

# MĚŘENÍ TEPLOTNÍHO POLE BIMETALOVÉHO SENZORU S VYUŽITÍM ANALÝZY OBRAZU

*David Grobelný, Pavel Nevřiva, Přemysl Plešivčák*

VSB - TU Ostrava, K455, 17. Listopadu 15, Ostrava – Poruba, 708 33, Czech Republic

## Abstrakt

Mechanické části senzorů jsou v mnoha oblastech nahrazovány elektronickým zařízením. Taková elektronická zařízení jsou citlivá na okolní teplotu a na okolní teplotní změny. Na příklad bimetalový senzor se používá pro měření teploty oleje v automobilové vaně. Aby mohl být nahrazen bimetalový proužek elektronikou, byl vytvořen matematický model dynamického chování bimetalového senzoru, který je popsán v článku [1]. Předložený článek se zabývá ověřením matematického modelu bimetalového senzoru teploty. Spojuje fyzikální přístupy a metody analýzy obrazu. Konkrétně se jedná o zpracování naměřených dat, které byly snímány termovizní kamerou FLIR THERMACAM SC2000 a jejich následné porovnání s daty, které byly vypočteny numericky metodou konečných prvků.

## 1 Úvod

Tento článek popisuje vyšetření vlivu okolního prostředí na bimetalový senzor teploty. Konkrétně se jednalo o bimetalový senzor, který pracuje jako čidlo teploty v olejové vaně motoru automobilu. Dolní část tohoto senzoru je ponořena v olejové vaně a horní část je ovlivňována okolním vzduchem. V horní části jsou vývody, jimiž se senzor připojuje k elektrickému zařízení. Vzniká tedy rozhraní prostředí (olej- kovová deska-vzduch). Dále byl tento bimetalový senzor teploty použit jako vzorek pro zahájení přípravných prací na rozsáhlejší projektu GAČR 102/06/0498 [Modelování teplotní zátěže elektroniky moderních snímačů]. Bylo provedeno měření teplotního pole tohoto senzoru pomocí termovizní kamery v laboratorních podmínkách. Byl k dispozici termostat s olejem Marloth SH, který byl udržován na konstantní teplotě 94 °C. Na termostat byla umístěna izolační deska z dřevěného materiálu o průměru 5 mm. Deska měla zabránit úniku tepla z termostatu do okolního prostředí a zároveň zabraňovala v přílišném ohřevu okolního vzduchu. Do izolační desky byl vyvrtán otvor pro umístění senzoru. Senzor byl vyroben z mosazi (MS60). Dolní část senzoru byla ponořena do olejové lázně a na horní část senzoru působilo okolní ovzduší. Termovizní kamerou byla měřena horní část senzoru. Pro zvýšení koeficientu emisivity bylo použito začernění sazemi horní části senzoru s použitím svíčky, které mají koeficient emisivity 0.95 viz Obr.1.



Obr.1 Senzor začerněný sazemi

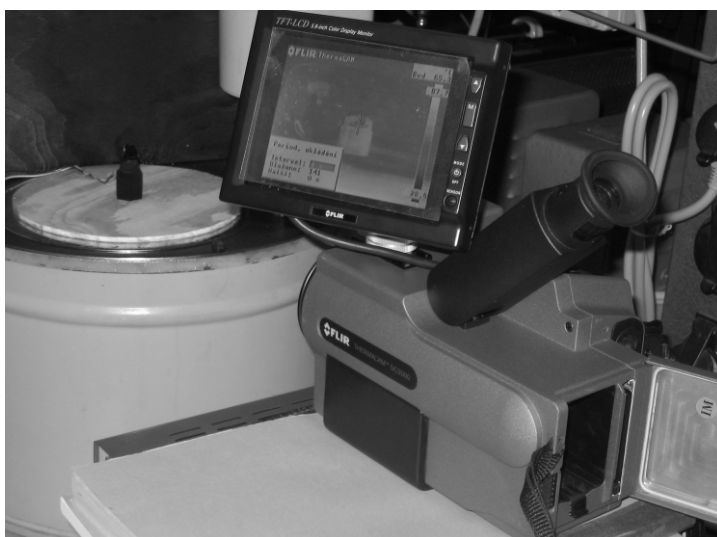
## 2 Měření

Pro měření byla použita termovizní kamera FLIR THERMACAM SC2000.

Parametry kamery:

Teplotní rozsah	1. -40 - +120 °C
	2. 0 - +500 °C
	3. +350 - +1500 °C
Teplotní citlivost	<0.08 °C @ 30 °C
Rozlišení	240x320

Kamera byla umístěna ve vzdálenosti 20 cm od senzoru v kolmém směru na přední plochu senzoru, aby byla dodržena maximální a konstantní intenzita záření viz. Obr.2. Před zahájením měření měl senzor teplotu okolí. Byl vložen do olejové lázně a termovizní kamerou byl měřen přechodový děj snímáním obrazu senzoru po čtyřech sekundách. Přechodový děj můžeme vysvětlit jako odezvu na jednotkový skok. V našem případě je jednotkovým skokem náhle zasunutí bimetalového senzoru do olejové vany s teplotou oleje 94 °C. Přechodový děj trval přibližně 800 s. Byly měřeny dva senzory a byl získán soubor 10 měření. Celková doba měření trvala 4 hodiny.



Obr.2 Měření termovizní kamerou

## 3 Zpracování výsledků měření

Pro zpracování měření bylo použito prostředí MATLAB, které slouží k matematickým výpočtům. Naměřená data jsou převedena do souborů (\*.mat) pomocí programu ThermaCam Researcher 2001 dodávaného ke kameře. V uvedených souborech je uloženo teplotní pole senzoru ve stupních Kelvina. Protože se jedná o 2D pole je možné s tímto polem pracovat jako s obrazem. Pro porovnání mezi jednotlivými soubory měření je potřeba data seřadit a předzpracovat. Při jednotlivých měřeních se nepodařilo senzor umístit do stejného bodu jako u předchozího měření. To má za následek jinou velikost senzoru, polohu a natočení senzoru. K detekování polohy senzoru v obraze byl použit detektor hran. Hrana v obraze je dána vlastnostmi obrazového elementu a jeho okolím. Je určena tím, jak se náhle mění hodnota obrazové funkce  $f(x,y)$ . Matematickým nástrojem pro studium náhlých změn obrazové funkce  $f(x,y)$  jsou parciální derivace. Změnu funkce udává například její gradient určující směr největšího růstu funkce (směr gradientu) vztah (2) a strmost tohoto růstu (modul gradientu) vztah (1).

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

$$\psi = \arctan \left( \frac{\frac{\partial f}{\partial y}}{\frac{\partial f}{\partial x}} \right) \quad (2)$$

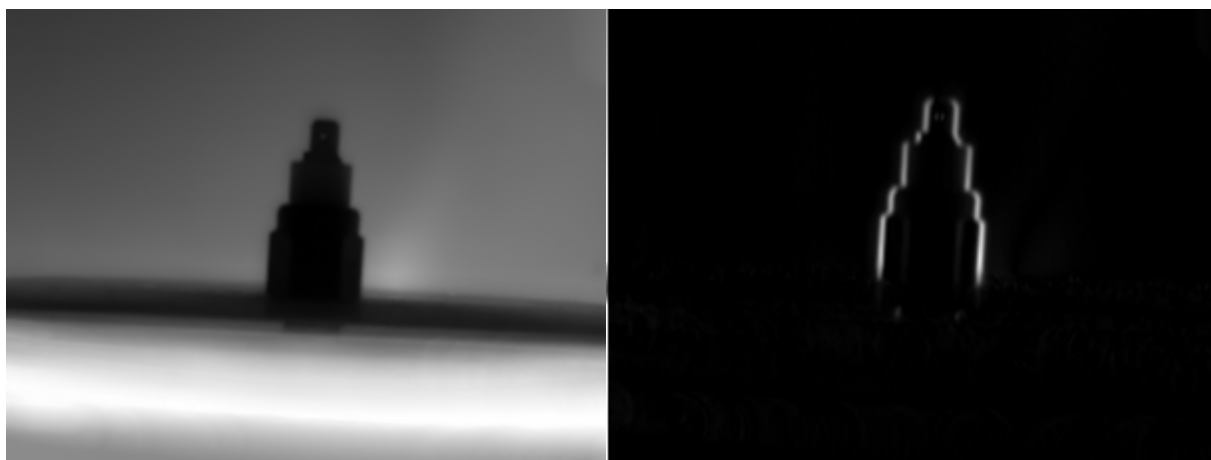
V digitalizovaném obraze se parciální derivace aproximuje diferencemi. K detekci hranic v digitalizovaném obraze se využívá konvoluce  $g(x,y)$  obrazové funkce  $f(x,y)$  s operátorem  $h(x,y)$  aproximující výše popsany gradient. Pro aproximaci gradientu byl použit operátor Prewittové. Gradient je odhadován v okolí 3x3 a detekuje svislé hrany senzoru.

$$h = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Jedná se o tzv. nerekurzivní filtraci, která je dána předpisem

$$g(x, y) = f(x, y) * h(m, n) \quad (4)$$

Na Obr. č.3 vidíme senzor těsně po vložení do olejové lázně. Na začátku přechodového děje má čidlo nižší teplotu než je teplota pozadí a zároveň je teplota povrchu senzoru všude stejná. Proto je tento obrázek ideální pro zpracování obrazu. Během měření není se senzorem manipulováno. Získané parametry mohou být použity pro ostatní obrázky jednoho měření.



a)

b)

Obr. č. 3 a) Vstupní obrázek, b) Detekce svislých hran senzoru

Po provedení detekce hran byla zdůrazněna svislá hranice senzoru viz. Obr č.3 b) a s použitím vhodného práhování byl obraz převeden na binární, který obsahoval pouze svislé hranice senzoru. Jednoduchým algoritmem byla zjištěna poloha hranice senzoru. Z polohy hranice senzoru bylo možné zjistit jeho velikost, umístění v obraze a natočení v pixelech. V obrázku bylo potlačeno pozadí. Ke změně velikosti a rotace senzoru byla použita geometrická transformace  $T$ , kterou můžeme popsat vztahem (5).

$$(x, y) = T\{(w, z)\} \quad (5)$$

Kde  $x$  a  $y$  jsou budoucí souřadnice zpracovávaného obrázku a  $w$  a  $z$  jsou současné souřadnice zpracovávaného obrázku.

Pro změnu velikosti obrázku platí

$$\begin{aligned}x &= s_x w \\ y &= s_y z\end{aligned}\tag{6}$$

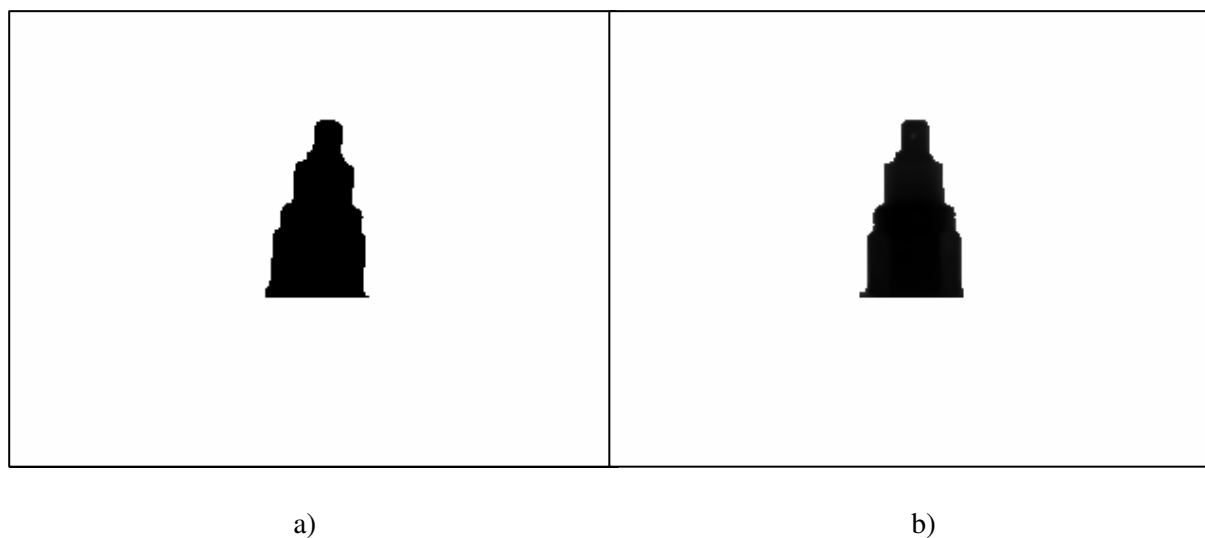
Kde  $s_x$  a  $s_y$  jsou škálovací parametry

Pro změnu rotace obrázku platí

$$\begin{aligned}x &= w \cos(\theta) - z \sin(\theta) \\ y &= w \cos(\theta) + z \sin(\theta)\end{aligned}\tag{7}$$

Úhel  $\theta$  je úhlem natočení

Na Obr. č.4 a) vidíme nalezený senzor s potlačeným pozadím. Senzor je mírně nakloněn. Abychom mohli provést korekci, musíme zjistit úhel naklonění. Víme, že senzor je symetrický podle osy y. Zjistíme polohy pixelů v polovině čar ohraničující spodní a horní část objektu. Zjistíme výšku senzoru a pomocí goniometrické funkce arctan dostaneme úhel naklonění.



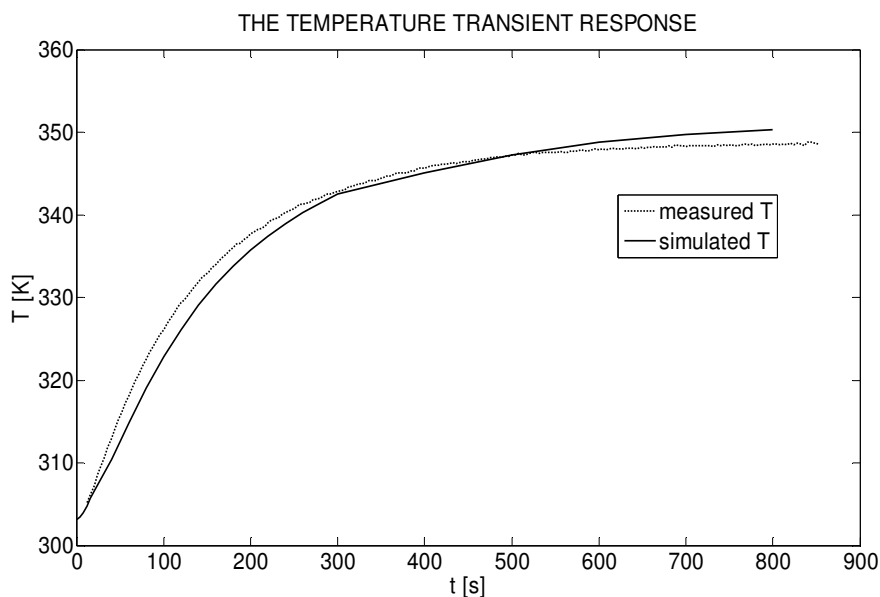
Obr. č. 4 a) Nalezení senzoru a potlačení pozadí. b) Korekce naklonění a posunutí do středu.

Pro korekci naklonění použijeme standardní funkci *imrotate* z knihovny Image Processing toolbox s využitím bikubické interpolace viz. Obr. č. 4 b). Podle výše popsaných metod byl ve všech souborech měření umístěn senzor do stejné polohy v obrazu měl stejnou velikost a natočení. V souborech měření byly vybrány konkrétní body senzoru, na kterých byly sledovány průběhy přechodového děje. Vhodnou metodou budou jednotlivá měření zařazena do tříd. Na souborech stejné třídy budou kumulačními metodami odstraněny rušivé vlivy.

## 4 Ověření analytického modelu

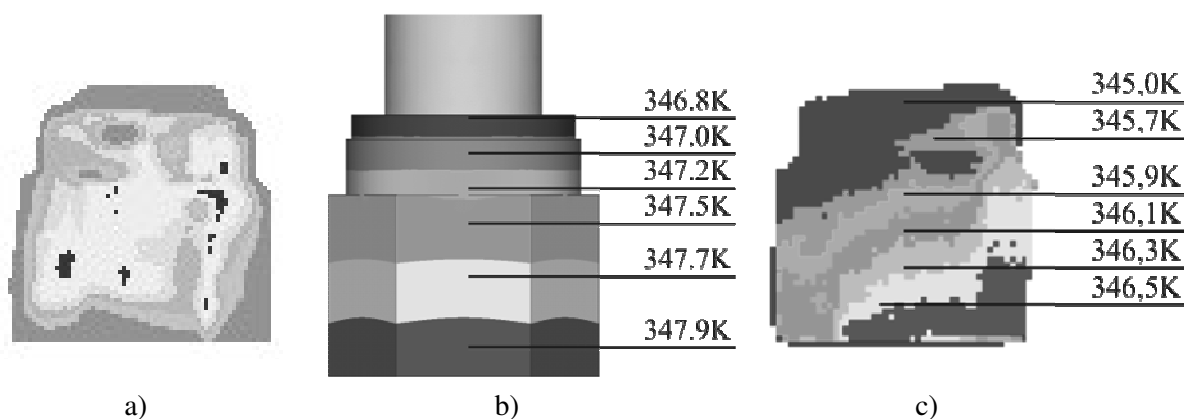
Po základních úpravách naměřených dat můžeme přejít k předběžnému ověření analytického modelu. Bere se v úvahu pouze jeden soubor naměřených dat. Zatím se k ověření analytického modelu nezohledňuje periodicitu naměřených dat, tato vyšší fáze ověření bude realizována v budoucnu a zřejmě bude využito kumulačních technik. Pro ověření analytického modelu sledujeme průběh přechodového děje. Důležitá je pro nás časová konstanta systému a tvar nalezené křivky.

Sledujeme průběh teploty pixelu umístěného uprostřed hlavy bimetalového senzoru. Simulovaná křivka je vypočtena v programovém prostředí ANSYS.



Obr. č. 5 Přechodová odezva teploty

Pro další srovnání sledujeme rozložení izometrických ploch (plochy o stejných teplotách) na povrchu bimetalového senzoru viz. Obr. č. 8



Obr. č. 6 Naměřené a simulované izotermické plochy

Vidíme vykreslení izotermických ploch v ustáleném stavu v rozpětí teploty 345K – 346,5K. Zde se dopouštíme chyb vzhledem k simulovaným izotermickým plochám bimetalového senzoru modelovaném v ANSYSU. U Obr. č. 6 a) je chyba způsobená nerovnoměrným začerněním senzoru zmiňovaném v úvodu. Koeficient emisivity je na ploše senzoru různý. Pro opravu této chyby byl zvolen jiný způsob začernění a to pomocí Thermo spreje, který má zaručenou emisivitu 0,96. Měření byla provedena znovu postupem uvedeným výše. Pro lepší zachycení dynamiky přechodového děje bylo zvoleno snímání jeden snímek za sekundu. Byl získán soubor 10 měření. Na obrázku č. 6 c) vidíme již souvislé izotermické plochy, dosáhli jsme určitého zlepšení. Tyto plochy však stále neodpovídají izotermickým plochám simulovaným pomocí programového balíku ANSYS. Chyba je zřejmě způsobená tím, že všechny plochy senzoru nejsou kolmé na objektiv kamery, tzn. koeficient emisivity je závislý i na úhlu, který svírá plocha s ohniskem objektivu IR kamery a také je zapříčiněna zbytkovou vynucenou konvekcí (proudění vzduchu okolo snímače).

## 5 Závěr

Pro ověření simulovaných dat bimetalového senzoru, byl získán soubor 10 měření pomocí IR kamery. Pro získání předběžných výsledků bylo použito zpracování obrazu s využitím Image Processing toolbox. Pro porovnání simulovaných a měřených dat byl vybrán povrchový bod bimetalového senzoru. Porovnával se přechodový děj teploty zvoleného bodu. Měřením jsme zjistili, že rozdíl teploty v ustálených stavech je okolo 2K, což představuje střední chybu 4%. Maximální rozdíl v časových konstantách je 28s. Střední chyba je okolo 3,5%. Analýza měřených dat je na počátku zpracování. Protože se jedná o stacionární děj budou data z dalších měření použita pro zpřesnění výsledků měření. Dále pak bude vybrána vhodná kumulační metoda pro odstranění náhodných chyb. Výsledky zpracování měřených dat budou použity v disertační práci.

## Poděkování

Tento projekt a článek je podporován Grantovou Agenturou České Republiky - 102/06/0498, Modelování teplotní zátěže elektroniky moderních snímačů.

## Reference

- [1] Mondek R., Plešivčák P., Nevřiva P., *Simulation of the temperature transient response of the bimetallic thermometer*, Proceedings of PDeS 2006, Vol. 1, pp. 483-486, Brno 2006.
- [2] Gonzalez R. C., Woods R. E., Eddins, *Digital Image Processing using MATLAB*, Prentice Hall, New Persey 2004.

---

David Grobelný  
david.grobelny@vsb.cz

Pavel Nevřiva  
pavel.nevriva@vsb.cz

Přemysl Plešivčák  
premysl.plesivcak@vsb.cz