író: Rahne Eric
okl. villamosmérnök

Villamos berendezések termográfiai állapotfelmérése

A cikksorozatunk múlt hónapban megjelent első része betekintést nyújtott a villamos elosztó-, kapcsoló- és vezérlőszekrények felmérésével kapcsolatos gyakorlati problémák egy részébe:

a villamos berendezések fémfelületei tipikus hőreflexiójából vagy letakaró műanyagokból adódó megfigyelési nehézségekre és annak megoldási lehetőségeire, valamint a hőkamera adottságai alapján figyelembe veendő geometriai felbontás követelményére.

A második részből megtudhatjuk, hogy mi a szerepe az olyan hőkamera-paramétereknek, mint a képfelbontás, a képrögzítési/képfrissítési frekvencia, a fókuszálás és mélységélesség.

Általánosan dilemmás kérdés, hogy a hőkamera milyen **pixelfelbontással (hány képponttal)** rendelkezzen. A sokpixeles (valóban) professzionális hőkamerák nagy látómező mellett elegendően jó geometriai felbontással rendelkeznek, így kevés felvétellel felmérhetők és dokumentálhatók a nagyobb kapcsolószekrények is.

A gépbekötések vagy műhelyi elosztások szekrényei pedig tipikusan egyetlenegy hőképen rögzíthetők. Viszont a nagyobb képpontszámmal (nagyobb detektorral) rendelkező hőkamerák beruházási költsége is sokkal magasabb. Milyen hőkamera beszerzése felel meg a mérési igényeknek, mely egyben még gazdaságos is?

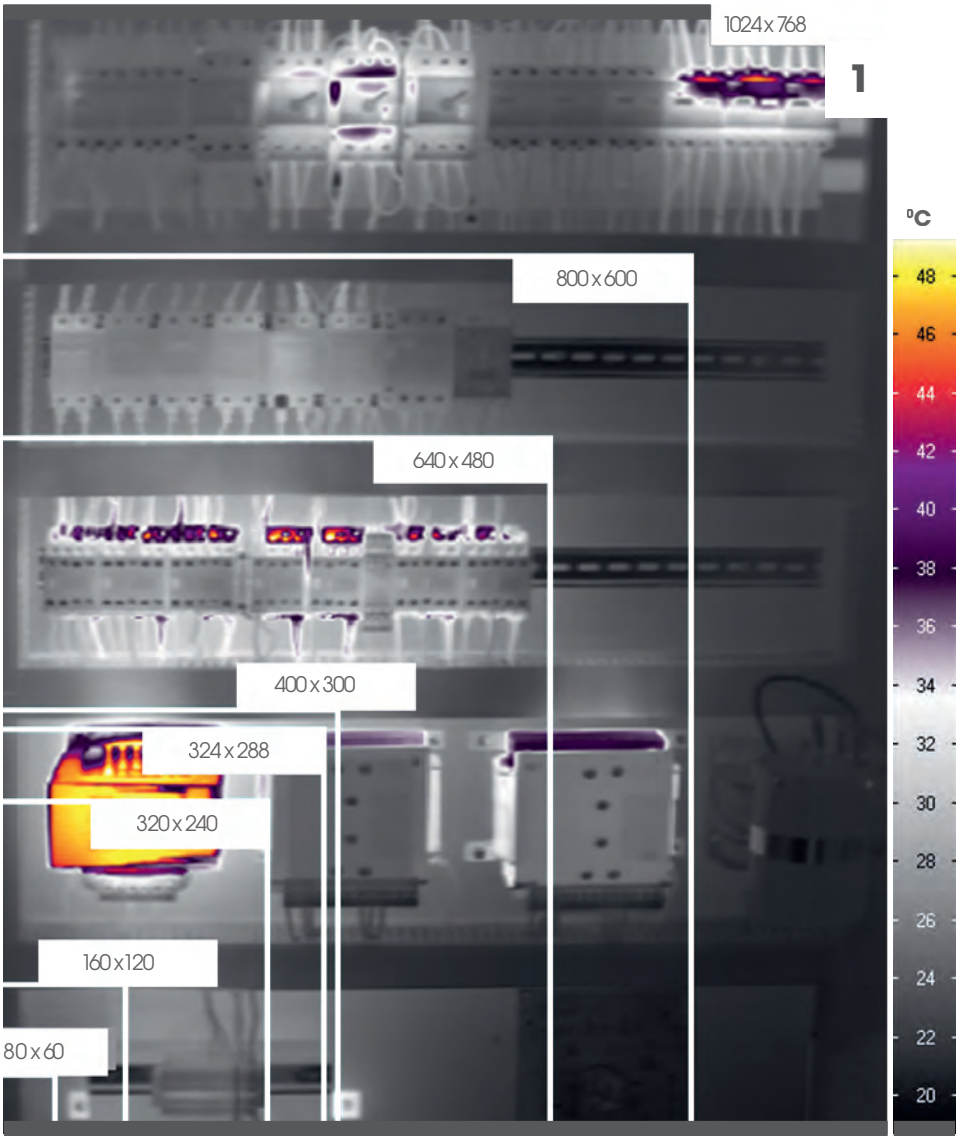
E kérdés eldöntésére több szempont is átgondolandó:

1. milyen gyakran (talán ismétlően) végezzük a méréseket,
2. hány darab és mekkora méretű kapcsolószekrényünk van, és mi a legkisebb megfigyelendő alkatrész vagy vezeték bennük,
3. mit és hogyan kell dokumentálnunk?

A kérdésekre adott válaszaink alapján nagyságrendileg felmérhető, hány darab helyszíni felvételre van szükségünk, utána hány hőképet kell kiértékelnünk. Különleges dokumentálási igények esetén talán az egyszerű jegyzőkönyvezésen túl még a hőképek (rengeteg időt felemésztő) montírozása is szükségessé válhat. Egy 1024x768 képpontos hőkamerával (megfelelő távolságból) felmérhető egyetlen egy felvétellel egy maximum 0,5x0,7 m méretű kapcsolószekrény, melyben 2 mm-t meghaladó átmérőjű

hőképpixelszám és munkaszükséglet

HŐKAMERA DETEKTORÁNAK PIXELMÉRETE	1024x768	800x600	640x480	400x300
HELYSZÍNI ADATRÖGZÍTÉSI IDŐSZÜKSÉGLET	1x	2x	3x	8x
JEGYZŐKÖNYVEZÉSI IDŐ MONTÁZS NÉLKÜL	1x	2x	3x	8x
HŐKÉP MONTÍROZÁSI IDŐSZÜKSÉGLET	nincs	1x	2x	3x
KÉSZÜLÉKÁR REFERENCIÁHOZ KÉPEST	1x	0,8x	0,7x	0,5x



1. kép: Pixelszám függvényében maximálisan mérhető felület
2 mm legkisebb vezetékátmérő mellett

se II.

kábelek találhatók. Ezt referenciának tekintve, a munkaidőigény az 1. táblázatban látható módon becsülhető.

A megfelelő hőkamera kiválasztása ezután a következő logikára alapozható: azt a hőkamerát kell választani, melynek ára a lehetőleg legnagyobb pixelszám mellett az elvégezendő munkavolumen (szekrények mennyisége x mérési gyakorisága x időszorzó) és a rá vonatkozó 3 éves munkadíj szorzatánál éppen még alacsonyabb. (3 év a hőkamerák jelenlegi műszaki avulási idejének fele. Ez nem egyenlő a készülékek tipikus élettartamával.) Lényegesen drágábbat választani pocsékolás, az „olcsóbbak" pedig túlzott munkadíjkiadást eredményeznének. A fenti gondolatmenettel kiválasztott hőkamera a harmadik évtől kezdve tiszta nyereséget produkál a kisebb pixelszámú versenytársaival szemben.

1. táblázat

384x288	320x240	160x120	80x60
9x	13x	54x	225x
9x	13x	54x	225x
5x	6x	12x	96x
0,4x	0,3x	0,1x	<0,1x

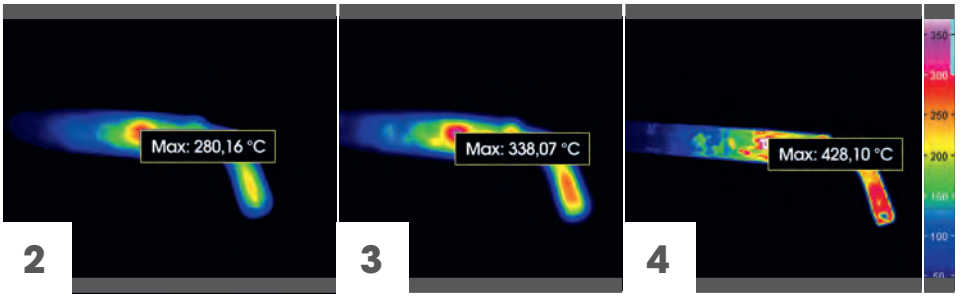
Képrögzítési/képfrissítési frekvencia

Szintén nem szőnyeg alá söpörhető műszaki paraméter a képrögzítési/képfrissítési frekvencia sem. Az elterjedt mikrobolométeres hőkamerák a képfelvételi frekvencia széles tartományát fedik le. Általában különbséget teszünk a lassú 9...15 Hz, valamint a gyorsabb 50...60 Hz, illetve max. 240 Hz képfrissítésű hőkamerák között. (Vannak még gyorsabb – akár 9 kHz – képfelvételi frekvenciát is biztosító hőkamerák is, melyek viszont e sebesség elérése érdekében fotondetektorokkal rendelkeznek.)

Kevés kivétellel a termikus folyamatok rendszerint nagy időállandóval rendelkeznek, és ha a tárgy nem mozog, a leírt (bolométerrel elérhető) képfrekvenciák bőségesen elégségesek. Vannak azonban nagyon gyors (tranziens) hőmérsék-

2-4. kép: A fókuszálás hatása egy forrasztópáka felvételén

Nagyon rossz fókuszálással	Kevésbé rossz fókuszálással	Tökéletes fókuszálással
maximumérték: 280 °C	maximumérték: 338 °C	maximumérték: 428 °C



let-folyamatok, illetve gyorsan mozgó mérési tárgyak, melyek rögzítéséhez lényegesen magasabb képfrekvenciák szükségesek. Például egy villamos berendezés bekapcsolás alatti melegedési folyamatának vagy egy szakaszoló terhelés alatti bontás-ívoltás során fellépő hőmérsékletek rögzítéséhez akár több kHz-es képfrissítések is szükségessé válhatnak.

Akkor lehetnek komoly problémák, ha kézben tartott hőkamerával kívánunk kellőképpen részletes hőképeket vagy akár nagyobb távolságú méréseket készíteni. A fényképezéssel kapcsolatosan ismert tény, hogy egy nyugodt kezű fényképész még 1/60-as zársebesség mellett is képes bemozdulás nélküli fényképek készítésére (állvány nélkül), egy „amatőr" bizonytalan keze pedig 1/125-ös zársebesség mellett is időnként bemozdult képeket eredményezhet. Ezek a zársebességek 17 ms, illetve 8 ms érzékelési időt jelentenek. Milyen ügyesség kell akkor ahhoz, hogy egy csak 9 Hz-es hőkamerával kézben tartva bemozdulatlan hőképeket rögzítsünk? Ehhez akár 30...40 ms-on keresztül mozdulatlanul kellene tartanunk a hőkamerát! Más szóval: kézben tartva csak olyan hőkamerákkal lehet biztonságosan, bemozdulás nélküli hőképeket készíteni, melyek integrálási idejük 15 ms-nál rövidebb, tehát képfrissítése 50 Hz vagy gyorsabb.

Fókuszálás

Sajnos a mérési nehézségek között a hőkamera kezelőjének felelőssége nemcsak a reflexiók elkerülése szempontjából megemlítendő, hanem – mivel a hőkamerák optikai mérőeszközök – a korrekt fókuszálás is külön figyelmet érdemel. Ennek elhibázása – az általános tévhittel ellenében – nemcsak életlen hőképekhez, hanem súlyos mérési hibához is vezet. A fókuszálással összefüggésben áll a mélységélesség tartománya is, amely elsősorban közeli felvételek esetében nagyon kicsi, és így komoly korlátokhoz (és ezáltal súlyos mérési hibákhoz) vezet.

A hőkamerák fókusza ugyanúgy „működik", mint ahogy azt a fényképezésnél megszoktuk: a kamerán belüli gyűjtő- vagy fókuszlencse feladata, hogy a beérkező sugarakat az érzékelő felületére (a hagyományos fényképezés esetén a filmre) vetítse. Téves fókuszálás esetén a sugárzás valós mennyiségének csak egy része esik az „éles" fókuszálás által meghatározott érzékelő felületre, a többi annak környékére vetítődik. Ez ahhoz vezet, hogy a mért hőmérséklet helyi maximum esetében alacsonyabb, helyi minimum esetében pedig magasabb lesz a valóságosnál. Minél rosszabb a fókuszbeállítás, annál nagyobb az eltérés a valós értéktől.

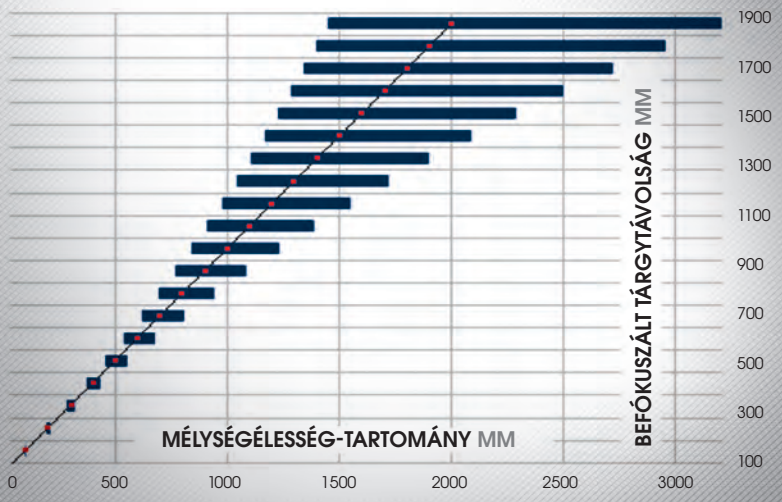
Az 5. ábra mutatja, hogy rossz fókuszálás esetén az érzékelőmátrix korrekt leképzési felületére csak a beérkező sugárzás egy része esik, a többi sugárzás a környezetét éri. Tehát rossz fókuszbeállítás esetén mindig kevésbé szélsőséges minimum/maximum hőmérsékleteket mutat a

6

mélységélesség-tartomány

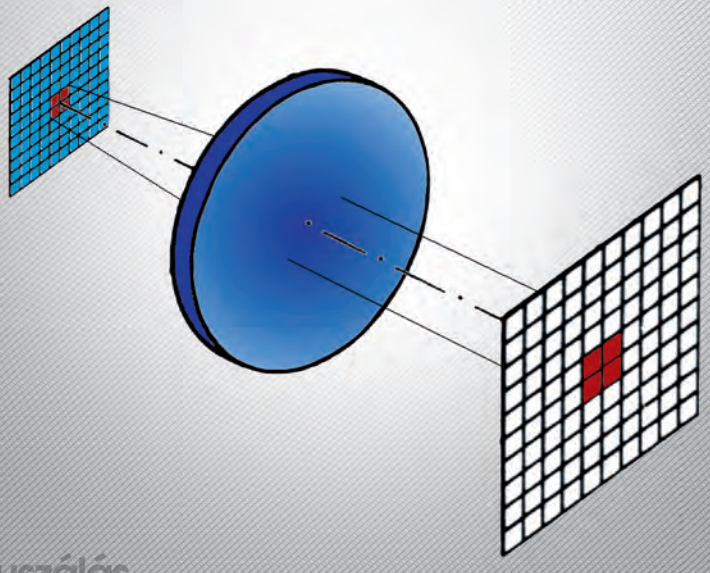
a tárgytávolság függvényében

hőkamera 17 µm pixelméretű detektorral, k=1/f=30mm optikával



forró pont, jó, illetve rossz fókuszálás esetén

optikai leképe



hőkamera, mint amilyen a tárgy felületén a valóságban, erre mutat példát a 2–4. képsorozat. A hiba (a helyi minimumérték növelésének, illetve a helyi maximumérték csökkentésének) mértéke függ a mérési távolsággal összefüggő mélységélességtől, valamint a helyi minimum/maximum geometriai méretétől. Minél rövidebb távolságból (ebből adódóan annál kisebb mélységélesség mellett) történik a mérés, annál kritikusabb a pontos fókuszálás. A helyi minimum, illetve maximum geometriai méretének (kiterjedésének) növekedésével pedig csökken az érték meghamisításának nagysága. A részleteket a 2. táblázat mutatja be.

Mélységélesség-tartomány

A tárgy leképzése nemcsak pontosan a hőkamera optikai rendszere által definiált, fókuszálással „élesre" beállított tárgysíkról megfelelő élességű, hanem a beállított távolságnál közelebbi és távolabbi tárgyakra nézve is, amelyek az ún. mélységélesség-tartományban helyezkednek el.

A mélységélesség-tartomány a következő paraméterektől függ:

- minél kisebb az objektív fókusztávolsága, annál nagyobb lesz a mélységélesség-tartomány,
- minél kisebb az apertúrablende (rekesz), annál nagyobb lesz a mélységélesség-tartomány,
- minél nagyobb a tárgytávolság, annál nagyobb lesz a mélységélesség-tartomány.

2. táblázat

kijelzett csúcshőmérsékletek

a forró hely mérete és a fókuszpontosság függvényében

100 °C forró hely, valamint 20 °C egyéb tárgyfelületi hőmérséklet esetén

100 °C-os forró hely mérete	Kijelzett hőmérséklet-csúcsérték [°C]			
	19x19 pixel	15x15 pixel	9x9 pixel	3x3 pixel
korrekt fókusz	100	100	100	100
1 pixelnyi rontás	99	98	97	93
2 pixelnyi rontás	98	97	95	88
3 pixelnyi rontás	96	96	93	84
5 pixelnyi rontás	94	93	90	78
10 pixelnyi rontás	90	88	83	69
20 pixelnyi rontás	84	81	75	60

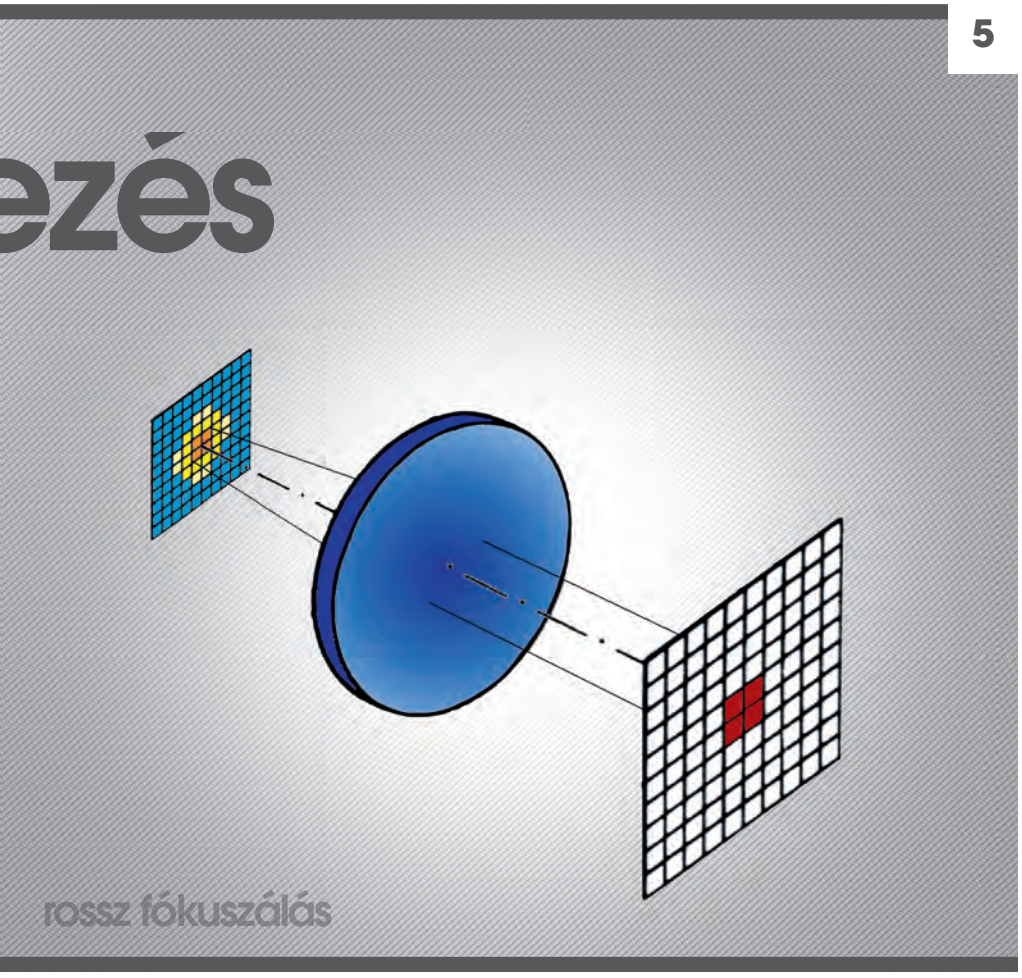
Következményként elsősorban nagyon közeli tárgyak felvétele során (pl. makrolencsés vagy mikroszkópobjektíves felvételek esetén), valamint az alacsony méréstartományokban alkalmazott nagy apertúrablende miatt nagyon kicsi a mélységélesség-tartomány terjedelme. A probléma ezért leginkább a (fotondetektorokhoz képest) lényegesen kisebb érzékenységű mikrobolométeres hőkamerákra jellemző, főleg kis tárgytávolságok esetében. Amennyiben a hiperfokális távolság n-edik részének megfelelő távolságra fókuszálunk, akkor a mélységélesség terjedelme nagyjából n^2 értékkel arányosan csökken.

A mélységélesség határai szemléltetésére vegyük alapul a következő paraméterű hőkamerát:

- detektor – pixelméret (r_p): 17 μm (átló),
- objektív – rekeszszám (k): 1 és fókusztávolság (f): 30 mm

A rekeszszámból és fókusztávolságból azonnal következik, hogy az objektív apertúrablendéje 30 mm-es. Ebből pedig kiszámolhatjuk a hiperfokális távolságot (azaz azt a távolságot, melyre való fókuszáláskor a mélységélesség-tartomány a végtelenig terjedt). Az $l_{hf} = f \times d_{irisz}/r_p$ közelítő egyenlettel ez jelen példa esetében 5,3 m-re adódik. Ilyenkor a mélységélesség közeli határa éppen a fókusztávolság fele, tehát 2,65 m.

A mélységélesség közeli és távoli határai kiszámításához szükséges egyenletek mellőzésével, azok értékeinek grafikus ábrázolása a 6. képen látható. Az éppen kiválasztott fókusztávolságtól függően kapunk tehát az itt jelzett határain belül éles hőképet – távoli fókuszáláskor széles távolságtartományban, közeli fókusz esetében azonban csak egy nagyon szűk tartományon belül. ■

5

ezés