

# DIGITÁLNÍ ZPRACOVÁNÍ OBRAZU Z TERMORIZNÍ KAMERY

*R. Hájovský, J. Krňávek, Z. Macháček*

Katedra měřicí a řídicí techniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, VŠB-TU Ostrava

## Abstrakt

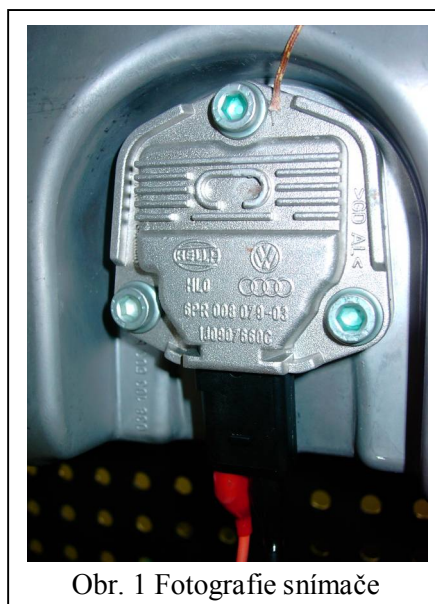
**Příspěvek se zabývá problematikou digitálního zpracování obrazu reprezentujícího teplotní pole mikroelektronického snímače ponořeného do horké olejové lázně. Digitálním zpracováním obrazu se získávají data použitelná pro porovnání obrazu z měření termovizní kamerou s obrazem generovaným matematickým modelem metodou konečných prvků v softwaru ANSYS. Oba porovnávané obrazy je nutné upravit tak, aby se shodovaly ve svých rozměrech, parametrech, natočení apod. Tyto úpravy jsou provedeny v matematickém programovém prostředí MATLAB. Po digitálním zpracování obrazů je možné v tomto matematickém programu porovnat a vyhodnotit výsledné měření například pomocí statistických metod, nebo aplikace neuronové sítě (umělá inteligence).**

## 1 Úvod

Příspěvek se zabývá digitálním zpracováním obrazu reprezentujícího tepelné působení na okolí snímače v olejové lázni. Naměřená data získaná termovizní kamerou lze srovnávat s vytvořeným matematickým modelem metodou konečných prvků – MKP pouze v případě, že jsou upraveny a zpracovány na shodné rozměry, parametry, natočení, ostrost atd. Z tohoto důvodu je nezbytné použití níže popsaných metod a postupů pro zpracování obrazu. Při realizaci projektu se využívá SW systém MATLAB spolu s jeho speciálním toolboxem pro zpracování obrazu - IMAGE PROCESSING TOOLBOX a matematický program ANSYS pro vytvoření matematického fyzikálního modelu přenosu tepla na okolí senzoru pomocí algoritmů numerických metod.

Monitorování a analýza teplotního působení přenosu tepla v okolí senzoru jsou důležité pro správnou funkci elektronických součástek, ze kterých je senzor složen. V závislosti na chemickém složení jsou elektronické součástky méně či více ovlivňovány okolní teplotou. Je nutné uvážit rozmístění elektronických součástek v přístrojích a zohlednit přenos tepla z okolí senzoru, i mezi součástkami samotnými. Zásadní vliv teplot na funkčnost a přesnost senzorů byl motivací pro řešení popisovaného projektu. Popisovaná problematika v příspěvku lze využít pro správnou konstrukci senzoru a určení limitů teplot okolí působících na elektroniku zařízení.

Měřená obrazová data jsou získána s využitím termovizní kamery FLIR THERMACAM SC2000. Při jejich následném zpracování v projektu byla aplikována metoda segmentace teplotního pole chladiče, korekce natočení snímače a dolnopropustný filtr za účelem vyhlazení ekvipotenciálních ploch. Filtrace je provedena ve frekvenční doméně.



Obr. 1 Fotografie snímače

## 2 Problematika tepelného přenosu a působení na elektroniku

U senzorů, které jsou vystavovány extrémním vlivům (např. vyšším teplotám), je nutné dobře specifikovat a definovat limitní hodnoty, které by při překročení mohly způsobit poškození elektronických součástek uvnitř senzoru. Je vhodné kalkulovat nejen s okolním prostředím a působením jeho teploty, ale také s přenosem tepla ze součástek s vysokou provozní povrchovou teplotou, jako výkonové tranzistory, transformátory, cívky relé, výkonové odpory. Vhodným rozmístěním, účinným větráním je třeba zajistit optimální provozní podmínky. Elektronické součástky musí mít stabilní parametry při působení standardních klimatických vlivů okolního prostředí jako jsou teplota nebo vlhkost.

Zkoušky ověřující stabilitu součástek na změny klimatických podmínek jsou standardizovány a shrnuty normou ČSN EN 60068-2 Základní zkoušky vlivu prostředí. Označování klimatické odolnosti a zkušební metody a postupy se shodují s mezinárodní normou IEC 60068:

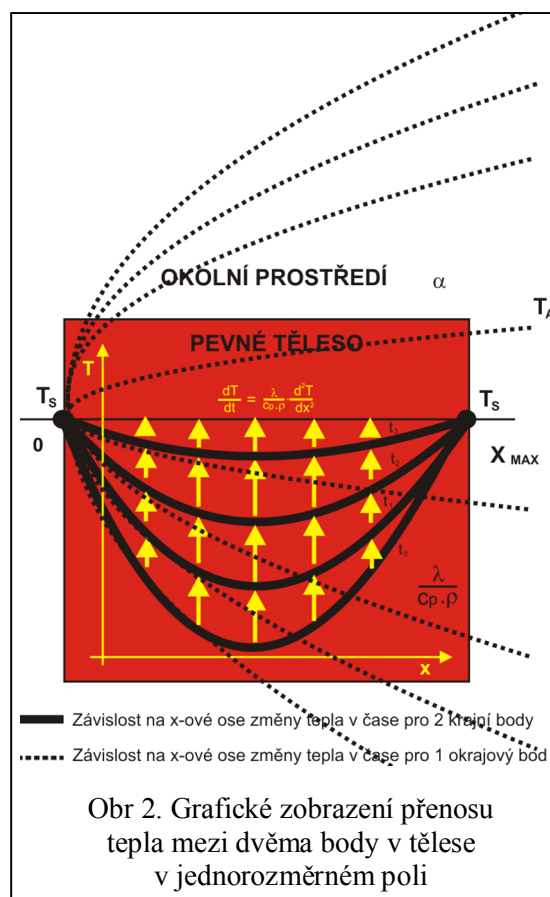
ČSN EN 60068-2-1 - Zkoušky vlivu vnějších činitelů prostředí - Chlad (34 5791:11/95),

ČSN EN 60068-2-2 - Zkoušky vlivu vnějších činitelů prostředí - Suché teplo (34 5791:01/96)

Teplota působící okolním prostředím bezprostředně na elektroniku je běžně dána maximálním rozsahem  $-55/-65^{\circ}\text{C}$  až  $+125^{\circ}\text{C}$ . Polovodičová elektronika je schopna odolávat teplotám nižším než  $-270^{\circ}\text{C}$ , jejichž složení je z chemických prvků a sloučenin Si, Ge, GaAs. V laboratorních podmínkách byly ověřeny provozní vlastnosti některých polovodičových elektronických součástek až do teplot  $+700^{\circ}\text{C}$  (diamantová Schottkyho dioda),  $650^{\circ}\text{C}$  (pro SiC MOSFET),  $+400$  až  $+500^{\circ}\text{C}$  (integrováné obvody založené na Si a GaAs). Pasivní elektronické součástky také mohou odolávat extrémním teplotním podmínkám, avšak závisí na složení materiálu a chemických sloučeninách [3].

Popisovaná problematika je zaměřena na analýzu přenosu tepla v okolí senzoru ponořeného v olejové lázni, kde teplota okolí samozřejmě tepelně ovlivňuje elektroniku umístěnou uvnitř senzoru. Analýzu přenosu tepla lze popsat matematickým modelem termodynamického systému, který prostorově vymezuje hmotnou část, jejíž stav se mění vlivem přenosu tepla nebo přeměnou jiných druhů energie. Tepelný systém je množina prvků, které jsou spojeny navzájem i s okolím tepelnými interakcemi a tvoří specifické vlastnosti systému. Tepelný systém  $S$  se skládá z podsystémů  $S_1, S_2 \dots S_K$ , které jsou tvořeny  $n$  prvky. Formálně lze tepelný systém popsat:  $S(X, R)$ , kde množina prvků je  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  a množina relací mezi prvky je  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ . Přechody mezi prvky podsystému se nazývají tepelné uzly, ve kterých dochází ke koncentraci teplot a tepelných napětí.

Přenos tepla se v tepelných systémech uskutečňuje vedením, konvencím, sáláním a může být popsán deterministickým matematickým modelem, který vychází ze základních zákonitostí přenosu tepla pomocí základní Fourierovy parciální rovnice vedení tepla s okrajovými a počátečními podmínkami. Dále může být přenos tepla popsán stochastickým matematickým modelem, který je



většinou řešen až po vyjádření deterministického matematického modelu. Jestliže systém neobsahuje vnitřní zdroj tepla, tedy nedochází ke zvýšení tepla  $\delta Q_V$  s objemovou hustotou  $q_V$ , což znamená, že  $q_V = 0$ , pak Fourierova parciální rovnice (rovnice pohybového teplotního pole) je rovna (1):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Fourierova parciální rovnice potvrdila hypotézu, kterou Fourier předpokládal, že změna teploty, tedy přenosu tepla závisí na parabolě vzhledem k souřadnicím vzdálenosti. Parabolický typ parciální diferenciální rovnice je patrný z Fourierovy parciální rovnice. Tvar paraboly přenosu tepla v tělese mezi jednotlivými prvky je dán určitými parametry tělesa, tedy výsledkem  $\frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$ , který shrnuje měrnou tepelnou vodivost  $\lambda$ , tepelnou kapacitu  $c_p$  a hustotu  $\rho$  [4].

Počáteční a okrajové podmínky je nutné definovat pro jednoznačné určení a doplnění řešení parciální diferenciální rovnice. Počáteční podmínka Fourierovy parciální rovnice zapsaná ve tvaru teploty  $T(x, y, z, 0)$  pro definování trojrozměrného prostoru tělesa obsahuje proměnnou  $t = 0$ , která má fyzikální interpretaci času. Proměnné  $x, y, z$  popisující fyzikální interpretaci bodových souřadnic v prostoru tělesa jsou u řešení počáteční podmínky proměnlivé:

$$0 \leq x \leq X_{MAX}, 0 \leq y \leq Y_{MAX}, 0 \leq z \leq Z_{MAX} \quad (2)$$

### 3 Zpracování dat z měření termovizní kamerou

Naměřená data jsou převedena do souborů (\*.mat) pomocí software ThermaCamResearcher 2001, který je dodáván ke kameře. V těchto souborech je uloženo teplotní pole přímo ve stupních Kelvina. Jelikož se jedná o 2D pole, je možné s ním pracovat jako s obrazem.

Při jednotlivých měřeních se nepodařilo senzor umístit do stejného bodu jako u předchozího měření, což má za následek různé velikosti senzoru, různé natočení a polohu. Pro detekci polohy senzoru v obraze je použit detektor hran. Tento využívá vlastnosti obrazového elementu a jeho okolí. Hrana je jak známo určena tím, jak prudce se mění hodnota obrazové funkce  $f(x,y)$ . Nabízí se tedy matematický nástroj parciální derivace. Změnu funkce tedy udává její gradient, který určuje směr největšího růstu funkce (směr gradientu) vztah (3) a strmost tohoto růstu (modul gradientu) vztah (4).

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan \left( \frac{\frac{\partial f}{\partial y}}{\frac{\partial f}{\partial x}} \right) \quad (4)$$

Nalezení hran senzoru je provedeno pomocí konvoluce (6) obrazové funkce  $f(x,y)$  a hranového operátoru  $h(x,y)$ , který aproximuje zmiňovaný gradient. Bylo vyzkoušeno několik operátorů a nejlepší výsledky byly dosaženy s operátorem Prewittové (5). Tento gradient je odhadován vždy v okolí 3x3 každého obrazového bodu a detekuje svislé hrany senzoru.

$$h = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$g(x, y) = f(x, y) * h(m, n) \quad (6)$$

Nalezení plochy snímače je realizováno pomocí algoritmu, který vybírá všechny body ležící nejprve vpravo od levé hranice a v druhém kroku vlevo od pravé hrany snímače. Ostatní obrazové body nuluje. Výsledkem tedy jsou dva binární obrazy, jejichž matematickým průnikem získáme plochu celého snímače jak je vidět na obr. 3. Z obr. 3a je dobře patrné naklonění snímače. Ke změně rotace nalezené plochy byla použita geometrická transformace  $T$ , kterou můžeme popsat vztahem (7). Obraz 3b ukazuje masku snímače segmentovanou z již správně natočeného obrazu. Masku snímače je z důvodů popsanych výše použitelná vždy pro jednu sérii měření.

$$(x, y) = T\{(w, z)\} \quad (7)$$

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

Pro změnu natočení obrázku platí

$$\begin{aligned} x &= w \cdot \cos(\theta) - z \cdot \sin(\theta) \\ y &= w \cdot \sin(\theta) + z \cdot \cos(\theta) \end{aligned} \quad (8)$$

kde  $\theta$  je úhel natočení.

Pro změnu velikosti obrázku platí

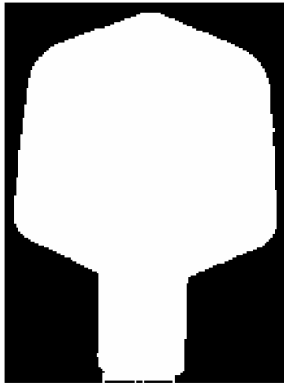
$$\begin{aligned} x &= s_x w \\ y &= s_y z \end{aligned} \quad (9)$$

kde  $s_x$  a  $s_y$  jsou škálovací parametry.

Pro zjištění úhlu natočení  $\theta$  bylo využito faktu, že senzor je symetrický podle osy  $y$ . Byly zjištěny polohy bodů v polorovinách čar ohraničující horní a dolní část snímače a následně jeho výška. Potřebný úhel naklonění byl poté spočten pomocí goniometrické funkce  $\arctan$ . Pro samotné natočení obrazu byla použita funkce *imrotate* z knihovny Matlab Image Processing toolboxu a interpolační metoda nejbližších sousedů.

Protože zkreslení obrazu z kamery souvisí s jejím přesným umístěním, stejně tak jako nakloněním, byla jako alternativa k prostému otočení obrazu s úspěchem aplikována i metoda odstranění projektivního zkreslení včetně natočení obrazu pomocí registrace obrazu do souřadnic obrazu ideálního, získaného z konečnoprvkového modelu. Přitom bylo využito metody kontrolních bodů, které jsou uloženy do souborů a jsou použity vždy pro jednu sérii měření. Z důvodu zajištění co největší souhlasnosti výběru kontrolních bodů v obraze bylo využito funkce *cpcorr*.

V současné době je metodika správného natočení, respektive zjištění úhlu natočení, rozpracována s využitím Radonovy transformace.



Obr. 3a: Maska snímače z původního obrazu. Obr. 3b: Maska snímače ze správně natočeného obrazu

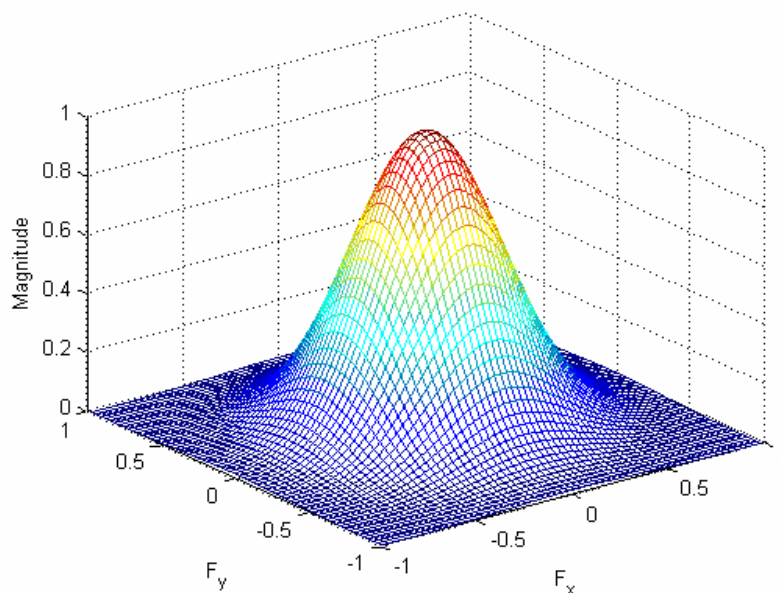
**Ukázka kódu programu pro segmentaci snímače:**

```
%segmentace snimace
R1=imread('mer6_1000_cut.tif');
R1=image;
%vytvoreni masky a filtrace okoli
RB1=(edge(R1,'prewitt'));
[m,n]=size(R1);
for u1=2:max(m)
    for u2=2:max(n)
        if max(RB1(u1,u2-1),RB1(u1,u2))==1
            RB1(u1,u2)=1;
        end
    end
end
end
RB2=(edge(R1,'prewitt'));
[m,n]=size(RB2);
for u1=max(m)-1:-1:1
    for u2=max(n)-1:-1:1
        if max(RB2(u1,u2+1),RB2(u1,u2))==1
            RB2(u1,u2)=1;
        end
    end
end
end

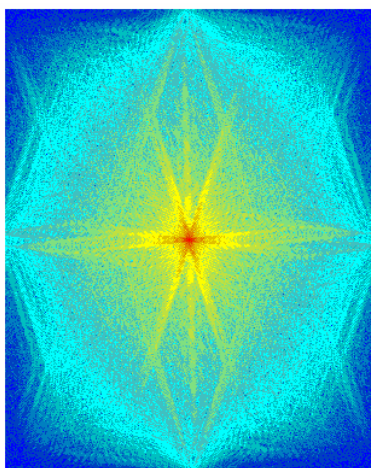
%prunik mnozin
RBW=min(RB1,RB2);
figure,imshow(RBW)

%nasobeni originalu a vyrezu
vR=RBW.*double(R1);
figure,imshow(vR)
maska=vR;
```

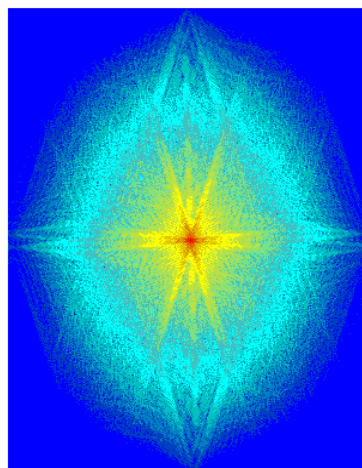
Maska snímače je po výše popsaných úpravách pomocí konvoluce vyplněna naměřeným teplotním polem, které je nejčastěji zobrazováno ve formě ekvipotenciálních ploch. Tyto plochy jsou však, jak je vidět z obrázků 6a velmi roztřepené a pro vizuální porovnání s ekvipotenciálními plochami ideálního modelu nevhodné. Na obrázek proto byl aplikován dolnopropustný filtr, jehož frekvenční charakteristiku můžeme vidět na obrázku 4. Výsledky filtrace jsou potom velmi dobře patrné ze spekter, která jsou ukázána na obrázcích 5a a 5b, nebo z ekvipotenciálních ploch na obrázku 6b.



Obr. 4: Použitý dolnopropustný filtr ve frekvenční doméně.



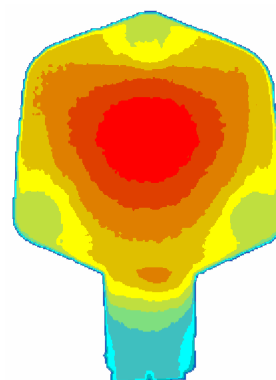
Obr. 5a: Spektrum původního obrázků



Obr. 5b: Spektrum obrázků po konvoluci s filtrem



Obr. 6a: Původní naměřené teplotní pole



Obr. 6b: Teplotní pole po aplikaci filtru

## 4 Zhodnocení

V příspěvku byly popsány základní metody zpracování obrazu, který je získán z termovizní kamery a který reprezentuje teplotní pole snímače. Digitální zpracování získaných obrazových dat slouží k ověření matematického modelu přenosu tepla. Ten je již vytvořen a v současné době probíhá výzkum v oblasti digitálního zpracování obrazu pomocí SW systému Matlab a Image Processing Toolboxu. Dále se plánuje analýza použití umělé inteligence, jako jsou neuronové sítě apod.

**Práce na projektu a příspěvek jsou podporovány projektem GAČR 102/06/0498 – Modelování teplotní zátěže elektroniky moderních snímačů.**

## LITERATURA

- [1] A. BOVIK. *Handbook of image and video processing*. Academic Press. ISBN 0-12-119790-5. 2000.
- [2] R. Gonzalez, R. Woods, S. Eddins. *Digital Image Processing Using Matlab*. Prentice Hall. ISBN 0-13-008519-7. 2004.
- [3] J. FUKÁTKO. *Teplo a chlazení v elektronice*. BEN - Praha. ISBN 80-86056-24-4, 2002.
- [4] J. KUNEŠ. *Modelování tepelných procesů*. SNTL. ISBN 80-03-00134-X, 1989.
- [5] MATLAB–user documentation. <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/matlab.shtml>

---

Ing. Radovan Hájovský, Ph.D. radovan.hajovsky@vsb.cz

Ing. Zdeněk Macháček, Ph.D. zdenek.machacek@vsb.cz

Ing. Jan Krňávek jan.krnavek@vsb.cz

VŠB-Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra měřicí a řídicí techniky  
17. listopadu 15  
708 33 Ostrava-Poruba

tel: 597324221

fax: 597323138