VILLAMOS BERENDEZÉSEK TERMOGRÁFIAI VIZSGÁLATA II.

Az infravörös sugárzás-érzékelés alapján csak az emissziós tényező, a reflektált hősugárzás (környezeti hőmérséklet) és (hősugárzás szempontjából átlátszó testek esetén) a háttér hőmérsékletének pontos ismerete mellett számítható ki (a termográfiai alapegyenlet alapján) a tárgy(felület) hőmérséklete. Minél alacsonyabb a tárgy emissziós tényezője (a sugárzás-kibocsátási képessége), annál többet kell korrigálni, tehát annál pontosabban kell minden paramétert megadni.

Az említett összefüggésből következik, hogy egyes esetekben semmiképp nem mérhető a tárgy hőmérséklete:

- tükröződő felületek esetén (például polírozott felületek, oxidációmentes fémfelületek),
- infrasugárzás szempontjából szinte tökéletesen átlátszó anyagok esetén (például egyes kristályos anyagok, különböző gázok).

Magyarázatként elmondhatjuk, hogy mindkét esetben az emissziós érték közel „0", tehát a test hőmérsékletével összefüggő és érzékelése alapján hőmérséklet-számításra felhasználható sugárzás szinte nincs. A gyakorlatban ez a tény igen nagy jelentőséggel bír: tudomásul kell vennünk ugyanis azt, hogy például új – szépen polírozott – alumíniumból vagy rozsdamentes acélból készített burkolattal rendelkező hőszigetelések termográfiai eszközökkel nem ellenőrizhetők. Teljesen mindegy az, hogy milyen hőmérsékletű (akár tűzforróságú) a mért felület, mindig csak a rajta reflektált környezeti tárgyak hőmérsékletét fogjuk látni („mérni"). Hasonló ténnyel állunk szemben akkor, amikor vadonatúj elektromos szerelvényeket, kapcsolószekrényeket kellene bevizsgálnunk: maga a fémes (polírozott) sínek, kötések, csatlakozások hőmérséklete nem határozható meg érintésmentesen. (Oxidált vagy festett [szigetelővel bevont] felületek azonban mérhetők: ilyenkor ugyanis nemfémes, matt jellegük miatt magas emissziós tényezőjük van.)

Ha egy hőképen sokféle anyagfelület található, akkor a pontos hőmérsékletszámításhoz szükségessé válhat a pixelenkénti emissziós tényező korrekciója. Erre klasszikus példaként az elektronikai kapcsolások hőterhelésének felmérése említendő: vannak nemfémes felületek (például kerámia, műanyag, lakk) és fémes (például réz, ón, nikkel és arany) felületek is. Megoldásként egyenletesen felmelegítik a bevizsgálandó NYÁK-ot egy, a környezettől elegendően eltérő hőmérsékletre (például 50 °C-ra 20 °C-os környezetben), és az érzékelhető hősugárzás-intenzitást pixelenkénti emissziós tényezőként tárolják el. Az ezután üzembe helyezett kapcsolásról készült hőkép számítását pedig a korábban rögzített emissziós tényező pixelmátrix alkalmazásával végzi el a szoftver, aminek eredményeképpen a minden egyes pixelre kiszámított hőmérsékletadat az eltérő emissziós tényezők ellenére mégis pontosan meghatározásra kerül.

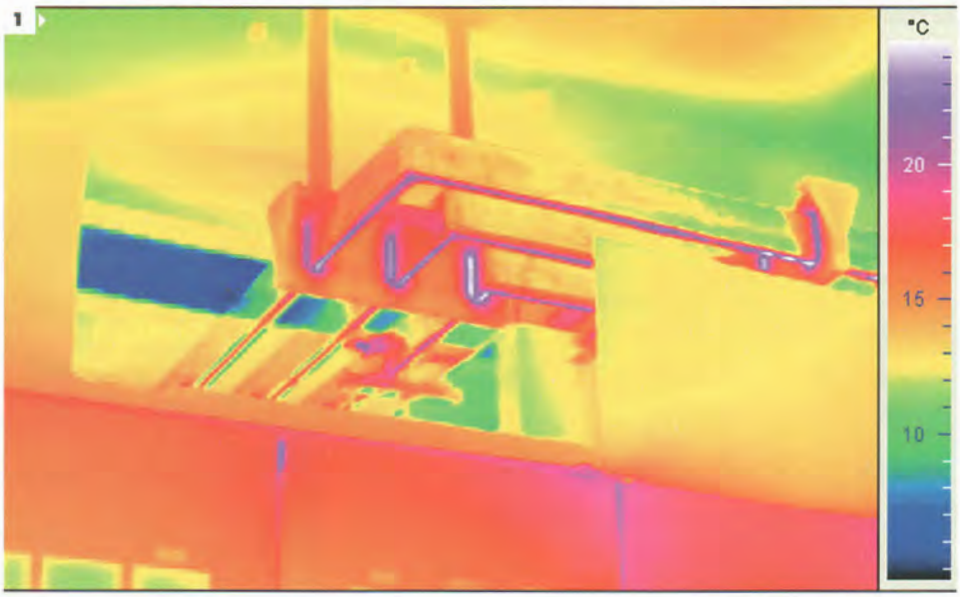
Gyakorlati mérési tanácsok

Ez a fejezet részletesen foglalkozik azzal, hogy termográfiai módszerekkel villamos berendezések vonatkozásában milyen méréseket (és milyen eredménnyel) lehet végrehajtani, és mire kell odafigyelni a mérési hibák kiküszöbölése érdekében.

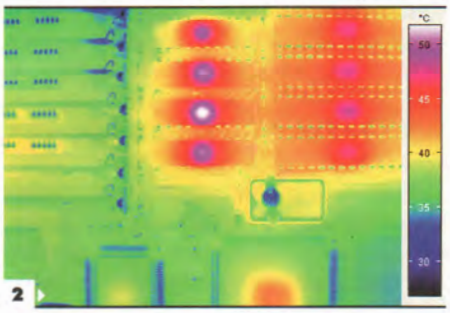
Villamos berendezésekkel kapcsolatos termográfiai mérések

A villamos berendezések termográfiai állapotfelmérése azon alapszik, hogy az alulméretezett vagy sérült vezetékek, a rossz kötések (megnövekedett átmeneti ellenállásuk miatt), valamint legtöbb esetben az elektromos szempontból meghibásodott készülékek a szokásosnál (a megengedettnél) magasabb hőfokra melegszenek fel. Itt a termográfiának az a legnagyobb előnye, hogy a mérések biztonságos távolságból – akár több kV-on üzemelő berendezésekről is – elvégezhetők anélkül, hogy ez a vizsgált eszköz üzemeltetését befolyásolná.

**Példák alacsony emisszióval rendelkező – nehezen mérhető – tárgyakra.
Új – polírozott felületű – rézsín. A rézsín alja melegebbnek tűnik a többi részénél, holott a réz jó hővezető képessége miatt biztos nincsenek eltérések, a látható hőhatás a rézsín alatt elhelyezkedő meleg berendezések tükröződéséből adódik.**

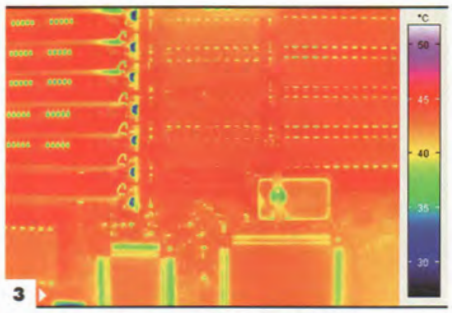


Példa az eltérő emissziós tényezők képpontonkénti korrekciójára.



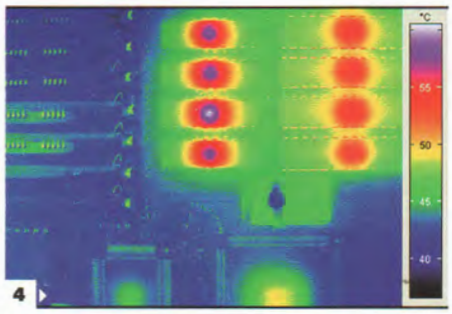
2

NYÁK hőképe emissziós érték-korrekció nélkül:
• a forró áramkör-lábak hidegnek tűnnek,
• a téves adatok oka: eltérő emissziós értékek.



3

Az 50 °C-ra felmelegített NYÁK hőképe:
• látszólag eltérő hőmérsékletek vannak,
• az eltérések okai az eltérő emissziós értékek.



4

NYÁK hőképe emisszióérték-korrigálással:
• pixelenkénti korrekció az 5. ábra alapján,
• a forró áramkörlábak így a hőképen is forrók.

Szokásos alkalmazási területek

■ Villamos berendezések állapotfelmérése az energiaiparban: generátorok, transzformátorok, szigetelők, kapcsolók, levezetők, kábelek, kötések, elosztók stb. (magas-, közép- és kisfeszültségű hálózatokban egyaránt).

■ Villamos berendezések ellenőrzése a termelési üzemekben: betáp-transzformátorok, fő- és alelosztók, kapcsolószekrények, egyéni bekötések stb.

■ Villamos gépek, berendezések az iparban: villanymotorok, fázisjavítók, frekvenciaváltók stb.

Termográfiai úton megtalálható villamos hibák

■ Alulméretezett (túlterhelt) kábelek, kapcsolószerelvények, kötések, transzformátorok.

■ Hibás (meglazult, korrodált) érintkezések bármilyen villamos berendezésen vagy eszközön.

■ Sérült kábelfejek, gyűrűk, túlfeszültség-levezetők.

■ Gyenge érintkezés a biztosítók rugóskapcsain, késes megszakítókon, áramvezető betoldásoknál, kábelkötéseken, motorindítókon.

■ Sérült árammegszakítók és kapcsoló szerelvények.

■ Fázis-kiegyenlítetlenségek a háromfázisú betáplálásokon.

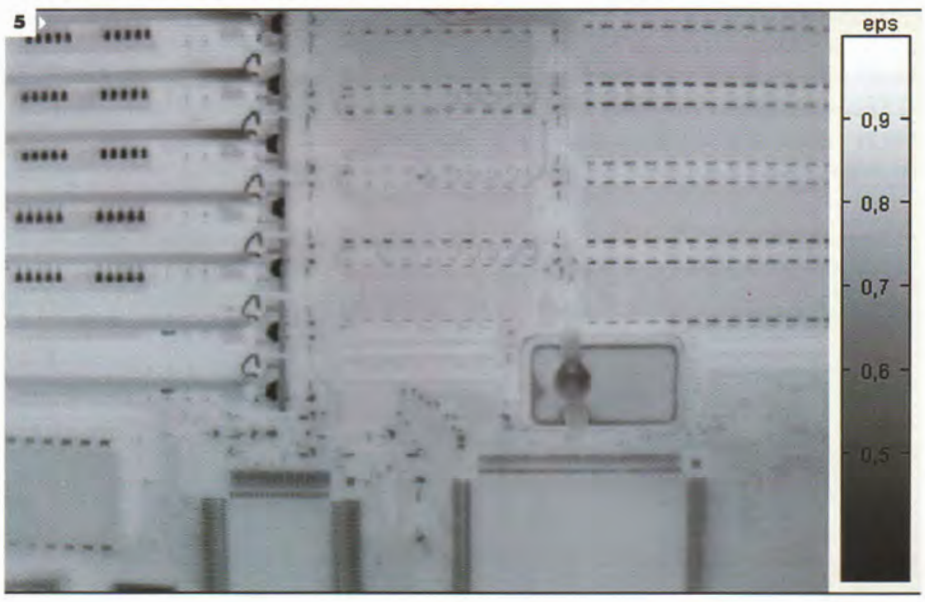
■ Túlterhelés vagy felharmonikusok miatti túlmelegedés.

■ Túlmelegedett (sérült vagy rossz beállítású) motor és generátor-kefeszerelvények.

■ Eltömődött transzformátor és generátor-hűtőrendszerek.

■ Hibás alkatrészek, mint például a kondenzátorok és a teljesítmény-félvezetők.

Példa az eltérő emissziós tényezők képpontonkénti korrekciójára.
NYÁK felületének emissziós értéke:
• az egyenletes hőmérsékletből számított eps,
• pixelenként történt az emisszió meghatározása.



5

Fontos tanácsok

■ Nagyfeszültségű berendezések esetén a biztonsági távolság feltétlenül betartandó, életveszély!

■ Kültéri mérések (például transzformátorok és távvezetékek) a hőreflexiók és a zavaró háttérsugárzás kiküszöbölése érdekében kora hajnalban vagy késő este (napsütés nélküli napszakban) végezhetők.

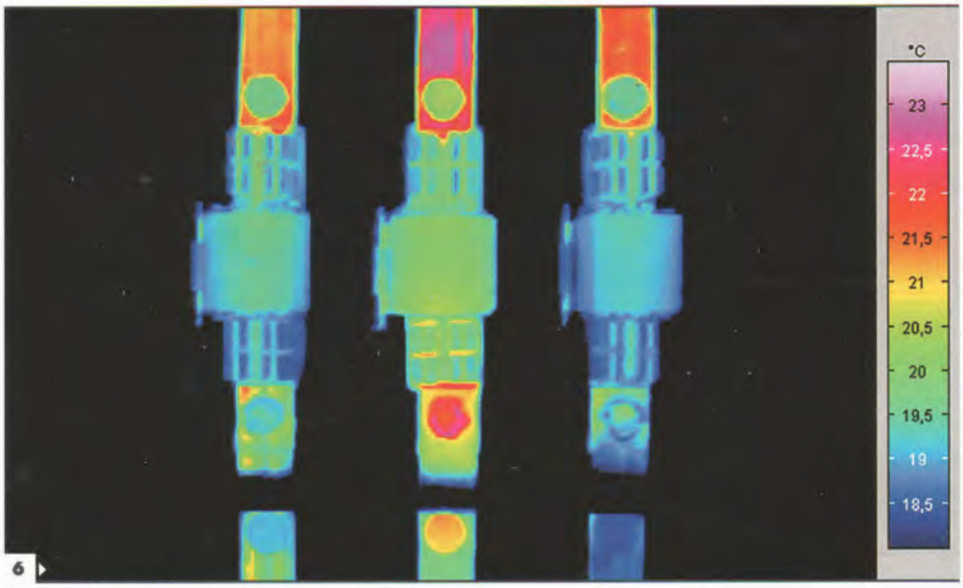
■ Főleg új berendezések esetén, tekintettel arra, hogy a tükörfényes, illetve szépen megmunkált fémes felületek nagyon kis emissziós tényezővel rendelkeznek, hőreflexió lép(het) föl. Ilyen jellegű mérési hibák kiküszöbölése érdekében többféle mérési pozícióból is ajánlatos elvégezni a méréseket.

■ Amennyiben a tükröződések miatt lehetetlen kiértékelhető méréseket végezni, a mérendő felületek mattítása (például matt festékkel) vagy ismert emissziós tulajdonsággal rendelkező anyag (például vékony szigetelőszalag) felragasztása segíthet. Természetesen mindez csak feszültségmentes állapotban végezhető el.

■ Ahhoz, hogy névleges (illetve üzemi vagy „teljes") terhelés mellett veszélyessé váló hibahelyek a mérés alkalmával felderítésére kerüljenek, a mérés az üzemi terhelés mellett végzendő. Az áramerősség négyzetével nő a villamos alkatrészek teljesítményterhelése és ezáltal a hőmérséklete is.

■ A kapcsoló és elosztó szerelvények tokozott részei nem mérhetők közvetlenül. Plexi vagy más műanyag ablakokon keresztül nem lehet termográfiai méréseket végezni. Ezeket – ha lehetséges – a mérés előtt (feszültségmentes állapotban!) le kell szerelni.

■ Kis mérési tárgyak vagy nagy távolságból történő mérések esetén (például távvezetékek) figyelembe veendő az alkalmazott termográfiai eszköz (hőkamera) által nyújtott geometriai felbontás. Egy-



6

Ipari biztosítékok felmérése

egy mérési felületre legalább három képpont kell, hogy essen, azért, hogy helyesen értékelhető legyen a mért hőmérsékletadat. Szükség esetén megfelelő optika (speciális teleobjektív) alkalmazásával kell a geometriai felbontóképességet a tárgy méretéhez/távolságához hozzáigazítani.

Tanácsok a megfelelő hőkamera kiválasztásához a mérési feladat függvényében

Míg az előző részben elmagyaráztuk a hőkamerákra jellemező műszaki paraméterek jelentését, a következőkben a szakmai területekre vonatkozóan adjuk meg a megfelelő mérőeszköz (hőkamera) kiválasztási szempontjait.

I. Villamos berendezések felmérése

■ **Hullámhossz-tartomány:** hosszúhullámú. Megjegyzés: a villamos berendezések tipikus hőmérséklettartománya 0 °C és 200 °C között van. Ezek a mérések legjobb minőségben hosszúhullámú hőkamerával végezhetők el, mivel a Planck-féle törvény szerint a testek ezeken a hőmérsékleten leginkább hosszúhullámú hősugárzást bocsátanak ki.

■ **Mérési (kalibrálási) tartomány:** legalább 0...150 °C vagy inkább: -20...250 °C. Megjegyzés: a méréstartományt a mérni kívánt berendezések várható hőmérsékletei alapján kell kiválasztani. Amennyiben hasonló áron beszerezhető szélesebb kalibrálási tartományú hőkamera, akkor a biztonság kedvéért ezt válasszuk. Természetesen a legjobb képminőséget a -20, illetve -40 °C-tól kalibrált kamerák biztosítják, mivel kisebb zajszintűek.

■ **Képpontok száma:** min. 160x120, illetve 320x240 képpont, jobb a 384x288 képpont. Megjegyzés: kisebb pixelszámmal csak nagyon kis felület, így például 120x160 pixellel csupán a kapcsolószekrények része (a legkisebb kábel keresztmetszetének függvényében csupán negyede, nyolcada) rögzíthető egy-egy hőképen. Ilyen kis kamera ezért hibakeresés elvégzésére jó, főleg, ha rendelkezik határértéktúllépésre automatikus vizuális vagy akusztikai riasztással, de komplett villamos hálózatok vagy gyártói berendezések dokumentálása a rengeteg felvétel, illetve a szükségessé váló hőképmontírozás miatt nem gazdaságos ezzel a berendezéssel.

■ **Geometriai felbontás:** min. 2 mrad, jobb az 1,5 mrad, legjobb az 1 mrad. Megjegyzés: mivel betartandó, hogy legalább 2 elemi képpont essen a legkisebb mérendő tárgy [a legkisebb keresztmetszetű kábel] felületére, a geometriai felbontás korlátozza, hogy milyen messziről lehet hőképeket készíteni. „Gyenge" geometriai felbontású hőkamera esetén ez ahhoz vezethet, hogy egy-egy kapcsolószekrényről akár 8-10 felvétel készítése válik szükségessé minden kábel és kötés korrekt felmérése érdekében.

■ **Hőmérséklet-felbontás:** 120 mK, vagy jobb a 80 mK. Megjegyzés: a villamos berendezések felmérése esetén elég nagy hőmérsékletkülönbségekre lehet számítani, ezért nem olyan kritikus pont a hőmérséklet-felbontás.

■ **Képfelvételi frekvencia:** nincs megkötés. Megjegyzés: a hőkamera képfelvételi frekvenciája legfeljebb arra vonatkozólag jelent megkötést, hogy a szkennelő hőkamerák 1 másodperces képfelvételi ideje miatt kameraállvánnyal kell dolgozni. A gyorsabb mátrixos kamerák esetén pedig „kézből" készíthetők a felvételek.

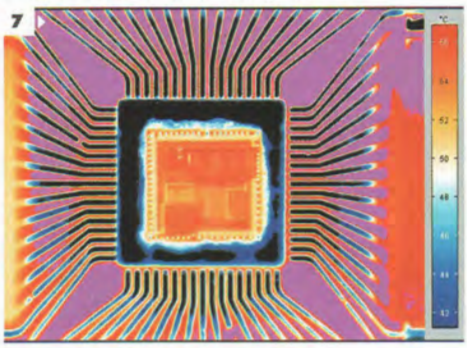
■ **Javasolt „különleges" funkciók:** választható színskála, autofókusz, beépített digitális videokamera vagy kompozit képalkotás (vizuális és hőkép egymásra vetítve).

II. Mikroelektronikai mérések (gyors hőmérsékletváltozással járó folyamatok)

■ **Hullámhossz-tartomány:** hosszúhullámú. Megjegyzés: az elektronikai eszközök tipikus hőmérséklettartománya 0 °C és 200 °C között van. Ezek a mérések legjobb minőségben hosszúhullámú hőkamerával végezhetők el, mivel a Planck-féle törvény szerint a testek ezen a hőmérsékleten leginkább hosszúhullámú hősugárzást bocsátanak ki.

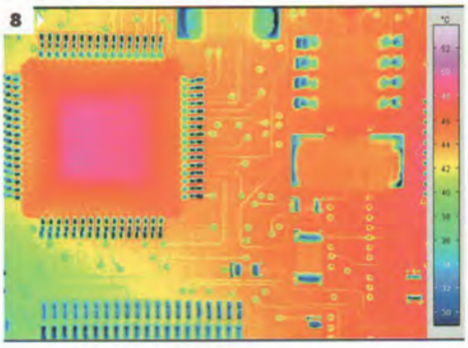
■ **Mérési (kalibrálási) tartomány:** min. 0...150 °C vagy jobb: -20...250 °C. Megjegyzés: a méréstartományt a mérni kívánt elektronikai eszköz várható hőmérsékletei alapján kell kiválasztani. Amennyiben hasonló áron beszerezhető szélesebb kalibrálási tartományú hőkamera, akkor a biztonság kedvéért ezt válasszuk. Termé-

Integrált áramkör mikroszkóplencsével



7

NYÁK standardlencsével



8

szetesen a legjobb képminőséget a -20, illetve -40 °C-tól kalibrált kamerák biztosítják, mivel kisebb zajszintűek.

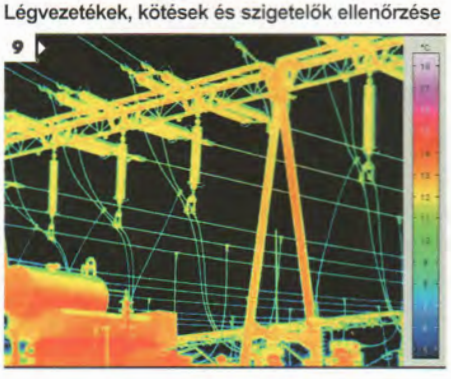
■ **Képpontok száma:** min. 160x120, illetve 320x240 képpont, jobb a 384x288 vagy akár a 640x480 képpont. Megjegyzés: kisebb pixelszámmal csak nagyon kis felületek, így például 120x160 pixellel csupán egy-két integrált áramkörnyi felület rögzíthető egy-egy hőképen. Ilyen kis kamera ezért hibakeresés elvégzésére jó (főleg, ha van határérték-túllépésre automatikus vizuális vagy akusztikai riasztása), de komplett nyákokat (elektronikai paneleket) bemérni és dokumentálni csak rengeteg felvétellel és hőképmontírozással lehet.

■ **Geometriai felbontás:** min. 1,5 mrad, de jobb az 1 mrad. Megjegyzés: mivel betartandó, hogy legalább 2 elemi képpont essen a legkisebb mérendő tárgy (a legkisebb keresztmetszetű áramkör-láb vagy nyomtatott huzal) felületére, a geometriai felbontás korlátozza, hogy milyen messziről lehet hőképeket készíteni. „Gyenge" geometriai felbontású hőkamera esetén ez ahhoz vezethet, hogy egy-egy nyákról akár 8-10 felvétel készítése válik szükségessé minden egyes alkatrész és vezeték korrekt felméréséhez.

■ **Hőmérséklet-felbontás:** 120 mK vagy jobb a 80 mK. Az elektronikai eszközök mérése esetén elég nagy hőmérsékletkülönbségekre lehet számítani, ezért nem olyan kritikus a hőmérséklet-felbontás.

■ **Képfelvételi frekvencia:** > 2 x folyamatfrekvencia. Megjegyzés: ez gyors folyamatok esetén az egyik legkritikusabb hőkamera-paraméter. Mivel a hőképek rögzítése digitális mintavételnek minősül, a digitális jelfeldolgozás egyik alappillérét, a Shannon-törvényt szükséges betartani. Ennek megfelelően a folyamat legmagasabb frekvenciakomponensénél legalább kétszer olyan gyorsan kell a mintavételezést (esetünkben hőképrögzítést) végezni. Ha például egy teljesítményelektronika az 50 Hz-es betáp miatt 50 Hz-es frekvenciával melegszik és hűl, a hőképfelvételi frekvenciának 100 Hz-nél magasabbnak kell lennie. Ellenkező esetben az úgynevezett Aliasing-effektus lép fel, és a hőmérsékletfolyamat időbeni lefolyásának ábrázolásánál az alul-mintavételezés miatt a valóságban lezajlónál lassúbb folyamatokat (változásokat) láthatunk.

Légvezetékek, kötések és szigetelők ellenőrzése



■ **Javasolt „különleges" funkciók:** választható színskála, autofókusz, különbségfelvétel (a referencia-hőképhez képest fellépő változás), sorozatfelvétel, pixelenkénti emissziós tényező-korrekció (az elektronikában alkalmazott alkatrészek – például réz, kerámia, műanyag – nagyon erősen eltérő emissziós tényezővel rendelkeznek, a sok kis apró felület „kézi" korrekciója viszont szinte lehetetlen).

III. Villamos távvezetékek felmérése

■ **Hullámhossz-tartomány:** hosszúhullámú. Megjegyzés: a távvezetékeken mérhető hőmérsékletek a terheléstől függően erősen eltérők lehetnek. Tipikusnak mondható (nyáron, éjjel) a 10...150 °C hőmérséklettartomány. Ilyen hőmérsékletek mérése legjobban hosszúhullámú hőkamerával oldható meg, mert a Planck-féle törvény szerint a testek ezeken a hőmérsékleteken döntő mennyiségben hosszúhullámú hősugárzást bocsátanak ki.

■ **Hőkameratípus:** mátrixos vagy szkennelő (letapogató). Megjegyzés: a távvezetékek vagy szigetelők meghibásodása esetén elég nagy hőmérsékletkülönbségekre lehet számítani, ezért nem olyan kritikus a képhomogenitás. Akár szkennelő, akár mátrixos kamerákkal is tökéletesen értékelhető adatokat lehet nyerni.

■ **Mérési (kalibrálási) tartomány:** -20 ...120 °C vagy jobb a -40...300 °C. Megjegyzés: mivel szabadtéri mérésekről van szó, ezért ezeket éjjel kell elvégezni. Az évszaktól függően előfordulhat, hogy a mérés közben lesüllyed a hőmérséklet akár -10 °C alá is, ilyenkor már csak olyan hőkamerával érünk el elfogadható minőségű felvételeket, amely kalibrálási tartománya -20 °C-tól kezdődik. Természetesen még jobb képminőséget biztosítanak a -40 °C-tól kalibrált kamerák, mivel kisebb zajszintűek. Ezért leginkább a -20 °C, illetve a -40 °C-tól kalibrált hőkamerák alkalmazását javasoljuk.

■ **Képpontok száma:** min. 320x240 képpont, jobb a 384x288 képpont. Megjegyzés: kisebb pixelszámmal csak nagyon kis felületek rögzíthetők egy-egy hőképen, például 120x160 pixellel csupán egyetlenegy szigetelő. Egy távvezetékszakasz felmérése emiatt rengeteg felvétellel járna, aminek feldolgozása is hatalmas munka.

■ **Geometriai felbontás:** min. 0,3 mrad, vagy jobb a 0,2 mrad. Megjegyzés: ez a legkritikusabb paraméter a távvezetékek felmérése esetén! Ahhoz, hogy megmérjük a 20 mm átmérőjű sodrony hőmérsékletét, 30 m magasban, korrekt módon (legalább két elemi képpont essen a felületére), 0,3 mrad vagy jobb geometriai felbontás szükséges. Mivel a mátrixos kamerák képpontjai között „hézag" van, még szigorúbb feltételt kellene alkalmazni (3 képpont essen a felületre), ezért biztonságosan pontos mérés csak 0,2 mrad mellett garantálható.

■ **Hőmérséklet-felbontás:** 120 mK, vagy jobb a 80 mK. A távvezetékek hibahelyein leggyakrabban nagy hőmérsékletkülönbségekre lehet számítani, ezért nem olyan kritikus a hőmérséklet-felbontás.

■ **Képfelvételi frekvencia:** talajról, álló járműről történő képfelvételnél nincs megkötés. Megjegyzés: a hőkamera képfelvételi frekvenciája legfeljebb arra vonatkozólag jelent megkötést, hogy a szkennelő hőkamerák 1 másodperces képfelvételi ideje miatt kameraállvánnyal kell dolgozni. A mátrixos kamerák esetén szintén állvány szükséges, mivel egyébként nem „célozható" be a messzeségben lévő sodrony vagy szigetelő.

■ **Javasolt „különleges" funkciók:** választható színskála, autofókusz, mindenképpen megfelelő teleobjektív, szkennelő kamera esetén valódi (elektrooptikai) nagyítás (Zoom), esetleg kompozit képalkotás (vizuális és hőkép egymásra vetítve), mozgó járműről történő felvételkészítéshez kamera-stabilizátor.

Szívesen állok minden érdeklődő rendelkezésére szakmai tanácsadással.

Rahne Eric