потужних MOSFET-транзисторах між стоком і витоком є вбудований зворотньо включений (паралельно) діод. Такий перехід поводить як звичайний діод, якщо змінити полярність живлення – це треба знати, щоб помилково не прийняти транзистор за пробитий. У наявності такого діода і його справності можна переконатися за допомогою мультиметра.

Універсальним за своїми можливостями є пробник для перевірки польових транзисторів (рис. 5.15), що дозволяє перевіряти працездатність польових транзисторів:

- з р-п переходом;
- з ізольованим затвором і вбудованим каналом (збіднений тип);
- одно- й двохзатворних з ізольованими затворами та індукованим каналом (збагачений тип).

Перемикачем S3 встановлюють, залежно від типу випробовуваного транзистора, необхідну полярність напруги на стоці транзистора. Для перевірки транзисторів із затвором у вигляді р-п переходу й транзисторів з ізольованим затвором і вбудованим каналом перемикач S1 встановлюють у положення «збіднення», а S2 – в положення «підкладка». Для перевірки транзисторів з ізольованими затворами та індукованим каналом перемикач S1 переводять у положення «збагачення», а S2 – в положення «підкладка» для одних затворів і «затвор 2» для транзисторів двохзатворів.

Після встановлення перемикачів у потрібні положення до гнізд роз'єму X1 підключають транзистор, що перевіряється, включають живлення і, регулюючи змінними резисторами R1 і R2 напруги на затворах, спостерігають за зміною струму стоку.

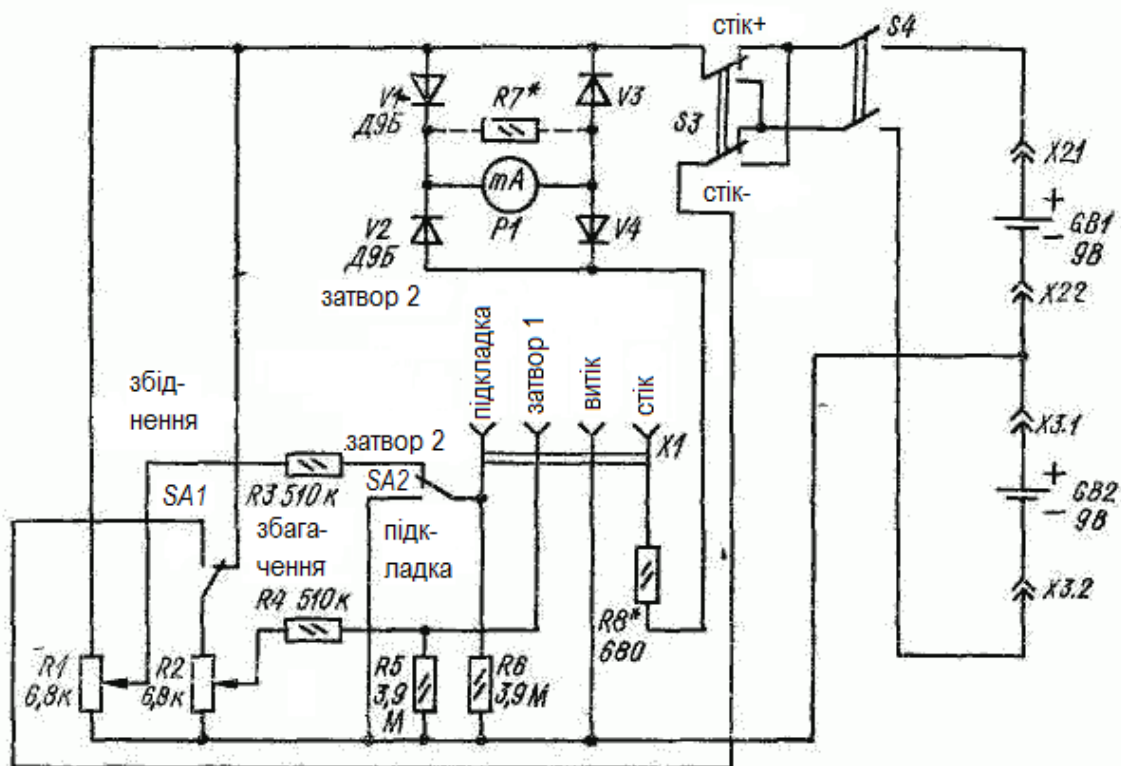


Рис. 5.15. Пробник для перевірки польових транзисторів

Резистори R3 і R4 обмежують струм затвора в разі його пробною або за помилкової полярності напруги на затворі (для транзисторів із затвором у вигляді p-n переходу). Резистори R5 і R6 унеможливають накопичення статичних зарядів на гніздах роз'єму X1 для підключення затворів. Резистор R8 обмежує струм, що протікає через міліамперметр P1. Міст (діоди V1–V4) забезпечує необхідну полярність струму через вимірювальний прилад за будь-якої полярності живлячої напруги.

Налагодження приладу зводиться до підбору резистора R8*, що забезпечує відхилення стрілки міліамперметра на останню відмітку шкали під час замкнутих гніздах «стік» і «витік». У приладі може бути використаний міліамперметр із струмом повного відхилення 10 мА або мікроамперметр з відповідним опором шунтуючого резистора R7*. Діоди V1–V4 – будь-які, малопотужні, германієві. Номінальний опір резисторів R1 і R2 – в межах 5,1–47 кОм. Пробник живиться від двох батарей «Крона» або від двох акумуляторів 7Д–0,1. Цим приладом можна вимірювати й напругу відсічки (прилад P1 має бути на струм 100 мкА). Для цього паралельно гніздам «затвор 1» і «витік» встановлюють додаткові гнізда, до яких підключають вольтметр. Послідовно з резистором R7* включають кнопку, під час натиснення на яку шунтуючий резистор відключається, потім встановлюють струм стоку 10 мкА і за зовнішнім вольтметром визначають напругу відсічки.

Перевірка напівпровідникових приладів осцилографом. Для перевірки напівпровідникових приладів придатний електронний осцилограф із якомога більшим вхідним опором або з подільником напруги з вхідним опором 10 МОм. До входу осцилографа (між сигнальним та «земляним» щупом) підключається прилад, що можна перевірити, торкнувшись сигнального щупа пальцями й проаналізувавши отриману осцилограму.

Якщо під час підключення радіоелемента осцилограма залишилася такою ж, як і без нього, значить прилад несправний – усередині є обрив. Дуже мала амплітуда сигналу інформує про коротке замикання в приладі, або про те, що струми витоку в ньому занадто великі й не дозволяють перевірити його. Останнє буває, як правило, під час спроб перевірки радіодеталей великої потужності.

Осцилограма на рис. 5.16 а відповідає справному кремнієвому діоду КД522А, підключеному анодом до сигнального, а катодом до земляного щупа осцилографа. Саме такій полярності підключення відповідають і всі інші осцилограми. За оберненої полярності вони

будуть перевернені навколо осі Х. Це дозволяє легко визначити напрямок провідності р-n переходу напівпровідникового приладу, що перевіряється. За розміром залишку позитивного півперіоду можна відрізнити германієвий прилад від кремнієвого. На рис. 5.16 а цей залишок складає близько 0,7 В.

Значно більше пряме падіння напруги характерне для світлодіодів. На осцилограмі, показаній на рис. 5.16 б, що відповідає світлодіоду АЛ307Е, позитивний напівперіод обмежений на рівні більш 2 В. Аналогічна осцилограма для світлодіода АЛ102Б (рис. 5.16 в) цікава тим, що на ній добре видно пробій р-n переходу за оберненого підключення близько 15 В. Цей пробій обернений і не призводить до пошкодження приладу, якщо тільки потужність розсіювання в цьому режимі не перевищить допустиму. Осцилограма на рис. 5.16 г відповідає стабілітрону КС147А. Напруга стабілізації легко визначається за амплітудою негативного напівперіоду.

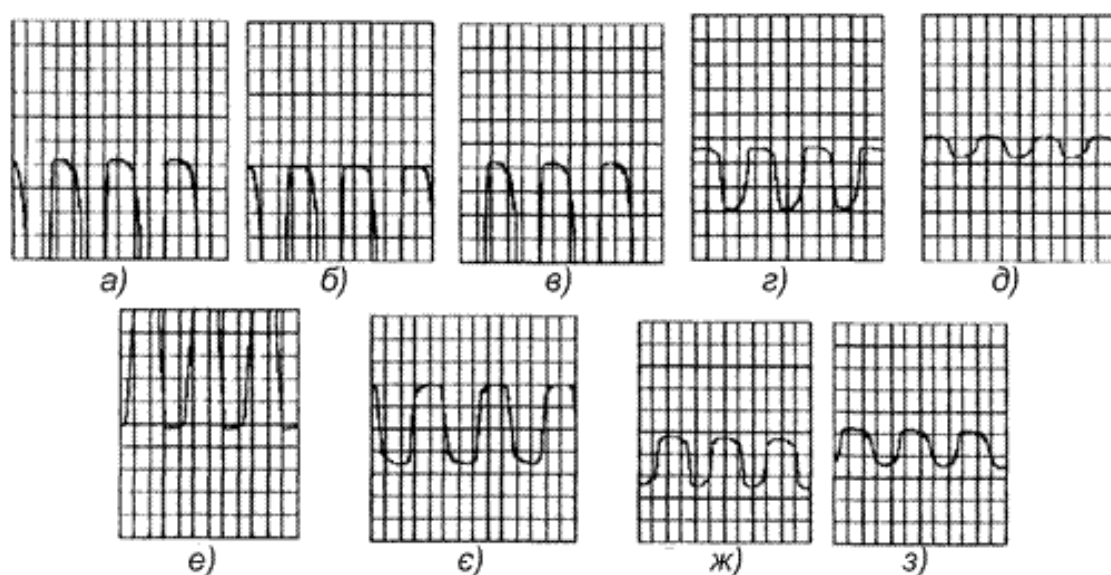


Рис. 5.16. Осцилограми перевірки напівпровідникових приладів осцилографом

Перевірка за допомогою осцилографа дозволяє виявити цікаві особливості деяких приладів. Наприклад, осцилограма на рис. 5.16 д, знята для стабілітрона Д818Е, показує, що він не проводить струм у прямому напрямку. І це дійсно так. Справа в тому, що фактично цей стабілітрон є послідовним з'єднанням стабілітрона й звичайного діода в одному корпусі. Осцилограма для зведеного стабілітрона КС191А показана на рис. 5.16 е. Тут амплітуди позитивного й негативного напівперіодів рівні між собою.

Цікавий факт виявився під час перевірки стабілітрона КС107А. Судячи з осцилограми рис. 5.16 є, він є звичайним стабілітроном із напругою стабілізації близько 12 В. Перевіряючи переходи транзисторів, існує можливість визначити не тільки їхню полярність і цілісність, але нерідко й відрізнити емітер від колектора. У більшості високочастотних транзисторів напруга пробою емітерного переходу значно нижче, ніж колекторного. Якщо осцилограма, що знімається під час перевірки колекторного переходу, нічим не відрізняється від показаної, наприклад, на рис. 5.16 а, то для емітерного переходу вона має вигляд, показаний на рис. 5.16 ж. Під час підключення до осцилографа виводів колектора й емітера перевіряються два зустрічно-послідовно з'єднаних р-п переходи (рис. 5.16 з).

5.3. Контроль технічного стану інтегральних мікросхем

5.3.1. Тестування аналогових інтегральних мікросхем

Не дивлячись на те, що інтегральні схеми мають різні форми, типи й розміри, для пошуку несправностей застосовуються такі стандартні методи:

- використання органів чуття;
- нагрів та охолодження;
- перевірка напруги;
- заміна;
- використання пробника.

Правильне функціонування операційного підсилювача здебільшого обумовлене компонентами, що оточують його. Отже, несправності операційних підсилювачів можуть бути викликані як в них самих, так і в інших компонентах, які визначають його коефіцієнт підсилення і частотні характеристики.

Майже на всі прояви неправильної роботи схеми з операційним підсилювачем вже є конкретні рекомендації:

- якщо у схемі неправильний коефіцієнт підсилення, то потрібно перевірити не операційний підсилювач, а резистори;
- якщо частотні характеристики підсилювача змінного струму або фільтру, або інтегратора неправильні, то потрібно перевіряти не операційний підсилювач, а конденсатори;
- якщо у схемі виникли паразитні коливання, то потрібно перевірити їх наявність на шині живлення або зсув фаз у колі зворотного зв'язку, а не перевіряти операційний підсилювач;
- якщо осцилограф показує на екрані частотну характеристику операційного підсилювача, на якій є сходинка, то

потрібно перевірити осцилограф або щуп осцилографа, або функціональний генератор, за допомогою якого перевіряється мікросхема.

За статистикою, причинами несправностей схем з операційними підсилювачами (ОП) в основному є пасивні компоненти. Рідко, але буває, що причина криється в операційному підсилювачі.

Представлений на рис. 5.17 а обрив інвертуючого входу призводить до розділення вхідного сигналу й негативного зворотного зв'язку. ОП працює з максимальним підсиленням, завдяки чому діючі на вхід перешкоди перенавантажують вихід підсилювача. На рис. 5.17 б представлений обрив перед точкою з'єднання негативного зворотного зв'язку з інвертуючим входом. Внаслідок цього підсилений паразитний сигнал подаватиметься на вхід без послаблення. Унаслідок несиметричного навантаження на вході також може зустрітися переміщення напруги зсуву на вихід. Обрив на виході (рис. 5.17 в) перенавантажує операційний підсилювач до обмеження. На виході проте буде лише переданий через опір зворотного зв'язку та зменшений вхідний сигнал. Представлений на рис. 5.17 г обрив негативного зворотного зв'язку збільшує на виході межу підсилення неробочого ходу ОП, внаслідок чого вихідний сигнал завдяки перевантаженню повністю обмежений. Замкнуті на коротко входи операційного підсилювача (рис. 5.17 д) призводять до відсутності сигналу на виході. Якщо вихід пов'язаний з напругою живлення, то він приймає потенціал напруги живлення. На рис. 5.17 е вихід замкнений накоротко з $+U_n$; у результаті цей рівень був виміряний на виході. Також під час короткого замикання входів на напругу живлення на виході завдяки підсиленню виникає сигнал, майже рівний потенціалу напруги живлення.

За полярністю вимірної напруги не можна зробити висновок про те, який саме вхід замкнений накоротко. Якщо, наприклад, накоротко замкнений інвертувальний вхід з позитивною напругою живлення, то на виході може бути як позитивна, так і негативна напруга живлення.

Допустимо, що є несправна електронна схема на операційному підсилювачі, яка вказує на відмову операційного підсилювача. У таких схемах зустрічаються два типи несправностей – за постійним струмом та за змінним струмом. Прикладами перших є самозбудження і шуми, а до другої відносяться незадовільна характеристика вихідної напруги, замикання виходу на позитивну або негативну шину живлення. Спочатку мікросхема перевіряється на наявність генерації за допомогою осцилографа. Якщо проблема в

генерації, необхідно спочатку перевірити вхідний сигнал. Якщо з ним все гаразд, далі перевіряються усі виводи мікросхеми, особливо виводи живлення. Якщо й тут немає помилок, то додавання в схему конденсаторів або RC-ланок у вузлах схеми дозволяє вирішити проблему.

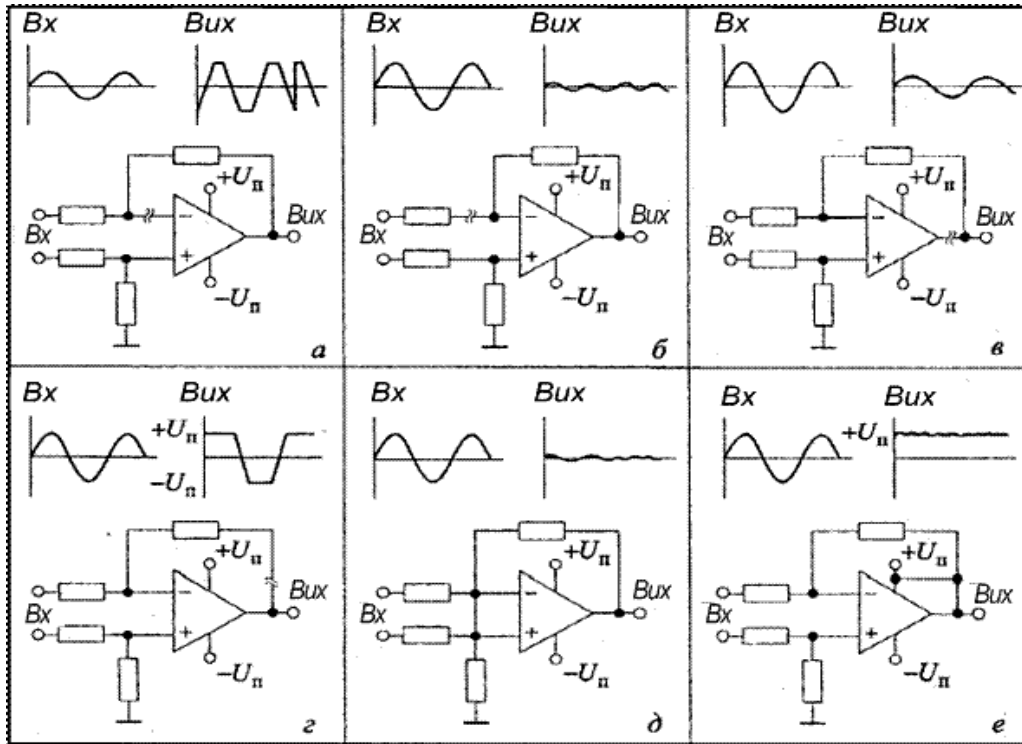


Рис. 5.17. Несправності, що викликані обривом та коротким замиканням виводів операційного підсилювача

Якщо тип відмови схеми вказує на проблеми постійного струму, то все мікросхема також спочатку перевіряється на наявність генерації. Переконавшись, що її немає, перевіряється коректність живлення і заземлення мікросхеми. Зустрічається обрив дроту заземлення, нестача напруги живлення через відсутність резистора або неправильного його номіналу. Бувають короткі замикання і розриви в колі живлення.

5.3.2. Тестування цифрових інтегральних мікросхем⁴⁰

Із ускладненням цифрових інтегральних мікросхем (ІМС), яким характерний високий ступінь інтеграції, виникають певні труднощі з

⁴⁰ Контрольно-измерительная техника / М. Цербст ; пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.

їх контролем. Оцінювання працездатності цифрових ІМС потребує затрат, співрозмірних із затратами на їх виробництво. Домінуючою причиною цього є постійне зростання функціональної складності мікросхем за відносно малої кількості виводів на її корпусі, що значно ускладнює доступ до елементів схеми під час виконання перевірок і тестування.

Контроль мікросхем необхідний для виявлення і локалізації можливих несправностей, під якими розуміють будь-яке відхилення від нормованих значень її параметрів. Контроль включає в себе два незалежні процеси:

- 1) генерування необхідних тестових впливів на мікросхему;
- 2) власне операції з контролю – прикладення до мікросхеми тестових впливів, оцінювання реакції схеми й представлення результатів контролю.

Оцінювання реакції мікросхеми проводиться шляхом порівняння з потрібними значеннями параметрів. За значної кількості тестових впливів виникає потреба у швидкодіючому запам'ятовуючому пристрої з великим об'ємом пам'яті длябереження потрібних значень. Як альтернативу можна застосувати безпосереднє порівняння контрольованої мікросхеми із завідомо справною мікросхемою даного типу. При цьому можуть застосувуватись автоматичні тестові системи перевірки цифрових схем, наприклад, *контрольні автомати*, що забезпечують:

- генерування тестових впливів;
- подавання тестових впливів на контрольовану мікросхему;
- оцінювання реакції схеми шляхом порівняння її з потрібною;
- індикацію результатів контролю.

Основним завданням під час планування контролю мікросхем є генерування необхідних тестових впливів, що дають змогу виявити можливі відхилення внутрішніх параметрів схеми від номінальних (нормованих) значень.

Залежно від виду контролю в загальному випадку можливі три групи тестових впливів:

- 1) *статичні вхідні сигнали* для контролю постійних електричних параметрів мікросхеми шляхом вимірювання напруг і струмів;

- 2) *динамічні вхідні сигнали* для контролю режимів роботи на змінному струмі, передусім залежні від часу (такі, що змінюються в часі) сигнали;

3) *логічні вхідні сигнали* для контролю режимів функціонування схеми.

Стосовно перших двох груп сигналів слід зауважити, що вони дозволяють контролювати електричні параметри шляхом вимірювання аналогових величин. При цьому можуть застосовуватися універсальні чи спеціальні системи контролю або ж вимірювальні системи, керовані персональною ЕОМ через стандартні інтерфейси.

Особливої уваги заслуговує контроль логічних функцій цифрових інтегральних мікросхем, що здійснюється шляхом подавання на вхід контрольованої схеми тестових впливів у вигляді двійкових (бінарних) сигналів. Відразу після подавання цих сигналів оцінюється двійковий сигнал на виході схеми й таким чином контролюється миттєвий стан схеми та його зміни в часі. Загалом же оцінюється динамічна поведінка схеми, хоча часові залежності можуть визначатися з деякою похибкою, пов'язаною із повільною зміною параметрів сигналів під час контролю.

Під час контролю логічних функцій інтегральної мікросхеми на кожен її вхід подаються певні логічні сигнали: 0 або 1. При цьому внутрішні несправності проявляються або безпосередньо, або ж за наявності тестових впливів за відхиленнями параметрів на виході схеми від номінальних значень. Для визначення цих впливів використовують переважно системи автоматичного генерування тестових впливів, що використовують для формування вихідних даних опис контрольованої схеми, а також відомості про її основні елементи, вузли та моделі несправностей. Описати мікросхему можна в різних формах:

- функціонально у вигляді рівнянь або таблиць;
- за допомогою логічної діаграми для встановлення топології⁴¹.

Аналіз схеми з метою побудови моделі її несправності здійснюється шляхом імітаційного моделювання⁴².

⁴¹ Топологія інтегральної мікросхеми – зафіксоване на матеріальному носію просторово-геометричне розташування сукупності елементів інтегральної мікросхеми й зв'язків між ними.

⁴² Імітаційне моделювання – метод дослідження, який базується на тому, що система, яка вивчається, замінюється імітатором і з ним проводяться експерименти з метою отримання інформації про цю систему. Експериментування з імітатором називають імітацією (імітація – це з'ясування суті явища, не вдаючись до експериментів на реальному об'єкті).

Імітаційне моделювання – окремий випадок математичного моделювання. Існує клас об'єктів, для яких з різних причин не розроблені аналітичні моделі або не розроблені методи розв'язування задач про такі моделі. У цьому випадку математична модель замінюється імітатором або імітаційною моделлю.

Генерація тестових впливів може здійснюватися різними методами:

- *структурно-орієнтовані методи* – під час генерації тестових впливів використовується структура мікросхеми на рівні функціональних елементів;

- *функціонально-орієнтовані методи* – якщо структура мікросхеми невідома або ж необхідно враховувати спеціальні функціональні несправності, які важко описати в рамках структурно-орієнтованих моделей, вдаються до структурно-незалежних методів контролю за функціонуванням мікросхеми, яка розглядається тільки на рівні її функцій. Застосування функціонально-орієнтованих моделей несправностей дозволяє генерувати необхідні тестові впливи.

Критерії під час генерування тестових впливів є такими:

- мінімальний час генерування;
- мінімальна тривалість контролю (мінімальна кількість тестів);

- простота апаратної реалізації тестових впливів.

Прилади для перевірки цифрових мікросхем. У практиці експлуатації електронних пристроїв з цифровими інтегральними мікросхемами знаходять застосування прилади самостійного виготовлення, короткий опис двох із яких наведений нижче.

Прилад для перевірки цифрових мікросхем дозволяє перевіряти цифрові мікросхеми ТТЛ, ТТЛШ і КМОП в корпусах DIP з 14-ма або 16-ма виводами. Його роботою керує персональна ЕОМ, внаслідок чого вдалося значно спростити прилад і забезпечити комфортність під час його експлуатації. Зручність роботи в основному залежить від програмного забезпечення.

За допомогою приладу можлива перевірка мікросхем серій K155, K555, KP1533, KP531, K176, K561, KP1561. Обмін тестовою інформацією з комп'ютером здійснюється через паралельний порт LPT. Тривалість елементарного тесту – 250 мкс, максимальний час перевірки складних мікросхем – не більше 2 с. Усі часові інтервали відповідають IBM-сумісному комп'ютеру з процесором AMD486DX4, що працює на тактовій частоті 120 МГц в операційній системі MS-DOS 6.22. Струм, споживаний приладом за напруги живлення 5 В – 90 мА (окрім струму, споживаного тестованою мікросхемою).

Увесь процес тестування мікросхем приладом можна розділити на такі етапи, що виконуються комп'ютером послідовно в часі:

- подача живлення на тестовану мікросхему;
- часова затримка (очікування закінчення перехідних процесів);

- серія елементарних тестів;
- виключення живлення мікросхеми;
- виведення результату тестування на монітор комп'ютера.

У елементарному тесті виконується така послідовність операцій:

- подача на входи тестованої мікросхеми логічних сигналів з таблиці, що знаходиться в пам'яті ЕОМ;
- зчитування з виходів мікросхеми логічних рівнів і порівняння їх із табличними.

Принципова схема приладу наведена на рисунку 5.18.

Перед подачею живлення на випробовувану мікросхему програмними засобами виконується попередній запис у регістри DD5, DD6 логічних одиниць (високих рівнів), що запобігає можливому псуванню мікросхеми із-за замикання її активних виходів через прямозміщені діоди (VD1–VD14) і виходи регістрів з низьким логічним рівнем.

Подача напруги живлення на тестовану мікросхему здійснюється встановленням рівня лог.0 на вході «ВКЛ». При цьому вихідні регістри DD5, DD6 переходять із стану високоімпедансу в активний. На виводи живлення панельок ХТ1, ХТ2 подається напруга +5 В через реле К1, що відображається контрольним світлодіодом НЛ2. Потім комп'ютер автоматично виконує декілька елементарних тестів, у кожен з яких входить конкретна послідовність операцій. У регістри DD1–DD4 послідовно записується 14-бітове слово: спочатку на лінію «ВХІД» подається старший, 13-й біт цього слова, і короткий імпульс високого рівня на вході синхронізації «СИНХ. ВХ.» фіксує цей біт. Потім подається 12-й біт, синхросигнал фіксує його, і так далі до нульового біта. Після закінчення цього процесу запису в регістрах DD1–DD4 зберігається тільки що передане 14-бітове слово. У регістрі DD4 містяться його старші біти, в DD1 – молодші. Подаючи на вхід «РЕГ ЗАП.» імпульс високого рівня, переписується це слово в паралельні регістри DD5, DD6, з виходів яких сигнал надходить на виводи тестованої мікросхеми. Кола R1VD1–R14VD14 відіграють роль запобіжників: вони захищають виходи тестованої мікросхеми від замикання через виходи регістрів DD5, DD6. Приміром на виводі 2 (вихід 0) DD5 присутній рівень «0», передаваний через діод VD1 на вхід тестованої мікросхеми. За рівня 1 на виводі DD5 діод VD1 закритий і через резистор R1 на вхід мікросхеми надходить рівень «1». У такому випадку коло ніяк не проявляє себе. Якщо ж вказаний вивід підключений до виходу тестованої мікросхеми, то в тригер регістра просто необхідно записати рівень «1», при цьому діод VD1 запобігає короткому замиканню через вихід регістра DD5 на шину

живлення, і резистор R1 створить невелике навантаження виходу тестованої мікросхеми.

Таким чином, ланцюжки R1VD1–R14VD14 запобігають конфлікту між виходами тестованої мікросхеми й виходами регістрів DD5, DD6. Після того, як на входи тестованої мікросхеми подана інформація, можна з'ясувати поточний стан виходів мікросхеми. Для цього рівнем «1» по входу «ПАР./ПОСЛ.» приставки регістри DD8–DD11 перемикаються в режим паралельного запису інформації з входів D0–D3 і, подавши через вхід «СИНХ. ВИХ.» короткий імпульс високого рівня на їх входи синхронізації, записуються в них логічні рівні на всіх виводах тестованої мікросхеми (окрім двох виводів живлення). Щоб передати цю інформацію про стан мікросхеми до комп'ютера, необхідно подати рівень «0» на вхід «ПАР./ПОСЛ.». При цьому регістри DD8–DD11 з'єднуються в послідовний ланцюжок через виходи їх старших тригерів і входи J і K. Далі з виходу тестера «ВИХ.» циклічно зчитуються 14 біт про стан виводів з синхронізацією процесу по входу «СИНХ. ВИХ.». Потім програмне забезпечення аналізує отримані дані, порівнюючи їх з табличними значеннями з бібліотеки мікросхем. Якщо біт відповідає входу тестованої мікросхеми, у ньому повинно бути те ж, що записане через один з регістрів DD5, DD6 на цей вхід. Якщо це вихід, логічний рівень на ньому залежить від типу мікросхеми, її логічної функції і поточного стану. Після закінчення тестів подаванням рівня «1» на вхід тестера «ВКЛ.» знімається напруга живлення і мікросхему можна виймати з панельки.

Прилад для контролю роботи мікросхем дозволяє працювати з мікросхемами без їх випаювання в динамічному режимі роботи. Перевага приладу над подібними розробками полягає в простоті схемного рішення, можливості перевірки будь-яких типів мікросхем (за відповідної елементної бази), можливості перевірки мікросхем без випаювання з плати в динамічному режимі й одиночних мікросхем з каси (набору). До недоліків приладу можна віднести:

- неможливість однозначної перевірки деяких складних мікросхем, у яких використовуються короткі запускаючі імпульси, а також генераторів;
- неможливість перевірки мікросхем, що працюють на великих частотах, хоча останній недолік можна спробувати вирішити за допомогою вживання в приладі більш швидкодійної серії мікросхем;
- необхідність мати набір зразкових мікросхем аналогічних мікросхемам, що перевіряються (основний недолік).

Ідея приладу полягає в порівнянні вихідних сигналів досліджуваної мікросхеми з вихідними сигналами зразкової мікросхеми, причому на входи зразкової мікросхеми подаються вхідні сигнали мікросхеми, що перевіряється.

Для всіх типів мікросхем оптимально використовувати мікросхеми цифрових компараторів: К555СП1, К531СП1–ТТЛ; К561П2–МОП. Можна використовувати мікросхеми чотирирозрядних повних суматорів або схем «виключає АБО» («исключающее ИЛИ») з відповідною логікою порівняння.

На рис. 5.19 наведена електрична принципова схема приладу. Сигнали мікросхеми, що перевіряється, із щупа надходять на роз'єм ХР1 і через перемикачі SB1–SB16 подаються на мікросхемну панель XS1 або на входи А компараторів DD1–DD4. Результат порівняння компараторів підсумовується мікросхемою DD5 і через тригер DD6 відображається світлодіодом HL1. За відтиснутого перемикача SB вхідний сигнал подається на відповідний вивід панелі під мікросхему. Під час натиснутого перемикача SB вхідний сигнал надходить на входи А компараторів DD1–DD4, а аналогічний вивід мікросхемної панелі з'єднується з входами В компараторів DD1–DD4. Таким чином, перемикачі SB мають натискатися лише ті, номери яких відповідають виходам мікросхеми, що перевіряється (навіть якщо вони не використовуються). Номери перемикачів, які відповідають входам мікросхеми, що перевіряється, і живленню, мають бути відтиснуті.

На початку роботи з приладом необхідно виписати з довідника всі номери виходів мікросхем, які перевірятимуться. Потім у панель вставляється зразкова мікросхема, і встановлюються перемикачі SB. Далі підключається щуп до мікросхеми, що перевіряється, відповідно до ключа.

УВАГА! *Усі операції необхідно виконувати з вимкненим живленням приладу й досліджуваної схеми.*

Важливо перевірити правильність встановлення зразкової мікросхеми, щупа й перемикачів, оскільки інакше можна вивести з ладу придатну мікросхему. Оскільки МОП – мікросхеми не витримують незадіяних входів, на всі входи цифрових компараторів DD1–DD4 через резистори R1–R32 подана напруга, трохи більша половини напруги живлення. Тому, якщо сталося неправильне підключення, то одна з мікросхем може вийти з ладу. Потім подається живлення і короткочасно натискається кнопка SB17, якщо в цей час світлодіод HL1 не світиться, то мікросхема, що перевіряється, справна. Якщо під час натиснення кнопки SB17 світлодіод спалахує, а потім потухає, то мікросхема, що перевіряється, швидше за все придатна. Це відбувається тому, що позначається затримка проходження сигналу й вона тим більша, чим коротша тривалість імпульсу.

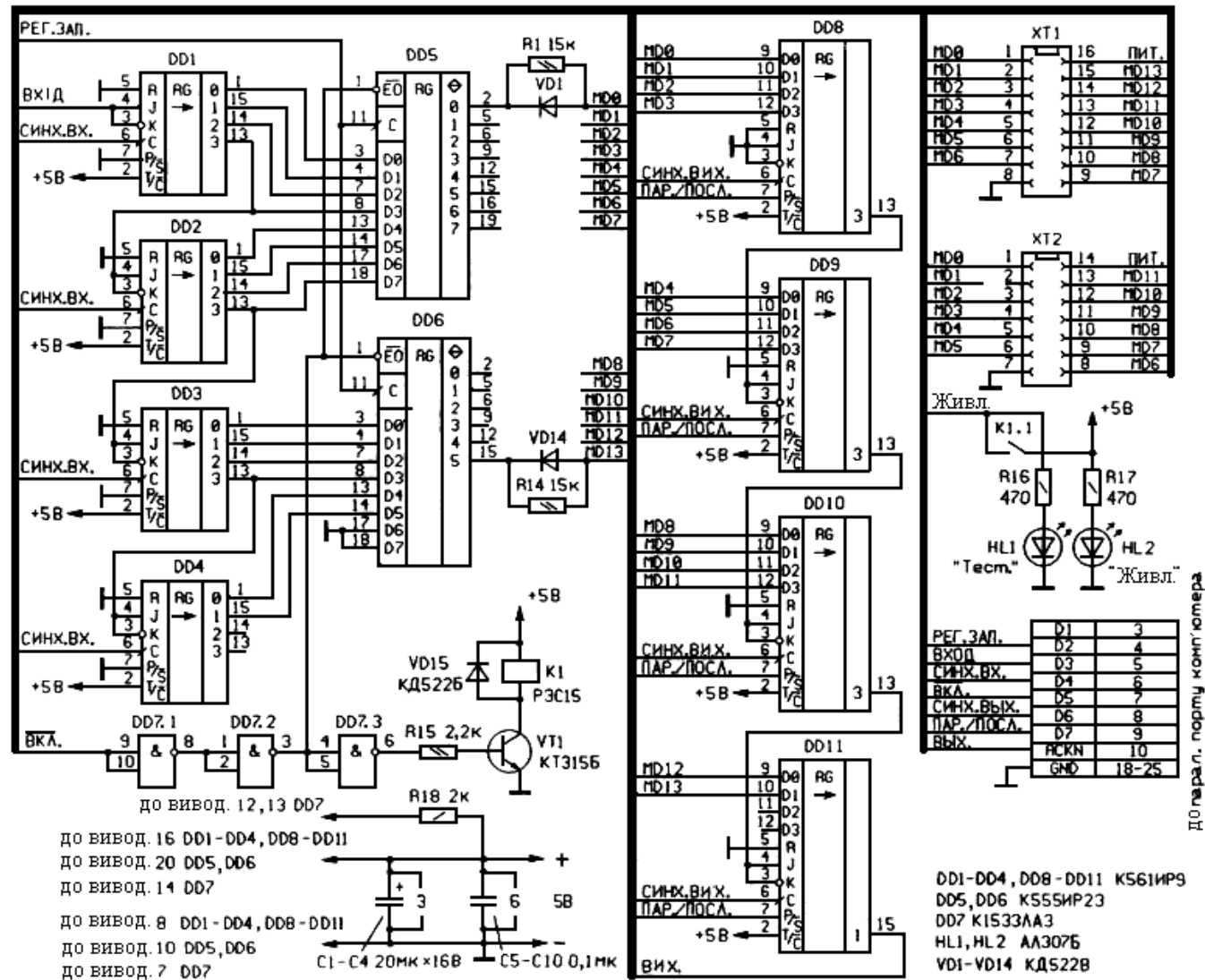


Рис. 5.18. Электрична принципова схема приладу для перевірки цифрових мікросхем

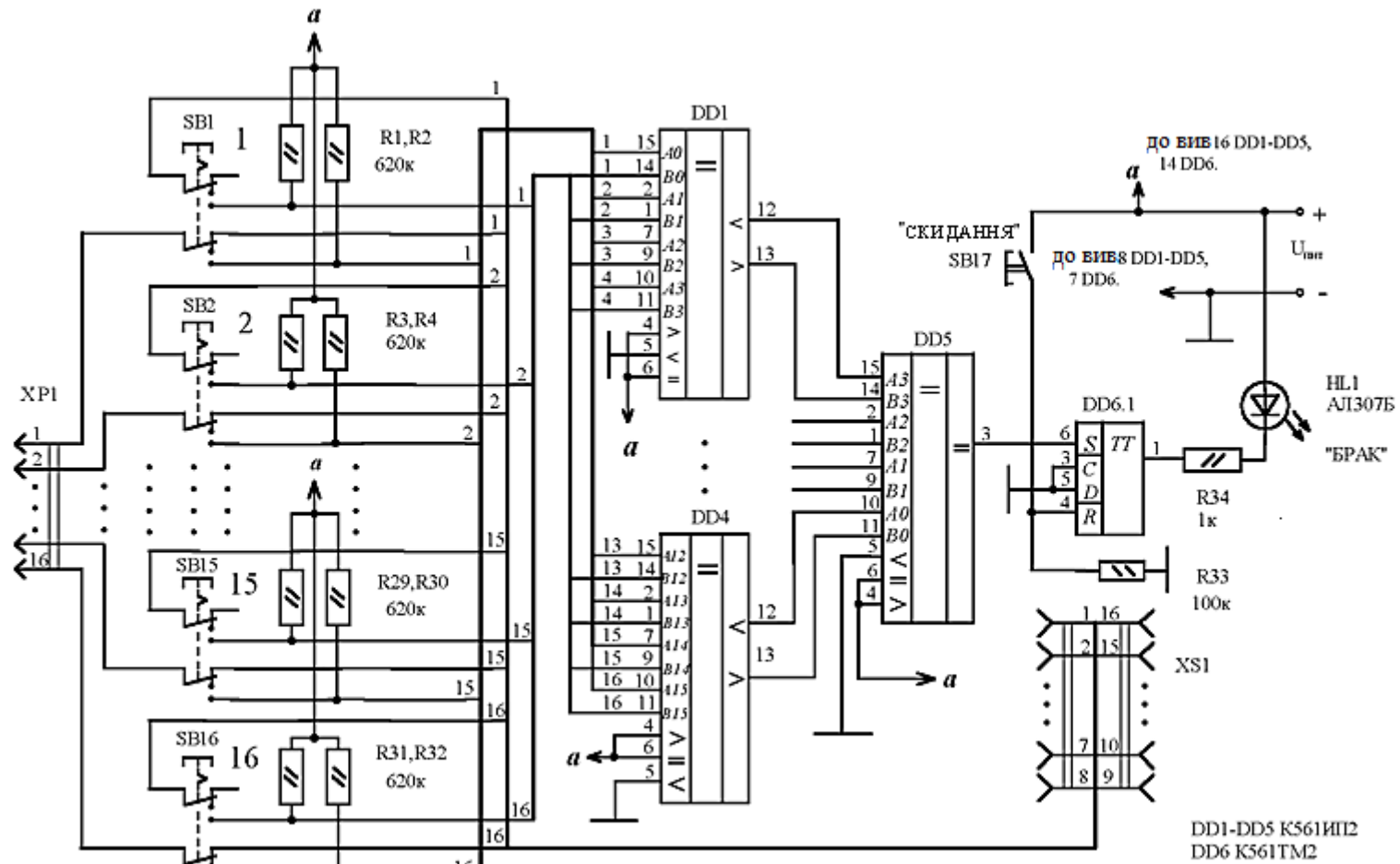


Рис. 5.19. Електрична принципова схема приладу для контролю роботи мікросхем

Передній фронт сигналу під впливом ємності монтажу й опору інтегрується і відбувається невеликий зсув вихідного сигналу. У результаті на виході мікросхеми DD5 короткочасно з'являється рівень логічного нуля, що дає можливість обнулити тригер DD6.1 кнопкою SB17. Коли на виході DD5 присутній постійний рівень логічної одиниці (повна рівність кодів на входах компараторів), тригер DD6.1 обнулити неможливо. Якщо мікросхема, що перевіряється, не придатна, то світлодіод горить постійно.

Мікросхеми з каси (набору) порівнюються з мікросхемою на будь-якій працюючій платі. Перевіривши мікросхему на платі, по черзі вставляють у мікросхемну панель мікросхеми з каси й перевіряють їх.

Конструкційно прилад складається з плати друкованого монтажу, на якій встановлені мікросхеми й передньої панелі. На передній панелі встановлені перемикачі типу П2К з незалежною фіксацією, кнопка типу КМ1–1 і панель під мікросхему типу РС16. Збоку встановлений роз'єм типу МРН–32. Плата й передня панель сполучені монтажними проводами. Напругу живлення краще брати з пристрою, що перевіряється. Якщо такої можливості немає, то напруга живлення має бути не менше, чим напруга плати з мікросхемами, що перевіряється.

Щуп (рис. 5.20) приладу зроблений з голок однакової довжини (40 мм), двох плат з металізованими отворами заводського виготовлення під 16 виводів (макетна плата) і стяжних гвинтів. Плата заводського виготовлення бажана, оскільки на ній точніше просвердлені отвори під мікросхему.

Голки вставляються в отвори двох плат так, щоб їх кінці одночасно ставали на площину, і припаюються до верхньої плати за допомогою аспірину. Потім плати стягуються гвинтами таким чином, щоб вільні кінці голок були близько 15 мм. До голок припаюється джгут з дроту МГТФ 0,07 з відповідною частиною роз'єму МРН–32. Довжина джгута – не більше 25 см. Зверху щуп закривається захисною кришкою.

Щуп встановлюється на мікросхему з боку корпусу спочатку одним рядом голок, потім з невеликим натягом другим рядом голок. Таким чином, виводи мікросхеми виявляються затиснутими між голками. Забезпечується хороший контакт виводів мікросхеми з голками щупа, навіть якщо плата покрита лаком.

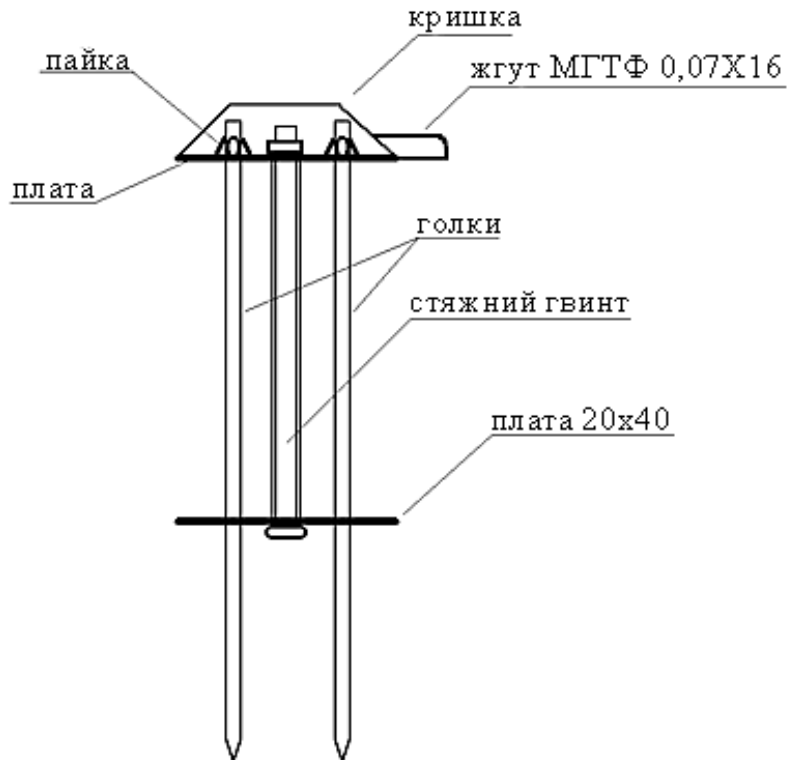


Рис. 5.20. Конструкція щупа

5.4. Спеціалізоване приладове забезпечення для тестування напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем

Тестер напівпровідникових приладів і аналогових мікросхем GUT-7000 (рис. 5.21 а) забезпечує:

- автоматичне визначення типу тестованої інтегральної мікросхеми (ІМС);
- 6 функцій режиму тестування;
- зручне управління приладом з клавіатурного поля.

Технічні характеристики тестера наведені в табл. 5.2.

5.2. Технічні характеристики тестера напівпровідникових приладів і аналогових мікросхем GUT-7000

Показник	Значення показника
Тип тестованих елементів	Таймери, операційні підсилювачі, схеми керування, комунікаційні ІМС, імпульсні схеми живлення, стабілітрони, оптоелектронні пари
Тестова напруга	$\pm 5 \text{ В} - \pm 24 \text{ В (DC)}$

Продовження таблиці 5.2

Тестова колодка	24-контактна для ІМС 2- і 3-контактна для напівпровідникових приладів
Індикація несправності	Сигнал змінної тональності
Функціональні клавіші	6 клавіш (TYPE, AUTO, BEEP, TEST, SEARCH)
Цифрові клавіші	10 клавіш (0–9)
Тип дисплея	РК-індикатор
Формат індикації	1 рядок, 16 символів (символ 9x7 крапок)
Напруга живлення	110В/220В ± 10%, 50/60Гц
Маса, кг	1,5
Габарити, мм	335x105x300

Тестер аналогових мікросхем GUT-7700 (рис. 5.21 б) забезпечує:

- перевірку працездатності ненавантажених елементів;
- тестування ІМС і напівпровідникових елементів.

Технічні характеристики тестера наведені в табл. 5.3.

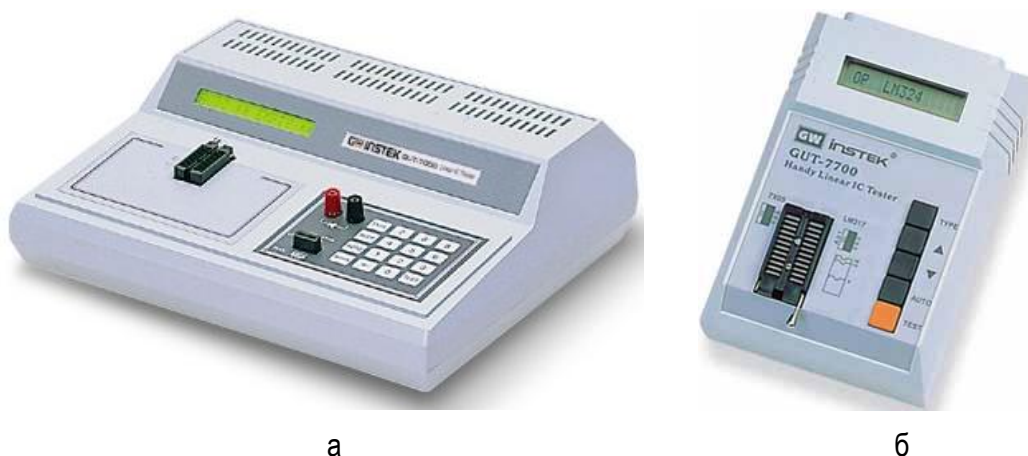


Рис. 5.21. Тестери: а) напівпровідникових приладів та аналогових мікросхем GUT-7000; б) аналогових мікросхем GUT-7700

5.3. Технічні характеристики тестера аналогових мікросхем GUT-7700

Показник	Значення показника
Тип тестованих елементів	Операційні підсилювачі, компаратори, схеми керування, замовлені ІМС, оптоелектронні пари, транзисторні збірки
Тестова напруга	± 5В (DC)
Тестова колодка	24-контактна
Час тестування	0,8 с/елемент

Продовження таблиці 5.3

Функціональні клавіші	5 клавіш (TYPE, AUTO, TEST)
Тип дисплея	РК-індикатор
Формат індикації	1 рядок, 16 символів(символ 9х7 крапок)
Напруга живлення	Батарея 9 В або через адаптер 9 В/0,5 А (входить до комплекту постачання)
Маса,кг	0,34

Пристрій для тестування цифрових мікросхем GUT-6600 (рис. 5.22)



Рис. 5.22. Пристрій для тестування цифрових мікросхем GUT-6600

Пристрій забезпечує тестування ТТЛ/КМОП мікросхем серій 74/40/45/41/44 і має зручний та простий інтерфейс керування (7 функціональних клавіш, 1-рядковий дисплей, мнемосхема на лицьовій панелі).

Органи керування пристрою - функціональні клавіші – 7 клавіш (TYPE, AUTO, TEST, POWER ON/OFF);

Дисплей пристрою:

- тип дисплея – РК-індикатор;
- формат індикації – 1 рядок, 16 символів (символ 9х7 крапок)

Технічні характеристики пристрою наведені в таблиці 5.4.

5.4. Технічні характеристики пристрою GUT–6600

Показник	Значення показника
Кількість каналів	До 512
Тестова напруга,В	5
Час тестування	0,8 с/ІМС
Тестова колодка	14/24-контактна
Напруга живлення	Батарея 9 В або від мережі ~ 220В; 50 Гц через адаптер 9 В/0,5 А
Маса,кг	0,34
Габарити,мм	160 x 45 x 110

Тестер цифрових мікросхем GUT–6000А (рис. 5.23).



Рис. 5.23. Тестер цифрових мікросхем GUT–6000А

Тестер забезпечує тестування ІМС – 54/74 серії ТТЛ і високошвидкісних КМОП, 4000 і 4500 серій КМОП, 55/75 серій ТТЛ.

Технічні характеристики тестера наведені в таблиці 5.5.

5.5. Технічні характеристики тестера GUT–6000А

Показник	Значення показника
Тестова напруга,В	5
Час тестування	0,8 с/ІМС
Тестова колодка	– 28-контактна
Живлення	Від мережі ~110В/220В; 50/60Гц
Габарити ,мм	335x105x300

Схемою тестера забезпечується:

- автопошук короткозамкнутих виводів мікросхеми;
- тестування 18000 найменувань ІМС;
- самодіагностування;
- захист від перевантаження;

Органи керування тестера:

- функціональні клавіші – 6 клавіш (6 функцій);
- цифрові клавіші – 10 клавіш (0–9);

Дисплей тестера:

- тип дисплея – ЖК-індикатор;
- формат індикації – 1 рядок, 16 символів (символ 9x7 крапок);

Тестер параметрів цифрових інтегральних мікросхем ЕТС–868 (рис. 5.24) призначений для функціонального й параметричного контролю ТТЛ і КМОП мікросхем з кількістю виводів до 512 й робочою частотою до 100 МГц (у певних режимах до 200 МГц). Він забезпечує формування тестової послідовності довжиною до 64 М наборів векторів з числом каналів 128 (з можливістю розширення до 512).



Рис. 5.24 Тестер параметрів цифрових інтегральних мікросхем ЕТС–868

Тестер ЕТС–868 спільно з комплексом для вимірювання параметрів аналогових інтегральних мікросхем ДМТ–x18 або x19 забезпечує вимірювання параметрів надвисокочастотних мікросхем або мікросхем змішаного типу з цифровим керуванням або цифровим виведенням сигналу. Технічні характеристики тестера наведені в табл. 5.6.

5.6. Технічні характеристики тестера параметрів цифрових інтегральних мікросхем ЕТС–868

Показник	Значення показника
1. Кількість каналів	до 512
2. Частота тестування, МГц	до 100 (до 200 у деяких режимах)
3. Дозвіл за частотою, кГц	25
4. Дозвіл за часом розміщення імпульсу, нс	50
5. Межі відносної похибки встановлення частоти, %	± 0,01
6. Максимальне значення сили вихідного струму каналів вимірювання, мА	50
7. Діапазони видаваних і вимірюваних тестером ЕТС–868 напруги постійного струму: – високий рівень (V _H) – низький рівень (V _L)	від (V _H +500 мВ) до 6,5 В від мінус 2,0 В до 6,0 В
8. Дискретність встановлення видаваної напруги постійного струму (дозвіл під час вимірювання), мВ	5
9. Межа допустимої похибки встановлення і вимірювання напруги постійного струму, мВ	±10
10. Параметри наростання, В/нс	не менше 1,5
11. Ємність каналу, пФ	не більше 50
12. Джерело живлення № 1, діапазон відтворення	від 0,1 до 6 В від 0,01 А до 2 А
13. Джерело живлення № 2 та № 3, діапазон відтворення	від мінус 16 В до плюс 16 В від 0,1 А до 1 А
14. Діапазон задаваних/вимірюваних значень напруги постійного струму, В	від мінус 8 до плюс 8; від ±200 нА до ±150 мА

Система для тестування мікросхем АЦП і ЦАП (рис. 5.25) на базі модульної платформи РХІ призначена для тестування параметрів мікросхем аналогоцифрових перетворювачів (АЦП) і цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП).

Тестування АЦП. Система (рис. 5.26) може тестувати весь спектр необхідних параметрів АЦП, зокрема:

- тестувати характеристики мікросхеми АЦП постійним струмом за допомогою мультиметра РХІ DMM;
- перевіряти розрядність випробовуваної мікросхеми;

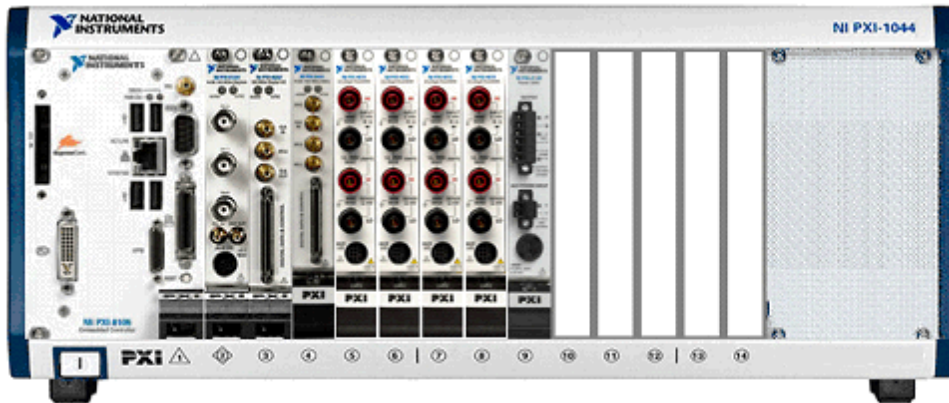


Рис. 5.25. Платформа PXI, призначена для тестування мікросхем АЦП і ЦАП

- оцінювати основні типи погрешностей, що виникають за квантування вхідного сигналу АЦП:
 - аддитивну похибку;
 - мультиплікативну похибку (full scale error);
 - диференціальну нелінійність передавальної характеристики (DNL);
 - інтегральну нелінійність передавальної функції (INL);
 - оцінювати значення аддитивної і мультиплікативної похибки залежно від температури;
 - вимірювати вхідні опір, ємність та оцінювати динамічний діапазон напруги по входу;
 - вимірювати струми споживання кожного живлення (цифровій та аналоговій частині мікросхеми).

Система для тестування мікросхем АЦП і ЦАП дозволяє також вимірювати (тестувати) динамічні характеристики АЦП за допомогою цифрового осцилографа PXI digitizer, і подальшого виконання блока перетворення Фурє (БПФ) над масивом вихідних значень АЦП за допомогою програмного забезпечення NI LabView. Така побудова системи дозволяє ефективно оцінювати основні динамічні характеристики АЦП:

- відношення сигнал/шум (SNR);
- загальні гармонійні спотворення THD;
- відношення сигнал/шум і спотворення (SINAD);
- динамічний діапазон, вільний від гармонік, а також ширину робочої смуги частот АЦП.

Система також дозволяє вимірювати характеристики цифрових каналів АЦП, а саме:

- опір входних каналів у відкритому стані;
- струми витоку відкритого й закритого каналу;
- входні й вихідні струми цифрових каналів у відкритому й замкнутому стані;
- значення напруги входних і вихідних каналів у станах логічного нуля й одиниці.

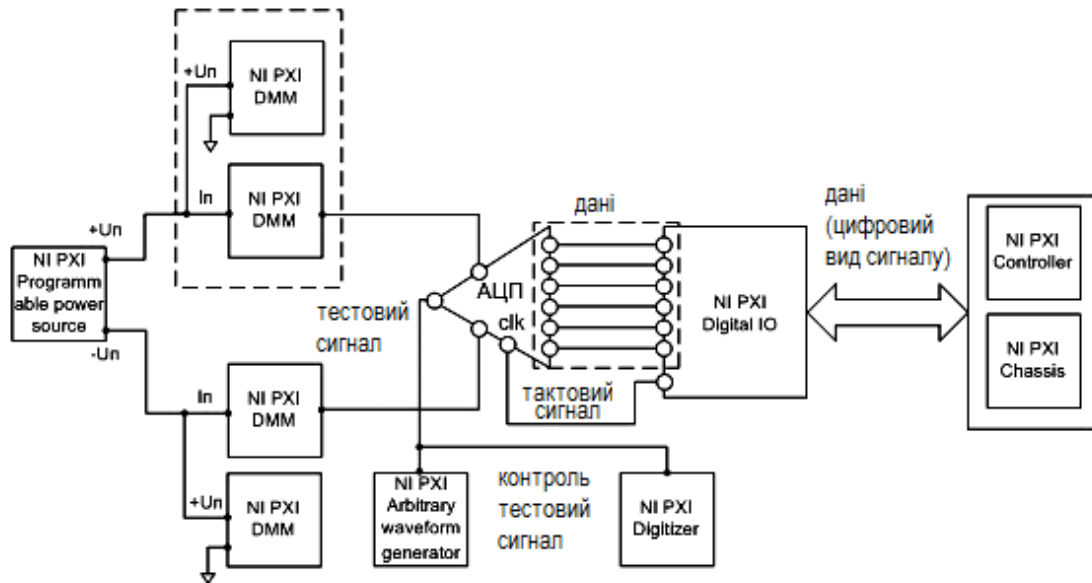


Рис. 5.26. Функціональна схема платформи PXI для тестування АЦП

За допомогою цифрового осцилографа PXI digitizer можна виміряти перехідні характеристики мікросхеми:

- латентності⁴³ перетворення;
- швидкості встановлення оцифрованих даних на виході пристрою;
- джиттера⁴⁴, а також параметрів тактового сигналу.

Формування аналогових сигналів для подачі на входні канали АЦП виробляється за допомогою генератора сигналів довільної форми – PXI arbitrary waveform generator.

Тестування ЦАП. Для тестування мікросхем ЦАП за допомогою модуля цифрового введення/виведення PXI digital IO необхідно

⁴³Латентність – затримка між стимулом і реакцією.

⁴⁴Джиттер (англ. *jitter* – тремтіння) – або фазове тремтіння цифрового сигналу даних – небажані фазові й частотні випадкові відхилення передаваного сигналу. Виникають внаслідок нестабільності задаючого генератора, змін параметрів лінії передачі в часі й різній швидкості поширення частотних складових одного й того ж сигналу.

сформувати послідовність цифрових відліків і подати її на входні регістри мікросхеми. Наприклад, модуль PXI-6552 має 20 цифрових каналів введення виводу й відповідно можливість тестування до 20 мікросхем ЦАП з послідовним інтерфейсом.

Система (рис. 5.27) забезпечує можливість реєстрації таких характеристик ЦАП за постійним струмом:

- оцінювати диференціальну нелінійність;
- оцінювати інтегральну нелінійність передавальною ЦАП;
- оцінювати аддитивну похибку;
- вимірювати вихідний опір;
- вимірювати вихідну ємність;
- вимірювати струми споживання кожним живленням (цифровою та аналоговою частинами мікросхеми).

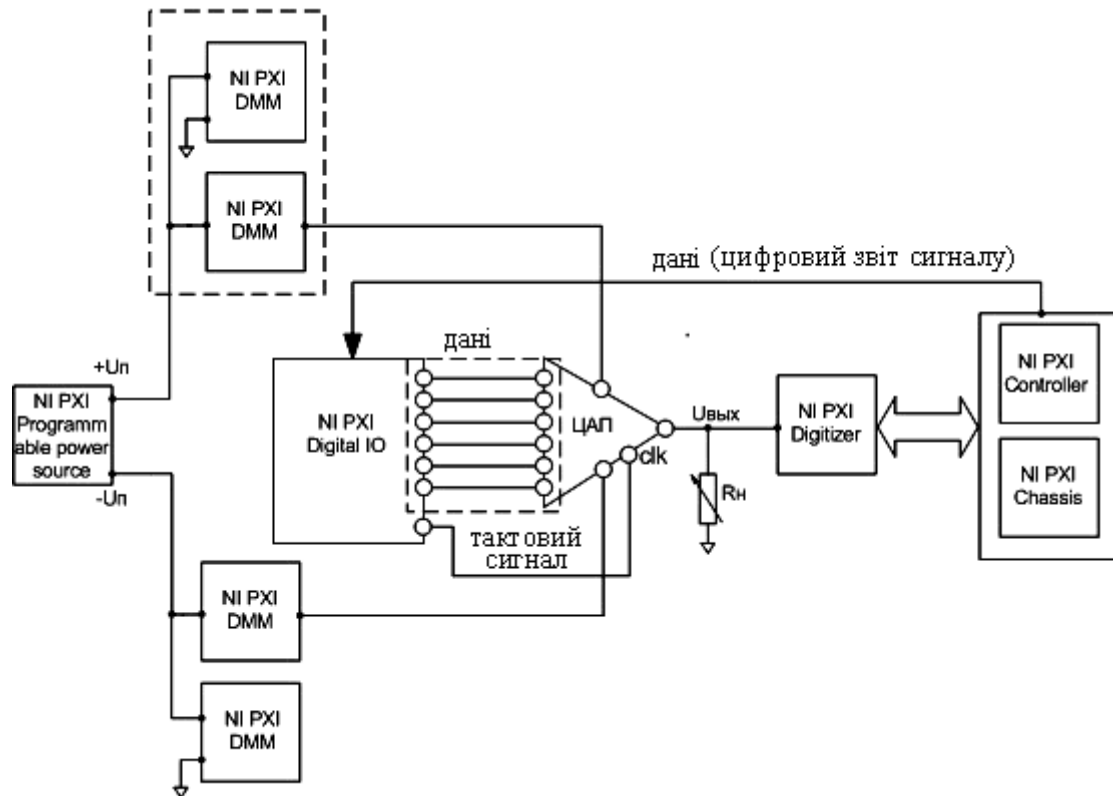


Рис. 5.27. Функціональна схема платформи PXI для тестування АЦП

Оцінювати динамічні характеристики мікросхем ЦАП:

- час наростання переднього фронту вихідного сигналу;
- час спаду заднього фронту вихідного сигналу;
- загальні гармонійні спотворення (THD);
- динамічний діапазон, вільний від гармонік (SFDR).

Система також дозволяє вимірювати характеристики цифрових каналів ЦАП. Використовуючи програмне забезпечення NI TestStand, користувач може легко автоматизувати виміри параметрів мікросхем АЦП і ЦАП, об'єднуючи багаточисельні режими тестування, створені в NI LabView у єдиний програмно-апаратний вимірювальний комплекс, а також розробити зручний призначений для користувача інтерфейс та автоматизувати створення звітів проведених випробувань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зайчик И. Ю. Практикум по электрорадиоизмерениям / И. Ю. Зайчик, Б. И. Зайчик. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1985. – 239 с.
2. Измерительные пробники / сост. А. А. Халоян. – ИП Радиософт, ЗАО «Журнал «Радио», 2003. – 244 с.
3. Метрология и радиоизмерения : учеб. для вузов / В. И. Нефедов, А. С. Сигов, В. К. Битюков и др. ; под ред. В. И. Нефедова. – 2-е изд., перераб. – М. : Высш.шк., 2006. – 526 с.
4. Тартаковский Д.Ф., Ястребов А.С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 2001.- 205 с.
- 5 Д.Садченков Тестирование радиоэлементов. // Ремонт&Сервис. – 2000. – № 3, 4. – С.108 ... 115

6. ТЕХНІЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ЗАСОБІВ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

6.1. Особливості технічного діагностування засобів електронної техніки

6.2. Діагностичні параметри засобів електронної техніки

6.3. Діагностичні процедури для оцінки технічного стану засобів електронної техніки

6.4. Структурно-функціональні моделі в діагностуванні засобів електронної техніки

6.5. Труднощі та помилки під час діагностування засобів електронної техніки

6.6. Автоматизована система діагностування електронних пристроїв «ТЕСТ-Д»

6.1. Особливості технічного діагностування засобів електронної техніки

Технічне діагностування засобів електронної техніки (ЗЕТ), як і загалом інших технічних об'єктів, пов'язане із вирішенням трьох основних взаємопов'язаних завдань [1, 2]:

– перевірка працездатності засобу (пристрою, приладу), після чого або продовжується його застосування за прямим призначенням або проводиться аналіз його стану;

– пошук несправних (дефектних) елементів і з'ясування первинної причини відмов засобу (пристрою, приладу);

– прогнозування стану засобу (пристрою, приладу) на перспективу – визначення із певною достовірністю його технічного ресурсу.

Перше завдання обов'язково вирішується як у випадку введення в експлуатацію засобів електронної техніки, що здійснюється з визначеною послідовністю, так і під час їх планового технічного діагностування.

До параметрів напівпровідникових перетворювачів, що підлягають перевірці під час технічного діагностування відповідно до «Порядку проведення експертизи електроустановок споживачів» віднесені:

– опір та електрична міцність ізоляції струмоведучих частин;

– режими й характеристики силових напівпровідникових приладів;

- захист агрегата до 1000 В в системі живлення із заземленою нейтраллю;
- опір заземлювальних пристроїв;
- рівень освітлення.

Безпосередньо ж у процесі використання засобу (пристрою, приладу) за призначенням здійснюється встановлений експлуатаційними документами періодичний або безперервний контроль якості функціонування. Як правило, контролюються вихідні й рідше внутрішні сигнали, відхилення яких від норми є ознакою відмови. Інколи водночас вирішується перше й друге завдання визначення технічного стану засобу електронної техніки, наприклад, у процесі послідовної перевірки його працездатності з локалізацією несправної ділянки блока чи вузла. Коли ж виявлене поступове погіршення параметрів діагностованого засобу, доцільно вирішити друге й третє завдання технічного діагностування, тобто виявити причини вказаного явища та оцінити інтервал часу, протягом якого без відновлювальних операцій можна буде ще використовувати засіб електронної техніки. Загалом же друге завдання має вирішуватися лише після достовірного встановлення несправного стану засобу (пристрою, приладу) чи в разі значного й стійкого відхилення його параметрів від нормативних значень.

У переважній частині випадків пошук несправностей засобів електронної техніки здійснюється шляхом контролю їх параметрів у спеціально визначених (встановлених) контрольних точках, що забезпечує швидке вирішення другого завдання діагностування для простих засобів. Робота зі складною електронною технікою потребує розробки спеціальних технологій (процедур) пошуку несправностей. Блок чи вузол з відхиленням за межі допуску вихідних сигналів за наявності на вході нормованих вхідних підлягає відновленню або заміні.

Третє завдання із наведеного вище переліку вирішується у два етапи:

- виявлення елементів (вузлів, блоків), параметри яких хоч і відхилилися від норми, але не вийшли за допустимі межі;
- безперервне або періодичне спостереження за функціонуванням таких елементів (вузлів, блоків) з метою встановлення динаміки зміни контрольованих параметрів та моменту виходу їх за межі допуску.

Важливість третього завдання технічного діагностування засобів електронної техніки передусім полягає в тому, що в разі його

успішного вирішення можна зупинити дрейф параметрів шляхом регулювання чи ремонту.

Слід зазначити, що *прогнозування технічного стану* електронних пристроїв через їх конструктивну складність і повільну зміну параметрів, пов'язане із рядом труднощів, а тому, як правило, здійснюється лише перевірка працездатності та пошук несправностей. Технічне діагностування засобів електронної техніки частіше є складовою комплексу експлуатаційних заходів, хоча може здійснюватися осібно – за оцінки кількості справної техніки серед наявної та під час приймальних випробувань за вимогою замовника.

6.2. Діагностичні параметри засобів електронної техніки [1]

Електронний пристрій, що має один вихід і відповідно один вихідний параметр, є за принципом дії схемою співпадіння. Якщо пристрій перебуває в справному стані, на всі його входи подаються належні енергетичні впливи та сигнали, а на виході пристрою існує певний вихідний параметр, за значенням знаходячись у полі допуску й відповідаючи нормальному режимові роботи. Суттєвою особливістю роботи електронної техніки є те, що більшість процесів перетворення енергії в них можна спостерігати лише з використанням вимірювальних приладів – засобів діагностування.

Практично до будь-якої доступної точки електронного засобу (пристрою, приладу) можна під'єднати засіб діагностування і кожна із таких точок є точкою діагностування із одним чи кількома діагностичними параметрами. Останні можуть бути *одномірними*, пов'язаними із однією фізичною величиною чи станом об'єкта діагностування, а також *багатомірними*, поєднуючи кілька фізичних величин, які разом характеризують стан засобу (пристрою, приладу).

Вихідні (діагностичні) параметри засобів електронної техніки можна спостерігати (контролювати) після того, як конкретний засіб (пристрій, прилад) запущений у дію. При цьому вказані параметри можуть бути одержані:

- внаслідок стимулюючого зовнішнього впливу на виріб;
- як робочі вихідні параметри відповідно до принципу роботи.

Параметри, які не потребують зовнішніх впливів, та параметри, що з'являються під час робочих впливів засобу електронної техніки, є природними результатами, що свідчать про його дію.

З іншого боку сигнали, спровоковані тестовими (стимулюючими) впливами, відрізняються від відгуків засобів

електронної техніки на робочі стимуляції і використовуються лише для їх перевірки. Потреба у штучних (тестових) впливах виникає у разі труднощів чи взагалі складності перевірки засобів електронної техніки в робочих режимах. Створення тестових впливів може базуватися на різноманітних методах:

- формуванні специфічних сигналів;
- зміні режимів використання засобів електронної техніки;
- зміні режимів живлення;
- фізичному розділенні засобу (пристрою, приладу) та перевірки частинами;
- пробних замінах тощо.

Як правило, діагностичними параметрами є величини, значення яких можна вимірювати та порівнювати з еталоном (нормативом). У цифрових електронних пристроях робочі послідовності двійкових сигналів (логічні «1» і «0») перетворюють у форму, зручну для спостереження та порівняння із номіналами, тобто формують діагностичну сигнатуру. За необхідності вона «запам'ятовується» перетворювачем на час, достатній для порівняння чи аналізу.

Трапляються випадки, коли оцінити технічний стан виробу та локалізувати його несправність можна лише на підставі ретельного розгляду комплексного вихідного параметра. Слід зауважити, що окрім параметрів об'єкта діагностування, які досить легко вимірюються, його функціонування може супроводжуватися тепловими, зоровими, звуковими та іншими явищами, які відчуває оператор і які інколи діють комбіновано. Роль таких явищ є попереджувальною, оскільки дозволяє певною мірою «передбачити» наступну відмову.

Під час перевірки ознак, які можна спостерігати, але неможливо точно виміряти, взаємодіють психологічні й технічні фактори технічного діагностування. Найбільш доцільною є перевірка працездатності засобів електронної техніки за їх вихідними (діагностичними) параметрами під час дії на входах робочих впливів. Виконані під час технічного обслуговування такі перевірки пов'язані із прийняттям рішення щодо стану виробу. Перевірка працездатності, як правило, має два (інколи більше) несумісні результати:

- *позитивний*, якщо значення діагностичного параметра перебуває в зоні допуску або відповідає нормальному стану (за використання порогових сигналізаторів чи явищ, які супроводжують функціонування засобу);

– *негативний*, коли значення діагностованого параметра виходить за межі зони допуску або ж спрацьовують порогові сигналізатори чи виникають незвичайні супроводжуючі явища.

У разі кількох (понад дві) альтернатив оператору потрібно значно більше часу на прийняття рішення, оскільки в цьому випадку він подумки виділяє та аналізує все ж їх бінарні поєднання із швидкістю, що визначається передусім досвідом.

Перевірка працездатності засобів електронної техніки здійснюється періодично чи безперервно в процесі їх функціонування шляхом спостереження та аналізу доступних для контролю вихідних параметрів. В окремих випадках відмова чи пошкодження виробу не відразу спричиняє вихід діагностичного параметра за межі зони допуску – діють системи стабілізації або автоматичного регулювання. Однак така автоматична компенсація аномального стану виробу супроводжується перенапруженнями та збільшенням навантаження, що спричиняє появу шумів, перегріву, іскріння, диму, обвуглювання, зміни кольору й форми деталей тощо.

Вказані пасивні параметри «інформують» про незадовільний стан засобу (пристрою, приладу) раніше, ніж це виявиться за діагностичним параметром, що вийшов за межі допуску. Щоправда це можливо тоді, коли техніка цілком перебуває в зоні спостереження оператора, який має достатній досвід її експлуатації.

Як правило, конструкцією засобів електронної техніки передбачаються спеціальні контрольні гнізда для діагностування, що виводяться на передні панелі (окремі клемні колодки). Їх часто доповнює значна кількість контрольних точок всередині засобу – на монтажних платах.

Технічна документація, зокрема принципові електричні схеми, місять відповідну інформацію щодо кожного контрольного гнізда чи точки – рівень напруги, осцилограму сигналу тощо. Часом фахівцю-діагносту з метою локалізації несправного вузла чи елемента доводиться самостійно встановлювати характерні точки діагностування із відповідними діагностичними параметрами. Загалом вибір діагностичних параметрів засобу електронної техніки, розміщених всередині та зовні засобу електронної техніки контрольних точок (гнізд) та зображення їх у технічній документації є надзвичайно відповідальною і складною роботою.

6.3. Діагностичні процедури для оцінки технічного стану електронної техніки [1, 2]

Аномальний режим функціонування засобів електронної техніки виявляється передусім операторами, що їх використовують і проводять перевірку працездатності. Далі працюють спеціалісти з ремонту, від досвіду та рівня кваліфікації яких залежить точність (якість) встановлення місця і характеру несправності.

У багатьох випадках практики-ремонтники, не маючи вищої освіти, з успіхом справляються з пошуком несправності, використовуючи свої чи запозичені раціональні прийоми й технології. Діяльність фахівців з діагностування та відновлення засобів електронної техніки вивчена недостатньо, а тому практично ніде не налагоджене серйозне навчання технічному діагностуванню⁴⁵.

Суттєво те, що оператор працює переважно із одним нормально функціонуючим засобом електронної техніки, а фахівець із діагностування обстежує велику кількість «не зовсім справних» виробів. Функціонування їх супроводжується появою цілого ряду ознак, аналіз яких дозволяє віднайти нові, ще не вивчені зв'язки між складовими об'єкта діагностування. Слід зауважити, що існуючі технології відновлення засобів електронної техніки або ж ігнорують завдання пошуку несправностей, або ж приділяють їм дуже мало уваги. Саме тому кожен фахівець самостійно чи з допомогою наставника оволодіває навичками діагностування як загалом електронної техніки, так і конкретних її зразків.

Перші електронні пристрої (та й окремі сучасні), маючи нескладну конструкцію, дозволяють відшукати несправність шляхом послідовної перевірки вузлів, блоків, каскадів із порівняно незначними витратами часу. Час і кошти в таких випадках витрачаються переважно на демонтаж, заміну несправних деталей та усунення обривів і замикань, зокрема в обмотках.

Зовсім інша ситуація характерна складним засобам електронної техніки, що містять значну кількість інтегральних мікросхем, мікропроцесори, мають сотні з'єднань. На зміну технологіям послідовного перебирання каскадів (вузлів, блоків) приходять спеціалізовані процедури пошуку несправностей, що передбачають

⁴⁵ Для прикладу витяги з публікації періодичної преси в США:

– "... Якщо ми не можемо мати більше техніків з ремонту апаратури, то давайте зробимо їх кращими";

– "... Якщо ускладнення техніки продовжиться, то це приведе до апаратури, управляти якою зможуть бабуїни, а для ремонту потрібні будуть кандидати наук".

перевірку виробів за окремими її складовими зі скороченням кількості операцій з перевірки працездатності. Способам пошуку, що набули поширення, навчають фахівців з експлуатації засобів електронної техніки.

Серед різновидів пошуку як послідовності дій, спрямованих на виділення одного із сукупності взаємопов'язаних елементів слід назвати такі:

- спосіб пробних замінів (заміщень);
- спосіб фізичного виключення;
- спосіб проміжних вимірювань.

Кожен із способів має суттєві недоліки, рідко застосовується осібно, а переважно разом, причому спеціалістами-практиками без якоїсь системи. Немає одностайної думки щодо завдань і технологій пошуку несправностей, а навпаки є розбіжності, дискусії та суперечки. Проте можна назвати ряд узагальнених характеристик послідовностей пошуку несправності (перевірки працездатності) засобів електронної техніки:

- пошукова операція є перевіркою діагностичних параметрів засобу електронної техніки;
- перевірка діагностичних параметрів здійснюється у характерних контрольних точках принципової електричної схеми;
- перевірка завжди має два або більше несумісних результати, що можуть бути одержані водночас;
- перевірки виконуються послідовно й кожна наступна пов'язана із результатом попередньої, що дозволяє сформувати своєрідне *дерево логічних можливостей*;
- після певної кількості перевірок пошук завершується виявленням дефектного елемента як причин неправильної дії виробу чи його виходу з ладу. Кожна гілка дерева логічних можливостей веде до одного із елементів схеми виробу, а тому загальна кількість гілок співпадає із числом можливих несправностей.

Є беззаперечним факт існування загальних принципів пошуку й прийняття рішень для різних сфер діяльності людини: техніки, медицини, юриспруденції і нарешті філософії.

Стосовно засобів електронної техніки вважають доцільними такі напрямки підвищення ефективності пошуку несправностей:

- вивчення дій досвідчених фахівців, особливо їх перших кроків, малопомітних сторонньому, які значно скорочують тривалість пошуку; це є своєрідним прихованим (латентним) етапом пошуку, який експлуатаційна документація практично не описує; йому характерний візуальний контроль параметрів практично без впливу на

виріб; позитивного результату при цьому можна досягти не лише за рахунок загальної кмітливості, а насамперед на основі знань структури засобу електронної техніки, уміння вибрати та оцінити діагностичні параметри; наслідком помилок при цьому буде значне зростання обсягу робіт з діагностування і ремонту;

– використання типових переліків впливів на об'єкти діагностування та його відгуків у разі справного стану; при цьому може застосовуватися як функціональне із робочими впливами діагностування, так і тестове із подачею на вхід об'єкта тестових, не характерних для нормального режиму роботи впливів;

– проведення кількох перевірок, що створюють алгоритм діагностування (діагностичну процедуру) – безумовну чи умовну: *безумовна процедура* потребує проведення перевірок усіх діагностичних параметрів засобу електронної техніки й тільки після цього співставлення отриманих результатів; у скорочуваний безумовній процедурі порядок перевірок може бути довільним; *умовна процедура* не вимагає проведення перевірок всіх діагностичних параметрів; залежно від результатів попередніх перевірок обирається місце наступної перевірки за схемою засобу електронної техніки, що скорочує тривалість пошуку несправності.

Будь-яка діагностична процедура може бути представлена:

- в описовій формі;
- у вигляді таблиці несправностей;
- у вигляді дерева логічних можливостей.

6.4. Структурні моделі в діагностуванні засобів електронної техніки [1]

Кожен засіб електронної техніки має свою структуру, що зображується на структурних, функціональних, принципових схемах та схемах з'єднань і на кресленнях друкованих плат. При цьому виріб розділяється на блоки (вузли), кількість яких та обсяг вміщуваних елементів можуть змінюватися в певних межах.

Слід мати на увазі такі застереження щодо поділу:

- із збільшенням обсягу блока їх загальна кількість у складі виробу зменшується;
- із збільшенням обсягу блока зростає його вартість;
- із збільшенням обсягу блока зростає вартість пошуку несправності та заміни елементів;
- із збільшенням обсягу блока зростає обсяг ЗІП та його вартість.

Виходячи з цього, не завжди є доцільним поділ на блоки за невеликої їх кількості з метою спростити пошук та усунути несправності. Як правило, за виникнення відмов під час експлуатації електронної техніки виходить з ладу функціональний вузол чи модуль, а тому із зменшенням розміру блока знижується вартість усунення несправності. Щоправда в такому випадку збільшується кількість блоків у складі виробу, а це обумовлює зростання затрат праці на пошук несправного вузла.

На стадії конструювання має вирішуватися задача пошуку такого рівня глибини пошуку та обсягу вузла, за яких вартість відновлення виробу була б мінімальною. Поряд з цим певний обсяг блока повинен бути встановлений під час експлуатації та відновлення засобу електронної техніки, що певною мірою звужує глибину пошуку. Визначальним фактором є не стільки вартість пошуку, як скорочення його тривалості.

Відсутність необхідних запасних вузлів (модулів) для заміни в разі виходу з ладу висуває необхідність пошуку несправності до рівня окремих деталей, що знижує до того ж і вартість комплекту запасних частин.

Під час поділу засобу (пристрою, приладу) на складові з метою зменшення кількості перевірок слід дотримуватися принципу функціональної близькості – на будь-якому рівні поділу кожен елемент повинен мати лише один вихід (рис. 6.1). У конкретному випадку поділу виробу його найпростішими складовими є деталі, а в іншому крайньому випадку як елемент розглядається сам виріб. Кількість необхідних перевірок скорочується за наявності таких функціональних зв'язків, а якщо всі елементи всередині блока взаємозв'язані й сигнали надходять на один вихід, можна обійтися лише однією його перевіркою.

Питання блочного ремонту засобів електронної техніки не є однозначним, оскільки потребує пошуку шляхом досліджень раціональних співвідношень між обсягом пошукових робіт та вартістю запасних блоків. За умови остаточного вирішення щодо конкретного засобу електронної техніки питання поділу на блоки може бути побудована його *структурна модель*. Така модель базується на зображенні елементів та існуючих між ними зв'язків із зазначенням напрямів передачі сигналів чи енергії.

Основою названої моделі може бути функціональна схема засобу електронної техніки, яку слід вдосконалити, щоб полегшити пошук несправностей. До моделі повинні входити усі наявні джерела живлення та контрольні точки, визначені конструкторами.

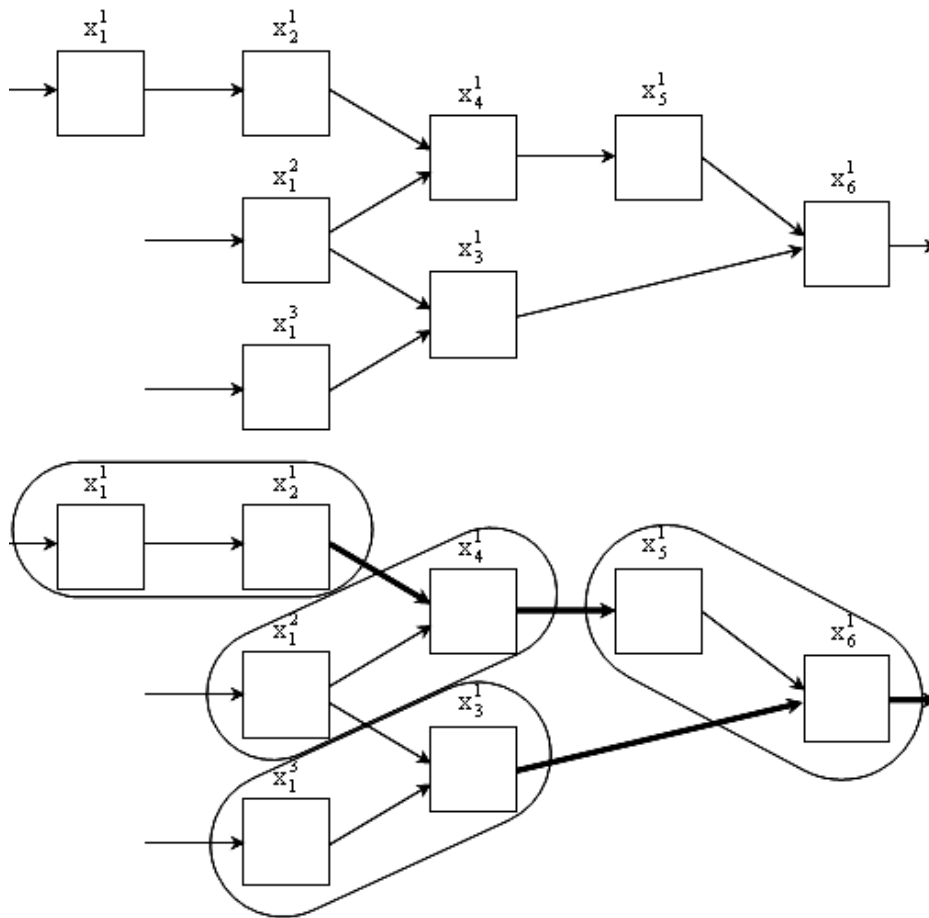


Рис. 6.1. Формування групи елементів всередині блока із дотриманням принципу функціональної близькості

Структурну модель можна назвати направленим (орієнтованим) графом (рис. 6.2), де елементи засобу електронної техніки зображені у вигляді кружків, а зв'язки між ними – у вигляді відрізків прямих ліній із стрілками.

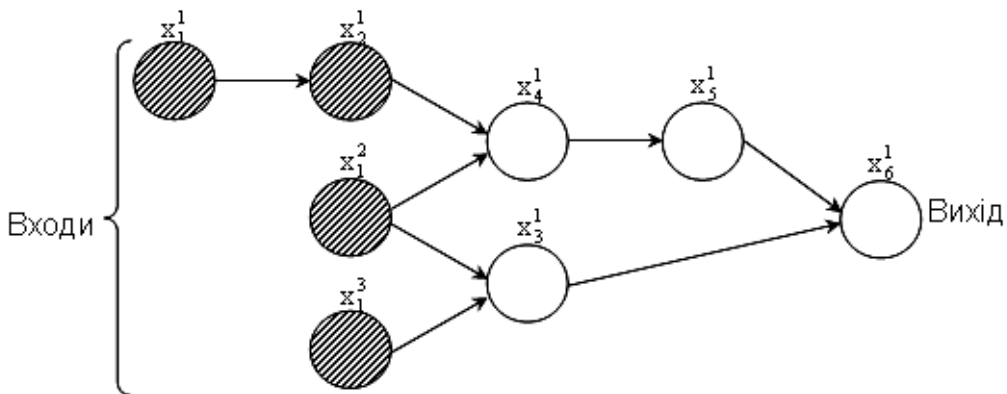


Рис. 6.2. Орієнтований граф як структурна модель об'єкта діагностування

Структурна модель має бути доповнена точками подачі робочих (випробувальних) напруг чи механічних впливів, а також точками перевірки діагностичних параметрів. Поряд із цим повинні бути зазначені чіткі координати всіх елементів моделі та характеристики допустимих значень діагностичних параметрів і способи їх перевірки. Заздалегідь мають бути визначені координати точок, до яких підключаються вбудовані й зовнішні засоби діагностування.

Під час побудови структурної графічної моделі засобу електронної техніки, зокрема в графічному вигляді, слід також враховувати можливість виникнення різних відмов одного й того ж елемента (обрив, замикання, перевантаження, розрегулювання), можливість пробних замін та визначитися щодо легкозамінюваних вузлів чи ділянок схем. Слід зауважити, що спроби вирішити завдання діагностування засобів електронної техніки без урахування їх фізичних і структурних особливостей не дають змоги отримати достатньо повні моделі й діагностичні процедури.

6.5. Труднощі та помилки під час діагностування засобів електронної техніки [1, 2]

Під час розробки технологій діагностування засобів електронної техніки та безпосередньо під час його проведення формується і вдосконалюється дерево логічних можливостей пошуку несправностей. Успіхом може вважатися побудова дерева із гілками однієї мінімізованої довжини. При цьому думка щодо примітивності пошукових завдань і простоти створення дерева є хибною.

Водночас діагностування приковує увагу виконавця за умови практичної відсутності регламентованості рішень та наявності певної свободи вибору варіантів пошуку несправностей. Факторами, що визначають достовірність отриманого результату та його «ціну», є досвід, бажання досягти поставленої мети, певною мірою вдача тощо. Поряд з цим діють психологічні фактори, проявляють вплив конструктивних особливостей об'єкта діагностування та його параметрів, рівень знань фахівця-діагноста, а також врахування ним характерних ознак методів і засобів пошуку.

У процесі перевірок засобу електронної техніки оператор діє як за алгоритмізованою методикою послідовного пошуку (у формі дерева логічних можливостей), так і за випадковими схемами, прагнучи вгадати контрольні точки, що вдається далеко не завжди. Однак успішне діагностування методом випадкового пошуку дає свої результати: з одного боку задоволення досягнутим успіхом, а з іншого

хибне уявлення про незвичайну складність пошуку та особливу інструкцію окремих діагностів. Насправді ж проблема полягає у відсутності доступних для масового оператора відлагоджених технологій діагностування засобів електронної техніки.

На шляху до успіху в пошуку несправностей об'єкта діагностування постає низка психологічних труднощів:

- діагност не завжди правильно уявляє собі можливі виходи пошуку, тобто варіанти несправних станів виробу та їх взаємозалежність; звідси – неможливість правильно оцінити пошукові зусилля і невпевненість в успішному завершенні пошуку;

- відсутність чітко визначених понять, пов'язаних із процесом пошуку; такий термінологічний дефіцит не дає можливості діагносту правильно сформулювати сутність проблем пошуку та обговорювати їх шляхом спілкування із більш досвідченими фахівцями;

- недостатній обсяг навчального часу, що відводиться на діагностування під час підготовки фахівців-експлуатаційників, зокрема в галузі електронної техніки; зазвичай багато часу й зусиль спрямовується на вивчення фізичних процесів у схемах електронних пристроїв, засвоєння методики та приладового забезпечення вимірювань; отримавши таким чином загалом корисні знання, але допоміжного характеру щодо діагностування, фахівець у реальних пошукових ситуаціях розгублюється і починає сумніватися у своїй професійності;

- сукупне сприйняття процесу пошуку, тоді як цей процес за своєю природою є дискретним; учень, що спостерігає, як здійснює пошук досвідчений фахівець, випускає з поля зору ті кроки пошуку, які він здійснює подумки, а також перевірки, обрані випадково або ж виходячи із суб'єктивних міркувань; прихована фаза пошуку, що базується на чисельних спостереженнях, аналізі пасивних ознак та показів контрольно-вимірювальних приладів є напрочуд інформативною і складною для засвоєння у навчальному процесі;

- дефіцит часу, що перешкоджає чіткому засвоєнню принципів роботи схем засобів електронної техніки, бажано за їх структурою; за відсутності наперед розробленого алгоритму пошуку в умовах, коли часу обмаль, надмірне хвилювання оператора значно ускладнює пошук.

Діагноста переслідують також методичні помилки, що можуть трапитися за таких обставин:

- недостатня увага до вивчення функціональних схем виробу, а саме вони найбільш повно відображають логіку взаємодії окремих складових частин;

- спроби уявити послідовність пошуку несправностей діагностованого виробу як сукупність лише вимірювань, без спостереження пасивних ознак, пробних замін блоків (вузлів, елементів), фізичних виключень, зміни режимів роботи та інших прийомів, властивих технологіям діагностування;

- не беззаперечний висновок про наявність чіткого парного зв'язку між окремим діагностичним параметром та відмовою засобу електронної техніки; у більшості випадків необхідно виміряти не менше двох діагностичних параметрів залежно від кількості входів контролюваного елемента та його місця у схемі виробу;

- погане розуміння процесів, що можуть викликати появу відмов та невміння оцінити їх вплив на діагностичні параметри; при цьому можуть бути змішані окремі види відмов, невідворотні зміни та тимчасові розрегулювання, стійкі дефекти та збої;

- небажання обговорювати з колегами зроблений вибір методики й обсягу пошуку несправностей та нехтування існуючими рекомендаціями щодо раціонального планування пошуку;

- надмірна самовпевненість діагностів-практиків та їх супротив впровадженню «чужих» технологій пошуку несправностей.

Перелічені обставини й відповідні їм помилки суб'єктивного характеру можуть поєднуватися із помилками, що пов'язані з браком знань та вмінь:

- спрощений розгляд засобу електронної техніки ізольовано, без урахування структури та внутрішніх функціональних зв'язків;

- переведення пошуку несправності відразу на рівень принципової електричної схеми з тим, щоб звести все до вимірювань;

- спроби зробити оцінки результатів вимірювань багатоальтернативними (такими, що мають два або більше результатів) начебто з необхідністю підвищення точності;

- нехтування випадками появи двох або більше дефектів у різних блоках чи вузлах;

- нехтування чи переоцінка трудомісткості перевірок параметрів;

- неадекватне ставлення до розрахункових значень ймовірностей відмов (враховувати, але не фаталізувати);

- необґрунтований вибір місця пробних змін, фізичних виключень та переходів із режиму в режим під час формування засобу електронної техніки;
- необґрунтоване, передчасне чи непотрібне розбирання виробу;
- дублювання перевірок, що дали правильні достовірні результати;
- погане розуміння способу індикації певного стану виробу у його просторі можливих станів;
- хибна думка про неможливість чи недоцільність діагностування цифрових пристроїв методами функціонального діагностування шляхом побудови умовних діагностичних процедур, наближених до зовнішнього прояву альтернативного мислення людини.

Основними передумовами успішного пошуку та усунення несправностей засобів електронної техніки є наявність такої інформації щодо них:

- структурна модель із зазначенням координат елементів;
- перелік видів відмов чи пошкоджень і відповідних їм очікуваних порушень роботи (несправностей);
- перелік діагностичних параметрів, способів і засобів впливу на об'єкт діагностування, точок контролю та часових параметрів проведення перевірок;
- технологія усунення несправностей на заданому рівні поділу виробу на елементи.

6.6. Автоматизована система діагностування електронних пристроїв «ТЕСТ-Д»

Під час виробництва й експлуатації електронних пристроїв, зокрема контролерів, систем автоматики тощо, які мають у своєму складі різні паралельні й послідовні інтерфейси (RS232, SPI, I2C тощо) виникає проблема перевірки їх працездатності. Класичним вирішенням вказаної проблеми є розробка спеціалізованих тестових стендів, але вони, як правило, мають вузьку сферу застосування і високу вартість. Використання для цих цілей універсального тестового устаткування має багато переваг.

Автоматизована система діагностування «ТЕСТ-Д» (АСД) використовується на виробництві як універсальне тестове устаткування (стенду) та дозволяє:

- створювати складні алгоритми тестування;

- здійснювати тривалий циклічний прогін пристроїв;
- тестувати різні інтерфейси прийому–передавання даних;
- тестувати масиви пам'яті;
- працювати з файлами даних;
- швидко перебудовуватися на тестування нового виробу.

Впровадження діагностичного стенду на базі АСД «ТЕСТ–Д» робить можливим не лише виконувати функціональне тестування електронних пристроїв, але й виконувати налагодження виробів, які не пройшли тестування. Як приклад застосування системи діагностування «ТЕСТ–Д1 USB» на складальному виробництві підприємства можна привести стенд для функціонального контролю пристроїв введення–виведення технологічної інформації для верстатів з числовим програмним управлінням.

Функціональне тестування пристрою УВВП включає перевірку таких режимів роботи:

- обмін інформацією з персональним комп'ютером по каналу USB;
- введення–виведення по каналу I2 C;
- введення–виведення по каналу ІРПС;
- введення–виведення по каналу ІРІР (6 різних режимів);
- введення–виведення по каналу RS232 (2 режими).

Тестований пристрій підключається до АСД «Тест–Д1 USB» за схемою, наведеною на рис. 6.3.

Алгоритм функціонального тесту ґрунтується на реальному алгоритмі роботи УВВП із зовнішніми об'єктами. Тестування полягає в перевірці інтерфейсів і режимів введення–виводу шляхом передавання в систему діагностування і прийому з неї контрольної технологічної програми за допомогою УВВП. При цьому система діагностування емулює вузли введення–виведення різних моделей систем числового програмного управління. Прийнятий у результаті вказаної передачі файл технологічної програми порівнюється з еталоном і за результатами порівняння видається результат тестування.

Використання системи діагностування «ТЕСТ–Д» як стенду функціонального контролю найефективніше на підприємствах, що не мають можливості розробити власне спеціалізоване діагностичне устаткування.

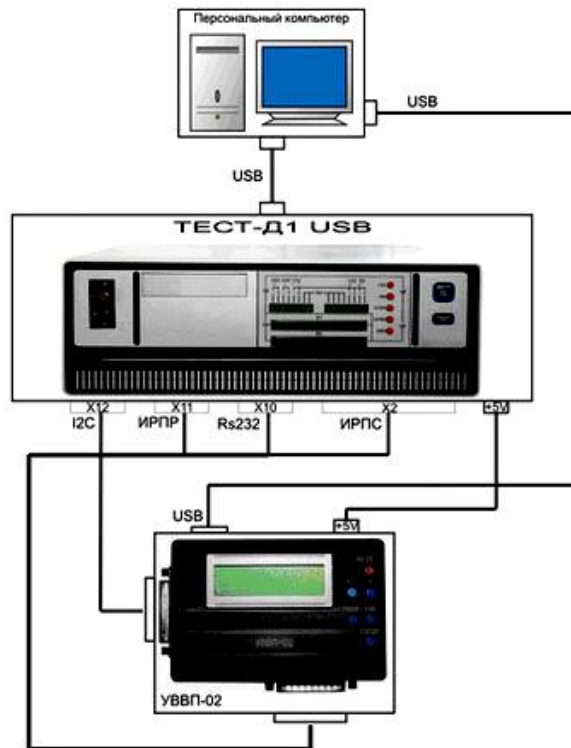


Рис. 6.3. Схема приєднання автоматизованої системи діагностування «ТЕСТ-Д» для функціонального контролю пристроїв введення–виведення технологічної інформації (УВВП) для верстатів з ЧПУ

Склад автоматизованої системи діагностування «ТЕСТ-Д». Основними елементами автоматизованої системи діагностування «ТЕСТ-Д» (рис. 6.4) є блок діагностування з комплектом джгутів, адаптерів і персональний комп'ютер. Управління роботою блока діагностування здійснюється від персонального комп'ютера через порт USB.



Рис. 6.4. Система діагностування «ТЕСТ-Д»

Персональний комп'ютер повинен мати таку мінімальну конфігурацію:

- процесор Pentium III ;
- частоту процесора 1 ГГц;
- пам'ять 128 Мбайт;
- монітор SVGA ;
- маніпулятор MOUSE ;
- два порти USB.

На сьогодні випускаються такі моделі системи діагностування і прилади:

- система діагностування «ТЕСТ–Д1» (рис. 6.5 а) – блок діагностування складається із функціонального тестера й блока живлення;
- система діагностування «ТЕСТ–Д3» (рис. 6.5 б) – блок діагностування складається з функціонального тестера, аналогового тестера «VI–зонд», тестера цифрових мікросхем «ВТЦМ–32» та блока живлення.



Рис. 6.5. Блоки діагностування систем:
а) «ТЕСТ–Д1»; б) «ТЕСТ–Д3»

Функціональний тестер системи діагностування «ТЕСТ–Д».
Функціональний тестер (рис. 6.6) призначений для діагностування електронних пристроїв за допомогою функціонального й сигнатурного тестування. Є базовим приладом системи діагностування «ТЕСТ–Д». До складу функціонального тестера входять програмований контролер, що має 190 (95) каналів введення–виведення з логічними рівнями ТТЛ і КМОП, логічний зонд (IN–зонд), зонд-генератор (OUT–зонд) та блоки живлення об'єкта контролю (основний: +5V 15A +12V 8A -5V 0,5A -12V 0,5A; додатковий: +/- 15V 1A +/- 24V 1,5A).

Тестер розміщується у блоці діагностування АСД «ТЕСТ–Д». Підключення до персонального комп'ютера здійснюється через порт USB або за допомогою ISA-контролера.

Функціональний тестер комплектується програмним забезпеченням:

- 1) для функціонального тестування – програма DIATEST.EXE та програма-редактор EDITTEST.EXE;
- 2) для виконання цифрового сигнатурного тестування – програма SIGTEST.EXE;
- 3) для діагностування в статичному режимі – програма CONTEST.EXE.

Поставляються також апаратно-програмні комплекти (АПК), призначені для ремонту за допомогою функціонального тестера різноманітних електронних пристроїв, що включають бібліотеку тестових програм та адаптери підключення.

Тестер входить до складу «Блока діагностики», системи діагностування «ТЕСТ-Д» або внутрішньосхемного тестера «ВТ-02» і працює з програмою ImtTest.EXE та програмою-редактором ImtEdit.EXE.



Рис. 6.6. Функціональний тестер

Склад і технічні параметри функціонального тестера.

Програмований контролер:

- Число каналів каналу введення–виводу190 (95)
- Рівні сигналівТТЛ, КМОП
- Максимальний рівень логічної одиниці15 V
- Максимальний рівень логічного нуля:
 - у режимі виведення0,4 V
 - у режимі введення0,8 V
- Максимальний струм за рівня логічного нуля:
 - у режимі виведення40 mA
 - у режимі введення0,8 mA

Зонд логічний (IN–зонд):

- Рівень логічної одиницівід 2,0 V до 15 V
- Рівень логічного нулявід -15 V до 1,0 V
- Вхідний опір.....20 кОм

Зонд генератор (OUT–зонд)

- Рівень логічної одиниці..... не менше 2,4 V

Рівень логічного нуля..... не більш 0,8 V
Максимальний вихідний струм200 мА

Під час функціонального й сигнатурного тестування контакт з об'єктом, що перевіряється, як правило, здійснюється через крайній роз'єм за допомогою спеціалізованого пристрою – адаптера підключення. Адаптери забезпечують подачу живлення на об'єкт контролю і його зв'язок з функціональним тестером. У деяких випадках адаптери здійснюють перетворення сигналів, що як впливають на об'єкт, так і приймаються з об'єкта.

Таким чином, не міняючи програмного забезпечення, користувач може самостійно значно розширити можливості системи діагностування, виготовивши необхідний йому спеціальний адаптер. Для визначення відповідності контактів вихідних роз'ємів адаптера й каналів введення–виведення користувачем складається файл опису конфігурації адаптера, шляхом заповнення стандартної таблиці.

Функціональне тестування. Під час функціонального тестування система діагностування перевіряє працездатність пристрою, емулюючи його роботу в складі діючого устаткування. Метод функціонального тестування реалізується за допомогою програми «Діагностичний тест» (diatest.exe). Алгоритми тестування, що задаються, дозволяють діагностувати електронні пристрої у режимах близьких або навіть жорсткіших, ніж робота в складі діючого устаткування.

Алгоритм тестування (рис. 6.7) задається в тестовому файлі у вигляді часових діаграм сигналів керування «Слів даних», у яких компактно представлена інформація, що передається багаторозрядними магістралями. Алгоритм визначає комбінації сигналів впливу, їх часову послідовність і порівняння отриманих у відповідь сигналів з еталонними.

Структура тесту є часовою діаграмою, на якій «Слова даних» синхронізуються сигналами управління, що дозволяє наочно й компактно описати досить складні алгоритми тестування практично будь-якого електронного пристрою. Структура проста, зрозуміла користувачеві й досить детально описана в документації, що поставляється. Для редагування і створення нових тестів до складу програмного забезпечення входить графічний редактор EditTest.exe.

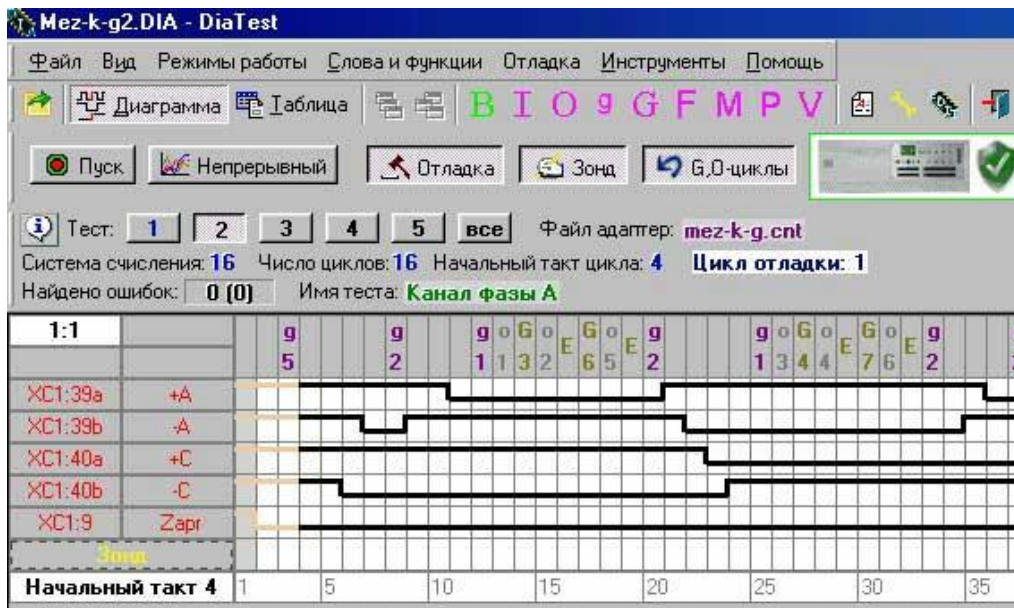


Рис. 6.7. Часова діаграма алгоритму тестування

Слід зазначити такі переваги програми:

- задавання часової діаграми довжиною до 128 тактів у поєднанні з циклічними повторами дозволяє отримати послідовності сигналів, що складаються з тисяч тактів, і в той же час наочно представити алгоритм тестування на екрані монітора;
- наявність керованих віртуальних одноканальних і багатоканальних генераторів дає можливість задати в тесті різні послідовності імпульсів і часові затримки без вживання додаткових сервісних приладів;
- можливість формування користувачем файлу опису контактів адаптера для підключення тестованої плати дозволяє використовувати один адаптер для діагностування різних типів плат з однаковими роз'ємами;
- створення в одному тестовому файлі декількох тестів, що дозволяє проводити тестування пристрою в різних режимах або здійснювати послідовні перевірки логічних вузлів;
- використання циклічного режиму тестування, що дає можливість визначення «плаваючих» дефектів і несправностей, пов'язаних з прогріванням пристрою;
- можливість спостерігати за допомогою логічного зонда (IN-зонд) проходження сигналів на виводах елементів синхронно з часовими діаграмами алгоритму тестування;
- наявність доповнюваного коментаря до тесту (записник), що дозволяє не лише описати алгоритм тесту, але й оперативно відобразити виниклі за результатами тесту зауваження;

– програма здійснює діагностування різних типів оперативних запам'ятовуючих пристроїв (ОЗП). Для статичних ОЗП з підживленням є можливість зберегти вміст ОЗП у файлі, записати дані з файлу в ОЗУП, перевірити ОЗП на збереження інформації;

– програма надає повний набір засобів для ремонту плат, що містять мікросхеми ПЗП: порівняння даних ПЗП з еталоном і пошук несправної мікросхеми пам'яті, запис вмісту мікросхем ПЗП у файл, перегляд, редагування даних ПЗП.

Програма працює з програматорами PROM та EPROM і підтримує ряд алгоритмів програмування, у тому числі мікросхем K573PФ1, що вже не випускаються, K573PФ2, K556PT4, K556PT5, K155PE3 та інших.

За наявності у складі системи діагностування аналогового тестера «VI–зонд» є можливість виконати знімання осцилограми в контрольованій точці плати, що перевіряється, з подальшим збереженням її в тестовому файлі. Запуск VI–зонда здійснюється з будь-якого заданого такту часової діаграми діагностичного тесту. Це забезпечує синхронізацію знімання і можливість порівняння осцилограм, знятих із справної і несправної плати.

Для користувачів, які самостійно розробляють тестові програми, пропонується універсальний модуль сполучення УМС–95, призначений для створення на його базі адаптерів для різних електронних пристроїв і редактор тестів EditTest.exe. Особливістю модуля УМС–95 є можливість за допомогою змінної перехідної плати задати необхідні зв'язки каналів системи діагностування й об'єкта контролю. Плата є макетним полем, на яке можливе встановлення користувачем різних елементів, що забезпечують узгодження сигналів. Перехід до тестування нового об'єкта контролю здійснюється заміною перехідної плати й сполучних джгутів на інші, відповідні новому об'єкту.

Цифровий сигнатурний аналіз. Цей метод реалізує програма «Сигнатурний тест». Для сигнатурного тестування використовуються ті ж канали введення–виведення, що й для функціонального тестування. Метод цифрового сигнатурного аналізу базується на застосуванні так званих «сигнатур» – певних цифрових послідовностей на виходах пристрою за подавання на вхід схеми фіксованих послідовностей цифрового коду.

У АСД «ТЕСТ–Д» цей метод реалізує програма «Сигнатурний тест». Принцип роботи сигнатурного тесту такий: на входи тестованої плати подається певна комбінація логічних рівнів і зчитується стан тестованого виходу, потім комбінація сигналів на входах змінюється і

знову прочитується стан тестованого виходу. Цей процес повторюється 2^{12} разів і в результаті виходить послідовність завдовжки 4096 біт, для якої розраховується 32-розрядна контрольна сума. Ця сума потім порівнюється з еталонним значенням, отриманим на свідомо справній платі. Алгоритм розрахунку гарантує виявлення одинарних, подвійних, пакетних і всіх непарних помилок у послідовності.

Контроль сигнатур можна здійснювати як на виходах плати, так і в контрольних точках усередині неї. Завдяки цьому програма дозволяє локалізувати несправність з точністю до конкретного елемента.

Програма застосовується в основному для тестування цифрових плат з однорідною структурою, хоча буває ефективна для ремонту навіть мікропроцесорних пристроїв. Програма дозволяє виконувати повну перевірку пасивних елементів, таких як перехідні плати, кабелі, джгути тощо, на наявність обривів, коротких замикань і помилок під час розпаювання роз'ємів.

Створення тестового файлу полягає в заповненні файлу шаблону, де задаються вхідні й вихідні контакти роз'ємів тестованого пристрою. Є можливість задати вхідні сигнали для передвстановлення елементів з пам'яттю, розташованих на тестованій платі.

Діагностування електронних пристроїв у статичному режимі. Програма «Тест контактів» дозволяє тестувати електронні плати в статичному й псевдодинамічному режимах, працюючи в режимах «Тестера» й «Редактора». Наявність режиму «Редактора» дозволяє користувачеві швидко й наочно створити на дисплеї мнемосхему роз'ємів будь-якого адаптера й відразу приступити до тестування електронної плати.

Після запуску програми в режимі «Тестера» й вибору типу адаптера, на екрані монітора з'являється вікно з мнемосхемою роз'ємів відповідного адаптера (рис. 6.8), до яких підключається плата, що діагностується.

Потім користувач має можливість встановлювати логічні сигнали, подавати циклічну послідовність сигналів на вхідні контакти плати, що перевіряється, і прочитувати інформацію з вихідних контактів плати однократно й циклічно. Контроль сигналів здійснюється візуально на екрані дисплея або за допомогою осцилографа.

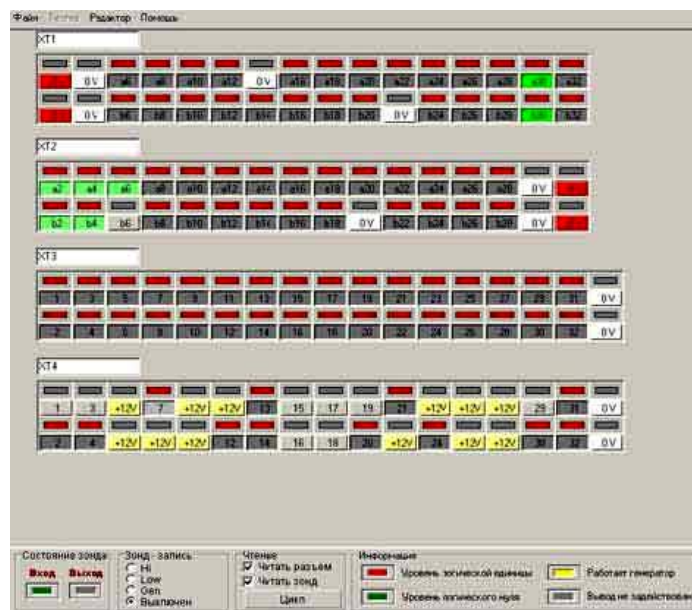


Рис. 6.8. Мнемосхема роз'ємів адаптера УЧПУ 2С42

Використовуючи ЗОНД-генератор (OUT-ZOND) і логічний зонд (IN-ZOND) користувач має можливість контролювати проходження сигналу між двома точками тестованої плати. ЗОНД-генератор (OUT-ZOND), що реалізує метод цифрового внутрішньосхемного тестування, задає циклічну послідовність імпульсів і дозволяє на час проходження імпульсу встановити заданий рівень на вході логічних мікросхем. Величина імпульсу струму, що подається на контакт мікросхеми, є достатньою для примусового встановлення виходу логічного елемента в заданий стан і в той же час не виводить його з ладу.

Режим знімання осцилограм. У діагностичному тесті є можливість виконати знімання осцилограм в контрольованій точці плати, що перевіряється, з подальшим збереженням у тестовому файлі. Ця опція доступна за спільної роботи функціонального тестера і аналогового тестера VI-зонд, який входить до складу АСД «ТЕСТ-ДЗ» або внутрішньосхемного тестера «ВТ-02». Запуск VI-зонда здійснюється з будь-якого заданого такту часової діаграми діагностичного тесту. Це забезпечує синхронізацію знімання і можливість порівняння осцилограм, знятих із справної і несправної плати. Для визначення параметрів осцилограм, що знімаються, у тесті задаються такт знімання, тривалість розгортки й максимальна амплітуда сигналу.

У кінці відробітку тесту на дисплеї з'явиться вікно, у якому відобразатимуться еталонна й знята осцилограма (рис. 6.9). У разі

збігу вони накладаються одна на одну. Знімання осцилограм може виконуватися як однократно, так і в циклічному режимі.

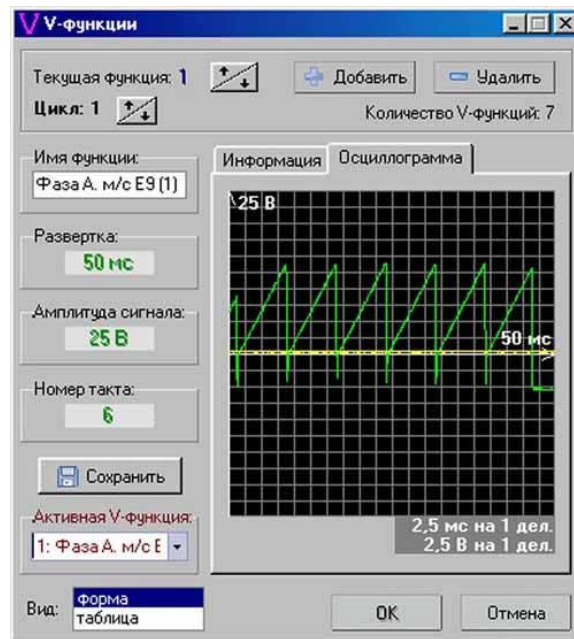


Рис. 6.9. Вікно виведення осцилограм (осцилограма пилкоподібної напруги блока СІФУ електропривода)

Важливою особливістю цього режиму є знімання, запам'ятовування і порівняння осцилограм процесів, що повільно змінюються (до 10 с).

Аналоговий тестер (VI-зонд) (рис. 6.10) призначений для пошуку несправностей в електронних пристроях. Апаратно-програмне забезпечення приладу дозволяє працювати в трьох режимах: *аналізатора вольтамперних характеристик, осцилографічного пробника й низькочастотного осцилографа*. Тестер входить до складу системного блока АСД «ТЕСТ-Д» або внутрішньосхемного тестера «BT-02» і працює з програмним забезпеченням VIZOND.EXE.

Програмне забезпечення дозволяє записати у файл послідовно практично необмежену кількість вольтамперних характеристик (до 32000) справного пристрою, а потім порівнювати їх із характеристиками несправної плати. VI-зонд рекомендується використовувати для локалізації несправності (пошуку несправного цифрового або аналогового компонента) після визначення несправного вузла пристрою за допомогою функціонального тесту.



**Рис. 6.10. Аналоговий тестер VI-ЗОНД
(аналізатор вольтамперних характеристик)**

Напряга живлення зонда: +5В, +15В, -15В, а споживаний струм по кожному каналу живлення не більше 200 мА.

Характеристики режимів роботи аналогового тестера (VI-зонд):

1. режим аналізатора вольтамперних характеристик:

– Параметри тестуючого сигналу по каналу «U»:

- форма сигналу – синусоїдальна;
- амплітуда напруги – 10 В;
- діапазон частот, Гц – 1, 10, 100, 1000, 2000.

Максимальний струм через замкнуті щупи, залежно від вибраного діапазону, мА – 1, 2.5, 5, 10. Запуск вимірювання – внутрішній або зовнішній.

2. Режим осцилографічного пробника:

– параметри тестуючого сигналу по каналу «G»:

- форма сигналу – синусоїдальна, пілкоподібна, імпульсна;
- амплітуда напруги – від 0В до 10 В, з дискретністю 0,1 В;
- діапазон частот, Гц – 1, 10, 100, 1000.

Вхідний опір каналу «X» – не менше 1 МОм. Максимальна амплітуда сигналу, що подається, на вхід «X» – не більш 50 В. Амплітуда напруги спостережуваної сигнатури – не більше 50 Ст. Запуск вимірювання – внутрішній або зовнішній.

3. режим осцилографа:

- амплітуда вимірюваного сигналу до 50 В;
- тривалість розгортки, мс – 1.6, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500;
- вхідний опір каналу «X» – 1 МОм.

Синхронізація – внутрішня або зовнішня: по передньому або задньому фронту запускаючого сигналу.

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) двополюсників радіокомпонентів різного типу або схемного набору елементів плати друкованого монтажу мають чітко виражені й легко розпізнавані форми. Знімання й аналіз вольт-амперних характеристик (англійська аббревіатура VI-Traces – метод вольт-амперного сліду) шляхом подавання на компоненти обмеженої за струмом змінної напруги, що перевіряються, з подальшим спостереженням за сигнатурою імпедансу результуючого струму через елемент (рис. 6.11), що перевіряється, є *методом аналогового внутрішньосхемного тестування* як цифрових, так і аналогових електронних пристроїв. Несправність радіокомпонентів у складних електричних ланцюгах може бути локалізована навіть за відсутності детальних знань про функціонування тестованого пристрою або документації на нього. Оскільки під час застосування цього методу до випробовуваних елементів прикладається безпечна низьковольтна й обмежена струмом тестуюча напруга, вони не можуть бути пошкоджені.

Перевірка вищезгаданим методом вхідного й вихідного імпедансу складних інтегральних елементів (операційних підсилювачів, компараторів тощо) часто не може виявити порушень їх внутрішньої структури. Подібні несправності виявляються лише перевіркою їх функціонування. Для перевірки аналогових елементів, основу яких складають операційні підсилювачі, застосовується режим аналогового тестера VI-ЗОНД «осцилографічний пробник», що є багатофункціональним генератором та осцилографом, синхронізованим запуском задаючим сигналом генератора. Це дозволяє отримати й порівняти осцилограми вхідного й вихідного сигналів тестованого елементу (рис. 6.12). Вхідний сигнал може бути заданий у вигляді синусоїди, пілкоподібної напруги або в імпульсній формі з можливістю регулювання амплітуди й частоти. За використання осцилографічного пробника на об'єкт контролю має бути подана відповідна напруга живлення.

У обох режимах роботи використовується вбудований цифровий осцилограф, який може працювати і як автономний пристрій (рис. 6.13). Частотні властивості його обмежені, він застосовується в основному під час тестування низькочастотних цифро-аналогових пристроїв (електроприводів тощо). Однією з особливостей осцилографа є його використання під час функціонального тестування електронних пристроїв, де є можливість знімання і запам'ятовування осцилограм під час запуску з будь-якого такту діаграми тесту.

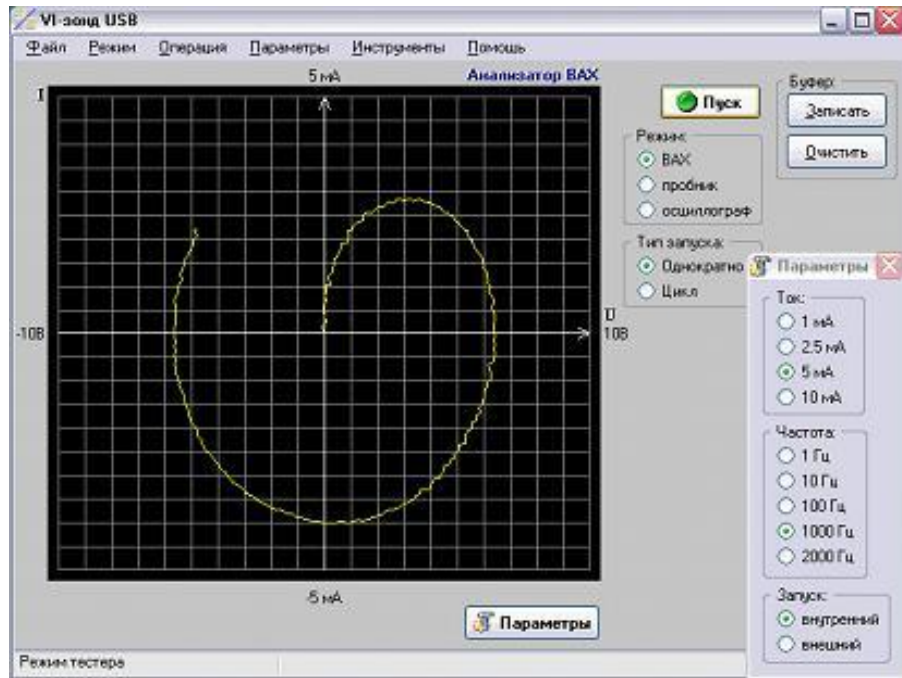


Рис. 6.11. Вікно аналізатора ВАХ на базі аналогового тестера VI-ЗОНД

Сигнатури й часові діаграми, отримані в режимах аналізатора ВАХ, пробника й осцилографа, можна записати в еталонний файл, який може містити до 32000 діаграм. Таким чином, є можливість тестування електронних пристроїв шляхом порівняння отриманих і еталонних діаграм.

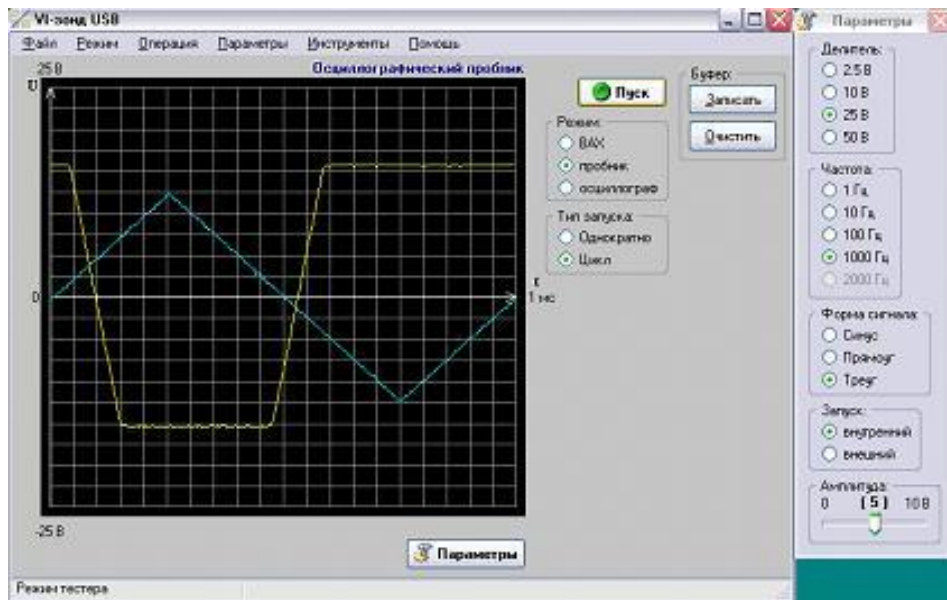


Рис. 6.12. Осцилограми вхідного й вихідного сигналів операційного підсилювача

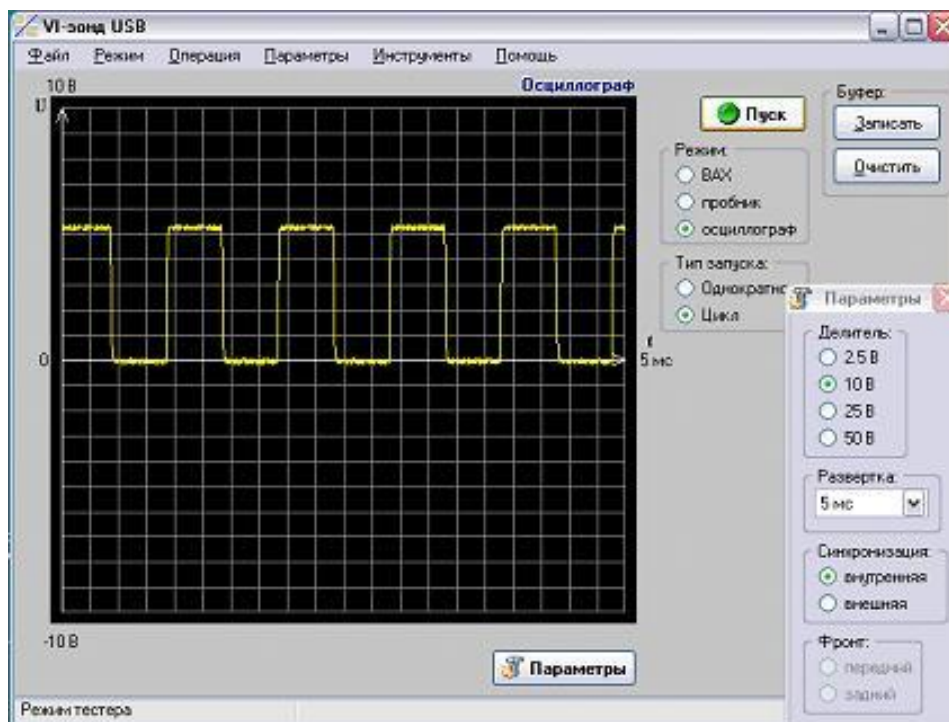


Рис. 6.13. Вбудований цифровий осцилограф аналогового тестера VI-ЗОНД

Діагностування тестером VI-зонд передбачає поконтактне тестування елементів електронних пристроїв (метод Pin By Pin). Зменшена швидкість тестування порівняно з аналогічними пристроями, що використовують для тестування багатоконтактних пробників і кліпси, як показала практика, не знижує продуктивності ремонту. Для визначення несправності користувачеві в будь-якому разі потрібно візуально проаналізувати кожну діаграму. Автоматизоване порівняння ВАХ з одного боку помітно ускладнює апаратну й програмну частини пристрою, з іншого боку не дає належного ефекту, оскільки навіть однакові за типом мікросхеми різних виготівників мають різні ВАХ. Крім того, під час використання багатоконтактних пробників виникають проблеми з їх контактами, а для більшості мікроконтролерів і програмованих логічних інтегральних схем подібні пробники досить дорогі або придбати їх неможливо.

Аналоговий тестер VI-Зонд, що є складовою частиною системи діагностування «ТЕСТ-Д», в основному призначений для локалізації несправного компонента після проведення функціонального тестування. Він дозволяє виявити несправності, які важко визначити за допомогою іншого тестового устаткування і має такі переваги:

- можливість тестування електронних компонентів з будь-якими типами корпусів, включаючи великі інтегральні схеми та

програмовані логічні інтегральні схеми, і будь-якою щільністю монтажу;

- можливість тестування електронних пристроїв через встановлені на них роз'єми будь-яких типів, а також контрольні точки, що є на платі;

- проста апаратна реалізація і менша вартість порівняно з аналогічними пристроями, у яких застосовуються багатоконтактні пробники.

Внутрішньосхемний тестер цифрових мікросхем ВТЦМ-32 (рис. 6.14) призначений для внутрішньосхемного контролю функціонування цифрових інтегральних мікросхем в електронних модулях з напругою живлення 5 В. Прилад працює у складі автоматизованої системи діагностування «ТЕСТ-Д», що розширює функціональні можливості системи і є її логічним продовженням.

Тестер ВТЦМ-32 має 32 цифрових канали, якими відбувається подавання впливів на мікросхему, що перевіряється, і приймання реакцій на ці впливи. Сигнали, що приймаються, аналізуються за рівнями логічного нуля й одиниці, які задаються користувачем. Мікросхема, що перевіряється, підключається за допомогою тестового затискача (кліпси), відповідного типу її корпусу (DIP, SOIC тощо), а її живлення двома затискачами, підключеними до кола живлення тестованої плати.



Рис. 6.14. Тестування цифрових мікросхем за допомогою внутрішньосхемного тестера цифрових мікросхем ВТЦМ-32

Внутрішньосхемний тестер цифрових мікросхем ВТЦМ-32 використовує метод цифрового внутрішньосхемного тестування (англійська аббревіатура – ICFT). Цей метод дозволяє, не випаюючи

цифрові мікросхеми з плати, перевірити правильність їх функціонування. Для цього на контакти тестованої мікросхеми подаються потужні імпульси, здатні встановити заданий рівень логічного сигналу незалежно від логічного стану компонента зв'язаного з контактом, що перевіряється (метод придушення логічних рівнів пристрою «backdriving»). Величина імпульсу струму, що подається на контакт мікросхеми, є достатньою для примусового встановлення виходу логічного елемента в заданий стан і в той же час не виводить його з ладу. Для того, щоб обмежити розсіювану потужність елемента мікросхеми, час, протягом якого подається дія, обмежено. Згідно з рекомендаціями міжнародного стандарту INT DEF SID 0053–1 час перевантаження не повинен перевищувати 65 мілісекунд.

Тестування мікросхеми виконується в 3 етапи:

1) подача напруги живлення на пристрій, що перевіряється, вимірювання напруги на виводах мікросхеми з перевіркою контакту кліпси з виводами мікросхеми й орієнтації кліпси відносно до ключа мікросхеми;

2) перевірка вихідних логічних станів виводів мікросхеми й наявність на них перемикань (сигналів від внутрішнього генератора тестованого пристрою), наявність виводів, підключених до кіл живлення, і виводів, сполучених між собою перемичками. Отриманий результат виводиться на дисплей у вигляді мнемосхеми об'єкта контролю (рис. 6.15);

3) за результатом другого етапу перевірки програма автоматично змінює заданий у тесті алгоритм тестування, виконує перевірку мікросхеми відповідно до зміненого алгоритму й виводить результати тестування на екран монітора у вигляді часових діаграм (рис.6.16) і таблиці даних.

За допомогою тестера є можливість виконувати перевірку різних цифрових мікросхем, включаючи мікросхеми ОЗПП і ПЗП. Слід підкреслити, що цей прилад має можливість рахувати інформацію з мікросхем ПЗП, впаяних у плати. Це особливо актуально сьогодні, оскільки велика частина мікросхем ПЗП, встановлених на промисловому устаткуванні, виробила свій ресурс і може в будь-який момент вийти з ладу.

У комплект постачання тестера входить бібліотека тестів мікросхем різних серій і довідник аналогів, де кожному тесту мікросхеми додається перелік аналогів мікросхем різних серій, країн і виробників.

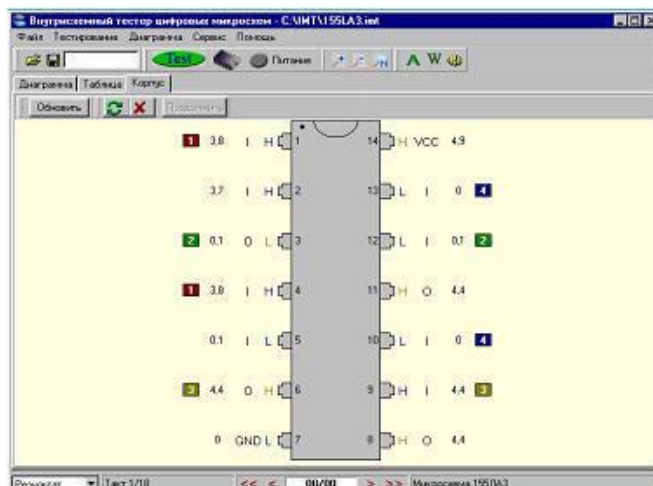


Рис. 6.15. Мнемосхема проверяемой микросхемы

До складу програмного забезпечення входить редактор тестів. З його допомогою користувач має можливість самостійно змінювати алгоритм тестування микросхем і виробляти розробку й відладку тестових програм на микросхемі, відсутні в базовій бібліотеці. Методика складання тестів на микросхемі проста й доступна будь-якому фахівцю з електроніки.

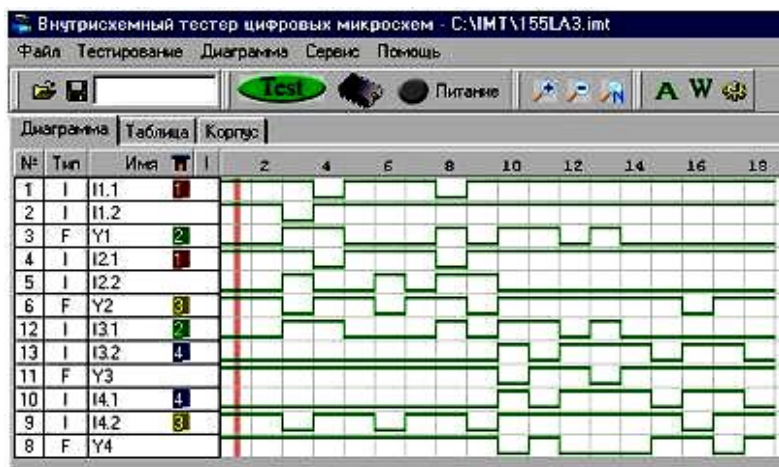


Рис. 6.16. Часова діаграма функціонального тесту

Внутрішньосхемний тестер електронних пристроїв «ВТ-02» (рис. 6.17, табл.6.1) призначений для внутрішньосхемного тестування цифрових та аналогових електронних пристроїв. Складається із аналогового тестера «VI-зонд» і внутрішньосхемного тестера цифрових микросхем «ВТЦМ-32». Тестер «ВТ-02» підключається до персонального комп'ютера через USB порт.



Рис. 6.17. Внутрішньосхемний тестер електронних пристроїв «VT-02»

6.1 Технічні характеристики тестера електронних пристроїв «VT-02»

Показник	Значення показника
Кількість інформаційних каналів	32
Рівень логічної одиниці вихідного сигналу	не менше 2,4 В
Рівень логічного нуля вихідного сигналу	не більше 0,4 В
Максимальний струм вихідного сигналу	від -300 мА до +300 мА
Час такту	від 1 до 8 мкс
Дискретизація такту, мкс	1
Діапазон вимірювання статичної напруги на каналах	від мінус 1,38В до плюс 5,00 В
Кількість зон аналізу за рівнем сигналів, що приймаються	2
Діапазон зони	від 0 до 5 В
Дискретизація зони	20 мВ
Напруга живлення об'єкта контролю	від 4,75 В до 5,25 В
Максимальний струм об'єкта контролю	4,5 А
Напруга живлення пристрою	+5 В -5 В,+12 В -12 В

Тестер мікропроцесорних пристроїв (логічний аналізатор даних) «ЛАД-03» (рис. 6.18) призначений для діагностування плат процесорів систем ЧПУ, контролерів та інших мікропроцесорних пристроїв. Підключення обох тестерів до персонального комп'ютера здійснюється через USB порт.



Рис. 6.18. Тестер мікропроцесорних пристроїв (логічний аналізатор) «ЛАД–03»

Тестер мікропроцесорних пристроїв «ЛАД–03» має властивості класичного аналізатора й додаткові сервісні можливості, спрямовані на полегшення діагностування і ремонту мікропроцесорних пристроїв. Конструкційно тестер виконаний у вигляді окремого блока, що підключається до персонального комп'ютера через USB порт. Тестер працює з програмою ANALYZER.EXE.

Основною відмітною особливістю логічного аналізатора ЛАД є можливість створювати еталонні файли, що містять алгоритм роботи свідомо справного пристрою, а потім порівнювати їх з файлами тестованих пристроїв. Результат порівняння, представлений у вигляді конкретних даних, адрес, команд, властивих досліджуваному об'єкту, здатний вказати користувачеві на несправність або підказати подальший напрям її пошуку. Ця можливість реалізується за допомогою ряду особливостей, властивих цьому приладу.

Логічний аналізатор ЛАД має 40 вхідних каналів. У той же час програмне забезпечення аналізатора дозволяє зняти й зберегти в одному тестовому файлі до 120 часових діаграм сигналів (рис. 6.19). Використання синхронного запуску аналізатора й об'єкта контролю, надає можливість послідовно знімати дані в одноканальному (режим «Зонд») і багатоканальному режимі, а потім зводити їх на одному екрані, отримуючи цілісну картину роботи вузла з безлічі окремих

діаграм. Представлення інформації у вигляді слів даних (див. далі) дозволяє користувачеві досить легко і швидко її обробити. Крім того одноканальне, послідовне знімання даних (*метод pin by pin*) робить можливим тестувати електронні плати з будь-якою щільністю монтажу й компоненти з будь-якими типами корпусів, включаючи програмовані логічні інтегральні схеми.

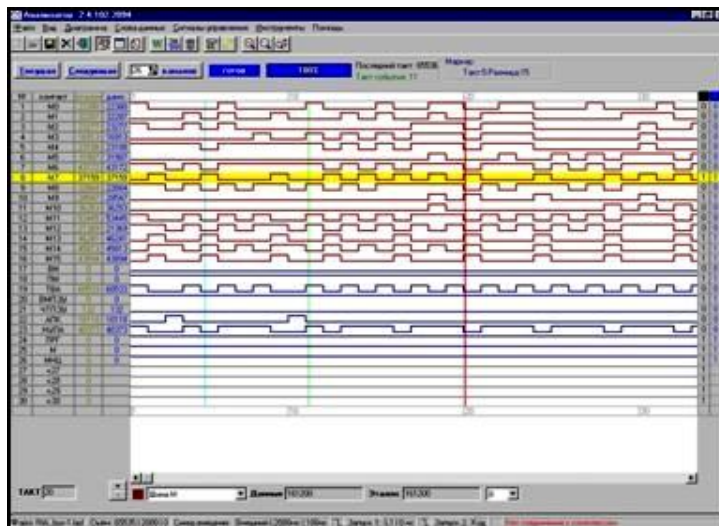


Рис. 6.19. Часові діаграми роботи тестованого пристрою

Глибина тестування не обмежена об'ємом пам'яті аналізатора за рахунок організації багатократного заповнення ОЗП. Глибина тестування може бути 65535 x 256 тактів, що дає можливість протестувати процесор практично на всьому адресному просторі ПЗП.

У синхронному режимі (режим зовнішньої синхронізації) ЛАД фіксує в цифровій пам'яті логічні стани на своїх входах у моменти, визначувані синхронізуючим сигналом, який може бути знятий з тестованого об'єкта й поданий на будь-який із 40 вхідних каналів аналізатора або на спеціальний канал зовнішньої синхронізації, що має захист від перешкод. Користувачеві надається можливість розділити отриману інформацію за типами: команди, дані, адреси тощо. З цією метою використовуються так звані «Слова даних», що дозволяють формувати з вхідних каналів групи шин. Порядок розташування каналів у шині визначає для кожного такту синхронізації певний код, що є в цьому такті числовим значенням «Слова даних». Дані розміщуються в таблиці згідно із заданою системою числення і порівнюються з раніше знятим еталоном, а команди можуть бути дизасембльовані.

Табличне представлення даних тестування (рис. 6.20) у вигляді, зручному користувачеві, дозволяє швидко й точно визначити, на

якому такті почалися збої в роботі процесора або сталася його зупинка.

The screenshot shows the 'Аналізатор' software interface. The main window displays a table with columns for 'Слово' (Word), 'Такт' (Clock), 'Значення' (Value), and 'Такт' (Clock). The table contains 36 rows of data. To the right of the table is a control panel with various settings and buttons.

Слово	Такт	Значення	Такт
Слово M	1	14525	14525
Слово M	2	170720	170720
Слово M	3	40020	40020
Слово M	4	14526	14526
Слово M	5	160200	160200
Слово M	6	14527	14527
Слово M	7	40120	40120
Слово M	8	14530	14530
Слово M	9	170722	170722
Слово M	10	40120	40120
Слово M	11	14531	14531
Слово M	12	160200	160200
Слово M	13	14532	14532
Слово M	14	40200	40200
Слово M	15	14533	14533
Слово M	16	160600	160600
Слово M	17	14534	14534
Слово M	18	47777	47777
Слово M	19	14535	14535
Слово M	20	161200	161200
Слово M	21	14536	14536
Слово M	22	177	177
Слово M	23	14537	14537
Слово M	24	161600	161600
Слово M	25	14540	14540
Слово M	26	0	0
Слово M	27	14541	14541
Слово M	28	162200	162200
Слово M	29	14542	14542
Слово M	30	17776	17776
Слово M	31	14543	14543
Слово M	32	162600	162600
Слово M	33	14544	14544
Слово M	34	50000	50000
Слово M	35	14545	14545

The control panel on the right includes the following elements:

- Найдено ошибок: 0
- Обработано тактов: 1021
- Поиск по таблице: 17711
- Направление поиска: вверх вниз
- Настройки: Отображать слова: все
- Отображать только ошибки:
- Использовать контакты синхронизации:
- Синхронизация тактов: Число тактов: 1
- Операция: Вставка Удаление
- Buttons: Выполнить, Пересчитать ошибки, Обновить таблицу

Рис. 6.20. Табличне представлення результату тестування

Асинхронний режим роботи або режим внутрішньої синхронізації дає можливість отримати від досліджуваного об'єкта інформації з високою мірою дискретизації і використовується, як правило, для локалізації несправності. В асинхронному режимі роботи класичного аналізатора неможливо зв'язати процес знімання інформації із зовнішнім сигналом. Програмне забезпечення ЛАД дає можливість користувачеві здійснювати віртуальну синхронізацію виведення отриманої інформації на екран. Для цього використовуються «канали синхронізації», які вибираються користувачем зі всього масиву діаграм, задіяних у даному файлі. Такий підхід дозволяє показувати в таблиці лише вибіркочну інформацію, зняту в моменти часу, прив'язані до вибраного фронту або рівня сигналів синхронізації. Таким чином, знаходячись в асинхронному режимі, ЛАД дозволяє працювати із словами даних за тією ж методикою, що викладена вище для синхронного режиму. Як і в синхронному режимі будуть сформовані команди, дані, адреси для порівняння їх з еталоном.

ЛАД має два рівні запуску: запуски 1-го й 2-го порядку. Запуск 1-го порядку використовується для одночасного запуску аналізатора й об'єкта контролю. Використовуючи запуск 2-го порядку, користувач може задати початок знімання даних з певного такту роботи процесора або з моменту появи на шинах процесора заданих адреси, коди даних, команди. Сигнал запуску 2-го порядку може використовуватися для запуску осцилографа з метою перегляду осцилограм цифрових або аналогових сигналів у заданий момент.

Є можливість задати початок знімання даних на діаграмі або в таблиці до події і після неї. Інформація, що передуює запускаючій події, називається передісторією (prehistory), зібрана після події – післяісторією (posthistory). ЛАД разом з аналізом паралельних даних реалізує можливість приймання та аналізу послідовних даних відповідно до стандарту інтерфейсу RS232. Отримана інформація може бути проглянута у вигляді часових діаграм або таблиці кодів.

Великою проблемою для ремонтників є збої в роботі електронних пристроїв внаслідок виникнення короткочасних імпульсних перешкод (глітчів). Тривалість перешкоди може бути менше, ніж мінімальний період синхронізації аналізатора, що не дозволяє приладу її зафіксувати без використання спеціальних режимів роботи. ЛАД володіє такими спеціальними можливостями й визначає перешкоду як сигнал, який міняє свій логічний стан більше одного разу між двома послідовними вибірками, і, під час включення відповідної опції, відображає перешкоду на діаграмі. Така модель аналізатора дозволяє визначити наявність перешкоди лише на одному каналі за один вимір.

Технічні характеристики логічного аналізатора ЛАД–03 представлені в табл. 6.2. Відносно низька частота дискретизації (40 мГц) не є недоліком цієї моделі приладу, оскільки, з одного боку, дозволяє вирішувати поставлені завдання з ремонту процесорів систем ЧПУ, а з іншого – робить його доступним за вартістю для придбання ремонтними службами підприємств.

Програмне забезпечення логічного аналізатора ЛАД працює в середовищі WINDOWS і має зручний російськомовний інтерфейс. Дружнє програмне середовище, добре організована довідкова система дозволяють швидко освоїти й успішно експлуатувати цей прилад.

6.2. Технічні характеристики тестера мікропроцесорних пристроїв ЛАД–03

Показник	Значення показника
Режим роботи	однократний і циклічний
Кількість інформаційних входів	40
Кількість вихідних управляючих сигналів	5
Розмір буфера даних (глибина пам'яті)	64 До
Напруга живлення, В	5
Параметри входів: – вхідний опір – напруга порогу – робоча напруга	100 кОм CMOS/ TTL 5 В від 0 до + 5 В

Синхронізація: – частота внутрішньої синхронізації – частота зовнішньої синхронізації – канал зовнішньої синхронізації	від 40 МГц до 1 КГц максимум 20 МГц будь-який з 40 інформаційних каналів або спецканал
Запуск: – число рівнів запуску – канали запуску – тип запуску	2 за будь-яким інформаційним або окремим каналом за фронтом, спадом, кількістю імпульсів, збігом коду та таймеру
Режим роботи	однократний і циклічний
Відображення: – формат	у вигляді часових діаграм, таблиці, коду, слів даних
Програмне забезпечення: – середовище Інтерфейс з комп'ютером	Windows 95/98/ME або Windows 95/98/ME/2000/XP паралельний або USB

Логічний аналізатор ЛАД–03 є базовим пристроєм апаратно-програмного комплексу, до складу якого входять тести, адаптери підключення і документація для ремонту процесорів МС1201, «Електроніка 60» УЧПУ 2С42, плати ПРЦ УЧПУ НЦ31, процесорів контролера «Мікродат», мікропроцесорних пристроїв на основі мікроконтролерів 8080, 8085, Z80, кругових фотоімпульсних датчиків та інших пристроїв.

Програматори мікросхем PROM, EPROM (рис. 6.21) у складі автоматизованої системи діагностування «ТЕСТ–Д» призначені:

– програматор PROM – для програмування мікросхем К155РЕ3, К556РТ4, К556РТ5 та інших аналогічних мікросхем;

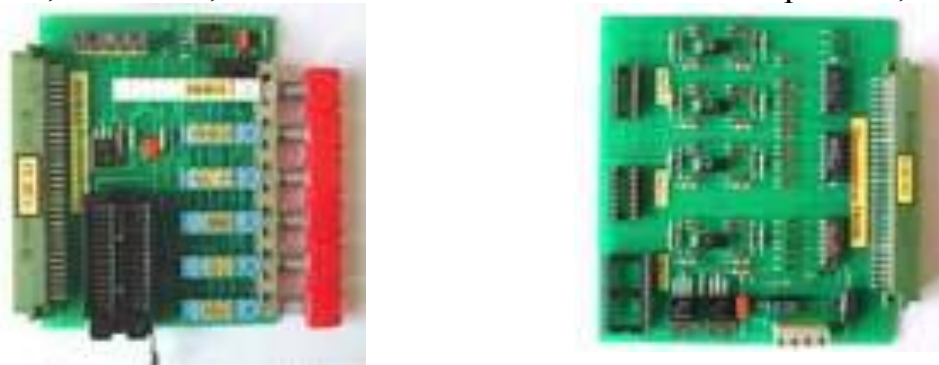


Рис. 6.21. Програматори PROM, EPROM до логічного аналізатора ЛАД–03

– програматор EPROM – для програмування мікросхем К573РФ1, К573РФ2, К573РФ4, 2716 – 27512 та інших аналогічних мікросхем.

Програматори виконані у вигляді окремих модулів, які підключаються до роз'єму Х2 функціонально-сигнатурного тестера. Програматори використовують програму DIATEST.EXE.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ксёэнз С. П. Диагностика и ремонтпригодность радиоэлектронных средств / С. П. Ксёэнз. – М. : Радио и связь, 1989. – 248 с.
2. Мозгалевский А. В. Техническая диагностика (непрерывные объекты) : учебн. пособие для вузов / А. В. Мозгалевский, Д. В. Гаскаров. – М. : «Высш. школа», 1975. – 207 с.
3. Зайчик И. Ю. Практикум по электрорадиоизмерениям / И. Ю. Зайчик, Б. И. Зайчик. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1985. – 239 с.
4. Лаппе Р. Измерения в энергетической электронике / Р. Лаппе, Р. Фишер; пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
5. Автоматизированная система диагностики «Тест Д- USB» [Электронный ресурс] – Режим доступа : <http://test-d.cncinfo.ru>

7. КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗАСОБІВ ІНФРАЧЕРВОНОЇ ТЕХНІКИ

7.1. Загальні засади застосування засобів інфрачервоної техніки в енергетиці

7.2. Застосування пірометрів для контролю технічного стану енергетичного обладнання

7.3. Застосування тепловізорів для контролю технічного стану енергетичного обладнання

7.3.1. Принцип дії і будова тепловізорів

7.3.2. Визначальні характеристики тепловізорів

7.3.3. Особливості вибору тепловізорів

7.3.4. Номенклатура тепловізорів

7.3.5. Нормативні засади тепловізійного контролю технічного стану електрообладнання

7.3.6. Об'єкти тепловізійного контролю в енергетиці

7.3.7. Технології контролю технічного стану енергетичного обладнання із застосуванням тепловізорів

7.3.8. Особливості тепловізійного контролю технічного стану контактних з'єднань

7.4. Аналіз термограм електроустаткування

7.1. Загальні засади застосування засобів інфрачервоної техніки в енергетиці

Надійність сучасних систем виробництва й розподілу електроенергії значно визначається безвідмовністю роботи устаткування електроустановок. Аварійні пошкодження часто супроводжуються руйнуванням устаткування, призводять до порушення електропостачання і значних економічних збитків у споживача. Підтримувати необхідний ступінь надійності устаткування в процесі його експлуатації покликана система технічного обслуговування і ремонту.

Необхідність вдосконалення системи й методів експлуатаційного контролю устаткування визначається їх недостатньою ефективністю і часто потребою виведення його з роботи. У цьому відношенні застосування приладів інфрачервоної техніки (ІЧТ) для оцінки теплового стану устаткування забезпечує отримання оперативної інформації на ранній стадії розвитку дефекту. Впровадження в практику приладів ІЧТ – один з основних напрямів

розвитку високоефективної системи технічного діагностування з використанням пірометрів і тепловізорів. Вибір того чи іншого приладу визначається в основному технічними завданнями, які передбачається вирішувати з його допомогою.

Ефективність інфрачервоного (ІЧ) діагностування багато в чому залежить від таких факторів:

- наявності нормативно-технічної бази й відповідних методик;
- досконалості конструкції приладу ІЧТ;
- кваліфікації персоналу;
- прийнятої системи оцінки отриманих результатів вимірювань та інших чинників.

З введенням в дію ГКД 34.20.202–2002 «Галузевий керівний документ. Норми випробування електрообладнання» (додаток А) тепловізійний контроль електрообладнання та повітряних ліній електропередавання зайняв належне місце серед багатьох інших методів визначення технічного стану й випробувань.

Можна вважати, що певною мірою ІЧ-діагностування є «індикаторним» засобом оцінки стану об'єкта й часто вимагає для визначення місця і характеру вогнища тепловиділення застосування додаткового об'єму випробувань і вимірювань. Отримані результати обстежень, що характеризують тепловий стан об'єкта, багато в чому залежать від його конструкції, місця розташування вогнища тепловиділення, характеру та його інтенсивності, зовнішніх дій та інших чинників, вимагають порівняння з результатами, отриманими на інших фазах або ідентичному устаткуванні тощо. Таким чином, оцінка теплового стану об'єкта, що діагностується, як правило, повинна здійснюватися шляхом багатопараметричного аналізу результатів тепловізійного обстеження, традиційних та інших методів технічного контролю електроустаткування.

Виробничниками, зокрема підприємством ММП «Инфра-техник» (колишня лабораторія інфрачервоної техніки фірми ОРГРЭС), розроблені методики дефектації електроустаткування під час проведення ІЧ-діагностування. У методиці ММП «Инфра-техник» розглянуті останні розробки в галузі тепловізійної техніки, похибки, що виникають під час проведення вимірювань із застосуванням тепловізорів і традиційних методів контролю, проаналізовані причини пошкоджень устаткування і можливості виявлення їх під час ІЧ-діагностування, наведені рекомендовані значення нормативів бракувань за температурою нагріву, пропозиції щодо проведення дефектації устаткування.

Процес дефектації передбачає:

- оцінювання небезпеки дефекту за виявленою тепловою аномалією і можливе прогнозування його розвитку;
- визначення об'єму й проведення багатопараметричних вимірювань, вибраних до передбачуваного виду дефекту, облік похибок, які можуть виникнути під час проведення ІЧ-діагностування;
- підготовку рекомендацій з подальшої експлуатації устаткування (аварійний стан об'єкта, прискорений експлуатаційний контроль, моніторинг стану об'єкта із залученням засобів контролю під робочою напругою тощо).

Система ІЧ-діагностування включає комплекс взаємозв'язаних циклів, що визначають послідовність проведення операцій та їх інформативність. Регламент проведення ІЧ-діагностування електрообладнання встановлює періодичність та об'єм вимірювань контрольованого об'єкта або сукупності об'єктів. Періодичність проведення ІЧ-діагностування визначається з урахуванням досвіду його експлуатації, режиму роботи, зовнішніх та інших дій і в загальному вигляді визначена нормативно-технічною документацією.

Операції з проведення ІЧ-діагностування повинні виконуватися приладами інфрачервоної техніки, що забезпечують достатню ефективність у визначенні дефекту на працюючому устаткуванні.

7.2. Застосування пірометрів для контролю технічного стану енергетичного обладнання

Принцип дії та будова пірометрів. *Пірометрія* (від грецьк. *pyr* вогонь і *metreo* вимірюю) – група методів вимірювання температури. Раніше до пірометрії відносили всі методи вимірювання температури, яка перевищує граничну для ртутних термометрів, а з 60-х років ХХ ст. до пірометрії все частіше відносять лише оптичні методи, що базуються на застосуванні пірометрів, і не включають до неї методи, які передбачають застосування термометрів опору, термоелектричних термометрів з термопарами та ряд інших методів.

Майже всі оптичні методи базуються на вимірюванні інтенсивності теплового випромінювання (інколи – поглинання) тіл (об'єктів). Інтенсивність теплового випромінювання дуже залежить від температури T тіл і різко убуває з її зниженням. Зважаючи на це, методи пірометрії застосовують для вимірювання відносно високих температур (наприклад, серійним радіаційним пірометром від $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вище). За значень температури нижче $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ методи пірометрії грають загалом другорядну роль, але за температури понад

1000 °С вони стають головними, а коли температура вище 3000 °С – практично єдиними методами вимірювання температури.

Усе більш широке застосування отримує радіаційна термометрія в технологічних процесах, де раніше традиційно використовувалися контактні методи, причому діапазон вимірювань розширився у бік низьких температур до -50 °С. Слід зазначити, що останнім часом набули поширення безконтактні методи вимірювання температури в енергетичній промисловості.

Принцип дії інфрачервоного пірометра базується на вимірюванні абсолютного значення випромінюваної енергії однієї хвилі в інфрачервоному спектрі. На сьогодні це відносно недорогий безконтактний метод вимірювання температури. Пірометри можуть наводитися на об'єкт практично з будь-якої відстані й обмежені лише діаметром вимірюваної плями (рис. 7.1) на його поверхні та прозорістю довкілля.

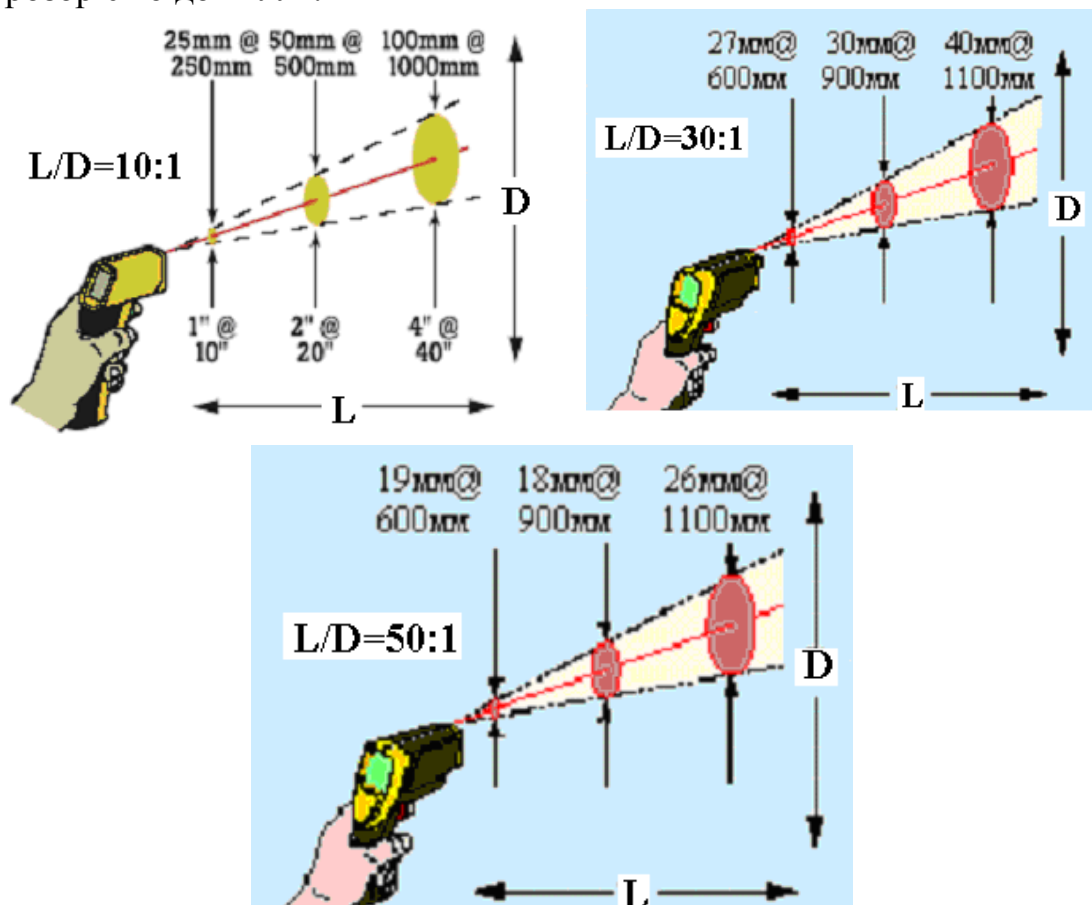
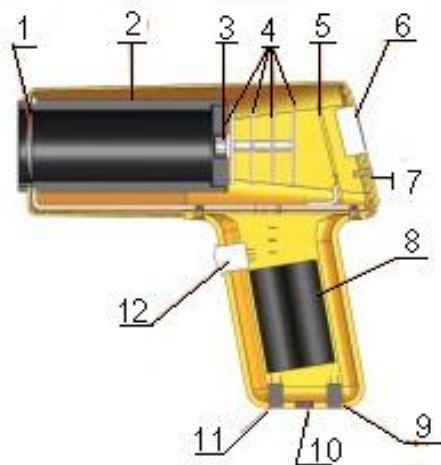


Рис. 7.1. Розміри вимірюваної пірометром плями в точці фокусування ($L/D=50:1$ – оптична дозвільна здатність – відношення відстані до поверхні об'єкта вимірювань до діаметра вимірюваної плями в точці фокусування)

Інфрачервоні термометри, часто звані пірометрами, використовують принцип детектування інфрачервоного випромінювання, інтенсивність і спектр випромінювання якого залежить від температури тіла. Вимірюючи характеристики випромінювання тіла (об'єкта), пірометр побічно визначає температуру його поверхні. Будова сучасного пірометра наведена на рис.7.2.

Призначення і застосування пірометрів. Як засоби виміральної техніки пірометри призначені для:

- вимірювання температури віддалених і важкодоступних об'єктів;
- вимірювання температури рухомих частин;
- обстеження частин електроустановок, що знаходяться під напругою;
- контролю високотемпературних процесів;
- реєстрування температур, що швидко змінюються;
- вимірювання температури тонкого поверхневого шару;
- обстеження частин, що не допускають дотику;
- обстеження матеріалів з низькою теплопровідністю або теплоємністю;
- експрес вимірювань температури.



РК-індикатор

Рис. 7.2. Будова сучасного пірометра: 1 – лінза з оптичної кераміки (ZnSe); 2 – пірометрична захисна капсула; 3 – датчик – термобатарей; 4 – плати аналогово-цифрової обробки; 5 – плата індикатора; 6 – рідкокристалічний (РК) індикатор; 7 – плівкова клавіатур; 8 – акумулятор; 9 – роз'єм для під'єднання зарядного пристрою; 10 – кріплення під штатив; 11 – роз'єм для зв'язку з комп'ютером; 12 – кнопка включення режиму вимірювання

Сфери застосування пірометрів:

- 1) *теплоенергетика*: котли, турбіни, бойлери, теплотраси, паропроводи;
- 2) *електроенергетика*: трансформатори, кабелі, контактні з'єднання, шини під напругою;
- 3) *металургія і металообробка*: печі, стани, преси;
- 4) *електроніка*: контроль температури елементів і деталей;
- 5) *діагностування двигунів внутрішнього згорання*;
- 6) *контроль температури електродвигунів і підшипників*;
- 7) *контроль температури технологічних процесів*;
- 8) *контроль умов зберігання і перевезення харчових продуктів*;
- 9) *обстеження будівель і споруд (енергетичний аудит)*;
- 10) *обстеження систем опалювання, вентиляції і кондиціонування*;
- 11) *обстеження холодильної техніки*;
- 12) *оснащення пожежних бригад*.

Основні характеристики пірометрів:

– *діапазон вимірюваних температур і довжина хвилі пірометра*. Робочий діапазон температур пірометра залежить від довжини хвилі випромінювання, на яке реагує детектор пірометра. Оскільки спектр випромінювання із зростанням температури зміщується у бік коротких хвиль, високотемпературні пірометри мають коротшу довжину хвилі. Для користувача робоча довжина хвилі пірометра не має значення, його цікавить діапазон температур;

– *швидкодія пірометра*. Оскільки пірометри застосовуються у випадках швидкої зміни температури, швидкодія для них є важливою характеристикою. Вона зазвичай оцінюється часом досягнення 95 % сталого показу (час встановлення показу);

– *настроювання випромінювальної здатності об'єкта вимірювання*. Для точного визначення температури тіла за його випромінюванням необхідно знати його випромінювальну здатність (міра чорноти). Більшість поверхонь за характером випромінювання близькі до абсолютно чорного тіла, проте деякі (наприклад, поліровані метали) істотно відрізняються. Загалом випромінювальні властивості об'єкта визначаються властивостями матеріалу, чистотою обробки й кольором поверхні вимірювання. Приміром випромінювальна здатність більшості органічних матеріалів становить приблизно 0,95 (відносно абсолютно чорного тіла). Прості пірометри налаштовані на фіксовану випромінювальну здатність (найчастіше – 0,95), тому під час вимірювання температури добре відзеркалюючої поверхні вони

дають похибку в декілька градусів. У складніших пірометрах можна встановлювати випромінювальну здатність, компенсуючи цю похибку. У найбільш досконалих пірометрах є вбудовані таблиці випромінювальної здатності багатьох відомих матеріалів, що позбавляє від необхідності їх запам'ятовування;

– *поле зору пірометра* – вимірюваний діаметр об'єкта, з поверхні якого пірометр приймає енергію інфрачервоного випромінювання;

– *оптичний дозвіл пірометра*. Пірометри вимірюють середню температуру поверхні, що знаходиться в ділянці чутливості, яку приблизно можна представити конусом (рис. 7.3 а), вершина якого упирається в об'єктив приладу, а основа розташовується на поверхні об'єкта. Відношення висоти конуса до його діаметра $L:D$, що носить назву оптичного дозволу (оптичної дозвільної здатності чи показника візування) пірометра, є однією з основних характеристик приладу (інколи використовують зворотну величину – $D:L$). Чим більший показник візування $L:D$, тим дрібніші предмети пірометр може розрізнити на відстані;

– *фокусна відстань пірометра*. Ділянку чутливості пірометра можна вважати конічною лише на достатній відстані. Поблизу вона має складнішу форму. Часто зона чутливості пірометра спочатку звужується до мінімуму, а потім починає розширюватися у формі конуса (рис. 7.3 б). Відстань F , на якій досягається мінімальний діаметр зони чутливості d , називається фокусною відстанню. Для таких пірометрів параметри F і d вказуються в документації. Існують спеціальні короткофокусні пірометри, у яких d складає 5–8 мм на відстані F 300–600 мм;

– *точність вимірювання* не залежить від відстані доти, доки розмір об'єкта перевищує поле зору пірометра. Якщо ж розмір об'єкта менший, то індукована пірометром температура не буде достовірною, оскільки контрольований об'єкт не заповнює все поле зору приладу й сприймає випромінювання від інших об'єктів навколишнього середовища;

– *спосіб націлювання пірометра*. Прості пірометри не мають пристрою націлювання і можуть застосовуватися лише на близьких відстанях. Для націлювання пірометра на віддалені об'єкти найчастіше застосовується промінь лазера. За допомогою одиночного лазерного променя можна визначити лише точку поблизу центру зони чутливості. Промінь лазера такого прицілу не збігається з оптичною віссю об'єктива пірометра, тому центр зони зміщений відносно лазерного покажчика на фіксовану відстань 1–2 см (т.з. помилка

паралаксу). Знаходять застосування кілька різновидностей лазерних прицілів для пірометрів (рис. 7.3 в). У вдосконаленому *коаксіальному прицілі* промінь лазера виходить із центру об'єктива пірометра й завжди потрапляє в центр зони вимірювань. *Подвійний лазерний приціл* показує не лише розташування, але й розмір зони вимірювань пірометра, проте на близькій відстані він може бути дуже завищений. *Різновид подвійного прицілу з пересічними променями називається крос-лазером* і зазвичай застосовується в короткофокусних пірометрах, оскільки цей вигляд лазера зручний для визначення місця розташування фокусу об'єктива. *Круговий лазерний приціл*, утворений кількома променями, наочно позначає зону вимірювання пірометра. Простому круговому прицілу властиві вже згадані недоліки – паралакс і завищений розмір зони вимірювання на близькій відстані. Найбільш досконалий приціл, позбавлений цих недоліків, створюється кількома лазерними променями, розташованими довкола об'єктива пірометра, які створюють гіперболоїд обертання. Такий приціл точно позначає зону вимірювання на будь-якій відстані від пірометра, тому він називається *точним круговим лазером (TRUE SPOT™)*.

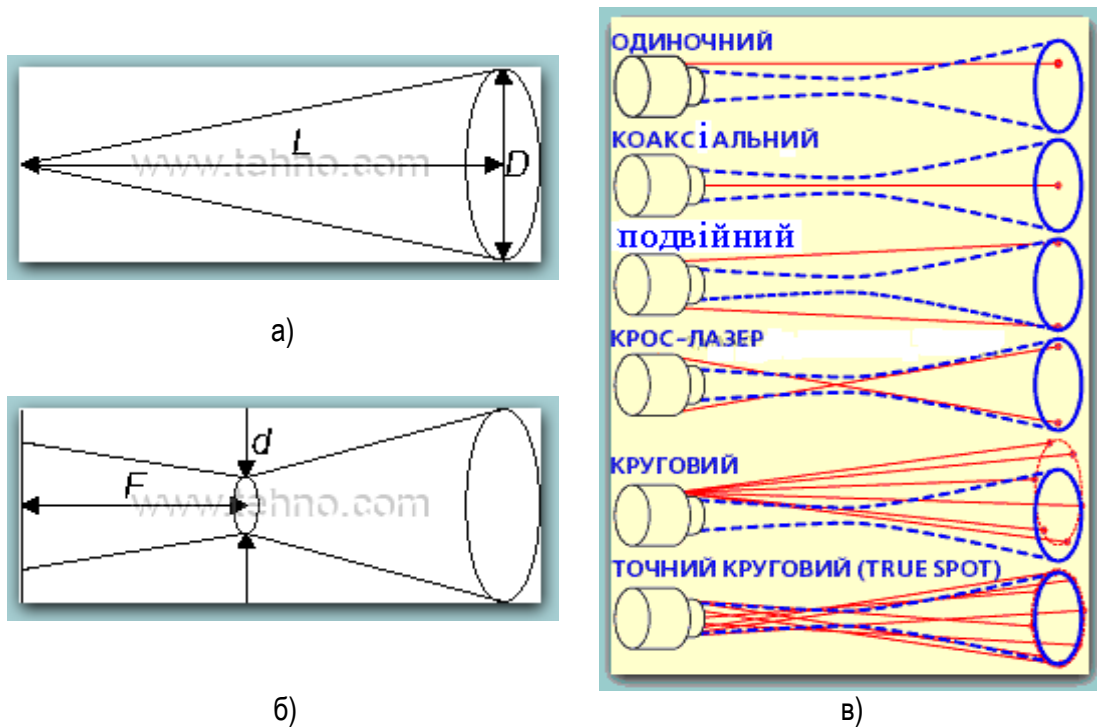


Рис. 7.3. Область чутливості (а), фокусна відстань (б) і лазерні приціли (в) пірометрів

Лазерний промінь погано видно на яскраво освітленій або розжареній поверхні, тому високотемпературні пірометри для націлювання інколи оснащуються оптичними візирами.

Переваги й недоліки пірометрів. Пірометричний контроль технічного стану устаткування за температурою має ряд переваг і недоліків порівняно з контактними методами вимірювання температури.

Серед *переваг* слід зазначити:

- високу швидкодію, що визначається типом приймача випромінювання і схемою обробки електричних сигналів. Під час використання квантових приймачів випромінювання (фотодіодів) і швидкодіючих аналогово-цифрових перетворювачів (АЦП) постійна часу може складати 10^{-2} – 10^{-6} с;

- можливість вимірювання температури рухомих об'єктів і елементів устаткування, що знаходяться під високою напругою;

- відсутність спотворення температурного поля об'єкта контролю, що особливо актуально під час вимірювання температури матеріалів з низькою теплопровідністю (дерево, пластик тощо), а також ризику пошкодження поверхні й форми, якщо об'єкти м'які (пластичні);

- можливість вимірювання високих температур, за яких застосування контактних засобів вимірювання або неможливе, або час їх роботи дуже невеликий;

- можливість роботи в умовах підвищеної радіації і температури довкілля (до $+250$ °С) за рознесення приймальної головки й електронного блока пірометра з використанням оптоволоконного кабелю.

Основними *недоліками* пірометричних вимірювань температури є труднощі повного врахування зв'язків між термодинамічною температурою об'єкта й реєстрованою пірометром тепловою радіацією. Необхідно враховувати зміну випромінювальної здатності поверхні від довжини хвилі в реєстрованому спектральному діапазоні й від температури в діапазоні вимірювань, а також наявність поглинання випромінювання в середовищі між пірометром та об'єктом контролю, геометричні параметри поля зору пірометра та його оптичної системи, температуру довкілля і корпусу приладу.

Номенклатура пірометрів. Пірометри як безконтактні вимірники температури є незамінними елементами кіл контролю і керування в багатьох галузях промисловості – металургійній, машинобудівній, електронній, хімічній, медико-біологічній та ін. Їм немає альтернативи під час вимірювання температури рухомих (наприклад, метал на прокатному стані), важкодоступних або таких, що знаходяться в небезпечних зонах (електроустановки високої напруги) об'єктів.

Значна частина пірометрів розроблялася і випускалася в Україні: на Кам'янець-Подільському приладобудівному заводі (КППЗ), Харківському заводі «Прилад» й у Львівському НВО «Термоприлад». У цілому парк пірометрів у колишньому СРСР складав 200–300 тис. приладів, велику частину яких (до 70–80 %) складали візуальні пірометри із зникаючою ниткою типу «Промінь». Серійний випуск пірометрів в обмежених об'ємах (всього близько 15–25 % від загальної кількості) здійснювався в Москві, Ленінграді, Свердловську, Горькому. Основну масу парку пірометрів складали прилади з основною похибкою 1–5 %.

Використання сучасної елементної бази істотно розширило можливості цих приладів і дозволило наділити їх новими властивостями – окрім вимірювань вони можуть тепер проводити обробку отриманої інформації і здійснювати складні дії з управління технологічним процесом. Знизилася вага, приладів, зменшилися габарити, прилади стали простішими й зручнішими в експлуатації.

Усе це стало можливим завдяки застосуванню в приладах нової елементної бази, що включає мікропроцесори. Використання електроніки нового покоління дозволило також знизити відсоток відмов приладів як за рахунок зменшення кількості використовуваних елементів, так і за рахунок високої надійності кожного з них. Крім того, коректніше враховується вплив випромінювальної здатності вимірюваного об'єкта й температури довкілля, що дозволило підвищити точність вимірювань у цехових умовах. Висока стабільність джерел опорної напруги й цифрове перетворення сигналу приймача випромінювання в температуру створили передумови для збільшення міжповіркового інтервалу пірометрів.

Структура парку включає такі основні групи приладів:

- скануючі пірометри (тепловізори) – 3–5 %;
- пірометри повного й часткового випромінювання – 70–75 %;
- пірометри спектрального відношення – 10–15 %;
- монохроматичні пірометри – 15–20 %.

Нижче наведений опис деяких моделей пірометрів, що набули поширення на виробництві та в наукових дослідженнях.

Пірометри часткового випромінювання «СМОТРИЧ» (рис. 7.4 а) (Кам'янець-Подільський приладобудівний завод) призначені для безконтактного вимірювання і періодичного експрес-контролю температури під час налагодження різних технологічних процесів у промисловості. Технічні характеристики пірометрів наведені в табл. 7.1.

Пірометри оснащені: «Смотрич–4ПМ» – лазерним показчиком, «Смотрич–5ПМ» – візирним пристроєм. Усі моделі забезпечують цифровий відлік і запам'ятовування поточних значень температури, мають компенсацію похибки від дії навколишньої температури й від випромінювальної здатності об'єкта.

7.1. Технічні характеристики пірометрів «Смотрич–4ПМ» і «Смотрич–5ПМ»

Модифікація	Діапазон вимірюваних температур, °С	Робоча відстань, м	Показник візування	Похибка
«Смотрич –4ПМ»				
01	Від 0 до 100	Від 0,35 до 3,0	10:10	±2°
02	Від 30 до 1100	Від 0,6 до 15,0	10:10	±1,5°
03	Від 30 до 200	Від 0,6 до 15,0	25:1	±4°
04	Від 200 до 900	Від 1,0 до 15,0	25:1	±1,5°
05	Від 200 до 900	Від 1,0 до 15,0	25:1	±1,5°
06	Від 100 до 1300	Від 0,6 до 15,0	25:1	±1,5°
07	Від 300 до 1400	Від 1,0 до 15,0	50:1	±1,5°
«Смотрич –5ПМ»				
01	Від 900 до 2400	Від 2,0 до 15,0	250:1	±1°
02	Від 1000 до 1500	Від 1,0 до 15,0	250:1	±1°
03	Від 600 до 1500	Від 2,0 до 15,0	250:1	±1°
04	Від 700 до 1700	Від 2,0 до 15,0	250:1	±1°
05	Від 800 до 2000	Від 2,0 до 15,0	250:1	±1°

Додаткові можливості (за окремим замовленням) – пам'ять і зв'язок з комп'ютером (RS–232).

Інфрачервоний термометр «НІМБУС» (НПФ «Харківприлад») призначений для вимірювання температури поверхні об'єкта без безпосереднього контакту з ним, дозволяє на відстані виявляти дефектні з'єднання комутаційних апаратів та ошиновки розподільних пристроїв, не відключаючи напруги, контролювати тепловий режим двигунів внутрішнього згорання, визначати температуру поверхні будь-якої речовини, контролювати стан теплотрас і футерування печей. Технічні характеристики пірометрів наведені в табл. 7.2.

7.2. Технічні характеристики термометра «НІМБУС»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірюваних температур, °С	від мінус 18 до плюс 275
Похибка %,	не більше ± 2
Оптичний дозвіл (L:D)	8:1
Час відгуку, с	не більше 0,5
Робочий спектральний діапазон, мкм	7–18

Продовження таблиці 7.2

Випромінювальна здатність (фіксована)	0,95
Температура навколишнього середовища, °С	Від 0 до плюс 50
Живлення	батарея 9 В
Маса, кг	не більше 0,23
Габаритні розміри, мм	152x101x38

Інфрачервоний термометр «Німбус-530/1» (НПФ «Харківприлад»)

1. Пірометр «Німбус-530/1» забезпечує виконання вимірювань в діапазоні температур від мінус 32°С до плюс 530 °С з похибкою $\pm 2\%$ від результату вимірювання. Показник візування пірометра – 20:1.

Загальний вигляд інфрачервоних термометрів «Німбус» наведений на рис 7.4 б, в.

Пірометр спектрального відношення «ДПР-1» (рис. 7.4 г) призначений для безконтактного дистанційного вимірювання температури поверхні об'єктів і температурних аномалій. У пірометрі використаний принцип перетворення теплової енергії інфрачервоного випромінювання в електричні сигнали за допомогою піроелектричного приймача й застосована двохспектральна схема виміру, що дозволяє виключити вплив випромінювальної здатності поверхні об'єкта на результат вимірювання.

Відмітні функції та особливості пірометра «ДПР-1»:

- незалежність результатів вимірювань від стану довкілля (забруднення газами, водними парами, пилом тощо);
- можливість точного вимірювання температури для рухливих та вібраційних об'єктів;
- можливість точного вимірювання температури алюмінієвого розплаву;
- прилади не бояться магнітних полів і працюють біля індукційних печей;
- незалежність точності вимірювання від поверхні об'єкта (на явність часткового забруднення оксидами, шлаками тощо).

Технічні характеристики пірометра наведені в табл. 7.3.

Результати вимірювань виводяться на цифровий індикатор та на виходи в аналоговій формі із струмом від 4 до 20 мА і в цифровій через RS-485 або RS-232. Можливі стаціонарне або переносне виконання пірометра.

7.3. Технічні характеристики пірометра «ДПР-1»

Показник	Значення показника
Діапазон температур, °С	від плюс 330 до плюс 2500
Точність вимірювань, °С	± 5;
Рівень чутливості, °С	1,0;
Кут поля зору, градусів	0,5 ± 2,0
Коефіцієнт візування	– від 30 до 100
Час відгуку, с	– 0,25
Живлення	від акумуляторів або від мережі ~220 В через адаптер 12В/130мА
Маса, кг	2,0
Габаритні розміри, мм	122х114х275

Пірометр інфрачервоний «С-20.2» (рис. 7.4 д) призначений для безконтактного вимірювання температури поверхонь твердих (сипких) і рідких середовищ за їх власним тепловим випромінюванням.

Сфера застосування:

- енергетика (діагностування контактних з'єднань на відстані до 3 м);
- теплоенергетика;
- житлово-комунальне господарство (температурний контроль стану теплотрас і теплоізоляції будівель на відстані до 10 м);
- виробництво будівельних матеріалів (контроль поверхні нагріву усередині печі, температури цеглини, кераміки під час випалення).

Технічні характеристики пірометра наведені в табл. 7.4.

7.4. Технічні характеристики пірометра «С-20.2»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірювання температури, °С	від мінус 18 до плюс 1050
Допустима відносна похибка	– ± 2 °С (± 2 %)
Показник візування	12:1
Спектральний діапазон, мкм	8–14
Коефіцієнт випромінювальної здатності	0,1–1,0
Кількість елементів пам'яті, шт	12
Живлення	алкалінова або NiCd батарея напругою 9 ± (1–2) В
Маса, кг	0,48
Габаритні розміри, мм	220х134х60

Умови експлуатації пірометра:

- температура довкілля, °С – від 0 до плюс 45;
- відносна вологість, % – не більше 90 %;
- атмосферний тиск, кПа – від 86 до 106.

Оптичний цифровий пірометр «ПИТОН-102» (рис. 7.4 е) призначений для дистанційного безконтактного вимірювання температури за тепловим (інфрачервоним) випромінюванням обстежуваного об'єкта. Пірометри ПИТОН-102 застосовуються під час проведення промислових вимірювань.

Об'єктами вимірювань є як тверді поверхні, так і різні середовища – рідини й сипкі речовини.

Відмітні особливості пірометрів серії «ПИТОН-102»:

- подвійна лазерна система для точного наведення;
- надійний термодатчик виробництва Японії;
- спеціальна керамічна захисна лінза;
- відсутність рухомих вузлів;
- акумуляторне живлення з індикацією заряду;
- архів на 100 результатів вимірювань;
- зв'язок з комп'ютером через СОМ-порт;
- програмне забезпечення в комплекті.

Портативний інфрачервоний термометр «Raynger MT4» фірми Raytek знаходить застосування:

- у системах вентиляції, опалювання і кондиціонування повітря;
- під час виконання ремонтних робіт;
- під час визначення несправностей електроізоляції і здійснення профілактичних заходів;
- у промисловості;
- в автомобілебудуванні та на підприємствах з налагоджування та обслуговування автомобілів;
- у харчовій промисловості;
- у суднобудуванні та під час виконання профілактичних робіт на кораблях.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рис. 7.4. Інфрачервоні пірометри: а) «Смотрич»; б) «НІМБУС»; в) «Німбус-530/1»; г) «ДПР-1»; д) «С-20.2»; е) «ПИТОН-102»

Портативний інфрачервоний термометр «Raynger ST 20 Pro» нового покоління є надійною переносною моделлю із вдосконаленими

функціями обробки даних. Сфери застосування приладу – енергетичний аудит, обслуговування електричного, механічного, теплового устаткування, діагностування автомобілів, опалювальних і вентиляційних систем, харчова та автомобільна промисловості, суднобудування.

Портативний інфрачервоний термометр «Raynger ST 60 ProPlus» нового покоління із вдосконаленими характеристиками й дизайном забезпечує вимірювання температури гарячих і важкодоступних об'єктів швидко й з безпечної відстані. Прилад має лазерний восьмиточковий круговий лазерний покажчик S60, що окреслює зону вимірювань.

Інфрачервоний термометр «Raynger MX4+» із широким температурним діапазоном, доконалою оптикою та системою лазерного прицілювання True Spot™ є найбільш універсальним і досконалим портативним термометром для всіх видів виробничих і дослідницьких робіт. «Raynger MX4+» є єдиним пірометром, розробленим з унікальним коаксіальним лазерним візиром True Spot із вказівкою центральної точки області вимірювань, що забезпечує високу точність контролю температури.

Прилад забезпечує визначення точок перегріву електрообладнання, двигунів, коробок передач і підшипників автомобілів, а також контроль температури повітря і повітропроводів у системах повітряного опалення.

Високотемпературний інфрачервоний термометр «Raynger3i2M» з оптичним і лазерним прицілом розроблений для контролю температури в ливарному й металургійному виробництві, включаючи термообробку, відпуск, гартування і кування. Може застосовуватися в технологіях напівпровідників, хімічній промисловості, нафтохімії і наукових дослідженнях.

Інфрачервоний термометр «Raynger MX6» з функцією фотореєстрації є першим у світі високоточним інфрачервоним термометром із вбудованою цифровою фотокамерою. Одночасно з вимірюванням температури отримується фотознімок контрольованого об'єкта. Доповнення показів температури цифровими фотографіями дозволяє підвищити якість проведення профілактичного обслуговування завдяки створенню зображень у режимі реального часу із зазначенням температури об'єкта й навколишнього середовища.

Сфери застосування приладу:

– технічне обслуговування електроустаткування і електричних систем;

- діагностування машинного устаткування;
- системи пожежної безпеки;
- контроль температури в будівельній промисловості;
- діагностування систем опалення і мікроклімату.

Подібним приладом є пірометр «PhotoTemp MX6», який здійснює запис цифрових фотографій у пам'ять і фіксує дані за температурою, датою і часом вимірювань. Виробник пропонує спеціалізоване програмне забезпечення DataTemp MX® для записування результатів проведених вимірювань і фотографій, що зберігаються в пам'яті термометра, на комп'ютер. Технічні характеристики пірометрів (інфрачервоних термометрів) наведені в табл. 7.5, а їх зовнішній вигляд на рис. 7.5.

Професійні безконтактні термометри (пірометри) ThermoPoint виробництва знаходять застосування під час виробництва й ремонту автомобілів, у промисловості та в енергетиці, при обслуговуванні устаткування і споруд, під час виконання дорожніх робіт, у пожежній охороні.

7.5 Технічні характеристики пірометрів Raynger і PhotoTemp виробництва фірми Raytek–MT

Тип пірометра	Показник		
	Діапазон вимірювань температури, °C	Точність	Оптична дозвільна здатність
Raynger MT4	Від мінус 18 до плюс 260	2–3 %	6:1
Raynger ST 20 Pro	Від мінус 32 до плюс 400	1 % або $\pm 1^{\circ}\text{C}$	12:1
Raynger ST 60 Pro	Від мінус 32 до плюс 600	1 % або $\pm 1^{\circ}\text{C}$	30:1
Raynger MX4+	Від мінус 30 до плюс 900	$\pm 0.75\%$	
Raynger 3i 2M	Від плюс 200 до плюс 1800		180:1
Raynger MX6	Від мінус 30 до плюс 932	$\pm 0.75\%$	
PhotoTemp MX6	Від мінус 30 до плюс 900	$\pm 0.75\%$	60:1



Інфрачервоний термометр «Raynger MT4»

Діапазон вимірювань – від мінус 18 до плюс 260 °С

Точність – 2–3 % від виміряної величини

Оптична дозвільна здатність – 6 : 1



Інфрачервоний термометр «Raynger ST 20 Pro»

Діапазон вимірювань – від мінус 32 до плюс 400 °С

Оптична дозвільна здатність – 12:1

Точність – у межах 1 % або ± 1 °С

Надійна переносна модель із вдосконаленими функціями обробки даних



Інфрачервоний термометр «Raynger ST 60 ProPlus»

Діапазон вимірювань – від мінус 32 до плюс 600 °С

Оптична дозвільна здатність – 30 : 1

Точність – у межах 1 % або ± 1 °С



Інфрачервоний термометр «Raynger MT4+»

Діапазон вимірювань – від мінус 30 до плюс 900 °С

Точність – $\pm 0,75\%$ від виміряної величини, але не менше $\pm 0,75$ °С за температури 25 °С



Інфрачервоний термометр «Raynger 3i 2M»

Діапазон вимірювань – від плюс 200 до плюс 1800 °С

Оптична дозвільна здатність – 180:1

Модель з оптичним і лазерним прицілом



Інфрачервоний термометр «Raynger MX6»

Інфрачервоний термометр із функцією фотореєстрації (вбудована цифрова фотокамера).
 Діапазон вимірювань – від мінус 30 до плюс 932 °С
 Точність – $\pm 0.75\%$ від виміряної величини, але не менше $\pm 1^\circ\text{C}$



Інфрачервоний термометр «PhotoTemp MX6»

Високоточний інфрачервоний термометр із вбудованою цифровою фотокамерою
 Діапазон вимірювань – від мінус 30 до плюс 900 °С
 Оптична дозвольна здатність – 60:1
 (для опції близького фокусу CF 50:1)
 Точність – 0.75 %
 Прецизійний лазерний приціл подвійної яскравості

Рис. 7.5. Інфрачервоні термометри (пірометри) виробництва фірми Raytek–MT

Портативний інфрачервоний пірометр «ThermoPoint 2 Pro» – простий і надійний прилад для щоденного використання.

Технічні характеристики пірометра наведені в табл. 7.6.

7.6. Технічні характеристики пірометра «ThermoPoint 2 Pro»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірюваних температур, °С	від мінус 32 до плюс 400
Точність вимірювань:	
- за температури навколишнього середовища плюс $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$	1 % або $\pm 1^\circ\text{C}$ (більше із значень за температури понад $+23^\circ\text{C}$)
- за температури від мінус 18 до плюс 23°C	$\pm 2^\circ\text{C}$
- за температури від мінус 26 до мінус 18°C	$\pm 2,5^\circ\text{C}$
- за температури від мінус 32 до мінус 26°C	$\pm 3^\circ\text{C}$
Оптична дозвольна здатність (L:D)	12:1
Час спрацьовування	500 мс (95 % випадків)
Живлення	9 В Alkaline або NiCd батарея
Маса, кг	0.32

Налаштування випромінювальної здатності не передбачене, використовується фіксоване значення 0,95.

Прилад має лазерне прицілювання (одна точка).

Портативний інфрачервоний пірометр «ThermoPoint 3 Pro» – прилад із широким діапазоном вимірюваних температур, індикацією максимальної температури й вибором типу лазерного цілевказування.

Технічні характеристики пірометра наведені в табл. 7.7.

7.7. Технічні характеристики пірометра «ThermoPoint 3 Pro»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірюваних температур, °C	від мінус 32 до плюс 545
Точність вимірювань: - за температури навколишнього середовища плюс 23°C ± 2 °C - за температури від мінус 18 до плюс 23 °C - за температури від мінус 26 до мінус 18 °C - за температури від мінус 32 до мінус 26 °C	1 % або ± 1 °C (більше із значень за температури об'єкта понад +23 °C) ± 2 °C ± 2,5 °C ± 3 °C
Оптична дозвільна здатність (L:D)	12:1
Час спрацьовування	500 мс (95 % випадків)
Робоча температура навколишнього середовища, °C	від 0 до плюс 50
Живлення	9 В Alkaline або NiCd батарея
Маса, кг	0.32

Портативний інфрачервоний пірометр «ThermoPoint 6 ProPlus» – професійний прилад, що використовується під час виконання найважливіших завдань.

Технічні характеристики пірометра наведені в табл. 7.8.

7.8. Технічні характеристики пірометра «ThermoPoint 6 ProPlus»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірюваних температур, °C	від мінус 32 до плюс 600
Точність вимірювань: - за температури навколишнього середовища плюс 23°C ± 2 °C - за температури від мінус 18 до плюс 23 °C - за температури від мінус 26 до мінус 18 °C за температури від мінус 32 до мінус 26 °C	1 % або ± 1 °C (більше із значень за температури об'єкта понад +23 °C) ± 2 °C ± 2,5 °C ± 3 °C
Оптична дозвільна здатність (L:D)	30:1(у фокусі)
Час спрацьовування	500 мс (95 % випадків)

Продовження таблиці 7.8

Робоча температура навколишнього середовища, °С	від 0 до плюс 50
Живлення	9 В Alkaline або NiCd батарея

Пірометр «ThermoPoint 6 ProPlus» має лазерне прицілювання в центрі й по межі плями вимірювань, широкий діапазон вимірюваних температур і запам'ятовування значень температури в 12 точках, що значно спрощує процес вимірювання температури. Можливе підключення термопари (діапазон вимірюваних температур -32–+600 °С від -40 до +260 °С), а також встановлення приладу на триногу.

Портативний інфрачервоний пірометр «ThermoPoint 62» має унікальну 16-точкову систему кругового лазерного прицілювання із центральною точкою. Графічний дисплей приладу автоматично відображає графік зміни температури за останні зміряні 10 точок.

Технічні характеристики пірометра наведені в табл. 7.9.

7.9. Технічні характеристики пірометра «ThermoPoint 62»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірюваних температур, °С	від мінус 32 до плюс 600
Клас точності	1,0
Оптична дозвільна здатність (L:D)	60:1
Час спрацьовування	500 мс (95 % випадків)
Індикація	РК-дисплей
Робоча температура навколишнього середовища, °С	від 0 до плюс 50
Живлення	батарея 9 вольт («Крона»).

Настроювання випромінювальної здатності – регульоване.

Запам'ятовування значень температури – Θ_{max} , Θ_{min} , $\Theta_{різницева}$, $\Theta_{середня}$ в останньому вимірюванні.

Прилад має звукову індикацію виходу за межі порогових рівнів – нижче мінімального й вище максимального значень вимірюваних температур. Рівні встановлюються оператором у межах вимірюваного діапазону температур.

Портативний інфрачервоний пірометр «ThermoPoint 64+» має такі ж характеристики, як і пірометр ThermoPoint 62, і включає Windows сумісне програмне забезпечення для аналізу даних – IRGraph, термопару К типу (хромель-алюмелева ТХА), кабель RS232 для з'єднання з комп'ютером і джерело живлення від мережі. Зручна у

використанні таблиця значень випромінювальної здатності для 30 матеріалів в ТРТ64 і ТРТ64+.

Обидві моделі ТРТ62 і ТРТ64 випускаються з оптикою що має стандартний фокус (SF) і <короткий фокус> (CF) фокус (мінімальний діаметр вимірюваної плями 6 мм на відстані 300 мм).

Портативний інфрачервоний пірометр «ThermoPoint 90» обладнаний оптичним візором і лазерним прицілом одночасно. Технічні характеристики пірометра наведені в табл. 7.10, а зовнішній вигляд – на рис.7.6.

7.10. Технічні характеристики пірометра «ThermoPoint 90»

Тип пірометра	Діапазон вимірюваних температур, °С	Довжина хвилі, мкм	Спосіб прицілювання	Кут візування D:L
LTDL2	Від мінус 30 до плюс 1200	8–14	лазер	1:75
LTSC			оптичний	1:75
LTCL2			лазер	1:75
LRL2			оптичний	1:120
LRSC			оптичний	1:120
LRACL2			лазер	1:120
1ML2	плюс 600– плюс 3000	1	оптичний	1:180
1MSC	плюс 600– плюс 3000	1	оптичний	1:180
2ML2	плюс 200–1 плюс 800	1,6	оптичний	1:90
2MSC	плюс 200–1 плюс 800	1,6	оптичний	1:90

Пірометри виробництва фірми OPTES CO., LTD (Японія) є сучасними досконалими вимірниками температури з широкими функціональними можливостями. Технічні характеристики пірометрів наведені в табл. 7.11, а зовнішній вигляд – на рис.7.8 – 7.12.

Пірометр серії PT-02LD за малих розмірів має великий світлодіодний дисплей з підсвічуванням (дозвіл – 0,1 °С). Оптика приладу – дзеркальний/кремнієвий фільтр. Прицілювання здійснюється із використанням лазерного маркера.

Пірометр серії PT-3S спеціально розроблений для вимірювання дуже маленьких (точкових) об'єктів на короткій відстані (25 мм). Пірометр обладнаний точковою діодною указкою. Вбудована система звукового ефекту допоможе встановити правильну відстань (25 мм).

Можливе налаштування коефіцієнта випромінювання «ТЕМНЫЙ/ЯРКИЙ». Прилад дуже легкий в обігу, зручний під час щоденної роботи з електронними компонентами, деталями, що гріються, може бути використаний для перевірки температури пасу приводу генератора в автомобілях.

Пірометр серії PT-5LD – багатофункціональний портативний вимірник температури, придатний для практичного використання в польових умовах. Оптика приладу – дзеркальний/кремнієвий фільтр.

Нові функції пірометра:

- сигнал про високе й низьке значення вимірюваної температури: зуммер і світлодіод;
- 99 точок даних пам'яті.

Можливий режим тривалих вимірювань. Прилад має водонепроникний корпус (вода не потрапляє всередину корпусу, якщо пірометр опиняється у воді не більше ніж на 30 хв. і на глибині не більше 1 метра).

Пірометр серії PT-S80 забезпечує високу продуктивність, зручний у використанні. Час відгуку приладу – 0,5 с.

Пірометр має великий світлодіодний дисплей з підсвічуванням та коаксіальний лазерний маркер. Можливий вибір випромінювальної здатності об'єкта вимірювань. Одинарна функція пам'яті.

Немає кнопки увімкнення/вимкнення. Живлення автоматично вимикається через 15 секунд після того, як відпускається кнопка вимірювань. Можливе під'єднання пірометра до персонального комп'ютера (є власна 35-точкова функція пам'яті). Є функція годинника й сигналу часу.

Пірометр комплектується жаростійким чорним скотчем (НВ-250), який призначений для точніших вимірювань, особливо якщо вимірюваний об'єкт має блискучу поверхню. При цьому слід встановити коефіцієнт випромінювальної здатності рівний 0,95, прикласти скотч на поверхню об'єкта й через час, достатній для нагрівання скотчу до температури поверхні об'єкта, виміряти температуру ділянки, покритої скотчем.

Якщо лазерний цільказівник зрушується від осі центру вимірювань, його важко помістити знову в те ж саме місце. Щоб вирішити цю проблему пірометр PT-S80 забезпечений коаксіальним лазерним маркером, який вказує на точний центр ділянки вимірювання незалежно від відстані. Часто вимірювання з великої відстані може бути складним через широкую ділянку вимірювання.

Областю вимірювання пірометра PT-S80 (рис. 7.7) є квадрат розміром 30x30 мм з відстані 1 м. Навіть з відстані 5 метрів довгофокусний варіант дає можливість виміряти ділянку розміром 150x150 мм, тому прилад забезпечує надійні вимірювання навіть у важкодоступних і небезпечних місцях.



ThermoPoint 2 Pro



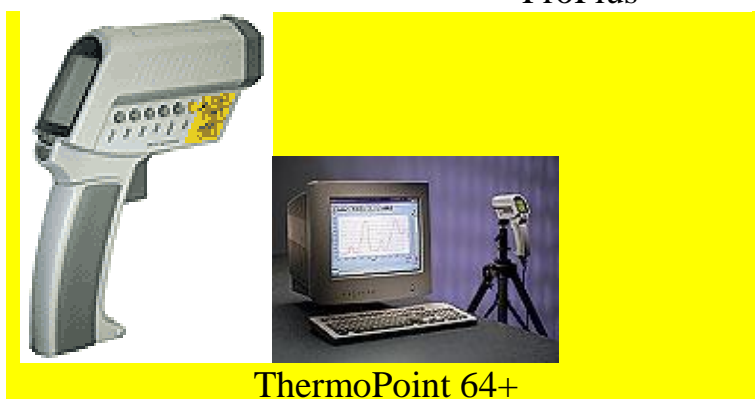
ThermoPoint 3 Pro



ThermoPoint 6 ProPlus



ThermoPoint 62



ThermoPoint 64+



ThermoPoint 90



Рис. 7.6. Портативні інфрачервоні пірометри ThermoPoint

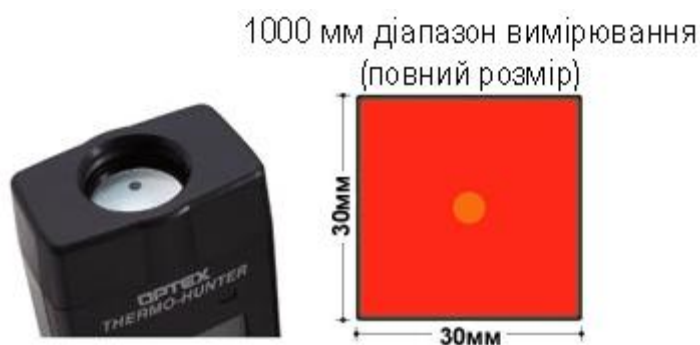


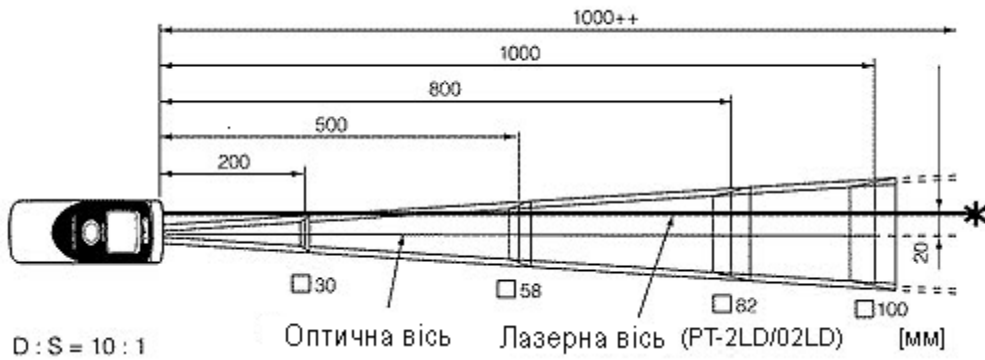
Рис. 7.7. Ділянка вимірювання пірометра PT-80

7.11. Технічні характеристики пірометрів виробництва фірми OPTES CO., LTD (Японія)

Показник	PT-02LD	PT-3LF	PT-3S	PT-5LD	PT-S80
Діапазон вимірюваних температур, °C	від мінус 40 до плюс 200	від мінус 20 до плюс 400	від 0 до плюс 200	від 0 до плюс 500	від мінус 30 до плюс 600
Поле зору	100/1000мм	30/1000мм	2,5мм/25мм		30мм / 1000мм
Точність (за різних значень вимірюваної температури)	(e = 0,95 за температури 25 °C ±3 °C) Менше 0 °C – ±3 °C, від 0 до 200 °C – ±2 °C Менше 32 °C – ±6 °C, від 32 до 400 °C – ±4 °C	(e = 0,95 за температури 25 °C ±3 °C) 20~ 0°C ±3,0 °C; 0.1 ~200°C – 2,0°C	(e = 0,95 за температури 25 °C ± 3 °C) ±3°C від значення показу	(e = 0,95 за температури 25 °C ±3 °C) 0~ 200 °C ±2 °C; 201 ~200 °C – ±2 %	(e = 0,96 за температури 25 °C ±3 °C) -30 до 0 °C – ±3 °C, від 0,1 °C до 200 °C – ±2 °C, вище 200 °C ±1 °C номінального значення
Оптична дозвільна здатність L:D	10:1	33:1		15:1	33:1
Діапазон дисплея, °C	від мінус 50 до плюс 230	від мінус 20 до плюс 60	від мінус 30 до плюс 230	від мінус 10 до плюс 650	від мінус 30 до плюс 199,9
Одиниця вимірювання температури	°C/ F				
Живлення	AA(лужна батарея) x 2 шт		Лужні сухі батареї AAA x 3 шт.	лужна суха батарея 9В (1 шт)	AA(лужна батарея) x 2 шт
Навколишня температура, °C	від 0 до плюс 50		від 0 до плюс 50	від 0 до плюс 50	від - мінус 10 до плюс 60
Маса, кг	0,180	0,200	0,120	0,200	0,230
Габаритні розміри, мм	140 x 56 x 37	162 x 52 x 32		160 x 44 x 42	182 x 56 x 38



Загальний вигляд пірометра



Поле зору пірометра

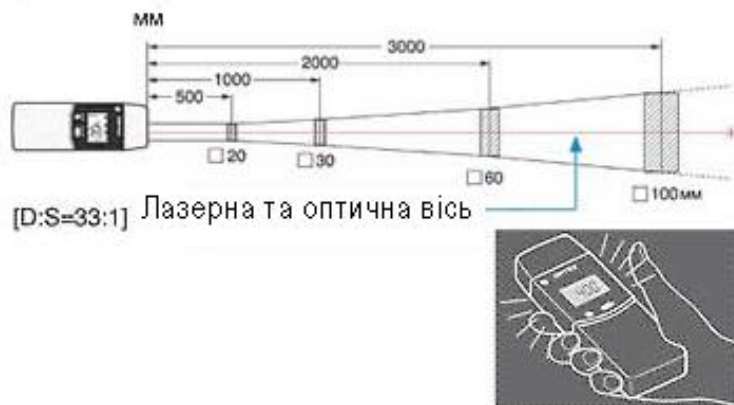


Дисплей пірометра

Рис. 7.8. Пірометр PT-02LD (фірма OPTES CO., LTD, Японія)



Загальний вигляд пірометра



Поле зору пірометра



Дисплей пірометра

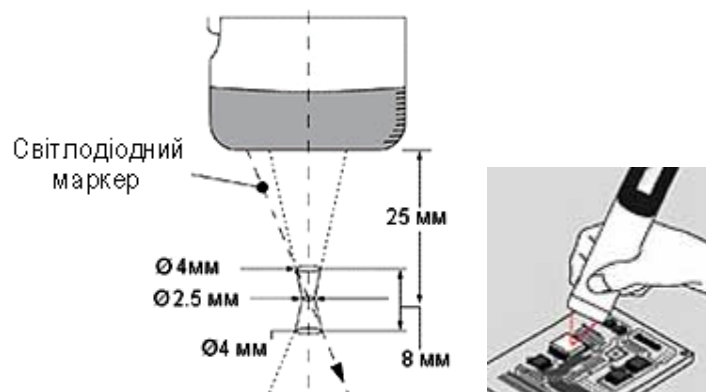
Рис.7.9. Пірометр PT-3LF (OPTES CO., LTD, Японія)



Використання пірометра



Дисплей пірометра

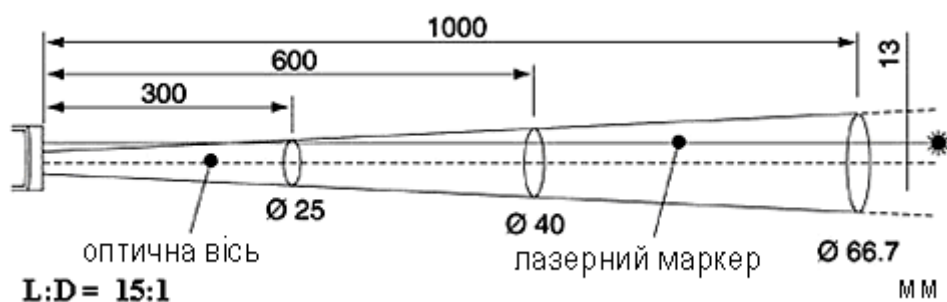


Поле зору пірометра

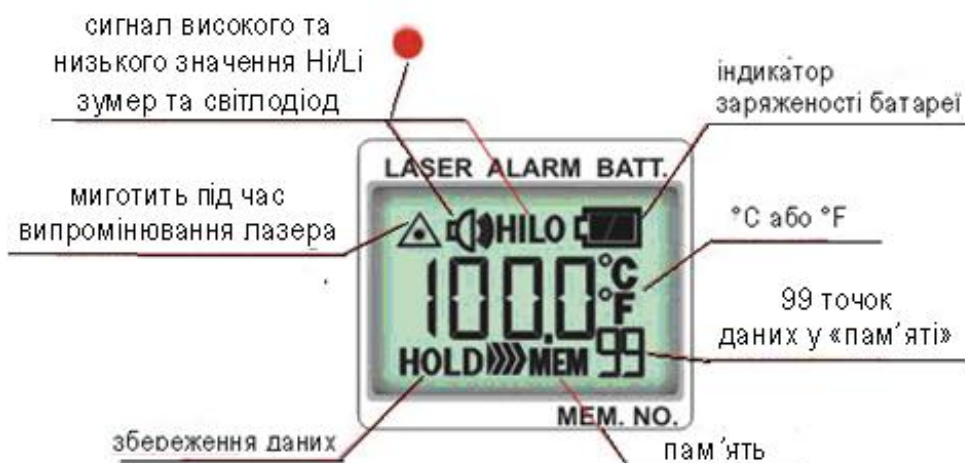
Рис. 7.10. Пірометр PT-3S (OPTES CO., LTD, Японія)



Загальний вигляд пірометра



Поле зору пірометра



Дисплей пірометра

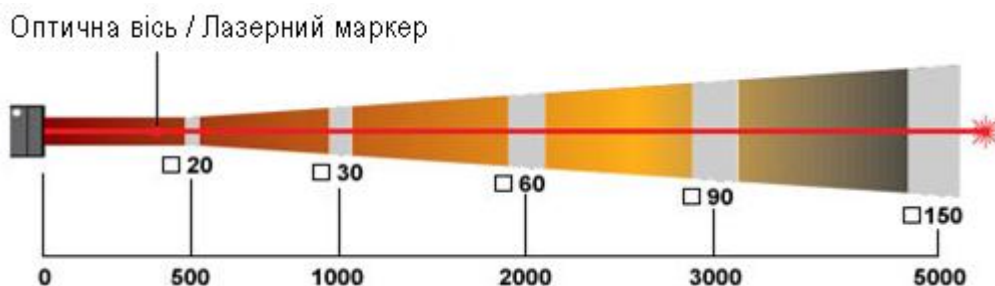
Рис. 7.11. Пірометр PT-5LD (OPTES CO., LTD, Японія)



Загальний вигляд пірометра



Дисплей пірометра РТ-80



Область вимірювань пірометра РТ-80

Рис. 7.12. Пірометр РТ-80 (OPTES CO., LTD, Японія)

Портативний пірометр серії Land PocketTherm (рис. 7.13) є приладом із системою кругового наведення на об'єкт. У пірометрі використовується лазерна технологія для підсвічування ділянки вимірювання. За живлення всього від двох батарей типу АА, прилад настільки малий, що може поміщатися в кишені.

Технічні характеристики пірометра наведені в табл.7.12

7.12. Технічні характеристики пірометра Land PocketTherm

Показник	Значення показника
Діапазон вимірюваних температур, °С	від мінус 40 до плюс 400
Точність	під час вимірювання температури +200 °С або вище ± 1 % результату вимірювання; у діапазоні вимірюваних температур від 0 до +200 °С – ± 2 °С
Спектр, мкм	від 8 до 14
Спектральний відгук, мкм	від 8 до 14
Оптична система	кремнієві лінзи
Система прицілювання	круговий лазер
Дисплей	рідкокристалічний цифровий дисплей
Джерело живлення	дві АА лужні батареї; напруга 3В, струм 80 мА
Маса, кг	0,14 (з батареями).
Габаритні розміри, мм	27,5 x 44 x 152

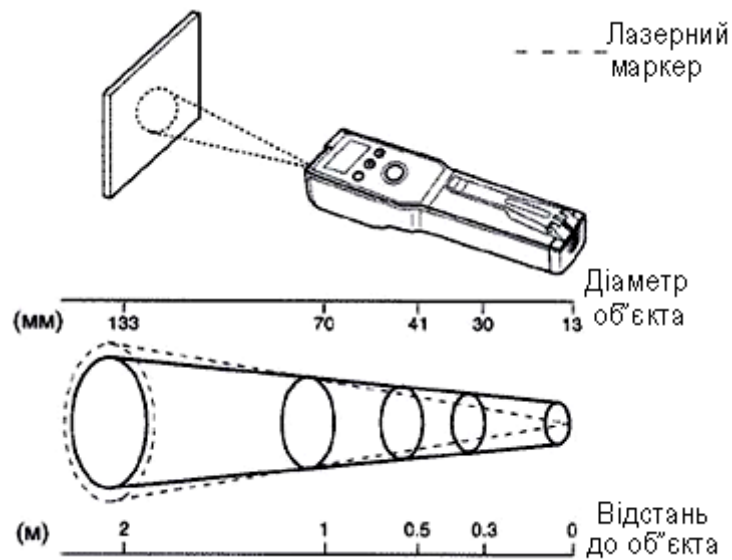
Можливе встановлення коефіцієнта теплового випромінювання (одне з трьох значень: 0,95; 0,90 або 0,85). Час відгуку становить 1,5 с (90 % відгук).

Ступінь захисту від впливу навколишнього середовища – IP54.

Умови навколишнього середовища – температура від 0 до плюс 50 °С; відносна вологість не вище 85 % (за температури +35 °С, без конденсації вологи).



Загальний вигляд пірометра



Поле зору пірометра



Дисплей пірометра

Рис. 7.13. Пірометр Land PocketTherm 30

Обстеження енергетичного устаткування за допомогою інфрачервоних пірометрів. Методи контролю температури енергетичного устаткування з використанням пірометрів і тепловізорів набувають все більш широкого розповсюдження в останні роки. Це пов'язано передусім з ефективністю цього методу контролю, а також з його безпечністю для персоналу.

Вибір марки пірометра багато в чому визначається спектром завдань, які необхідно вирішити з його допомогою. В енергетиці основними об'єктами контролю служать деталі й вузли енергоустановок. *Діапазон граничних значень температур нагріву частин і деталей енергоустановок встановлений ГОСТ 8024-90 «Нормы нагрева при длительном режиме работы и методы испытаний».*

Так, граничнодопустима температура контактів із міді та сплавів без покриття на повітрі за номінального навантаження складає 75 °С, з накладними пластинами з срібла – 120 °С, покритих сріблом – 105 °С, стикових з покриттям із срібла товщиною не менше 24 мкм – 120 °С, з покриттям оловом – 90 °С. З'єднання (окрім зварних і паяних) з міді, алюмінію і сплавів у повітрі без покриття можуть нагріватися до 90 °С, з покриттям оловом – до 106 °С, з покриттям сріблом, нікелем – до 115 °С.

Практично все устаткування (за винятком ізоляційних матеріалів, що мають клас нагрівостійкості вищий 120 °С) має найбільшу допустиму температуру нагріву в діапазоні 80–120 °С. *Тому, вибираючи пірометр, діапазон контрольованих температур повинен лежати в діапазоні від 0 до 200 °С.* Другою, важливою для діагностування енергоустаткування характеристикою пірометрів, є значення показника візування. Це відношення діаметру плями, з якої проводиться вимірювання температури на об'єкті до відстані до цього об'єкта. Показник візування визначає мінімальні розміри контрольованого об'єкта.

Наочною характеристикою фокусування оптики пірометрів є діаграма поля зору – це графічне відображення залежності діаметру плями, з якої проводиться вимірювання температури на об'єкті, від відстані до об'єкта.

Контроль корпусів трансформаторів, що мають розмір декілька метрів, не становить складнощів під час використання пірометрів з великим показником візування, тоді як вимірювання температури ошиновки, струмопроводів, контактів, роз'єднувачів, розміри яких складають кілька сантиметрів, пов'язане із труднощами. За малих

розмірів об'єкта складно добитися точних вимірювань пірометрами з показником візування 1:70 і більше (1:50; 1:8).

Необхідно зазначити, що із збільшенням показника візування різко підвищується ціна імпортованих пірометрів. Пірометрів із показником менше 1:130 на низькі температури багато західних фірм взагалі на наш ринок не поставляють. Пірометри з показником візування менше 1:200 виготовляються навіть вітчизняними виробниками за індивідуальними замовленнями. Таким чином, оптимальним вибором вважатиметься пірометр із показником візування в діапазоні 1:100, 1:200 й оптикою, сфокусованою на відстані 2–3 м.

Однією з важливих характеристик пірометрів є *спектральний діапазон пропускання оптики*. Нині загально визнаним вважається діапазон від 8 до 14 мкм. Цей діапазон знаходиться в ділянці прозорої атмосфери і не має усередині себе ліній поглинання води, С, CO₂, O₂. Це дозволяє проводити вимірювання з відстані до 100 м без істотного ослаблення сигналу. Крім того, прилад стає менш чутливим до сторонніх засвічень від високотемпературного устаткування, а також і до засвічень від сонця, а це серйозна перевага під час пірометричного контролю устаткування на вулиці вдень. Під час вибору пірометра необхідно звернути увагу на наявність функції встановлення коефіцієнта теплового випромінювання в діапазоні від 1.00 до 0.10. Ця функція в більшості сучасних приладів реалізована.

На ринку є багато приладів вітчизняного й зарубіжного виробництва з розширеним сервісом. Запам'ятовування ряду значень температури, часу проведення вимірювань, значення коефіцієнта теплового випромінювання та інших параметрів об'єкта істотно спрощує завдання під час складання звітів і підвищує довіру під час аналізу результатів.

Застосування пірометрів черговим персоналом і ремонтними бригадами істотно підвищує оперативність і достовірність під час виявлення аварійних і передаварійних вузлів. Регулярне використання пірометрів черговим персоналом дозволяє накопичувати дані про температурні режими устаткування за різного навантаження. Це, у свою чергу, дає можливість застосовувати оптимальні рішення за об'ємом ремонту, під час виведення устаткування в ремонт та оцінити якість ремонту після запуску устаткування в експлуатацію. Дешевизна методу інфрачервоного контролю за допомогою пірометрів, його оперативність і доступність дозволяє використовувати пірометричний контроль практично на будь-якому підприємстві.

Загалом можна зробити такі висновки:

1) контроль температури радіаційними пірометрами значно підвищує надійність енергоустаткування у зв'язку з можливістю своєчасного відключення і виведення в ремонт найбільш небезпечних вузлів;

2) інфрачервоний контроль з використанням пірометрів є більш простим і доступним методом оперативного діагностування енергетичного устаткування черговим персоналом і персоналом ремонтних бригад, ніж тепловізійний;

3) пірометричний контроль дозволяє підвищити безпеку роботи персоналу, оскільки роботи проводяться безконтактно на відстані й не вимагають зняття напруги;

4) пірометри можуть ефективно використовуватися для виявлення вузлів, що найбільш часто виходять з ладу, і деталей енергосистем – ошиновки, трансформаторів, *контактних з'єднань*;

5) під час пірометричного контролю необхідно враховувати такі чинники:

- розмір контрольованого об'єкта;
- відстань до об'єкта;
- матеріал, форму і стан поверхні об'єкта;
- кут, під яким проводиться контроль;
- метеоумови (сонячне освітлення, опади, туман, роса тощо);

– температуру навколишнього повітря;

6) під час вибору радіаційного пірометра для контролю енергоустаткування необхідно звернути увагу на такі технічні характеристики:

– діапазон контрольованих температур (переважно від 0 до +200 °С);

– показник візування (1:100–1:200);

– точність вимірювань (1–1,5 %);

– встановлення коефіцієнта теплового випромінювання (1,00–0,10);

– спектральний діапазон (8–14 мкм);

7) одним з основних чинників, що впливають на точність вимірювання температури радіаційними пірометрами часткового випромінювання, є *правильний вибір значення коефіцієнта теплового випромінювання матеріалу поверхні контрольованого об'єкта*.

Як відомо, пірометр обчислює температуру об'єкта, вимірюючи потік теплового випромінювання з деякої частини його поверхні в робочій ділянці спектра (або використовуючи відношення потоків у

двох і більш областях спектра – в пірметрах спектрального відношення).

Для розрахунку щільності випромінювання в заданому спектральному інтервалі застосовують закон Планка, який є основним і найбільш загальним законом у теорії теплового випромінювання:

$$E_{\lambda, T} = \frac{\varepsilon \cdot C_1}{\lambda^5 \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)}, \quad (7.1)$$

де ε – випромінювальна здатність; C_1 і C_2 – перша й друга постійні Планка; λ – довжина хвилі; T – температура.

Об'єкт, що повністю поглинає падаюче на нього випромінювання, має найбільшу випромінювальну здатність $\varepsilon = 1$ і називається «абсолютно чорним тілом». Реальні об'єкти мають випромінювальну здатність менше 1, тому випромінюють менше енергії. Проблема полягає в тому, що для більшості реальних об'єктів випромінювальна здатність залежить від температури й довжини хвилі (зазначено вище), тобто ($\varepsilon = f(T)$), а також від багатьох інших чинників – матеріалу й форми об'єкта, стану поверхні, наявності оксидної плівки, конденсату вологи тощо (рис. 7.14).

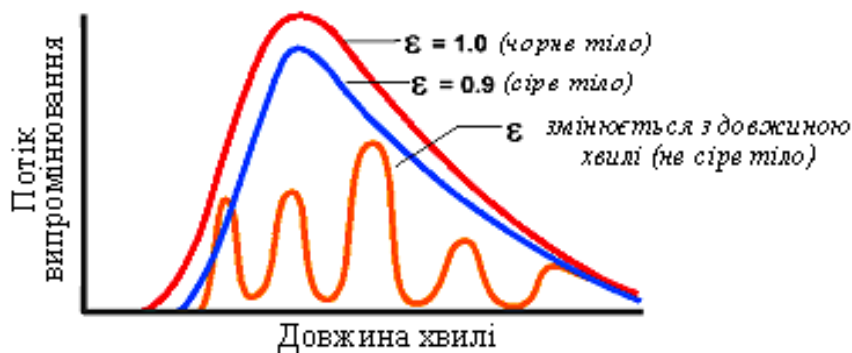


Рис. 7.14. Випромінювальна здатність «абсолютно чорного тіла» й реальних об'єктів

Дерево, пластик, органічні матеріали, камінь, графіт мають випромінювальну здатність близько 0,8–0,95, на противагу їм випромінювальна здатність металів може змінюватися в дуже широких межах, і залежить від температури й довжини хвилі. Поверхня розплавленого металу утворює гладке дзеркало, випромінювальна здатність якого може бути менше 0,1, а випромінювальна здатність плаваючого на поверхні шлаку може досягати значень 0,9–0,95.

Для коректного вимірювання температури необхідно точно вказати пірометру випромінювальну здатність об'єкта, для визначення якої можна скористатися довідковими даними або деякими практичними методами. Між пірометром та об'єктом не повинно бути перешкод, непрозорих у робочій ділянці спектра пірометра, інакше в результаті зменшення потоку випромінювання, його показники будуть занижені. Об'єкт вимірювання, навпаки, має бути непрозорим у цій ділянці спектра.

Значні похибки виникають також під час забруднення поверхонь оптичної системи пірометра, що обумовлює необхідність їх періодичного очищення, або, в особливо важких умовах, безперервного обдування чистим повітрям.

Оптична система формує поле зору пірометра – ділянку, у межах якої проводяться вимірювання температури. Для коректного проведення вимірювань необхідно, щоб об'єкт повністю перекривав поле зору. Інакше, по-перше, потік теплового випромінювання потрапляє на приймач (датчик) пірометра від об'єкта вимірювання зменшиться пропорційно скороченню площі, що перекривається об'єктом, по-друге, на приймач потраплятиме випромінювання заднього фону (об'єктів, розташованих за об'єктом вимірювання).

Як параметр, що визначає діаметр поля зору пірометра, зазвичай використовують вже згаданий вище «показник візування» (відношення діаметра поля зору приладу до відстані, до точки вимірювання). Найточніше розрахувати діаметр поля зору можливо під час використання діаграми поля зору пірометра, на якій наводиться діаметр (або радіус) поля зору залежно від відстані до об'єкта вимірювання.

Пірометром може бути виміряна лише температура поверхні об'єкта, вимірювання температури усередині об'єкта можливе лише шляхом порушення його цілісності (що справедливо й для контактних засобів вимірювання). Для настроювання і повірки пірометрів необхідно використовувати моделі абсолютно чорного тіла, випромінювальна здатність яких близька до одиниці й визначена з високою точністю.

Особливості контролю технічного стану контактних з'єднань із застосуванням пірометрів. Дефекти контактних з'єднань складають більшість від виявлених за допомогою інфрачервоного діагностування дефектів енергетичного обладнання. Залежно від

сфери застосування електричні контактні з'єднання (далі – контактні з'єднання) підрозділяються на класи⁴⁶ (табл. 7.13).

7.13. Класи контактних з'єднань

Сфера застосування контактного з'єднання	Клас контактного з'єднання
Контактні з'єднання кіл, перерізи провідників яких вибрані за допустимими тривалими струмовими навантаженнями (силові електричні кола, лінії електропередавання тощо)	1
Контактні з'єднання кіл, перерізи провідників яких вибрані за стійкістю до наскрізних струмів, втрати й відхилення напруги, механічної міцності, захисту від перевантаження. Контактні з'єднання в колах заземлювальних і захисних провідників із сталі	2
Контактні з'єднання кіл з електротехнічними пристроями, робота яких пов'язана з виділенням великої кількості тепла (нагрівальні елементи, резистори тощо)	3

Примітка. У стандартах і технічних умовах на конкретні види електротехнічних пристроїв повинні указуватися класи 2 і 3, клас 1 не вказується.

Залежно від кліматичного виконання і категорії розміщення електротехнічних пристроїв за ГОСТ 15150⁴⁷ контактні з'єднання підрозділяються відповідно на групи (табл. 7.14). За конструктивним виконанням контактні з'єднання підрозділяються на нерозбірні й розбірні.

7.14. Групи контактних з'єднань (за ГОСТ 10434–82)

Кліматичне виконання і категорії розміщення електротехнічного пристрою	Група контактного з'єднання
Усіх кліматичних виконань для категорії розміщення 4.1 за атмосфери типів II та I. Кліматичні виконання У, УХЛ, ТС для категорії розміщення 3 і кліматичних виконань УХЛ, ТС для категорії розміщення 4 за атмосфери типів II та I	A

⁴⁶ ГОСТ 10434–82. Межгосударственный стандарт. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования

⁴⁷ ГОСТ 15150–69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды

Будь-які поєднання кліматичного виконання і категорії розміщення, окрім вказаних вище, за атмосфери типів II та I. Будь-які поєднання кліматичного виконання і категорії розміщення за атмосфери типів III та IV	Б
---	----------

Залежно від матеріалу провідників, що сполучаються, і групи контактних з'єднань розбірні контактні з'єднання підрозділяються на:

- такі, що не вимагають застосування засобів стабілізації електричного опору – див. пп. 2.1.6 і 2.1.8 стандарту (ГОСТ 10434–82);
- такі, що вимагають застосування засобів стабілізації електричного опору – див. пп. 2.1.7 і 2.1.8 стандарту (ГОСТ 10434–82).

Слід зазначити, що за стандартом⁴⁸ *електричним контактом* є доторкання тіл, що забезпечує неперервність електричного кола, тоді як *контакт електричного кола* є частиною електричного кола, призначеною для комутації і проведення електричного струму, а *контактне з'єднання* є контактом електричного кола, що призначений тільки для проведення електричного струму й не призначений для комутації електричного ланцюга за заданої дії пристрою.

Під час проведення пірометричного контролю найбільша кількість вимірювань виконується для контактних з'єднань класу 1. Стандартом (ГОСТ 10434–82. Межгосударственный стандарт. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования) визначені основні технічні вимоги до конструкції, електричних параметрів, стійкості до механічних факторів, надійності й безпеки контактних з'єднань. Для інтерпретації результатів пірометричного й тепловізійного обстеження важливі також такі параметри контактних з'єднань, як конструкція з'єднання, матеріал поверхні, геометричні розміри, умови експлуатації.

Нерозбірні контактні з'єднання можуть бути виконані зварюванням чи паянням, штирьовим виводом, зварюванням через перехідну пластину, з'єднанням проводів через перехідну гільзу, обпресуванням, з'єднанням жил проводу в овальних з'єднувачах. При цьому важливим фактором є форма струмопроводу контактного з'єднання. Вона може бути плоскої, циліндричної та складеної з декількох деталей форми. Плоска форма характерна для шинопроводів, що можуть мати прямокутний і квадратний перерізи, циліндрична форма характерна для одножильних струмопроводів, збірна – для багатожильних струмопроводів, яка зазвичай

⁴⁸ГОСТ 14312–79. Контакты электрические. Термины и определения

використовується у лініях електропередавання. Залежно від конструкції нероз'ємного струмопроводу зона з'єднання струмопроводів може бути лінійною, площинною, циліндричною та багатозонною. Лінійне контактне з'єднання характеризується зміною опору струмопроводу уздовж лінії з'єднання, наприклад, лінії зварювання, та у випадку відмінності величини опору звареного шва від опору струмопроводу зміною тепловиділення в цій зоні. Лінійне контактне з'єднання характерне для простого зварного й звареного через перехідну пластину контактного з'єднання.

Площинне нероз'ємне контактне з'єднання виникає під час контакту двох плоских струмопроводів, (звичайно шинопроводів) накладенням одного на інший і з'єднанням за допомогою зварювання, паяння або штирьовим виводом із зварюванням. У такому випадку тепловиділення змінюється по всій площині контакту струмопроводів.

Циліндричне нероз'ємне з'єднання виникає під час з'єднання проводу (кабелю) з кабельним наконечником за допомогою паяння. Тепловиділення в цьому випадку відбувається в усій зоні контакту, звичайно всередині кабельного наконечника.

Багатозонне нероз'ємне контактне з'єднання характерне для з'єднання жил проводів з'єднувачами за допомогою обпресування. У загальному випадку воно характерне й для площинного з'єднання за неповного контакту площин струмопроводів. Тепловиділення в такому контактному з'єднанні відбувається в зонах контакту струмопроводів і може мати складний вигляд.

Розбірні контактні з'єднання поділяються на з'єднання з плоскими виводами, із вивідними штирями та з гніздовими виводами. За конструкцією вони підрозділяються на з'єднання зі стабілізацією електричного опору й без його стабілізації. У свою чергу, розбірні контактні з'єднання з плоскими виводами розділяються на виводи з контргайкою, із пружинною шайбою, контакт проводу зі згинанням у кільце й без згинання в кільце, сталевим кріпленням з тарілчастою пружиною, сталевим кріпленням із захисним покриттям, сталевим кріпленням через перехідну мідно-алюмінієву пластину матеріалів, таких як золото чи срібло.

Оксидна плівка⁴⁹ на поверхні більшості матеріалів, що використовують для виготовлення струмопроводів, є ізолятором, тому її наявність в ділянці контактного з'єднання зменшує електропровідність і приводить до підвищеного тепловиділення.

⁴⁹ Приміром плівка Al_2O_3 на поверхні алюмінію, яка перешкоджає його подальшому окисленню.

Наявність механічних часток у зоні контактного з'єднання може призвести до деформації металу й зменшення провідності з'єднання.

Підвищене тепловиділення в контактних з'єднаннях виникає за рахунок зменшення площі зон провідності порівняно із загальною площею контакту. Опір, що виникає за рахунок зменшення площі зон провідності, називається *опором звуження*. У зонах провідності практично завжди присутні оксидні плівки, що так само збільшує опір контакту. Необхідно відзначити, що розрахунок опору звуження для простих контактів досить складний у зв'язку зі складним видом електричного поля в провідниках кінцевих розмірів.

У загальному випадку під час визначення опору звуження вимірюють опір провідника, що має контактне з'єднання і віднімають від цієї величини опір аналогічного провідника тієї ж довжини без контактного з'єднання. Зі зміною радіуса зони контакту з'єднання і числа таких зон опір звуження зменшується обернено пропорційно росту.

На величину опору звуження великий вплив має тиск, прикладений до контактних площин розбірного контактного з'єднання. Збільшення тиску призводить до зростання кількості контактних площин і збільшення їхньої площі. Істотний вплив на величину опору звуження роблять дефекти контактних з'єднань, що виникають як у процесі їхнього виготовлення, так і під час експлуатації.

Умовно дефекти контактних з'єднань можна розділити на такі групи:

- лінійні дефекти нероз'ємних (зварених, паяних) з'єднань;
- зонні дефекти;
- об'ємні дефекти.

Лінійні дефекти пов'язані, у першу чергу, з тріщинами, що виникають як у зоні з'єднання, так і в струмопроводах, що примикають до зони з'єднання. Причиною виникнення тріщин може служити брак виробника, великі механічні навантаження або часто повторювані механічні навантаження на провідник.

Зонні дефекти характерні для всіх типів контактних з'єднань. Вони викликані дефектами провідників, нерівністю поверхонь, поганою якістю зварювання і пайки, наявністю оксидної плівки та іншим. Зонні дефекти присутні завжди в різних з'єднаннях і є основною причиною збільшення опору звуження.

Об'ємні дефекти виникають за деформації геометрії контактних площадок, унаслідок чого виникає не площинність під час контакту шинопроводів. Об'ємні дефекти існують завжди в

нероз'ємних з'єднаннях отриманих за допомогою обпресування.

Під час проведення температурного контролю виявити зони дефекту важко, бо тепловиділення виникає тільки в зоні провідності, у той час як дефектні ділянки струмопроводів звичайно не проводять струм і відповідно не нагріваються. Цей факт часто не враховується під час розшифрування термограм і, як наслідок, приводить до неправильних висновків.

Пірометричний контроль температури контактних з'єднань проводять за результатами вимірювань температури на поверхні контактів, де температура має звичайно більш низьке значення, ніж у зоні контакту й усереднюється по площі плями контролю пірометра. Важливим фактором під час пірометричного контролю контактних з'єднань є розмір об'єкта контролю і мінімально допустима відстань для проведення контролю.

Найбільше поширення в енергетиці одержали пірометри з кутом візування 1:60, 1:100 і мінімальним діаметром плями контролю 25 мм (С-110, С-300). Зважаючи на те, що контактні з'єднання мають різну конструкцію і розміри: від кількох міліметрів (одножильні струмопроводи) до сотень міліметрів (шинопроводи високовольтних підстанцій) бажано проводити контроль з відстані, коли найменший розмір контакту перевищує діаметр плями контролю на відстані контролю мінімум в 1,5 рази.

На жаль, на відкритих розподільчих пристроях напругою понад 20 кВ більшість контактних з'єднань знаходиться на відстані більше 7 метрів від землі, і мають розмір менше 70 мм. Це призводить до виникнення похибок під час проведення контролю температури пірометрами з кутом візування більше 1:100.

7.3. Застосування тепловізорів для контролю технічного стану енергетичного обладнання

7.3.1. Принцип дії і будова тепловізорів

Тепловізори відносяться до оптико-електронних приладів пасивного типу. У них невидиме оком людини інфрачервоне випромінювання від обстежуваних об'єктів перетворюється в електричний сигнал, який піддається підсиленню та автоматичній обробці, а потім перетворюється у видиме зображення теплового поля об'єкта для його візуальної і кількісної оцінки.

Обов'язковою умовою формування картини розподілу теплових полів по поверхні об'єкта є наявність температурного контрасту між об'єктом і місцевістю (фоном), а в межах контуру об'єкта – між його

окремими елементами (сучасні тепловізійні прилади здатні сприймати температурні контрасти (0,05–0,1) К).

Тепловізійні прилади мають багато переваг: забезпечення великих ділянок бачення незалежно від рівня природної освітленості, що дозволяє їм працювати цілодобово, можливість роботи в умовах інтенсивних світлових перешкод і до певного ступеня – за зниженої прозорості атмосфери (туман, дощ, снігопад, пил, дим та ін.). Ці прилади здатні сприймати теплове випромінювання від об'єктів через середовища, непрозорі для видимого або ближнього інфрачервоного (ІЧ) випромінювання, але прозорі для теплового випромінювання: листя, маскувальні мережі, невеликий шар землі, нагромадження предметів та ін. Це дає можливість спостерігати замасковані або приховані об'єкти.

Тепловізійні прилади з 60-х років ХХ століття розвивалися за двома основними напрямками: з використанням дискретних приймачів випромінювання спільно з механічними системами сканування (розгортки) зображення і приладів без механічного сканування. При цьому можна виділити чотири покоління тепловізійних приладів:

1) *тепловізори нульового покоління* базуються на застосуванні одиночних приймачів випромінювання і двовимірної розгортки зображення за допомогою скануючої оптико-механічної системи;

2) *тепловізори першого покоління* базуються на застосуванні одновимірних лінійок фотоприймачів та одновимірної оптико-механічної розгортки зображення;

3) *тепловізори другого покоління* базуються на застосуванні матриць фотоприймачів у вигляді 2–6 лінійок з часовою затримкою і накопиченням та одновимірної оптико-механічної розгортки зображення;

4) *нове третє покоління* (рис. 7.15, 7.16) базується на застосуванні фокально-площинних двовимірних багатоелементних матриць фотоприймачів (FPA – Focal Plane Array), що «дивляться» без використання оптико-механічних систем розгортки зображення. Основними перевагами цих приладів є: відсутність оптико-механічної розгортки зображення і відповідно малі маса, габарити й енергоспоживання, безшумна робота, високе відношення сигнал/шум та якість зображення, широкий динамічний діапазон, можливість зв'язку із сучасними комп'ютерами, відео- й телевізійною апаратурою, цифрова обробка зображення в реальному масштабі часу.

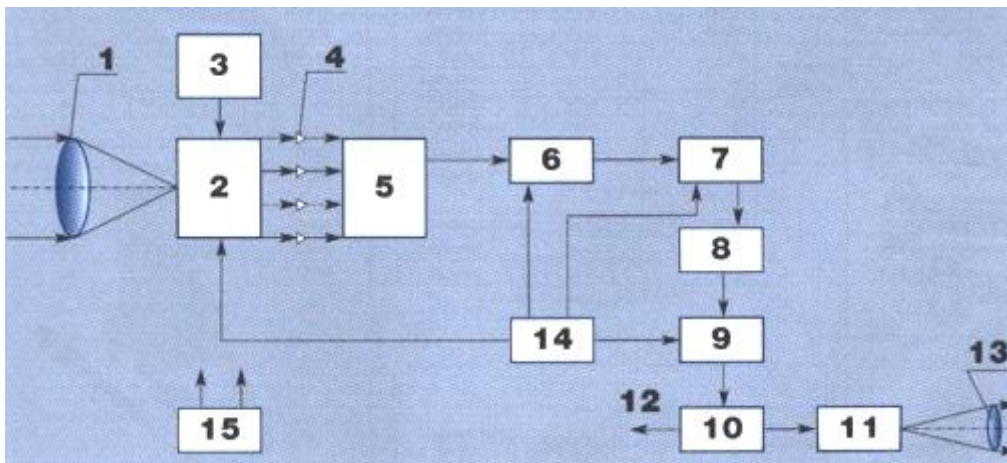


Рис. 7.15. Блок-схема тепловізійної камери третього покоління:
 1 – ІЧ-об’єктив, 2 – матриця ІЧ-фотоприймачів, 3 – блок охолодження або термостабілізації матриці,
 4 – передпідсилювачі, 5 –мультиплексор, 6 – аналоговий коректор неоднорідності сигналів, 7 – аналого-цифровий перетворювач,
 8 – цифровий коректор неоднорідності сигналів, 9 – коректор непрацюючих елементарних фотоприймачів матриці, 10 – блок формування зображення з мікропроцесорною обробкою відеосигналу, 11 – цифровий вихід для підключення до персонального комп’ютера, 12 – ТВ-монітор, 13 – окулярна система, 14 – тактовий генератор, 15 – первинне джерело живлення (акумуляторна батарея)

Наявність блока охолодження або термостабілізації матриці та окулярної системи не є обов’язковою і залежить від типу приладу. Неоднорідності сигналів елементарних фотоприймачів матриці заздалегідь коригуються в аналоговій формі, перетворюються в цифрову й коригуються з використанням даних, отриманих у процесі калібрування. Далі сигнали виправляються (можливе віднімання непрацюючих елементів матриці з їх заповненням) і надходять до блока формування зображення. На його виході інформація видається або як відеосигнал, що направляєється до ТВ-монітора, або в цифровій формі для передачі в персональний комп’ютер.

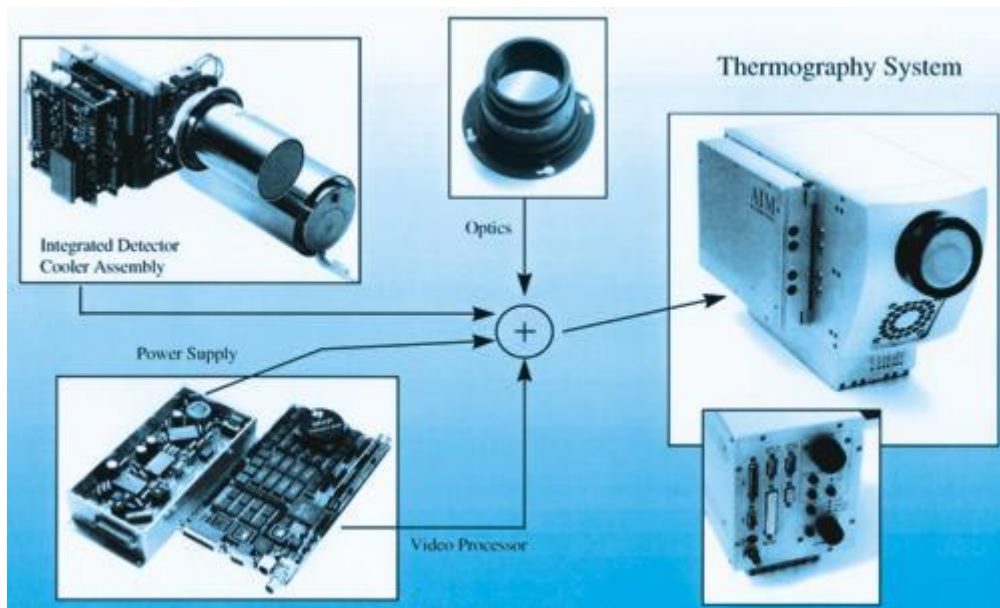


Рис. 7.16. Складові частини тепловізійного приладу

Для глибокого (криогенного) охолодження матриці ($T = 75\text{--}80\text{ K}$) використовується газова холодильна машина, що працює за замкнутим циклом Спліт-Стирлінга. Для неглибокого охолодження ($T = 150\text{--}250\text{ K}$) або термостабілізації роботи неохолоджуваної матриці використовується система термоелектричного охолодження.

Сучасні фокально-площинні матриці ІЧ-фотоприймачів можуть бути виконані на основі різних матеріалів – халькогенідів свинцю (PbS, PbSe), з'єднання кадмій-ртуть-теллур – HgCdTe (*KPT*), антимоніду індію (InSb), силіциду платини (PtSi), домішкового кремнію (Si:x) і германію (Ge:x), багат шарових структур з квантовими ямами на базі GaAs/AlGaAs – так званих *QWIP* детекторів (*QWIP* – Quantum Well Infrared Photodetector), мікроболометрів і піроелектриків.

Зовнішній вигляд типової ІЧ-матриці показаний на рис. 7.17 а, а її обрамлення електронними платами із захисним вікном з германію – на рис. 7.17 б. На рис. 7.17 в показані типові охолоджувачі, що працюють за циклом Спліт-Стирлінга, а на рис. 7.17 г – приймальний модуль, що містить ІЧ-матрицю, охолоджувач та електронний блок, що включає буферний підсилювач та аналого-цифровий перетворювач. На рис. 1.16 зображений мікропроцесорний модуль обробки відеосигналу, приймальний модуль і модуль ІЧ-об'єктива як складові частини тепловізійного приладу. Подібний принцип будови приладів із стандартних модулів (*SIM* – Standard Imaging Module) взагалі характерний для сучасного теплобачення. Він забезпечує

високий ступінь уніфікації приладів, спрощує їх збирання і налагодження, знижує вартість.

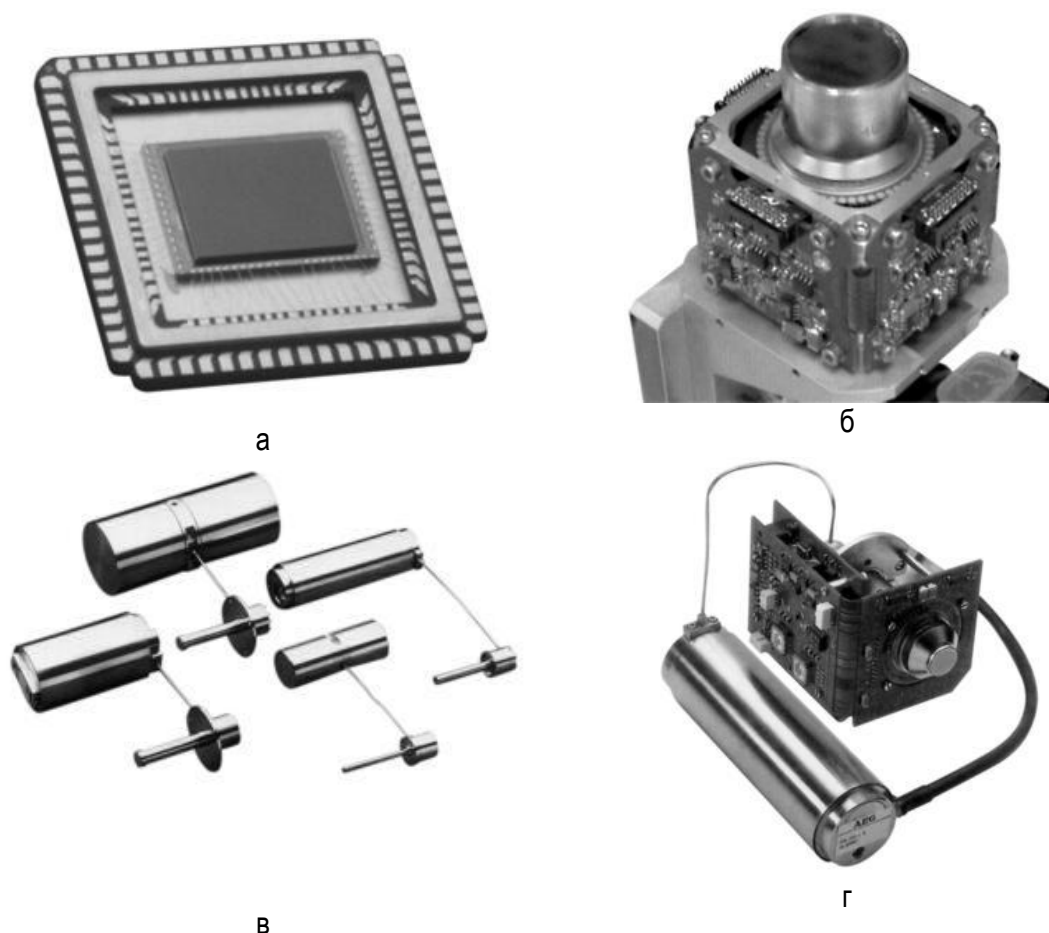


Рис. 7.17. Складові частини тепловізійної камери третього покоління: а – ІЧ-матриця; б – ІЧ-матриця із захисним вікном; в – охолоджувачі; г – приймальний модуль

Як матеріали для піроелектричних приймачів випромінювання використовуються цирконати свинцю, ніобати й титанати барію-стронцію, сополімери вініленфториду, а для мікроболометрів використовуються модифікації оксидів ванадію $VxOy$, полікристалічний та аморфний кремній.

Принцип роботи мікроболометра⁵⁰ полягає в зміні опору матеріалу під час поглинання ІЧ-випромінювання. Маса кращик

⁵⁰ Болومتر (дав.-гр. βολή – промінь і μέτρον – міра) – прилад для вимірювання енергії випромінювання. Був винайдений Самуелем Пірпонтотом Ленглі в 1878 р. Основний компонент болметра – дуже тонка пластинка (наприклад, з платини або іншого провідного матеріалу), зачорнена для кращого поглинання випромінювання. Через свою малу товщину пластинка під дією випромінювання швидко нагрівається і її опір підвищується. Для вимірювання малих відхилень опору пластинки її включають у вимірювальний міст, який балансує у відсутність засвічення.

тепловізійних приладів на мікроболометрах доходить до 0,5 кг, а ІЧ-чутливих модулів – до 0,2 кг. Чутливість, що характеризується NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) – еквівалентна шуму різниці температур для кращих приладів досягає близько 50 мК за рекордного значення 20 мК, типових – 100 мК, середніх – 150 мК, буває NETD = 300–400 мК. Формат матриці в основному 320x240 пікселів, хоча відомі матриці з числом пікселів 640x480 з кроком 28 мкм [11].

Конкурентами приладів на мікроболометрах є прилади на піроелектричних приймачах. У них під час дії ІЧ-випромінювання міняється спонтанна поляризація або діелектрична проникність чутливого конденсаторного елемента. Хоча в таких приладах і використовуються механічні модулятори, прилади також не вимагають охолодження і працюють у тій же ділянці спектра. За чутливістю вони дещо гірші: NETD не більше 80 мК, типово 100–150 мК. Використовується найчастіше той же формат 320x240 пікселів, але є і формат 640x512, а в тепловізійному біноклі LION – 512x256.

У 90-і роки ХХ століття з'явилися тепловізійні прилади на QWIP-матрицях з високою технологічністю, відтворюваністю, однорідністю параметрів за елементами з форматом 256x256, 320x240, 320x256, 640x512 пікселів. Чутливість досить висока: у кращих приладів NETD навіть нижче 10 мК, типових – 20 мК, середніх – 35 мК. QWIP-матриці володіють здатністю управління спектральною чутливістю і можливістю перейти в майбутньому від гібридних структур фокальних матриць до монолітних [11].

Перше місце поки займають прилади з використанням ІЧ-матриць на базі КРТ. Можливість їх роботи в ділянці спектра 1–20 мкм є важливою перевагою. Розроблені матриці з форматом 640x480 пікселів. Чутливість за NETD дуже висока: для кращих моделей – 10 мК, типових – 15 мК, середніх – 20 мК [11].

Неохолоджувані мікроболометричні й піроелектричні ІЧ-матриці не мають поки достатньо високої чутливості. Проте існують реальні можливості підвищення їх NETD до 10 мК (за умови використання ІЧ об'єктива з відносним отвором 1:1) і зменшення розмірів елементарного фотоприймача матриці до теоретичних меж – 20 мкм для ділянки спектра 8–14 мкм. Формат мікроболометричних матриць у найближчому майбутньому може досягати 960x1280 пікселів. Фірма Sanders/Lockheed Martin (США) планує довести масу таких ІЧ матриць до 25 г [11].

7.3.2. Визначальні характеристики тепловізорів

Важливими характеристиками тепловізора, що визначають його технічний рівень, є такі параметри:

- *температурний дозвіл* – мінімально помітна різниця температур об'єкта та його фону. Має бути не гірше 0,1 °С за температури +30 °С;

- *просторовий дозвіл* – елементарний тілесний кут, яким здійснюється аналіз простору;

- *діапазон вимірюваних температур*. Верхня межа повинна бути не менше +200 °С для контролю електроустаткування. Під час обстеження тепломеханічного устаткування цей поріг є сенс збільшити до +500 °С, а іноді й більше;

- *спектральний діапазон* – робоча спектральна ділянка тепловізора. Рекомендований РД 34.45-51.300-97 спектральний діапазон вимірювань становить 8–12 мкм;

- *автокомпенсація дії зовнішніх чинників*. У тепловізорі має бути передбачена компенсація температури навколишнього середовища, випромінювальної здатності об'єкта, відстані, з якої виконується обстеження;

- *швидкість формування зображення* – число зображень отриманих у секунду. Важлива під час реєстрації високодинамічних теплових процесів, зйомки з автомобіля або вертольота;

- *енергоспоживання*. Витрата енергії є основним чинником під час вибору параметрів батареї для роботи в польових умовах;

- *охолодження ІЧ-детектора*. Метод охолодження детектора тепловізора впливає на його характеристики. Тому, щоб підвищити здатність виявляти, необхідно зменшити власне випромінювання детектора. Основні способи охолодження: рідким азотом, система мікрохолодильника Стірлінга й за рахунок термоелектричного ефекту. На сьогодні на ринку інфрачервоної техніки пропонуються тепловізори нового покоління з неохолоджуваними матричними детекторами;

- *маса* під час роботи в польових умовах має велике значення і характеризує портативність системи;

- *специфічні вимоги до експлуатації тепловізора*. До них відносяться кліматичні чинники, вібраційні дії, зручності користування під час роботи в будь-який час доби тощо.

7.3.3. Особливості вибору тепловізорів

Виявлення дефекту має здійснюватися за можливості на ранній стадії його розвитку, для чого тепловізор повинен мати достатню чутливість, надійність, простоту в обслуговуванні, прийнятну вартість, необхідні функціональні й конструкційні можливості.

Під час вибору тепловізійних систем рекомендується звертати увагу на їх функціональні можливості:

- *чутливість і діапазон вимірювання температур*; чутливість (роздільна здатність за температурою) повинна бути не менше 0,1 °С за температури фону +25–30 °С, основний діапазон вимірювання від – -20 °С до +200 °С і вище, за необхідності забезпечуються діапазони: високочутливий, розширений і високотемпературний;

- *спектральний діапазон* має значення під час проведення тепловізійного контролю переважно в сонячний час;

- *детектор* повинен забезпечувати стабілізацію вимірюваної температури за рахунок застосування стабілізації мікроболометричного приймача або глибокого охолодження приймача. Інакше буде потрібним часте перекалібрування камери у випадках зміни температури навколишнього повітря, що приведе до зниження точності вимірювання та їх стабільності;

- *об'єктиви*. Переважні об'єктиви з рознесеними лінзами й додатковою діафрагмою, що не допускає можливості попадання на детектор випадкового випромінювання і підвищує якість зображення усуненням можливості підсвічування зображення на детекторі тепловими променями, що йдуть від самого досліджуваного об'єкта й багато разів відображеними від внутрішньої поверхні детектора, що приводить до розмиття картини. Камера має бути оснащена ручним управлінням фокусом. Воно краще моторизованого за швидкістю, плавністю і надійністю, а також знижує енергоспоживання камери. Як приклад можна привести професійну фототехніку, яка завжди оснащена ручним приводом фокусу;

- *простота управління*. Камера повинна управлятися кнопками в режимі «прямого доступу», тобто «натиснув кнопку – отримав результат». У ній не повинна використовуватися складна система меню, яка втомлює зір оператора й подовжує процес вимірювання;

- *візуальний контроль*. Переважний первинний контроль об'єкта, спостережуваного на екрані, що також забезпечує можливість панорамного всього його огляду або більшої частини;

– *якість*. Багато зарубіжних фірм під час виготовлення приладів інфрачервоної техніки використовують комплектуючі вузли, що купуються в країнах Азії і Близького Сходу, якість яких часто залишає бажати кращого.

– *точність і стабільність показників*. Похибка вимірювання 2 % або 2 °С по всьому зображенню в усьому інтервалі робочих температур; компенсація зміни температури елементів камери; коригування впливу атмосфери (врахування відстані, температури, відносної вологості); коригування випромінювання і температури фону;

– *режими роботи*. Вимірювання температури в точці; вимірювання різниці температур двох точок; автоматичне знаходження максимальної або мінімальної температури; автоматичне знаходження максимальної, середньої, мінімальної температури в будь-якій ділянці об'єкта; отримання ізотерми; виділення порогових максимальних і мінімальних значень температур; отримання температурного профілю безпосередньо в зоні виникнення дефекту та ін.;

– *вартість*. Вартість камери під час придбання її через посередника може бути завищена на 15–20 %.

Для якісного тепловізійного контролю також важлива кваліфікація персоналу й система оцінки отримуваних результатів.

Оператор, що працює з тепловізійною технікою, повинен володіти знаннями у сфері теплобачення, вміти розбиратися в теорії фізики діелектриків, знати конструкцію контрольованого об'єкта й уявляти собі теплові процеси, що протікають у ньому, мати інформацію про пошкодзованість устаткування і можливі місця виникнення дефектів, уміти правильно проводити аналіз отриманих результатів вимірювань і пов'язувати їх з рекомендованим їм додатковим об'ємом традиційних вимірювань для уточнення характеру й місця положення виявленого дефекту.

Відносна простота проведення інфрачервоного діагностування працюючого устаткування дозволяє проводити його 1–2 рази на рік. Отримані результати разом із інформацією про контрольований об'єкт, умови, режими й тривалість його роботи тощо повинні зберігатися в комп'ютерній базі даних і застосовуватися в необхідних для аналізу випадках. Отримані термографічні зображення об'єкта за необхідності рекомендується порівнювати в часі, із зміною навантаження шляхом порівняння виміряних температур у межах фази, між фазами, із завідомо справними вузлами або ділянками, з різних точок огляду тощо.

Під час вибору тепловізора необхідно передбачити можливість змінного об'єктива, якщо в цьому з'явиться необхідність у процесі експлуатації. В останніх моделях є функція автокалібрування за зміни об'єктива. Більшість тепловізорів, пропонованих споживачеві, мають широкий набір додаткових функцій (запис голосових коментарів, вбудована цифрова камера й ліхтарик для підсвічування об'єкта, що знімається, функції сигналізації максимальної та мінімальної температур, цифрове збільшення зображення тощо), які можуть бути корисні й ефективні в роботі, але при цьому відбиваються на ціні приладі.

7.3.4. Номенклатура тепловізорів

Тепловізор «Иволга» призначений для безконтактного контролю температури поверхонь твердих (сипких) тіл, газових струменів і розплавів різних матеріалів за їх власним тепловим випромінюванням. Інфрачервоне випромінювання реєструється уздовж лінії візування і виводиться у вигляді графіка розподілу радіаційної температури на вбудований рідкокристалічний монітор приладу. Структурна схема тепловізора наведена на рис. 7.18, а його загальний вигляд – на рис. 7.19 а.

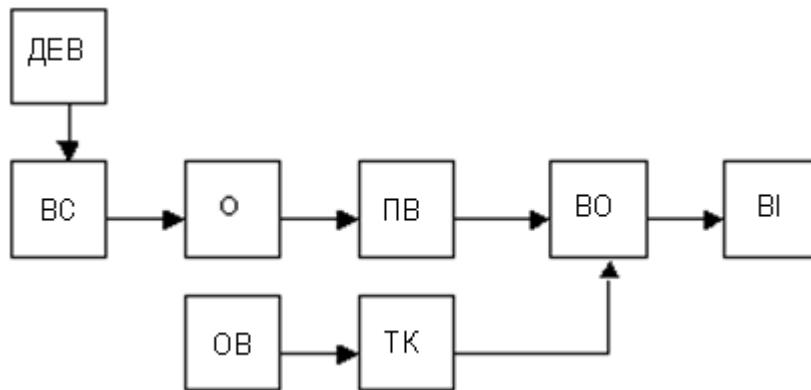


Рис. 7.18. Структурна схема тепловізора «Иволга»:

ДЕВ – джерело еталонного випромінювання; ВС – вузол сканування;

О – інфрачервоний об'єктив; ПВ – приймач випромінювання;

ВО – вузол обробки сигналу; ВІ – вузол індикації; ОВ– об'єктив

відеокамери; ТК – телевізійна камера

Потік інфрачервоного випромінювання, що випускається об'єктом, відбивається дзеркалом вузла сканування ВС у вхідну зіницю об'єктива, фокусується і потрапляє на приймач випромінювання ПВ, що знаходиться у фокусі об'єктива. Приймач

випромінювання ПВ перетворює енергію падаючого на нього потоку ІЧ-випромінювання в електричну напругу.

Вузол обробки ВО перетворює сигнал з приймача випромінювання ПВ у масив значень радіаційної температури, відповідно до збереженої в незалежній пам'яті індивідуальної градувальної характеристики приладу й показників вбудованих датчиків температури та відображає цей масив у вигляді графіка на рідкокристалічному моніторі пульта керування.

Одночасно з виведенням графіка розподілу радіаційних температур до вузла індикації ВІ надходить зображення об'єкта у видимому спектральному діапазоні, що формується телевізійним каналом, який складається з мініатюрної телевізійної камери ТК з об'єктивом ОВ.

Значення радіаційної температури, реєстрованої в центрі поля зору, додатково виводиться на монітор у вигляді цифрового значення. Графік розподілу температури й відповідний йому кадр відеозображення (рис. 1.19 б) можуть бути збережені в незалежній пам'яті для подальшої обробки на комп'ютері за допомогою спеціального розробленого програмного забезпечення. Підключення до зовнішнього комп'ютера здійснюється послідовним каналом зв'язку, що відповідає вимогам стандарту RS-232.

Конструкційно лінійний сканер складається з вимірювального блока й сполученого з ним електричним кабелем пульта керування. Зовнішня акумуляторна батарея підключається до гнізда, розташованого на передній панелі вимірювального блока.

Технічні характеристики тепловізора наведені в табл.7.15

7.15 Технічні характеристики тепловізора «Иволга»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірюваних температур, °С	Від мінус 20 до плюс 170
Межа абсолютної похибки, що припускається	±1,5 °С
Час встановлення показів, с	2
Спектральний діапазон, мкм	3–5
Кут поля зору по лінії сканування, град	40
Кут миттєвого поля зору фотоприймача, град	4,6 x 4,6
Місткість незалежної пам'яті, кадрів	30
Споживана потужність, Вт	18
Маса, кг	1,5
Габаритні розміри, мм	174 x 120 x 110

Умови експлуатації тепловізора:

- температура довколишнього повітря, °С – від -10 до +45;
- відносна вологість, % – до 90;
- атмосферний тиск, кПа – 86–106.

Тепловізійний комплект «Снигирь-500» (рис. 7.19 в, г) призначений для контролю температури поверхні об'єктів до +500 °С та вимірювання коефіцієнта теплового випромінювання. Міцний і дуже зручний у використанні комплект є ідеальним інструментом для найрізноманітніших застосувань.

Особливості комплекту:

– миттєве безконтактне вимірювання температури (виявлення найрізноманітніших несправностей і миттєве визначення проблемної зони на чіткому та яскравому інфрачервоному зображенні);

– підвищена точність вимірювань (комплекс дозволяє визначити коефіцієнт теплового випромінювання досліджуваного матеріалу для підвищення точності вимірювань);

– міцна й легка конструкція, що відповідає вимогам ергономіки (органи керування роблять комплекс дуже простим в обігу; комплекс ідеально підходить для роботи як в приміщенні, так і на відкритому повітрі);

– можливість швидкого виявлення недоліків (перегляд зображення на 3,5-дюймовому РК-дисплеї).

Технічні характеристики тепловізора наведені в табл. 7.16.

7.16 .Технічні характеристики тепловізора «Снигирь-500»

Показник	Значення показника
Діапазон контрольованих температур, °С	від мінус 10 до плюс 500
Чутливість, °С	0,2
Спектральний діапазон, мкм	від 7,5 до 13
Режим вимірювань	фіксована крапка в середині зображення
Мінімальна фокусна відстань, м	0,3
Частота оновлення зображення з прогресивною розгорткою, Гц	9
Фокусування	ручне

Як датчик у тепловізійній камері використовується матриця у фокальній площині (FPA), неохолоджуваний мікроболометр 120x120 пікселів. Камера має кольоровий РК-дисплей 3,5 дюйма (8,9 см) по діагоналі, 16000 кольорів. Засоби керування в меню приладу – колірні

гама (кольорове або чорно-біле зображення), авторегулювання (автоматичне/ручне). Можливі уставки – дата/час доби, мова, режим виключення живлення, яскравість дисплея. Коригування вимірів тепловізора можливе шляхом зміни коефіцієнта випромінювання (регулюється від 0,1 до 1,0). Тип носія інформації у приладі – вбудована флеш-пам'ять (50 зображень у форматі JPEG).

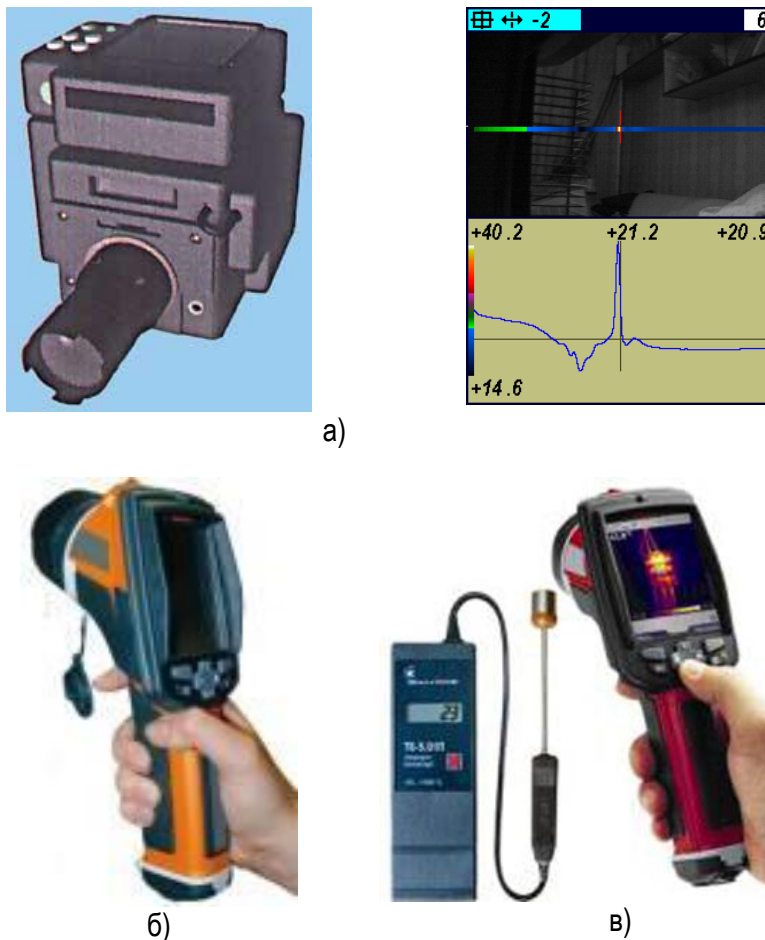


Рис. 7.19. Тепловізори виробництва підприємств Російської Федерації: а) «ИВОЛГА» (справа відеозображення і графік температури); б) «СНИГИРЬ»; в) комплект «СНИГИРЬ–500» (тепловізійна камера й контактний цифровий термометр)

Тепловізор має USB Інтерфейс для передавання інформації до ПЕОМ.

Живлення тепловізора:

– літій-іонна акумуляторна батарея, що допускає заміну в робочих умовах. Час безперервної роботи до 7 годин. На дисплеї показується рівень заряду батареї;

– мережа змінного струму – адаптер живлення від мережі змінного струму 90–260 В, 50/60 Гц.

Умови експлуатації:

- діапазон робочих температур – від -15 °С до +50 °С;
- діапазон температур під час зберігання – від -40 °С до +70 °С;
- вологість – від 20 % до 80 % без конденсації вологи.

Тепловізор «THERMACAM E300» (FLIR Systems)⁵¹ – інфрачервона камера для виявлення несправностей електротехнічного устаткування та енергооб'єктів.

«THERMACAM E300» (рис. 7.20 а) – міцна, надлегка й зручна у використанні інфрачервона камера, що забезпечує отримання повних радіометричних зображень високого дозволу (320x240 пікселів), що дозволяє вимірювати температуру об'єктів з високою точністю. Тепловізор «THERMACAM E300» спеціально розроблений для швидкого виявлення несправностей і має змінну оптику для адаптації камери до будь-яких умов. Тепловізійна камера E300 дозволяє вимірювати перепади температури всього в 0,1 °С та отримувати чіткі, вільні від перешкод зображення високої якості, що відображаються на 2,5-дюймовому кольоровому РК-дисплеї. Вбудований лазерний цілевказівник LOCATIR™ допомагає швидко прив'язати гарячу точку на інфрачервоному зображенні до реального фізичного об'єкта, що істотно підвищує рівень безпеки оператора на об'єктах, які знаходяться під напругою.

У пам'яті тепловізора може зберігатися до 80 інфрачервоних зображень в стандартному JPEG – форматі (з малим коефіцієнтом стискування). Це дозволяє виконувати швидкий перегляд збережених зображень, оскільки всі зображення записуються у форматі JPEG, для їх перегляду немає потреби у використанні спеціального програмного забезпечення.

Переміщувані курсори (у формі перехрестя) дозволяють вимірювати й аналізувати температуру в одній точці. Можна також знаходити найбільш гарячу точку заданої області й виділяти

⁵¹ Компанія FLIR Systems є світовим лідером у розробці й виробництві ІЧ термографічних камер. Досвід роботи компанії перевищує 30 років, на сьогодні в усьому світі використовується більше 30000 ІЧ-камер, вони застосовуються в планово попереджувальному технічному обслуговуванні, науково-дослідних розробках, неруйнівному контролі, контролі технологічних процесів та автоматизації, контролі якості та ін. Компанія FLIR Systems має три заводи, що знаходяться в США (Портланд і Бостон) і в Стокгольмі (Швеція). Офіси із збуту є в Бельгії, Франції, Німеччині, Італії, Сполученому Королівстві та в Гонконзі.

обстежувані ділянки за допомогою колірною маркування. Тепловізор «THERMACAM E300» має всі необхідні засоби аналізу для швидкого приймання рішень. Тепловізійна камера «THERMACAM E300» надає повний набір засобів визначення температури як для зображень, що отримуються в реальному масштабі часу, так і для збережених зображень високого дозволу (320x240 пікселів). Джойстик дозволяє переміщати курсори по зображенню – це істотна перевага в порівнянні зі всього лише однією фіксованою точкою в центрі зображення.

Колірні палітри, коефіцієнт випромінювання, діапазон температур та інші параметри можна легко змінювати натисненням клавіші. Системи вбудованих меню забезпечують зручний доступ до вдосконалених, але простих у використанні програмних засобів.

До комплекту постачання тепловізора «THERMACAM E300» входить програмне забезпечення THERMACAM QuickView, яке дозволяє виконувати аналіз отриманих інфрачервоних зображень і складати прості звіти в PDF-форматі. Програмне забезпечення THERMACAM Reporter на базі Microsoft Word можна придбати додатково. Для тепловізора «THERMACAM E300» розроблений і випускається ряд змінних об'єктивів та аксесуарів.

Іонно-літієва батарея, що має малу масу й великий термін служби, забезпечує можливість проведення обстеження протягом понад 2 години без перерви на заряджання, яке здійснюється за допомогою вбудованого зарядного пристрою. У комплект постачання входить також система заряджання на дві батареї з адаптером для заряджання від автомобільної мережі.

Поміщена в пиловологозахисний корпус, камера E300 (ступінь захисту від впливу навколишнього середовища IP54) може експлуатуватися у важких промислових умовах.

Тепловізор «THERMACAM E320» (FLIR Systems) – компактна інфрачервона тепловізійна камера, що забезпечує можливість безконтактного вимірювання температури, отримання чітких теплових зображень, їх аналізу в польових умовах, а також збереження зображень для проведення якісного й кількісного подальшого аналізу та складання звітів. THERMACAM E320 (рис. 7.20 б) – єдина камера, яка надає за доступною ціною практично всі можливості, якими володіє інфрачервона камера професійного класу. Тепловізор «THERMACAM E320» дозволяє бачити чіткі зображення (320x240 пікселів) на екрані ПК-дисплея з високою роздільною здатністю.

Камера забезпечує безконтактні прецизійні вимірювання температури в діапазоні від -20 °С до +1200 °С (2 піддіапазони й додатково від +250°С до +1200 °С) та має високу термочутливість (0,10 °С).

Особливостями тепловізора «THERMACAM E320» є:

- цифрова зміна масштабу відтворення до 4;
- звукова тривожна сигналізація;
- автоматичне виявлення гарячої точки;
- текстове анотування в польових умовах (забезпечується збереження базових текстових коментарів (анотацій) разом з інфрачервоним зображенням);
- вбудований лазерний покажчик.

Передбачене збереження понад 80 зображень у радіометричному JPEG-форматі. Прилад можна використовувати як в приміщенні, так і поза його межами в будь-яких погодних умовах (ступінь захисту від впливу навколишнього середовища IP54). Є програма THERMACAM Reporter для детального подальшого аналізу результатів вимірювань і складання звіту. Адаптованість камери до будь-якої ситуації забезпечує широкий діапазон аксесуарів, зокрема змінних об'єктивів.

Під час виконання інспекцій технічного обслуговування за поточним станом, що базується на прогнозуванні запасу надійності, можна виявитися в ситуаціях, коли немає місця, щоб зробити крок назад і відійти від об'єкта спостереження. Тоді прекрасним рішенням є використання ширококутного об'єктива. Працюючи ж із об'єктами, які знаходяться на значному віддаленні, доцільно використовувати телескопічний об'єктив. Змінні об'єктиви надають термографісту гнучкість, необхідну для пристосування до найбільш вимогливих застосувань приладу. Для здобуття видимих зображень на екрані дисплея за освітлення прямим сонячним світлом тепловізор має сонцезахисний пристрій (козирок).

Тепловізор «ThermaCam P25LE» (FLIR Systems) (рис. 7.20 в) – інфрачервона камера загального призначення, яка містить у своєму складі:

- інфрачервону камеру;
- валізу для транспортування;
- кришку для об'єктива, наплічний пасок, пасок для перенесення в руках;
- керівництво з експлуатації;
- акумуляторні батареї (2 шт.);
- блок живлення;

- зарядний пристрій для акумуляторної батареї;
- комплект мікрофон-наушник для запису голосових коментарів;

- відеокабель із роз'ємом RCA;
- USB-кабель;
- відеокабель S-video;
- PCMCІ карту FLASH-пам'яті;
- програмне забезпечення THERMACAM Quick View.

Тепловізор «ThermaCam P45» (FLIR Systems) (рис. 7.20 г) – інфрачервона камера загального призначення, що містить у своєму складі:

- інфрачервону камеру;
- валізу для транспортування;
- кришку для об'єктива, наплічний пасок, пасок для перенесення в руках;
- керівництво з експлуатації;
- акумуляторні батареї (2 шт.);
- блок живлення;
- зарядний пристрій для акумуляторної батареї;
- комплект мікрофон-наушник для запису голосових коментарів;

- відеокабель з роз'ємом RCA;
- USB-кабель;
- відеокабель S-video;
- PCMCІ карту FLASH-пам'яті;
- програмне забезпечення THERMACAM Quick View.

Тепловізор «THERMACAM P65» (Flir Systems) (рис. 7.20 д) – інфрачервона система контролю технічного стану об'єктів. Він має всі якості, які необхідні для ухвалення обґрунтованих рішень під час проведення робіт із технічного обслуговування:

- прецизійне безконтактне вимірювання температури (температурний діапазон від -40 до +2000 °С, теплова чутливість 0,08 °С);
- висока якість зображень;
- отримання зображень як в інфрачервоній, так і у видимій ділянках спектра;
- запис текстових і мовних коментарів з використанням технології безпроводного зв'язку Bluetooth;
- використання безпроводного ІЧ зв'язку;
- автофокусування;

- додаткове підсвічування знімною лампою;
- висока швидкість передавання зображень;
- збереження всієї радіометричної інформації у форматі JPEG;

- запис тепловізійного відео у форматі AVI.

Прилад комплектується програмним забезпеченням для отримання професійного звіту за результатами обстеження.

Тепловізор має нові корисні функції для прискорення і полегшення обстеження:

- *звукова й колірна сигналізація.* Оператор може встановлювати в камері значення порогової допустимої температури. Якщо камера «THERMACAM P65» направлена на об'єкт, температура якого перевищує встановлене порогове значення, то спрацює звукова й колірна сигналізація;

- *вимірювання різниці температур.* Розрахунок різниці температур для точок вимірювання безпосередньо в польових умовах;

- *автоматичне виявлення гарячої точки.* Камера «THERMACAM P65» автоматично показує температуру й позицію найбільш гарячої точки на зображенні об'єкта;

- *запис AVI-файлів.* Камера «THERMACAM P65» може записувати відеозображення тривалістю до 35 секунд в AVI-файлі. Ця функція необхідна під час сканування таких рухомих об'єктів, як двигуни, конвеєрні стрічки та ін. Для подальшого аналізу такий AVI-файл може відтворюватися у самій камері або в персональному комп'ютері;

- *завантаження призначених для користувача профілів.* У тепловізора «THERMACAM P65» є можливість збереження і завантаження своїх власних налаштувань камери (колірні палітри, курсори тощо) у вигляді свого «профілю»;

- *запис мовних коментарів* за допомогою технології Bluetooth. Камера «THERMACAM P65» з кожним зображенням може зберігати до 30 секунд мовних коментарів. Технологія Bluetooth забезпечує безпроводне з'єднання між камерою і головним пристроєм із вбудованим мікрофоном. Такий безпроводний головний мікрофон усуває необхідність у всіх кабельних з'єднаннях між оператором і камерою, що підвищує безпеку роботи оператора;

- *просте введення текстових анотацій.* Тепер не потрібно знову й знову заповнювати всі поля у вікнах текстових анотацій. Можна просто скопіювати текстові анотації з одного зображення в інше й змінити лише те, що необхідно.

Тепловізор має ергономічну легку портативну конструкцію.

Тепловізор «THERMACAM P65HS» (FLIR Systems) є системою інфрачервоної дефектоскопії із широкими можливостями, яка має конструкцію, що відповідає вимогам ергономіки й призначається для забезпечення максимальної ефективності й продуктивності праці професійного термографіста.

Особливості тепловізора «THERMACAM P65HS» (рис. 7.20 е):

- прецизійне безконтактне вимірювання температури (теплова чутливість, рівна 0,08 °C);
- висока якість зображення (320x240 пікселів);
- отримання зображень в інфрачервоній і видимій ділянках електромагнітного спектра;
- використання технології безпроводного зв'язку Bluetooth;
- автофокусування;
- висока швидкість завантаження зображення;
- збереження радіометричних зображень у форматі JPEG;
- запис у монопольному режимі й у форматі AVI.

До камери може бути приєднана лампа для освітлення темних ділянок, наприклад, під час отримання візуальних зображень у приміщенні. Рідкокристалічний дисплей разом зі всіма необхідними кнопками дистанційного керування є знімним, що дозволяє спостерігати за зображеннями під час встановлення камери у важкодоступних місцях. Тепловізор є ергономічним, легким і портативним приладом, зручним і доступним в експлуатації.

Тепловізор «THERMACAM P640» (FLIR Systems) – перша професійна інфрачервона камера з неохолоджуваним мікроболометром, що забезпечує отримання високоякісних зображень з дозволом 640x480 пікселів. Цей тепловізор (рис. 7.20 є) – ідеальний засіб діагностування для професійних термографістів, що знають усі переваги й особливості ІЧ-камер і працюють з камерою протягом кількох годин протягом дня. У камері P640 передбачений багатий набір функцій, що робить її надзвичайно корисною для користувачів.

За використання спільно з новим програмним забезпеченням (ПЗ) THERMACAM Reporter, тепловізор «THERMACAM P640» дозволяє з високою ефективністю проводити інфрачервоні обстеження і складати професійні звіти за їх результатах. Тепловізор «THERMACAM P640» забезпечує отримання найкращих результатів за максимально коротким проміжком часу.

Інтеграція ІЧ-камери, цифрової відеокамери з лампою підсвічування і лазерного цілевказівника дозволяє проводити більшу кількість обстежень за мінімальний час. ІЧ-зображення і відеозображення, а також інша інформація, що отримується за

допомогою камери «THERMACAM P640» у польових умовах, можуть бути легко завантажені в нове програмне забезпечення THERMACAM Reporter, яке дозволяє проводити аналіз температури й автоматично готувати звіти. Функціональна гнучкість нової камери «THERMACAM P640» забезпечує високу ефективність обстеження незалежно від конкретного застосування і налаштувань користувача.

Особливостями тепловізора є:

- висока якість зображення з дозволом 640x480 пікселів;
- надзвичайно висока температурна чутливість 60 мК;
- ручне й автоматичне фокусування;
- цифрове збільшення до 8x з панорамуванням;
- збереження в пам'яті відеофайлів з ІЧ-зображеннями;
- одночасне виведення на екран зображення в режимі реального часу й контрольного зображення;
- маркер гарячої точки на відеозображенні;
- текстові й мовні коментарі;
- спрощена інтеграція зображень та іншої інформації в професійне програмне забезпечення;
- безпроводний зв'язок (інтерфейс IRDA);
- колірна сигналізація;
- звукова сигналізація.

Тепловізор має великий РК-дисплей розміром 5,6 дюймом, видношукач високого дозволу з регульованим кутом нахилу, вбудовану відеокамеру з лампою підсвічування. Прилад вирізняється ергономічною конструкцією і малою масою та має міцний корпус з магнієвого сплаву (IP 54).

Якість зображення, безумовно, є однією з найбільш важливих характеристик будь-якої ІЧ-камери. Вища якість зображення забезпечує можливість бачення великої кількості деталей, ухвалення більш обґрунтованих рішень за менший час і, отже, вищу ефективність аналізу.

Чудова якість зображення досягається використанням оптимальної комбінації «детектор/об'єктив». Камера «THERMACAM P640» оснащена новітнім неохолоджуваним гик-детектором високого дозволу 640x480 пікселів, а також дуже потужним об'єктивом. Прецизійний об'єктив з германію з інтегрованим USM-механізмом фокусування дозволяє максимально ефективно реалізувати всі переваги матриць у фокальній площині (FPA) високого дозволу.



Рис. 7.20. Тепловізори виробництва компанії FLIR Systems:
 а) THERMACAM E300; б) THERMACAM E320; в) THERMACAM P25LE; г) THERMACAM P45; д) THERMACAM P65;
 е) THERMACAM P65HS; е) THERMACAM P640

Камера «THERMACAM P640» є останнім досягнення в галузі ІЧ-технологій. Вочевидь, що ІЧ-зображення 640x480 пікселів має в 4

рази вищий дозвіл порівняно з традиційним зображенням 320x240 пікселів. Камера дозволяє проводити вимірювання температури невеликих об'єктів, з високою точністю, знаходячись від об'єкта на вдвічі більшій відстані, ніж у випадку з камерою дозволом 320x240 пікселів.

Убудований видошукач високого дозволу є необхідним засобом під час проведення контролю в польових умовах, він забезпечує отримання великого контрастного зображення. Можливість зміни кута нахилу (90 °С) дозволяє комфортно працювати в будь-яких умовах, використовувати різні варіанти вибору кадру. Видошукач можна нахиляти й регулювати на свій розсуд, що дає можливість бачити чіткі ІЧ-зображення в найрізноманітніших умовах і навіть під час попадання прямого сонячного світла.

Тепловізор «THERMACAM P640» має поворотну ручку з інтегрованими органами управління, що дозволяє встановлювати камеру в будь-яку зручну для роботи позицію. У ручку інтегровані кнопки та джойстик для управління камерою «THERMACAM P640».

Таким чином, кнопки завжди залишаються безпосередньо під пальцями. Декілька кнопок і джойстик забезпечують управління всією камерою «THERMACAM P640» і дозволяють виконувати операції вибору та включення різних функцій. За допомогою кнопок виконуються автоматичне фокусування, «заморожування» і збереження зображень.

ІЧ-камера «THERMACAM P640» призначена для застосування в різних галузях науки й техніки – електростанції, оброблювальна промисловість, будівництво, дослідження, розробки та ін. Нові технічні можливості тепловізора «THERMACAM P640» забезпечують можливість його використання для вирішення практично будь-яких завдань, що вимагають ІЧ-обстежень.

Тепловізор INFRACAM (FLIR Systems) – зручна в експлуатації інфрачервона камера, що дозволяє виразно побачити приховані пошкодження, які не можна виявити неозброєним оком.

Технічні характеристики тепловізора(рис.7.21а) наведені в табл. 7.17

7.17.Технічні характеристики тепловізора INFRACAM

Показник	Значення показника
Діапазон вимірюваних температур,°С	Від мінус 10 до плюс 350
Чутливість, °С	0,12
Режим вимірювань	Фіксована точка в середині зображення
Мінімальна фокусна відстань, м	0,3

Продовження таблиці 7.17

Частота оновлення зображення, Гц	9 з прогресивною розгорткою
Тип датчика	Матриця у фокальній площині (FPA), неохолоджуваний
Мікроболометр	120x120 пікселів
Спектральний діапазон, мкм	від 7,5 до 13
Представлення зображення	Кольоровий дисплей ЖК: 3,5" (8,9 см) по діагоналі, 16000 кольорів
Інтерфейс	USB - передавання зображень на ПЕОМ
Живлення	Літій-іонна акумуляторна батарея, допускає заміну в робочих умовах. Час безперервної роботи – до 7 годин (індикація рівня зарядженості батареї). Робота від мережі змінного струму – адаптер живлення від мережі змінного струму 90–260 В, 50/60 Гц
Маса, кг	0,55

Прилад має лазерний цілевказівник locatIR (напівпровідниковий діодний лазер (матеріал AlGaInP), потужність 1мВт, випромінювання в червоному діапазоні спектра з довжиною хвилі 635 нм)

Фокусування – ручне

Умови довкілля:

– діапазон робочих температур, °С – від мінус 50 до плюс 50;

– діапазон температур під час зберігання, °С – від мінус 40 до плюс 70;

– вологість, % – від 20 до 80 без конденсації вологи.

Засоби керування тепловізором у меню: колірна гама (кольорове або чорно-біле зображення), авторегулювання (автоматична/ручна). Уставки, що вводяться оператором: дата/час доби, мова, режим виключення живлення, яскравість дисплея.

Коригування вимірів виконується шляхом зміни коефіцієнта випромінювання (регулюється від 0,1 до 1,0). Збереження зображень здійснюється у зовнішній флеш-пам'яті типу CD до 1000 зображень у термографічному форматі JPEG. Тепловізор «INFRACAM» зберігає в пам'яті 50 зображень у зручному форматі JPEG, які можна легко передати на персональний комп'ютер.

Тепловізор «FLIR INFRACAM SD» (FLIR SYSTEMS) – нова вдосконалена модель тепловізора «INFRACAM» відрізняється вищою чутливістю і наявністю SD-карти пам'яті, що дозволяє зберегти до

1000 зображень у форматі JPEG. Тепловізори широко використовуються в усьому світі керівниками виробництва, електриками та іншими фахівцями з обслуговування, що займаються прогнозуванням, для виявлення місць перегріву, для запобігання електричним аваріям, підвищення рівня безпеки й навіть для попередження пожеж.

Технічні характеристики тепловізора наведені в табл. 7.18

7.18. Технічні характеристики тепловізора «INFRACAM SD»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірюваних температур, °C	від мінус 350 до плюс 350
Точність	– ± 2 °C або ± 2 % від абсолютної температури
Режим вимірювання	– фіксована точка, область (мін./макс.)
Лазерний покажчик	Laser Locator™
Поле зору / мінімальна фокусна відстань	25x25/ 0,3 м
Температурна чутливість, °C	0,12 за температури +30 °C (краща у своєму класі)
Частота кадрів, Гц	9
Фокусування	ручне
Тип детектора	матриця у фокальній площині (FPA), неохолоджуваний мікроболометр 120x120 пікселів
Спектральний діапазон, мкм	– від 7,5 до 13
Флеш-пам'ять	на зйомній мікро SD карті 256 Мб (1000 зображень)
Формат файлів	радіометричний формат JPEG
Інтерфейси	USB - передавання зображень на ПЕОМ
Живлення	літій-іонна батарея, що перезаряджається, замінювана в умовах експлуатації; час роботи – 7 годин безперервно; дисплей показує стан батареї
Система заряджання	заряджання без витягання з камери; адаптер змінного струму 90–260 Вт, 50/60 Гц; 12 В від автомобільної мережі (з використанням кабелю, що поставляється за додаткову ціну)
Робота від мережі змінного струму	адаптер змінного струму 90–260 Вт, на виході – напруга 12 В, постійного струму

Прилад має кольоровий РК дисплей із розміром по діагоналі 3,5” (8,9 см), 16000 кольорів.

Вимоги до умов довкілля:

- інтервал робочих температур, °С – від мінус 15 до плюс 50;
- інтервал температури зберігання, °С – від мінус 40 до плюс 70;
- вологість, % – від 20 до 80 без конденсації вологи (робота й зберігання).

Тепловізійна камера «INFRACAM SD»(рис.7.21б) має ряд потужних функцій для проведення точних вимірювань температури. Вбудований лазерний інфрачервоний локатор LOCATIR допомагає операторові співставляти пляму перегріву на інфрачервоному зображенні з реальним фізичним об’єктом, завдяки чому підвищується можливість виявляти неполадки. Функція «Зона мин-макс» дозволяє миттєво знаходити місце з найнижчою або з найвищою температурою на об’єкті й усуває ризик пропустити важливу інформацію.



а)



б)

**Рис. 7.21. Тепловізори виробництва компанії FLIR Systems:
а) INFRACAM; б) INFRACAM SD**

Управління тепловізором здійснюється за допомогою меню «Палітри» (кольори мінливості, веселка, чорно-біла, чорно-біла

інвертована), автопідстроювання (безперервна, ручна). Оператором можуть бути введені уставки: число/час доби, одиниця вимірювання температури – °C / °F, мова, масштаб, інформаційне поле, яскравість свічення РК дисплея (висока/нормальна/низька).

Для коригування вимірювань може бути змінений коефіцієнт випромінювання об'єкта від 0,1 до 1,0, а також внесена поправка на відбиту температуру навколишнього повітря.

Тепловізор «FLIR i5» (рис. 7.22 а) – найменша й недорога інфрачервона камера, що забезпечує:

- отримання миттєвих ІЧ-зображень у процесі обстеження;
- детектування прихованих проблем, швидкий аналіз несправностей і виконання профілактичних оглядів;
- обстеження будівель для детектування областей підвищеної вологості й витоків тепла;
- ідентифікація місць втрат тепла й поганої теплоізоляції;
- визначення несправностей електроустаткування до його переходу в небезпечний стан;
- створення звітів, аналіз і документування результатів обстежень за допомогою простого у використанні програмного забезпечення (ПЗ).

Особливості камери:

- гнучкість запису й сумісність із персональним комп'ютером;
- збереження окремих зображень у форматі JPEG на SD-карті;
- передавання файлів через USB-порт до персонального комп'ютера;
- сумісність з програмним забезпеченням Reporter 8 та QuickReporter компанії FLIR Systems.

Сфери застосування тепловізійних камер «FLIR i5»:

- діагностування електричного й механічного устаткування;
- інспекції з техніці безпеки;
- контроль технічного стану контактних з'єднань;
- виявлення пошкоджень ізоляції;
- пошук пошкоджень у системах вентиляції і кондиціонування.

Технічні характеристики тепловізора наведені в табл.7.19

7.19. Технічні характеристики тепловізора «FLIR i5»

Показник	Значення показника
<p>1. Параметри візуалізації:</p> <ul style="list-style-type: none"> - поле зору/мінімальна фокусна відстань, м - температурна чутливість, °С - частота кадрів, Гц - фокусування - тип детектора <p>- спектральний діапазон, мкм</p>	<p>17x 17/0,6 менше 0,1 9 не потрібне матриця у фокальній площині (FPA), неохолоджуваний мікроболометр 80x80 пікселів 7,5 x 13</p>
<p>2. Представлення зображення</p>	<p>кольоровий РК-дисплей з розміром по діагоналі 2,8” (7,2 см), 16000 кольорів</p>
<p>3. Вимірювання:</p> <ul style="list-style-type: none"> - інтервал температур, °С - точність, °С - режим вимірювання - керування за допомогою меню <p>- уставки, які вводяться</p> <p>- коригування вимірів</p>	<p>від 0 до +250 ± 2 або ± 2 % від абсолютної температури фіксована точка палітри (кольори мінливості, райдуга, чорно-біла, чорно-біла інвертована), автопідстроювання (безперервне, ручне) дата/час доби, одиниця вимірювання температури °С/°F, мова, масштаб, інформаційне поле, яскравість світіння РК-дисплея (висока/нормальна/низька); зміна коефіцієнта випромінювання від 0,1 до 1,0, поправка на відбиту температуру навколишнього повітря, вбудована таблиця коефіцієнтів випромінювання</p>
<p>4. Збереження зображення</p>	<p>mini SD карта; формат файлів – радіометричний формат JPEG</p>

Продовження таблиці 7.19

<p>5. Джерело живлення:</p> <ul style="list-style-type: none"> - тип батареї - час роботи - система підзаряджання - робота від мережі змінного струму 	<p>літій-іонна, перезаряджувана, замінювана в умовах експлуатації</p> <p>5 годин безперервної роботи</p> <p>Дисплей показує стан батареї</p> <p>підзаряджання без виймання із камери за допомогою адаптера від мережі змінного струму 220В, 50/60 Гц або від мережі автомобіля напругою 12 В</p> <p>адаптер змінного струму потужністю 90–260 Вт, на виході напруга 12 В постійного струму</p>
<p>6. Вимоги до умов навколишнього середовища:</p> <ul style="list-style-type: none"> - інтервал робочих температур, °С - інтервал температури зберігання, °С - вологість, % - ступінь захисту від впливу навколишнього середовища 	<p>від 0 до плюс 50 від мінус 40 до плюс 70 робота й збереження від 20 до 80, без конденсації вологи IP 44</p>
<p>7 Фізичні характеристики:</p> <ul style="list-style-type: none"> - маса, кг - габаритні розміри, мм 	<p>0,34, включаючи батарею та об'єктив 243 x 81 x 103</p>
<p>8 Інтерфейси</p>	<p>USB - передавання зображень на персональний комп'ютер</p>

Тепловізор «FLIR P660» (рис. 7.22 б) – інфрачервона камера промислового призначення, у якій реалізовані новітні технології
Технічні характеристики тепловізора наведені в табл.7.20.

7.20. Технічні характеристики тепловізора «FLIR P660»

Показник	Значення показника
<p>1. Параметри візуалізації:</p> <ul style="list-style-type: none"> - поле зору/мінімальна фокусна відстань, м - температурна чутливість, °C - частота кадрів, Гц - фокусування - цифрове збільшення - тип детектора - спектральний діапазон, мкм 	<p>змінні об'єктиви 25°, 7°, 12°, 45°; 0,045 за температури +30 °C 30 ручне й автоматичне 1–8х безперервне матриця у фокальній площині (FPA), неохолоджуваний мікроболометр 640x480 пікселів від 7,5 до 13</p>
<p>2. Представлення зображення:</p> <ul style="list-style-type: none"> - дисплей - система покращення контрастності - вихідний відеосигнал - відеокамера <p>Режими суміщення інфрачервоного та відеозображення – перегляд ІЧ-зображення або повнокольорового відеозображення. Режим «картинка в картинці» з повністю регульованою ІЧ-областю, злиття ІЧ і відеозображень, вище, нижче порогу й для інтервалу температур. На екрані реальне й опорне зображення</p>	<p>кольоровий РК-дисплей з розміром по діагоналі 5,6” 16000 кольорів DDE (Dynamic Details Enhancement) PAL або NTCS композитний відеовихід, або цифровий 3,2 Мп з автофокусуванням</p>
<p>3. Вимірювання:</p> <ul style="list-style-type: none"> - інтервал температур, °C - точність - повторюваність - режим вимірювання: <ul style="list-style-type: none"> • точкові вимірювання • діапазон макс/мін/середнє значення в межах квадрата або кола • 5 масштабованих і переміщуваних діапазонів 	<p>від мінус 40 до плюс 500 у двох піддіапазонах, до 1500 °C, до +2000 °C ± 1 % від абсолютної температури не гірше ± 1 °C) ± 1 % від абсолютної температури не гірше ± 1 °C) 10 переміщуваних точок</p>

<ul style="list-style-type: none"> • автоматичне виділення гарячої/холодної точки; • функція ізотерми • функція лінійного профілю • різниця температур між вимірюваними функціями • функція опорної температури - керування за допомогою меню - уставки, які вводяться - коригування вимірів 	<p>інтервал, вище, нижче</p> <p>палітри (кольори мінливості, райдуга, чорно-біла, чорно-біла інвертована), автопідстроювання (безперервне, ручне) дата/час доби, одиниця вимірювання температури °C/F, мова, масштаб, інформаційне поле, яскравість світіння РК-дисплея (висока/нормальна/низька) зміна коефіцієнта випромінювання від 0,1 до 1,0, поправка на відбиту температуру навколишнього повітря, вбудована таблиця коефіцієнтів випромінювання</p>
<p>4. Коментарі:</p> <ul style="list-style-type: none"> - голосові коментарі - текстові коментарі - положення на місцевості 	<p>провідна гарнітура додавання коментарів із заздалегідь підготовленого списку вбудована система глобального позиціонування (GPS)</p>
<p>5. Збереження зображення:</p> <ul style="list-style-type: none"> - тип - формат файлів - збереження радіометричних послідовностей 	<p>SD карта, галерея зображень радіометричний формат JPEG MPEG 4, змінювана частота кадрів (таймер кадрів)</p>
<p>6. Лазерний вказівник LocatiR™:</p> <ul style="list-style-type: none"> - класифікація - тип 	<p>клас 2 напівпровідниковий AlGaInP діодний лазер, 1 мВт/635 нм, червоне світіння</p>
<p>7. Джерело живлення:</p> <ul style="list-style-type: none"> - тип батареї - час роботи - система підзаряджання 	<p>літій-іонна, перезаряджувана, замінювана в умовах експлуатації 3 години безперервної роботи. Дисплей показує стан батареї Підзаряджання без виймання із камери за допомогою адаптера від мережі змінного струму</p>

- робота від мережі змінного струму	220В, 50/60 Гц або від мережі автомобіля напругою 12 В адаптер змінного струму потужністю 90–260 Вт, на виході напруга 12 В постійного струму
- енергозбереження	автоматичне вимкнення і перехід у режим очікування (вибирається користувачем)
8. Вимоги до умов навколишнього середовища: - інтервал робочих температур, °С - інтервал температури зберігання, °С - вологість, % - ступінь захисту від впливу навколишнього середовища - ударне навантаження - вібрація	від мінус 15 до плюс 50 від мінус 40 до плюс 70 робота й збереження від 20 до 80, без конденсації вологи IP 54 5g, IEC68068 – 2–29 2g, IEC68068 – 2–6
9. Фізичні характеристики: - маса, кг - габарити, мм	менше 0,88, включаючи батарею та об'єктив 106 x 201 x 125
10. Інтерфейси	USB, mini USB – передавання зображень на персональний комп'ютер; стандартний композитний відеовихід – CVDC (ITU-R-BT, 470 PAL/SMPTE 170 M NTSC); ГЧ-порт – передавання зображень на персональний комп'ютер; FireWear – передавання цифрового відео в реальному часі

Особливості тепловізора:

- висока якість ГЧ-зображень;
- наявність широкого спектра об'єктивів – від ширококутних до телеоб'єктивів;
- прецизійний лазерний покажчик;
- видошукач високого дозволу з регульованим нахилом для контролю поза приміщеннями;
- наявність функцій «злиття» теплового й видимого зображень (Thermal Fusion), а також – «картинка в картинці» для виділення проблемних ділянок;
- можливість використання мовних і текстових коментарів;

- запис у камері послідовності зображень;
- можливість використання персональних налаштувань і широкий діапазон вживання;
- безпроводне дистанційне керування для роботи у важкодоступних місцях;
- безпроводне дистанційне керування роботою камери під час роботи на небезпечних або важкодоступних об'єктах;
- сумісність із програмними пакетами Reporter та Researcher компанії FLIR.

Камера оснащена USB- і Firewire-роз'ємами. Камеру відрізняє підвищена безпека – високий дозвіл камери дозволяє знаходитися на більшій відстані від об'єкта контролю. Вбудована 3,2-мегапіксельна відеокамера забезпечує отримання чітких і детальних зображень, які можуть бути збережені разом з відповідним інфрачервоними зображеннями.

На великому (5,6'') та яскравому екрані РК-дисплея високого дозволу можуть відтворюватися чіткі зображення. Такий екран може встановлюватися практично під будь-яким кутом, що дозволяє набудувати його під час роботи навіть у найскладніших умовах. Камера має вбудований GPS-приймач для локалізації об'єктів і координатного прив'язування отримуваних ІЧ-зображень. Інформація про географічне місце розташування об'єкта тепловізійного обстеження являє все більший інтерес для багатьох секторів промисловості, у яких використовуються інфрачервоні камери для контролю і технічного обслуговування устаткування. Реалізовані в тепловізорі P660 технології системи глобального позиціонування GPS дозволяють чітко визначати положення контрольованої ділянки й відповідних йому ІЧ-зображень.

Прив'язані до географічних координат ІЧ-зображення можна завантажувати в програмний пакет Reporter з прив'язуванням до наявної топографічної карти або інформаційної системи супутникових зображень (подібної Google Earth), що дозволяє визначати географічне місце розташування об'єктів, зображення з яких були отримані.

Приймач сигналів системи глобального позиціонування GPS, вбудований у тепловізор, дає можливість виконувати технічне обслуговування устаткування систем тепло- й енергопостачання, електрозв'язку, гірничої промисловості, обслуговувати структуру організації виробництва, системи постачання та інших секторів, які повинні мати справу з контролем у межах великих ділянок. Така система дозволяє технічним працівникам просто і швидко переглядати, аналізувати й безпосередньо локалізувати ІЧ-зображення

із безлічі різних об'єктів, що також забезпечує можливість направляти групи контролю і ремонтні бригади на відповідні об'єкти.

Довговічність і надійність тепловізорів тепловізора Р660 гарантує високу ефективність експлуатації під час проведення обстежень як усередині, так і поза приміщеннями в системах тепло- й енергопостачання. Тепловізор має пульт дистанційного керування, що забезпечує віддалене керування усіма функціями приладу за технологією WLAN (дистанція до 200 м).

Тепловізор «FLIR T400» (рис. 7.22 в).

Технічні характеристики тепловізора наведені в табл.7.21.

7.21. Технічні характеристики тепловізора «FLIR T400»

Показник	Значення показника
<p>1. Параметри візуалізації:</p> <ul style="list-style-type: none"> - поле зору/мінімальна фокусна відстань, м - температурна чутливість, °С - частота кадрів, Гц - фокусування - цифрове збільшення - тип детектора 	<p>25° x 18,75°; 15°; 45°</p> <p>0,05 за температури +30 °С 9/30</p> <p>ручне й автоматичне 1–8х безперервне матриця у фокальній площині (FPA), неохолоджуваний мікроболометр 320x240 пікселів від 7,5 до 13</p>
<p>2. Представлення зображення:</p> <ul style="list-style-type: none"> - дисплей - вихідний відеосигнал - відеокамера 	<p>кольоровий РК-дисплей з розміром по діагоналі 3,5” 16000 кольорів з функцією Touch Screen PAL або NTCS композитний відеовихід 1,3 Мп</p>
<p>3. Вимірювання:</p> <ul style="list-style-type: none"> - інтервал температур, °С - точність - повторюваність - режим вимірювання 	<p>від мінус 20 до плюс 350 в двох діапазонах, до плюс 1200 °С ± 2 °С або ±2 % від абсолютної температури ± 1 °С або ± 1 % від абсолютної температури переміщувані точки й ділянки, кольорова сигналізація про температуру вище або нижче заданого значення, максимальна</p>

<ul style="list-style-type: none"> - керування за допомогою меню - уставки, які вводяться - коригування вимірів 	<p>температура діапазону, мінімальна температура діапазону, середня температура діапазону палітри (кольори мінливості, райдуга, чорно-біла, чорно-біла інвертована), автопідстроювання (безперервне, ручне) дата/час доби, одиниця вимірювання температури °C/F, мова, масштаб, інформаційне поле, яскравість світіння РК-дисплея (висока/нормальна/низька) зміна коефіцієнта випромінювання від 0,1 до 1,0, поправка на відбиту температуру навколишнього повітря, вбудована таблиця коефіцієнтів випромінювання</p>
<p>5. Збереження зображення:</p> <ul style="list-style-type: none"> - тип - формат файлів 	<p>SD карта, галерея зображень; радіометричний формат JPEG</p>
<p>6. Лазерний вказівник LocatiRTM:</p> <ul style="list-style-type: none"> - класифікація - тип 	<p>клас 2 напівпровідниковий AlGaInP діодний лазер, 1 мВт/635 нм, червоне світіння</p>
<p>7. Джерело живлення:</p> <ul style="list-style-type: none"> - тип батареї - час роботи - система підзаряджання - робота від мережі змінного струму 	<p>літій-іонна, перезаряджувана, замінювана в умовах експлуатації 3 години безперервної роботи. Дисплей показує стан батареї підзаряджання без виймання із камери; адаптер змінного струму 90–260 Вт, 50/60 Гц або від мережі автомобіля напругою 12 В адаптер змінного струму потужністю 90–260 Вт, на виході напруга 12 В постійного струму</p>
<ul style="list-style-type: none"> - енергозбереження 	<p>автоматичне вимкнення і перехід у режим очікування (вибирається користувачем)</p>
<p>8. Вимоги до умов навколишнього середовища:</p> <ul style="list-style-type: none"> - інтервал робочих температур, °C - інтервал температури зберігання, °C - вологість, % 	<p>від мінус 15 до плюс 50 від мінус 40 до плюс 70 робота й збереження від 20 до 80, без конденсації вологи</p>

- ступінь захисту від впливу навколишнього середовища	IP 54
- ударне навантаження	25g
- вібрація	2g
9. Фізичні характеристики:	
- маса, кг	менше 0,88, включаючи батарею та об'єktiv
- габаритні розміри, мм	106 x 201 x 125
10 Інтерфейси	USB, mini USB – передавання зображень на персональний комп'ютер; стандартний композитний відеовихід – CVDC (ITU-R-BT, 470 PAL/SMPTE 170 M NTSC); ГЧ-порт – передавання зображень на персональний комп'ютер; FireWear – передавання цифрового відео в реальному часі

Тепловізор «Fluke Ti20» (США) – вдале поєднання можливостей, зручності й компактності пірометра з функціональними ресурсами ІЧ-камери. В основі детектора тепловізора – неохолоджуваний мікроболометр, основним компонентом якого є дуже тонка пластинка з провідного матеріалу, зачорнена для кращого поглинання енергії. За малої товщини пластинка під дією опромінення швидко нагрівається і її електричний опір підвищується. Для вимірювання малих відхилень опору пластинки її включають у мостову схему, яку під час калібрування балансують у відсутності засвічення.

Тепловізор «FlukeTi20» (рис. 7.23 а) миттєво показує «гарячі» й «холодні» точки об'єкта у формі тепловізійного зображення з використанням колірної градації в заданому діапазоні температур. У тепловізорі застосована висококонтрастна кольорова графічна матриця (128 x 96), що гарантує вимірювання в діапазоні від -10 до +350 °С, достовірне й чітке відображення на дисплеї температурної градації в зоні сканування об'єкта. Основні технічні характеристики приладу наведені в табл. 7.21.



a)



б)



в)

Рис. 7.22. Тепловізори виробництва компанії FLIR Systems: а) FLIR i5; б) FLIR P660; в) FLIR T400

7.21. Технічні характеристики тепловізора FlukeTi20

Показник	Значення показника
Діапазон вимірювань температури, °С	від мінус 10 до плюс 350
Поріг температурної чутливості, °С	0,2
Похибка вимірювання температури	±2° С, але не менше ±2 %
Оптичне поле зору, по горизонталі x по вертикалі	20° x 15°
Спектральний діапазон, мкм	7–14
Частота розгортки зображення, Гц	9
Система наведення/вказівки	Лазер клас 2
Фокусування	Ручне, мінімальна відстань 61 мм
Регульована випромінювальна здатність	від 0,10 до 1,00 (з кроком 0,01)
Умови експлуатації: - температура навколишнього середовища, °С - відносна вологість, %	від 0 до +50 від 10 до 95 без конденсації вологи
Умови зберігання: - температура навколишнього середовища, °С - відносна вологість, %	від мінус 25 до плюс 70 від 10 до 95 без конденсації вологи
Маса (разом з батареями), кг	не більше 1,2
Габаритні розміри, мм	178x102x254

Функції відображення тепловізора:

- 10 палітр;
- відображення максимальної і мінімальної температури.

Дисплей – 2,5” РК кольоровий дисплей.

Додаткові функції:

- регулювання яскравості РК-дисплея;
- компенсація температури фону, що настроюється.

Передача даних – USB порт. Пристрій пам’яті – вбудована флеш-пам’ять на 100 зображень.

Захист від зовнішніх дій – IP54 (волого й пилозахищене виконання). Джерело живлення – акумулятор (Li-ion) або 6 батарей АА. Час автономної роботи від батарей – до 3 годин.

Функціональність тепловізора FlukeTi20 очевидна в таких особливостях:

- візуальний температурний аналіз об’єктів і поряд розташованого устаткування на фоні довкілля;
- висока чутливість – для стійкого роздільного відображення ділянок з невеликою температурною різницею;

- робота однією рукою (наведення на ціль і натиснення курка);
- великий кольоровий РК-дисплей, довідкові підказки під час термосканування об'єктів;
- живлення від акумуляторів (до трьох годин безперервної роботи);
- аналіз даних і збережених зображень (ПО INSIDEIR);
- введення позначень для можливості прив'язки й маршрутизації збережених результатів за увесь шлях обстеження;
- режим звукової сигналізації для виявлення температури вище й нижче граничних значень, встановлених користувачем.

Простий у користуванні тепловізор FlukeTi20 дозволяє за допомогою інтуїтивно зрозумілих інструкцій на екрані працювати за принципом «наведи і знімай». Для виконання вимірювань необхідно навести і сфокусувати прилад на об'єкт, при цьому здійснюється автоматичне вирівнювання діапазону температур для створення чіткого зображення. Під час натиснення на курок поточна картинка з додатковою екранною інформацією про режим та умови зйомки зберігається в пам'яті (внутрішня пам'ять приладу – 50 екранів (термограм)).

Оскільки тепловізор Fluke Ti20 розроблений передусім для промислового застосування, він надає широкі можливості персоналу з обслуговування і ремонту виробничого й електроенергетичного устаткування для виявлення небезпечного нагріву приводів (рис. 7.24) підшипників, контакторів, трансформаторів, «підгораючи» контактів, клем і наконечників фідерів. Таким чином, візуально виявляється і документується передаварійний стан електричних кіл, блоків, рухомих або навантажених тертям деталей.

Головними перевагами тепловізора FlukeTi20 є швидка локалізація джерел потенційних проблем, прискорення обстежень, максимальна безпека під час експлуатаційного контролю електроустановок, превентивне виявлення відхилень і проблем для запобігання збоєм у робочих циклах устаткування, прогнозне температурне діагностування.

Тепловізор «Fluke Ti32» (рис. 7.23 б) створений для професіоналів і може використовуватися практично для будь-яких цілей: від пошуку конкретних несправностей до виявлення під час планового технічного обслуговування потенційного виходу деталей із ладу. Завдяки високій якості зображення, додатковим об'єктивом, швидкозмінним акумуляторним батареям, інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу управління і підвищеній міцності цей тепловізор є

ідеальним інструментом для інженерів, робота яких вимагає високої мобільності. Основні технічні характеристики приладу наведені в табл. 7.22.

7.22. Технічні характеристики тепловізора «FlukeTi32»

Показник	Значення показника
1. Діапазон вимірювань температури, °С	від мінус 20 до плюс 600
2. Поріг температурної чутливості, °С	менше 0,05 °С за температури 30 °С
3. Похибка вимірювання температури	±2°С, але не менше ±2%
4. Оптичне поле зору, по горизонталі x по вертикалі	23° x 17°
5. Спектральний діапазон, мкм	8–14
6. Частота розгортки зображення, Гц	9
7. Система наведення/вказівки	Лазер клас 2
8. Мінімальна дистанція фокусування, см	15
9. Регульована випромінювальна здатність	від 0,10 до 1,00 (з кроком 0,01)
10. Умови експлуатації: - температура навколишнього середовища, °С - відносна вологість, %	від 0 до +50 від 10 до 95 без конденсації вологи
11. Умови зберігання: - температура навколишнього середовища, °С - відносна вологість, %	від -25 до +70 від 10 до 95, без конденсації вологи
12. Маса (разом з батареями), кг	не більше 1,05
13. Габаритні розміри, мм	277 x 122 x 170

Режими вимірювань тепловізора – точковий по центру й по гарячим та холодним маркерам. Розмір матриці тепловізора – матриця у фокальній площині 320x240, неохолоджуваний мікроболометр. Робочі режими камери – повний кадр у кадрі, повне інфрачервоне зображення і режим змішування. Камера видимого діапазону (відео) – 1680x1200 пікселів, повнокольорова. Шкали-палітри: кольори нагріву заліза, синьо-червона, високого контрасту, жовта, кольори нагріву металу, сіра. Цифровий дисплей – кольоровий ландшафтний РК-дисплей VGA (640x480) розміром 9,1 см (3,6’’). Зберігання даних – карта пам’яті SD об’ємом 2 ГБ (3000 ІЧ-зображень у форматі .bmp або 1 200 зображень IR-Fusion у форматі .IS2). Підтримувані формати файлів – JPEG, BMP, GIF, PNG, TIFF, WMF EXIF and EMF. Екранні індикатори – стан акумулятора, годинник і середня температура, індикація діапазону й періоду. Сигналізація за максимальним і мінімальним рівнями температури. Запис голосових коментарів. Більше 4 годин безперервної роботи від одного акумулятора. Програмне забезпечення – професійне програмне забезпечення

надається без додаткової оплати. Метрологічна атестація – свідоцтво про метрологічну атестацію УКРЦСМ надається за додаткову оплату.

«Fluke Ti32» – перший тепловізор з матрицею (сенсором) 320x240, що надає чіткі, деталізовані картинки. *Задіюючи запатентовану компанією технологію інфрачервоного синтезу (IR-Fusion), користувачі дістають можливість повністю об'єднати на екрані високопрецизійні теплові зображення з візуальними (видимими на світлі) картинками, при цьому використовувати режими «картинка в картинці», змішувати між собою зображення під час виявлення складних проблем з їх подальшим аналізом.*

Тепловізор «Fluke Ti32» надає можливість встановити деяку дистанцію між техніком та об'єктом вимірювань (рис. 7.25). Кожен прилад поставляється з двома замінюваними батареями з можливістю режиму перезаряджання, що дозволяє безперервно використовувати в роботі отримані зображення. Опціонально можливий режим телефото й набір ширококутних лінз для того, щоб переформатувати в гострий фокус відстані й широкий огляд. Пристрій тестувався на предмет стійкості під час падіння з висоти 2 м, має класифікацію IP54 за ступенем захисту від дії води й пилу.

Програмне забезпечення Fluke SmartView (за режимів безкоштовних модернізацій впродовж всього терміну експлуатації приладу) включене в кожен тепловізор. SmartView є комплектом модульного програмного інструментарію для спостережень, анотацій, редагування та аналізу інфрачервоних зображень, яке повністю підтримує технологію інфрачервоного синтезу (IR Fusion). Це програмне забезпечення дає користувачам можливість редагувати зображення в п'яти режимах перегляду.

Тепловізори «FLUKE Ti40», «Ti45», «Ti50», «Ti55» серії IR FlexCam (рис. 7.23 в, г). Мають буквально всі можливості, потрібні для виконання термографічних досліджень. З детектором розмірами 160x120 пікселів та еквівалентною шумовою тепловою чутливістю (NETD) 0,08 °C вони забезпечують високий дозвіл зображень і дозволяють виявити дуже малі відмінності за температурою. Простота у використанні приладів і широкі можливості аналізу отриманих зображень у польових умовах забезпечуються структурою меню на основі Windows® CE.

У тепловізорах FT застосована нова технологія IR-Fusion™, яка дозволяє отримати видиме зображення одночасно з ІЧ-зображенням, що полегшує завдання ідентифікації та аналізу інфрачервоних образів. Вона дозволяє легко виділити компоненти з

можливими несправностями й безпомилково визначити ділянки, що потребують ремонту в першу чергу.

Сфери застосування тепловізорів:

- профілактичне техобслуговування – виявлення потенційних проблем механічних та електричних вузлів устаткування до того, як вони стануть причиною відмови;

- техобслуговування промислового устаткування – перевірка ефективності ремонту й усунення несправностей;

- контроль якості – вивчення прототипів нових виробів для удосконалення теплових режимів;

- контроль за технологічними процесами – спостереження в режимі реального часу для забезпечення ефективної і безпечної роботи устаткування.

Технологія IR-Fusion™ (застосована в моделях FT) пов'язує звичайне видиме зображення з тепловим зображенням об'єкта. Вона дозволяє злити воедино два зображення і створити різні комбінації в режимі «Кадр в кадрі». Можна набудувати граничні рівні сигналу, щоб точно виділити на зображенні тепловізора компоненти устаткування, температура яких виходить за встановлені межі. Як видимі, так і інфрачервоні зображення можна включити до звітів з тепловізійного обстеження. Це в багато разів прискорює процес складання звітної документації, оскільки не вимагає використання окремої цифрової камери. Технологія IR Fusion дозволяє легко виділити компоненти з можливими несправностями й безпомилково визначити ділянки, що потребують ремонту в першу чергу.

Завдяки застосуванню великих дисплеїв тепловізора (п'ять дюймів по діагоналі) і малошумливих датчиків VOx, тепловізори Fluke IR FlexCam дозволяють отримати дуже високоякісні зображення і дають змогу виявити малі відмінності за температурою.

Новий складений об'єктив тепловізора з кутом повороту 180° забезпечує виконання зйомок у важкодоступних місцях. Дисплей залишається у полі зору оператора під час спостереження устаткування зверху, знизу або в обхід нерухомих перешкод. Функція SmartFocus з одним регулювальником спрощує фокусування зображення тепловізора. При цьому не потрібно прибирати руку з тепловізора, щоб обернути кільце об'єктива.

Завдяки таким вбудованим функціям, як AutoCapture, тепловізори IR FlexCam дозволяють виявити й усунути несправності, які надзвичайно важко виявити іншими засобами. Прилад легко налаштовується на автоматичну зйомку ділянок, температура яких виходить за встановлені межі. Завдяки цьому прискорюється зйомка й

аналіз нерегулярностей, оскільки можна концентруватися лише на зображеннях тепловізора, що містять аномалії.



а)



б)



в)



г)

Рис. 7.23. Тепловізори Fluke: а) Fluke Ti20; б) Fluke Ti32; в) FLUKE Ti40,Ti45; г) Fluke Ti50FT-10/20

Стандартний набір містить усі функції аналізу й складання звітів. Програмне забезпечення тепловізора SmartView™ (входить у комплект постачання) містить повний набір функцій для перегляду й аналізу ІЧ-зображень, а також для їх анотації та складання звітів.

Можливе складання звітів з призначеними для користувача налаштуваннями з включенням прийнятих у компанії технічних процесів, множинних зображень і результатів їх порівняльного аналізу. У повному радіометричному режимі тепловізори дозволяють отримати й зберегти значення температури, що калібрується, для матриці з тисяч точок, які складають теплове зображення. Це дозволяє виконати детальний аналіз отриманих зображень тепловізора шляхом налаштування ключових параметрів, наприклад, коефіцієнта випромінювання або температурного діапазону, як у польових умовах прямо на камері, так і в офісі за допомогою комп'ютерної програми.

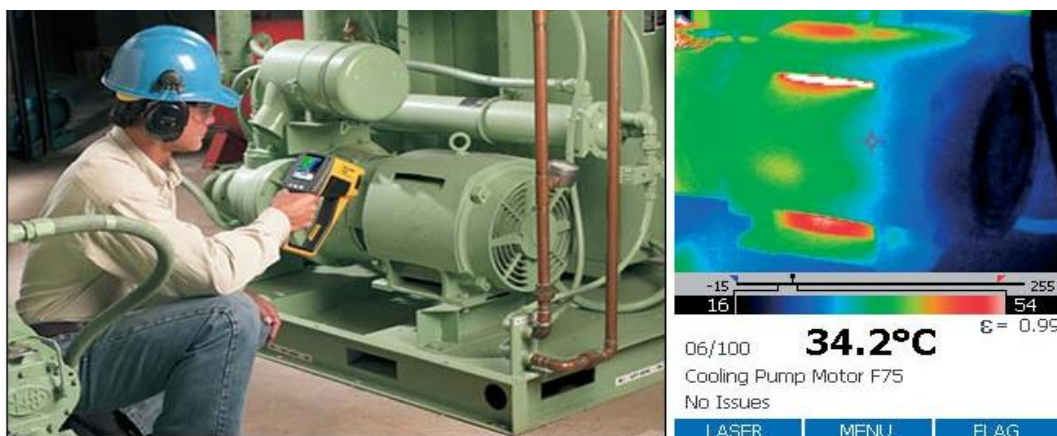


Рис. 7.24. Оцінювання температурного режиму виробничого устаткування за допомогою тепловізора «FlukeTi20»



Рис. 7.25. Вимірювання тепловізором «Fluke Ti32» з деякої відстані

Порівняльні характеристики тепловізорів серії Ti 40/45 та серії Ti 50/55 наведено в табл. 7.23 і 7.24.

7.23. Порівняльні характеристики тепловізорів серії Ti 40/45

Порівняння тепловізорів серії Ti 40/45	Ti45FT	Ti45	Ti40FT	Ti40
Малошумні детектори VOx для отримання високоякісних зображень із високим дозволом	160 x 120			
Широкий діапазон температур для обстеження промислового устаткування	від мінус 20 до плюс 600 °C		від мінус 20 до плюс 350 °C	
Варіант для обстеження об'єктів з високою температурою	плюс 1200 °C			
Висока теплова чутливість, що дозволяє виявити малі різниці температур	≤0,08 °C		≤0,09 °C	
Гнучкий складений об'єктив з кутом повороту 180 ° (забезпечує отримання зображень у будь-якій ситуації)	•	•	•	•
Набір із 3-х змінних об'єктивів для широкого діапазону застосувань	•	•	•	•
Великий 5-дюймовий високо-контрастний кольоровий РК-дисплей (дозволяє отримати чіткі зображення незалежно від умов освітлення)	•	•	•	•
Виконання радіометричних вимірів у всьому діапазоні для аналізу й відстеження змін температури	•	•	•	•
Функція SmartFocus для отримання високоякісних зображень і виконання точних вимірювань температури	•	•	•	•
Простота використання завдяки структурі меню на основі Windows® CE	•	•	•	•
Можливість індивідуального налаштування для вживання в різноманітних областях	•	•	•	•
Можливість використання карт пам'яті CompactFlash для зберігання більше 1000 ІЧ-зображень разом із даними радіометричних вимірювань	•	•	•	•
Програмне забезпечення SmartView для аналізу й складання звітів	•	•	•	•
Режим AutoCapture для виявлення аномалій у температурному режимі досліджуваного устаткування	•	•		
Вбудовані в камеру функції аналізу зображень	•	•		

Продовження таблиці 7.23

Можливість включення користувачем анотацій для спрощення складання звітів	•	•		
Вбудована цифрова камера для отримання знімків у видимому світлі	•		•	
Функція IR-Fusion, що дозволяє отримати злиті зображення в інфрачервоному й видимому діапазонах і виділити проблемні компоненти	•		Режим «Кадр в кадрі»	
Можливість задавання меж сигналу в режимі ІЧ/відео зйомки	•			
Лазерний вказівник для точного наведення на об'єкт	•		•	
Фотоспалах і ліхтар для отримання високоякісних зображень в умовах слабого освітлення	•		•	

7.24. Порівняльні характеристики тепловізорів серії Ti 50/55

Порівняння тепловізорів серії Ti 50/55	Ti55FT	Ti55	Ti50FT	Ti50
Малощумні детектори VOx для отримання високоякісних зображень із високим дозволом	320 x 240			
Широкий діапазон температур для обстеження промислового устаткування	від мінус 20 до плюс 600 °C		від мінус 20 до плюс 350 °C	
Висока теплова чутливість, що дозволяє виявити малі різниці температур	≤0,05 °C		≤0,07 °C	
Гнучкий складений об'єктив з кутом повороту 180° (забезпечує здобуття зображень у будь-якій ситуації)	•	•	•	•
Набір із 3-х змінних об'єктивів для широкого діапазону застосувань	•	•	•	•
Великий 5-дюймовий високо-контрастний кольоровий РК-дисплей (дозволяє отримати чіткі зображення незалежно від умов освітлення)	•	•	•	•
Виконання радіометричних вимірів у всьому діапазоні для аналізу й відстеження змін температури	•	•	•	•
Функція SmartFocus для отримання високоякісних зображень і виконання точних вимірів температури	•	•	•	•
Простота використання завдяки структурі меню на основі Windows® CE	•	•	•	•

Продовження таблиці 7.24

Можливість індивідуального налаштування для застосування в різноманітних областях	•	•	•	•
Програмне забезпечення SmartView для аналізу й складання звітів	•	•	•	•
Можливість використання карт пам'яті CompactFlash для зберігання більше 1000 ІЧ-зображень разом із даними радіометричних вимірювань	•	•	•	•
Режим AutoCapture для виявлення аномалій у температурному режимі досліджуваного устаткування	•	•		
Вбудовані в камеру функції аналізу зображень	•	•		
Можливість включення користувачем анотацій для спрощення складання звітів	•	•		
Вбудована цифрова камера для отримання знімків у видимому світлі	•		•	
Функція IR-Fusion, що дозволяє отримати злиті зображення в інфрачервоному й видимому діапазонах і виділити проблемні компоненти	•		•	
Можливість задавання меж сигналу в режимі ІЧ/відео зйомки	•			
Лазерний вказівник для точного наведення на об'єкт	•		•	
Спалах і ліхтар для отримання високоякісних зображень в умовах слабого освітлення	•		•	

Поле зору (FOV) – 23° по горизонталі й 17° по вертикалі. Мінімальна дистанція фокусування – 15 см. Теплова чутливість (NETD) – менше 0,05 °С за температури +30 °С. Режими вимірювань – точковий по центру й по гарячих та холодних маркерах. Розмір матриці – матриця у фокальній площині 320x240, неохолоджуваний мікроболометр. Спектральний діапазон – 8–14 мкм. Робочі режими камери – повний кадр у кадрі, повне ІЧ-зображення і режим змішування. Камера видимого діапазону (відео) – 1680x1200 пікселів, повнокольорова. Шкали-палітри: кольори нагріву заліза, синьо-червона, високого контрасту, жовта, кольори нагріву металу, сіра. Цифровий дисплей – кольоровий ландшафтний РК-дисплей VGA (640x480) розміром 9,1 см (3,6").

Зберігання даних – карта пам'яті SD об'ємом 2 ГБ (3000 ІЧ-зображень у форматі .bmp або 1 200 зображень IR-Fusion у

форматі .IS2). Підтримувані формати файлів – JPEG, BMP, GIF, PNG, TIFF, WMF EXIF and EMF. Екранні індикатори – стан акумулятора, годинник і середня температура, індикація діапазону й періоду. Сигналізація за максимальним і мінімальним рівнями температури. Запис голосових коментарів. Більше 4 годин безперервної роботи від одного акумулятора. Водостійке й пилонепроникне виконання – IP54. Маса, кг – 1,05. Габарити, мм – 277 x122 x170.

Тепловізор «IRISYS 1011» (рис. 7.26 а) – технічно прогресивний портативний тепловізор, що має ряд переваг у застосуванні в різноманітних технологіях.

Типовими сферами застосування приладу є:

- планово-запобіжне обслуговування устаткування, зокрема енергетичного;
- контроль технологічних процесів;
- науково-дослідні й конструкторські роботи;
- визначення несправностей у системах опалення, вентиляції та кондиціонування;
- обслуговування автомобілів.

Тепловізор ергономічної конструкції містить оптичну систему, детектор, електронний блок, оптичний модулятор, лазерний покажчик і чотири стандартні батареї або акумулятори розміру AA.

Прилад має рукоятку пістолетного типу, на якій може кріпитися будь-який портативний комп'ютер або сумісний пристрій Palm, який працює як процесор, дисплейний блок і блок для зберігання зображення. Вихід з тепловізора може оброблятися в режимі реального часу на персональному комп'ютері.

Тепловізор розроблений для роботи однією або двома руками. Для роботи однією рукою камеру й призначений для користувача портативний комп'ютер закріплюють на рукоятці для утворення єдиного блока невеликої маси. Для роботи двома руками камеру від'єднують від рукоятки, а портативний комп'ютер залишають на рукоятці. Останню конфігурацію використовують для роботи у важкодоступних місцях. Тепловізор можна підключити до персонального комп'ютера або ноутбука за допомогою послідовного кабелю RS232.

Технічні характеристики тепловізора наведені в табл.7.25.

7.25. Технічні характеристики тепловізора «IRISYS 1011»

Показник	Значення показника
Стандартний температурний діапазон вимірювань, °С	Ввід мінус 30 до плюс 300
Точність	- ± 2 °С або ± 2 %;
Спектральна чутливість, мкм	від 8 до 14
Поріг температурної чутливості, °С	0,3
Оптичне поле зору по горизонталі x по вертикалі	20° x 20° (стандарт) і 10° x 10° (опція);
Система наведення/вказівки	лазер класу 2
Фокусування	регулювання немає. Мінімальний діаметр вимірюваної плями 1мм на відстані 50 см
Зчитування температури	усі пікселі двома рухомими курсорами
Дисплей	екран додаткового портативного комп'ютера (КПК)
Зображення, що відображується	до 96x96 пікселів
Функції відображення	3 палітри; до 10-ти вимірюваних точок; автоматичний пошук максимальної температури; функції звукової сигналізації; температурний графік
Об'єднання кадрів	до 10 кадрів
Частота кадрів, Гц	8
Пристрій пам'яті	картка пам'яті КПК або на комп'ютері (об'єм термограм обмежений пам'яттю КПК)
Інтерфейс для передавання даних	RS 232
Джерело живлення	4 батареї, акумуляторів AA або від мережевого адаптера. Час автономної роботи від батарей – 8 годин
Маса, кг	не більше 0,7.
Габаритні розміри, мм	120x125x80

Детектор тепловізора – піроелектричний приймач матриця – 16x16.

Регульована випромінювальна здатність об'єкта контролю – від 0,01 до 1,00 (з кроком 0,01).

Умови експлуатації:

– температура навколишнього середовища, °С – від мінус 5 до плюс 50;

– відносна вологість, % – від 10 до 100 (без конденсації).

Умови зберігання:

– діапазон температур навколишнього середовища, °С – від мінус 20 до плюс 80;

– відносна вологість, % – від 10 до 100 (без конденсації).

Поставляється як опція портативний комп'ютер серії HP iPAQ. Якщо використовується IBM сумісний комп'ютер, потрібні такі мінімальні характеристики: 32Mb RAM; 300 МГц процесор; MS Windows 95 і 98, NT, 2000, XP; RS232 послідовний порт; кольорова графіка.

Тепловізор «IRISYS серії IRI 4010» (рис. 7.26 б) поєднує в собі новітні технології, легкість у користуванні й доступність за ціною. Тепловізор IRI 4010 кращий у своєму класі за співвідношенням ціна/якість.

Технічні характеристики тепловізора наведені в табл. 7.26.

7.26. Технічні характеристики тепловізора «IRISYS 4010»

Показник	Значення показника
Стандартний температурний діапазон вимірювань, °С	Ввід мінус 10 до плюс 250
Похибка вимірювання температури	– ± 2 °С, але не менше ± 2 %
Спектральна чутливість, мкм	від 8 до 14
Поріг температурної чутливості, °С	0,15
Оптичне поле зору по горизонталі x по вертикалі	20° x 15°
Система наведення/вказівки	лазер класу 2
Фокусування	ручне, мінімальна відстань 30 мм
Зчитування температури	усі пікселі двома рухомими курсорами
Детектор тепловізора	неохолоджувана мікроболометрична матриця 160x120 елементів
Додаткові функції	2-х кратний оптичний ZOOM
Регульована випромінювальна здатність об'єкта контролю	від 0,20 до 1,00 (з кроком 0,01)
Дисплей	3,5" РК кольоровий дисплей
Зображення, що відображується	до 96x96 пікселів
Функції відображення	4 палітри; дві варійовані вимірювальні точки; автоматичний пошук максимальної і мінімальної температур; різниця температур між двома точками
Частота кадрів, Гц	9
Пристрій пам'яті	змінна карта пам'яті SD/MMC до 1000 термограм
Інтерфейс для передавання даних	USB

Продовження таблиці 7.26

Джерело живлення	акумулятор (Li-ion) або через адаптер від мережі 220В, 50 Гц Час автономної роботи від батарей – 4 години
Маса, кг	не більше 0,75
Габаритні розміри, мм	110x120x230



а)



б)

**Рис. 7.26. Тепловізійні камери IRISYS 1011 (а)
та IRISYS 4010 (б)**

Умови експлуатації:

- температура навколишнього середовища, °С – від мінус 15 до плюс 45;
- відносна вологість, % – від 10 до 100 (без конденсації вологи).

Умови зберігання:

- діапазон температур навколишнього середовища, °С – від мінус 20 до плюс 70;
- відносна вологість, % – від 10 до 100 (без конденсації).

Тепловізор «Land Guide M4» (Land Instruments International (Великобританія)) (рис. 7.27 а) – найменший і найлегший серед тепловізорів, представлених у світі. Компактний дизайн разом з передовими технологіями, велика місткість пам'яті, LCD дисплей, звуковий сигнал, вихід USB. Технічні характеристики тепловізора наведені в табл. 7.27.

7.27. Технічні характеристики тепловізора «Land Guide M4»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірювання температури, °С	від мінус 20 до плюс 250
Температурний дозвіл, °С	менше 0,12 за температури +30 °С
Похибка вимірювання температури	±2 °С або ±2% від вимірюваної величини
Спектральний діапазон, мкм	8–14
Оптичне поле зору	стандартне 25°x19°
Частота кадрів, Гц	60
Лазерний цілевказівник	напівпровідниковий, клас 2
Коригування впливу навколишньої температури	забезпечене автоматично
Коригування випромінювальної здатності	від 0,10 до 0,99 (з кроком 0,01)
Коригування на зовнішню оптику	автоматичне, на основі інформації від внутрішніх датчиків
Коригування на пропускання атмосфери	Забезпечене автоматично
Захист від зовнішніх дій	IP54
Захист від удару/вібрації	25 G/ більше 2,5 G
Температура зберігання/роботи, °С	від мінус 10 до плюс 50 / від мінус 20 до плюс 60
Маса, кг	0,265 з акумулятором
Габаритні розміри, мм	120 x 60 x 30

Тип детектора, застосованого в теплові зорі, – неохолоджувана мікроболометрична матриця 160x120 елементів.

Дисплей – стандартний 2,2” РК кольоровий дисплей з активною матрицею.

Тепловізор має вбудовану кольорову цифрову відеокамеру (640x480 пікселів).

Функції аналізу, що реалізуються приладом:

- одна вимірювана рухома точка;
- функції звукової сигналізації;
- автоматичний пошук максимальної температури;
- ізотерма;
- один діапазон із відображенням максимальної, мінімальної і середньої температури;
- цифрове 2-х кратне збільшення(ZOOM);
- температурний профіль.

Прилад здатен проводити запис термограм на внутрішню пам'ять 1 Гб з можливістю запису відеозображення і голосової анотації термограм до 5 хвилин на кадр.

Є внутрішня флеш-пам'ять на 100 термограм з можливістю запису голосової анотації термограм до 30 с на кадр.

Інтерфейс приладу – відеовихід (PAL, NTSC), USB для зв'язку з комп'ютером.

Джерело живлення – стандартні акумулятори (Li-ion) і мережевий адаптер. Час роботи від одного акумулятора – більше 2 годин. Споживана потужність – менше 3 Вт.

Тепловізор «*Land Guide M3*» (Land Instruments International (Великобританія)) (рис. 7.27 б) – полегшена версія багатофункціонального й наймініатюрнішого у світі тепловізора LAND GUIDE M4.

Відмінності тепловізора M3 від M4:

- відсутня камера для зйомки у видимому діапазоні;
- вбудована пам'ять на 100 зображень(у M4 – 600);
- одна вимірювальна нерухома точка (4 вимірних точки у M4);
- частота розгортки зображення на вибір – 8.5 Гц (не вимагає ліцензії) і 60 Гц.

Технічні характеристики тепловізора наведені в табл. 7.28.

Тип детектора, застосованого в тепловізорі – неохолоджувана мікроболометрична матриця 160x120 елементів. Дисплей – стандартний 2,2” РК кольоровий дисплей з активною матрицею.

Функції аналізу, що реалізуються приладом:

- 1 вимірювальна рухома крапка;

- функції звукової сигналізації;
- автоматичний пошук максимальної температури;
- ізотерма;
- 1 діапазон із відображенням максимальної, мінімальної і середньої температури;
- цифрове 2-х кратне збільшення;
- температурний профіль.

7.28. Технічні характеристики тепловізора «Land Guide M3»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірювання температури, °С	Від мінус 20 до плюс 250
Температурний дозвіл, °С	менше 0,12 за температури +30 °С
Похибка вимірювання температури	± 2 °С або ± 2 % від вимірюваної величини
Спектральний діапазон, мкм	8–14
Оптичне поле зору	стандартне 25°x19°
Частота кадрів, Гц	8,5 або 60
Лазерний цілевказівник	напівпровідниковий, клас 2
Коригування впливу навколишньої температури	забезпечене автоматично
Коригування випромінювальної здатності	від 0,10 до 0,99 (з кроком 0,01)
Коригування на зовнішню оптику	автоматичне, на основі інформації від внутрішніх датчиків
Коригування на пропускання атмосфери	забезпечене автоматично
Захист від зовнішніх дій	IP54
Захист від удару/вібрації	25G/ більше 2,5 G
Температура зберігання/роботи, °С	від мінус 10 до плюс 50 / від мінус 20 до плюс 60
Маса, кг	0,265 з акумулятором
Габаритні розміри, мм	120 x 60 x 30

Прилад здатен проводити запис термограмм. Внутрішня флеш пам'ять на 100 термограм з можливістю запису голосової анотації термограм до 30 с на кадр. Інтерфейс приладу – відеовихід (PAL, NTSC), USB для зв'язку з комп'ютером. Джерело живлення – стандартні акумулятори (Li-ion) і мережевий адаптер. Час роботи від одного акумулятора – більше 2 годин. Споживана потужність – менше 3 Вт.

Тепловізор «LAND ThermoPro TP8» (рис. 7.27 в) – один з кращих за технічними й експлуатаційними характеристиками тепловізор. Зв'язок з комп'ютером у реальному часі, можливість збереження як звичайного відео, так і інфрачервоного зображення (тільки на ПК),

сенсорний дисплей і запис голосових коментарів через Bluetooth гарнітуру, ставлять цю тепловізійну камеру поза конкуренцією.

Користувач одночасно отримує інфрачервоне й звичайне зображення об'єкта. При цьому пристрій записує динамічну радіометричну послідовність рухомих цілей у режимі реального часу. Місткість зберігання складає до 1 тис. зображень за місткості пам'яті до 2 Гбайт. Чутливість приладу коливається в діапазоні від -20 до +800 °С. Крім того, тепловізор автоматично визначає найгарячішу точку об'єкта, а вибрані установки можна зберегти й застосувати за необхідності. Протягом кількох хвилин можна створити звіт, скориставшись зручним інтерфейсом Microsoft Word, на основі шаблонів або в ручному режимі. Крім того, користувач може включити до звіту інфрачервоні або кольорові зображення, деталі вимірів та іншу необхідну інформацію.

Модель TP8 використовує для інфрачервоних зображень дозвіл 384x288, а для кольорових – 1280x1024. Операторові достатньо навести пристрій на досліджуваний об'єкт і натиснути кнопку. Обидва типи зображення будуть збережені в одному файлі з текстовою анотацією або голосовим супроводом тривалістю до 30 с. Лазерний покажчик допоможе співставити точку нагріву, показану на інфрачервоному зображенні, з реальним об'єктом.

Прилад може аналізувати до 8 областей одночасно, а також збільшувати й зберігати їх із зазначенням відносного мінімуму/максимуму або середньою величиною температур для кожної окремої досліджуваної ділянки. Крім того, пристрій також підтримує виведення гістограми розподілу й кривої постійної температури. Вбудована пам'ять дозволяє зберігати до 450 зображень, а додаткова SD-карта понад 1000. Технічні характеристики тепловізора наведені в табл. 7.29.

Тип детектора, застосовувана в тепловізорі неохолоджувана мікроболометрична матриця 384x288 елементів. Кольорова цифрова відеокамера 1280x1024 елементів; 10-ти кратний цифровий ZOOM (плавний).

7.29. Технічні характеристики тепловізора «LAND ThermoPro TP8»

Показник	Значення показника
Діапазон вимірювання температури, °С	від мінус 20 до плюс 800
Температурний дозвіл, °С	менше 0,08 за температури +30 °С
Похибка вимірювання температури	± 1 °С або ± 1 % від вимірюваної величини
Спектральний діапазон, мкм	8–14

Продовження таблиці 7.29

Оптичне поле зору	стандартне 22°x16° (опціонально телеоб'єктив 7,7°x5,8°, ширококутовий об'єктив 45,6°x35°)
Частота кадрів, Гц	60
Лазерний цілевказівник	напівпровідниковий, клас 2
Коригування впливу навколишньої температури	забезпечене автоматично
Коригування випромінювальної здатності	від 0,10 до 0,99 (з кроком 0,01)
Коригування на зовнішню оптику	автоматичне, на основі інформації від внутрішніх датчиків
Коригування на пропускання атмосфери	забезпечене автоматично
Захист від зовнішніх дій	IP54
Захист від удару/вібрації	30G/ 3G
Температура зберігання/роботи, °C	від мінус 20 до плюс 50 / від мінус 20 до плюс 60
Маса, кг	0,85 з акумулятором
16. Габаритні розміри, мм	186 x 106 x 83

Функції відображення тепловізора:

- 5 палітр;
- до 8 вимірювальних точок;
- автоматичний пошук максимальної температури;
- відображення максимальної і мінімальної температури;
- різниця температур;
- ізотерма;
- 4 області з відображенням максимальної, мінімальної і середньої температури;
- функція сигналізації;
- збереження термографічного й стандартного відео;
- функція поєднання термограми й фотознімка;
- корекція випромінювальної здатності – від 0,10 до 1,00 (з кроком 0,01).

Фокусування тепловізора – автоматичне або ручне. Дисплей – 3,5” РК-дисплей з активною матрицею.

Інтерфейси приладу для передавання даних:

- відеовихід (PAL, NTSC);
- відеовихід VGA;
- інтерфейс USB 2,0 – для передавання даних у реальному часі на комп'ютер і керування тепловізором + протокол обміну;

– інтерфейс RS232 – для керування камерою з комп'ютера.



**Рис. 7.27. Тепловізори фірми Land Instruments International:
а) Land Guide M4; б) Land Guide M3; в) LAND ThermoPro TP8**

Передбачений запис термограм на компакт-диск флеш-карти з можливістю запису голосової анотації термограм і відеозображення (опціонально). Пристрій пам'яті – змінна карта пам'яті SD (2Gb) + вбудована.

7.3.5. Нормативні засади тепловізійного контролю технічного стану електрообладнання

Практична термографія електроустаткування в колишньому СРСР вперше почала застосовуватися в Україні, у ЦНДЕЛ ВЕО «Донбасенерго», після встановлення в цьому об'єднанні в 1976 році

кількох вітчизняних тепловізорів серії ИФ (ИФ–14ТВ та ИФ–20ТВ), «Електрон» (КТА–1), американського тепловізора «Проубай», а потім і шведського тепловізійного комплексу «АГА–782». За період з 1982 до 1988 рік у ВЕО «Донбасенерго» було обстежено понад 500 розподільних пристроїв різного класу напруги (54300 одиниць електроустаткування), 256 повітряних ліній електропередавання протяжністю 13169 км (з них 194 з вертольота), виявлено 756 одиниць дефектного електроустаткування, 2538 дефектних контактних з'єднань (з них 247 – на повітряних лініях електропередавання) [4].

Це були найперші кроки в розвитку термографії в Україні. Протягом подальших двох десятиліть ІЧ-діагностування в електроенергетиці України розвивалося швидкими темпами: з'явилися нові, сучасні тепловізори й пірометри, був напрацьований великий практичний досвід термографічного контролю і діагностування електроустановок. Наприклад, на Чорнобильській АЕС, яка стала першою з АЕС України, що впровадила цей вид діагностики, у 1994 р. з'явилася термографічна система «Thermovision–880» шведської компанії AgEMA Infrared Systems, дещо пізніше сучасні тепловізори стали застосовувати й на інших АЕС, у НЕК «Укренерго», а також у багатьох інших енергосистемах України.

Попри накопичений за минулий період багаторічний позитивний досвід практичного інфрачервоного діагностування електроустаткування в ряді енергосистем НЕК «Укренерго», на Чорнобильській АЕС та інших атомних станціях, цей ефективний метод визначення технічного стану електроустаткування не набув ще належного поширення в електроенергетичній галузі України. Хоча свого часу в нормативному документі ГКД 34.20.302–2002⁵² [6] термографічний контроль та ІЧ-діагностування електроустаткування були введені до переліку обов'язкових, широкому впровадженню цієї прогресивної технології неруйнівного контролю електроустаткування значною мірою заважала відсутність детально вписаних правил і методичних прийомів роботи із засобами ІЧ-техніки, аналізу особливостей проведення таких вимірювань, порядку організації термографічного контролю на енергетичних підприємствах.

Протягом останніх кількох років здійснене узагальнення досвіду застосування ІЧ-діагностування в Україні: розроблений нормативний

⁵² Втратив чинність із введенням в дію з 28.02.2007 р. СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007. Методичні вказівки «Технічне діагностування електрообладнання і контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередавання засобами інфрачервоної техніки»

документ СОУ–Н ЕЕ 20.302.2006 [7] із застосування ІЧ-діагностування електроустаткування і випущений посібник [3], що є власне технологічною картою виконання робіт з інфрачервоного діагностування електроустаткування. У випущеному посібнику обґрунтовані: вибір необхідних за своїми параметрами тепловізорів, порядок проведення тепловізійного контролю для кожного виду устаткування, склад бригади, що здійснює ІЧ-діагностику електроустаткування, оформлення результатів вимірювань та їх аналіз, створення бази даних за результатами вимірювань, оцінка результатів, формування висновків стосовно допустимості (або, навпаки, недопустимості) продовження роботи обстежуваного електроустаткування, висновків щодо необхідності проведення профілактичних ремонтів, встановлення термінів проведення ремонтних робіт тощо. З прийняттям цього важливого нормативного документа й виходом посібника термографічний контроль електроустаткування в Україні виходить на якісно новий рівень свого розвитку.

Вимоги нормативних документів стосовно тепловізійного контролю. Як зазначено вище, в Україні набув чинності розроблений фахівцями енергетичної галузі стандарт СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007. Методичні вказівки «Технічне діагностування електрообладнання і контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередавання засобами інфрачервоної техніки» (Затверджено та надано чинності: наказ Мінпаливенерго України від 15.02.2006 р. №89). Документ власне являє собою методичні вказівки з організації, проведення і оцінювання результатів технічного діагностування засобами інфрачервоної техніки електрообладнання і контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередавання напругою 0,22 – 750 кВ, а саме:

- контактних з'єднань і контактів всіх видів і виконань, застосовуваних в електрообладнанні і електроустановках напругою 0,22 – 750 кВ;
- електричних машин постійного і змінного струму усіх потужностей і напруг;
- силових трансформаторів, автотрансформаторів, шунтуючих реакторів;
- високовольтних вводів та ізоляторів;
- електричних апаратів(комутаційні електричні апарати, вимірювальні трансформатори струму і напруги, високочастотні загороджувачі, бетонні струмообмежувальні реактори, конденсатори

зв'язку, ємнісні подільники напруги і силові конденсатори, вентиляльні розрядники і обмежувачі перенапруг);

- силових кабельних ліній;
- повітряних ліній електропередавання;
- електроустановки і електрообладнання на напругу до 1000 В;
- електрообладнання систем збудження генераторів і синхронних компенсаторів;
- електрообладнання систем безперебійного живлення, напівпровідникових перетворювачів частоти, компонентів їх електронних вузлів.

В документі наведені терміни і визначення понять, а також технічні вимоги до засобів інфрачервоної техніки і додаткового обладнання. Поряд із цим детально викладені основні фактори, що впливають на точність вимірювання температури, зокрема тепловий фон, наведене тепло від оточуючих предметів, сонячне випромінювання, вітер та інші метеоумови, нагрів індукційними струмами, магнітні поля, теплова інерція обстежуваних об'єктів.

Результати діагностування згідно із методичними вказівками мають бути оформлені у вигляді звіту або протоколу обстеження із визначеним обсягом інформації.

Вимоги РД 34.45-51.300-97 «Объём и нормы испытаний электрооборудования» (РФ). Тепловізійний контроль електроустаткування проводиться відповідно до вимог РД 34.45–51.300–97⁵³ в частині додатка № 3 «Тепловизионный электрооборудования и воздушных линий» за методикою тепловізійного обстеження РД 153–34.0–20.363–99 «Методика инфракрасной диагностики электрооборудования и воздушных линий».

Види електроустаткування, які підлягають тепловізійному обстеженню:

- генератори;
- комірки КРПЗ, КРП, КТП;
- повітряні лінії електропередавання;
- кабелі, їх з'єднання, ізоляція;
- вентиляльні розрядники, обмежувачі перенапруг;
- роз'єднувачі, віддільники, шинні мости, їх ізоляція;
- масляні й повітряні вимикачі;

⁵³ РД 34.45–51.300–97. Объем и нормы испытания электрооборудования

– вимірювальні й силові трансформатори, авто-трансформатори;

Тепловізійне діагностування електроустаткування (рис. 8.29) виявляє наступні види дефектів:

- стан міжлистової ізоляції статора генератора;
- порушення паянь лобових частин обмоток;
- перегриви контактних з'єднань;
- наявність дефектних ізоляторів;
- порушення в роботі систем охолодження;
- порушення внутрішньої циркуляції масла в баку трансформатора;
- ослаблення контактних з'єднань струмовідних частин;
- погіршення стану основної ізоляції, ізоляції введень, шунтуючих конденсаторів;
- перегрів контактних з'єднань апаратних затискачів;
- тріщини в опорно-стержневих ізоляторах, дефекти підвісної ізоляції;
- обрив шунтуючих опорів;
- нерівномірність розподілу напруги по елементах;
- порушення зовнішніх і внутрішніх контактних з'єднань;
- погіршення внутрішньої ізоляції обмоток, пов'язане із шламоутворенням та іншими дефектами;
- погіршення ізоляції кінцевих кабельних муфт і кабельних закладень;
- дефекти підтримувальної арматури.

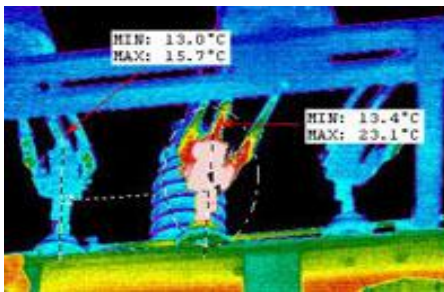
Тепловізійне обстеження дозволяє діагностувати стан таких видів теплотехнічного устаткування (рис. 7.29):

- місць всмоктування повітря і порушень торкета в газоходах котлів;
- димарів із залізобетонним і цегельним стволом;
- місць витоків у підземних трубопроводах;
- теплоізоляції котлоагрегатів, турбін, печей, трубопроводів.

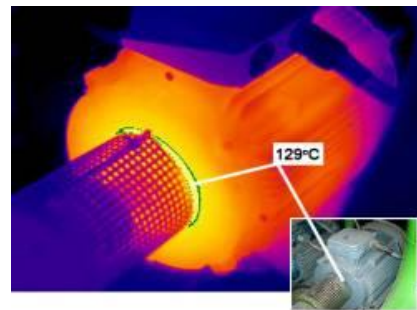
Тепловізійне обстеження теплотехнічного устаткування виявляє такі види дефектів:

- дефекти теплоізоляції між футеруванням і стволом труби;
- трасування теплотрас, уточнення місць і розмірів компенсаторів;

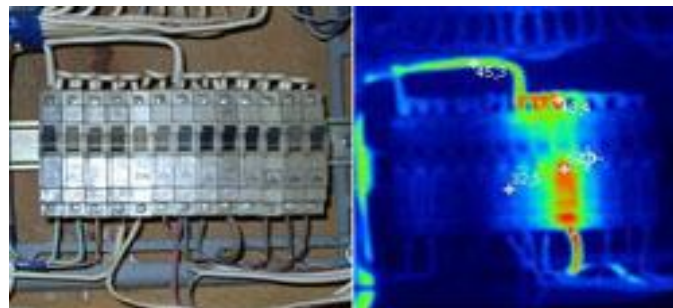
- дефекти несучих конструкцій і кислототривких покриттів у газоходах казанів;
- дефекти теплоізоляції в підземних трубопроводах (руйнування, намокання);
- дефекти ствола труб (тріщини, негерметичні шви бетонування, ділянки пористого бетону);
- дефекти футерування труб (тріщини, випадання цегли, не закладені монтажні отвори, негерметична слезникових поясів);
- місця всмоктування повітря в газоходи підвідних труб;
- дефекти теплоізоляції печей, трубопроводів тощо;
- виявлення місць пориву трубопроводу.



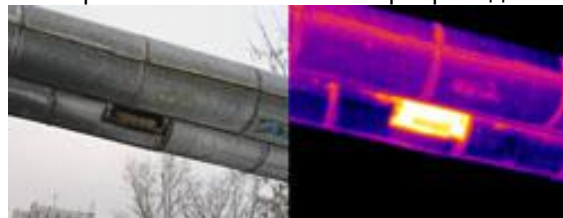
Перегрів приєднання на підстанції



Перегрів електродвигуна



Перевантаження лінії електропроводки



Дефекти теплової ізоляції труб

Рис. 7.29. Термограми електрообладнання і теплових мереж

Методики тепловізійного контролю електрообладнання. Впровадження приладів інфрачервоної техніки (ІЧТ) в енергетику є

одним з основних напрямів розвитку високоефективної системи технічного діагностування, яка забезпечує можливість контролю теплового стану електроустаткування та електроустановок без виведення їх із роботи, виявлення дефектів на ранній стадії їх розвитку, скорочення витрат на технічне обслуговування за рахунок прогнозування термінів та об'ємів ремонтних робіт.

Тепловізійний контроль електроустаткування і повітряних ліній електропередавання передбачений РД 34.45–51.300–97 «Объём и нормы испытаний электрооборудования»(РФ). Для забезпечення єдиних технічних вимог до умов і порядку проведення ІЧ-діагностування електроустаткування й оцінки результатів вимірювань у ВАТ «Фирма ОРГРЭС» розроблені РД 153–34.0–20.363–99. «*Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ*». Під час розробки цього документу враховані результати робіт з інфрачервоного діагностування, що проводилися ВАТ «Фирма ОРГРЭС» і рядом енергосистем та використані інформаційні матеріали фірм «Інфраметрікс» (США), «АГЕМА» (Швеція).

В «*Основных положениях*» розглянуті похибки вимірювань температури за ІЧ-контролю і способи їх усунення, конструкційні особливості електроустаткування, пов'язані з протіканням теплових процесів під час його роботи, наведені норми оцінки теплового стану струмовідних частин, термограми характерних несправностей електроустаткування, вказані основні принципи вибору приладів інфрачервоної техніки, способи метрологічної перевірки пірометрів тощо.

Документ розрахований на спеціалізований інженерно-технічний персонал, що володіє необхідними знаннями у сфері ІЧ-діагностування. На рис. 7.30 наведена структурна схема системи інфрачервоної діагностики енергетичного устаткування і технологічних споруд. Регламент проведення ІЧ-діагностування (1 на рис. 7.30) включає періодичність та об'єм вимірювань температури контрольованого об'єкта або сукупності об'єктів.

Періодичність ІЧ-діагностування електроустаткування розподільних пристроїв і повітряних ліній електропередавання визначена лабораторією інфрачервоної техніки з урахуванням досвіду його експлуатації, режиму роботи, зовнішніх та інших чинників і відбита у відповідних рекомендаціях.

Операція з проведення ІЧ-діагностування (2 на рис. 7.30) повинна виконуватися приладами ІЧТ, що забезпечують достатню ефективність у визначенні дефекту на працюючому устаткуванні.

Виявлення дефекту (3 на рис. 7.30) має здійснюватися за можливості на ранній стадії розвитку, для чого прилад ІЧТ повинен мати достатню чутливість навіть під час дії несприятливих чинників, що можуть спостерігатися в експлуатації (вплив негативних температур, пилу, електромагнітних полів тощо). Під час аналізу результатів ІЧ-діагностування (4 на рис. 7.30) повинні здійснюватися оцінка виявленого дефекту та прогнозування можливостей його розвитку й термінів відновлення. Після усунення виявленого дефекту (5 на рис. 7.30) необхідно провести повторне діагностування (6 на рис. 7.30) з метою формулювання висновку про якість виконаного ремонту.

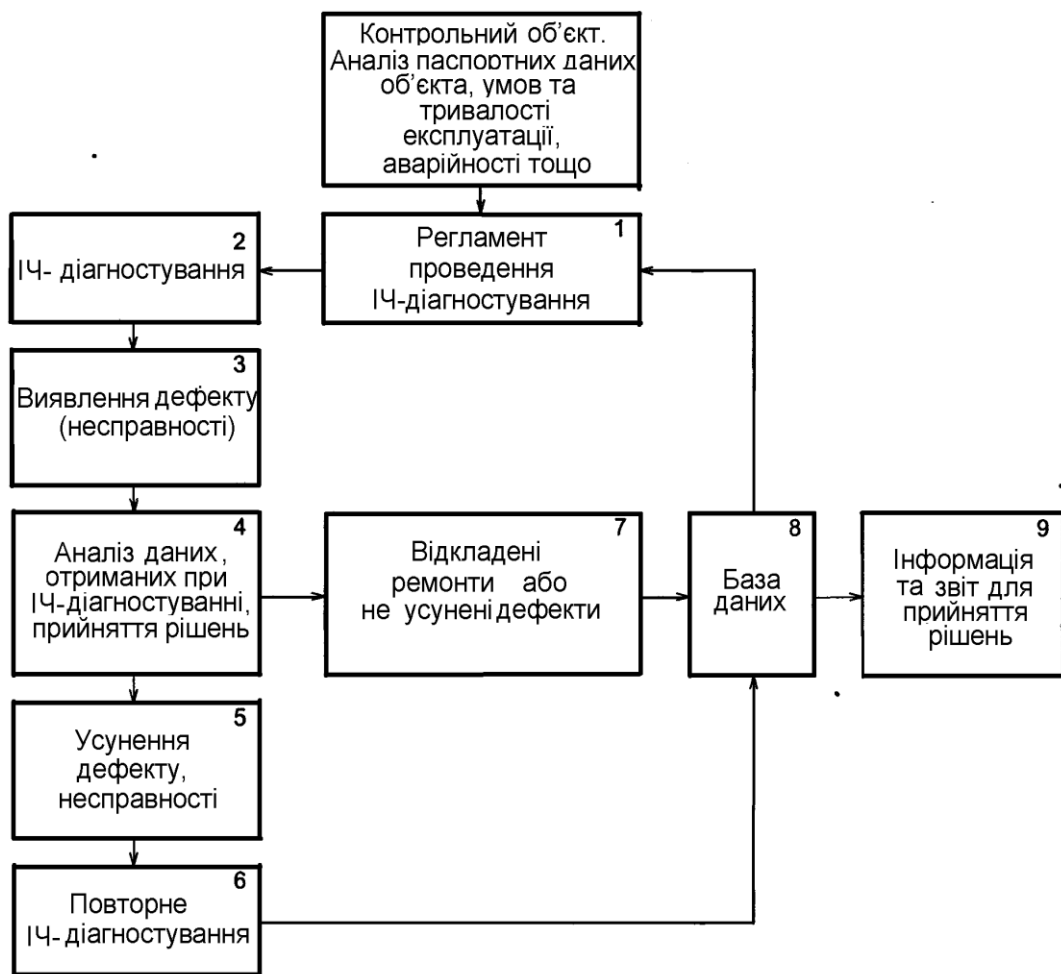


Рис. 7.30. Система інфрачервоного діагностування енергетичного устаткування і технологічних споруд

Базу даних (8 на рис. 7.30) для відповідальних об'єктів (трансформатори, вимикачі, розрядники) бажано закладати в комп'ютер з тим, аби вона відображала не лише результати

ІЧ-діагностування, але й усю інформацію про цей об'єкт, включаючи тип, термін служби, умови експлуатації, режими роботи, об'єми й види ремонтних робіт, результати профілактичних випробувань і вимірювань та інші відомості, що дозволяють на підставі розгляду всього комплексу чинників, закладених у пам'ять комп'ютера, судити про технічний стан об'єкта.

Похибки під час інфрачервоного контролю. Інфрачервоний (ІЧ) контроль бажано проводити за відсутності сонця (у хмарну погоду або вночі), переважно перед сходом сонця, за мінімальної дії вітру в період максимальних струмових навантажень, краще навесні – для уточнення об'єму ремонтних робіт і (або) восени – з метою оцінки стану електроустаткування перед зимовим максимумом навантаження.

Під час проведення ІЧ-контролю повинні враховуватися такі чинники:

- коефіцієнт випромінювання матеріалу;
- сонячна радіація;
- швидкість вітру;
- відстань до об'єкта контролю;
- значення струмового навантаження;
- теплове віддзеркалення тощо.

Під час проведення інфрачервоного обстеження електроустаткування істотне значення має виявлення та усунення систематичних і випадкових похибок, що чинять вплив на результати вимірювань. Систематичні похибки обумовлені конструкцією вимірювального приладу, а також залежать від його вибору відповідно до вимог щодо досконалості вимірювань (роздільної здатності, поля зору тощо).

Випадковими похибками, що виникають під час проведення ІЧ-контролю, можуть бути: дія сонячної радіації, вибір випромінювальної здатності тощо. Нижче розглянуті види похибок і способи їх усунення.

Вплив випромінювальної здатності об'єкта контролю. Коефіцієнт випромінювання матеріалу в загальному вигляді залежить від довжини хвилі, кута спостереження поверхні контрольованого об'єкта й температури. Для металів на відміну від газоподібних і рідких речовин спектральний коефіцієнт випромінювання змінюється незначно (табл. 7.30).

7.30. Коефіцієнти випромінювання матеріалів

Вид матеріалу	Стан поверхні	Температура, °С	Коефіцієнт випромінювання, мкм
алюміній	анодований	100	0,55
	необроблена поверхня	20–50	0,06–0,07
	окислений	50–500	0,2–0,3
бронза	полірований	50–100	0,04–0,06
	необроблена	50–100	0,55
залізо	полірована	50	0,1
	іржаве	20	0,61–0,85
	необроблене	20	0,24
	окислене	100	0,74
латунь	оцинковане	30	0,25
	поліроване	400–1000	0,14–0,38
	окислена	200–600	0,6
мідь	полірована	100	0,03
	полірована	20–100	0,02–0,05
мідь	з тонкою окисною плівкою	20	0,037
	окисдована	100–200	0,6–0,73
	електролітична, полірована	20–100	0,05
мідь	на струмозійомниках, блискуча	20–100	0,3
	на струмозійомниках, матова або окисдована	20–100	0,5
	блискучий	250	0,08
сталь	сірий, окислений	20	0,28
	поржавіла	20	0,69
сталь	легована	500	0,35
	неіржавіюча	20–700	0,16–0,45
	окисдована	200–600	0,8
	оцинкована	20	0,28
	полірована	100	0,07
азбест	плити шорсткі, сірі	-	0,96
	папір	-	0,94
	картон	20–700	0,74–0,88
асфальт	сипкий	-	0,95
	вкатане дорожнє покриття	-	0,9
бетон	плити гладкі	-	0,63
	стіни литі, необроблені	-	0,55
бітум	плоска кривля	-	0,96
	рідкий	-	1,0

Продовження таблиці 7.30

папір	білий	20	0,7–0,9
	жовтий	20	0,72
	зелений	20	0,85
	червоний	20	0,76
	матовий	20	0,93
	темно-синій	20	0,84
	чорний	20	0,9
вода	гладкий лід	-10	0,95
	дистильована	20	0,96
	іній	-10	0,98
	сніг	-10	0,85
дерево	брус	20	0,8–0,9
	дошка	20	0,96
шкіра	людська	32	0,98
каучук	твердий/ м'який	20/20	0,95/0,86
цеглина	червоний	20	0,93
	силікатний	20	0,66
фарби масляні	матова чорна	100	0,98
	різних кольорів	100	0,92–0,94
скло	-	20–100	0,91–0,94
графіт	оброблений напилком	20	0,98
грунт	вологий	20	0,95
	сухий	20	0,9
фарфор	глазурований	20	0,75 ... 0,93
	неглазурований	20	0,9
цемент	-	-	0,54

Коефіцієнт випромінювання окрім зазначених факторів залежить також від кута спостереження. Для металів коефіцієнти випромінювання постійні в інтервалі кутів спостереження (0–40) градусів, для діелектриків – в інтервалі кутів (0–60) градусів. За межами цих значень коефіцієнт випромінювання швидко зменшується до нуля за напрямом спостереження по дотичній.

Так, за довжини хвилі випромінювання 10 мкм під час спостереження по нормалі вода близька до абсолютно чорного тіла, а під час спостереження по дотичній стає дзеркалом $E = 0$. В електроустановках відмінність у кутах спостереження може виникнути під час проведення ІЧ-контролю під кутом струмовідної шини.

На ділянках А і С (рис. 7.31) спостереження здійснюється по нормалі до площини шини, на ділянці В переважатиме відбивна

здатність матеріалу, що спотворюватиме картину теплового зображення.

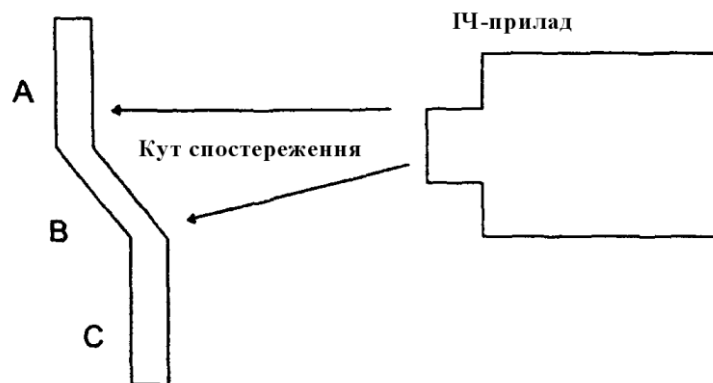


Рис. 7.31. Вплив кута спостереження на результати вимірювань температури

Коефіцієнти випромінювання металів із зростанням температури зазвичай збільшуються і залежать від стану поверхні металу. Оскільки струмовідний вузол електричного апарату або установки може включати кілька компонентів, виготовлених із різномірних металів, поверхні яких забарвлені, мають окисні плівки або різну чистоту обробки поверхні, тобто різні коефіцієнти випромінювання, під час інфрачервоного контролю можуть виникнути припущення про перегрів на ділянках із підвищеними коефіцієнтами випромінювання.

У подібних випадках доцільно провести пофазне порівняння результатів вимірювань, оцінити стан поверхні перегрітої ділянки (точки) за допомогою бінокля, з'ясувати об'єм ремонтних робіт, що проводилися на цьому струмовідному вузлі тощо. У тому випадку, коли коефіцієнт випромінювання контрольованого об'єкта відомий, його фактична температура може бути визначена за формулою

$$T_{\text{факт}} = \frac{T_{\text{рад}}}{\sqrt[4]{E}}, \quad (7.1)$$

де $T_{\text{рад}}$ – радіаційна температура, виміряна ІЧ-приладом; E – коефіцієнт випромінювання контрольованої поверхні.

У практиці може виникнути необхідність у визначенні коефіцієнта випромінювання контрольованого об'єкта або його вузла. Для цього на ділянку контрольованої поверхні наноситься покриття з матової чорної фарби або наклеюється шматок стрічки для фотошаблонів, коефіцієнти випромінювання яких близькі до одиниці. Після того, як покриття або стрічка набуває температури об'єкта,

здійснюється вимірювання температури $T_{\text{факт}}$. Вимірявши температуру $T_{\text{рад}}$ незабарвленої ділянки, за наведеною формулою можна визначити коефіцієнт випромінювання контрольованого об'єкта (табл. 7.30).

Сонячне випромінювання. Сонячна радіація нагріває контрольований об'єкт, а також за наявності ділянок (вузлів) з хорошою відбивною здатністю створює враження про наявність високих температур у місцях вимірювання. Ці явища особливо виявляються під час використання ІЧ-приладів зі спектральним діапазоном 2–5 мкм. Для виключення впливу сонячної радіації рекомендується здійснювати ІЧ-контроль вночі (переважно після півночі) або в хмарну погоду. За гострої необхідності вимірювання в електроустановках за сонячної погоди рекомендується виконувати для кожного об'єкта по черзі з кількох діаметрально протилежних точок.

Вітер. Якщо ІЧ-контроль здійснюється на відкритому повітрі, необхідно брати до уваги можливість охолодження вітром контрольованого об'єкта (контактного з'єднання). Так, перевищення температури, виміряне за швидкості вітру 5 м/с, буде приблизно в два рази нижче, ніж виміряне за швидкості вітру 1 м/с. У діапазоні швидкостей 1–7 м/с справедлива така формула:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \left| \frac{V_1}{V_2} \right|^{0,448}, \quad (7.2)$$

де ΔT_1 – перевищення температури за швидкості вітру V_1 ; ΔT_2 – те ж за швидкості вітру V_2 .

Вимірювання за швидкості вітру вище 8 м/с не рекомендується проводити. Під час перерахунків отриманих значень перевищення температури можна окрім формули користуватися коефіцієнтами коригування (табл. 7.31).

7.31. Коефіцієнт коригування показів інфрачервоного приладу, отриманих за вітряної погоди

Швидкість вітру, м/с	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Коефіцієнт коригування	1,0	1,36	1,64	1,86	2,0	2,23	2,4	2,5

Слід зазначити, що часто сила вітру під час ІЧ-діагностування буває змінною, тому вказаний перерахунок може привести до додаткових похибок.

Струмове навантаження. Температура струмовідного вузла (контактного з'єднання) залежить від навантаження і прямо

пропорційна квадрату струму, що проходить через контрольовану ділянку:

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \left| \frac{I_1}{I_2} \right|^2, \quad (7.3)$$

де ΔT_1 – перевищення температури за струму I_1 ; ΔT_2 – те ж за струму I_2 .

За необхідності перерахунок бажано проводити від вищого навантаження до нижчого й за близьких значень струмів (відмінності на 20–30 %).

Теплова інерція. Під час змінного струмового навантаження доводиться зважати на теплову інерцію контрольованого об'єкта. Так, тепла постійна часу для контактних вузлів апаратів складає близько 20–30 хвилин, тому під час визначення струму навантаження за амперметром контрольованого приєднання не слід враховувати короточасні «кидки» струму, пов'язані з комутаційними процесами або режимом роботи споживача. Теплова постійна для вентиляних розрядників складає приблизно 6–8 годин, тому результати вимірювань тепловізором тільки що поставленого під напругу розрядника можуть виявитися помилковими.

Дощ і сніг. Дощ, туман, мокрий сніг значно охолоджують поверхню контрольованого об'єкта, температура якої вимірюється за допомогою ІЧ-приладу, і до певної міри розсіюють інфрачервоне випромінювання краплями води; ІЧ-контроль допускається проводити під час невеликого снігопаду із сухим снігом або легкого дощу.

Магнітні поля. Під час роботи з ІЧ-приладами поблизу шин генераторної напруги, реакторів і взагалі в електроустановках з великими робочими струмами доводиться стикатися з проблемою захисту ІЧ-приладу від впливу магнітного поля. Останнє викликає спотворення картини теплового поля об'єкта на кінескопі тепловізора або порушує роботу радіаційного пірометра.

За наявності магнітних полів під час проведення ІЧ-контролю рекомендується:

а) якщо струмовідні шини знаходяться над головою оператора з тепловізором або пірометром або поблизу нього, постаратися, переміщаючись біля контрольованого об'єкта, вибрати місце розташування з мінімальним впливом магнітного поля;

б) використовувати об'єкти з меншим кутом спостереження (наприклад, 7x7), що дозволить здійснювати контроль за об'єктом з віддаленої відстані;

в) під час контролю за допомогою тепловізора з оптико-механічним скануванням сканер можна розташувати поблизу об'єкта, а відеоконтрольний пристрій із кінескопом, використовуючи довгий кабель від сканера, винести за межі зони впливу магнітного поля.

Теплове віддзеркалення. У ряді випадків, особливо під час ІЧ-контролю струмовідних частин, розташованих у невеликих замкнутах об'ємах (наприклад, у КРП або КРПЗ), доводиться стикатися з можливістю отримання помилкових результатів через теплове віддзеркалення (рис. 7.32) від нагрівальних елементів, ламп освітлення, сусідніх фаз тощо.

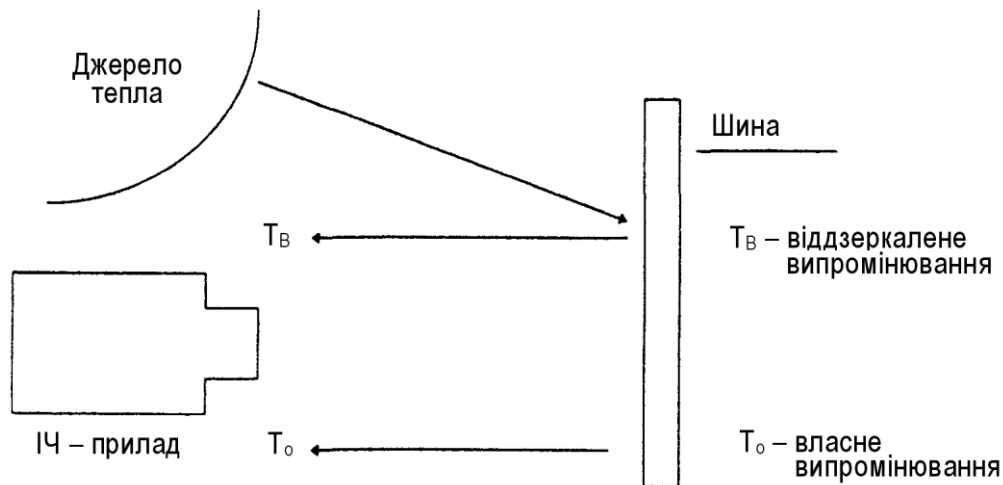


Рис. 7.32. Вплив теплового віддзеркалення на результати вимірювань температури

Останнє виявляється під час контролю струмовідної частини з малим коефіцієнтом випромінювання, яка має хорошу відбивну здатність. У результаті термографічна зйомка може показати гарячу точку (пляму), хоча насправді це просто теплове віддзеркалення. Тому рекомендується в подібних випадках виконувати ІЧ-обстеження об'єкта під різними точками зору й зі зміною місця розташування оператора з ІЧ-приладом. За необхідності на час вимірювання відключається освітлення об'єкта тощо.

Нагрів індукційними струмами. У струмовідних частинах електроустановок, що обтікаються значними струмами (наприклад, шини генераторної напруги), часто спостерігаються нагриви, обумовлені індукційними струмами, які циркулюють у магнітних матеріалах – пластинах шинотримачів, кріпильних болтах, близько розташованих металоконструкціях та ін. Нагриви від індукційних струмів, якщо вони розташовані поблизу контактних з'єднань, можуть створювати помилкове враження про перегрів останніх.

Вплив дальності ІЧ-контролю. Істотне значення під час ІЧ-контролю має відстань до контрольованого об'єкта, зважаючи на розсіяння і поглинання ІЧ-випромінювання в атмосфері за рахунок туману, снігу та інших чинників. Особливо цей вплив позначається за використання тепловізорів, що працюють у спектральному діапазоні 2–5 мкм.

Під час використання пірометрів необхідно, щоб площа спостереження за можливості відповідала площі контрольованого об'єкта, оскільки інакше на результати вимірювань чинитиме вплив температура довкілля.

Поряд із розглянутим документом *«Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ»* на базі технології енергетичних обстежень, діагностування і неруйнівного контролю фахівцями «ВЕМО»⁵⁴ розроблена й аттестована *«Методика тепловизионной неразрушающей диагностики электрооборудования»*.

В Україні набув чинності розроблений фахівцями енергетичної галузі стандарт СОУ–Н ЕЕ 20.577:2007. Методичні вказівки *«Технічна діагностика електрообладнання і контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередавання засобами інфрачервоної техніки»* (Затверджений наказом Мінпаливенерго України від 15.02.2006 № 89).

7.3.6. Об'єкти тепловізійного контролю в енергетиці

Найбільш масовим об'єктом теплового контролю в електроустановках є контактні з'єднання у відкритих і закритих розподільних пристроях. Установлений такий розподіл дефектів за контактами: болтові з'єднання – 48 %, спресовані – 6 %, зварні шви – 2 %, контакти роз'єднувачів – 43 %, провідники й кабельні мережі – 1 %. До масових об'єктів теплового контролю відносяться також ізолятори (особливо фарфорові) в гірляндах високовольтних ліній електропередавання, ізолятори на введеннях силових трансформаторів, електродвигунів високої напруги, шинних мостів, а також фарфорові кришки електричних апаратів. Тепловий контроль необхідний також для діагностування стану багатоелементних вентильних розрядників, високовольтних трансформаторів (за перегрівом вводів визначають якість внутрішньої струмової петлі у фарфоровій сорочці, заповненій маслом), колекторних щіток

⁵⁴ ВАТ Технологический институт энергетических обследований, диагностики и неразрушающего контроля «ВЕМО» (РФ)

електричних машин, рубильників та інших навантажених струмом вузлів.

Економічний ефект від проведення заходів щодо теплового контролю високовольних ліній передачі (110–750 кВ) в результаті зменшення числа аварійних відключень в енергетичних системах, оцінюється в декілька десятків мільйонів гривнів на рік. А застосування тепловізорів під час випробувань трансформаторів істотно знижує витрати на проведення цих робіт. В окремих випадках за один день роботи можна виявити стільки дефектів, що це окупить вартість тепловізора. Наприклад, на хімічних, металургійних, машинобудівних заводах, не говорячи вже про об'єкти атомної енергетики, вартість ліквідації аварії може в багато разів перевищувати вартість тепловізора.

Обширна номенклатура електротехнічних вузлів, що підлягають теплому контролю безпосередньо на заводах: електролізні ванни, у яких за допомогою тепловізора визначають число й місцезнаходження коротких замикань за різницею температур нормально нагрітого й перегрітого катодів.

У комунальному господарстві теплоенергетичні пристрої і комунікації, як і об'єкти електроенергетики, зважаючи на специфіку їх роботи, легко розділити на класи «придатний – непридатний» за тепловим полем.

7.3.7. Технології контролю технічного стану енергетичного обладнання із застосуванням тепловізорів

Питання діагностування енергетичного обладнання останнім часом набувають все більшої актуальності. По-перше, з роками зростає частка устаткування, яке відпрацювало нормативний термін служби (понад 50 % усіх встановлених потужностей у Росії (як і в Україні)). Крім того, у результаті переходу до ринкових відносин і недофінансування протягом багатьох років у необхідних об'ємах проведення планово-профілактичних робіт знизилася якість і надійність енергопостачання, а також значно збільшилася пошкоджуваність електроустаткування, зокрема в енергосистемах така ситуація характерна для трансформаторів на підстанціях напругою 35–750 кВ, які є одним із найважливіших елементів, що визначають надійність електропостачання. За даними аналізу пошкоджуваності силових трансформаторів, проведеного «ОРГРЭС» (РФ), із загального числа відмов трансформаторів близько 60 % припадає на трансформатори з напрацюванням понад 12 років, і при

цьому близько 45 % всього парку трансформаторів мають термін служби більше 20 років. До того ж останнім часом в енергосистемах небезпечними чинниками стали тривалі підвищення напруги й зростання потужності коротких замикань.

Постійно діючими чинниками економіки є хронічна недостатність засобів на проведення технічного обслуговування і модернізації енергоустаткування та «вимивання» кваліфікованих кадрів служб головного енергетика. Усе це ставить проблему оцінювання стану й прогнозування працездатності та залишкового ресурсу енергоустаткування на одне з перших місць у системі обслуговування. При цьому все більша увага приділяється розробці методів і систем діагностування, які дозволяють контролювати стан устаткування в процесі експлуатації. До таких сучасних і високоефективних способів діагностування належить тепловізійне обстеження, яке дозволяє виявляти дефекти на ранній стадії їх розвитку. Високу ефективність мають тепловізійні обстеження з виявлення дефектів діючого електроустаткування, зокрема контактних з'єднань, ділянок перевантаження кабелів; вони дозволяють провести оцінку теплового стану трансформаторів різного призначення, електродвигунів, розрядників, реакторів та іншого електроустаткування в процесі експлуатації без зняття напруги.

Тепловізійне діагностування електроустаткування є інформативним, економічним і зручним. Застосування тепловізійних обстежень дозволяє перейти до системи підтримки експлуатаційної готовності устаткування шляхом організації моніторингу технічного стану електроустаткування і проведення ремонту за наслідками цього моніторингу.

Як відомо, сутність теплового (теповізійного) методу діагностування полягає в дистанційній реєстрації температурного поля на поверхні контрольованого устаткування вимірювальною апаратурою, побудові й аналізі термограм з використанням ПЕОМ для виявлення і класифікації дефектів та ухвалення рішення щодо подальшої експлуатації устаткування. Наявність дефекту за такого діагностування характеризується аномальною зміною (як правило, підвищенням) температури в дефектній зоні порівняно з якісними ділянками.

Як засіб вимірювання поверхневої температури передбачається використання тепловізора або інфрачервоного сканера, що реєструє ІЧ-випромінювання уздовж лінії сканування, положення якої контролюється на моніторі за видимим зображенням об'єкта. На відміну від звичних видимих зображень, що отримуються в

основному за рахунок відображеного або такого, що проходить світла, теплові зображення створюються завдяки зсуву максимумів спектрів власного випромінювання тіл за їх нагрівання в короткохвильовому діапазоні. Зміна ефективної температури поверхні тіла до певної міри відповідає деталям візуально спостережуваної картини, тому створюваний тепловізором видимий аналог теплового зображення в псевдокольорах може мати зовнішню схожість зі спостережуваним об'єктом. Ця обставина є дуже важливою для об'єктивного аналізу погроз, що створюються дефектами в різних приладах, пристроях, устаткуванні.

Тепловий контроль, використовуваний у технічній і медичній діагностиці, моніторингу навколишнього середовища може здійснюватися двома методами: пасивним та активним. *Пасивний метод* полягає у використанні природного тепла, що виділяється в процесі виробництва або експлуатації об'єкта контролю і спостереженні за допомогою тепловізійної системи розподілу температур в часі й просторі. Порівняння з ідеальною моделлю розсіювання тепла дозволяє визначити всі відхилення температури, важливі для режимів експлуатації. *Активний метод* зазвичай застосовується після охолодження об'єкта. Для цього використовують зовнішнє джерело тепла, що створює в матеріалі термоудар. Тепловізійна система аналізує розповсюдження теплових хвиль у динаміці й за зміною теплопровідності в матеріалі виявляє внутрішні дефекти.

Перевагами тепловізійного діагностування електроустаткування над іншими методами неруйнівного контролю:

- обстеження об'єктів у процесі експлуатації без зняття напруги;
- можливість класифікації дефектів за ступенем їх небезпеки;
- можливість об'єктивного документування виявлених дефектів;
- незначні експлуатаційні витрати;
- висока безпечність роботи.

Основними технічними вимогами до засобів тепловізійної техніки є:

- спектральний діапазон у межах 2,5–5,0 або 8,0–14,0 мкм;
- похибка вимірювання температури в межах ± 2 °С;
- чутливість приблизно 0,20 °С;
- діапазон вимірюваних температур від -20 °С до +600 °С;

- формат зображення не менше 320x240 елементів для тепловізорів і не менше 100 елементів для сканерів;
- кількість зображень, що зберігаються – не менше 30;
- температурні умови роботи – від -15°C до +50 °C.

У деяких випадках, наприклад, під час обстеження контактних з'єднань, допустимо використання пірометрів. Як засоби, що підвищують точність, надійність і достовірність вимірювань, рекомендується використовувати: цифровий термометр з похибкою вимірювання температури не вище за 0,1 °C, анемометр і цифрову фотокамеру, якщо тепловізор або сканер не фіксує відеозображення. Взагалі рекомендується використовувати тепловізор із можливістю отримання відеозображення.

Тепловізійний контроль повністю замінює традиційні методи випробувань з відключенням устаткування. Він також дає додаткові діагностуючі критерії й дозволяє виявляти дефекти, які неможливо виявити ніякими іншими методами випробувань. Суттєвим є те, що вдається виявити дефекти на ранній стадії розвитку та своєчасно вжити заходів для запобігання можливим аваріям. У результаті виключаються пошкодження електроустаткування через несвоєчасно виявлені дефекти й підвищується безпека експлуатації. Крім того, традиційні методи випробувань багатьох видів устаткування можуть бути повністю замінені тепловізійним обстеженням, що істотно скорочує витрати на діагностування технічного стану.

Примітка. Методи теплового контролю в галузях виробництва, транспортування, перетворення, консервації і споживання різних видів енергії використовуються у світі понад 25 років.

Досвід однієї електроенергетичної компанії у Швеції, що здійснює стовідсотковий контроль підстанцій (до 150000 вузлів за рік), показав, що альтернативи тепловізійному контролю в цій сфері немає, оскільки перегріті вузли утворюються безперервно. У Бельгії завдяки багаторічному планомірному використанню тепловізійної техніки кількість відмов на електричних підстанціях скоротилася в три рази. У Норвегії всі лінії електропередавання перед терміном закінчення гарантії підлягають тепловому контролю. У Данії тепловізором, встановленим на автомобілі, за ніч перевіряють до 100 км теплотрас. Здійснюється відеозапис, а ділянки виявлених витоків гарячої води обводять крейдою на вулиці чи тротуарі.

Фірма General Motors (США) знайшла на своїх підприємствах більше 44000 застосувань системам «технічного зору», у багатьох із яких використовуються тепловізори. Національне бюро стандартів США розробило методику розрахунків теплових втрат з поверхні

промислових об'єктів, що дозволяє кількісно оцінити зношування теплоізоляції печей, накопичувальних ємкостей, димарів.

Застосування тепловізійного контролю базується на тому, що наявність багатьох видів дефектів електричного устаткування викликає зміну температури дефектних елементів, що може бути зареєстроване за допомогою тепловізора.

Як критерії оцінки технічного стану струмовідних з'єднань передбачаються:

- перевищення температури (різниця між вимірюваною температурою нагріву й температурою навколишнього повітря);
- надмірна температура (перевищення вимірюваної температури контрольованого вузла над температурою аналогічних вузлів, що знаходяться в однакових умовах);
- коефіцієнт дефектності K_{δ} – відношення вимірюваного перевищення температури контактного з'єднання до перевищення температури, вимірюваного на цілій ділянці шини (проводу), віддаленій від цього контактного з'єднання на відстань не менше 1 м).

Неодмінною умовою розрахунку цих критеріїв є знання струмового навантаження $I_{роб}$ контрольованого устаткування і значення номінального струму $I_{ном}$. Наведені в нормативній документації допустимі значення перевищення температури розраховані для номінального струму $I_{ном}$, тому виміряне значення перевищення температури $T_{вим}$ слід привести до номінального струму через співвідношення

$$T_{ном} = T_{вим} (I_{ном}/I_{роб}). \quad (7.4)$$

Цим співвідношенням можна користуватися під час вимірювання перевищення температури контактів і болтових контактних з'єднань (КС) за струмів навантаження $(0,6-1,0) I_{ном}$.

За струмів навантаження $(0,3-0,6) I_{ном}$ як норматив слід використовувати значення температури $T_{0,5}$, перераховане до $0,5I_{ном}$:

$$T_{0,5} = T_{вим}(0,5I_{ном}/I_{роб}) \cdot 2. \quad (7.5)$$

Тепловізійне обстеження електроустаткування за струмів навантаження менше $0,3I_{ном}$ не рекомендується проводити, оскільки таке навантаження не сприяє виявленню дефектів, особливо на ранній стадії їх розвитку. Отримані розрахунковим шляхом значення перевищення температури $T_{ном}$ і $T_{0,5}$ дозволяють для контактів і болтових контактних з'єднань оцінити ступінь несправності, використовуючи критерій «надмірна температура».

Якщо надмірна температура знаходиться в межах від 5 °С до 10 °С, то це оцінюється як початкова стадія несправності й слід вжити заходів щодо її усунення під час запланованого ремонту. Надмірна температура в 10–30 °С оцінюється як розвинутий дефект, який слід усувати під час найближчого виведення електроустаткування з роботи. Якщо надмірна температура перевищує 300 °С, то це оцінюється як аварійна ситуація, що вимагає негайного усунення дефекту.

Оцінювання стану зварних або контактних з'єднань, виконаних обтисканням, рекомендується проводити також за надмірною температурою або за коефіцієнтом дефектності⁵⁵.

Оцінювання теплового стану силових кабелів рекомендується проводити, як і контактних з'єднань, за критерієм «коефіцієнт дефектності K_d ». Це дозволяє встановити ступінь несправності. Якщо $K_d < 1,2$, то це оцінюється як початковий ступінь несправності.

Якщо $K_d = 1,2–1,5$, то це вже розвинутий дефект. Як аварійна оцінюється ситуація, коли $K_d > 1,5$.

Використання тепловізорів і сканерів дозволяє провести діагностування не тільки таких достатньо простих вузлів, як контактні з'єднання, але й оцінювати технічний стан такого устаткування, як трансформатори, електродвигуни тощо.

Трансформатори входять до складу основного устаткування електричних станцій та підстанцій. Їх важливість в енергосистемах приводить до необхідності проведення комплексного діагностичного обстеження, основна мета якого – це дати об'єктивну оцінку стану трансформаторів, виявити дефекти, розробити рекомендації щодо їх усунення і здійснювати їх подальшу безаварійну експлуатацію.

Разом з такими традиційними методами діагностування трансформаторів, як визначення рівня і місця розташування джерел часткових розрядів, хромато-графічний аналіз розчинених у маслі газів (ХАРГ), усе більше застосування одержує тепловізійне обстеження трансформаторів. Воно дозволяє оцінити їх тепловий стан і справність систем і вузлів, що входять до їх складу.

Досвід проведення тепловізійного діагностування силових трансформаторів свідчить, що воно дозволяє виявити такі несправності:

⁵⁵ Коефіцієнт дефектності – відношення максимальної вимірної температури контактного з'єднання (контакту) до максимальної температури, вимірної на цілісній (без будь-яких з'єднань) ділянці проводу (шини), яка знаходиться від контактного з'єднання (контакту) на відстані, не меншій ніж 1 м.

- порушення механічної ізоляції обмоток;
- вигорання витків обмотки із-за струмів короткого замикання;
- перегрів магнітопроводу через струми короткого замикання;
- порушення роботи охолоджувальних систем (маслонасосів, вентиляторів, фільтрів тощо);
- порушення в роботі пристроїв регулювання напруги під навантаженням (РПН);
- утворення застійних зон масла в баку трансформатора;
- порушення герметичності бака;
- перегрів внутрішніх контактних з'єднань обмоток низької напруги з виводами трансформатора;
- пошкодження маслонаповнених вводів.

Аналіз пошкоджуваності маслонаповненого устаткування, проведений у РАО «ЕЭС России», показав, що в силових трансформаторах і шунтуючих реакторах 87,7 % порушень припадає на три основні вузли – маслонаповнені вводи, обмотки й пристрої РПН, пристрої регулювання напруги без навантаження (ПБВ). Тому під час тепловізійного обстеження трансформаторів цим вузлом слід приділити особливу увагу.

Під час аналізу результатів тепловізійного обстеження необхідно враховувати конструкційне виконання цього типу трансформатора, спосіб охолодження обмоток і магнітопроводу, умови й тривалість експлуатації. Це вимагає проведення попередньої підготовки до обстеження шляхом вивчення паспортних і конструктивних даних трансформатора, терміну й умов експлуатації, відомостей про результати проведених ремонтів, ступеня завантаження трансформатора. Результатом обстеження трансформатора є звіт із фіксацією виявлених дефектів, ступеня їх розвитку, даються рекомендації щодо усунення дефектів і додаються термограми дефектів та їх прив'язка до відеозображення. Це дозволяє планувати роботи з ремонту, спираючись не тільки на нормативи, але й використовувати результати тепловізійного обстеження, які відображають реальну картину технічного стану устаткування. Тепловізійне обстеження маслонаповнених трансформаторів струму (ТС) дозволяє оцінити стан внутрішніх і зовнішніх контактних з'єднань. З урахуванням специфіки роботи вимірювальних і релейних трансформаторів струму на попередньому етапі підготовки до обстеження слід звернути увагу на кількість струмів контактних з'єднань, що протікають обмотками, і їх величину, а також на

результати вимірювання характеристик температури проводять дефектацію дугогасильної камери.

Аналогічним чином під час тепловізійного обстеження оцінюється тепловий стан роз'єднувачів і віддільників.

Об'єм тепловізійного обстеження електродвигунів залежить від їх потужності й конструкційного виконання. Основними об'єктами обстеження є: корпус статора, колектор, підшипники, коробка виводів і система охолодження. Аномальні зони на корпусі статора електродвигуна свідчать про появу виткових замикань у котушках обмотки або про закупорку вентиляційних каналів. Перевірка коробки виводів дає інформацію про стан контактних з'єднань. Температура нагріву підшипників електродвигуна не повинна перевищувати значень, вказаних у нормативній літературі або в інструкції заводу-виробника.

Тепловізійний метод є одним з методів під час комплексного контролю стану повітряних ліній електропередавання, що виконується звичайно з використанням вертольотів. Це пред'являє жорсткіші вимоги до характеристик тепловізора, способу встановлення апаратури на борту, методик тепловізійної зйомки в процесі польоту й до прив'язки координат вертольота до місцевості й інспектованої ПЛ. Нижче викладені особливості тепловізійного контролю електроустаткування систем електропостачання.

Силові трансформатори, автотрансформатори, масляні реактори. Тепловізійний контроль силових трансформаторів є методом діагностування, що забезпечує разом з традиційними методами (вимірювання ізоляційних характеристик, струму холостого ходу, хроматографічного аналізу складу газів в маслі та інших) отримання додаткової інформації про стан об'єкта.

Під час проведення ІЧ-діагностування силових трансформаторів можна виявити такі несправності:

- виникнення магнітних полів розсіювання в трансформаторі за рахунок порушення ізоляції окремих елементів магнітопроводу (консолі, шпильки тощо);
- порушення в роботі охолоджувальних систем (маслонасів, фільтрів, вентиляторів тощо);
- зміна внутрішньої циркуляції масла в баку трансформатора (утворення застійних зон) у результаті шламоутворення, конструкційних прорахунків, розбухання і зсув ізоляції обмоток у трансформаторів (особливо у трансформаторів з великим терміном служби);

- нагріву внутрішніх контактних з'єднань обмоток НН з виводами трансформатора;
- виткове замикання в обмотках вбудованих трансформаторів струму;
- погіршення контактної системи деяких виконань РПН тощо.

Під час оцінки внутрішнього стану трансформатора тепловізором здійснюється вимірювання значення температур на поверхні його бака, тому необхідно зважати на характер теплопередачі магнітопроводу й обмоток. Крім того джерелами тепла є:

- масивні металеві частини трансформатора, зокрема бак, пресувальні кільця, шпильки тощо, у яких тепло виділяється за рахунок додаткових втрат від вихрових струмів, що наводяться полями розсіювання;
- струмовідні частини вводів, де тепло виділяється за рахунок втрат струмовідної частини й у перехідному опорі з'єднувача відведення обмотки;
- контакти перемикачів РПН.

Відведення теплових втрат від магнітопроводу й обмоток до масла й від масла до системи охолодження здійснюється шляхом конвекції. Зони інтенсивного руху масла є тільки поблизу поверхні бака трансформатора, де відбувається теплообмін. Решта масла в баку трансформатора знаходиться у відносному спокої і приходить у рух під час зміни навантаження або температури навколишнього повітря.

Відповідно до п. 6.4.12 ПТЕ–2006 температура верхніх шарів масла за номінального навантаження повинна бути не вище:

- у трансформаторів із системою охолодження ДЦ (примусова циркуляція повітря і масла) – 75 °С;
- у трансформаторів із системами охолодження М (природна циркуляція повітря і масла) і Д (примусова циркуляція повітря та природня циркуляція масла) – 95 °С;
- у трансформаторів із системою охолодження Ц (примусова циркуляція води й масла) температура масла на вході до маслоохолодника повинна бути не вище 70°С.

Визначення внутрішніх дефектів обмоток спрямоване на виявлення:

- локальних нагрівів у баку трансформатора, пов'язаних із місцевим перегрівом окремих котушок трансформатора;
- перегрівів контактних з'єднань відводів обмоток;

- застійних зон масла.

Визначення працездатності пристроїв системи охолодження трансформатора передбачає:

- зняття термограм (рис. 7.33) пристроїв системи охолодження трансформаторів;
- оцінку їх працездатності;
- формулювання рекомендацій щодо необхідності вжиття оперативних заходів з усунення неполадок.

Маслонасоси. Температура нагріву на поверхні корпусу маслонасоса й трубопроводів працюючого трансформатора повинна бути практично однаковою. За появи несправностей у маслонасосі (тертя крильчаток, виткове замикання в обмотці електродвигуна тощо) температура на поверхні його корпусу підвищується і перевищує температуру на поверхні маслопроводу.

Дуттєві вентилятори. Оцінка теплового стану електродвигуна вентиляторів здійснюється зіставленням вимірних температур нагріву. Причинами підвищення нагріву можуть бути: несправність підшипників кочення; неправильно вибраний кут атаки крильчатки; виткове замикання в обмотці електродвигуна тощо.

Термосифонні фільтри (ТФ) призначені для безперервної регенерації масла в процесі роботи трансформатора. Рух масла через фільтр з адсорбентом відбувається під дією тих же сил, які забезпечують рух масла через охолоджувальні радіатори, тобто під дією різниці густини гарячого й холодного масла.

Фільтр приєднаний паралельно трубам радіатора системи охолодження, тому в працюючого фільтра температури на вході й виході повинні відрізнятися між собою. У налагодженому фільтрі буде спостерігатися плавне підвищення температури по його висоті. Температура на вході та виході фільтра буде практично однаковою за:

- використання дрібнозернистого силікагелю;
- шламоутворення у фільтрі;
- випадкового закриття засувки на трубопроводі;
- роботи трансформатора в режимі холостого ходу.

Охолоджувальні радіатори. Несправність крана радіатора або його помилкове закриття приводить до перекриття руху масла через радіатор. У цьому випадку температура труб радіаторів істотно нижча, ніж у працюючого радіатора. З часом поверхні труб радіаторів піддаються дії іржі, на них осідають продукти розкладання масла й паперу, що приводить до зменшення перерізу труб для протікання масла або ж до повного його припинення. Такі труби радіатора холодніші за інші.

Перемикальні пристрої (РНТ, РПН тощо) вбудовуються в трансформатори й складаються з перемикача, реактора та контактора. Контактор перемикального пристрою розміщується в окремому корпусі, розміщеному на стінці бака й залитому маслом. Під час перегріву контактів контактора із-за невеликого об'єму залитого в нього масла на стінах його бака мають місце локальні нагріви. Контроль стану контактів перемикача, зважаючи на його глибинне розташування в баку трансформатора, доволі проблематичний.

Датчик температури. Практично єдиним критерієм оцінки ефективності роботи системи охолодження трансформатора є температура верхніх шарів масла, яка вимірюється за допомогою термометрів (термометричних сигналізаторів з електроконтактним манометром) або дистанційних термометрів опору, що встановлюються в гільзах кришки бака. Контроль температури масла в цих випадках пов'язаний з істотними похибками, які обумовлені інструментальною точністю вимірювань, місцем розміщення гільзи та іншими чинниками. Тому під час термографічного обстеження трансформатора необхідно порівнювати значення температур на кришці бака, виміряні тепловізором, з виміряними за допомогою датчиків температури.

Поверхня бака трансформатора. Зняття температурних профілів бака трансформатора в горизонтальному й вертикальному напрямках, зіставлення їх з конструктивними особливостями трансформатора (розташування обмоток, відводів, елементів охолодження тощо), пофазне порівняння одержаних даних дозволяє одержати додаткову інформацію про характер протікання теплових процесів у баку трансформатора. Під час обстеження трансформатора необхідно оцінювати як значення температур, так і їх розподіл за фазами.

Маслорозширники. Під час зміни теплового стану трансформатора відбувається обмін масла між його об'ємами, що знаходяться в баку й маслорозширнику. За стабілізації теплового стану теплообмін між цими об'ємами масла відбувається в основному за рахунок теплопередачі. Під час огляду за допомогою тепловізора вихлопної труби трансформатора видно рівень масла, що знаходиться в ній, і характер зміни температури по висоті труби. Може спостерігатися падіння температури на поверхні маслопроводу після газового реле (дефект крана).

Термографічному обстеженню трансформатора має передувати:

- ознайомлення з конструкцією виконання обмоток; системою охолодження, результатами роботи трансформатора, об'ємом і характером ремонтних робіт, що виконувалися;
- тривалістю експлуатації, результатами експлуатаційних випробувань і вимірювань тощо.

Поверхні бака трансформаторів, фільтрів, систем охолодження повинні бути оглянуті, з них необхідно видалити бруд і сліди масла, тобто створити умови для забезпечення однакової випромінювальної здатності поверхонь трансформаторів. Обстеження доцільно проводити в темний час доби, за вимкненого штучного освітлення трансформатора, у безвітряну, не дощову погоду, під час максимально можливого навантаження і в режимі неробочого ходу. Тепловізор слід розташувати на штативі, якомога ближче до трансформатора, на осі середньої фази, з використанням об'єктива з полем зору 7–12° і забезпечувати можливість як відео, так і аудіозапису.

Після налаштування постійного температурного режиму запису тепловізора ведеться покадрова реєстрація термозображення, починаючи з верхньої частини крайньої фази (А) у напрямку до іншої крайньої фази (С) з накладенням кадрів один на одного близько 10 % розміру кадру. Досягнувши бака крайньої фази (С), об'єктив опускається нижче, і далі покадрова зйомка продовжується в протилежному напрямі. Таким чином, процес зйомки ведеться поки не буде записана вся поверхня бака, включаючи розташовані під його днищем маслонасоси, маслопроводи та інші вузли.

Термографічній оцінці піддається вся доступна для цього поверхня по периметру. Тепловізор в усіх точках зйомки повинен знаходитися на однаковій відстані від трансформатора. Мінімальна кількість точок зйомки – чотири, максимальна залежить від розташування і типу системи охолодження. Так, під час встановлення виносної системи охолодження кількість точок зйомки збільшується до шести. Термографічна зйомка супроводжується мовними коментарями, які записуються разом із термограмами. У коментарях повинні відображатися режим роботи трансформатора, хід ведення обстеження, опис явищ, що фіксуються тепловізором та інші події. У подальшому здійснюється покадрове поєднання результатів зйомки в єдиний розгорнений «тепловий» план. Аномальні температури нагріву ділянок плану повинні співставлятися з даними технічної документації на трансформатор, у яких вказано конструктивне розташування відведень обмотки, котушок, зон циркуляції масла, магнітопроводу та його елементів. При цьому фіксується робота

системи охолодження, оцінюється зона циркуляції масла, що створюється кожній з них.

Масляні вимикачі. За ІЧ-контролю масляних вимикачів перевіряється стан контактної системи вимикача, верхньої частини маслонаповнених вводів, вбудованих трансформаторів струму й пристроїв підігріву бака. Оцінка контактів дугогасильних камер (ДК) проводиться на підставі вимірювання температури нагріву поверхонь бака вимикача в зоні розташування камер. На ранній стадії розвитку дефекту в ДК, бак вимикача виглядатиме світліше, ніж баки решти фаз. Аварійні перегріву контактів ДК характеризуються появою на поверхні баків масляних вимикачів локальних теплових «плям». Під час отримання незадовільних результатів тепловізійного контролю контактів дугогасильних камер потрібно провести позачергове вимірювання перехідного опору всього струмовідного кола кожного полюса вимикача й залежно від його значення провести ревізію ДК або встановити прискорену періодичність ІЧ-контролю.

Можливі дефекти масляних вимикачів:

- нагрів зовнішніх контактних з'єднань кріплення шлейфів до вводів вимикача;
- перегріву контактів дугогасильної камери;
- порушення в роботі системи підігріву бака;
- знижений рівень масла у вводах;
- погіршення ізоляційних характеристик масла (бак більш нагрітий порівняно із сусідніми фазами).

Масляні вимикачі серії ВМП–10 призначені для встановлення в комірках КРП і випускаються на номінальні струми 630, 1000, 1600 і 3150 А і напругу 10 кВ. За тепловізійного контролю цих вимикачів перевіряється: болтове з'єднання шини й виводів вимикача, стан роликового струмознімного з'єднання і контактів дугогасильної камери. Погіршення стану контактів роликового струмознімного з'єднання і дугогасильної камери звичайно виявляються у вигляді локальних нагрівів на поверхні корпусу вимикача.

Зовнішні контакти й контактні з'єднання вимикачів, якщо вони доступні візуальному огляду й знаходяться на повітрі, під час ІЧ-діагностування оцінюються за підвищенням температури, що регламентується ГОСТ–9024–90. У маломасляних вимикачів (серії ВМТ) на напругу 110–220 кВ усередині колонок є рухомі й нерухомі контакти, роликові струмозійми та інші вузли з болтовими з'єднаннями. З часом відбувається ослаблення кріплення болтів, що викликає нагрів (наприклад, між рухомих і нерухомих контактами),

який може бути видний тільки з одного боку вимикача. Такий дефект легко пропустити, тому огляд ВМТ треба проводити з усіх боків.

Застосування тепловізійного обстеження для виявлення дефектів високовольтних маслонаповнених вводів вимикачів під робочою напругою дозволяє не тільки виявити вводи, для яких потрібний прискорений контроль, але й виявити приховані дефекти вводів, які неможливо виявити традиційними методами випробувань. Останнім часом все частіше виявляються дефекти, пов'язані з порушенням заземлення вимірювального виводу вводу МВ, що може привести до його пошкодження. На початковій стадії розвитку цього дефекту видно нагрів кришки вимірювального виводу, який може бути виявлений тепловізором, а потім з'являється видимий візуально дуговий розряд.

За наслідками обстеження, можна виконати розрахунок значення тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції вводу (за відповідною методикою), не проводячи високовольтних вимірювань мостом Р5026. Суттєво, що отримані результати розрахунку є достатньо точними.

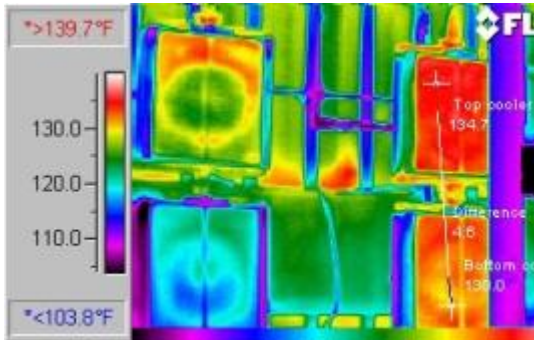
Вакуумні вимикачі. Останнім часом широкого розповсюдження набули вакуумні вимикачі, які випускаються як вітчизняною промисловістю, так і західними виробниками. У зв'язку з цим виникає питання про можливість діагностування стану їх дугогасильних камер. І хоча герметизація дугогасильного середовища у вакуумній камері від навколишнього середовища проводиться високоякісною аргоною зваркою, яка не втрачає своїх ущільнюючих властивостей протягом всього експлуатаційного періоду, проте вакуумний вимикач є електроустановкою, яке необхідно контролювати, щоб запобігти виходу його з ладу.

Для оцінювання можливості контролю за допомогою тепловізора стану вакуумних вимикачів, групою фахівців з Санкт-Петербурга були проведені експериментальні дослідження методу контролю, що базується на вимірюванні температури. Суть його полягала в тому, що через контакти вимикача пропускався струм $0,5I_n$. Температура камер була значно нижчою, ніж температура струмовідних частин через аксіальне відведення тепла від контактів. Потім була здійснена розгерметизація однієї з фаз. Повторні вимірювання показали, що температура камери, яка втратила вакуум вища, ніж в інших приблизно на 2 градуси, а це досить для виявлення дефекту. Проведений експеримент засвідчив принципову можливість контролю стану дугогасильних камер вакуумних вимикачів на основі

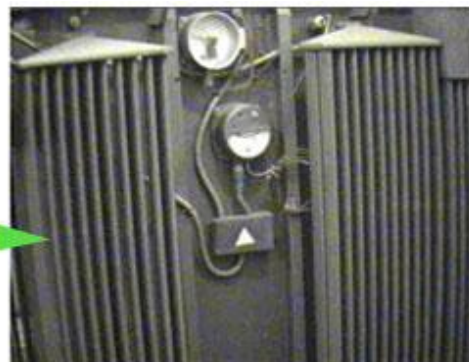
вимірювання температури, тобто із застосуванням тепловізійної техніки.



Виділення надлишкового тепла в розподільному трансформаторі внаслідок появи внутрішнього дефекту й низького рівня масла



Холодне оребрення трансформатора внаслідок низького рівня масла



Порушення циркуляції масла в радіаторі теплообмінника трансформатора

Рис. 7.33. Термограми систем охолодження силових трансформаторів, отримані за допомогою тепловізорів Flyn Systems

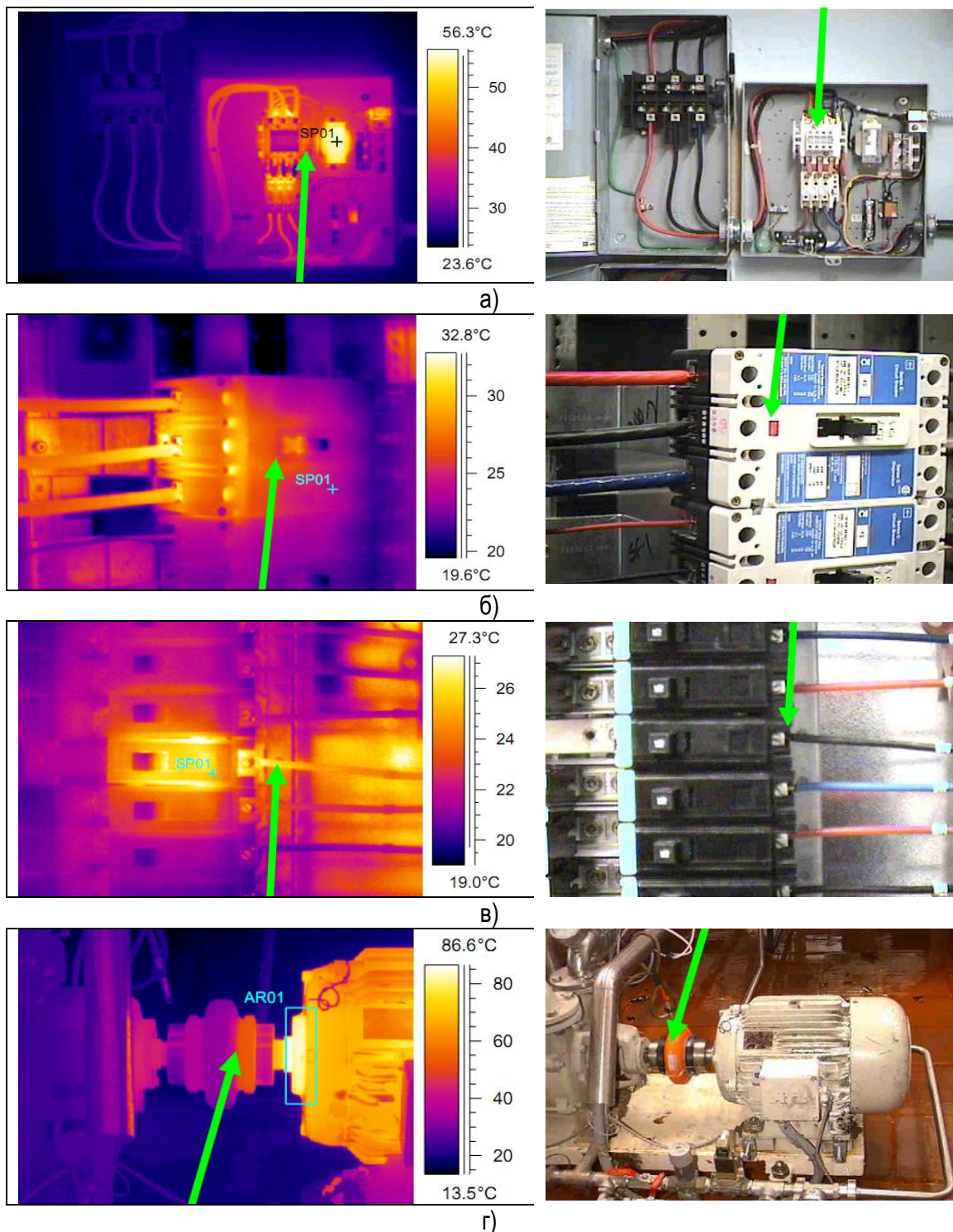


Рис. 7.34. Термограми й фотознімки електротехнічного обладнання, отримані за допомогою тепловізора і цифрової фотокамери: а) перегрів затискачів електромагнітного пускача й знижувального трансформатора у шафі керування; б) перегрів затискачів триполюсного автоматичного вимикача; в) перегрів однополюсного автоматичного вимикача; г) перегрів підшипника електродвигуна в електроприводі

7.3.8. Особливості тепловізійного контролю технічного стану контактних з'єднань

Контакт – струмовідна частина апарату, яка під час операції розмикає і замикає коло, або в разі ковзаючих чи шарнірних контактів зберігає безперервність кола.

Контактне з'єднання – струмовідне з'єднання (болтове, зварне, виконане методом обжимання), що забезпечує безперервність струмового кола.

Застосування приладів ІЧ-діагностування – тепловізорів і пірометрів дозволяє дистанційно й безпечно для персоналу визначати стан контактів і контактних з'єднань, які складають найбільшу частину дефектів, що виявляються під час тепловізійного обстеження підстанцій. Причиною такого положення, як правило, є порушення технології ремонту й монтажу. Найчастіше виявляються дефекти болтових з'єднань та опресовування. Як показала практика, чим нижче клас напруги, тим кількість дефектних контактів більше й навпаки.

Контактні з'єднання бувають таких типів:

- болтові;
- зварні;
- опресовані;
- виконані скручуванням.

У контактних з'єднаннях, виконаних опресовуванням, може спостерігатися неправильний підбір наконечників або гільз, неповне заведення жили в накінецьник, недостатня ступінь опресовування, що приводить до появи дефектів у процесі експлуатації.

Існує три категорії або ступені розвитку дефекту:

- дефект у початковій стадії;
- сильно розвинений дефект;
- дефект в аварійній стадії.

Залежно від ступеня розвитку дефекту необхідно встановлювати терміни й заходи з його усунення. Крім того, під час розрахунків та аналізу стану дефектного контакту необхідно враховувати значення фактичного й номінального навантаження на приєднанні.

Дефекти, виявлені під час тепловізійного обстеження контактних з'єднань, класифікуються за трьома категоріями:

- 1) *початкова стадія несправності* (тримати під контролем, усунути під час планового ремонту);
- 2) *розвинутий дефект* (вжити заходів під час найближчого виведення в ремонт, але не пізніше ніж за 1 місяць);

3) *аварійний дефект* (потрібне негайне усунення).

Виявлення дефектів контактних з'єднань розподільних пристроїв і повітряних ліній (рис. 7.35). Як відомо, залежно від конструкції, призначення, способу з'єднання матеріалів, сфери застосування та інших чинників розрізняють болтові, зварні, паяні й виконані обтисканням (спресовані та скручені) контактні з'єднання. До контактних з'єднань можна віднести також дистанційні розпірки дротів.

Дефекти зварних контактних з'єднань. Під час експлуатації в контактних з'єднаннях, виконаних зварюванням, причинами виникнення дефектів можуть бути: відхилення від заданих параметрів, підрізи, міхури, непровари, напливи, тріщини, шлакові й газові включення (раковини), незакладені кратери, перепалювання жил проводу, неспіввісність сполучених провідників, неправильний вибір наконечників, відсутність захисних покриттів на з'єднаннях тощо.

Технологія термічного зварювання не забезпечувала надійну роботу зварних з'єднувачів проводів великих перерізів (240 мм² і більше). Це пов'язано з тим, що із-за недостатнього розігрівання в процесі зварювання з'єднуваних проводів і нерівномірного зближення їх кінців відбувається перепалювання зовнішніх повивів, непроварювання, а в місці зварювання з'являються усадкові раковини і шлаки. У результаті знижується механічна міцність зварного з'єднання, що призводить під час механічних навантажень, менших розрахункових, до обриву (перегорання) проводу в петлі анкерної опори.

Дефекти зварювання в петлях анкерних опор є причинами до аварійних відключень повітряних ліній електропередавання за малого терміну їх експлуатації (рис. 7.36). Якщо у зварному з'єднанні відбувається обрив окремих провідників, то це призводить до підвищення перехідного опору контакту та його температури. Швидкість розвитку дефекту в цьому випадку істотно залежатиме від багатьох чинників: значення струму навантаження, тягіння проводів, вітрових і вібраційних дій тощо. На підставі проведених експериментів було встановлено, що:

– зменшення активного перерізу проводу на 20–25 % за рахунок обриву окремих провідників може бути не виявлене під час ІЧ-контролю з вертольота, що пов'язане з малим коефіцієнтом випромінювання дроту, віддаленістю тепловізора від траси на 50–80 м, впливом вітру, сонячною радіацією та іншими чинниками;

– під час відбракування дефектних контактних з'єднань, виконаних зварюванням, за допомогою тепловізора або пірометра

необхідно мати на увазі, що швидкість розвитку дефекту в цих з'єднаннях набагато вища, ніж у болтових контактних з'єднань з натисненням;

- дефекти контактних з'єднань, виконаних зварюванням за надлишкової температури близько 5 °С, виявлені тепловізором під час обстеження ПЛ з вертольота, необхідно класифікувати як небезпечні;

- сталеві втулки, не видалені із зварної ділянки проводів, можуть створювати помилкове враження про можливий нагрів, за рахунок високого коефіцієнта випромінювання поверхні.

Дефекти опресованих контактних з'єднань. У контактних з'єднаннях, виконаних опресовуванням, спостерігається неправильний підбір накінецьників або гільз, неповне заведення жили в накінецьник, недостатня міра опресовування, зсув сталевого сердечника в з'єднувачі проводу тощо. Як відомо, одним із способів контролю опресованих з'єднувачів є вимірювання їх опору постійному струму (рис. 7.37).

Критерієм мінімального контактного з'єднання є опір еквівалентної ділянки цілого проводу. Опресований з'єднувач вважається придатним до експлуатації, якщо його опір не більше ніж в 1,2 разу перевищує еквівалентну ділянку цілого проводу. Під час опресування з'єднувача його опір різко падає, але із збільшенням тиску він стабілізується і змінюється незначно. Опір з'єднувача дуже чутливий до стану контактної поверхні опресованих проводів, тому поява оксиду алюмінію на контактних поверхнях веде до його різкого збільшення і підвищеного тепловиділення.

Незначні зміни перехідного опору контактного з'єднання в процесі опресування, а також пов'язане з цим мале тепловиділення в ньому, вказує на недостатню ефективність виявлення в них дефектів безпосередньо після монтажу за допомогою приладів ІЧ-техніки. У процесі експлуатації опресованих контактних з'єднань наявність у них дефектів сприятиме інтенсивнішому утворенню оксидних плівок із підвищенням перехідного опору й появи локальних перегрівів. Тому можна вважати, що ІЧ-контроль нових опресованих контактних з'єднань не дозволяє виявляти дефекти опресовування і повинен проводитися для з'єднувачів, що пропрацювали в експлуатації певний термін (1 рік і більше).

Основними характеристиками опресованих з'єднувачів є міра опресовування і механічна міцність. Із збільшенням механічної міцності з'єднувача його контактний опір зменшується. Максимум механічної міцності з'єднувача відповідає мінімуму електричного контактного опору.

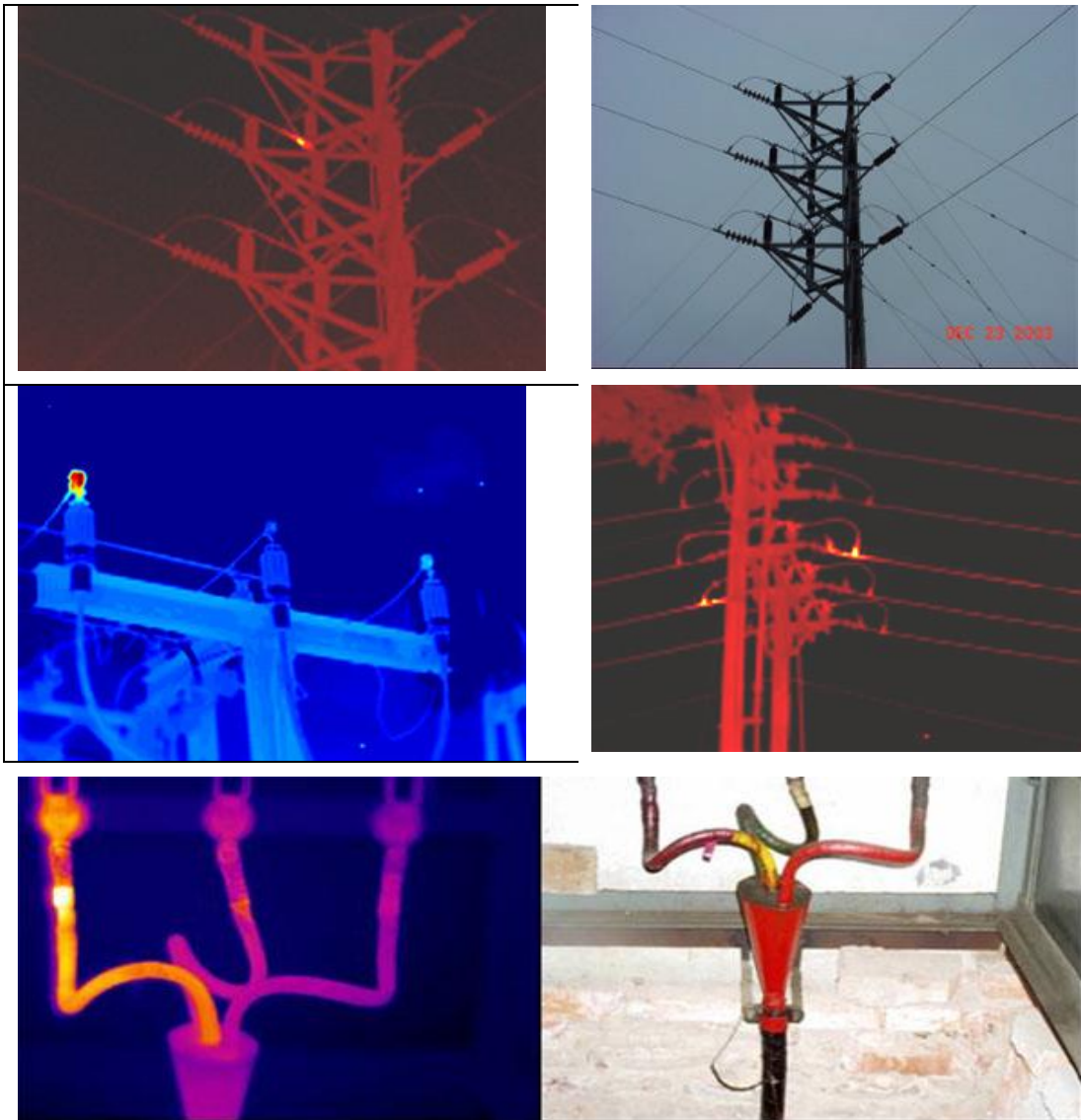


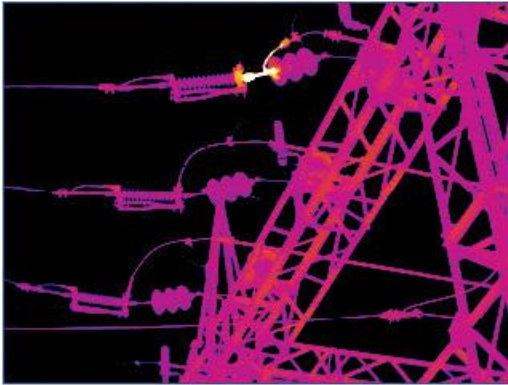
Рис.7.35. Термограми елементів повітряних і кабельних ліній електропередавання

Дефекти болтових контактних з'єднань. Контактні з'єднувачі, виконані за допомогою болтів, найчастіше мають дефекти через відсутність шайб при з'єднанні мідної жили з плоским виводом з міді або сплаву алюмінію, із-за відсутності тарілчастих пружин, внаслідок безпосереднього приєднання алюмінієвого накінецьника до мідних виводів устаткування в приміщеннях з агресивним або вологим середовищем, а також у результаті недостатнього зусилля затягування болтів та ін. Болтові контактні з'єднання алюмінієвих шин на великі струми (3000 А і вище) мають недостатню стабільність в експлуатації. Якщо контактні з'єднання на струми до 1500 А вимагають підтягування болтів один раз на 1–2 роки, то аналогічні з'єднання на

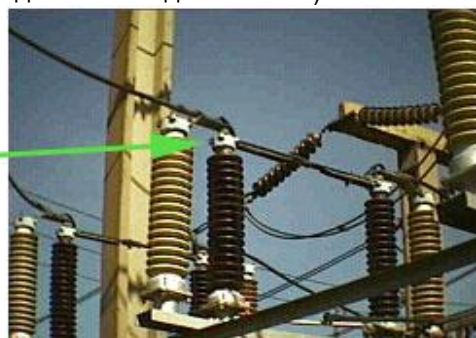
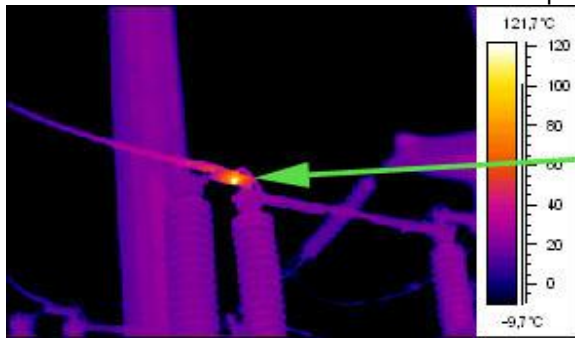
струми 3000 А і вище потребують щорічного перебирання, з неодмінним зачищенням контактних поверхонь. Необхідність у такій операції пов'язана з тим, що в шинопроводах на великі струми (збірні шини електростанцій і т. д.), виконаних з алюмінію, інтенсивніше протікає процес утворення оксидних плівок на поверхні контактних з'єднань.

Появі оксидних плівок на поверхні болтових контактних з'єднань сприяють різні температурні коефіцієнти лінійного розширення сталевих болтів та алюмінієвої шини. Під час проходження шинопроводом струму короткого замикання або в разі змінного струмового навантаження виникає вібрація, особливо за великої протяжності шинопроводу й відбувається деформація (ущільнення) контактної поверхні алюмінієвої шини. У цьому випадку зусилля, що стягує дві контактні поверхні ошиновки, слабшає, шар мастила, що був між ними, випаровується. У результаті утворення оксидних плівок площа зіткнення контактів, тобто кількість і величина контактних майданчиків (точок), через які проходить струм, зменшується, і в той же час збільшується густина струму в них. Вона може досягати тисяч ампер на квадратний сантиметр, унаслідок чого значно зростає нагрів цих точок. Температура останньої точки досягає температури плавлення матеріалів контакту й між контактними поверхнями утворюється крапля рідкого металу. Температура краплі, підвищуючись, доходить до кипіння, простір довкола контактного з'єднання іонізується і може утворитися багатофазне замикання в розподільчому пристрої. Під дією магнітних сил дуга може переміщатися уздовж шин розподільчого пристрою зі всіма витікаючими звідси наслідками.

Досвід експлуатації свідчить, що разом з шинопроводами на великі струми недостатню надійність мають одноболтові контактні з'єднання. Останні, відповідно до ГОСТ 21242–75, допускаються до застосування на номінальний струм до 1000 А, проте реально ушкоджуються вже за струмів 400–630 А. Підвищення надійності цих контактних з'єднань вимагає низки технічних заходів щодо стабілізації їх електричного опору. Процес розвитку дефекту в болтовому контактному з'єднанні, як правило, протікає досить довго й залежить від таких чинників: струму навантаження, режиму роботи (стабільне навантаження або змінне), дії хімічних реагентів, вітрових навантажень, зусиль затягування болтів, наявності стабілізації тиску контактів та ін. Поступове підвищення перехідного опору контактного з'єднання відбувається до певного моменту, після чого відбувається



Контактне з'єднання з перегрівом на порталі підстанції (виміряна з використанням телескопічного об'єктива температура з'єднання складає +225 °С)



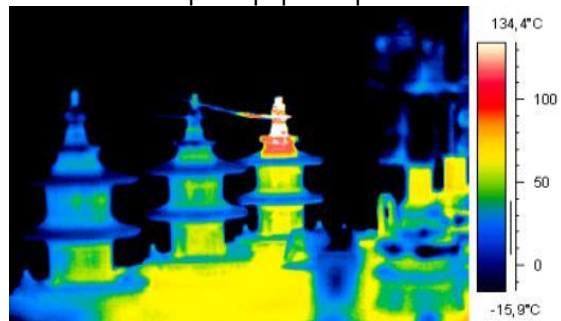
Перегрів болтового з'єднання на лінійному роз'єднувачі (ЗРП 110 кВ)



Перегрів болтового з'єднання шинного моста трансформатора

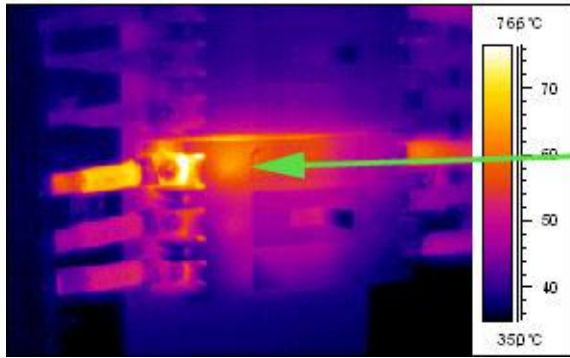


Перегрів контактної з'єднання ВЧ загороджувача

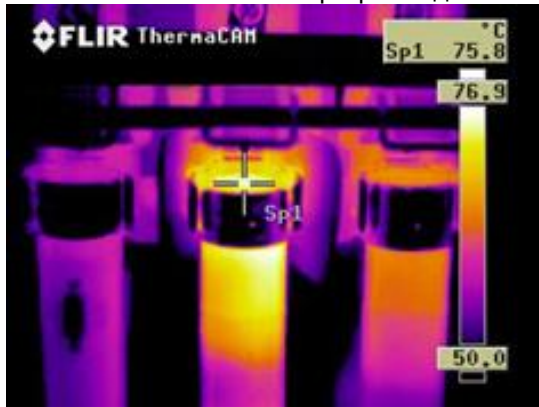


Перегрів контактної з'єднання вводу силового трансформатора

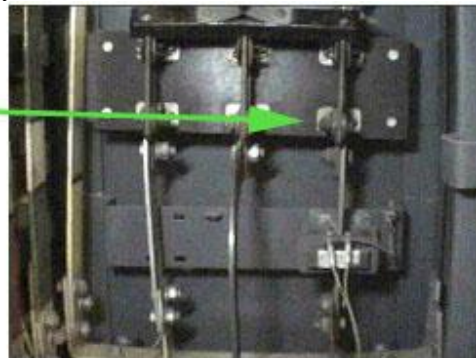
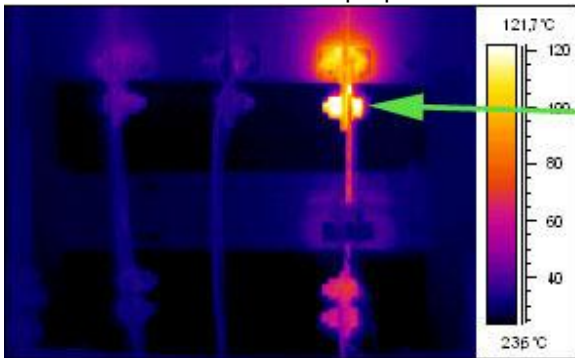
Рис. 7.36. Термограми контактних з'єднань устаткування систем електропостачання



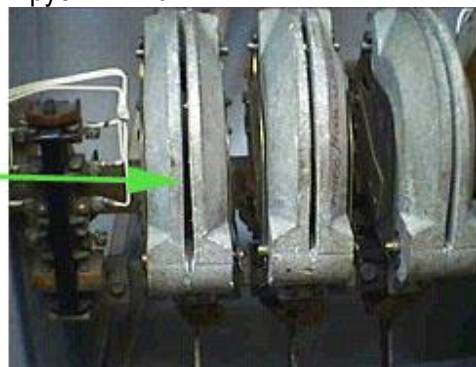
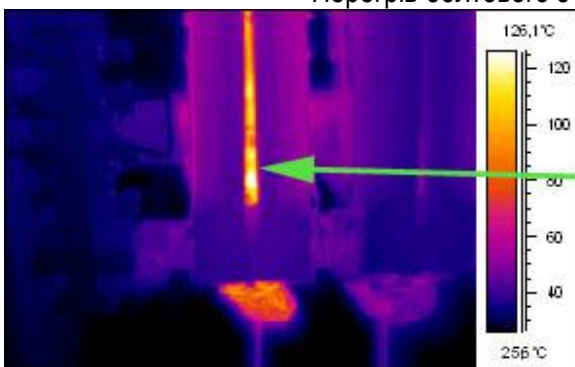
Перегрів ввідного затискача автоматичного вимикача



Перегрів контактної роз'єму запобіжника



Перегрів болтового з'єднання рубильника



Нагрів контакту контактора

Рис. 7.37. Термограми контактних з'єднань апаратів керування та захисту напругою до 1000 В

різке погіршення контактної поверхні з інтенсивним тепловиділенням, що характеризує аварійний стан контактного з'єднання.

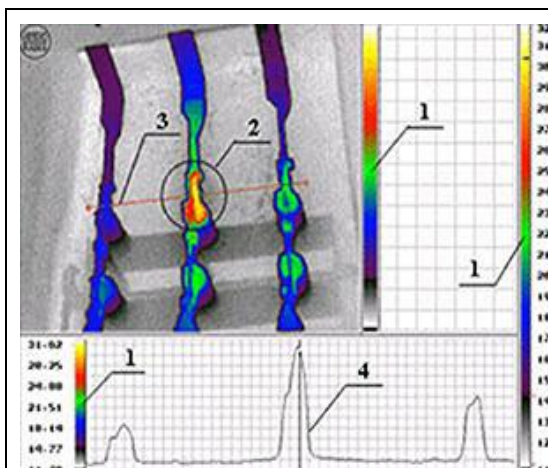
Аналогічні результати були отримані фахівцями фірми «Інфраметрікс» (США) під час теплових випробувань болтових контактних з'єднань. Підвищення температури нагріву в процесі випробувань носило поступовий характер протягом року, а потім наставав період різкого підвищення тепловиділення.

Дефекти контактних з'єднань, виконаних скручуванням. Відмови контактних з'єднань, виконаних скручуванням, виникають, в основному через дефекти монтажу. Неповне скручування проводів в овальних з'єднувачах (менше 4–5 витків) призводить до витягування проводу із з'єднувача та його обриву. Неочищені проводи створюють високий перехідний опір, внаслідок чого виникає перегрів проводу в з'єднувачі з його можливим вигоранням. Траплялися випадки неодноразового висмикування грозозахисного тросу типу АЖС–70/39 із овального з'єднувача марки СОАС–95–3 повітряних ліній 220 кВ, скрученого на меншу кількість обертів.

Дистанційні розпірки. Незадовільна конструкція деяких виконань дистанційних розпірок, дія вібраційних зусиль та інші чинники можуть призвести до перетирання провідників проводу або їх зламування. У цьому випадку через дистанційну розпірку протікатиме струм, значення якого визначатиметься характером і мірою розвитку дефекту.

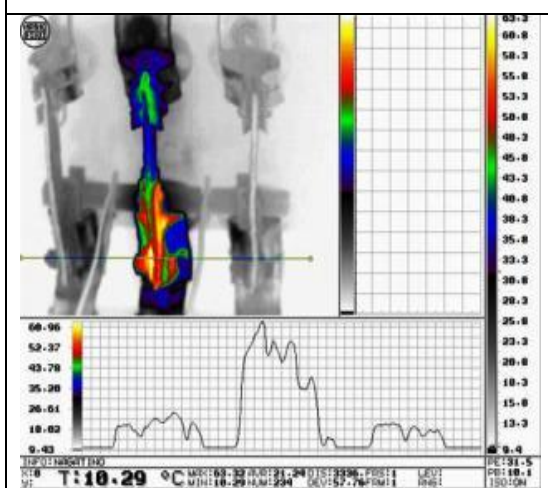
7.4. Аналіз термограм електроустановки

Отримані під час тепловізійного обстеження термограми підлягають аналізу, що включає аналіз виявленого дефекту (дефектів), визначення надлишкової температури, оцінювання дефекту за класифікацією і формулювання відповідних рекомендацій (рис. 7.38).



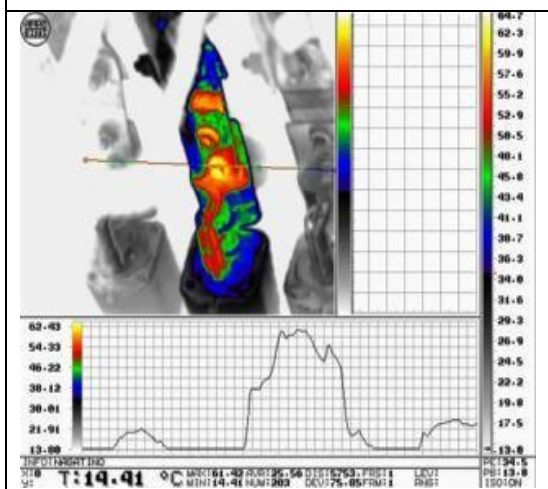
Елементи термограми:

1. Температурна шкала – визначає співвідношення між кольоровою гамою ділянки термограми та її температурою.
2. Зона аномального нагріву – елемент устаткування, що має підвищену температуру(характеризується кольоровою гамою у верхній частині температурної шкали).
3. Лінія температурного зрізу –лінія, що проходить через зону аномального нагріву й вузол, аналогічний дефектному.
4. Температурний графік – графік, що відображає розподіл температури уздовж лінії температурного зрізу.



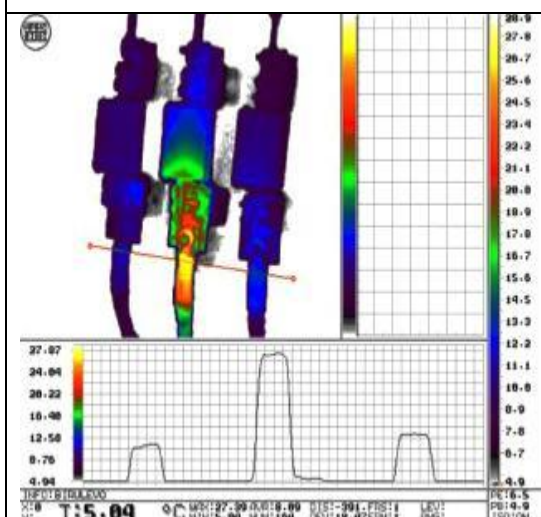
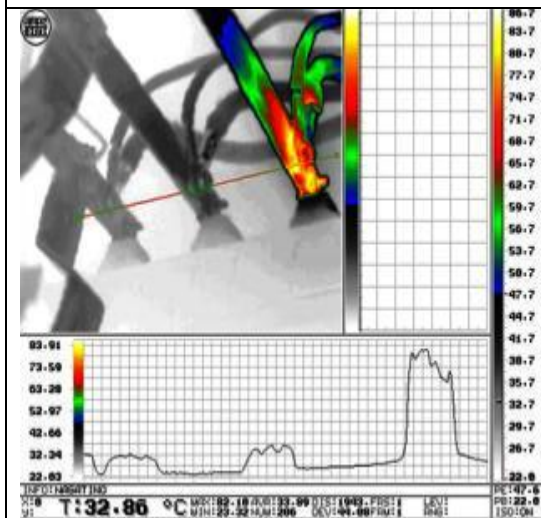
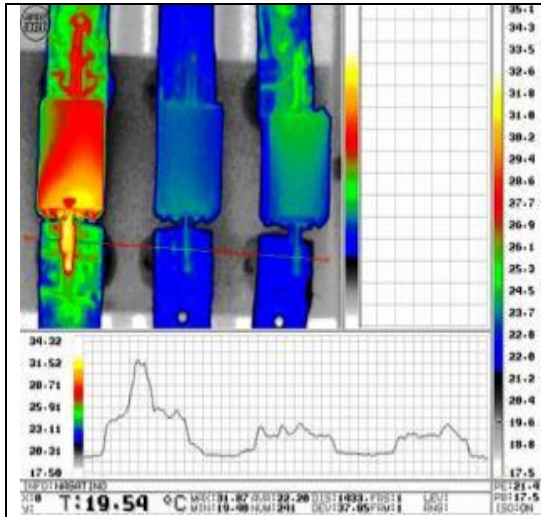
Термограма №1

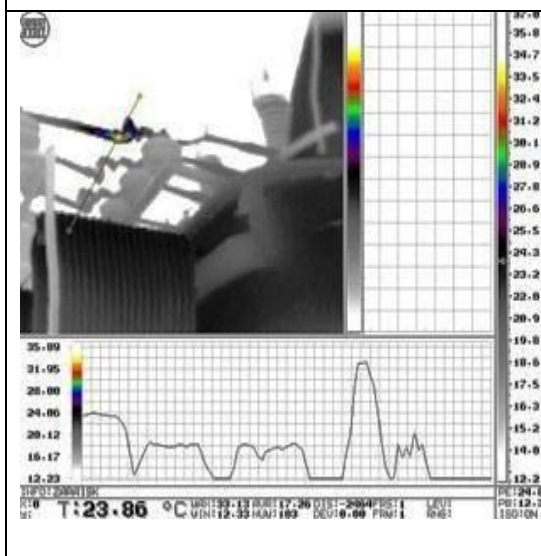
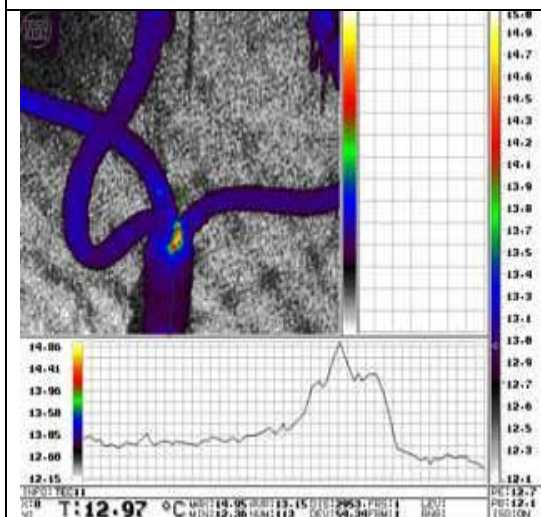
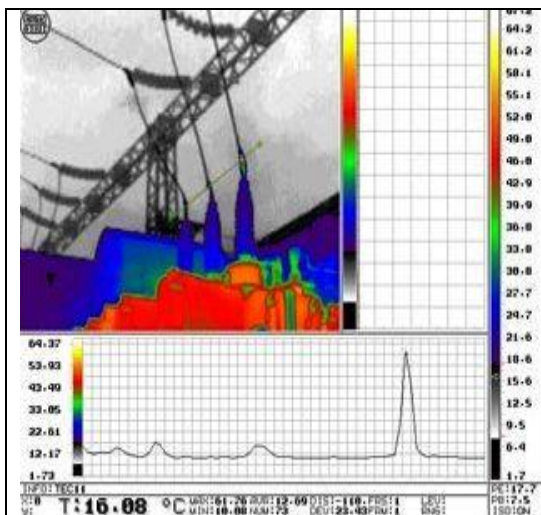
Дата обстеження: XX.XX. 20XX р.
 Елемент: **рубильник**.
 Аналіз дефекту: нагрів шарніра фази В.
 Надлишкова температура: = 32 °С.
 Оцінка дефекту: аварійний.
 Рекомендації: потребує негайного усунення дефекту. Виконати ремонт шарнірного вузла.

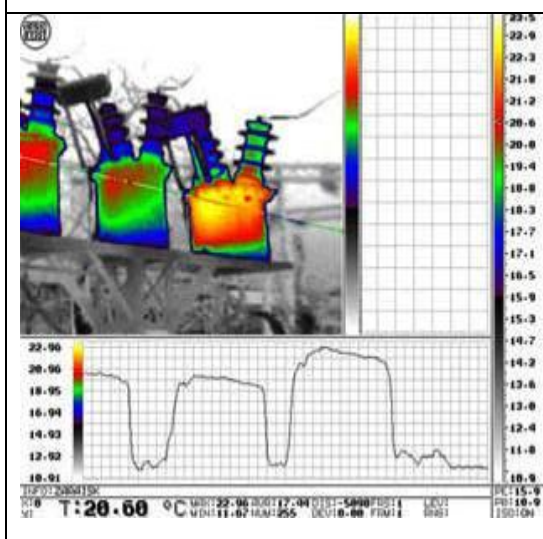
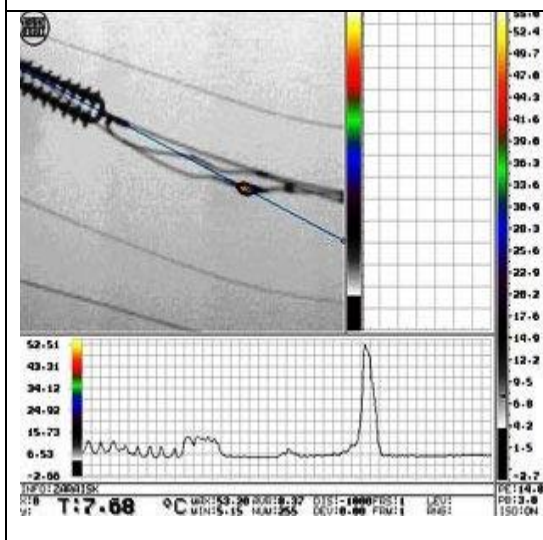
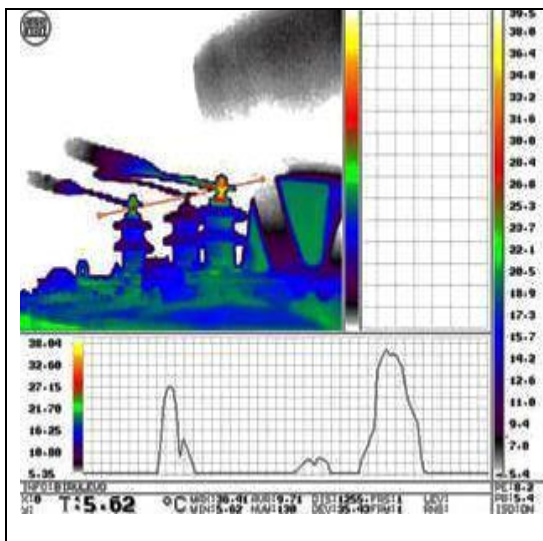


Термограма №2

Дата обстеження: XX.XX. 20XX р.
 Елемент: **група запобіжників**
 Аналіз дефекту: нагрів болтових з'єднань перемички між рубильником і запобіжником фази В.
 Надлишкова температура: =40 °С.
 Оцінка дефекту: аварійний.
 Рекомендації: потребує негайного усунення дефекту. Зачистити й підтягнути болтові з'єднання.







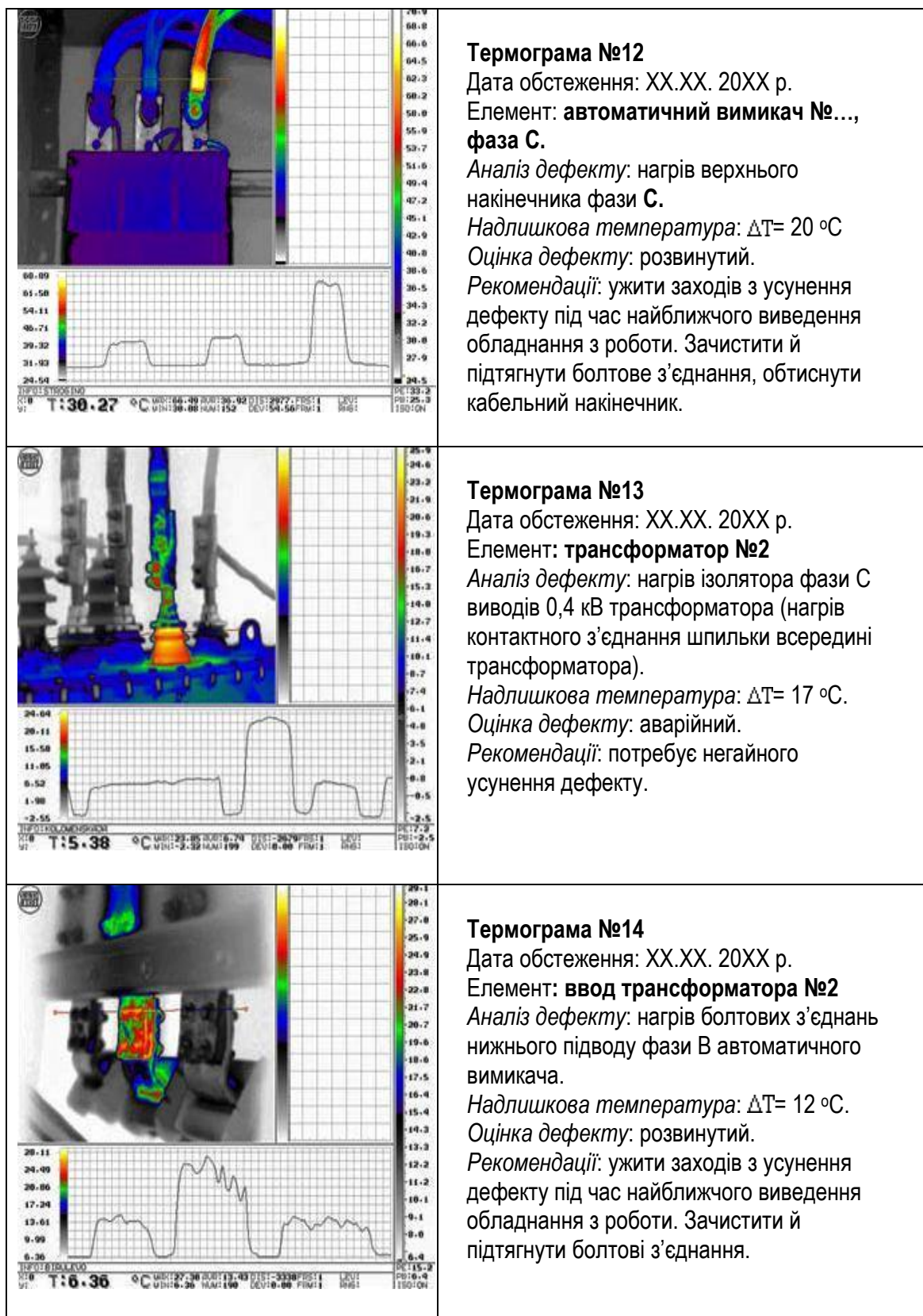


Рис. 7.38. Приклади аналізу термограм електроустаткування

ЛІТЕРАТУРА

1. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Ж. Госсорг. – М. : Мир, 1988. - 416 с.
2. Вавилов В.П. Инфракрасная термографическая диагностика в строительстве и энергетике / В.П. Вавилов, А.Н. Александров. – М. : НТФ «Энергопрогресс», 2003. – 76 с.
3. Бажанов С. А. Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств / С. А. Бажанов. – М. : НТФ «Энергопрогресс», 2000. – 76 с.
4. Криксунов Л. З. Тепловизоры : справочник / Л. З. Криксунов, Г.А. Падалко. – К. : Техника, 1987. – 166 с.
5. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. Затверджено та надано чинності: наказ Міністерства палива та енергетики України від 15 січня 2007 р. № 13
6. СОУ-Н ЕЕ 20.577:2007. Методичні вказівки «Технічне діагностування електрообладнання і контактних з'єднань електроустановок і повітряних ліній електропередавання засобами інфрачервоної техніки». Затверджено та надано чинності: наказ Мінпаливенерго України від 15.02.2006 р. №89.
7. ГКД 34.20.302-2002 «Норми випробування електрообладнання». Затверджено та надано чинності: наказ Мінпаливенерго України від 28.08.2002 р. №503.
8. Гершенгорн А. И. Применение термографии для обнаружения повреждений в электрических и энергетических установках и оборудовании / А. И. Гершенгорн // Энергохозяйство за рубежом. – 1983. – №5. – С. 26–31.
9. О тепловизионном контроле электротехнического оборудования / Д. С. Масленников, А. Г. Константинов, В. Н. Осотов и др. // Электр. станции. – 1985. – №1. – С. 73–75.
10. Кравченко О. А. Метод тепловізійного контролю електрообладнання та його норми / О. А. Кравченко, О. И. Тишко // Электропанорама. – 2003. – №7–8. – С. 41-43
11. Гершенгорн А. И. Применение термографии для обнаружения повреждений в электрических и энергетических установках и оборудовании // Энергохозяйство за рубежом. – 1983. – № 5. – С. 26–31.
12. О тепловизионном контроле электротехнического оборудования / Д.С. Масленников, А.Г. Константинов, В.Н. Осотов и др. // Электр. станции. – 1985. – № 1. – С. 73–75.

**Перелік стандартів
України, СНД, ЄС та Міжнародної електротехнічної
комісії (ІЕС), використаних під час роботи
над посібником**

ДСТУ 2843–94. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення.

ДСТУ 3120–95. Електротехніка. Літерні позначення основних величин.

ДСТУ 2860–94. Надійність техніки. Терміни та визначення

ДСТУ 2861–94. Надійність техніки. Аналіз надійності. Основні положення

ДСТУ 2862–94. Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги

ДСТУ 2864–94. Надійність техніки. Експериментальне оцінювання та контроль надійності. Основні положення

ДСТУ 3004–95. Надійність техніки. Методи оцінки показників надійності за експериментальними даними

ДСТУ 3433–96 (ГОСТ 27.005–97). Надійність техніки. Моделі відмов. Основні положення

ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения

ГОСТ 18322–78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения

ГОСТ 8865–93 (МЭК 85–84). Системы электрической изоляции. Оценка нагревостойкости и классификация.

ГОСТ 27905.1–88 (МЭК 505–75). Системы электрической изоляции электрооборудования. Оценка и классификация.

ГОСТ 27905.2–88 (МЭК 791–84, МЭК 610–78). Системы электрической изоляции. Оценка эксплуатационных характеристик, механизма старения и методы диагностики.

ГОСТ 14312–79. Контакты электрические. Термины и определения.

ГОСТ 18058–80. Двигатели трехфазные асинхронные короткозамкнутые погружные серии ПЭД. Технические условия.

ГОСТ 30195–94. Электродвигатели асинхронные погружные. Общие технические условия.

ГОСТ 403–73. Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Допустимые температуры нагрева частей аппаратов.

ГОСТ 8024–90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний.

ГОСТ 2491–82. Пускатели электромагнитные низковольтные. Общие технические условия.

ГОСТ 9098–78. Выключатели автоматические низковольтные. Общие технические условия.

ГОСТ 12434–83. Аппараты коммутационные низковольтные. Общие технические условия.

ГОСТ 14255–69 (МЭК 144–63). Аппараты электрические на напряжение до 1000 В. Оболочки. Степени защиты.

ГОСТ 16308–84. Реле электротепловые токовые. Общие технические условия.

ГОСТ 17523–85. Реле электромагнитные. Общие технические условия.

ДСТУ ISO 13600–2001. Системи енергетичні, технічні. Основні положення;

ДСТУ ІЕС 6050–551: 2007. Електротехнічний словник термінів

