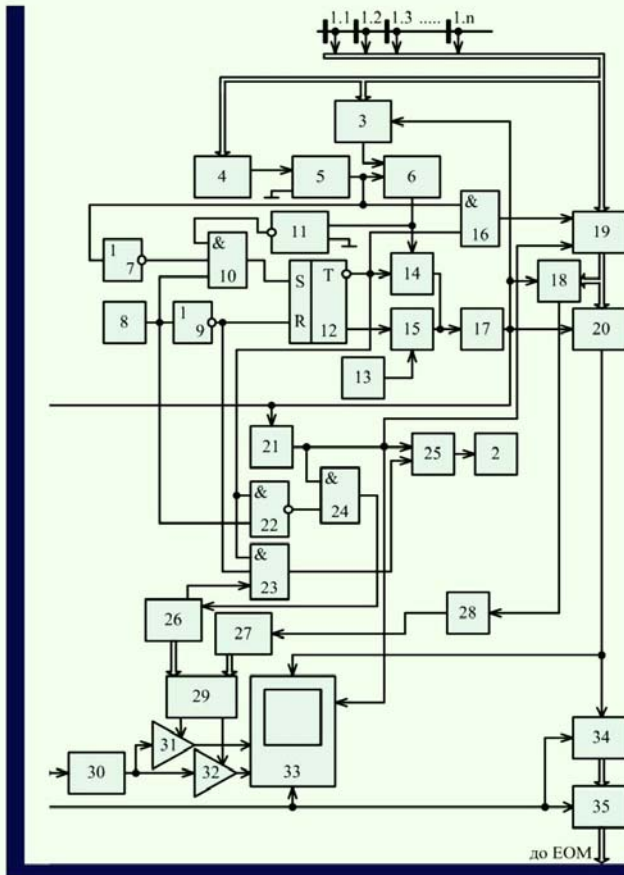


В. В. Грабко, В. В. Грабко

# МЕТОДИ І ЗАСОБИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ, ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ, ЗА ТЕПЛОВИМИ ПОЛЯМИ



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**В. В. Грабко, В. В. Грабко**

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ,  
ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ, ЗА ТЕПЛОВИМИ ПОЛЯМИ**

**Монографія**

УНІВЕРСУМ-Вінниця

2008

УДК 621.384.3

Г 75

*Рецензенти:*

**Р. Н. Кветний**, доктор технічних наук, професор

**В. О. Стороженко**, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 10 від 27.03.2008 р.)

**В. В. Грабко, В. В. Грабко**

Г 75 Методи і засоби для дослідження об'єктів, що обертаються, за тепловими полями: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 155 с.

ISBN 978-966-641-258-7

В монографії здійснено огляд та аналіз існуючих методів і засобів тепловізійного діагностування електрообладнання засобами інфрачервоної техніки. Описані розроблені авторами нові математичні моделі відновлення тепловізійного портрету електрообладнання та побудовані на їх основі пристрої, що дозволяють визначати технічний стан об'єкта дослідження за результатами вимірювань теплових полів.

Книга розрахована на інженерно-технічних працівників електротехнічної промисловості та електроенергетики, що займаються експлуатацією електричного обладнання, а також може бути корисною студентам та аспірантам ВНЗ.

УДК 621.384.3

ISBN 978-966-641-258-7

© В. Грабко, В. Грабко, 2008

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	3
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	5
ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ З ПИТАНЬ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ .....	8
1.1. Методи і засоби тепловізійного діагностування електрообладнання .....	10
1.2. Методи і засоби тепловізійного діагностування об'єктів, що обертаються під час роботи .....	20
1.3. Класифікація тепловізійних засобів для діагностування електрообладнання .....	36
1.4. Висновки та постановка задачі дослідження .....	38
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ОБ'ЄКТІВ, ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ .....	40
2.1. Математичні моделі пристроїв для діагностування об'єктів, що обертаються .....	40
2.1.1. Математична модель тепловізійного пристрою, швидкість сканування поля якого наближається до швидкості об'єкта .....	40
2.1.2. Математична модель тепловізійного пристрою для відновлення портрета теплового поля об'єкта .....	42
2.1.3. Математична модель тепловізійного пристрою, швидкість сканування якого перевищує швидкість обертання об'єкта .....	47
2.2. Математична модель для врахування факторів зовнішнього впливу під час тепловізійних вимірювань .....	49
2.3. Застосування генетичних алгоритмів для врахування факторів зовнішнього впливу під час тепловізійних вимірювань .....	56

2.4. Математична модель для діагностування стану ізоляції об'єкта, що обертається, за його тепловим портретом.....	61
<b>РОЗДІЛ 3. СИНТЕЗ СТРУКТУРНИХ СХЕМ ПРИСТРОЇВ ТЕПЛОВІЗІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ, ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ.....</b>	<b>67</b>
3.1. Вибір математичного апарату, придатного для розв'язання задачі синтезу структури тепловізійного контролю.....	67
3.2. Синтез структур пристроїв для тепловізійного діагностування об'єктів, що обертаються.....	70
3.3. Синтез структур тепловізійних пристроїв для діагностування роторів та статорів електричних машин.....	84
3.3.1. Синтез структури тепловізійного пристрою для діагностування роторів електричних машин.....	84
3.3.2. Синтез структури тепловізійного пристрою для діагностування статорів електричних машин.....	93
3.4. Синтез структури пристрою для врахування впливу зовнішніх факторів при тепловізійних дослідженнях.....	95
<b>РОЗДІЛ 4. МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ПОХИБКИ СИНТЕЗОВАНИХ ПРИСТРОЇВ.....</b>	<b>106</b>
4.1. Мікропроцесорний засіб для тепловізійного діагностування об'єктів, що обертаються.....	107
4.2. Мікропроцесорний засіб для тепловізійного діагностування роторів електричних машин.....	112
4.3. Оцінка похибок першого і другого роду при визначенні температури точок теплового портрета електрообладнання.....	115
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>120</b>
<b>ЛІТЕРАТУРА.....</b>	<b>122</b>
Додаток А.....	142
Додаток Б.....	143
Додаток В.....	148
Додаток Г.....	151

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП	аналого-цифровий перетворювач
БОП	блок оперативної пам'яті
ВКБ	відеоконтрольний блок
ЕОМ	електронно-обчислювальна машина
ЗБ	запам'ятовуючий блок
ІЧ	інфрачервоний
КД	кроковий двигун
ПВЗ	пристрій вибірки-зберігання
ПЗБ	постійний запам'ятовуючий блок
ФН	функція належності
ЦАП	цифро-аналоговий перетворювач

## ВСТУП

В сучасних умовах економічного розвитку нашої держави постає питання продовження терміну служби всього енергоємного обладнання, зокрема електроенергетичного. Ті капіталовкладення, які здійснюються в теперішній час в електроенергетичну галузь, є незначними і не вирішують загальної проблеми надійної експлуатації електрообладнання, яке в переважній більшості було введено в роботу ще в радянські часи.

Очевидно, що повне зняття з експлуатації електрообладнання, яке відпрацювало нормативний термін, неможливе, особливо якщо воно знаходиться в задовільному стані і може попрацювати ще деякий час. З іншого боку, експлуатація такого обладнання є небезпечною і може мати важкі наслідки. Тому постає питання експлуатації електрообладнання за технічним станом, що передбачає здійснення його діагностування в процесі роботи.

Для діагностування електрообладнання застосовуються різні методи та засоби. Як показує досвід, не існує єдиних підходів до визначення технічного стану того чи іншого виду електрообладнання. В деяких випадках таке діагностування взагалі здійснити неможливо.

Відомо, що в багатьох випадках для визначення технічного стану електрообладнання необхідно виводити з роботи. Одним із підходів до діагностування електрообладнання, який особливо інтенсивно розвивається в останні роки, є застосування тепловізійних методів визначення технічного стану електрообладнання. Переваги такого підходу очевидні, оскільки тепловізійні методи придатні для виявлення дефектів будь-якого електрообладнання дистанційно та без виведення його з роботи. Але на тепловізійні вимірювання мають вплив фактори навколишнього середовища, які спотворюють загальну інформацію про тепловий портрет об'єкта дослідження, а отже і про його технічний стан. До таких факторів впливу відносяться температура навколишнього середовища, швидкість вітру, вологість, прозорість середовища тощо.

Тепловізійні обстеження електричних машин в процесі їх роботи мають специфічний характер. Очевидно, що теплове поле

ротора, що обертається, неможливо отримати за допомогою звичайних тепловізійних засобів, які дозволяють вимірювати статичні теплові поля.

Крім того, в процесі роботи електричних машин навіть при наявності спеціальних тепловізійних засобів неможливо отримати інформацію про дефекти, що розвиваються в обмотках електричних машин в точках, недоступних безпосередньо для тепловізійного вимірювання.

Вказані проблеми обумовлюють актуальну наукову задачу – підвищення точності та розширення функціональних можливостей тепловізійних пристроїв за рахунок удосконалення їхніх елементів та структур.

Дослідженню та створенню методів та засобів тепловізійного діагностування присвячена велика кількість робіт, авторами яких є В. О. Стороженко, С. О. Воронов, Б. І. Мокін, А. Б. Власов, В. Г. Аракелян, В. П. Вавілов, В. В. Ключев, В. О. Порєв, Д. А. Рапопорт та багато інших.

# РОЗДІЛ 1

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ З ПИТАНЬ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

Відомо, що працездатність електрообладнання визначається його технічним станом і є пов'язаною із залишковим робочим ресурсом.

В теперішній час процес діагностування технічного стану є складним і мало автоматизованим.

Метою технічного діагностування електрообладнання є забезпечення оптимальної економічної його експлуатації при забезпеченні потрібної надійності і зменшенні до мінімуму витрат на технічне обслуговування та ремонт [1].

Цієї мети можна досягти, відслідковуючи технічний стан електрообладнання в процесі експлуатації.

Задачі технічної діагностики в системі експлуатації електрообладнання полягають у встановленні необхідності заміни змінних деталей і вузлів, проведенні регулювання, виконанні поточних та капітальних ремонтів, якості їх виконання, встановленні причин можливих відмов електрообладнання [2].

Очевидно, що будь-яка відмова електрообладнання, що викликає створення аварійної ситуації, призводить до значних втрат, пов'язаних із призупиненням електропостачання, псуванням обладнання та продукції тощо.

В сучасних умовах в експлуатації електрообладнання здійснено перехід від системи планово-попереджувальних ремонтів, згідно з якою технічне обслуговування і ремонт електричного обладнання здійснювалось через певні встановлені терміни, до системи обслуговування за технічним станом електричного обладнання [3].

Переваги такого підходу очевидні, оскільки відпадає необхідність виконання комплексу профілактичних робіт на обладнанні, яке має задовільний технічний стан. Відомо, що будь-яке втручання в електрообладнання, проведене навіть фахівцями високого рівня, призводить до зниження надійності і зменшення терміну служби, оскільки при цьому порушуються з'єднання і відбувається

нове припрацювання деталей, що супроводжується інтенсивним спрацюванням елементів конструкцій. Крім того, в процесі виконання робіт можливе ушкодження окремих деталей та вузлів.

Перехід до технічного обслуговування за станом передбачає необхідність отримання додаткової інформації про об'єкт, що експлуатується, а це досягається декількома шляхами. Наприклад, для отримання певної інформації об'єкт контролю оснащується рядом додаткових сенсорів, сигнали з яких виводяться в систему збору і обробки інформації.

Одним із ефективних методів визначення технічного стану обладнання є застосування тепловізійної техніки [4–7], яка дозволяє за тепловими портретами робити висновки про технічний стан обладнання.

Для енергетичної галузі застосування тепловізійної техніки є особливо актуальним, оскільки такий підхід дозволяє дистанційно встановлювати технічний стан обладнання, що має переваги з точки зору безпеки проведення досліджень на працюючому електричному обладнанні.

Слід зазначити, що тепловізійні дослідження широко застосовуються в різних сферах людської діяльності, зокрема для дистанційного неруйнівного контролю будівельних конструкцій [8], для контролю трубопроводів [9], труб поверхні нагріву котлів [10], поверхні турбін [11], теплопроводів [12], паропроводів [13], в системах пожежної сигналізації [14].

В роботах [15 – 20] показано широке застосування теплового неруйнівного контролю в машинобудуванні, металургії, електроніці, залізничному транспорті, нафтохімії, медицині, мистецтві, військовій техніці тощо.

## **1.1. Методи і засоби тепловізійного діагностування електрообладнання**

Як зазначалось, серед методів та засобів неруйнівного контролю і технічної діагностики тепловий контроль займає важливе місце. Основними його перевагами є висока безпека роботи (дистанційний контроль), незначні експлуатаційні затрати, недороге технічне обслуговування, низькі інспекційні витрати [15].

Система технічного діагностування з використанням приладів інфрачервоної техніки забезпечує контроль стану обладнання та споруд без виводу їх з роботи, виявлення дефектів на ранній стадії, скорочення затрат на технічне обслуговування за рахунок прогнозування строків та об'єму ремонтних робіт [21].

За допомогою приладів інфрачервоної (ІЧ) техніки можна виявити та оцінити неполадки в генераторах, в силових трансформаторах та автотрансформаторах, в масляних та повітряних вимикачах, в вентильних розрядниках, в трансформаторах струму, в конденсаторах, в високочастотних загороджувачах, в кабельному господарстві електростанцій, на роз'єднувачах, на від'єднувачах та ін. Досвід енергосистем показує, що для якісного обстеження електрообладнання підстанцій необхідно мати портативні тепловізори з високою роздільною здатністю та комп'ютерною обробкою результатів вимірювання, а також необхідна висока кваліфікація оператора. При діагностуванні з використанням приладів ІЧ техніки повинні враховуватись конструкція обладнання, що контролюється, та режим його роботи. Так, при контролі електрообладнання результати вимірювань необхідно порівнювати з нормативними даними та враховувати не тільки струмові навантаження, але й зовнішній фактор: швидкість вітру, температуру навколишнього середовища, вологість, матеріал об'єкта, що досліджується, та ін.

Для огляду електрообладнання, виявлення зон нагріву та прискорення процесу контролю на підстанціях спочатку слід застосовувати тепловізор, а потім пірометр дальньої дії для визначення температури нагрітого тіла [22].

Набутий досвід тепловізійного обстеження електрообладнання

сформовано у вигляді нормативного документа [23].

В ряді робіт сконцентровано досвід і запропоновані підходи до тепловізійного діагностування електрообладнання.

Так, в роботі [22] вказується на застосування тепловізійного контролю високовольтного силового електрообладнання. В результаті аналізу виявлено, що більшість дефектів має місце через неякісні контактні з'єднання.

Досвід застосування ІЧ діагностування у ВАТ “Луганськобленерго” показує, що методами тепловізійного контролю виявляються дефекти на ранніх стадіях, коли традиційними методами спрогнозувати погіршення технічного стану об'єктів дослідження неможливо. Зазначається також виявлення випадків погіршення ізоляції, які не підтверджувались традиційними дослідженнями [24].

В роботі [25] зроблено висновок, що тепловізійне сканування доцільніше проводити, коли навантаження електрообладнання перевищує 40% і пропрацювало воно не менше 1 години. Виявлена обернено пропорційна залежність числа дефектних контактних з'єднань в залежності від класу напруги.

В ряді інших робіт [26–30] вказується на високу оперативність, мобільність діагностування електричного обладнання тепловізійним методом та виявлення дефектів, що розвиваються, на ранніх стадіях.

Надзвичайно ефективним є застосування тепловізійної техніки для дослідження стану повітряних ліній електропередач, внаслідок чого продуктивність праці зростає в 5–10 разів і більше [31–34]. Крім того, застосування тепловізора дозволяє здійснювати відбракування підвісних ізоляторів гірлянд.

Не менш ефективним є застосування тепловізійного діагностування до засобів захисту від перенапруг [35, 36], на яких покладені робочі функції в аварійних та перехідних режимах роботи електромереж.

Зазначимо, що наявність температурних аномалій є важливою ознакою появи дефекта.

При тепловізійному дослідженні високовольтних маслонаповнених вводів було зроблено висновок, що саме такий підхід дозволяє виявити пошкодження, що розвиваються, в той час як

типовий електричний та хроматографічний методи контролю не показують відхилень параметрів за допустимі межі [37, 38].

Тепловізійний контроль дозволяє виявити приховані внутрішні дефекти ізоляції силових трансформаторів. В роботах [39, 40] показано, що за допомогою тепловізора вдається виявляти яскраво виражені локальні нагрівання стінок бака трансформатора, що свідчить про локальне пошкодження ізоляції, яке можна виявити лише розбираючи конструкцію.

Не менш ефективним є тепловізійне діагностування систем охолодження силових трансформаторів. Тільки такий підхід дозволяє виявляти на працюючому обладнанні неефективність охолодження через забруднення ребер радіаторів, дефект циркуляційного маслососа, внаслідок чого температура підвищується, та ступінь забруднення фільтрів і патрубків, що призводить до перекосу в теплових полях системи охолодження [41–43].

В роботі [44] на прикладі високовольтних трансформаторів напруги пропонується підхід, який передбачає порівняння температурних значень об'єкта контролю, отриманих розрахунковим шляхом, з даними, отриманими при тепловізійному вимірюванні. Внаслідок виконаних дій визначаються розбіжності і робиться висновок про наявність або відсутність дефекту.

Для здійснення тепловізійних вимірювань застосовуються тепловізори як відомих зарубіжних виробництв (AGEMA, LAND, Flir Systems), так і виробників країн СНД (ЗАТ “Спектр”, НПВ “Оріон”, ЦНТИ “Електрон”, Даркос та інші) [31].

Методи та засоби отримання тепловізійної інформації в залежності від природи ІЧ випромінювання, що використовується системою для отримання корисної інформації, можна розділити на три великі групи: активні, пасивні та комбіновані [45, 46]. В ІЧ системах, робота в яких основана на активному методі, діагностований об'єкт опромінюється джерелом ІЧ випромінювання, параметри якого відомі. Системи, що працюють на основі пасивного методу отримання тепловізійної інформації, використовують власне випромінювання діагностованого об'єкта.

ІЧ системи, що використовують випромінювання об'єкта

освітленого природними джерелами, відносять до комбінованих. Випромінювання, що використовується для отримання інформації про об'єкт при такому методі, має дві складові: власне випромінювання та випромінювання від декількох джерел.

Найбільш широке розповсюдження отримали системи, що використовують пасивний метод завдяки невеликим габаритам, малій потужності споживання, зручності обслуговування і експлуатації та відносно низькій вартості.

Пасивні методи отримання тепловізійної інформації ґрунтуються на дистанційному вимірюванні параметрів потоку випромінювання об'єкта. До цих параметрів відносяться абсолютне значення цього потоку і його спектральний розподіл. В зв'язку з цим пасивні методи отримання тепловізійної інформації ділять на енергетичні і спектральні [47, 48].

Найбільше розповсюдження для задач діагностики отримали енергетичні методи, оскільки для своєї реалізації вони потребують найменшу кількість оптико-електронної апаратури (використовується один спектральний діапазон сприймання ІЧ випромінювання). Спектральні методи дають найменші похибки вимірювання температури, але на виготовлення засобів, що реалізують ці методи, потрібні великі затрати. Похибки, що виникають при використанні енергетичних методів, легко компенсувати за рахунок отримання апріорної інформації про випромінювальну здатність групи об'єктів діагностування.

В ряді робіт [49–57] наведені технічні характеристики тепловізорів провідних фірм світу, здійснено їх порівняльний аналіз, а також даються характеристики деяких тепловізорів, що виробляються в країнах СНД. Із літератури бачимо, що закордонні тепловізори мають ряд переваг – високу точність вимірювань та роздільну здатність, відсутність рухомих механічних частин, а отже, високу надійність, відсутність необхідності застосування охолоджувальних речовин тощо. Тепловізори ж вітчизняного виробництва мають задовільну точність роботи, а тому теж широко застосовуються в тепловізійних дослідженнях.

Слід зазначити, що вартість сучасних тепловізорів провідних

фірм світу вимірюється сотнями тисяч гривень, в той час як вартість тепловізорів країн СНД на порядок нижча.

Серед найпоширеніших методів тепловізійного контролю застосовується метод, що передбачає безпосереднє вимірювання ІЧ випромінювання за допомогою спеціальних сенсорів, які перетворюють інформацію, що надходить, в електричний сигнал з подальшою його обробкою [47,48].

Відомі методи вимірювання температури поверхні оптичними і ІЧ пірометрами [58], які дозволяють безконтактно здійснювати замірювання шляхом наведення чутливого елемента на об'єкт і реєстрації його теплового випромінювання. Але таким шляхом неможливо виміряти температуру одночасно по всій досліджуваній поверхні, оскільки кількість чутливих елементів обмежена.

В роботі [59] запропоновано метод вимірювання температури, який передбачає розкладання вимірюваного кольорового зображення на три колірні компоненти – червону, зелену і синю. Цифрові значення компонент порівнюються з еталоном і з найближчих значень визначається температура поверхні. Метод дозволяє отримувати високу роздільну здатність, але застосовується переважно в металургії.

Інший метод вимірювання температури, який передбачає вимірювання випромінювання об'єкта, що реєструється під кутом до нормалі поверхні випромінювання, рівному повному куту падіння, з подальшою модуляцією та обробкою ортогонально поляризованих компонент випромінювання об'єкта [60]. Метод має обмеження, оскільки застосовується лише для оптично гладких поверхонь.

Відомий метод вимірювання температури [61], згідно з яким температура визначається по відношенню до інтенсивності монохроматичного випромінювання і першої похідної інтенсивності випромінювання по довжинах хвиль, яка береться для значення тієї ж довжини хвилі, що і величина інтенсивності монохроматичного випромінювання.

Недоліком реалізації такого методу є залежність вимірювань від кута направлення на джерело випромінювання, оскільки при зміні цього кута змінюється положення зображення спектра

випромінювання поверхні детектора спектра випромінювання.

Для дистанційного вимірювання температури шляхом опромінення сенсора з фотопровідного матеріалу зі зміною опору останнього, в роботі [62] запропоновано метод тепловізійного вимірювання, обмеженням якого є низька максимальна швидкість сканування об'єкта, обумовлена великим часом регенерації термочутливого шару сенсора.

В роботі [47] викладено метод вимірювання температури, ідея якого полягає у зміні товщини тонкої масляної плівки від температури ІЧ випромінювання, що реєструється, яка змінює температуру масляної плівки. Швидкість випаровування масла, а отже, і товщина плівки залежить від температури. При цьому масляна плівка додатково освітлюється однорідним потоком видимого світла. Інтерференційна картина, що спостерігається, залежить від товщини масляної плівки, а отже, і від температури.

Недоліком такого методу є необхідність періодично відновлювати масляну плівку через випаровування масла.

Слід зазначити, що наведений метод реалізується у евапорографах.

Відомий метод безконтактного вимірювання температури [63], який полягає у вимірюванні інтенсивності власного випромінювання об'єкта не менш, ніж при трьох температурах в декількох спектральних інтервалах, причому замість однієї з інтенсивностей може вимірюватись повне випромінювання, яке описується законом Стефана–Больцмана. Число виміряних інтенсивностей та кількість значень температур, при яких здійснюються вимірювання, повинні відповідати кількості невідомих параметрів, що визначають інтенсивність випромінювання.

Процедура визначення температури цим методом вимагає тривалого проміжку, спеціальних умов, а тому застосовується тільки в спеціальних вимірюваннях.

Для реалізації методів тепловізійного контролю об'єктів розроблені різноманітні структури тепловізійних пристроїв.

Так, в ряді робіт [64–71] запропоновано конструкції тепловізорів, які мають незначні відмінності в структурах, але в

загальному спільний принцип дії. В них ІЧ сигнал з об'єкта контролю надходить на опто-електронну систему прийому сигналу з опто-механічною розгорткою, звідки електричний сигнал через різноманітні фільтри та перетворювачі, що покращують певні характеристики тепловізорів, подається на відеоконтрольний блок (ВКБ), який забезпечує виведення сигналу в зручній для спостереження формі. В окремих структурах мають місце блоки, що забезпечують збереження отриманої інформації.

Відома конструкція тепловізора із зонним скануванням [72], особливістю якого є застосування в опто-механічній розгортці багатогранної призми, яка обертається в процесі сканування об'єкта.

Основним обмеженням запропонованої структури є суттєве погіршення якості зображення при обертанні скануючої призми.

Відомий пристрій для вимірювання температури [73], який дозволяє визначати температуру контрольованого об'єкта з ефективною довжини хвилі пропускання переналагоджувального монохроматора в момент порівняння енергії випромінювання в фіксованому довгохвильовому спектральному інтервалі та енергії випромінювання, що потрапляє на фотоприймач після переналагоджувального монохроматора.

Подібним чином працює пристрій для вимірювання температури [74], принцип роботи якого полягає у розкладанні спектра досліджуваного випромінювання за допомогою монохроматора та визначенні довжини хвилі, при якій інтенсивність випромінювання на виході монохроматора є максимальною.

Обмеженням цих двох пристроїв є наявність значної методичної похибки вимірювань температури та специфічна галузь застосування – в електроламповому виробництві та металургії.

В роботі [75] запропоновано структуру тепловізора, в якій реалізовано блок відображення інформації, що дозволяє створювати ефект квазіоб'ємності (рельєфності) панорамної картини випромінювання досліджуваного об'єкта. Ця розробка орієнтована в основному на дослідження процесів горіння.

Відомий пристрій для безконтактного вимірювання температури [76], в якому передбачається вимірювання ІЧ випромінювання та

розкладання його на три спектральних потоки з подальшим їхнім порівнянням і визначенням фактичної температури об'єкта контролю. Метод, що реалізований в цьому пристрої, має обмеження, обумовлене складністю зрівняння контрольованих температур по трьох вимірних попередньо спектральних потоках. Крім того, такий підхід дозволяє застосування вказаного пристрою для вимірювання температур в металургії, скловарному виробництві тощо.

Відома група тепловізійних пристроїв [77–79], особливістю яких є застосування в якості ІЧ сенсора багатоеlementного приймача випромінювання. Такі пристрої дозволяють покращити якість зображення, оскільки компенсується нерівномірність стрічок растру, але сам багатоеlementний приймач, як і систему розгортки зображення реалізувати складно, що обмежує їх застосування.

В роботі [80] запропоновано структуру тепловізора, в якому з метою спрощення приймача теплового випромінювання він реалізований в матричній формі на основі піроелектричних детекторів. Складністю реалізації такої конструкції є проблема підбору детекторів з однаковими технічними характеристиками.

Іншим типом пристрою для вимірювання температури є тепловізор з матричним ІЧ приймачем, сигнал на який потрапляє після обробки ІЧ випромінювання об'єкта в блоці спектрального розкладання. Певним обмеженням такого підходу є складність досягнення інваріантності пристрою для динамічної зміни кута направлення на джерело випромінювання [81].

Матричний тепловізор, що містить фотоприймальну матрицю з креостатною системою охолодження, вихідні сигнали якої попередньо обробляються в електронних блоках з подальшим комп'ютерним аналізом, опубліковано в роботі [82]. Відзначається ряд позитивних технічних характеристик такого пристрою та широка галузь застосування.

Аналогічний тепловізійний пристрій, що містить фотоприймальну матрицю, креостат та електронний блок обробки сигналів, який під'єднаний до комп'ютера, описано в роботі [83]. Основним обмеженням цього пристрою є невисока контрастність зображення при вимірюванні неоднорідно розподілених температур в

діапазоні 20–40°C, що знижує область його застосування.

Пристрої для реєстрації теплового випромінювання, принцип дії яких полягає у визначенні температури об'єкта опосередковано через ємність конденсатора, яка змінюється внаслідок зміни геометрії конденсатора під впливом теплового випромінювання, розроблені в роботах [84–87]. Кожен із цих тепловізорів має свої особливості реалізації, але всі вони мають спільне обмеження – висока складність реалізації термочутливого елемента, роль якого виконує конденсатор спеціальної конструкції, одна із обкладок якого переміщується під дією ІЧ випромінювання.

Слід зазначити, що для дистанційного вимірювання температури використовуються пірометри [88–91], але вони дозволяють вимірювати температуру лише в конкретних точках і не дають цілісного теплового портрета об'єкта дослідження. Практика експлуатації тепловізійних засобів показує, що пірометри в переважній більшості застосовуються для ідентифікації окремих місць досліджуваних об'єктів після температурного контролю за допомогою тепловізорів.

Всі вищезазначені тепловізійні пристрої мають спільне обмеження – вони не дозволяють однозначно зробити висновок про температуру діагностованого електрообладнання в залежності від його завантаження та ступеня впливу факторів навколишнього середовища.

Сучасні тепловізори дозволяють вимірювати теплові поля з точністю до 0,1°C, а отже відповідно здійснювати діагностування електрообладнання, завантаження якого не перевищує 5 %.

В теперішній час в енергосистемах використовуються рекомендації, згідно з якими перепад значень температури, приведеної до 50 % або 100 % завантаження електрообладнання, пропорційний квадрату струму [92]

$$\frac{\Delta T_x}{\Delta T_0} = \left( \frac{I_n}{I_\phi} \right)^2,$$

де  $\Delta T_x$  – прогнозоване перевищення температури поверхні об'єкта при номінальному струмі  $I_n$ ;  $\Delta T_0$  – виміряне перевищення

температури поверхні об'єкта при реальному струмі  $I_{\phi}$ .

Відомо, що в процесі досліджень на результати вимірювання теплових полів можуть впливати – температура навколишнього середовища, вологість, швидкість вітру, прозорість середовища, габарити об'єкта тощо. Очевидно, що складно порівняти результати досліджень, отримані для одного і того ж об'єкта, наприклад в умовах низької температури і високої швидкості вітру та за умов відсутності вітру і малої прозорості середовища.

Нормативні документи [23, 92–94] не дають рекомендацій щодо швидкості впливу вітру на температуру досліджуваної поверхні об'єкта, хоча вплив вітру очевидний. Не містять зазначені матеріали рекомендацій відносно врахування інших факторів впливу.

В роботі [95] наведена емпірична формула, яка дозволяє враховувати вплив швидкості вітру на результати вимірювань

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{0,448}.$$

Застосування цієї формули можливе, якщо вимірювання перевищення температури об'єкта  $\Delta T_2$  здійснювались при швидкості вітру  $V_2$ , а перерахунок на безвітряну погоду ( $V_1=0$ ) дозволяє отримати скориговане значення температури  $\Delta T_1$ .

Реальні визначення температури об'єкта контролю за наведеними формулами з врахуванням завантаження обладнання та швидкості вітру при вимірюваннях дають похибки вимірювань 200 % і більше.

Подібна оцінка таким підходам викладена в роботах [96, 97].

В роботі [42] зазначається про необхідність врахування факторів впливу при здійсненні тепловізіяних досліджень.

В статтях [98, 99] запропоновано підходи, які дають можливість визначати фактичну температуру контрольованого об'єкта з врахуванням завантаження електрообладнання та температури навколишнього середовища.

В запропонованих моделях теплообмін визначається за рахунок випромінювання, конвекції та тепловіддачі, які характеризують вплив навколишнього середовища та завантаження електрообладнання на результати вимірювань. Розроблено комп'ютерну програму, яка

дозволяє автоматизувати процес ідентифікації температурного портрета об'єкта. Слід зазначити, що вказані моделі вимагають врахування багатьох параметрів і вимагають проведення серій розрахунків. В той же час ці моделі не дозволяють враховувати вплив інших факторів, що мають місце під час проведення теплових вимірювань.

Розв'язок подібної задачі, але для врахування зовнішніх факторів при проведенні теплового контролю трубопроводів, наведений в [100].

Викладений підхід передбачає розв'язання чисельними методами рівняння теплопровідності за сформульованими граничними і початковими умовами.

Очевидно, що елементи запропонованої математичної моделі можна використати і при розв'язанні подібних задач для діагностування електрообладнання.

Крім задач вимірювання теплового поля портрета електрообладнання та встановлення рівня працездатності у відповідності з [23, 93] в літературі зустрічаються публікації, що характеризують більш широке використання результатів тепловізійних досліджень.

Так, в роботах [101, 102] запропоновано математичні моделі, з яких в результаті тепловізійного контролю можливо оцінити експлуатаційні показники надійності контактних з'єднань.

Очевидно, що застосовуючи інші підходи і розроблюючи математичні моделі, можливо розв'язувати інші актуальні задачі з використанням засобів тепловізійних досліджень.

## **1.2. Методи і засоби тепловізійного діагностування об'єктів, що обертаються під час роботи**

Як зазначалось вище, особливістю тепловізійного контролю електричних машин в процесі їх роботи є необхідність зняття теплових полів рухомих частин.

Отримання теплових портретів роторів електричних машин під час їх обертання навіть за допомогою сучасних швидкодійних

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-258-7>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-258-7>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-258-7>

*Наукове видання*

**Грабко Володимир Віталійович  
Грабко Валентин Володимирович**

**МЕТОДИ І ЗАСОБИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТІВ,  
ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ, ЗА ТЕПЛОВИМИ ПОЛЯМИ**

**Монографія**

Редактор С. Малішевська

Оригінал макет підготовлено Валентином Грабком

Видавництво ВНТУ «УНІВЕРСУМ-Вінниця»  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-85-32

Підписано до друку 08.07.2008 р.  
Формат 29,7×42 ¼ Папір офсетний  
Гарнітура Times New Roman  
Друк різнографічний Ум. др. арк. 14,73  
Наклад 100 прим. Зам. № 2008-100

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001 р.  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114  
Тел. (0432) 59-81-59