

Uporaba IR-termografije v fluidni tehniki – 1. del

Bojan TEŽAK

Izveček: Povišanje temperature je pogost znanilec problema, ki se bo pojavil na stroju ali napravi. Uporaba infrardeče (IR) termografije za ugotavljanje temperaturnega stanja naprav je postala sestavni del prediktivnega/preventivnega programa vzdrževanja v podjetjih. Termografija je neporušitvena in nekontaktna metoda merjenja temperature, primerna za zgodnje odkrivanje porajajočih se problemov. Že dalj časa se uspešno uporablja za rutinske preglede na najrazličnejših področjih tehnike, še zlasti na področju elektroenergetskih naprav. Na področju fluidne tehnike, še zlasti hidravlike, do sedaj ni veliko primerov uporabe, čeprav so hidravlični pogonski sistemi idealni za termografski nadzor.

V prvem delu prispevka je razložen princip merjenja z nekaj primeri, v drugem delu pa komentirana primernost uporabe termografije na hidravličnih sistemih, še posebej na hidravličnih pogonskih sklopih, hidravličnih agregatih in njihovih komponentah.

Ključne besede: infrardeča termografija, IR-termografija, preventivno vzdrževanje, prediktivno vzdrževanje, hidravlika, fluidna tehnika,

■ 1 Uvod

Termografija je danes uveljavljena in nepogrešljiva metoda nadzora elektroenergetskih naprav. To je bila tudi prva in je še danes najbolj razširjena uporaba termografije. Prve termografske kamere so se pojavile v 60. letih prejšnjega stoletja. Čeprav velike in nerodne za uporabo, so nezadržno utirale pot izredno učinkoviti metodi nadzora. Hiter, učinkovit in nekontaktni pregled naprav iz varne razdalje, ki nemoteno obratujejo pod normalnimi pogoji, so lastnosti, ki so omogočile nesluten razmah metode. Temu je sledil silovit razvoj termografskih naprav, ki so danes manjše, zmogljivejše in cenovno dostopnejše, kot smo si lahko mislili še pred nekaj leti. Tako kot si danes brez infrardeče tehnologije, ki med drugim omogoča nočno opazovanje v praktično nemogočih razmerah, ne znamo več predstavljati uspešnega vojskovanja, si v naslednjih letih ne

bomo več predstavljali razvoja, raziskav, proizvodnje in vzdrževanja brez uporabe infrardeče termografije. Meje uporabnosti termografije so določene samo z omejenostjo naše domišljije.

■ 2 Fizikalne osnove

2.1 Kaj je termografija?

Infrardeča termografija ali krajše termografija je prikaz toplotne slike na osnovi nekontaktnega merjenja toplotnega sevanja, ki leži v infrardečem delu elektromagnetnega spektra. Za merjenje se uporablja posebna termografska kamera, ki omogoča, da vidimo objekte na

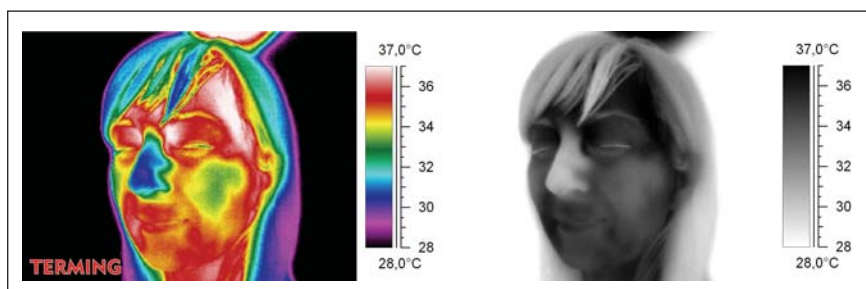
osnovi njihove izsevane in reflektirane toplote (slika 1).

Infrardeči spekter je za človeško oko neviden svetlobni spekter z valovno dolžino, ki se razteza med 0,75 in 1000 mikroni. Umeščen je med vidno svetlobo in mikrovalovnim delom elektromagnetnega spektra. Ime »infra« je dobil, ker po valovni dolžini leži takoj pod rdečo vidno svetlobo.

Infrardeča svetloba ima podobne lastnosti kot vidna. Širi se s svetlobno hitrostjo, se uklanja, reflektira in absorbira.

Vsa telesa, ki so na temperaturi nad absolutno ničlo, sevajo infrardečo

Bojan Težak, univ. dipl. inž.,
Terming termografija, d. o. o.,
Ljubljana



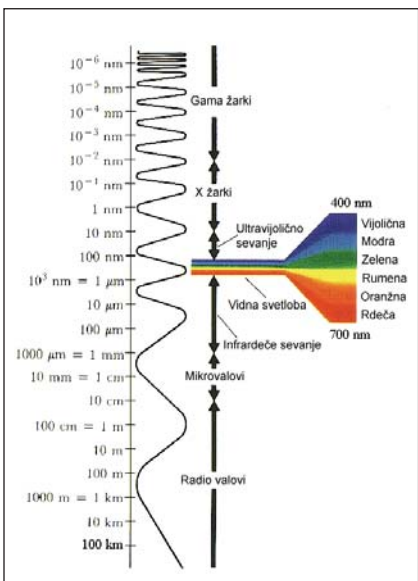
Slika 1. Kvalitetne termografske kamere so zelo uporabne tudi v medicini.



svetlobo [1]. Toplote, ki jo sevajo telesa s temperaturami pod 500 °C, ne moremo videti s prostim očesom, ker je valovna dolžina sevanja daljša od valovne dolžine vidnega spektra. Koža je veliko boljši toplotni senzor kot naše oči. Šele ko temperatura objektov preseže 500 °C, se valovna dolžina toplotnega sevanja toliko skrajša, da se približa vidnemu ob-



Slika 2. Potek ogrevanja jeklenega valja v indukcijski peči in ohlajanje raztaljenega stekla lahko zaradi visokih temperatur grobo ocenimo tudi s prostim očesom [2]



Slika 3. Elektromagnetni spekter. Infrardeče valovanje obsega področje med 1 in 1000 μm

močju. Zelo vroče predmete smo zato sposobni zaznati tudi z očmi (slika 2).

2.2 Elektromagnetni spekter

Od celotnega elektromagnetnega spektra, ki sega od gama žarkov do dolgih radijskih valov, smo neposredno z očmi sposobni zaznati le majhen del, ki zajema vidno svetlobo od 0,40 do 0,70 μm (mikrometrov). Barve vidimo zato, ker lahko ločimo med različnimi valovnimi dolžinami (slika 3).

Atmosfera razmeroma dobro prepušča le del infrardečega spektra. Za praktično uporabo sta primerni samo dve tako imenovani IR-okni (slika 4); kratkovalovno med 2 in 5 μm in dolgovalovno med 8 in 12 μm.

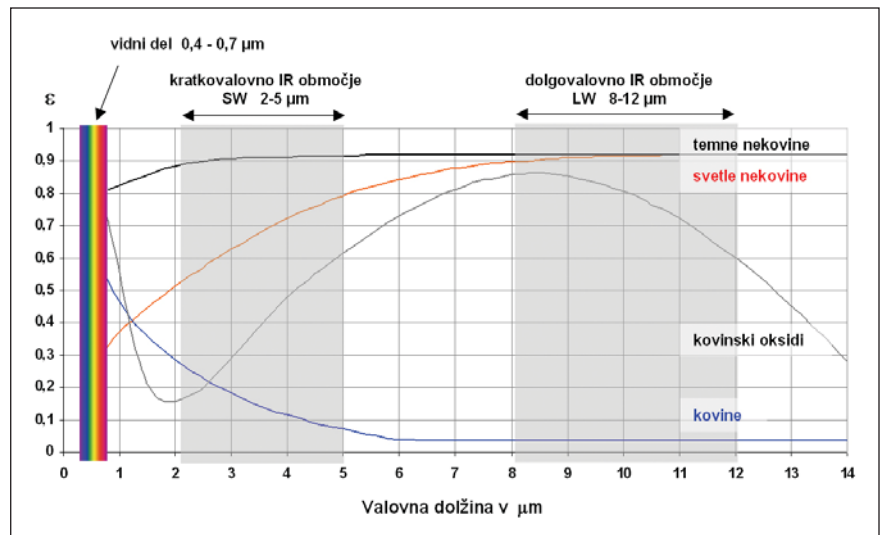
2.3 Emisivnost

Pomembna lastnost termografije je, da lahko vsaki točki na sliki (termogramu) tudi izmerimo temperaturo.



Slika 5. Priključek na desno varovalko je slab. Zaradi majhne emisivnosti nepobarvane bakrene površine in vijaka ga na termogramu vidimo navidezno hladnega [2].

temperatura nizka in seveda napačna. Slika 5 prikazuje problem merjenja nizkoemisivnih površin.

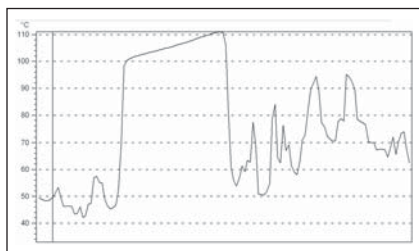


Slika 4. Atmosferska okna za IR-svetlobo in odvisnost emisivnosti ϵ od valovne dolžine

Termografska kamera zaznava tako imenovano »navidezno« temperaturo. Od površine objekta sprejema energijo, ki jo je ta sposobna izsevati in reflektirati. Visokorefleksne kovinske površine imajo izredno nizko sposobnost sevanja (slika 4). Tudi če je tak objekt na visoki temperaturi, je s kamero izmerjena »navidezna«

Na diagramu na sliki 6 je prikazan pripadajoči linijski temperaturni profil vzdolž linije na sliki 5, ki kaže izrazit skok »navidezne« temperature na pobarvanem delu bakrene povezave. Na refleksijskih priključkih, zgoraj in spodaj (slika 5), lahko pričakujemo podobno visoko temperaturo, ki pa jo termogram in graf

zaradi majhne sposobnosti sevanja refleksne površine ne zaznata.



Slika 6. Linijski temperaturni profil

Termografer mora biti zato pri merjenju refleksnih površin izredno pozoren. Neupoštevanje prave vrednosti za emisivnost in ostalih motečih vplivov lahko neizkušenega merilca privede do popolnoma napačnih zaključkov, ki imajo lahko katastrofalne posledice.

Emisivnost je lastnost površine, da seva in absorbira IR-energijo. Emisivnost realne površine je vedno manjša od emisivnosti idealnega črnega telesa, ki pri dani temperaturi seva več kot vsa druga telesa (slika 7). Emisivnost črnega telesa ($\epsilon = 1$) je neodvisna od valovne dolžine. Emisivnost vseh drugih teles je manjša od 1. Sevanje črnega telesa določa Stefanov zakon:

$$W_{\epsilon} = \sigma AT^4 \quad (1)$$

kjer v enačbi predstavlja:

- W_{ϵ} – moč sevanja črnega telesa v W
- σ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$)
- A – sevalna površina v m^2
- T – absolutna temperatura v K

Sivo telo imenujemo objekt s konstantno emisivnostjo preko vseh valovnih dolžin, ki je manjša od 1 ($\epsilon < 1$). Zanj velja, da je moč sevanja za faktor emisivnosti manjša od sevanja črnega telesa:

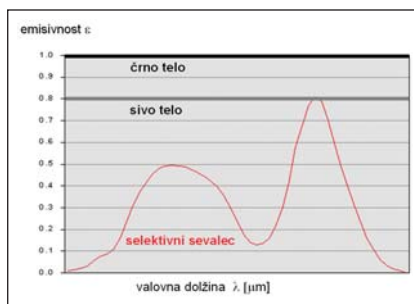
$$W_s = \epsilon \sigma A T^4 \quad (2)$$

pri čemer je W_s moč sevanja sivega telesa v W.

Selektivni sevalec je površina, katere emisivnost se spreminja z valovno dolžino:

$$W(\lambda) = \epsilon(\lambda) \sigma A T^4 \quad (3)$$

kjer predstavlja $W(\lambda)$ moč sevanja selektivnega sevalca v W.



Slika 7. Odvisnost emisivnosti od valovne dolžine za različna telesa

Na emisivnost vplivajo vrsta materiala, struktura površine, geometrija merjenca, kot gledanja, temperatura merjenca in valovno področje občutljivosti termografske kamere.

Primer vpliva emisivnosti površine prikazuje slika 8. Visoko emisiven asfalt je tudi dober absorber toplote. Na mestih, kjer niso stali avtomobili, je sonce asfalt močno ogrelo. Hladne sence so posledica parkiranih avtomobilov. Na desnem parkirišču lahko na termogramu celo razpoznamo, da so se v kratkem času izmenjali trije različno veliki avtomobili.

Emisivnost površine, ki jo opazujemo s termografsko kamero, je torej zelo pomemben podatek, ki ga moramo poznati, če hočemo pravilno razumeti termogram in izmeriti pravo temperaturo v zeleni točki.

3 Uporaba termografije

3.1 Prednosti termografskega pregleda

Termografija odkriva stanje opazovanega objekta na osnovi od objekta



Slika 8. Visoka emisivnost asfalta pomeni tudi visoko sposobnost absorpcije toplote

sprejete izsevane in reflektirane toplotne energije (slika 9). Pri tem na objekt vplivajo vsi trije načini širjenja toplote: prevodnost, konvekcija in radiacija.



Slika 9. Hidravlična črpalka v vidni svetlobi (zgoraj) in pri pogledu skozi IR-kamero (spodaj)

Nekaj glavnih prednosti termografskega pregleda:

- zmanjšuje verjetnost požara,
- zmanjšuje število nenadnih zastavitev proizvodnje,
- preprečuje draga popravila,
- preverja uspešnost montaže novih naprav in popravil,
- podaljšuje življenjsko dobo naprav.

3.2 Termografska kamera

Termografska kamera je instrument, ki pretvarja nevidno toplotno seva-



nje v vidno sliko in jo prikaže na zaslonu. Dobljeno toplotno sliko imenujemo termogram. Kamera sprejema toplotno energijo in jo preračuna v temperaturo, ki je mera za količino toplote. Tako je mogoče z infrardečo kamero ne samo videti toploto predmetov, ampak tudi meriti njihovo temperaturo.

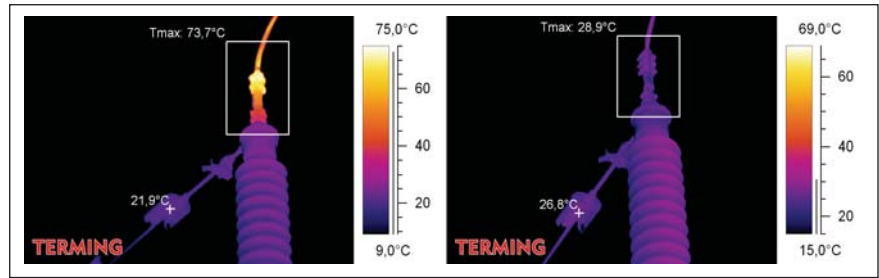


Slika 10. Termografska kamera nam omogoča videti nevidno svetlobo, toploto.

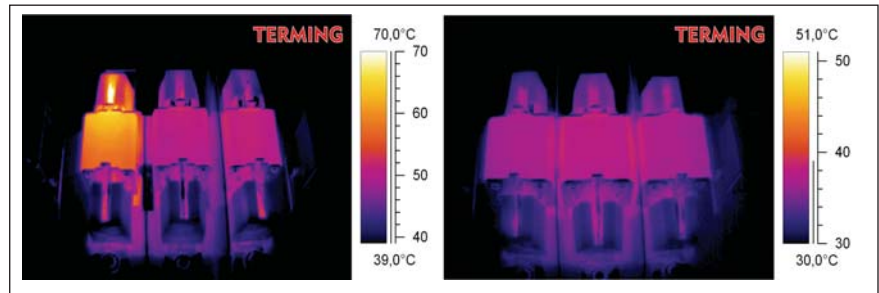
Termografska kamera (slika 10) se uporablja zelo podobno kot videokamera, pri čemer je v vsakem trenutku možno zelo hitro in cenovno ugodno preveriti stanje stroja ali njegovega dela.

3.3 Primeri iz elektroenergetike

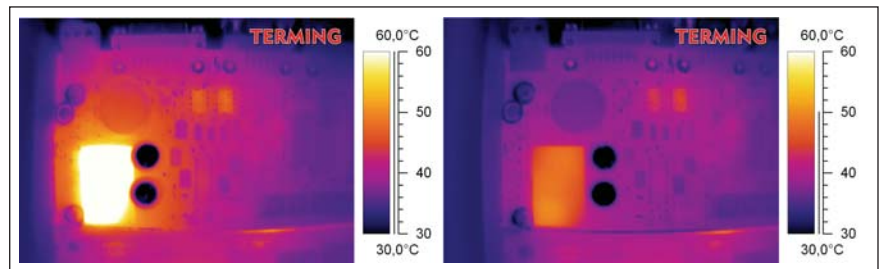
Uporaba termografije v elektroenergetiki je tako razširjena prav zaradi možnosti nekontaktnega merjenja. Na slikah 11, 12 in 13 je prikazanih nekaj termogramov, ki dokumentirajo široko uporabnost metode, od kontrole naprav visoke napetosti do elektronskih elementov na tiskanih vezjih.



Slika 11. Priključek na 110 kV ločilnik pred popravilom in po njem [2]



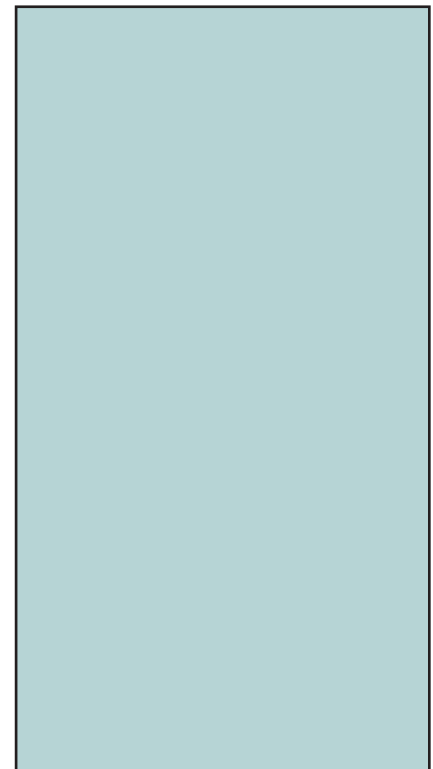
Slika 12. Po popravilu podnožja se leva varovalka ne pregreva več [2]



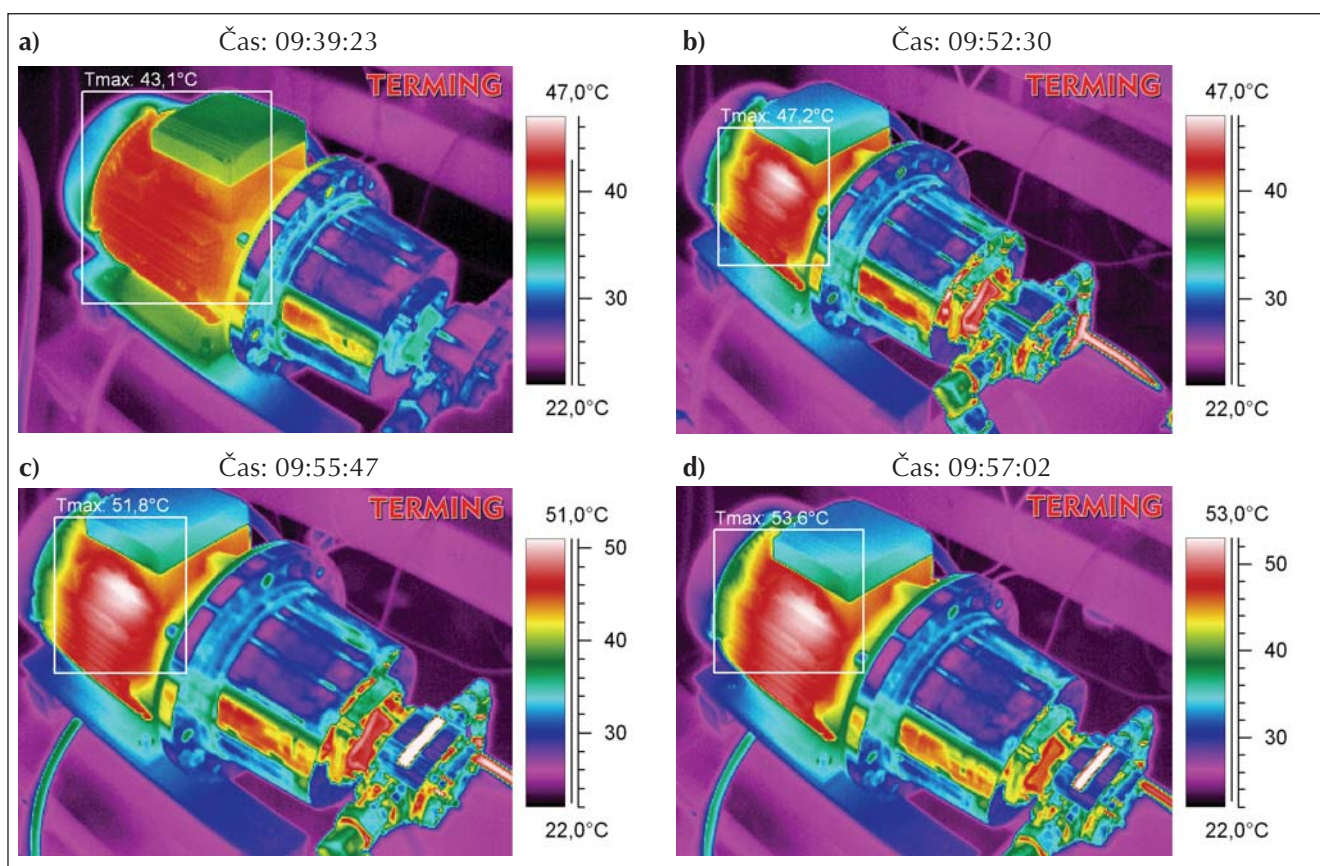
Slika 13. Visoko greetje elementa na levem termogramu je v primerjavi z referenčnim elementom na desnem termogramu znak za okvaro [2]

3.4 Analiza termogramov

Iz termogramov naprave, posnetih s časovnim zamikom, lahko zelo enostavno spremljamo temperaturne spremembe na površini naprave. Tako lahko dobimo trend spreminjanja temperature. Na sliki 14 je prikazan diagram trenda naraščanja temperature ohišja motorja po vklopu.



TERMING
 TERMOGRAFIJA d.o.o.
 PREGLED STANJA
 ELEKTROENERGETSKIH NAPRAV
 Tel.: 01 281 16 96
 E-pošta: terming@siol.com
 KO TOPLOTA POSTANE VIDNA



Slika 14. Spremljanje ogrevanja elektromotorja s termografsko kamero

Za natančno analizo bi lahko število posnetkov poljubno povečali ali podaljšali čas meritve. Iz istih termogramov lahko naredimo diagrame trendov za katerokoli površino na motorju (slika 15). Hitro, natančno in nekontaktno.

Časovni interval med prvim in zadnjim termogramom na sliki 14 je manj kot 18 minut. Analizo trenda pa lahko naredimo tudi za veliko daljše obdobje. Na sliki 16 je posnetek stanja priključkov na stikalo [3]. Levi in desni zgornji priključek se grejeta bolj kot srednji. Tempera-

turne razlike med priključki so okoli 25 °C, kar je razmeroma malo.

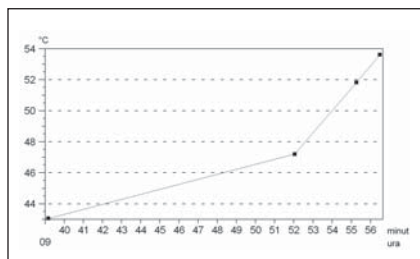
Tako pregrevanje ne zahteva takojšnjega ukrepanja, saj ni nevarnosti, da bi v kratkem času prišlo do večjega poslabšanja. Vsekakor pa je spoje potrebno popraviti ob prvem načrtovanem remontu, kar se v tem primeru ni zgodilo. Slika 17 prikazuje stanje po dveh letih. Ker napaka ni bila odpravljena, je prišlo do znatnega pregrevanja levega priključka.

Po dveh letih je zaradi pregrevanja levega priključka prišlo do vidne po-

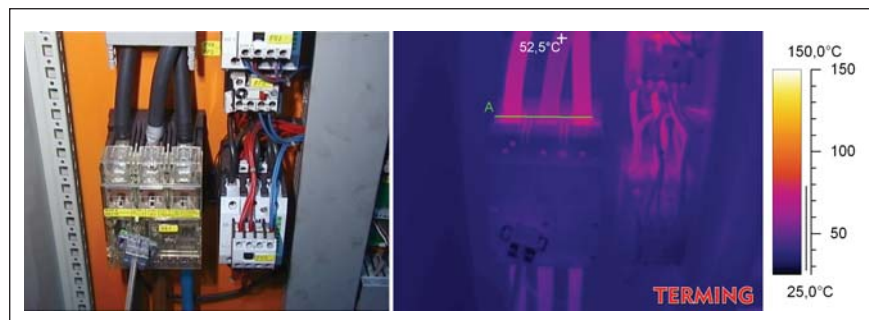
škodbe kabla. Tako visoko pregrevanje je poškodovalo tudi stikalo, ki ga je potrebno zamenjati. Visokim stroškom popravila bi se s pravočasnim ukrepanjem lahko izognili.

Temperaturne razlike ob odkritju napake (linija A) in po dveh letih (linija B) so prikazane na diagramu na sliki 18.

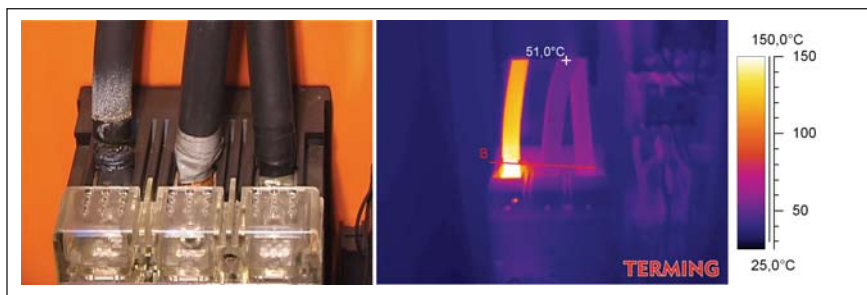
Ob odkritju napake so najvišje temperaturne razlike med priključki znašale okoli 25 °C, kar je razvidno z grafa A na sliki 18. Meritve po dveh letih so odkrile znatno pregrevanje



Slika 15. Iz termogramov je mogoče enostavno dobiti podatke za časovni prikaz poteka ogrevanja elektromotorja



Slika 16. Temperaturne razlike med zgornjimi priključki na stikalo znašajo le okoli 25 °C.



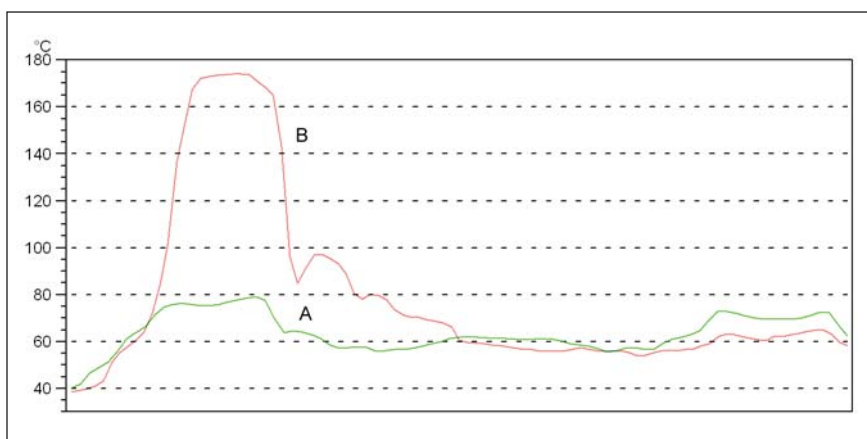
Slika 17. Stanje na enakih priključkih po dveh letih

levega priključka. Graf B na sliki 18 kaže, da je levi priključek na temperaturi preko 170 °C, medtem ko sta ostala dva priključka celo na nižji temperaturi kot ob prvih meritvah.

Visoka temperatura je že poškodovala priključek in stikalo. Ali bo povzročila tudi požar, je odvisno od vestnosti vzdrževalcev. Dobili so drugo, veliko

hodiščnimi vrednostmi se lahko spremljata trenutna zmogljivost stroja in njegovo trenutno stanje. Ko se pojavi problem, so lahko razpoložljivi podatki o preteklih stanjih koristni pri ugotavljanju vzroka nastanka napake in so v pomoč pri njenem odpravljanju.

Merjenje s termografsko kamero zgleđa na prvi pogled zelo enostav-



Slika 18. Temperaturne razlike ob odkritju napake in po dveh letih

bolj resno opozorilo, da ukrepajo. Ali se bo to zgodilo pravočasno?

■ 4 Zaključek

Termografija se je pri vzdrževanju dokazala kot odlično orodje za lociranje in diagnostiko stanja elektroenergetskih naprav kakor tudi hidravličnih komponent ter sistemov. Proces termografskega pregleda je hiter in učinkovit, kar je velikega pomena za takšne dinamične sisteme, kot so hidravlični.

Z zbiranjem podatkov v daljšem obratovalnem obdobju in primerjavo z iz-



no. Žal pa je veliko primerov, ko je novopečeni »termografer« postavljal napačno in usodno, predvsem pa drago diagnozo stanja naprave.

Ne glede na vrsto uporabe velja, da je pri merjenju in razlagi rezultatov nujno potrebno znanje s področja trenutne uporabe in termografije. Le v rokah šolanega in izkušenega termograferja ter s sodelovanjem strokovnjaka, ki merjene naprave ali objekt dobro pozna, bodo rezultati meritev pravilni in uporabni.

Literatura

- [1] Težak, B., Lesjak, S.: Termografija; Elektrotehniška revija; št. 2/2002.
- [2] Težak, B.: Termografska poročila podjetja iz obdobja 1992–2005, Terming, d. o. o.
- [3] Težak, B.: Termografija in požarna varnost; revija Požar; letnik 11, maj 2005.
- [4] Ortwig, H., Staud, J., Schafer, J., Luxenburger, B.: Infraroththermografie zur Zustandsanalyse fluidtechnischer Anlagen; 4. ifk, Dresden, 2004

Usage of IR Thermography in Fluid Power – Part 1.

Abstract: An abnormal rise in temperature is almost the first indication of equipment malfunction. Monitoring the surface temperature condition with infrared (IR) thermography has become the standard procedure in every preventive maintenance program. Thermography is, as non-invasive and non-contact temperature measurement method, one of the most effective techniques for early detection of equipment problems. One of the most popular applications of thermography is the preventive inspection of electro-energetic equipment. Although hydraulic systems are ideal for thermographic monitoring, until now reports on thermography usage in fluid technique are rare.

The basics of thermography, along with a few examples, are explained in the first part of this paper. The second part shows some applications on hydraulic systems and components.

Keywords: infrared thermography, IR thermography, preventive maintenance, predictive maintenance, hydraulic, fluid technique.