VYHODNOCENÍ KVALITY IZOLACE TEPLOVODŮ

M. Sláma, J. Šípal

Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Fakulta strojního inženýrství

Abstrakt

Tento článek se zabývá hodnocením kvality izolace teplovodů. Hodnocení je provedeno pomocí termovizního zobrazení teplovodů. Na základě měření termovizní technikou je sestaven teplotní profil měřeného teplovodu a matematickou analýzou stanoveny jednotlivé tepelné anomálie na měřených profilech. Při vyhodnocení je využito možnosti spojení jednotlivých termogramů. Analýza je tak prováděna na kompletních několik desítek metrů dlouhých termogramech teplovodů. Výsledkem jsou pak přesně zaměřené polohy tepelných mostů včetně velikosti a rozsahu poškození tepelné izolace.

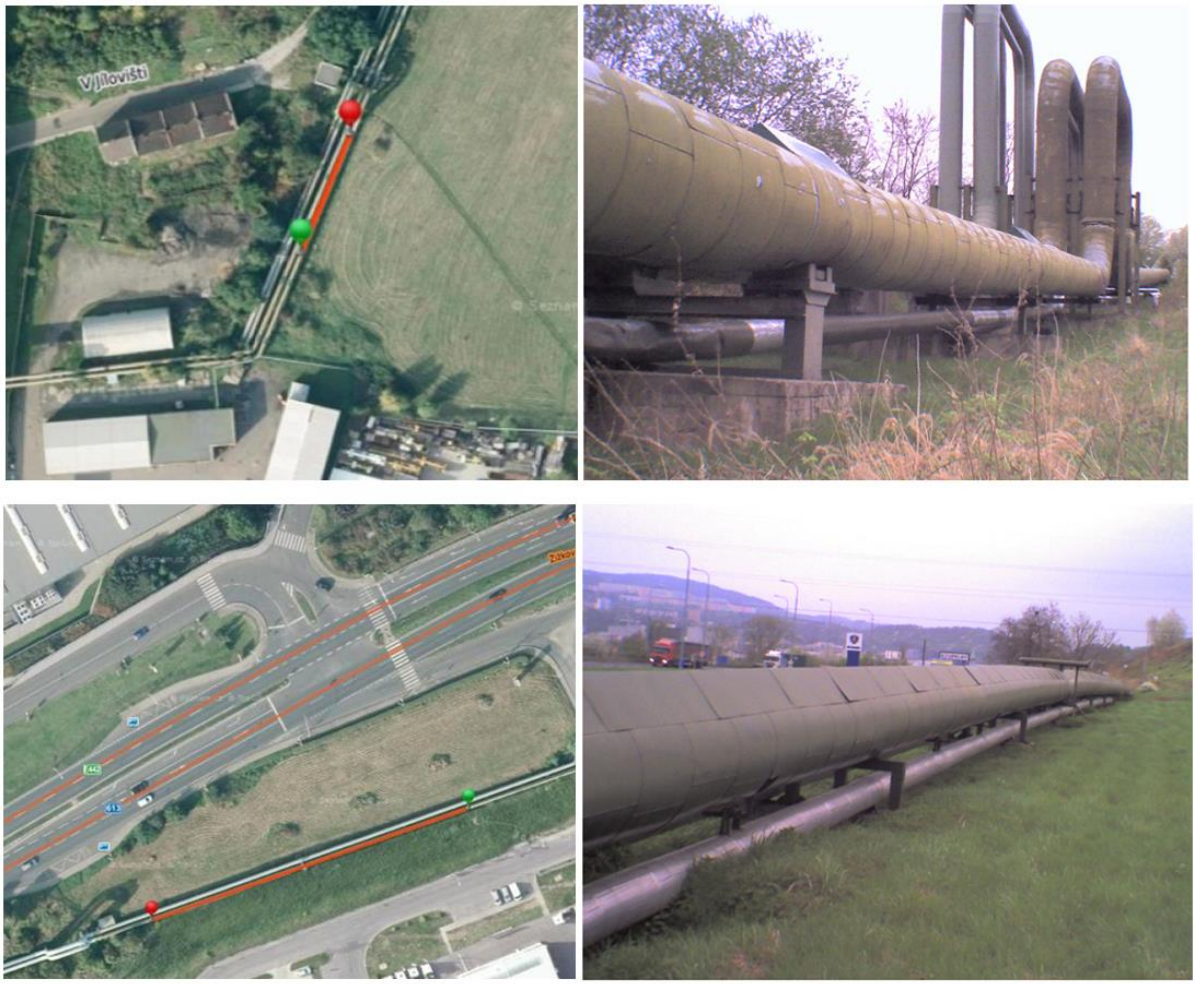
1 Úvod

Tepelná energie je rozváděna z míst výroby do objektů spotřeby pomocí potrubních systémů, kde proudí teplonosné médium. Nejčastěji se jedná o vodu nebo páru. Tento přenos tepla se však neobejde bez ztrát, které jsou způsobeny výměnou tepla s okolím teplovodů. Pro jejich minimalizaci jsou potrubí opatřena izolační vrstvou. Tato vrstva je však v průběhu času poškozována mnoha vlivy a její kvalita a tepelný odpor se v průběhu času zhoršuje. Bohužel ve většině případů není možno stav izolace určit přímo. Existují provozní metody pro zjišťování provozních ztrát stanovená vyhláškou MPO č. 151/2001Sb, v platném znění. Jak Schmitova metoda tak kalorimetrická metoda poskytují informaci o celkovém tepelném toku a neurčují místa a stav poruch izolační vrstvy. Naopak termovizní metoda umožňuje zaznamenat přesné vady izolace, které se projevují jako tepelné mosty. Tato metoda je vhodná pro komplexní zhodnocení skutečného stavu tepelné izolace energetických rozvodů.

2 Měření a získání vstupních dat pro zaměření poruch tepelné izolace

Pro získání vstupních dat pro zhodnocení kvality izolace byly vytipovány dva úseky parovodů z teplárny Trmice (obrázek 1). K těmto zkušebním profilům pak byl následně vybrán testovací profil teplovodního potrubí v Dolních Beřkovicích.

Pro zaměření tepelných mostů je třeba ze získaných termogramu zjistit, v jaké vzdálenosti od počátku měřeného úseku se nacházejí a také stanovit co tepelným mostem je a co není. Můžeme provést vizuální posouzení snímek po snímku. Tímto postupem, ale jen obtížně přesně zaměříme místo poruchy. Navíc některé úniky tepla pláštěm jsou přirozené a jsou dané technologií montáže izolace. Proto je vhodné použít počítačovou analýzu. Jde tedy o složení termogramů do panoramatického snímku a jeho analytické zpracování vlastním skriptem v programu MATLAB. Je třeba předeslat, že software FLIR Tool + je schopen poskytovat poměrně dobré analytické výstupy. Tyto výstupy však jsou pouze pro jednotlivé snímky. Pro panoramatické snímky však již tento program nestačí. Pokud budeme pracovat se snímky pořízenými v terénu bez stativu, začne mít tento software při sestavování panoramatických snímků problémy. Terénní snímky vykazují jistý stupeň natočení. Nikdy nelze kameru udržet v ruce zcela kolmo ke snímanému potrubí. Program pak nedokáže takové snímky spojit bezchybně, popřípadě je vůbec dohromady nesloží. Lze využít i možnost programu exportovat vybraná data jednoho snímky do datového souboru (*.csv). Pro dlouhé profily je však tato možnost vyloučená, neboť nejsme schopni udržet na všech snímcích vždy stejný výběr dat (šířku potrubí) a zároveň dostáváme duplicitní hodnoty na překryvu okrajů termogramů. Proto bylo třeba nalézt jinou možnost jak provést složení termogramů. Při skládání termogramů v jiném grafickém programu není již možnost využít znovu analytické nástroje programu FLIR Tool+ a je třeba využít jiné metody analýzy dat získaných v termogramech.



Obrázek 1: Měřené potrubní profily

2.1 Měření termální kamerou

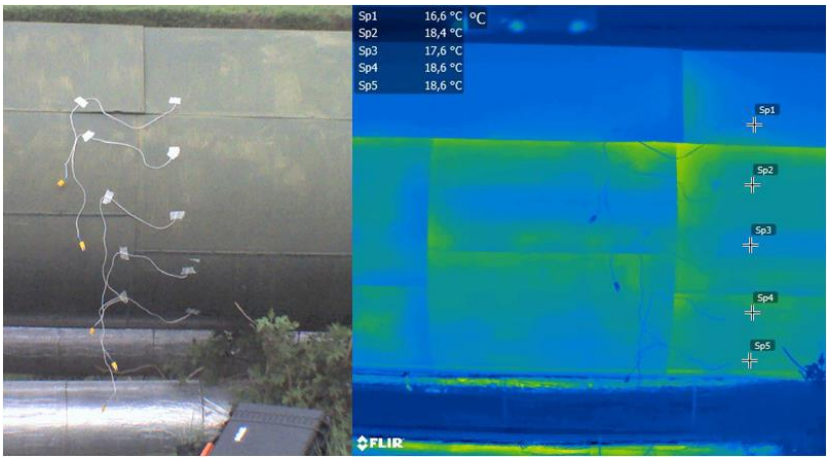
Měření infračerveného záření lze provést pomocí termálních zobrazovačů. Termální kamera měří a zobrazuje objektem vyzařované infračervené záření. Skutečnost, že záření přímo závisí na povrchové teplotě objektu, umožňuje kameře tuto teplotu vypočítat a zobrazit. Před samotným měřením, je však třeba před samotným měřením stanovit následující parametry:

- emisivita objektu,
- teplota odraženého záření,
- vzdálenost mezi objektem a kamerou,
- relativní vlhkost,
- teplota atmosféry.

Z hlediska měření je nejdůležitějším údajem pro správné zobrazení teplot na měřeném profilu stanovení emisivity objektu. Pokud je na termokameře nastavena vyšší hodnota emisivity, než je skutečná hodnota emisivity, potom termokamera při dané povrchové teplotě měřeného objektu bude očekávat více tepelného záření, ale protože naměří méně záření, stanoví, že povrchová teplota je ve skutečnosti nižší. Naopak, při nastavení vyšší hodnoty emisivity bude termokamera při dané povrchové teplotě očekávat více tepelného záření a proto nakonec vyhodnotí, že povrchová teplota měřeného objektu je vyšší. Je zřejmé, že správné nastavení emisivity velmi ovlivňuje přesnost měření. Správné určení emisivity není jednoduchý úkol a záleží na mnoha okolnostech a zkušenosti obsluhy termokamery.

Během terénního měření, však nelze očekávat, že budeme na měřeném úseku mít stále stejnou hodnotu emisivity. Potrubí vykazuje různou míru poškození a kvalitu krycího nátěru. Je třeba tedy zvolit jinou metodu korekce zobrazovaných teplot. Jako vhodnou možností se v tomto směru jeví

stanovení teplotní odchylky pomocí kontaktních teploměrů. Na obrázku 2 je znázorněno rozmístění kontaktních teploměrů na měřeném profilu a stanovené teploty v bodech měření pomocí termogramu. Jako referenční hodnoty byly použity teploty naměřené pomocí IR teploměru. Na termokameře stejně jako na IR teploměru byla nastavena fixní hodnota emisivity na hodnotu 0,95. V tabulce 1 vidíme porovnání teplot sejmutých termokamerou, IR teploměrem a kontaktními sondami. Z uvedených hodnot se vypočítá korekční teplota T_k, která bude využita při výpočtu teplotního pole v aplikaci MATLAB.



Obrázek 2: Rozmístění teplotních sond a teploty změřené termokamerou v příslušných bodech

Tabulka 1: SROVNÁNÍ TEPLOT NAMĚŘENÝCH V BODECH MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH SOND

	Kontaktní sondy [°C]	*IR Teploměr [°C]*	*Termokamera [°C]*
t_1	17	17,6	16,6
t_2	24	17,9	18,4
t_3	23	17,2	17,6
t_4	21	17,6	18,6
t_5	25	18,4	18,6
Průměr	22	17,7	17,9

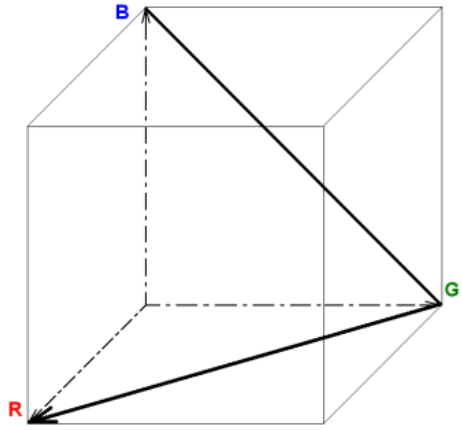
2.2 Úprava naměřených termogramu

Vytvořené termogramy jsou klasické bitmapové obrázky v barevném režimu RGB. K úpravě termogramu slouží software dodávaný společně s kamerou od společnost FLIR. Výhodou tohoto softwaru je možnost kontroly a korekce vložených údajů potřebných ke správnému měření povrchových teplot. Je zde možno provést korekci všech potřebných parametrů včetně změny emisivity, teplotních rozsahů a v neposlední řadě i změnu barevného schématu obrázku.

Termovizní snímky se vizualizují za použití viditelných palet či stupnic, které přiřazují barvu různým teplotám (různému množství tepelného toku). Stejný snímek tak lze zobrazit v odlišných barevných paletách a tím zviditelnit nebo zdůraznit teplotní diference. Pro sejmutí termogramu byla zvolena paleta rainbow. Tato paleta poskytuje zobrazení teplotních přechodů v rozložení barev RGB. Poskytuje dobrou vizualizaci měřených teplot, ale pro mnou použitý výpočet měření není příliš vhodná. U palet založených na RGB je třeba přesně vědět, jakým způsobem byla tato paleta sestavena. Jde tedy o to, po jaké křivce byl procházen barevný prostor RGB. Jakoukoliv barvu RGB si totiž můžeme představit jako bod v prostoru, kde osy xyz odpovídají jednotlivým barvám RGB. Každá barva je pak reálné číslo v intervalu <0,1>. RGB prostor je pak krychle o jednotkové straně. Barevnou stupnici pak například vytvoříme tak, že povedeme úsečku z modrého vrcholu do zeleného a dále do červeného. Ukázku vidíme na obrázku 3 a výslednou stupnici na obrázku 4.

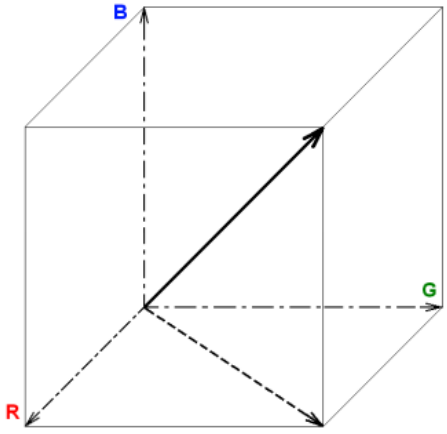
V uvedeném příkladu jsme procházeli prostor pomocí dvou lineárních funkcí. Prostor však může procházet i za použití exponenciální či goniometrických funkcí. Vzniklé barevné stupnice pak mají vždy charakteristickou parametrickou rovnici pro jednotlivé intenzity barev RGB. Bohužel se mi s dostupných zdrojů nepodařilo zjistit parametrické vyjádření průchodu barevného prostoru pro paletu rainbow. Proto jsem zvolil alternativní metodu a to převod na monochromatickou stupnici. Zde je trajektorie průchodu RGB prostorem úsečkou mezi černou a bílou barvou. Závislost teploty je tady

lineární a je přímo úměrná intenzitě bílé barvy. Průchod RGB prostorem a výslednou stupnici je vidět na obrázku 5 a 6.



Obrázek 3: Trajektorie průchodu barevným prostorem

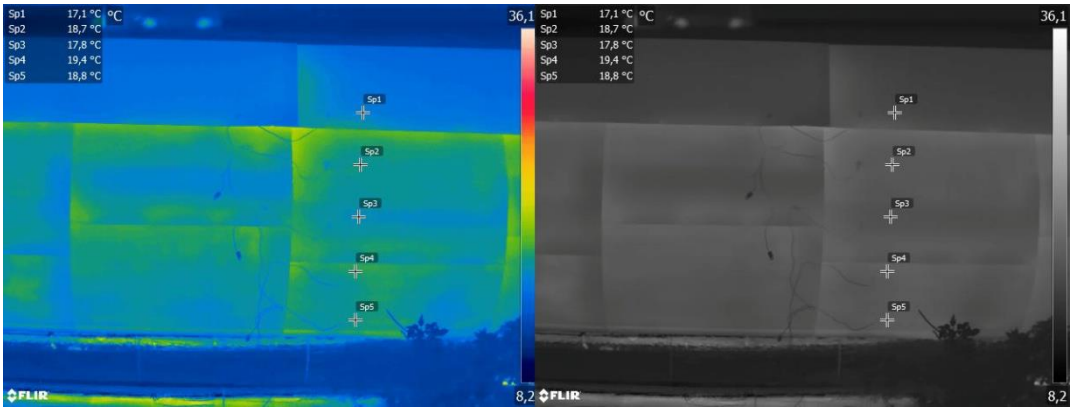
Obrázek 4: Výsledná bilineární stupnice



Obrázek 5: Trajektorie průchodu barevným prostorem

Obrázek 6: Výsledná monochromatická stupnice

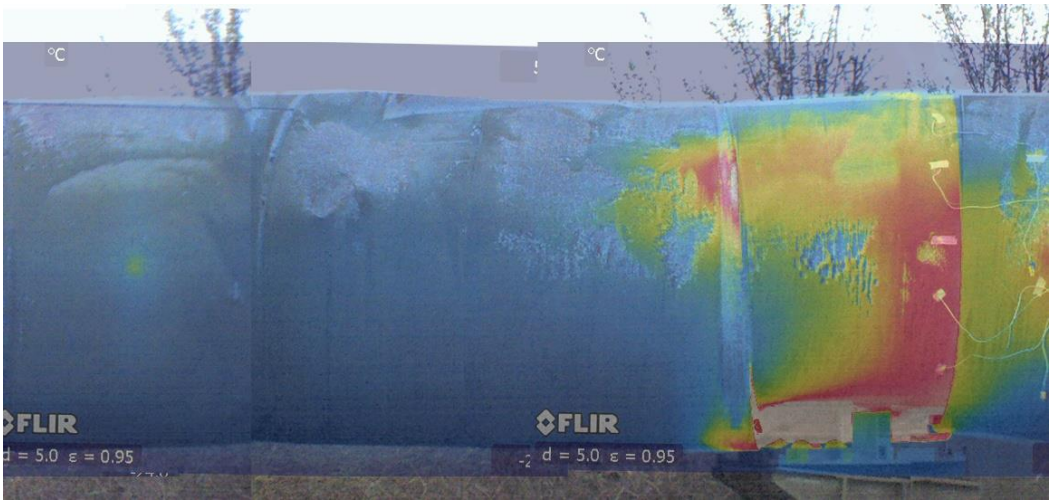
Převod mezi jednotlivými stupnicemi v softwaru FLIR probíhá bezztrátově a výsledné teplotní pole není nijak zkresleno. Převod obrázku do monochromatické stupnice je vidět na obrázku 7. Samozřejmě lze postupovat i obráceně tj. sejmout termogramy již v paletě černobílé a pro lepší vizualizaci jej pak převést do barevného schématu. Na výsledné hodnoty to nemá žádný vliv.



Obrázek 7: Převedení snímku do monochromatické stupnice

2.3 Skládání termogramu do teplotního profilu

Jednotlivé obrázky je v programu FLIR Tool+ možno spojit do panoramatických snímků a tím umožnit zobrazení celého měřeného profilu. Algoritmus pro skládání profilů však někdy nedokáže vyhodnotit správnou návaznost snímku a to buď v důsledku natočení snímku, popř. podobnosti teplotních polí. V takovém případě bylo třeba profil spojit ručně. K tomu posloužila aplikace Adobe Photoshop. Zde je možné u snímku použít průhlednost jednotlivých snímku a pomocí funkce prolnutí profily spojit. Jako referenční podklad usnadňující spojení snímků lze použít obrázek ve viditelném spektru pořizovaný kamerou zároveň s termogramem. Ručnímu spojení snímku je třeba věnovat zvláštní pozornost, protože samotná úprava nebo špatné napojení může být ve výsledném hodnocení zdrojem chybných dat. Možnosti spojení snímků je vidět na obrázku 8.



Obrázek 8: Možnost složení snímků v aplikaci Adobe Photoshop

Takto spojené snímky je třeba ještě oříznout o okraje s nasnímaným pozadím. Společně s oříznutím pozadí dojde částečně i k odstranění části měřeného profilu, ale tato ztráta nemá na výsledný výpočet závažný vliv. Finální oříznutí panoramatických snímků pak bylo provedeno v softwaru Adobe Photoshop CS6. Jednalo se o odstranění přebytečných okrajů snímků.

2.4 Výpočty v softwaru MATLAB

Pro analýzu dat byl vytvořen jednoduchý program v aplikaci MATLAB. Tento program umožňuje importovat vytvořené panoramatické termogramy do podoby matic. Tyto matice mají charakter bitového pole, o rozměrech importovaného obrázku, kde počet řádku odpovídá počtu pixelů ve vertikálním rozlišení obrázku a analogický počet sloupců matice odpovídá počtu pixelů v horizontálním směru. Každý prvek matice tak odpovídá jednomu pixelu importovaného termogramu. Protože byly vytvořené termogramy převedeny do barevné palety stupňů šedi, udává hodnota míru intenzity bílé barvy. Tu je třeba převést na teplotu. K tomuto přepočtu je užito teplotního rozsahu nastaveného při snímání termogramu.

Hodnota intenzity bílé barvy je uložena v obrázku v 8 bitech a nabývá tedy hodnot od 0 do 255. Výslednou hodnotu teploty tedy určíme ze vztahu:

$$T_c = \left(\frac{I_b}{255} \cdot \Delta T \right) + T_k \qquad [°C] \qquad (1)$$

kde: T_c – výsledná teplota [°C]

I_b – intenzita bíle barvy

ΔT – rozsah teplot nastavených na termokameře [°C]

T_k – korekční teplota [°C]

Takto vzniklo teplotní pole pokrývající teplotní profil reálnými teplotami. Vzniklá matice **A**(m,n) tedy odpovídá rozlišení obrázku o rozměrech m-n pixelů. Z této matice spočteme průměrnou

teplotu odpovídající každému sloupci matice. Tyto teploty vyneseme do grafu v závislosti na vzdálenosti od počátku měřeného profilu.

Pro zaměření vzdálenosti případných tepelných mostů byl jednotlivý pixel horizontálního rozlišení převeden na jednotku vzdálenosti. Ze změřené délky měřeného profilu byla vypočtena hodnota vzdálenosti pro jeden pixel. Velikost délky od počátku profilu k určitému bodu v poli nebo obrazu odpovídá:

$$L = \frac{L_{celk}}{px_{celk}} \cdot px \qquad [\text{m}] \qquad (2)$$

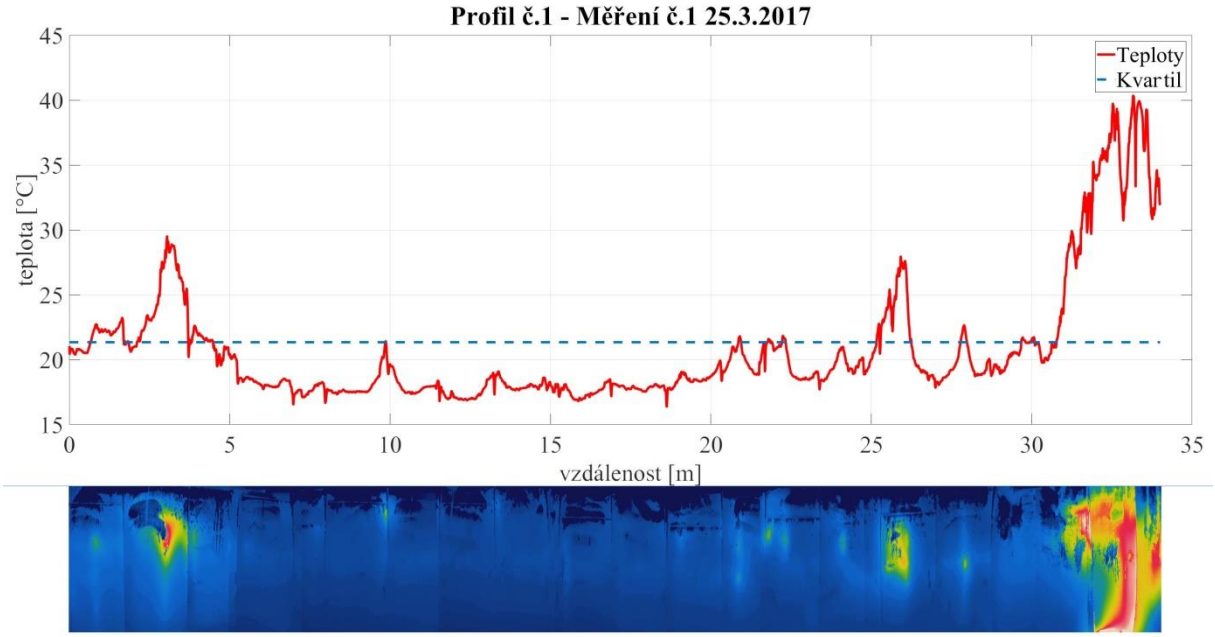
kde: L – délka [m]

L_{celk} – celková délka profilu [m]

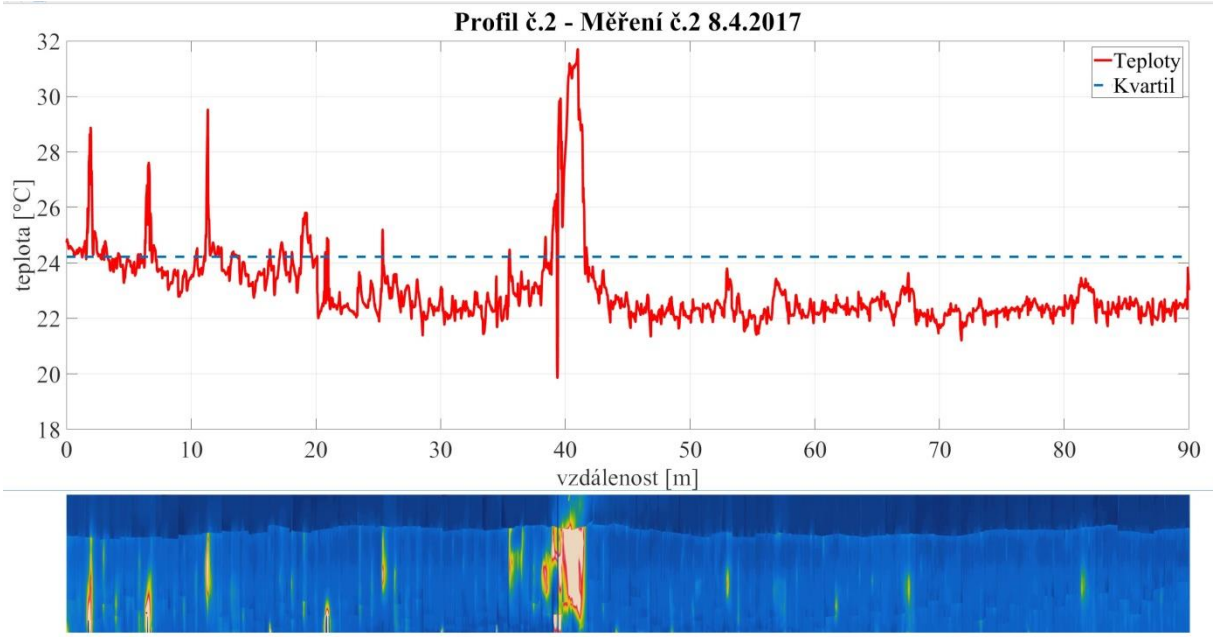
px_{celk} – celkový počet horizontálních pixelů [-]

px – počet pixelů [-]

Jako kritická hodnota pro hodnocení kvality tepelné izolace byl stanoven horní kvartil teplotních průměrů. Hodnota ležící nad horním kvartilem je považována za možný teplotní most. Takto spočtené teplotní a k nim příslušné vzdálenostní intervaly byly následně zkontrolovány na minimální délku tepelného mostu. V tomto případě byla délka stanovena na 0,5 m. Tato vzdálenost eliminuje tepelné mosty vzniklé technologií montáže a zároveň určuje minimální rozsah poškození, které je rentabilní opravovat. Na obrázku 9 a 10 jsou porovnány teplotní profil na termogramu s hodnotami vypočtenými programem. Z technických důvodu je termogram na obrázku záměrně rozměrově deformován. Je vidět, že program dobře mapuje teplotní odchylky a správně určuje teplotní mosty. Výstupem programu jsou jednotlivé intervaly vzdáleností od počátečního bodu. Jednotlivé vypočtené intervaly jsou uvedeny pro profil č.1 v tabulce 2-4 a pro profil č.2 v tabulce 5-7.



Obrázek 9: Porovnání vypočtených hodnot s termogramem měřeného profilu č.1



Obrázek 10: Porovnání vypočtených hodnot s termogramem měřeného profilu č.2

Tabulka 2: TEPELNÉ MOSTY NA PROFILU Č. 1 MĚŘENÍ Č. 1

Číslo poškození	*Počátek poškození [m]*	*Konec poškození [m]*	*Celková délka [m]*
1	**2,36**	**3,93**	**1,57**
2	**25,20**	**26,18**	**0,98**
3	**30,85**	**34,00**	**3,15**

Tabulka 3: TEPELNÉ MOSTY NA PROFILU Č. 1 MĚŘENÍ Č. 2

Číslo poškození	*Počátek poškození [m]*	*Konec poškození [m]*	*Celková délka [m]*
1	**2,48**	**3,57**	**1,57**
2	**25,24**	**25,93**	**0,69**
3	**30,69**	**34,00**	**3,31**

Tabulka 4: TEPELNÉ MOSTY NA PROFILU Č. 1 MĚŘENÍ Č. 3

Číslo poškození	*Počátek poškození [m]*	*Konec poškození [m]*	*Celková délka [m]*
1	**2,53**	**3,53**	**1,00**
2	**25,31**	**26,10**	**0,79**
3	**30,66**	**34,00**	**3,34**

Tabulka 5: TEPELNÉ MOSTY NA PROFILU Č. 2 MĚŘENÍ Č. 1

Číslo poškození	*Počátek poškození [m]*	*Konec poškození [m]*	*Celková délka [m]*
1	**36,44**	**41,48**	**5,04**

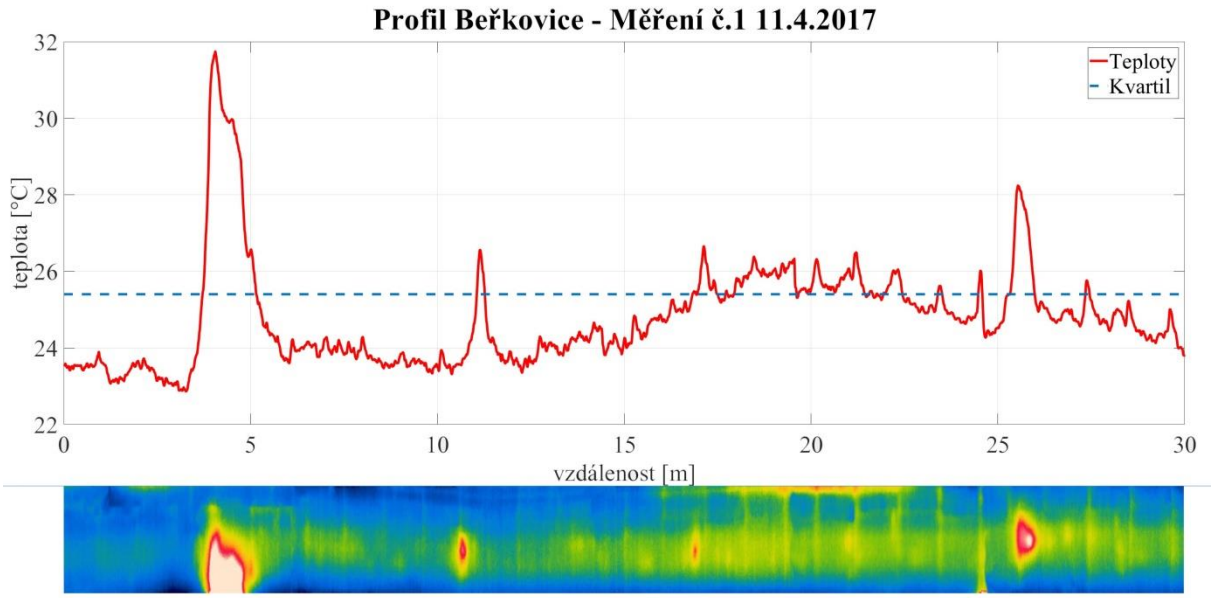
Tabulka 6: TEPELNÉ MOSTY NA PROFILU Č. 2 MĚŘENÍ Č. 2

Číslo poškození	*Počátek poškození [m]*	*Konec poškození [m]*	*Celková délka [m]*
1	**36,44**	**41,58**	**5,15**

Tabulka 7: TEPELNÉ MOSTY NA PROFILU Č. 2 MĚŘENÍ Č. 3

Číslo poškození	*Počátek poškození [m]*	*Konec poškození [m]*	*Celková délka [m]*
1	**38,14**	**43,07**	**4,93**

Vypočtené hodnoty z jednotlivých měření vykazují poměrně dobrou shodu. Pro stanovení jednotlivých tepelných mostu s větší přesností je možno použít více měření v různých podmínkách a výsledky pak zprůměrovat. Výsledné určené teplotní mosty pak budou více odpovídat skutečným poškozením. V testovacím měření na teplovodu v Doních Beřkovicích pak program poskytl dobré výsledky s ohledem na poškození tepelné izolace vlivem zatékání dešťové vody v důsledku poškození horní části izolace, která je na termogramu dobře patrná (obrázek 11). Výsledné tepelné mosty pak uvádí tabulka 8.



Obrázek 11: Porovnání vypočtených hodnot s termogramem měřeného profilu Beřkovice

Tabulka 8: TEPELNÉ MOSTY NA PROFILU DOLNÍ BEŘKOVICE

Číslo poškození	*Počátek poškození [m]*	*Konec poškození [m]*	*Celková délka [m]*
1	**3,68**	**5,28**	**1,60**
2	**17,22**	**23,76**	**6,54**
3	**25,18**	**26,75**	**1,18**

3 Závěr

Z uvedených výsledků je patrné, že pomocí měření tepelného vyzařování teplovodních systémů a jejich následnou počítačovou analýzou lze stanovit kvalitu tepelné izolace a zaměřit s vysokou mírou přesnosti tepelné mosty, které se nejvíce podílejí na tepelných ztrátách. Pomocí termovizního zobrazování lze pořídit celkový obraz profilu teplovodu a následně jej analyzovat za vytvoření seznamu tepelných mostů.

Uvedený postup lze aplikovat na poměrně dlouhé úseky, v řádech desítek až stovek metrů, potrubních systému. Za pomocí moderních technologií je pak možno provádět snímkování pomocí dronu a hodnotit tak i špatně přístupné potrubní rozvody. Jak bylo vidět při měření v Dolních Beřkovicích, je postup schopen odhalit i začínající degradaci izolačního materiálu vlivem vnikání atmosférické vlhkosti. Následná počítačová analýza složených termogramů je tady schopna zjistit i poškození, která by při pouhém terénním vyhodnocení jednotlivých termogramu nebyla jako porucha vůbec odhalena. Pracovník totiž nemůže posoudit potrubí jako celek.

Monitorováním stavu termoizolační vrstvy je možné zvýšit a zrychlit efektivitu údržby izolací potrubních systémů. Odpadá totiž nutnost, aby po označení vadných míst termoizolace, bylo v terénu provedeno ještě stanovení množství potřebného materiálu pro opravu jednotlivých vytipovaných úseků. Na základě měření a počítačové analýzy jde postup optimalizovat a provést pouze jedno terénní měření jedním pracovníkem. Na základě protokolu (viz tab. 2 až 6) z měření je pak bez nutnosti opětovného průzkumu stanovit množství potřebného materiálu určeného pro opravu. Opravované úseky jsou pak protokolem jasně a přesně definované. Uvedený postup, vytváření panoramatických termogramu a jejich počítačová analýza, tím šetří provozní náklady potřebné na údržbu termoizolačních vrstev potrubních rozvodů.

Literatura

[1] SLÁMA, Miroslav. *Vyhodnocování kvality izolace teplovodů*. 2017. Bakalářské práce. Univerzita J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Katedra energetiky a elektrotechniky.

[2] FRANTÍK, Petr. Barevné stupnice [online] dosupné z: http://kitnarf.cz/publications/2003/2003.07.www_stupnice/2003.07.www_stupnice.html

[3] Uživatelská příručka ThermaCam B640

[4] Vyhláška MPO č.151/2001 Sb. v platném znění zákona č. 406/2000 Sb. o hospodaření energií, v aktuálním znění
[5] ČSN 13 0108 Provoz a údržba potrubí

Bc. Miroslav Sláma
UJEP; Fakulta strojního inženýrství; Pasteurova 7, 400 96 Ústí nad Labem; tel 475285522; e-mail: miroslav.slama@ ujep.cz

doc. Ing. Jaroslav Šípal, Ph.D.
UJEP; Fakulta strojního inženýrství; Katedra energetiky a elektrotechniky; Pasteurova 7, 400 96 Ústí nad Labem; tel 475285515; e-mail: jaroslav.sipal@ ujep.cz