



A XVII-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”
SEBEȘ, 2017

AVANTAJELE, ERORILE ȘI LIMITELE TERMOGRAFIERII ÎN INFRAROȘU UTILIZATĂ LA MENTENANȚA SISTEMELOR DE ACȚIONARE HIDRAULICĂ

Alexandru-Daniel MARINESCU, Carmen-Anca SAFTA,
Teodor Costinel POPESCU

THE ADVANTAGES, ERRORS AND LIMITATIONS OF INFRARED THERMOGRAPHY METHOD USED TO THE MAINTENANCE OF HYDRAULIC DRIVE SYSTEMS

The subject of the article is to discuss the advantages, errors and limitations of infrared thermography which can be used as a non-invasive modern method of diagnosis even in industrial applications. The method of infrared thermography diagnosis is proposed to be applied in the preventive maintenance of hydraulic drive systems.

Keywords: infrared thermography, preventive maintenance, hydraulic actuators, errors, calibration

Cuvinte cheie: termografiere în infraroșu, mentenanță preventivă, acționări hidraulice, erori, calibrare

1. Introducere

În domeniul asigurării calității produselor și sistemelor tehnice examinările nedistructive sunt preferate pentru avantajul păstrării integrității funcționale a produsului/sistemului în condițiile verificării funcționalității acestora. Printre metodele cunoscute, termografia în infraroșu s-a remarcat în domenii dintre cele mai diverse: industriile

alimentară, metalurgică, energetică; sistemele mecanice; studiul organismelor biologice; protecția mediului, ș. a.

În domeniul Sistemelor de Acționări Hidraulice (SAH), "buna practică" a scos în evidență faptul că funcționarea corectă a unui sistem hidraulic sub presiune se face într-un domeniu de temperatură bine definit. Din punctul de vedere al mentenanței predictive, încă din proiectare sistemele hidraulice sunt prevăzute cu protecții la creșterea de temperatură, [1]. Păstrarea unui domeniu bun de temperatură asigură funcționarea SAH în parametri, fără pierderi energetice, deoarece proprietățile uleiului hidraulic se mențin în parametri de vâscozitate, densitate și compresibilitate. De aceea folosirea termografiei în infraroșu ca metodă de mentenanță preventivă este justificată, [2].

La INOE 2000-IHP București au fost realizate primele analize termografice pe aparatură hidraulică, punând în evidență distribuția de temperatură în cazul pompei cu pistoane axiale și disc înclinat testate, figura 1. Întrucât diferența de temperatură dintre zona cu rulmenți (capătul din stânga) și zona blocului de distribuție (capătul din dreapta) era mai mică de 10 °C, s-a ajuns la concluzia că pompa nu prezenta uzuri pronunțate și funcționa în parametrii din catalogul producătorului.

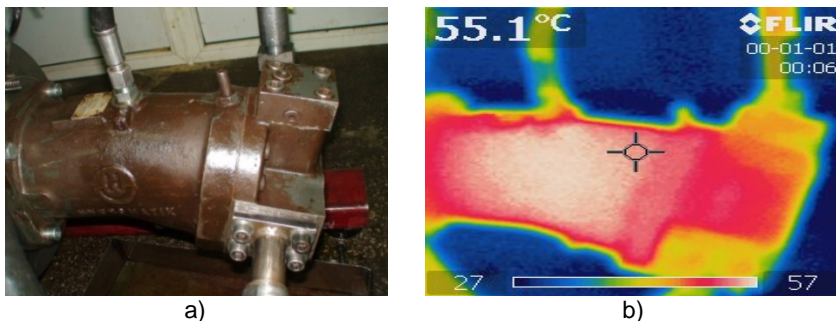


Fig. 1 Termograma obținută la verificarea funcționării pompei, [3].
a) pompa testată, Brueninghaus (Germania); b) termograma pompei

În partea de jos a termogramei, figura 1, b, se observă o scară de culoare-temperatură pentru o identificare ușoară a temperaturilor caracteristice diferitelor elemente constructive în timpul funcționării.

Lucrarea de față are ca principal scop discutarea erorilor care apar la termografia în infraroșu astfel încât metoda să poată fi folosită în operațiile de mentenanță a SAH. De asemenea, sunt precizate cauzele apariției acestor erori și sunt indicate măsurile care se pot lua pentru diminuarea acestora.

2. Principiul metodei de termografie în infraroșu

Bazele termografiei în infraroșu au fost puse de experimentul lui F.E.Herschel care a descoperit radiația în infraroșu. În experimentele sale, Herschel a asociat diferitelor culori obținute prin trecerea luminii solare printr-o prismă, cu temperatura măsurată pe întregul spectru obținut. În spectrul electromagnetic, domeniul de radiație infraroșie are lungimi de undă cuprinse între 0,75 μm și 1 mm, iar frecvențele între $3 \cdot 10^{11}$ Hz și $4 \cdot 10^{14}$ Hz, [4]. Pe de altă parte, orice corp aflat în stare condensată și temperaturi mai mari decât zero absolut emit radiație termică, [5].

Bazat pe aceste fenomene, termografia în infraroșu este un procedeu de "detectare de la distanță a radiației emise de un produs supus examinării și transformarea informațiilor obținute într-o imagine vizibilă pe care se pot pune în evidență eventualele discontinuități de produs", [6]. Astfel termografia în infraroșu este o metodă de examinare termică, nedistructivă, fără contact, care alături de alte metode termice de examinare nedistructivă poate fi utilizată ca instrument de lucru în asigurarea și evaluarea calității produselor și materialelor, tabelul 1 (Metode termice de examinare nedistructivă, [6]).

Tabelul 1

Metoda de examinare	Măsurarea unui parametru termic	Vizualizarea unui câmp termic	Măsurarea și vizualizarea
Prin contact direct	Termometrie prin contact (cu termometru, termocuplu)	Termografie cu substanțe sensibile (cristale lichide, peliculă de gheață)	Termografie cu substanțe sensibile (vopsele termosensibile)
Fără contact direct	Pirometrie/Radiometrie/Fotometrie Radiotermometrie	Termoviziune Radiografiere Fotografiere	Termografie în infraroșu (cu cameră IR)

Metoda termică de examinare nedistructivă fără contact direct prin termoviziune folosește ca mijloc de măsurare o cameră de termoviziune în infraroșu, CTIR. Elementul de bază al sistemului de măsurare este detectorul de radiație, respectiv camera în infraroșu, [6, 7].

Camerele în infraroșu au detector monoelement (point detector), și multielement tip matrice (array detector - FPA, Focal Plane Array) cu 640 x 480 detectori individuali, respectiv pixeli, [7]. În CTIR cu

un detector monoelement imaginea câmpului de temperatură este creată cu ajutorul unui sistem de scanare optomecanic construit prin intermediul unor oglinzi sau prisme în mișcare oscilatorie. Frecvența de scanare este de 25 Hz (50 Hz) pentru sistemul PAL în Europa și 30 Hz (60 Hz) pentru sistemul NTSC în Statele Unite ale Americii. În camerele cu detector monoelement domeniul aflat sub observație este construit punct cu punct la intervale consecutive de timp iar radiația detectată este convertită în semnal electric proporțional cu radiația existentă la fiecărui punct individual din imagine. Semnalele sunt amplificate și transmise sincron la un display sau alt tip de înregistrator obținând termograma. Acest principiu de funcționare este schematizat în figura 2. Rezoluția camerei monoelement depinde de rezoluția termică și spațială. Sistemul cu detector monoelement are proprietăți metrologice unice deoarece temperatura în fiecare punct este măsurată de același detector. Sistemul are avantajul unei calibrări ușoare.

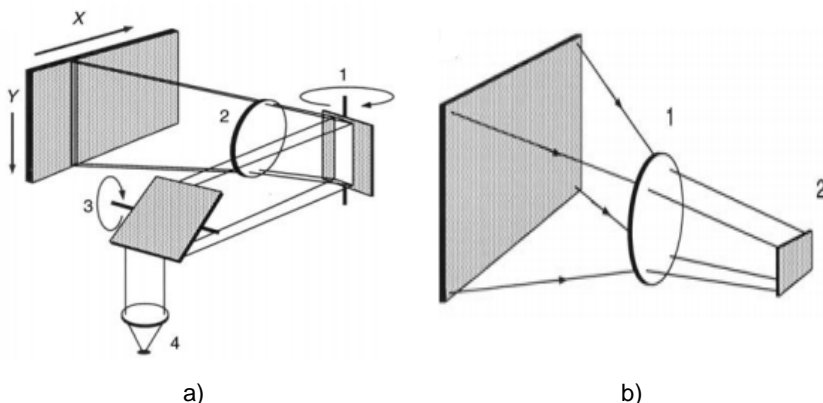


Fig. 2 Schema principiului de lucru al unui detector de CTIR

a) detector monoelement: 1, oglindă deflectoră orizontală; 2, sistem optic; 3, oglindă deflectoră verticală; 4 detector monoelement. b) detector multielement matrice FPA: 1, cameră optică; 2, matrice de detectori, [7]

CTIR cu detectori multielement tip matrice, FPA, au devenit folosite frecvent în termografia în infraroșu. Ele au în mod uzual 307.200 detectori individuali (pixeli), fiecare pixel fiind citit cu frecvența de 25 Hz (50 Hz) pentru sistemul PAL în Europa și 30 Hz (60 Hz) pentru sistemul NTSC în SUA, [7].

Camerele cu termoviziune au evoluat rapid ca tehnologie îmbunătățind tipurile de detectoare și începând cu anul 1997 au fost introduse camerele cu detectoare de tipul "microbolometric" matrice fără răcire.

3. Norme și standarde

Tehnologia de măsurare cu camere de termoviziune în infraroșu are noțiuni specifice, standardizate și armonizate cu standardele internaționale din domeniu.

Standardul de țară SR 13340-1996, intitulat „Examinări nedistructive, Termografie în infraroșu. Vocabular, traducerea normei franceze A 09-400-1987” specifică semnificația termenilor: infraroșu (IR), termografie, termogramă, sistem de termografieră, etc. În standardul amintit este dată următoarea definiție pentru termografie în infraroșu: „...este o tehnică ce permite obținerea cu ajutorul unei aparaturi adecvate, a imaginii termice a unei scene termice observate într-un domeniu spectral din infraroșu. Înțelegând prin imagine termică – repartiție structurată a datelor reprezentative ale radiației infraroșii provenind de la o scenă termică și prin scenă termică – parte a spațiului – obiect care se observă cu o aparatură de termografie în infraroșu”.

În domeniul metodelor termice de examinare se folosesc mai multe noțiuni, conform aceluiași standard. De exemplu:

”Examinare termografică – observare, măsurare, interpretare a caracteristicilor unei scene termice cu ajutorul unui ansamblu de aparate și instrumente denumite sistem de termografieră”.

”Sistem de termografieră – ansamblu de aparate ce permite recepționarea și prelucrarea unei imaginii termice”.

”Termogramă –rezultat al transcrierii în temperatură a uneia sau mai multor hărți de luminanță; imaginea codificată a unei scene termice”.

Alte norme internaționale des utilizate care reglementează domeniul termografiei în infraroșu sunt următoarele, [6, 7]:

- A 09-400-1991 Essais non destructifs. Thermographie infrarouge. Vocabulaire

- A 09-420-1991 Essais non destructifs. Thermographie infrarouge. Vocabulaire relatif a la caracterisation de l'appareillage.

- E 168-1999 Standard practices for general techniques of infrared quantitative analysis

- ASTM E 1149-1987 Standard definitions of terms relating to NDT by infrared thermography,

- ASTM E 1934-1999 Standard guide for examining electrical and mechanical equipment with infrared thermography.

- ASTM E 1213 Minimum resolvable temperature difference (MRTD).

- ASTM E 1311 Minimum detectable temperature difference (MDTD).
- ASTM E 1316 Section J. Terms.

4. Erori de măsurare și măsuri de minimizare

Una din întrebările pe care ni le punem în folosirea unei metode de măsurare este legată de modul în care estimăm precizia cu care s-a făcut măsurarea. Acest lucru înseamnă însă cunoașterea erorilor și a surselor de eroare ce pot apare în cadrul metodei. În literatura de specialitate [6÷10] se fac precizări privind erorile specifice măsurătorilor de temperatură cu camera de termoviziune în infraroșu. Există astfel erori de metodă, erori de calibrare și erori de transmitere electronică a semnalelor.

Erorile de metodă apar:

- fie datorită unei evaluări incorecte a parametrilor caracteristici termografiei în infraroșu, respectiv: emisivitatea obiectului analizat, ϵ , temperatura atmosferică, T_{atm} [K sau °C], temperatura mediului ambient, T_0 [K sau °C], umiditatea, ω [%], distanța dintre CTIR și obiect măsurat, d [m];

- fie datorită influenței radiației mediului ambient, reflectată direct sau indirect de obiect și detectată de cameră;

- fie datorită calibrării, respectiv evaluării incorecte a coeficienților de absorbție, reflexie și transmisie din mediul înconjurător;

- fie datorită zgomotului fonic și electronic al sistemului, [6].

"Emisivitatea (sau factorul de emisie) este un parametru adimensional cu valori cuprinse în intervalul (0, 1) și care reprezintă raportul dintre puterea totală de emisie a unui corp oarecare și puterea totală de emisie a corpului negru", conform definiției din SR 13340-1996.

Emisivitatea este specifică fiecărui material și variază în funcție de proprietățile suprafeței, temperatura obiectului măsurat, direcția pe care se face măsurătoarea, polarizare și timp de măsurare, [7]. Emisivitatea corpului negru este 1. Este foarte important ca acest parametru să fie setat corect în CTIR mai ales atunci când există diferențe mari de temperatură între temperatura obiectului măsurat și cea a mediului înconjurător. Pot să apară următoarele situații:

a₁) dacă temperatura obiectului măsurat este mai mare decât temperatura mediului ambient, iar emisivitatea setată este prea mare, atunci valorile citite de temperatură vor fi excesiv de mici;

a₂) dacă emisivitatea setată este prea mică, atunci valorile citite de temperatură, vor fi excesiv de mari.

b₁) dacă temperatura obiectului măsurat este mai mică decât temperatura mediului ambiant, iar emisivitatea setată este prea mare, atunci valorile de temperatură vor fi excesiv de mari.

b₂) dacă emisivitatea setată este prea mică, atunci valorile de temperatură citite vor fi excesiv de mici.

În figura 3 se prezintă, pe un exemplu de firmă, corespondența dintre setarea corectă a emisivității și temperatură,

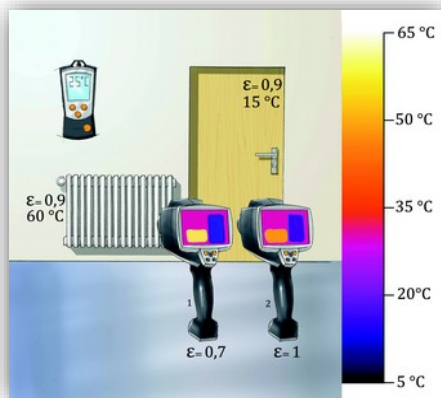


Fig. 3 Coeficientul de emisivitate, setat incorect, [11]

Emisivitatea este o mărime pe care trebuie să o impunem CTIR. Ea se poate estima având în vedere următoarele recomandări, [7÷11]:

- pentru corpuri semitransparente, $\epsilon = \frac{(1-R)(1-TT)}{1-R \cdot TT}$;
- pentru corpuri cu suprafață netedă, $\epsilon = k \sqrt{\frac{\rho}{\lambda}}$;
- pentru suprafețe metalice reale, $\epsilon = \frac{1}{b_1 \sqrt{\lambda} + b_2}$,

unde R , [m] este coeficientul de reflectanță sau factor de reflexie și reprezintă una din cele trei mărimi de calibrare; TT - coeficient de transmisie; $k = 0,365 \Omega^{-1/2}$; ρ [Ωm] - rezistivitatea; λ [μm] - lungimea de undă; b_1 și b_2 [$\mu m^{-1/2}$] - coeficienți, fără recomandări de alegere, [7].

Influența radiației emise de mediul ambiant crește când ϵ scadește, [7]. În prezența soarelui influența radiației emise de mediul ambiant măsurătorilor cu CTIR este și mai mare.

Calibrarea CTIR este o sursă de erori sistematice. Fiecare cameră are specificată de producător precizia de măsurare a temperaturii. De exemplu ± 2 °C sau ± 2 % sunt valori normale dar

obținute de producător în condiții de laborator, [7]. Calibrarea unui sistem de măsurare în infraroșu se face pentru un corp negru a căru emisivitate este aproximativ $\varepsilon \approx 1$. Pentru distanțe ale obiectivului camerei de obiectul măsurat, d , mici și având ca obiect măsurat un corp negru se consideră $TT_{\text{atm}} \approx 1$ (coeficient asociat cu absorbția radiației infraroșie de stratul atmosferic).

De asemenea se consideră $s_{\text{ob}} \approx s$ semnalul de ieșire al camerei (s) față de semnalul corespunzător temperaturii corpului măsurat (s_{ob}). În aceste condiții semnalul detectat pentru un punct de calibrare (și având semnificația fizică de intensitate totală a căldurii radiante detectate) este:

$$s_i = \frac{R}{\exp\left(\frac{B}{T_i}\right) - F} \quad \text{și} \quad T_i = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{s_i} + F\right)}, \quad \text{unde } B, F, R \text{ sunt constantele de}$$

calibrare ale aparatului. Convertirea semnalului detectat în temperatură se face pentru un domeniu specific de lungimi de undă ale radiației (λ_1, λ_2). Camerele de termoviziune pot avea răspunsul spectral în domeniul de bandă 3...5 μm (unde scurte - shortwave, SW) și domeniul 8...14 μm (unde lungi - longwave, LW), tabelul 2 (Benzi spectrale pentru măsurători în IR [6]).

Tabelul 2

Domeniul de utilizare	Banda spectrală	
	SW	LW
Echipamente energetice și electrice de interior	✓	✓
Echipamente electro-energetice de exterior		✓
Obiecte cu temperaturi mari (peste 400 °C)	✓	
Obiecte cu suprafețe puternic reflectante pentru radiația IR	✓	
Obiecte din sticlă sau plastic	✓	
Examinări la distanțe foarte mari		✓

Soluțiile profesionale pentru eliminarea erorilor sunt date în majoritatea cazurilor de alegerea unor camere de termoviziune performante. De exemplu camerele de termoviziune Testo (www.testo.com) se adresează măsurătorilor termografice de mare acuratețe și sunt prevăzute cu un software profesional de prelucrare și gestionare a imaginilor (IRSoft), care permite ajustări în cele mai mici detalii. Datorită funcțiilor de selectare a emisivității și de introducere a valorii temperaturii reflectate, disponibile atât în meniul camerei de termoviziune cât și în meniul software-ului, sunt înlăturate cele mai importante surse de eroare care apar la măsurarea fără contact a temperaturilor de pe suprafețe. Camerele Testo sunt prevăzute atât cu

lentile cu unghi larg de vizualizare pentru analizarea obiectelor de mari dimensiuni, cât și cu lentile cu unghi îngust, foarte potrivite pentru măsurători în detaliu.

Camerele de termoviziune Flir (www.flir.eu) sunt dedicate măsurătorilor termografice de mare precizie. La INOE 2000-IHP, primele termograme au fost realizate cu ajutorul unei camere de acest tip, model InfraCAM TM. Aceste camere au în dotare un software profesional de prelucrare și gestionare a imaginilor (ThermaCAM™ - QuickReport 1.0), care se poate instala ușor pe un PC sau laptop.

Termografia în infraroșu este o metodă modernă, eficientă, dar care prezintă și unele limitări. De exemplu, în diagnosticarea defecțiunilor la supapele de sens simple sau pilotate, pentru a verifica dacă o supapă se află în poziție deschisă se monitorizează indicii de temperatură de-a lungul supapei.

Dacă nu avem informații privind valoarea debitului ce trece printr-o supapă funcțională, metoda de termografiere nu ne indică capacitatea și gradul de deteriorare al supapei. Termografia în infraroșu poate detecta continuități sau discontinuități de mediu lichid sau solid, de exemplu scurgerile nefuncționale însoțite de un gradient de temperatură,[12].

Indicii de temperatură luați în amonte și aval față de supapă folosind un pirometru de contact sau un alt dispozitiv de măsurare a temperaturii, pot arăta dacă supapa de sens este închisă. Deci, metoda poate fi utilizată însă dă informații calitative, nu cantitative privind funcționalitatea supapei.

5. Concluzii

- Termografia în infraroșu, reprezintă o tehnică modernă de mentenanță, care utilizează camere de termoviziune ce pot furniza informații calitative privind starea de funcționare a unui sistem de acționare hidraulică.

- În acest scop se pot concepe metodologii de verificare pe grupe de aparate specifice SAH cu precizarea domeniului de temperatură la funcționarea normală a aparatului sau a SAH.

- Evident, utilizarea unei CTIR performante, o calibrare corectă a acesteia și o cunoaștere a modului de lucru bazată pe înțelegerea fenomenului fizic sunt condiții ce îndreptățesc folosirea metodei în mentenanța preventivă.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Totten, G.E., De Negri, V.J., *Handbook of Hydraulic Fluid Technology*, 2nd ed., 2012, CRC Press.
- [2] Marinescu, A-D., Popescu, T-C., Popescu, A-I., Safta, C-A., *Approaches of the best maintenance strategies applied to hydraulic drive systems*, Rev. Hidraulica, nr. 4, pp. 63-68, 2016.
- [3] Marinescu, A-D., Popescu, T-C., Enache, L., Safta, C-A., *Researches on specific malfunctions diagnosis of hydraulic drive systems equipments using the infrared thermography method*, Proc.of Intern. Conference on Hydraulics and Pneumatics HERVEX-22nd ed., Băile Govora 2016, pg. 218÷ 224.
- [4] Culea, E., Nicoara, S., *Physics for Engineers*, Editura UTPres, Cluj-Napoca, 2001.
- [5] Badea, A., Leca, A., ș.a. *Procese de transfer de căldură și masă în instalațiile industriale*, Editura Tehnică, 1982.
- [6] Mihai, Al., *Termografia în infraroșu*. Fundamente, Editura Tehnică, București, 2005.
- [7] Minkina, W., Dudzik, S., *Infrared Thermography. Errors and Uncertainties*. Ed. Wiley & Sons, 2009.
- [8] Chrzanowski, K., *Non-contact thermometry – measurement errors*, SPIE, Vol. 7, Warsaw, 2000.
- [9] Babka, R., Minkina, W., *Influence of calibration of an infrared camera on accuracy of sub-pixel edge detection of thermal objects*, Measurement, Automation and Monitoring, Vol. 48, No. 4, pp. 11–13, 2000.
- [10] Madding, R.P., *Emissivity measurement and temperature correction accuracy considerations*, Proceedings of the SPIE, Vol. 3700, pp. 393–401, 1999.
- [11] * * * <http://www.proidea.ro/aplicatii-produse-5/testo-possibile-erori-masurare-camera-termoviziune-9577.shtml>
- [12] * * * ISTOG (In Service Testing Owner's Group) - Check Valve Condition Monitoring Guideline http://www.istog.net/library/ISTOG_CVCM_Guideline_Final.pdf

Drd. Ing. Alexandru-Daniel MARINESCU
cercetător științific, Institutul Național de Cercetare – Dezvoltare pentru
Optoelectronică – Filiala Institutul de Cercetare pentru Hidraulică și Pneumatică
(INOE 2000 – IHP) București.
e-mail: alexandru_marini@yahoo.com

Prof. Dr. Ing. Carmen-Anca SAFTA, Universitatea Politehnică București,
Facultatea de Energetică
e-mail: safta.carmenanca@gmail.com

Dr. Ing. Teodor – Costinel POPESCU
cercetător științific gradul II, Institutul Național de Cercetare – Dezvoltare pentru
Optoelectronică (INOE 2000) –
Filiala Institutul de Cercetare pentru Hidraulică și Pneumatică,
(INOE 2000 – IHP) București.
e-mail: popescu.ihp@fluidas.ro