

## КОНТРОЛЬ ТА ДІАГНОСТИКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОСНОВНОГО ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ТА ТЕПЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС, ТЕС і ГЕС НА ОСНОВІ ТЕПЛОВІЗІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

**Б. Б. Бандурян<sup>1</sup>, Г. М. Федоренко<sup>2</sup>, Л. Б. Остапчук<sup>3</sup>, В. О. Саратов<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Харків*

<sup>2</sup>*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ*

<sup>3</sup>*Інститут електродинаміки НАН України, Київ*

Показано можливість використання тепловізійних технологій для виявлення дефектів електротехнічного та енергетичного обладнання АЕС, ТЕС і ГЕС. Наведено результати тепловізійного контролю технічного стану статора турбогенератора. Описано спосіб тепловізійного контролю технічного стану елементів конструкції електричних машин і апаратів, на який отримано патент України. Виконано верифікацію запропонованого способу тепловізійного контролю та діагностики на ДП завод «Електроважмаш».

Основна мета контролю та діагностики обладнання є упередження відмов, зниження втрат електроенергії та витрат на ремонти, що вкрай важливо для надійного і ефективного функціонування електростанцій. При цьому певні переваги має безконтактне дослідження обладнання на відстані. Рішення такої задачі можна здійснити шляхом реєстрації та аналізу інфрачервоного електромагнітного випромінювання, інтенсивність і спектральний склад якого визначається температурою та фізичними особливостями об'єктів. Здійснити це дозволяють сучасні тепловізійні комплекси, що забезпечують вимірювання та реєстрацію по точках температури поверхонь об'єкта, перетворення отриманих значень у відеосигнали і виведення на монітор теплового зображення [2 - 8]. При цьому необхідно враховувати коефіцієнти випромінювання поверхонь об'єктів, що досліджуються. Коефіцієнти випромінювання деяких сталевих поверхонь із різним покриттям, а також фарб та емалі наведено в таблиці.

Матеріал	Температура, °С	Коефіцієнт випромінювання
Фарба масляна матова чорна	100	0,98
Фарби масляні різних кольорів	100	0,92 - 0,96
Емаль	100	0,90
Сталь лита полірована	770 - 1040	0,52 - 0,56
Сталь окислена	200 - 600	0,79
Сталь значно окислена	50	0,88
Сталь шорсткувата з плоскою поверхнею	50	0,95 - 0,98
Сталь листовая (прокат)	50	0,56
Сталь листовая з блискучим шаром окису	25	0,82
Сталь іржава червона	20	0,69
Сталь алатирована	50 - 500	0,79
Сталь нікельована листовая	20	0,11
Сталь оцинкована	20	0,24
Сталь легірована (8% Ni, 18% Cr)	500	0,35
Сталь нержавіюча полірована	25 - 30	0,13
Сталь нержавіюча після піскоструйки	700	0,7
Сталь нержавіюча (прокат)	700	0,45
Сталь листовая шліфувана	940 - 1000	0,52 - 0,612
Сталь окислена шорсткувата	40 - 370	0,91 - 0,97

Будь-які фізичні або хімічні процеси, що пов'язані з виділенням або поглинанням тепла і, відповідно, виникненням дефектів устаткування, супроводжуються появою температурних аномалій. На цій основі за допомогою тепловізійної техніки можна швидко знайти витoki тепла й теплоносіїв, виявити зони розгерметизації, появу тріщин, порушення контактів тощо, тобто знайти приховані дефекти різної природи, виявити їх зародження та розвиток [1, 4, 7].

У світовій практиці тепловізійні технології широко застосовуються для проведення технічної діагностики складного відповідального устаткування, керування технологічними процесами, екологічного моніторингу тощо. У даний час реалізовані значення абсолютної (2 %) і відносної (0,1 K) температурної чутливості забезпечують вирішення зазначених задач. При цьому основне навантаження та відповідальні вимоги лягають на програмне забезпечення вимірювань, аналізу та прогнозування стану об'єкта, що досліджується.

Тепловізійна діагностика в Європі використовується з середини 70-х років. Роботи, що проводяться на основі цього методу, дають змогу суттєво підняти надійність експлуатації обладнання і його монтажу, а також якість будівельних робіт і знизити на 10 - 20 % енерговитрати на опалення житлових будинків [2, 5]. У даний час там діє міжнародний стандарт ІСО 6781-83 «Теплоізоляція. Якісне знаходження теплотехнічних порушень обмежуючих конструкцій. Інфрачервоний метод».

Тепловізійні технології широко та ефективно використовуються також для діагностики електротехнічного та енергетичного обладнання АЕС, ТЕС, ГЕС.

Положення про тепловізійний контроль електроустаткування та повітряних ліній електропередач входить у норми випробувань електроустаткування. Існують рекомендації Міжнародної електротехнічної комісії з граничних значень температур і припустимого підвищення температури обладнання порівняно з навколишнім середовищем [4, 6, 9].

При тепловізійному контролі електротехнічного обладнання та повітряних ліній передачі повинні застосовуватися тепловізори з розв'язувальною здатністю не гірше 0,1 °С, переважно зі спектральним діапазоном 8 - 12  $\mu\text{m}$  [3, 9].

Шляхом температурного тепловізійного контролю може бути виконано дослідження такого крупного енергетичного обладнання, як парогенератори, паропроводи, парові турбіни, а також внутрішніх поверхонь осердь статорів гідро- та турбогенераторів. При цьому можуть бути виявлені дефекти, що пов'язані з контактами між пакетами сталі та окремими пластинами у середині пакетів (порушення ізоляції листів та інші дефекти). Для цього в магнітопроводі за допомогою спеціальної обмотки створюється змінне магнітне поле, що викликає виникнення вихрових струмів в осерді й підвищене тепловиділення в області контактів між пластинами. Очевидно, що ступінь розігріву прямо вказує на втрати енергії і, відповідно, якість технічного стану осердя статора.

Застосування теплового контролю для діагностики осердя статора гідро- та турбогенераторів відомо понад 25 років [10, 11], однак устаткування, що використовується, не завжди дозволяє повною мірою подолати наявні труднощі, з яких відзначимо такі:

необхідність (як і при будь-яких дистанційних вимірюваннях температури) обліку значень випромінювальної здатності досліджуваної поверхні, її неоднорідності й кута візுவання;

динаміку зміни теплового поля;

визначення координат дефектних пакетів осердя статора генераторів.

Існує спосіб контролю якості збірки активної сталі статорів електричних машин, при якому шляхом індукційного нагріву та індикації зон підвищеного тепловиділення за допомогою термочутливого датчика виконують безперервну індикацію теплового випромінювання поверхні осердя статора, для чого термочутливий датчик, наприклад інфрачервоний, пересувають в осьовому напрямку по гвинтовій лінії, фіксують значення теплового поля у вигляді масштабної теплової карти, визначають форми та координати зон підвищеного

нагріву. Такий спосіб потребує розміщення термодатчика на спеціальному возику, що пересувається по поверхні статора [11].

Теоретичні та експериментальні дослідження дали змогу в даний час регламентувати величини магнітного поля, часовий інтервал впливу та рівні припустимих температурних перевищень. На підставі комплексу цих робіт було розроблено методику та отримано декларативний патент на винахід [12].

При проведенні цієї роботи використовувався апаратурно-програмний комплекс «Крионік-4м», розроблений співробітниками НТЦ «Крионік», що дозволив проводити вимірювання температури з точністю 2 % у будь-якій точці зображення, автоматично реєструвати аномалії та виводити профілі температури вздовж будь-якого перетину осердя генератора з геометричною прив'язкою.

Під час проведення випробувань осердя генератора піддавалося впливу змінного магнітного поля з індукцією 1,4 Тл протягом 20 хв і реєструвався розподіл температури по поверхні зубців і пазів. Неоднорідності випромінювальної здатності, перевідображення від сторонніх об'єктів і вплив кута спостереження враховувалися шляхом запису теплового зображення під час відсутності зовнішнього поля. Для прояву дефектів, розташованих на різній відстані від поверхні, реєстрація термограм проводилася протягом усього часу впливу магнітного поля.

При одержанні теплових образів необхідно враховувати вплив паразитних теплових полів, які за рахунок перевідбиттів або локального перегріву об'єкта випромінюванням можуть приводити до перекручувань дійсного теплового зображення. Із цією метою необхідно проводити екранування об'єкта та зйомку з різних ракурсів. Крім того, одержання абсолютних значень температури вимагає попереднього аналізу та оцінки випромінювальної здатності, а також її розподілу.

Перспективною та важливою областю застосування тепловізійних технологій є діагностика тріщин та свищів у першому контурі ядерних реакторів АЕС (трубопроводи, парогенератори тощо). Розгерметизація такого обладнання безпосередньо впливає на безпеку ядерних компонентів АЕС.

Можливість локалізації дефектів, пов'язаних із розгерметизацією, показано в [1]. Розглянуто дефекти у вигляді прямокутних тріщин з довжиною набагато більшою і шириною набагато меншою за товщину трубопроводу, а також свищів у вигляді круглих отворів з радіусом набагато меншим за товщину трубопроводу. Показано, що навколо тріщини тепловий потік підвищується на 10 - 30 %, біля свища - на 3 - 5 %, і це підвищення простягається на відстань, що сумірна з товщиною трубопроводу.

Температури поверхонь об'єктів визначаються такими факторами: теплофізичними властивостями матеріалу поверхні, параметрами внутрішнього середовища, температурою зовнішнього середовища.

На підставі рішення рівняння теплопровідності отримано аналітичні співвідношення для відносного збільшення потоку випромінювання поверхні трубопроводу в місцях пошкоджень [1]:

для тріщини (щілини) по координаті  $x$

$$\frac{\Delta J}{J} = \frac{\int_{-a}^a dx(T_2^4 - T_a^4)}{\int_{-a}^a dx T_a^4} + \frac{\eta_1 b(1 + a_1)^4}{\eta_2 a(1 + \frac{T_0}{T_1} \cdot a_1)^4}, \quad (1)$$

$$T_a = T_0 + \frac{T_1 - T_0}{1 + a_1}, \quad a_1 = aA/k;$$

для отвору по координаті  $r$

$$\frac{\Delta J}{J} = \frac{\int_0^a r dr (T_2^4 - T_a^4)}{\int_{-a}^a r dr T_a^4} + \frac{\eta_1 r_0^2 (1 + a_1)^4}{\eta a^2 (1 + \frac{T_0}{T_1} \cdot a_1)^4}, \quad (2)$$

де  $a$  - товщина трубопроводу;  $b$  - ширина тріщини;  $r_0$  - радіус отвору;  $T_0$  - температура навколишнього повітря;  $T_1$  - температура пари в трубопроводі;  $T_2$  - температура на поверхні трубопроводу;  $\eta_1, \eta$  - випромінювальна здатність щілини та трубопроводу відповідно;  $A$  - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні трубопроводу;  $k$  - коефіцієнт теплопровідності трубопроводу.

Можливе навіть спостереження виходу пари крізь отвори внаслідок реєстрації його власного випромінювання. При цьому, оскільки пара має не постійну форму, про наявність дефекту свідчить перевищення сигналу порівняно з пороговим рівнем випромінювання від бездефектної поверхні.

На підставі проведення експериментальних робіт доведено можливість тепловізійного контролю розгерметизації обладнання [2, 4, 6]. У реальних умовах на обладнанні Запорізької АЕС було проведено роботи з виявлення:

- порушень герметизації арматури;
- присосів у роз'ємних та нероз'ємних з'єднаннях;
- порушень герметизації трубопроводів, що вкриті ізоляцією.

Виявлення дефектів елементів обладнання за допомогою тепловізійних комплексів передбачає послідовність, представлену на структурній схемі (рис. 1).

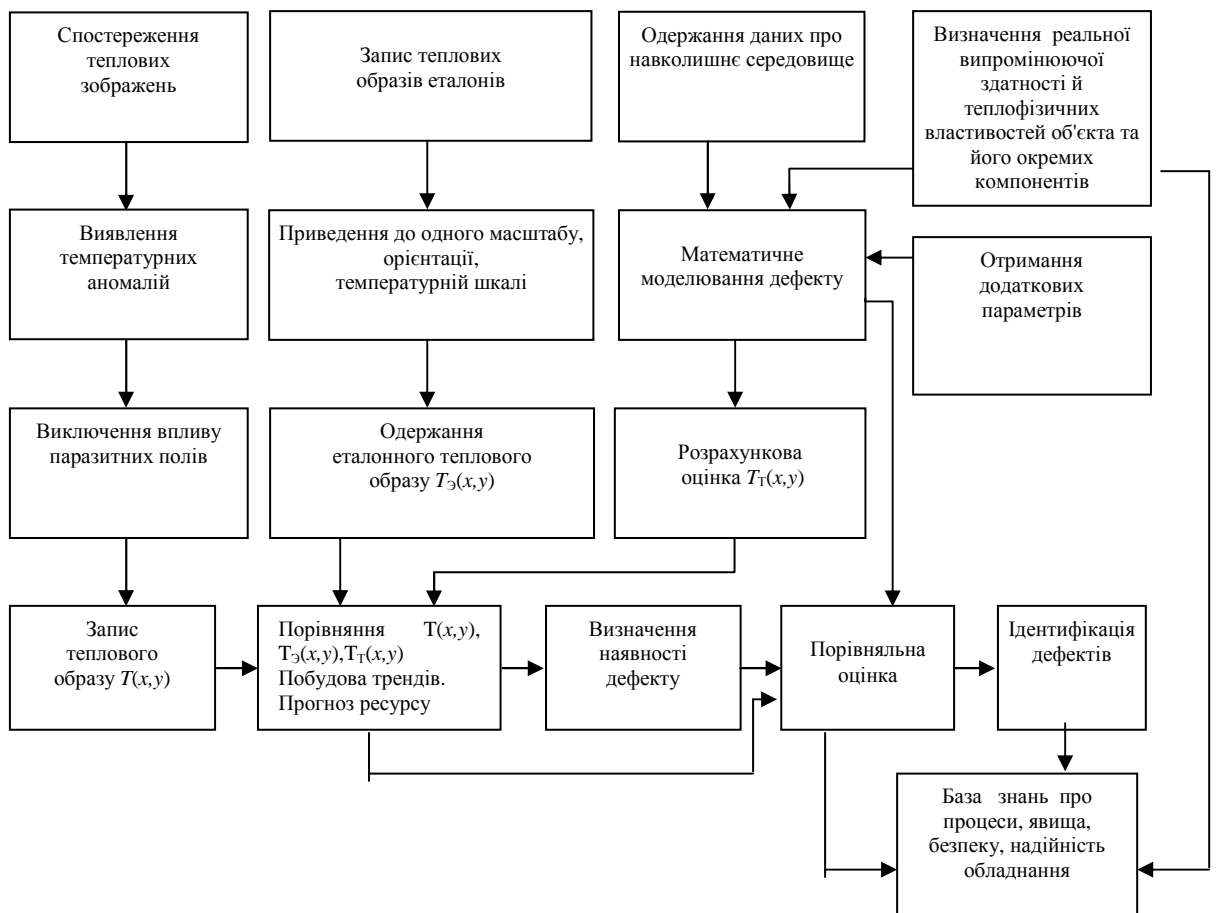


Рис. 1. Структурна схема обстеження об'єкта за допомогою тепловізійного вимірювального комплексу.

На рис. 2 наведено схему тепловізійних вимірювань теплового поля осердя статора турбогенератора при іспитах на стенді ДП завод «Електроважмаш» за методикою [12].

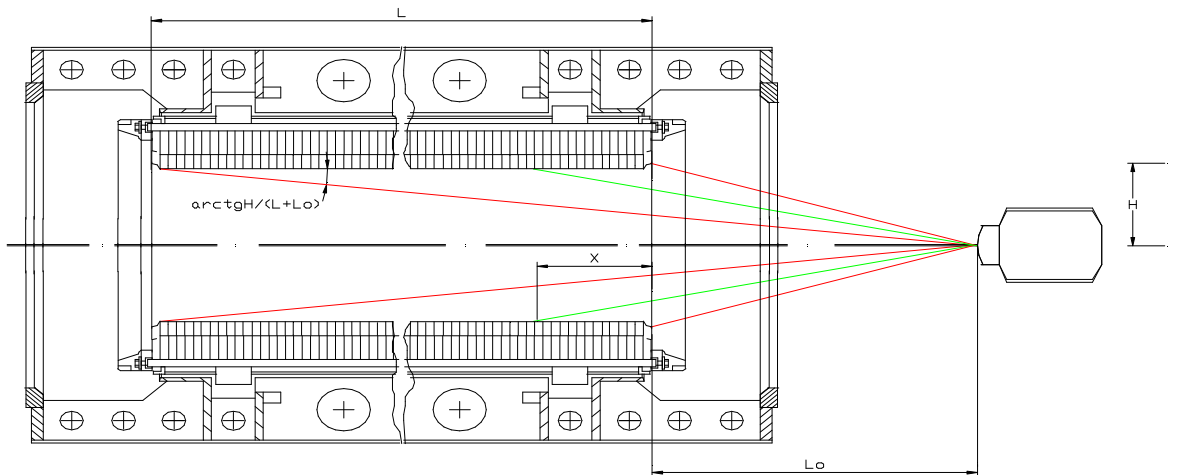


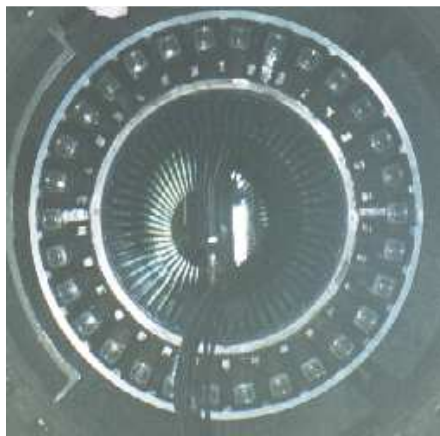
Рис. 2. Схема досліджень осердя статора турбогенератора за допомогою тепловізійного вимірювального комплексу за патентом України [12].

Вхідна зіниця тепловізійної системи розташовується на відстані  $L_0$  від крайнього пакета на осі симетрії магнітопроводу, тобто на відстані  $H$  від внутрішньої поверхні. Відстань  $L_0$  вибирається так, щоб кут огляду системи забезпечував одержання зображення всієї внутрішньої поверхні статора. У цьому випадку лінійна координата пакета  $X$  зв'язана з кутом спостереження  $\alpha$  як

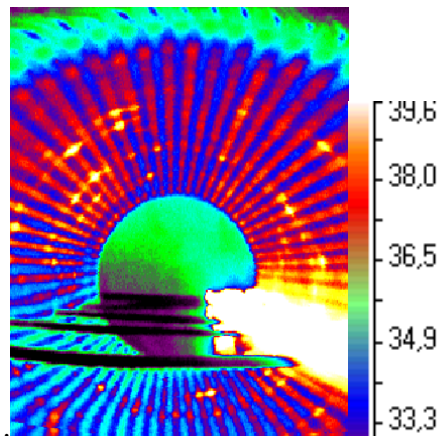
$$X = H / \operatorname{tg} \alpha - L_0 \quad (3)$$

Якщо повна довжина пакета  $L$ , то  $\operatorname{arctg}(H/L_0) > \alpha > \operatorname{arctg}[H/(L_0+L)]$ .

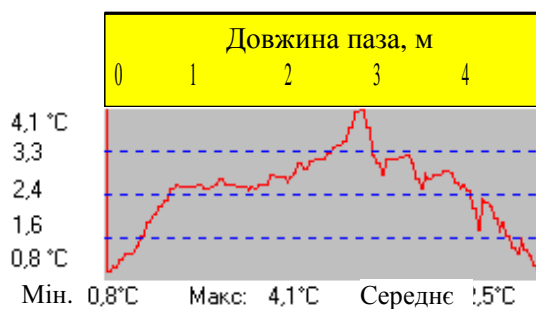
На рис. 3 представлено термограми осердя статора турбогенератора, що випробується, та температурний розподіл уздовж паза статора з виявленою температурною аномалією. Отримані перевищення температури, що спостерігаються, не перевищують припустимого рівня.



а



б



в

Рис. 3. Результати тепловізійного обстеження осердя статора:  
 а - зовнішній вигляд статора;  
 б - термограма осердя після впливу магнітного поля 1.4 Тл протягом 20 хв (у правому куті розігрітий виток збудження);  
 в - розподіл перевищення температури над навколишнім середовищем уздовж паза.

Крім того, до різних видів устаткування, яке можна контролювати інфрачервоними методами, слід віднести також рухомі елементи обладнання: зубчаті передачі, вали, муфти, клинові ремені, шківи, ланцюгові приводи, повітряні компресори, вакуумні насоси тощо. Основні переваги тепловізійних технологій при контролі рухомого та нерухомого обладнання складаються в безпосереднім спостереженні та швидкому визначенні топографії дефектних ділянок.

### Висновки

1. Тепловізійні технології дають змогу проводити технічне діагностування дистанційно без зупинки устаткування, що є істотною перевагою порівняно з іншими методами. Однак не дивлячись на можливості існуючої тепловізійної апаратури, теоретичні та методичні питання постановки технічного діагнозу сьогодні потребують розвитку та подальшого вивчення.

На підставі тепловізійного контролю може бути сформульовано висновок щодо технічного стану об'єктів. Це потребує виконання певного комплексу теоретичних і експериментальних робіт, які включають:

вивчення об'єктів, їх класифікацію за різними ознаками;

вивчення дефектів;

математичне моделювання;

розробку та обґрунтування програми діагностування;

аналіз результатів, його порівняння з імовірнісними оцінками та технічний діагноз стану об'єкта.

2. Сформульовано та обґрунтовано найбільш перспективні напрямки використання сучасних інфрачервоних технологій та тепловізійних комплексів з метою підвищення безпеки, надійності та ефективності експлуатації ключового обладнання АЕС, ТЕС і ГЕС.

3. Проведення зазначеного комплексу робіт дасть змогу реалізувати ефективні стратегії планово-попереджувального й прогностичного характеру на устаткуванні електростанцій. На підставі тепловізійного контролю технічного стану об'єктів забезпечується:

дистанційне спостереження теплового поля об'єктів у процесі монтажу, експлуатації та ремонту;

безпосереднє відображення на екрані монітору вимірювального комплексу картини теплового поля окремого елемента або в цілому об'єкта, що обстежується;

топографічна локалізація аномальних тепловиділень й оцінка їх рівнів з точністю 2 %;

фіксування та збереження отриманих зображень теплового поля об'єкта;

порівняльна оцінка теплових полів об'єкта або його елементів та аналіз їх змін у часі (побудова картин деградації та трендів зміни температурних, теплових та термомеханічних параметрів);

отримання та формування ключових елементів бази знань і бази даних про процеси, явища, безпеку та надійність обладнання АЕС, ТЕС і ГЕС.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Апальков В.М., Апальков Д.М.* Обнаружение утечек в трубопроводах // Информ.-аналит. вестник «Энергосбережение». - 1998. - № 4. - С. 13 - 15.
2. *Базалєєв М.І., Бандурян Б.Б., Клепиков В.Ф. та ін.* Тепловізійна діагностика теплоенергетичного обладнання, приладів та будівель // КИП и А (контрольно-измерительные приборы и автоматика). - 2005. - № 4. - С. 4 - 8.
3. *Бандурян Б.Б., Бут А.А.* Тепловизоры отечественного производства – энергетикам Украины // Новости энергетики. - 2000. - № 1-2. – С. 74 - 75.
4. *Бандурян Б.Б., Гордиенко Э.Ю., Ефременко В.Г. и др.* Тепловизионная диагностика теплоизолирующих конструкций // Строительные материалы и изделия. - 2001. - № 5-6. - С. 23 - 25.
5. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. – М.: Мир. - 1988. - 260 с.

6. *Ефременко В.Г., Бандурян Б.Б., Гордиенко Э.Ю.* Компьютерная термография в энергосбережении // Рынок инсталляций. - 1997. - № 11. - С. 17.
7. *Лесин Н.М., Савик А.А.* Термографическое обследование электрооборудования Белорусской энергосистемы // Энергетик. - 2005. - № 7. - С. 39 - 40.
8. *Милованов С.В.* Новые возможности в термографировании тепломеханического оборудования // Энергетик. - 2005. - № 10. - С. 48.
9. *Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца.* – М.: НЦ ЭНАС, 1998. - 256 с.
10. *Падалко Г.А.* Информационно-измерительное обеспечение тепловизора «Статор-1» // Измерительная техника. - 1980. - № 12. - С. 27.
11. *Мирошников М.М., Иванова Р.И., Караетян К.С.* Способ контроля качества сборки активной стали статоров электрических машин: А. с. СССР № 412825, 1976, бюл. № 29, с. 211.
12. *Спосіб тепловізійного контролю технічного стану елементів конструкцій електричних машин та апаратів № 357934 А.* - 2003, бюл. № 7.

Надійшла до редакції 30.01.06

## **25 КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОСНОВНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО И ТЕПЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭС, ТЭС И ГЭС НА ОСНОВЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Б. Б. Бандурян, Г. М. Федоренко, Л. Б. Остапчук, В. О. Саратов**

Показана возможность использования тепловизионных технологий для выявления дефектов электротехнического и энергетического оборудования АЭС, ТЭС и ГЭС. Представлены результаты тепловизионного контроля технического состояния статора турбогенератора. Описан способ тепловизионного контроля технического состояния элементов конструкции электрических машин и аппаратов, на который получен патент Украины. Проведена верификация предложенного способа тепловизионного контроля и диагностики на ГП завод «Электротяжмаш».

## **25 CONTROL AND DIAGNOSTICS OF TECHNICAL STATE OF MAIN ELECTRO TECHNICAL AND THERMAL EQUIPMENT OF NPS, TPS AND HPS ON THE BASIS OF THERMOVISION TECHNOLOGIES**

**B. B. Bandurian, G. M. Fedorenko, L. B. Ostapchuk, V. O. Saratov**

The opportunity of using of thermovision techniques for detection of defects of NPS, TPS and HPS electro technical and power equipment is shown. The results of thermovision monitoring of a of a turbine generator stator technical state are represented. The method for thermovision control of a technical state of electrical machines and apparatus construction elements, for which the patent of Ukraine have been obtained, is described. The verification of the offered expedient thermovision control and diagnostics at "Elektrovazhmash" factory was carried out.

