

# VALIDACE ZTRÁTOVÝCH VÝKONŮ A TEPLOTNÍHO MODELU SINUSOVÉHO FILTRU

*Ing. Jan Kořínek*

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě, DFJP, Univerzita Pardubice  
Studentská 95, 532 10 Pardubice, Česká republika  
tel.: +420 725 719 455, email: korinek.j@gmail.com  
web: <http://www.upce.cz>

**Abstrakt:** Tento článek pojednává o souvislostech mezi výkonnými ztrátami tlumivky sinusového filtru, jejich vlivem na rozložení teplotního pole sinusového filtru pod zátěží a o verifikaci těchto výkonnostních a teplotních poměrů. Zahrnuje popis vytvoření třírozměrné nestacionární MKP simulace tepelných poměrů sinusového filtru na základě matematického popisu kondukce, volné konvekce a ztrát. Následně je uvedena a popsána validační metodika měření teplotního pole pomocí termočlánků a termokamery. Je zde proveden rozbor výsledků validačního měření a MKP simulace se vzájemným porovnáním. Závěrem na základě získaných dat jsou pak nastíněny možnosti další optimalizace simulace tepelných poměrů tlumivky sinusového filtru.

**Klíčová slova:** tlumivka, sinusový filtr, Ansys, sdílení tepla, součinitel přestupu tepla, tepelná vodivost, magnetismus, vinutí, tepelné ztráty, volná konvekce. termočlánek, termokamera, MKP simulace

## 1 Úvod

Na optimalizaci vinutých dílů lze nahlížet více hledisky a to na základě faktu, o jaký obor problematiky se jedná. Jedno z těchto hledisek může být zaměřeno také na tepelný přestup vinutým dílem a jeho komponentami. V důsledku dochází k vývinu ztrátového tepla a díky energetické přeměně zvýšením teploty v okolí jejich zdroje. Následně tak dojde k termodynamické nerovnováze mezi více systémy. Tímto stavem je následně započat proces sdílení tepla, směřující k opětovnému dosažení rovnováhy.

Za pomoci MKP simulačních analýz validovaných s experimenty je tak možné si udělat představu o sdílení tepla v konstrukcích vinutých dílů. Metoda konečných prvků (dále jen MKP) je numerická metoda sloužící k matematickým výpočtům přibližných řešení fyzikálních vlastností a jevů definovaného fyzikálního modelu, která pracuje na principu diskretizace spojitého kontinua do konečného počtu prvků. Se zaměřením na různé koncepty lze tak tyto analýzy následně využít jako počáteční bod pro další optimalizaci.

Účelem tohoto měření a tohoto článku je validace ztrát a tepelných poměrů sinusového filtru SKY3FSM16-2kHz. MKP simulace teplotního rozložení sinusového filtru vyžaduje vstupy pro okrajové podmínky ve formě ztrátových výkonů a součinitelů přestupu tepla do okolního prostředí. Tyto dva vstupy závisejí na množství dalších proměnných, které tak ovlivňují přesnost výsledného výpočtu.

Při designu vinutého dílu na magnetickém jádře ovlivňuje magnetický obvod tloušťka použitého materiálu. Tato tloušťka se může do určité míry lišit. Vlivem toho dochází i k rozdílu ztrát, což znemožňuje přesnější určení jejich velikosti. Tlumivkou sinusového filtru dále vlivem spínací frekvence měniče teče vysokofrekvenční složka proudu, která obsahuje široké spektrum harmonických. Pro provedení výpočtu je potřeba počítat se základními harmonickými složkami a jejich velikost určit tak, aby v ní byly zohledněny ztráty i ostatních

harmonických. Dalším faktorem je dosažené oteplení. Toto oteplení má vliv na zvýšení ztrát sinusového filtru.

Z hlediska problematiky sdílení tepla konvekcí je kritické co nejpřesnější určení součinitele přestupu tepla. Jeho výpočet je závislý především na charakteru proudění v blízkosti stěn sinusového filtru ale i na jejich geometrii. V proudění je pak nutno uvažovat pro dané médium jeho rychlost, hustotu, kinematickou a dynamickou viskozitu, tepelnou vodivost, objemovou roztažnost i měrné tepelné kapacity. Všechny tyto vlastnosti jsou teplotně závislé. V simulaci uvažované volné konvekci se uplatňuje i vliv tíhového zrychlení.

Z důvodu výše zmíněných vlivů se pro ověření výpočtu ztrátových výkonů a simulace sdílení tepla realizovalo experimentální měření jeho oteplení a proudu protékajícího sinusovým filtrem. Proud slouží jako podklad pro výpočet ztrát a k jejich rozdělení na ztráty v jádře a ve vinutí které jsou následně použity jako okrajové podmínky pro MKP simulaci teplotního pole. Měření reálných teplot dosažených na sinusovém filtru pak slouží pro celkové porovnání s provedenou MKP simulační analýzou.

## 2 Problematika sdílení tepla

Sdělené teplo může být definováno jako forma tepelné energie, která právě prochází hranicí termodynamické soustavy. Může přecházet pouze při teplotním gradientu z teplejšího prostředí do prostředí s nižší teplotou. Je více způsobů jak může sdílení tepla probíhat. Tyto způsoby jsou vždy spojeny s nějakou formou pohybu hmoty, díky kterému přechází.

*Základní druhy sdílení tepla:*

- **vedením** (kondukce)
- **prouděním** (konvekce)
- **zářením** (radiace)

Ke sdílení může docházet i více způsoby současně, avšak většinou je jeden způsob přestupu oproti druhému zanedbatelný [1].

### 2.1 Sdílení tepla vedením (kondukcí)

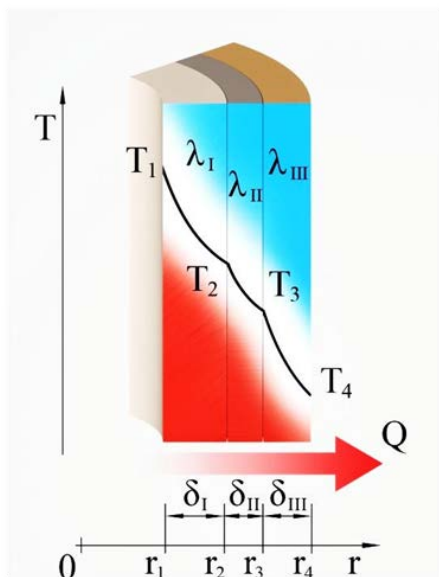
Ke sdílení tepla vedením dochází v největší míře v pevných látkách. Je to šíření mechanických forem energie mikroskopického pohybu atomů. Pokud má hmota v různých místech různou teplotu, dochází k vzájemným srážkám mezi molekulami s různou energií. Po srážce se energie molekul s původně menší energií zvyšuje a energie molekul s původně větší energií se zmenšuje. Tak dochází k tepelnému toku z místa s vyšší energií do místa s nižší energií, ježhož mírou je teplota. Může se i v malé míře vyskytovat v tekutinách, ale je zaštitěno prouděním, které má v tomto případě majoritní převahu [1] [2].

Pro případ změny teploty pouze v ose  $z$  je tepelný tok dle Fourierova zákona pro vedení tepla úměrný ploše, přes kterou prochází, a také záporné hodnotě derivace teploty podle souřadnice  $z$  [2].

$$Q = -s\lambda \frac{dT}{dz} [W] \quad (2.1)$$

Figuruje zde ještě součinitel úměrnosti přestupu tepla tzv. *tepelná vodivost*  $\lambda [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$ . Tento součinitel má každý materiál jiný, je to materiálová vlastnost. Jeho

hodnota se odvíjí od koncentrace molekul v materiálu. Čím je tato koncentrace v prostoru materiálu nižší, tím je součinitel taktěž nižší. Tento součinitel je také závislý na teplotě.



**Obr. 2.1** Schematické znázornění vedení tepla vícevrstvou válcovou plochou

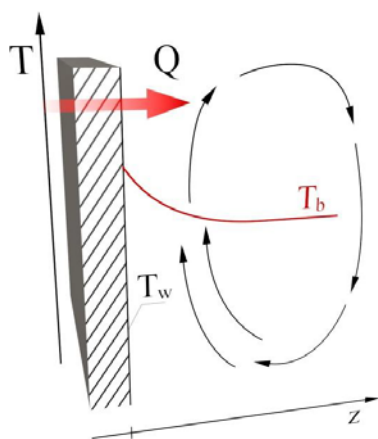
Pro názornou ukázkou zde bude uveden vztah pouze pro sdílení tepla vedením **válcovou stěnou**.

Pro vedení tepla **válcovou stěnou** ve směru kolmém na podélnou osu válcových ploch, je tepelný tok stejný a tudíž i nezávislý na vzdálenosti od osy soustavy. Integrací (2.1) a dosazením okrajových podmínek za předpokladu že *tepelná vodivost*  $\lambda$  je konstantní po úpravě dostáváme vztah pro složenou válcovou plochu z více vrstev [1]:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi L(T_1 - T_n)}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\lambda_j} \ln\left(\frac{r_{j+1}}{r_j}\right)} [W] \quad (2.2)$$

## 2.2 Sdílení tepla prouděním (konvekcí)

Tento druh sdílení se uplatňuje v tekutinách, kdy pohybem tekutiny částice o vyšší teplotě přecházejí do míst s nižší teplotou a opačně. Jejich pohyb může být vyvolán záměrně např.: v důsledku změny tlakové energie v energii kinetickou atd..., potom se jedná o **konvekci vynucenou**. Jestliže částice odplývají do poloh, kde je výskyt potenciálově vyšší energie, jedná se o **konvekci volnou** [1].



**Obr. 2.2** Schematické znázornění sdílení tepla prouděním

Tyto způsoby konvekce popisuje *Newtonův ochlazovací zákon*, dle něhož je možno zjistit tepelný tok mezi pevnou stěnou a okolo ní proudící tekutinou [2].

$$\dot{Q} = \alpha S(T_b - T_w) [W] \quad (2.3)$$

Zásadní vliv zde má *součinitel přestupu tepla*  $\alpha [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$ , který je závislý na všech proměnných ovlivňujících proudění v okolí stěny. Proto se jeho hodnoty mohou lišit pro různé druhy proudění i o několik řádů. Zejména zde hraje roli rychlost proudění, kinematická viskozita, charakteristický rozměr obtékaného tělesa aj. Tyto závislosti zahrnují tzv. *podobnostní kritéria*.

### 2.2.1 Podobnostní kritéria

Při početním určování *součinitele přestupu tepla*  $\alpha$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ] se využívá podobnostních čísel (kritérií) jež jsou bezrozměrná. Tyto kritéria využívají teorie podobnosti, aby bylo možno v obecné rovině početní model přenést na geometricky podobné dílo. Díky využití *Buckinghamova teorému* a dosazením do *Newtonova ochlazovacího zákona* tak dostáváme tato čísla [1] [2]:

**Nusseltovo číslo:** 
$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (2.4)$$

Vyjadřuje podíl charakteristické hodnoty toku tepla a charakteristické hodnoty toku tepla v hypoteticky nehybném prostředí [2].

K jeho určení je možno dojít také pomocí kritériálních rovnic, které jsou modifikované pro způsoby obtékání různých těles a za stavu volné nebo vynucené konvekce.

**Reynoldsovo číslo:** 
$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad (2.5)$$

Popisuje vynucené proudění. Určuje jeho charakter, jenž se může pohybovat v laminární nebo turbulentní oblasti. Je v podstatě poměr setrvačných a viskózních sil.

**Prandtlovo číslo:** 
$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.6)$$

Vyjadřuje látkovou vlastnost při sdílení tepla.

**Pécletovo číslo:** 
$$Pe = RePr \quad (2.7)$$

Toto číslo je možno vyjádřit součinem Reynoldsova čísla a Prandtlova čísla. Vyskytuje se zde závislost na hydrodynamickém charakteru toku.

**Grashofovo číslo:** 
$$Gr = \frac{\gamma g \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (2.8)$$

Kritérium se uplatňuje ve volné konvekci. Výše zmíněná kritéria se uplatňují hlavně v konvekci vynucené. Vyjadřuje proudění tekutiny, které je vyvolané rozdílem teplot.

Toto je pouze výběr podobnostních čísel, která nejvíce souvisejí s problematikou výpočtů této práce. Existuje řada dalších, ale není pokládáno za nutné je v této souvislosti zmiňovat [1].

### 2.3 Sdílení tepla zářením (radiací)

Těleso v závislosti na jeho povrchové teplotě vyzařuje také druh energie ve formě elektromagnetických vln rozdílných vlnových délek. Toto vlnění se šíří rychlostí světla a jeho podstata přenosu je odlišná od molekulárního nebo turbulentního. Jelikož se tak může dít v celém spektru vlnových délek, interakce této energie s molekulami vzduchu je velmi malá. Energie vyzářená povrchem jednoho tělesa tak ve vzduchovém prostředí může působit na druhé s minimálním procentuálním úbytkem. Energie záření, která dopadne na jednotku plochy se nazývá *celková hustota dopadajícího zářivého toku*. Tělesa mohou energii absorbovat, odrážet, nebo ji propouštět. S tím souvisí termín *absolutně černého tělesa*, které hypoteticky všechnu zářivou energii pohltí. U ostatních reálných těles se zde zavádí *emisivita*  $\varepsilon$  [–], která vyjadřuje poměr *hustoty zářivého toku* tělesa ku *hustotě zářivého toku*, které by vyzářilo *černé těleso* [3].

Intenzitu vyjadřuje *Stefanův-Boltzmanův zákon* který je možné pro praktické výpočty užít i v upraveném tvaru:

$$\dot{Q} = \varepsilon\sigma S(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.9)$$

*Emisivita*  $\varepsilon [-]$  nabývá hodnot  $0 \sim 1$  a  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$  je Stefan-Boltzmanova konstanta.



**Obr. 2.3** Schematické znázornění sdílení tepla zářením

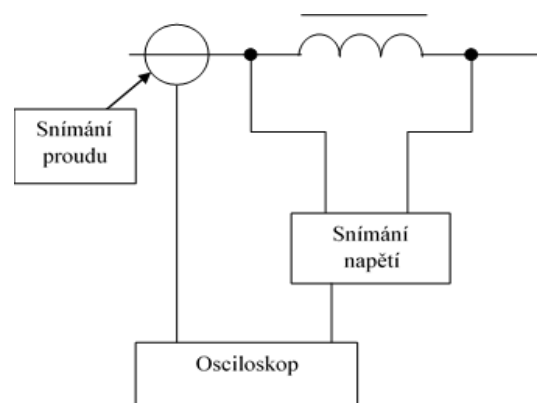
### 3 Problematika ztrát v magnetickém poli

Vypočítaná velikost ztrát sinusového filtru s uvažováním *rovníc 3.1-3.3* byla rozdělena na ztráty v magnetickém materiálu a na ztráty ve vinutí kde  $P$  jsou ztráty celkové,  $P_j$  ztráty Jouleovi a  $P_{MAG}$  ztráty magnetické. Faktor přidavných ztrát  $k$  zahrnuje vliv skinefektu, paralelně zapojených vodičů, ztrát vířivými proudy a vliv okolních vodičů. Celková hodnota ztrát byla korigována se skutečnými naměřenými hodnotami dle *schématu 3.4*. Pro snímání proudu byla použita proudová sonda. Pro napětí diferenciální sonda. Obě dvě byly připojené na osciloskop *Tektronix 350MHz/5Gs*.

$$P = \frac{1}{T} \int ui dt [W] \quad (3.1)$$

$$P_j = RI^2k [W] \quad (3.2)$$

$$P_{MAG} = P - P_j [W] \quad (3.3)$$



**Schéma. 3.4** Schématické znázornění měření ztrát sinusového filtru

## 4 Popis zapojení sinusového filtru

Zapojení sinusového filtru je možno vidět na *schématu 4.1*. Přívodní kabel ze sítě nn 3x230/400V byl přiveden do třífázové komutační tlumivky. Tlumivka byla zapojena do svorek L1,L2,L3, frekvenčního měniče a na výstupní svorky byl připojen sinusový filtr. Za sinusovým filtrem byla zapojena konstantní zátěž. Frekvenční měnič o výkonu 11kW od firmy Siemens vytvářel na výstupu sdružené šířkově pulsní modulované napětí PWM spínané 4kHz. Toto napětí bylo filtrováno dolní propustí typu LC pod hraní 1kHz. Za touto propustí, tedy sinusovým filtrem bylo přivedeno napětí na konstantní zátěž.

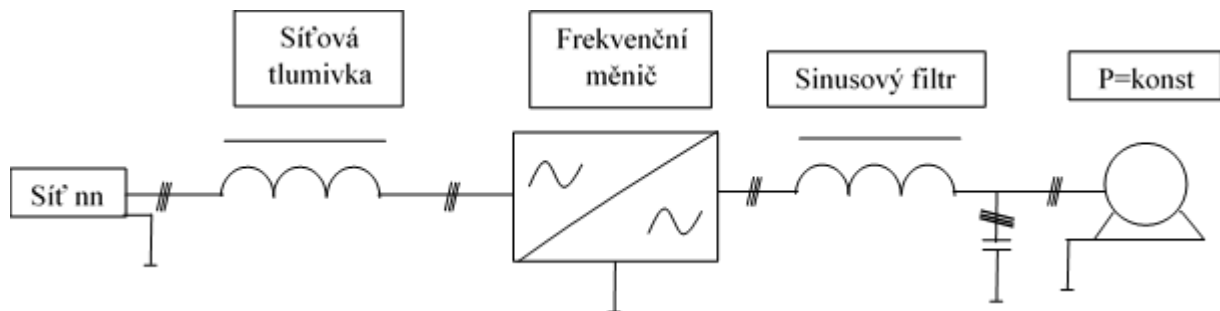


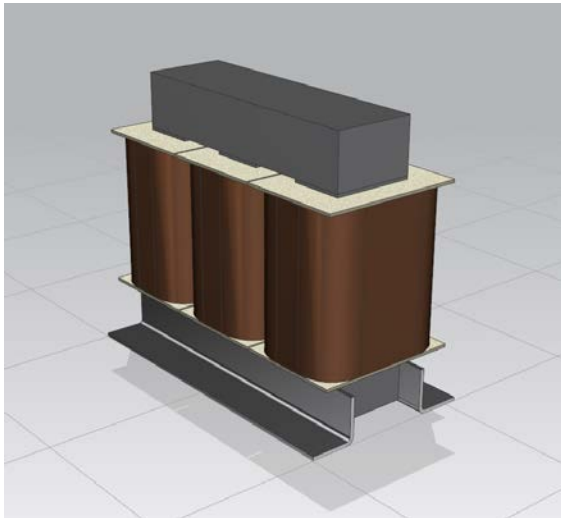
Schéma. 4.1 Schématické znázornění zapojení sinusového filtru

## 5 Metodika implementace konečně-prvkového modelu sinusového filtru

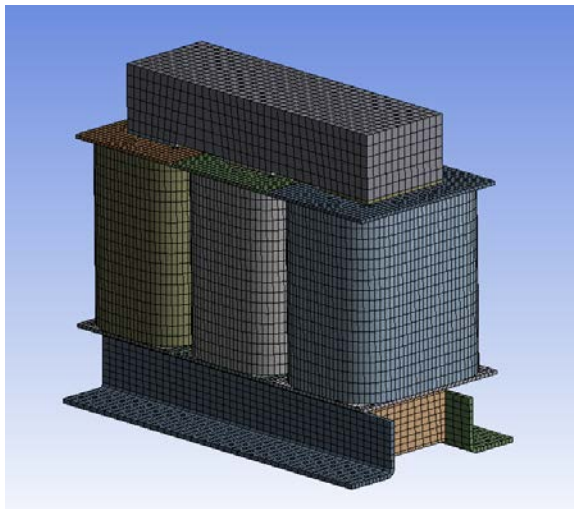
Pro výpočet rozložení teplotního pole byl vytvořen model sinusového filtru s charakteristickými rozměry dle produktové specifikace. Výpočetní úloha, její nastavení, vytvoření sítě a definice okrajových podmínek a výsledný postprocessing byly provedeny za pomoci software Ansys. Simulace je pro nestacionární případ, průběh změn teplot je tak možno sledovat v jádře, kostře vinutí, vinutí a stahovací konstrukci.

### 5.1 Geometrie a materiály modelu

Jádro filtru je složeno z izotropních za studena válcovaných plechů. Jejich počet určuje konečnou šířku jádra. Jelikož plechy na sebe těsně doléhají, pro potřeby výpočtu je uvažován model jádra jako monolitický při zachování charakteristických rozměrů typu 3UI105. K tomuto modelu byly přiřazeny materiálové vlastnosti nezbytné pro tepelně konduktivní výpočet a to zejména hustota a tepelná vodivost. Obdobný předpoklad byl pro potřeby výpočtu zaveden také v případě vinutí z měděného drátu. Vinutí cívky tak představuje monolitický solid s přiřazenými materiálovými vlastnostmi mědi a charakteristickými rozměry dle produktové specifikace sinusového filtru. Kostře vinutí jsou přiřazeny materiálové charakteristiky pro Pocan B4239. Pro optimalizaci modelové sítě nebylo uvažováno žebrování na horizontálních plochách kostry. L-profil stahovací konstrukce obsahuje data o hustotě a tepelné vodivosti uhlíkové oceli. Kompletní model je možno vidět níže na *obrázku 5.1*.



**Obr. 5.1** Grafické zobrazení použitého 3D modelu sinusového filtru



**Obr. 5.2** Síť 3D modelu použitá pro výpočet teplotního pole

## 5.2 Vlastnosti sítě

Pro dosažení co nejnižšího výpočetního času byl kladen důraz na optimalizaci tvaru elementů tvořících síť celého modelu kterou je možno vidět na *obrázku 5.2*. Přibližně 85% sítě tak tvoří elementy hexahedrálního typu. Celkový počet elementů tvořících celý model je 53936.

## 5.3 Iničiační a okrajové podmínky simulace

Jedním z parametrů vstupujícím do výpočtu je počáteční teplota. Protože při experimentální validaci byla teplota okolí 15°C, do simulace byla tedy uvažována taktéž. Konečný čas výpočtu pro ustálení teplot byl nastaven na 80 000s.

Okrajová podmínka *tepelného toku* byla plošně aplikována na jádro a cívky sinusového filtru. Na jádře byl vypočten ztrátový výkon 17,2W/cívku. Ztrátový výkon na samostatné cívce je 15,9W.

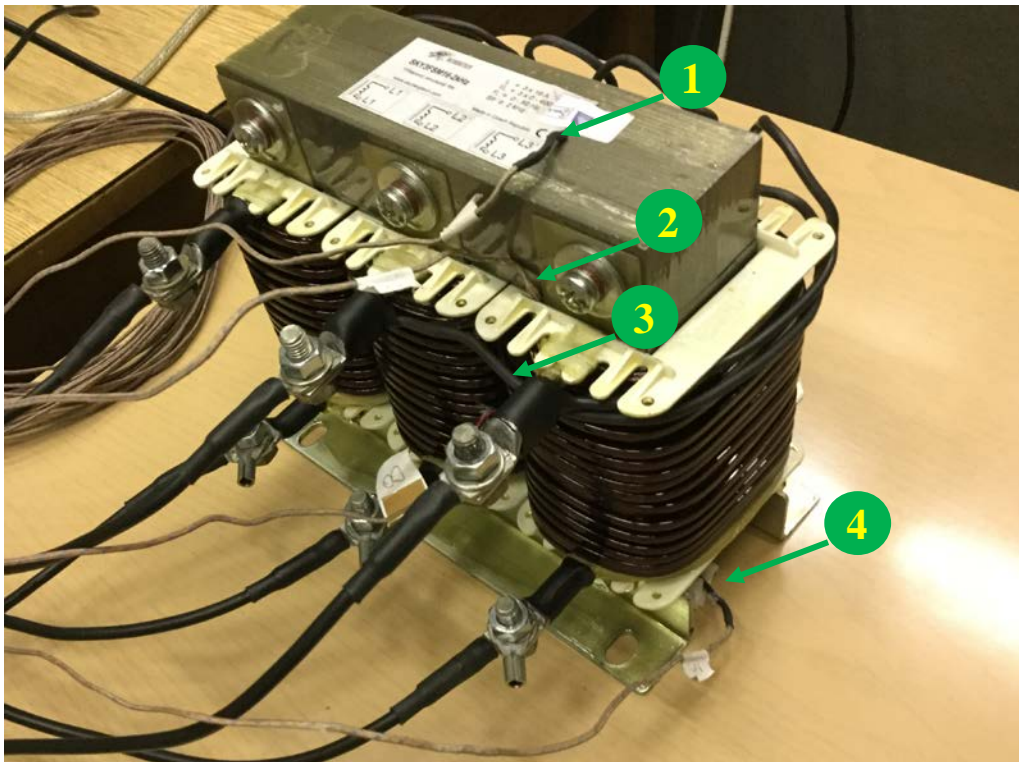
Okrajová podmínka pro konvektivní přenos tepla je definována hodnotou *součinitele přestupu tepla*  $\alpha$  [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]. Pro výpočet všech součinitelů přestupu tepla je uvažován výpočetní model a vztahy volné konvekce. Za okolní médium je uvažován vzduch. Vlastnosti vzduchu jsou uvažovány teplotně závislé. Díky tomu dostáváme pro každou určující teplotu jiné hodnoty Grashofova, Prandtlova, Rayleighova a Nusseltova čísla. Výsledný součinitel přestupu tepla viz. *rovnice (5.1)* jež je vztáhnut na určitou geometrickou oblast se tedy až do ustálení stále mění.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{vzd}}{L_{char}} \left[ \frac{W}{mm^2 \cdot K^1} \right] \quad (5.1)$$

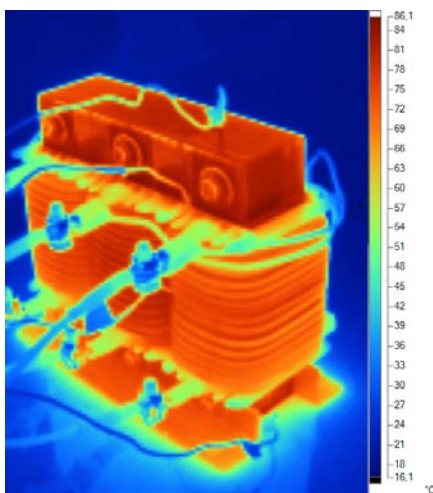
## 6 Validační měření teplot

Sinusový filtr byl umístěn v prostoru na vodorovné desce bez vynuceného proudění nebo působení dalších zdrojů tepla. Teplota okolního vzduchu byla 15°C. Charakter obtékání stěn tak odpovídá volné konvekci. Měření teplot sinusového filtru zatíženého proudem 23A proběhlo za pomoci termočlánků a termokamery.

Termočlánek využívající principu přímé přeměny rozdílu teplot na elektrické napětí je třídy T s maximální teplotou použití do 350°C. Je vyroben z kombinace materiálu mědi a konstantanu. Chyba měření je 0,75% při teplotách nad 0°C. Termočláanky jsou připojeny na autokalibrační jednotku *National Instruments*® pomocí které je vyhodnocován průběh oteplení. Byly použity celkem čtyři termočláanky rozmístěné na odlišných měřicích bodech jak na povrchu, tak i vně filtru viz. *obrázek 6.1*. Termočlánek č.1 měří teplotu na povrchu jádra. Termočlánek č.2 je umístěn mezi jádrem a kostrou vinutí. Termočlánek č.3 je v zasunut mezi vinutími a termočlánek č.4 je naopak umístěn na spodní straně jádra rovnoběžně s rovinnou deskou na které je sinusový filtr umístěn.



**Obr. 6.1** Sinusový filtr SKY3FSM16-2kHz s nainstalovanými termočláanky



**Obr. 6.2** Ukázka zobrazení rozložení teplotního pole

snímků barevná paleta se spektrem modrá-červená. Důvodem využití tohoto spektra je pak lepší názornost při porovnávání s MKP simulací teplotního rozložení.

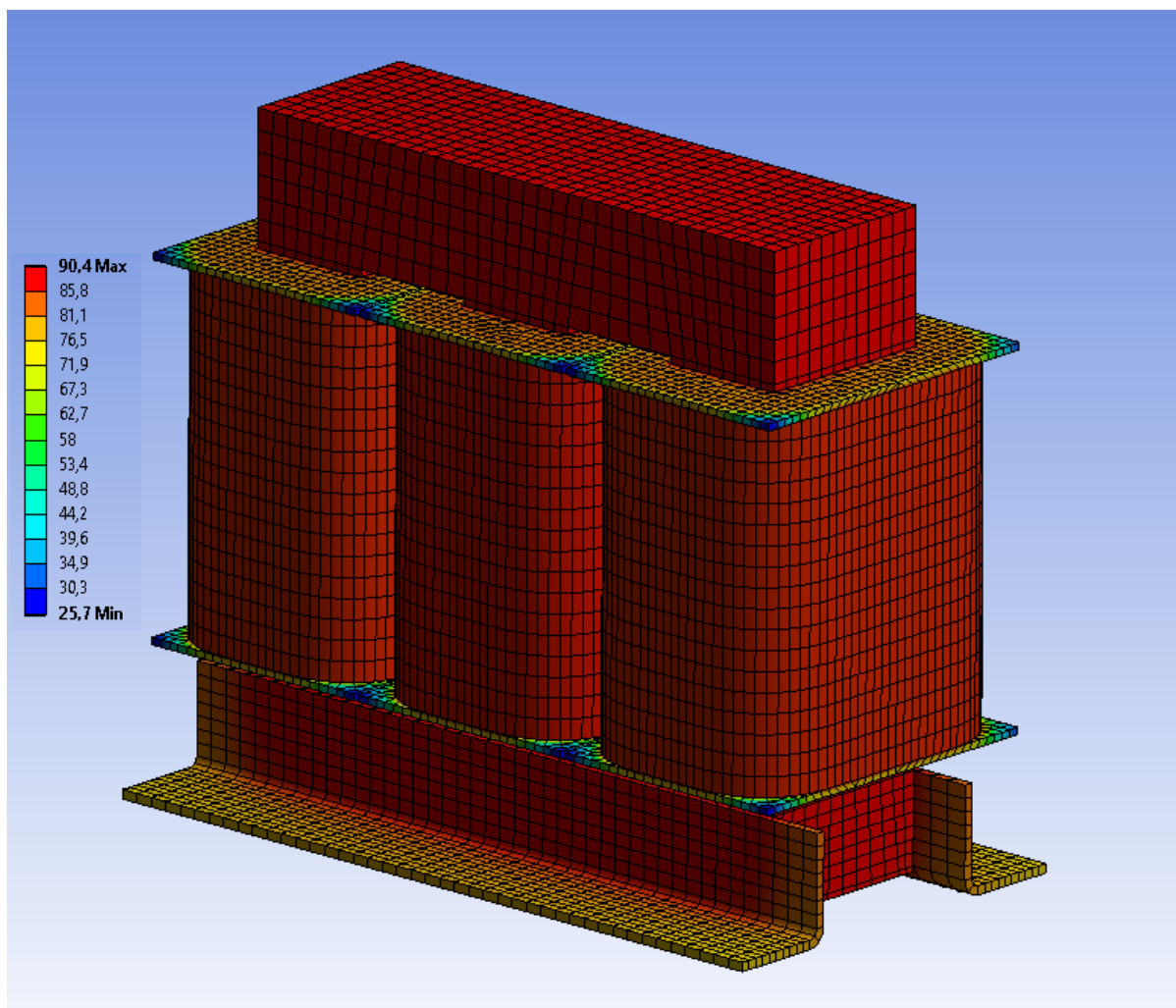
Druhou metodou měření teplot bylo snímání infračerveného záření generovaného povrchem sinusového filtru pomocí termokamery *Fluke*® *Ti125*. Pro vyzářené množství infračerveného spektra je tak zásadní aktuální povrchová teplota a emisivita povrchu materiálu. Na základě těchto nasnímaných dat pak termokamera spočítá povrchovou teplotu. Emisivita nastavená v zařízení pro detekci byla zkalibrována na hodnotu 0,96 na základě porovnání změřeni druhého kusu sinusového filtru, jehož teplota byla ustálena na teplotu okolí. S termokameru lze měřit v rozmezí teplot od -20°C až 350°C s přesností  $\pm 2^\circ\text{C}$  nebo 2% podle toho která hodnota je větší. Tepelná citlivost detekce je 0,1 °C při teplotě cíle 30 °C [4]. Jak je možno vidět na *obrázku 6.2*, v průběhu celého měření byla použita pro zobrazení zachycených



## 7 Naměřené hodnoty oteplení

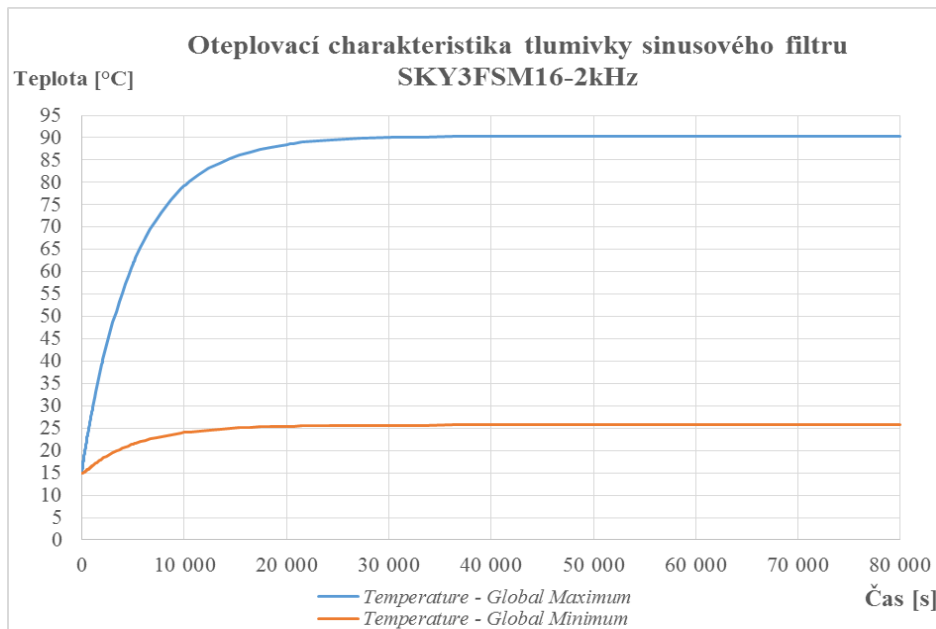
### 7.1 Výsledné teploty dle Ansys simulace

Z provedené MKP simulace sinusového filtru bylo vypočteno 3D teplotní rozložení celou geometrií které je možno vidět na *obrázku 7.1*. Barevná škála vyjadřuje místní teplotu ve °C. Výpočet byl proveden jako nestacionární s časovým skokem 1s v rozmezí 0 až 80 000 s. K ustálení řešení došlo po 154 iteracích v čase 70 100 s. Na *obrázku 7.2* je zobrazen průběh maximální a minimální teploty v závislosti na čase při zátěži sinusového filtru.



**Obr. 7.1** 3D rozložení teplotního pole

Bylo zde dosaženo globální maximální ustálené teploty na hodnotě 90,4°C. Je vidět že již po 5-ti hodinách dosahuje teplota 97 % ze své maximální hodnoty. K celkovému ustálení dojde po následujících 14,5 hodinách a zvýšením teploty o 2,5°C. Zobrazená závislost má exponenciální charakter. Nejnižší ustálená hodnota na celém sinusovém filtru je 25,7°C. Ta dosáhne 97 % ze své maximální hodnoty již po 4 hodinách. Za dalších 13,2 hodin dojde k ustálení zvýšením o 0,8°C. Oblast maximálních teplot se pohybuje na jádře a to v místech mezi kostrou vinutí, zejména pak u prostředního vinutí. Teploty blízké se maximálním jsou také v horní části jádra. Teploty na samotném vinutí se pohybují v rozmezí od 86°C do 87°C. Maximum je pak dosaženo na prostřední cívce. Kostra vinutí má pak své maximum teploty uvnitř v místech kontaktu s jádrem na hodnotě 90,4°C. Minimální teplota 25,7°C je pak v rozích horizontálních okrajů. Současně tak je i globálním minimem celého sinusového filtru.

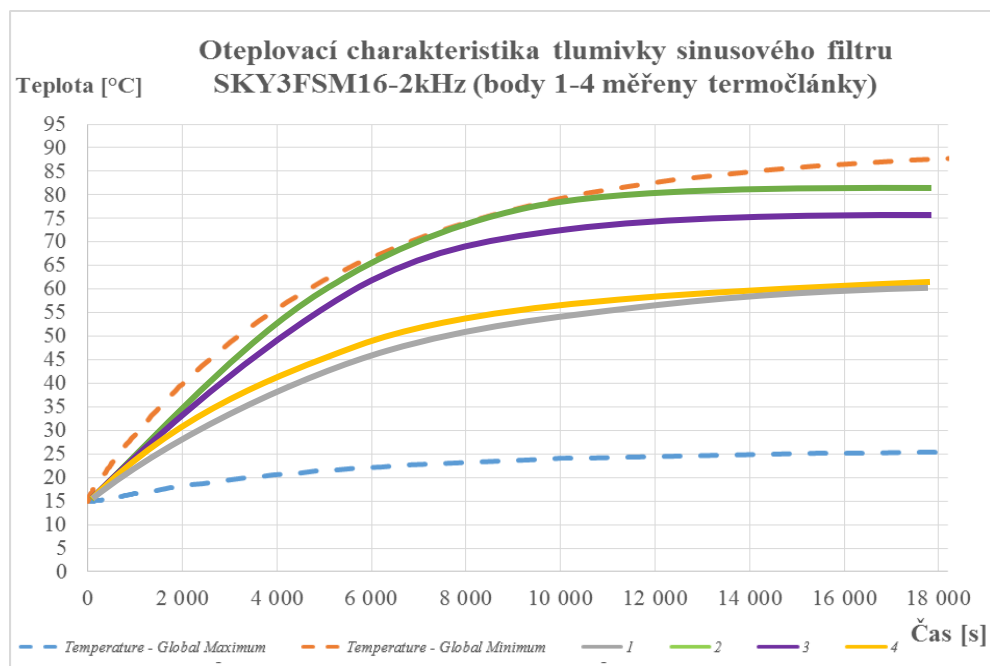


**Obr. 7.2** 3D rozložení teplotního pole

## 7.2 Výsledné teploty dle měření s termočládky

Z měření pomocí termočládků byla zjištěna oteplovací charakteristika. Monitorování teploty trvalo od spuštění zátěže po dobu 5-ti hodin. Na základě naměřených dat byla pro vyhlazení provedena regrese trendu. Orientačně byla do grafu na *obrázku 7.3* přidána data oteplení ze simulace pro porovnání průběhů teplot. Z *obrázku 7.3* je vidět, že charakter oteplení ze simulace se blíží provedenému měření.

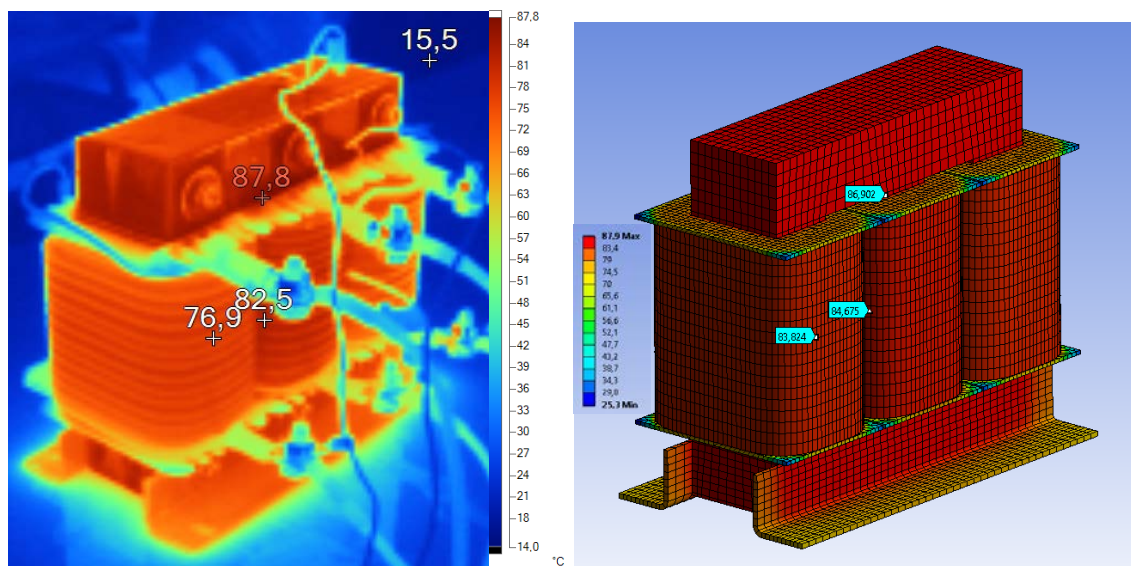
Nejvyšší naměřená teplota po 5-ti hodinách byla naměřena v *bodě č.2* na hodnotě 82,1°C tedy v místě mezi horní částí kostry vinutí a jádra. 76,4°C bylo změřeno mezi vinutími v *bodě č.3*. Na povrchu jádra v *bodě č.1* bylo naměřeno 60°C a v *bodě č.4* teplota 60,6°C.



**Obr. 7.3** Průběh teplot z bodů 1-4 změřených termočládky

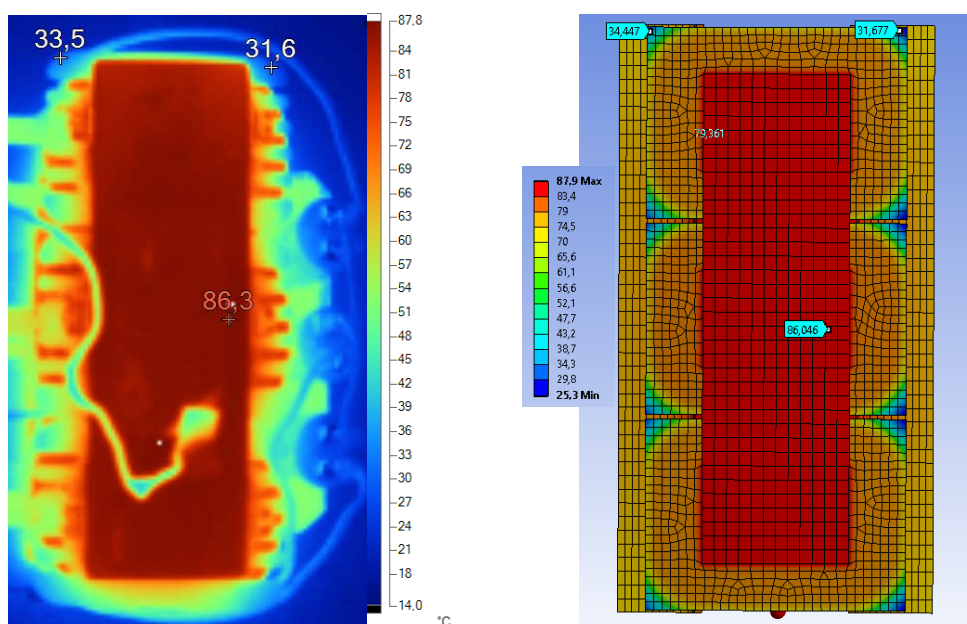
### 7.3 Výsledné teploty dle měření termokamerou

Na níže uvedené sérii obrázků je možno vždy spatřit teplotní pole sejmuté termokamerou se zobrazením teplotní škály a maximálních teplot dosažených v konkrétním pohledu. Dále bude uveden pro porovnání přiřazený pohled 3D modelu ze simulace. Jelikož reálná oteplovací charakteristika byla měřena po dobu 5-ti hodin, porovnané snímky ze simulace jsou použity taktéž z této doby a nikoliv z doby ustáleného stavu tzn. odečtené pro čas 18 000s. Z obrázku 7.2 je ale patrné že rozdíl maximální teploty z této doby a doby po ustálení je minimální. Po odečtu simulačních dat tak činí 2,5°C



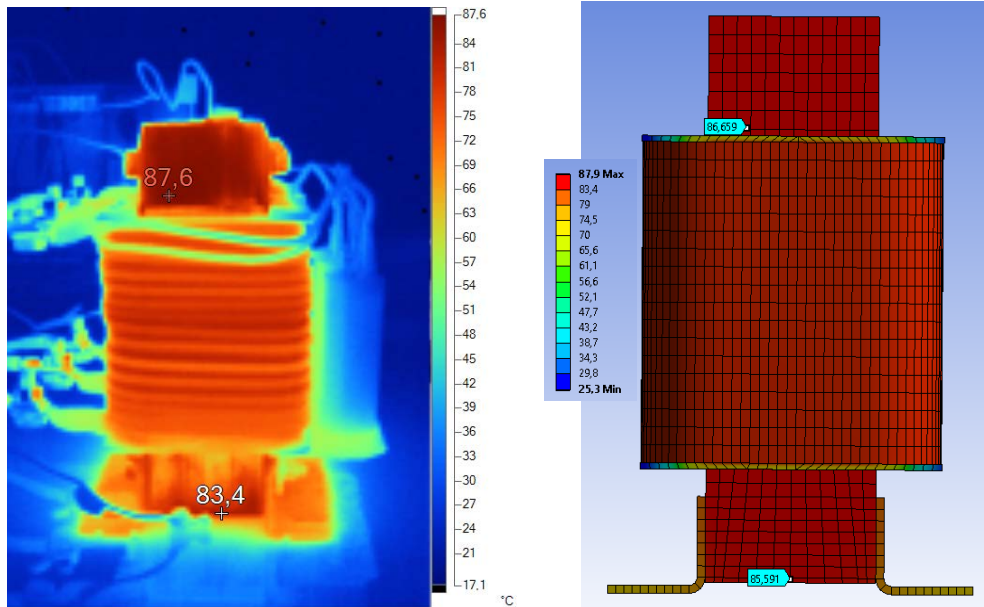
Obr. 7.4 Porovnání teplotních polí z termokamery a simulace

Na obrázku 7.4 jsou vyznačeny body pro orientační přehled v místech na povrchu stranového a prostředního vinutí. Dále je pak zaznamenána nejvyšší změřená teplota na aktuálním snímku na hodnotě 87,8°C. Stejně body lze také spatřit na pravé straně obrázku. Je vidět že se zde rozdíly pohybují běžně do 2,5°C vyjma krajního vinutí kde je rozdíl v teplotách až 6,9°C. Ze snímků je také možné vidět, že reálné rozložení teplotního pole na středním vinutí koresponduje se simulací.



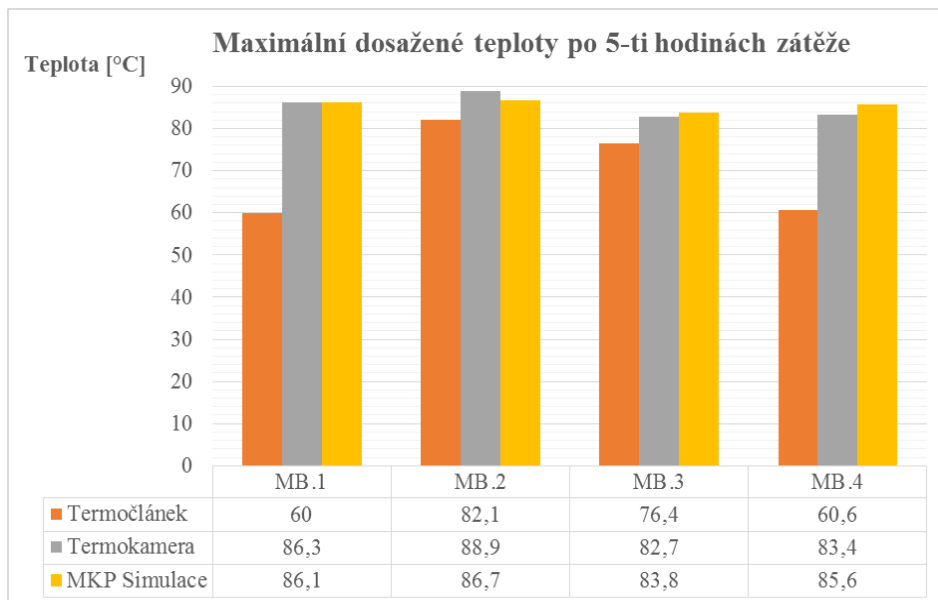
Obr. 7.5 Porovnání teplotních polí z termokamery a simulace – pohled shora

V místech na okrajích koster vinutí byla dle simulace určena nejnižší teplota po ustálení. Ověření lze nalézt na *obrázku 7.5* kde v těchto rozích byla změřena teplota na hodnotách 31,6°C a 33,5°C. Rozdíly tak oproti simulaci jsou maximálně do 1°C. Z hlediska rozložení teplot koster vinutí tak výpočetní model v těchto místech simulace odpovídá realitě. Na *obrázku 7.6* je ve spodní části vidět naměřená teplota jádra u povrchu desky. Oproti 85,6°C ze simulace je zde změřena teplota 83,4°C. Teplota v horní části ze strany jádra se liší poněkud méně a to o 1,1°C. Naměřeno zde bylo 87,6°C na rozdíl od 86,6°C ze simulace.



**Obr. 7.6** Porovnání teplotních polí z termokamery a simulace – pohled ze strany

V *tabulce 7.1* jsou uvedeny teploty z měřících bodů 1-4. Maximální dosažené teploty v těchto bodech jsou změřeny nebo vypočteny v čase 5-ti hodin provozu pod zátěží. Ze simulace jsou odečteny ve stejných místech pomocí virtuálních sond. V případě termokamerou sejmutého infračerveného vyzařování jsou odečteny teploty měřících míst na snímcích pomocí software pro analýzu a protokolování infračervených snímků.



**Tab. 7.1** Srovnání maximálních teplot v místech měřících bodů

## 8 Závěrečné shrnutí a výhled následné optimalizace

Při porovnání výše zmíněných metod se z hlediska dosažených maxim jako nejvíce pesimistická MKP simulace. Lze ale říci, že její výsledky se ve všech měřících bodech nejvíce blíží hodnotám změřených termokamerou. Výrazný rozdíl teplot změřených termočlánkem se vyskytuje v bodě 1 a 4, tedy na horní a dolní vodorovné straně povrchu jádra. Potenciální vysvětlení by se dalo nalézt ve způsobu uchycení termočlánku, jehož kontakt s povrchem jádra nemusel být ideální. Celkově se jako nejvíce optimistické jeví z hlediska dosažených teplot měření termočlánky. Tomu přispívá fakt, že termočlánek samotný má svou úroveň tepelné vodivosti. V místě kontaktu tak dochází k přestupu tepla z materiálu sinusového filtru do termočlánku. Je tak měřena nižší teplota, než je ve skutečnosti na povrchu sinusového filtru v blízkém okolí.

Při porovnávání snímků z termokamery a 3D modelu sinusového filtru je zřejmé, že v některých místech se teplotní pole ze simulace více odlišuje od reálného rozložení. Dochází k tomu v místě kontaktu desky a nosníku stahovací konstrukce, u vinutí poblíž upínacích ok pro napájení a také na horizontální ploše koster vinutí. V simulaci by bylo možno pro zpřesnění teplotního rozložení toto ovlivnit propracováním geometrie 3D modelu do větších detailů, např. přidáním žebrování koster vinutí, upínacích ok, přidání geometrie podstavné desky i držáku kondenzátorů.

Rozložení teplotního pole na všech vinutí odpovídá svým charakterem realitě, nicméně rozdíly teplot mezi středním a krajním vinutím jsou ve skutečnosti větší než spočítané simulací. To lze vysvětlit vlivem propracovanosti detailů vinutí v 3D modelu. Zde byl uvažován pro zjednodušení výpočtu hladký povrch. U reálného výrobku tlumivky sinusového filtru je v důsledku navinutí drátu povrch drážkovaný. Tento fakt má vliv na proudění při volné konvekci, kdy je měněn jeho charakter díky kolmému směřování proudu přes drážky vinutí. V závislosti na tom je tak měněn koeficient přestupu tepla a tím výsledná teplota povrchu. Zapracováním detailnější geometrie vinutí do 3D modelu tak vyústí v použití korelačních vztahů modifikovaných pro tvar konkrétní geometrie. Další vliv na rozdíly teplot v jednotlivých vinutích má rozložení ztrát ve vinutí. V 3D modelu jsou v rámci okrajových podmínek ztráty na každém vinutí stejné. Ve skutečnosti se ale mohou na každém vinutí do určité míry lišit. To by pak mělo za následek zvětšení rozdílu teplot mezi vinutími.

Výše zmíněné souvislosti tak ukazují nový potenciál, který lze využít ke zpřesnění vstupních parametrů pro matematický model simulace. Výhledově lze tak přidat více geometrických detailů do aktuálního modelu, aplikovat hodnoty změřených ztrát a tím tak docílit změny rozložení teplotního pole.

## Poděkování

Příspěvek vznikl za podpory projektu Studentská grantová soutěž SGSDFJP\_2016001. Vznik příspěvku podpořila firma SKYBERGTECH s.r.o. která zapůjčila tlumivku sinusového filtru a zároveň poskytla podporu při validačním měření.

## Literatura

- [1] NOŽIČKA, J. *Základy termomechaniky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02409-1.
- [2] HASAL, P., I. SCHREIBER a D. ŠNITA. *Chemické inženýrství I*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2007. ISBN 80-7080-589-7.
- [3] ŠESTÁK, J. a F. RIEGER. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. TA357.Š37 1993.
- [4] FLUKE. *fluke.com: Ti90, Ti95, Ti100, Ti105, Ti110, Ti125 TiR105, TiR110, TiR125 Performance Series Thermal Imagers* [online]. © 2012 [cit. 2016]. Dostupné z: <http://www.fluke.com/fluke/czcs/support/manuals/default.htm>