

**Univerzita Pardubice**  
**Dopravní fakulta Jana Pernera**  
**Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v**  
**dopravě**

# **ANALÝZA TEPELNÝCH POMĚRŮ V ODRUŠOVACÍCH KOMPONENTÁCH ELEKTRICKÝCH POHONŮ**

Ing. Jan Kořínek

Disertační práce  
**2018**

**Doktorand**

Ing. Jan Kořínek

**Studijní program**

P3710 / Technika a technologie v dopravě a spojích

**Studijní obor**

3706V005 / Dopravní prostředky a infrastruktura: Elektrotechnika

**Školitel**

prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.

**Školitel specialista**

—

**Školící pracoviště**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne: .....

.....  
Podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval především vedoucímu mé disertační práce prof. Ing. Jaroslavu Novákovi, CSc. za ochotu a vyjití vstříc při řešení jakéhokoli výzvy, které nastaly při realizaci této práce. Poděkování patří také prof. RNDr. Miladě Kozubkové, CSc. za vřele poskytnuté rady pro přípravu numerických simulací a doc. Ing. Janu Chyskému, CSc. za pomoc při realizaci validačních měření. Rád bych také poděkoval firmě Skybergtech s.r.o. která poskytla konzultační a technickou podporu v problematice odrušovacích prvků.

## **Anotace**

Tato disertační práce pojednává o souvislostech mezi výkonovými ztrátami odrušovacích prostředků, jejich vlivem na rozložení teplotního pole komponent odrušovacího prostředku pod zátěží a o verifikaci těchto výkonnostních a teplotních poměrů. Zahrnuje popis vytvoření třírozměrné numerické konečně objemové simulace tepelných poměrů odrušovacího prostředku na základě matematického popisu kondukce, konvekce a ztrát. Obsahuje výběr teoretických vztahů a závislostí souvisejících s problematikou práce. Následně je uvedena a popsána validační metodika měření teplotního pole pomocí termočlánků a termokamery. Je zde proveden rozbor výsledků validačního měření a numerické simulace se vzájemným porovnáním. Závěrem na základě získaných dat jsou pak nastíněny možnosti další optimalizace simulace tepelných poměrů odrušovacích prostředků.

## **Klíčová slova**

Ansys, numerické simulace, CFD, přenos tepla a hybnosti, termovize, kondukce, konvekce, volná konvekce, EMC, sinusový filtr, vinutí, elektromagnetismus, šířkově pulsní modulace

## **Title**

Analysis of Thermal Relations in Interference Suppression Components of Electric Drives

## **Annotation**

This dissertation is about relationship between power losses of the interference suppression devices, their influence to thermal field of interference suppression device under load and about verification of this power relations and thermal relations. It includes description of creation of the three-dimensional finite volume simulation of the interference suppression device thermal relations based on mathematical description of the conduction, convection and losses. Theoretical background related to thesis problematics is included. Subsequently is described validation methods of the temperature field measurement by thermocouples and thermovision. In addition, there is shown mutual evaluation of the validation measurement and finite volume simulation. Finally, there are outlined the options of the further optimisation of interference suppression device temperature field simulation.

## **Keywords**

Ansys, numerical simulations, CFD, heat and momentum transfer, thermovision conduction, convection, free convection, EMC, sinus filter, choke, electromagnetism, pulse width modulation

## Obsah:

<b>1. Úvod a účel práce.....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1 Uplatnění odrušovacích prostředků v dopravní technice .....	- 4 -
<b>2. Cíle disertační práce.....</b>	<b>- 6 -</b>
<b>3. Současný stav problematiky .....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>4. Problematika návrhu sinusového filtru a určení jeho ztrát .....</b>	<b>- 12 -</b>
4.1 Návrh sinusového filtru.....	- 12 -
4.2 Ztráty kondenzátorů .....	- 13 -
4.3 Ztráty tlumivky.....	- 14 -
- 15 -	
4.3.1 Ztráty v magnetickém obvodu .....	- 15 -
4.3.2 Ztráty ve vinutí .....	- 15 -
<b>5. Přehled teorie přenosu hybnosti, tepla a CFD.....</b>	<b>- 16 -</b>
5.1 Teorie přenosu hybnosti a tepla .....	- 16 -
5.1.1 Bilanční rovnice přenosu .....	- 16 -
5.1.2 Rovnice kontinuity.....	- 17 -
5.1.3 Navier – Stokesova rovnice .....	- 17 -
5.1.4 Energetická rovnice .....	- 18 -
5.1.5 Turbulence .....	- 19 -
5.2 Přenos tepla a jeho mechanizmy .....	- 20 -
5.2.1 Sdílení tepla vedením – Fourierův zákon .....	- 20 -
5.2.2 Fourier – Kirchoffova rovnice .....	- 21 -
5.2.3 Okrajové podmínky na stěně .....	- 22 -
5.2.4 Sdílení tepla konvekcí.....	- 24 -
5.2.5 Podobnostní kritéria.....	- 25 -
5.3 Počítačová dynamika tekutin (CFD).....	- 26 -
5.3.1 Řešení metodou konečných objemů (Finite Volume Method).....	- 26 -
5.4 Síť (Meshing) .....	- 28 -
5.4.1 Kategorizace sítí .....	- 29 -
5.4.2 Kvalita sítě .....	- 30 -
5.5 Modelování turbulence.....	- 31 -
5.6 Turbulentní model Realizable k-ε.....	- 32 -
5.7 Modelování proudění u stěny – Dvouvrstvý model (Enhanced Wall Treatment) .....	- 33 -
<b>6. Numerické simulace sinusového filtru.....</b>	<b>- 35 -</b>
6.1 Přehled simulovaných variant.....	- 35 -
6.2 Varianta A1 – zjednodušená geometrie v Ansys Transient Thermal.....	- 35 -
6.2.1 Geometrie a materiály.....	- 36 -
6.2.2 Síť (Meshing).....	- 38 -
6.2.3 Okrajové podmínky .....	- 39 -
6.2.4 Nastavení numerického řešení .....	- 41 -
6.3 Varianta A2 – zjednodušená geometrie v Ansys Fluent .....	- 41 -
6.3.1 Geometrie a materiály.....	- 42 -

6.3.2 Síť (Meshing).....	- 43 -
6.3.3 Okrajové podmínky a tepelné zdroje .....	- 45 -
6.3.4 Nastavení numerického řešení .....	- 45 -
<b>6.4 Varianta A3 – zjednodušená geometrie ve STAR-CCM+ .....</b>	<b>- 46 -</b>
6.4.1 Geometrie a materiály.....	- 46 -
6.4.2 Síť (Meshing).....	- 46 -
6.4.3 Okrajové podmínky a tepelné zdroje .....	- 48 -
6.4.4 Nastavení numerického řešení .....	- 48 -
<b>6.5 Varianta B1 – středně detailní geometrie v Ansys Fluent.....</b>	<b>- 48 -</b>
6.5.1 Geometrie a materiály.....	- 49 -
6.5.2 Síť (Meshing).....	- 50 -
6.5.3 Okrajové podmínky a tepelné zdroje .....	- 51 -
6.5.4 Nastavení numerického řešení .....	- 52 -
<b>6.6 Varianta C1 – detailní geometrie v Ansys Fluent .....</b>	<b>- 52 -</b>
6.6.1 Geometrie a materiály.....	- 52 -
6.6.2 Síť (Meshing).....	- 55 -
6.6.3 Okrajové podmínky a tepelné zdroje .....	- 56 -
6.6.4 Nastavení numerického řešení .....	- 56 -
<b>6.7 Varianta C2 – detailní geometrie v Ansys Fluent; aktualizované ztráty .....</b>	<b>- 56 -</b>
<b>6.8 Varianta D1 – detailní geometrie v Ansys Fluent – aktivní chlazení.....</b>	<b>- 56 -</b>
6.8.1 Geometrie a materiály.....	- 57 -
6.8.2 Síť (Meshing).....	- 58 -
6.8.3 Okrajové podmínky a tepelné zdroje .....	- 60 -
6.8.4 Nastavení numerického řešení .....	- 61 -
<b>7. Experimentální validace numerických analýz .....</b>	<b>- 63 -</b>
7.1 Validace v otevřeném prostředí .....	- 64 -
7.2 Validace v uzavřeném prostředí.....	- 66 -
<b>8. Vyhodnocení získaných dat .....</b>	<b>- 69 -</b>
8.1 Ohřev v otevřeném prostředí – přirozená konvekce .....	- 69 -
8.1.1 Vyhodnocení oteplovacích charakteristik a dosažených teplot .....	- 69 -
8.1.2 Vyhodnocení teplotního pole.....	- 73 -
8.2 Ohřev v uzavřeném prostředí s aktivním chlazením.....	- 78 -
8.2.1 Vyhodnocení dosažených teplot .....	- 78 -
8.2.2 Vyhodnocení teplotního pole.....	- 81 -
<b>9. Srovnání numerických simulací pro stanovení metodiky .....</b>	<b>- 85 -</b>
9.1 Přesnost výpočtu teplotního pole .....	- 85 -
9.2 Časová náročnost výpočtů.....	- 88 -
9.3 Hardwarové nároky .....	- 91 -
9.4 Zhodnocení implementace jednotlivých variant .....	- 91 -
9.4.1 Varianta A1 – zjednodušená geometrie v Ansys Transient Thermal .....	- 93 -
9.4.2 Varianta A2 – zjednodušená geometrie v Ansys Fluent.....	- 94 -
9.4.3 Varianta A3 – zjednodušená geometrie ve STAR-CCM+.....	- 94 -
9.4.4 Varianta B1 – středně detailní geometrie v Ansys Fluent .....	- 95 -
9.4.5 Varianta C1 – detailní geometrie v Ansys Fluent.....	- 95 -
9.4.6 Varianta C2 – detailní geometrie v Ansys Fluent; aktualizované ztráty .....	- 96 -
<b>10. Směry dalšího vývoje .....</b>	<b>- 97 -</b>

<b>11. Závěr .....</b>	<b>- 98 -</b>
<b>Summary .....</b>	<b>- 100 -</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>- 102 -</b>
<b>Vlastní publikace .....</b>	<b>- 105 -</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>- 106 -</b>



## Seznam obrázků

<b>Obr. 1.1</b>	a) Sinusový filtr pro jmenovitý proud 1000A – pohled na systém připojovacích ok [6]	
	b) Sinusový filtr pro jmenovitý proud 1000A – pohled na kondenzátory [6] ....	- 3 -
<b>Obr. 1.3</b>	Sinusový filtr pro jmenovitý proud 100A [6] .....	- 4 -
<b>Obr. 1.2</b>	Sinusový filtr pro jmenovitý proud 130A [6] .....	- 4 -
<b>Obr. 2.1</b>	Schematické znázornění cílů disertační práce .....	- 6 -
<b>Obr. 2.1</b>	Ukázka charakteristiky koeficientu oteplení $dT/dP$ v závislosti na rychlosti obtékání [6] .....	- 9 -
<b>Obr. 4.1</b>	Průběhy proudů a sdružených napětí [6] .....	- 14 -
<b>Obr. 4.2</b>	Harmonická analýza proudů z průběhu $I(C2)$ [6] .....	- 14 -
<b>Obr. 5.1</b>	Schematické znázornění vedení tepla vícevrstvou válcovou plochou [33] .....	- 21 -
<b>Obr. 5.2</b>	Okrajová podmínka prvního druhu .....	- 22 -
<b>Obr. 5.3</b>	Okrajová podmínka druhého druhu .....	- 22 -
<b>Obr. 5.4</b>	Okrajová podmínka třetího druhu .....	- 23 -
<b>Obr. 5.5</b>	Okrajová podmínka spojitosti teplotního rozložení .....	- 23 -
<b>Obr. 5.6</b>	Schematické znázornění sdílení tepla prouděním [33] .....	- 24 -
<b>Obr. 5.10</b>	Schéma řešení numerického výpočtu .....	- 27 -
<b>Obr. 5.11</b>	Příklady základních prvků pro tvorbu sítě z leva – jehlan (pyramidový prvek), čtyřstěn, pětistěn (prizmatický prvek), šestistěn (kvádr) .....	- 28 -
<b>Obr. 5.12</b>	Příklad sítě tělesa tvořené ze základních prvků [36] .....	- 29 -
<b>Obr. 5.13</b>	Strukturovaná síť (vlevo), nestruturovaná síť (uprostřed), hybridní síť (vpravo) .....	- 30 -
<b>Obr. 5.14</b>	Rovnostranný trojúhelník (vlevo), vysoce zkosený trojúhelník (vpravo) .....	- 30 -
<b>Obr. 5.15</b>	Rozložení počtu buněk a jejich hodnot míry zkosení ve 3D prostorové síti. ...	- 31 -
<b>Obr. 5.16</b>	Rozdělení oblasti v blízkosti stěny. [17] .....	- 33 -
<b>Obr. 6.1</b>	Zjednodušený CAD model tlumivky sinusového filtru .....	- 37 -
<b>Obr. 6.2</b>	Vlevo - síť modelu tlumivky sinusového filtru; vpravo – podélný řez sítí .....	- 38 -
<b>Obr. 6.3</b>	Statistika míry zkosení elementů sítě .....	- 39 -
<b>Obr. 6.4</b>	Ukázka plochy geometrického regionu .....	- 40 -
<b>Obr. 6.5</b>	Schéma výpočtu součinitele přestupu tepla .....	- 40 -
<b>Obr. 6.6</b>	CAD model symetrický podle roviny ZY .....	- 42 -
<b>Obr. 6.7</b>	Vlevo – řez sítí z Ansys Meshing; vpravo řez sítí po konverzi v Ansys Fluent .....	- 44 -
<b>Obr. 6.8</b>	Statistika míry zkosení elementů sítě .....	- 44 -
<b>Obr. 6.9</b>	Vlevo – OP pressure outlet; uprostřed – OP wall; vpravo – OP symetrie .....	- 45 -
<b>Obr. 6.10</b>	Vlevo – polyhedrální síť tlumivky sinusového filtru; vpravo - řez sítí s přilehlým lokálním zjemněním .....	- 47 -
<b>Obr. 6.11</b>	Vlevo – středně detailní CAD model sinusového filtru – pohled I; .....	- 50 -
	vpravo – středně detailní CAD model sinusového filtru – pohled II .....	- 50 -
<b>Obr. 6.12</b>	Vlevo – polyhedrální síť sinusového filtru; vpravo - příčný řez sítí .....	- 51 -

<b>Obr. 6.13</b>	Statistika míry zkosení elementů sítě .....	- 51 -
<b>Obr. 6.14</b>	Řez vzduchovým prostorem mezi kostrou vinutí a vinutím.....	- 53 -
<b>Obr. 6.15</b>	Vlevo – detailní CAD model sinusového filtru – pohled I;.....	- 54 -
	vpravo – detailní CAD model sinusového filtru – pohled II .....	- 54 -
<b>Obr. 6.16</b>	Vlevo – polyhedrální síť sinusového filtru; vpravo - příčný řez sítě .....	- 55 -
<b>Obr. 6.17</b>	Statistika míry zkosení elementů sítě .....	- 55 -
<b>Obr. 6.18</b>	Vlevo – CAD model rozváděčového prostoru včetně sinusového filtru;	
	vpravo - detail pozice sinusového filtru.....	- 57 -
<b>Obr. 6.19</b>	Vlevo – adaptace sítě podle gradientu rychlosti;	
	vpravo - adaptace sítě podle gradientu teploty .....	- 59 -
<b>Obr. 6.20</b>	Řez adaptovanou sítí výpočetní domény rozváděčové skříně .....	- 59 -
<b>Obr. 6.21</b>	Statistika míry zkosení elementů sítě .....	- 60 -
<b>Obr. 6.22</b>	Vlevo – OP pressure outlet; uprostřed – OP velocity inlet;	
	vpravo – OP symetrie .....	- 60 -
<b>Obr. 7.2</b>	Panel pro měření oteplovacích charakteristik [1] .....	- 63 -
<b>Obr. 7.1</b>	Autokalibrační ústředna National Instruments PXI [1].....	- 63 -
<b>Obr. 7.3</b>	Schématické znázornění zapojení sinusového filtru.....	- 64 -
<b>Obr. 7.4</b>	Vlevo – naměřený průběh sdruženého napětí PWM na střídači;	
	vpravo - sdružené napětí za sinusovým filtrem .....	- 64 -
<b>Obr. 7.5</b>	Sinusový filtr SKY3FSM16-2kHz s nainstalovanými termočládky [34].....	- 65 -
<b>Obr. 7.6</b>	Ukázka zobrazení rozložení teplotního pole [34].....	- 66 -
<b>Obr. 7.7</b>	Vlevo – měřící rozváděčová skříň (otevřený instalační prostor);	
	vpravo – detail instalačního prostoru se zapojením filtru.....	- 66 -
<b>Obr. 7.8</b>	Sinusový filtr SKY3FSM16-2kHz s nainstalovanými termočládky	
	uvnitř rozváděčové skříně.....	- 68 -
<b>Obr. 8.1</b>	Oteplovací charakteristiky sinusového filtru SKY3FSM16-2kHz	
	v měřících bodech 1-4 .....	- 69 -
<b>Obr. 8.2</b>	Porovnání dosažených teplot v měřících bodech 1-4 – 5 hodin zátěže .....	- 70 -
<b>Obr. 8.3</b>	Porovnání oteplovacích charakteristik měřícího bodu 2 – 5 hodin zátěže .....	- 71 -
<b>Obr. 8.4</b>	Porovnání dosažených teplot v měřících bodech 1-4 – ustálený stav .....	- 72 -
<b>Obr. 8.5</b>	Porovnání oteplovacích charakteristik měřícího bodu 2 – ustálený stav.....	- 73 -
<b>Obr. 8.6</b>	Porovnání teplotních polí z termokamery a varianty A1 v čase 5 hodin.....	- 75 -
<b>Obr. 8.7</b>	Porovnání teplotních polí varianty A2 a A3 v čase 5 hodin.....	- 75 -
<b>Obr. 8.8</b>	Porovnání teplotních polí varianty B1 a C1 v čase 5 hodin .....	- 75 -
<b>Obr. 8.9</b>	Teplotní pole varianty C2 v čase 5 hodin .....	- 76 -
<b>Obr. 8.10</b>	Příčný řez středem tlumivky sinusového filtru varianty A1 a A2	
	v čase 5 hodin .....	- 77 -
<b>Obr. 8.11</b>	Příčný řez středem tlumivky sinusového filtru a sinusového filtru	
	varianty A3 a B1 v čase 5 hodin.....	- 77 -
<b>Obr. 8.12</b>	Příčný řez středem sinusového filtru varianty C1 a C2 v čase 5 hodin .....	- 78 -
<b>Obr. 8.13</b>	Porovnání dosažených teplot v měřících bodech 0-8 při vypnutém	
	aktivním chlazení – ustálený stav .....	- 79 -
<b>Obr. 8.14</b>	Porovnání dosažených teplot v měřících bodech 0-8 při rychlosti	
	proudu vzduchu $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav.....	- 79 -

<b>Obr. 8.15</b>	Termokamera - porovnání dosažených teplot jednotlivých režimů – ustálený stav.....	- 80 -
<b>Obr. 8.16</b>	Streamlines proudění vzduchu z ventilátoru – režim $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .....	- 81 -
<b>Obr. 8.17</b>	Porovnání teplotních polí při vypnutém aktivním chlazení – ustálený stav .....	- 82 -
<b>Obr. 8.18</b>	Porovnání teplotních polí při rychlosti proudu vzduchu $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav .....	- 82 -
<b>Obr. 8.19</b>	Porovnání teplotních polí při rychlosti proudu vzduchu $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav.....	- 82 -
<b>Obr. 8.20</b>	Porovnání teplotních polí při rychlosti proudu vzduchu $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav.....	- 83 -
<b>Obr. 8.21</b>	Porovnání teplotních polí při rychlosti proudu vzduchu $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav.....	- 83 -
<b>Obr. 8.22</b>	Příčný řez středem sinusového filtru při rychlosti proudu vzduchu $0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav.....	- 84 -
<b>Obr. 8.23</b>	Příčný řez středem sinusového filtru při rychlosti proudu vzduchu 4 a $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav.....	- 84 -
<b>Obr. 8.24</b>	Příčný řez středem sinusového filtru při rychlosti proudu vzduchu 10 a $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav.....	- 84 -
<b>Obr. 9.1</b>	Porovnání odchylek teplot v měřících bodech 1-4 – 5 hodin zátěže .....	- 86 -
<b>Obr. 9.2</b>	Porovnání odchylek teplot v měřících bodech 1-4 – ustálený stav .....	- 86 -
<b>Obr. 9.3</b>	Porovnání odchylek teplot v měřících bodech 1-8 – ustálený stav .....	- 88 -
<b>Obr. 9.4</b>	Doby výpočtu a síťování vztažené k variantě A2.....	- 90 -
<b>Obr. 9.5</b>	Počty elementů sítě jednotlivých geometrií vztažené k variantě A2.....	- 90 -
<b>Obr. 9.6</b>	Využití operační paměti vztažené k variantě A2.....	- 91 -
<b>Obr. 9.7</b>	Hodnocení posuzovaných hledisek při implementaci simulace ohřevu sinusového filtru v otevřeném prostředí .....	- 92 -

## Seznam tabulek:

<b>Tab. 4.1</b>	Zadání třífázového sinusového filtru SKY3FSM16-2kHz .....	- 12 -
<b>Tab. 4.2</b>	Vyčíslení ztrát třífázového sinusového filtru SKY3FSM16-2kHz .....	- 15 -
<b>Tab. 6.1</b>	Přehled simulovaných variant .....	- 35 -
<b>Tab. 6.2</b>	Materiálové vlastnosti .....	- 37 -
<b>Tab. 6.3</b>	Výběr dalších parametrů nastavení sítě .....	- 38 -
<b>Tab. 6.4</b>	Parametry vzduchu .....	- 43 -
<b>Tab. 6.5</b>	Výběr parametrů nastavení sítě .....	- 43 -
<b>Tab. 6.6</b>	Přehled relaxačních faktorů .....	- 45 -
<b>Tab. 6.7</b>	Výběr parametrů nastavení sítě .....	- 47 -
<b>Tab. 6.8</b>	Materiálové vlastnosti .....	- 50 -
<b>Tab. 6.9</b>	Materiálové vlastnosti .....	- 54 -
<b>Tab. 6.10</b>	Materiálové vlastnosti .....	- 57 -
<b>Tab. 6.11</b>	Výběr parametrů nastavení sítě .....	- 58 -
<b>Tab. 6.12</b>	Přehled relaxačních faktorů a interpolačních schémat .....	- 61 -
<b>Tab. 7.1</b>	Štítkové hodnoty elektromotoru .....	- 63 -
<b>Tab. 7.2</b>	Štítkové hodnoty elektromotoru .....	- 67 -
<b>Tab. 9.1</b>	Kritéria konvergence .....	- 88 -

## Seznam příloh:

<b>Příloha A</b>	Specifikace ventilátoru EBM-PAPST D3G146-LV13-01 .....	- 106 -
<b>Příloha B</b>	Porovnání teplotních polí v otevřeném prostředí – pohled ze shora .....	- 108 -
<b>Příloha C</b>	Porovnání teplotních polí v otevřeném prostředí – pohled ze strany .....	- 110 -
<b>Příloha D</b>	Porovnání dosažených teplot v měřicích bodech 0-8 při rychlosti proudu vzduchu $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav .....	- 112 -
<b>Příloha E</b>	Porovnání dosažených teplot v měřicích bodech 0-8 při rychlosti proudu vzduchu $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav .....	- 112 -
<b>Příloha F</b>	Porovnání dosažených teplot v měřicích bodech 0-8 při rychlosti proudu vzduchu $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ – ustálený stav .....	- 113 -
<b>Příloha G</b>	Termočlánky - porovnání dosažených teplot režimů – ustálený stav .....	- 113 -
<b>Příloha H</b>	Simulace - porovnání dosažených teplot režimů – ustálený stav .....	- 113 -
<b>Příloha I</b>	Porovnání teplotních polí v uzavřeném prostředí s aktivním chlazením - – zadní pohled .....	- 114 -

## Seznam použitých symbolů a značek

A	[m <sup>2</sup> ]	Plocha
a	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]	Součinitel teplotní vodivosti
c <sub>p</sub>	[J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
C	[–]	Konstanta
C <sub>μ</sub>	[–]	Proměnná pro zajištění kladných normálových napětí
d	[m]	Průměr charakteristického tvaru
F <sub>n</sub>	[Hz]	Nosná frekvence
$\vec{g}$	[m · s <sup>-2</sup> ]	Tíhové zrychlení
Gr	[–]	Grashofovo číslo
h	[J · kg <sup>-1</sup> ]	Měrná entalpie
HSG <sub>1</sub>	[°K]	Počáteční gradient teploty vinutí
HSG <sub>2</sub>	[°K]	Přírůstek maximální teploty vinutí
I <sub>n</sub>	[A]	Jmenovitý proud
I <sub>p</sub>	[A]	Proudové přetížení
I(C2)	[A]	Celkový proud tekoucí kondenzátorem
I(L2)	[A]	Celkový proud tekoucí tlumivkou
I(Rshunta1)	[A]	Proud tekoucí zátěží
i <sub>1</sub>	[A]	Elektrický proud za počátečního zatížení
i <sub>2</sub>	[A]	Elektrický proud za maximálního zatížení
k	[J · kg <sup>-1</sup> ]	Turbulentní kinetická energie
k <sub>dT/dP</sub>	[–]	Koeficient oteplení dT/dP
L	[m]	Charakteristický rozměr
l	[m]	Charakteristický rozměr obtékaného tělesa
l <sub>μ</sub> /l <sub>ε</sub>	[m]	Délková měřítka
n	[–]	Poměr celkových ztrát transformátoru
$\vec{n}$	[–]	Normálová vzdálenost středu buňky od stěny
Nu	[–]	Nusseltovo číslo
p	[Pa]	Tlak
P		Obecná fyzikální vlastnost
$\dot{p}^{(g)}$		Rychlost vzniku obecné fyzikální vlastnosti
P <sub>cu</sub>	[W]	Ztráty ve vinutí
P <sub>fe</sub>	[W]	Ztráty na jádře
Pr	[–]	Prandtlovo číslo
$\rho$		Hustota toku obecné fyzikální veličiny
$\vec{q}$	[W · m <sup>-2</sup> ]	Hustota tepelného toku
$\dot{Q}$	[W]	Tepelný tok
$\dot{Q}^{(g)}$	[W · m <sup>-3</sup> ]	Rychlost vzniku tepla v objemové jednotce
Re	[–]	Reynoldsovo číslo
Sf <sub>n</sub>	[Hz]	Minimální spínací frekvence šířkově pulzní modulační střídače
t	[s]	Čas
T	[°K]	Termodynamická teplota
T <sub>b</sub> /T <sub>∞</sub>	[°K]	Termodynamická teplota prostředí tekutiny
T <sub>o</sub>	[°K]	Operační teplota
T <sub>w</sub> /T <sub>s</sub>	[°K]	Termodynamická teplota stěny tělesa
THD <sub>u</sub>	[%]	Harmonické zkreslení napětí

$TL_1$	[W]	Celkové ztráty za známého zatížení
$TL_2$	[W]	Celkové ztráty za maximálního zatížení
$TO_1$	[°K]	Znamá počáteční teplota oleje
$TO_2$	[°K]	Celková teplota oleje
$\vec{u}$	[m · s <sup>-1</sup> ]	Rychlost proudění
$u_e$	[J · kg <sup>-1</sup> ]	Měrná vnitřní energie
$\Delta u$	[%]	Fázový úbytek napětí filtru
$U_n$	[Vac]	Napětí na kondenzátorech
$v$	[m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]	Měrný objem
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Kontrolní objem
$V(V3, W)$	[Vac]	Sdružené napětí na kondenzátorech (na zátěži)
$V(V2, W3)$	[Vac]	Sdružené napětí PWM mezi střídačem a sinusovým filtrem
$V_n$	[V]	Napětí jednotlivých harmonických
$y$	[m]	Vzdálenost od stěny ve směru normály
$y^+$	[-]	Bezrozměrná veličina při odvozování stěnových funkcí
$\alpha$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	Součinitel přestupu tepla
$\gamma$	[K <sup>-1</sup> ]	Součinitel objemové roztažnosti
$\vec{\delta}$	[Pa]	Normálové napětí
$\vec{\Delta}$	[s <sup>-1</sup> ]	Rychlost deformace
$\varepsilon$	[J · kg <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> ]	Rychlost turbulentní disipace
$\lambda$	[W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost
$\lambda_m$	[W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost mědi
$\lambda_{vzd}$	[W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost vzduchu
$\mu$	[Pa · s]	Dynamická viskozita
$\mu^{(t)}$	[Pa · s]	Turbulentní viskozita
$\nu$	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]	Kinematická viskozita tekutiny
$\pi$	[-]	Ludolfovo číslo
$\rho$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	Hustota
$\rho_0$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	Konstantní hustota
$\vec{\tau}$	[Pa]	Dynamické napětí
$\phi$	[-]	Objemový zlomek
$\nabla$	[m <sup>-1</sup> ]	Hamiltonův operátor

### Symbole nad písmeny:

$\rightarrow$	Vektor
$\vec{\rightarrow}$	Tenzor
$\bar{\quad}$	Průměrná hodnota podle prostorových souřadnic
$\sim$	Střední časová hodnota

### Indexy:

$*$ , $+$	Bezrozměrné veličiny
$(t)$	Turbulentní
$'$	Fluktuální složka
$i, j, k$	Kartézské složky

# 1. Úvod a účel práce

Tato práce se zabývá numerickými simulacemi teplotních polí elektrických a magnetických obvodů odrušovacích prvků, které se používají v elektronických výkonových měničích, ve velké míře pak ve frekvenčně řízených pohonech.

S rozvojem techniky výkonových polovodičových měničů se uplatňuje stále větší množství zařízení v elektrotechnických systémech, která pracují se spínacími tranzistory a se šířkově pulsní modulací (PWM). Přestože šířkově pulsní modulace ve své podstatě významně ohraničuje harmonické spektrum proudů a napětí, jsou při ní průběhy napětí tvořeny sledem obdélníkových pulsů s velmi strmými hranami. [1]

Během provozu měničů s výkonovými spínacími tranzistory se na vstupní i výstupní straně zařízení objevují negativně se projevující vlivy. Řadí se mezi ně například rušení okolních elektronických zařízení v galvanické, induktivní, kapacitní a radiové formě. Zrod vlnových jevů na vedení spojených se vznikem nebezpečných přepětí, deformací průběhů napětí sítě a zhoršení účinnosti a činitele výkonu (opravdového účinnosti) je značně pravděpodobný v případě aplikace vedení s délkou větší než přibližně 10m. Vyskytnout se mohou také akustické vlivy, přídatné ztráty, a další vlivy, související často s aktuální aplikací. [1]

Neustále rostoucí tendence využívání zařízení se spínacími tranzistory a narůstání výkonu klade značnější požadavky na eliminaci rušivých vlivů těchto zařízení. Odrušení pomocí pasivních prvků se jeví jako nejjednodušší a přitom účinné. Do kategorie pasivních prvků spadají tři skupiny odrušovacích prostředků: tlumivky, filtry  $du/dt$  a sinusové filtry. Nejjednodušším odrušovacím prostředkem jsou sériově řazené tlumivky, které představují zvýšenou impedanci pro vyšší harmonické složky proudu. Zejména v průbězích proudu mají pozitivní vliv na snížení obsahu harmonických složek. Filtry  $du/dt$  jsou tvořeny LC články. Jejich impedance není na takové úrovni, zásluhou které by byly zcela eliminovány harmonické složky napětí a proudu, zamezují ale vzniku přepětí díky výraznému omezení strmosti nárůstu a poklesu napětí. [1]

Sinusové filtry jsou osvědčeným pasivním prvkem pro odstínění vlivu zařízení pracujících se spínacími tranzistory. Ve stále větším počtu případů si požadavky na slučitelnost velkého počtu zařízení se spínacími tranzistory vynucují jejich použití. V rámci odrušování na síťové straně zařízení se sinusové filtry používají například ve spojení s elektrickými rekuperačními pohony, které jsou vybaveny vstupním pulsním usměrňovačem, nebo ve spojení se síťovými střídači fotovoltaických zdrojů nebo na síťové straně nabíječek pro elektromobily. Použití

sinusových filtrů na výstupní straně je běžné v elektrických frekvenčně řízených pohonech, kde v případě použití dlouhého přívodního kabelu k motoru se filtr připojuje na výstup frekvenčního měniče. [1]

Sinusové filtry se navrhují pro široký rozsah proudů v rozmezí od jednotek A do jednotek kA. Aplikací sinusového filtru je možno z napětí formovaného šířkově pulsní modulací vytvořit téměř čistě sinusový průběh. Odrušovací účinky sinusových filtrů jsou tak velmi významné. Použití sinusových filtrů však s sebou přináší i skutečnosti, které se mohou v určitých situacích jevit negativně. Mezi ně nejčastěji patří: nezanedbatelné rozměry, nezanedbatelná hmotnost, úbytek napětí na filtru až 10% a rovněž vznik ztrátového výkonu. [1]

Ztrátový výkon sinusového filtru je dán především ztrátami v železném magnetickém obvodu tlumivek. Nejvýraznější podíl na těchto ztrátách mají složky frekvencí odvozené od spínací frekvence šířkově pulsní modulace. Tyto ztráty mohou nabývat řádově velikosti až stovek W u filtrů, které jsou dimenzovány pro proudy až stovek A. Tímto ztrátovým výkonem je ovlivněna celková účinnost zařízení, ale zejména je ho nutno uvažovat v celkové tepelné bilanci zařízení. V návaznosti na to tak aktivity návrhu koncepce odvodu ztrátového tepla nabývají na důležitosti. [1]

Na optimalizaci odrušovacích prostředků 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 odrušovacím prostředkem a jeho komponentami. V důsledku činnosti dochází k vývinu ztrátového tepla a tím díky energetické přeměně ke zvýšení 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. [2]

Za pomoci simulačních analýz řešených převážně metodou konečných objemů validovaných s experimenty je tak možné si udělat představu o sdílení tepla v konstrukcích odrušovacích prostředků s ohledem na charakteristiky proudění tekutiny v jejich okolí. Metoda konečných objemů 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 objemů. Se zaměřením na různé koncepce lze tak tyto analýzy následně využít jako počáteční bod pro další optimalizaci.

Vlivem činnosti sinusových filtrů dochází ke generování ztrátového tepla. Aby nedošlo k překročení maximální provozní teploty jednotlivých dílů, ze kterých se filtr skládá, je nutné identifikovat lokální maximální teploty na jednotlivých místech produktu. Tyto informace



může poskytnout numerická simulace teplotního pole napříč odrušovacím prostředkem. Nachází se zde tak prostor pro další optimalizaci návrhu konstrukce odrušovacích prostředků a souvisejících komponent. Na obrázku 1.1-1.3 lze spatřit příklady konstrukce těchto zařízení poskytnuté firmou SKYBERGTECH s.r.o.

Účelem této práce je vytvoření metodiky vyšetřování tepelných poměrů v jednotlivých částech odrušovacích prostředků numerickými metodami s vazbou na tepelný návrh těchto prostředků dimenzovaných pro konkrétní aplikaci. V rámci tepelné analýzy a návrhu jsou zde zahrnuty návrhové provozní parametry a zejména vliv okolního prostředí na odvod tepla. Jsou tak simulovány podmínky pro určení 3D teplotního pole na povrchu i vně komponent odrušovacích prvků odpovídající reálné konfiguraci pro průmyslové využití. Numerické modely jsou průběžně ověřovány experimentálně na skutečných výrobcích a porovnávány s reálným měřením.



**Obr. 1.1** a) Sinusový filtr pro jmenovitý proud 1000A – pohled na systém připojovacích ok [6]  
b) Sinusový filtr pro jmenovitý proud 1000A – pohled na kondenzátory [6]



**Obr. 1.2** Sinusový filtr pro jmenovitý proud 130A [6]



**Obr. 1.3** Sinusový filtr pro jmenovitý proud 100A [6]

Odrušovacím prostředkem pro experimentální ověřování je sinusový filtr zapůjčený firmou SKYBERGTECH s.r.o. Tato firma působí stabilně na českém trhu již řadu let a je jedním z předních výrobců odrušovacích zařízení. Pro účely této práce poskytuje konzultační a technickou podporu z hlediska interakce sinusového filtru a tepelných vlastností komponent s vazbou na jejich konstrukci.

## 1.1 Uplatnění odrušovacích prostředků v dopravní technice

Dopravní technika je oblastí s vysokou mírou uplatnění výkonových polovodičových měničů. Výkonové měniče se používají jako obvody pro úpravu parametrů napájecí elektrické energie prakticky ve všech typech dopravy a to jak v mobilních, tak i ve stacionárních aplikacích. Zásadní význam má použití výkonových polovodičových měničů v dopravních prostředcích, kde je elektrická energie použita pro trakční pohon. Jedná se tradičně o drážní vozidla, v současnosti se předmětná oblast výrazně rozšiřuje o prostředky pro silniční dopravu v souvislosti s nástupem silniční elektromobility. V dopravní technice pracují ve vzájemné součinnosti výkonová, řídicí, diagnostická a komunikační zařízení a míra rizik spojených s podceněním problémů elektromagnetické kompatibility je vysoká. Proto zde má využití odrušovacích prostředků výkonových měničů zásadní význam a problematika elektromagnetické kompatibility a odrušování je implementována v příslušných normách. Pro

oblast elektromagnetické kompatibility výkonových měničů v drážních zařízeních je základním legislativním dokumentem, používaným i při schvalování vozidel, norma ČSN EN 50121, která stanovuje zejména limity odolnosti zařízení vůči externím rušivým vlivům a emisní limity rušení a dále metody měření emisí a odolnosti zařízení. Pro oblast elektromagnetické kompatibility v silničních vozidlech je základním dokumentem, používaným i při homologaci vozidel, předpis EHK 010 TUV – SÚD.

S prostředky pro odrušení nežádoucích vlivů výkonových elektronických měničů se lze v dopravní technice setkat například v těchto aplikacích:

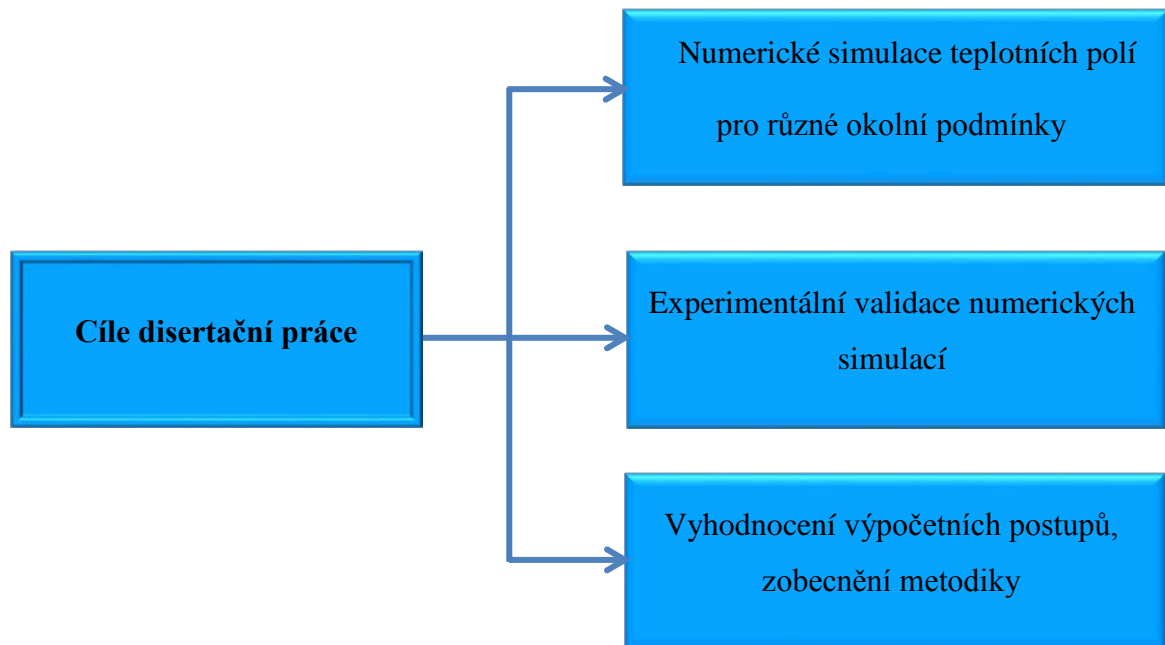
- měniče pro napájecí zdroje pro palubní sítě dopravních prostředků
- palubní nabíječe pomocných akumulátorů
- vstupní odrušovací filtry trakčních měničů
- měniče pro napájení pomocných pohonů v dopravních prostředcích

Se sinusovými filtry, kterým je především věnována tato práce, se lze v dopravní technice setkat zejména v těchto aplikacích:

- odrušení výstupů měničů pro některé pomocné pohony
- výstupní odrušení měničů pro napájení střídavých palubních sítí
- výstupní odrušení zdrojů zálohového napájení v dopravních systémech
- výstupní odrušení trakčních měničů s extrémně rychlými spínacími prvky (zejména SiC)
- odrušení vstupních obvodů síťových nabíječů akumulátorů pro elektromobilitu

Vzhledem ke stále vyššímu uplatnění výkonových měničů v dopravní technice, vzhledem k používání spínacích prvků se zlepšujícími se parametry a krátkými spínacími časy a vzhledem k rostoucím požadavkům na kvalitu odrušení z hlediska legislativy je evidentní, že budou narůstat nároky na odrušovací prvky a v návaznosti na to nároky na efektivitu jejich návrhu, konstrukce a výroby v kontextu se specifiky konkrétních dopravních systémů.

## 2. Cíle disertační práce



Obr. 2.1 Schematické znázornění cílů disertační práce

Hlavní cíle disertační práce jsou následující:

- **Tvorba numerických simulačních modelů teplotních polí.** V první části se práce bude zaměřovat na vytváření numerických simulací teplotních polí odrušovacích prostředků pro různá okolní prostředí. Jedná se zejména o zjištění vlivu charakteru proudění obklopujícího odrušovací prostředek. Přestup tepla do okolí se dramaticky změní v případě, že se jedná o přirozený přestup oproti situaci vynuceného proudění, například při aktivním chlazení komponent. To má dopad na výsledné rozložení teplotního pole na povrchu i uvnitř komponent. Rovněž hraje roli umístění odrušovacího prostředku, ať už ve volném prostředí nebo pro častější případ v různých druzích zástaveb a rozváděčů.
- **Validace a ověřování výpočetních modelů.** Průběžně s aktivitou z první části je nutná validace a ověřování výpočetních modelů na reálných výrobcích. Na základě měření povrchových teplot a v rámci možností i měření teplot uvnitř komponent odrušovacích prvků je ověřováno simulované teplotní rozložení. Podněty získané z experimentálních měření jsou využity pro zpřesnění výpočtu teplotního pole až na požadovanou úroveň.

Experimentální validace tvoří podstatnou část při procesu tvoření numerických simulací, je tak definována jako jeden z cílů této práce.

- **Zobecnění výpočetních postupů a stanovení metodiky tepelné analýzy odrušovacích prvků s vazbou na jejich konstrukci.** Poslední část se zabývá vyhodnocováním simulačních a experimentálních dat. Pro simulace je zamýšleno použít výpočetní software od společnosti Ansys a Siemens. Tento software nabízí možnost realizovat požadované výpočty ve více svých modulech. V rámci vyhodnocení a utvoření metodiky je tak možné porovnat vhodnost použití modulů pro konkrétní simulaci. Na základě získaných dat o teplotních polích je cílem vytvořit soubor doporučení a postupů aplikovatelných při ověřování tepelných vlastností komponent odrušovacích prvků s vazbou na jejich konstrukci.

### 3. Současný stav problematiky

Výkonné softwarové prostředky využívající algoritmy numerické analýzy jsou významným nástrojem pro návrh magnetických a elektrických obvodů elektromagnetických komponent v elektrotechnickém průmyslu. Tyto prostředky se uplatňují jak při elektromagnetických, tak při tepelných výpočtech například, elektromotorů, transformátorů nebo cívek.

Speciální skupinu komponent tvoří odrušovací prostředky, kde je třeba zohlednit významné harmonické zkreslení napětí i proudů. Nekonstantní a nesinusové průběhy napětí a proudů odrušovacích členů představují komplikaci jak po stránce návrhu těchto členů, tak po stránce výpočtu jejich zatížení, i po stránce výkonových a tepelných poměrů zjišťovaných experimentálně. Poznatky vztahující se k analýze ztrátových výkonů a tepelných polí jsou nejčastěji součástí know-how firem, které se zabývají výzkumem, vývojem a výrobou těchto produktů. Ucelená řešení této problematiky je tedy vzhledem k firemní ochraně prakticky nedostupná, z provedení odrušovacích prvků jednotlivých výrobců není ani zřejmé, na kolik byly při jejich vývoji využity výpočtové a numerické metody, a na kolik empirické.

I přes toto omezení se podařilo zjistit jisté informace, které souvisí s aktuálním děním v této problematice. Například lze získat materiál [3] od firmy CST, která vyvíjí simulační software v oblasti elektromagnetismu. V něm jsou prezentovány možnosti daného softwaru na numerickém výpočtu 3D teplotního pole výkonové tlumivky na základě kalkulace ztrát ve vinutí. Vliv okolí je následně určen celoplošně jedinou konstantní hodnotou součinitele přestupu tepla.

Autoři Elmoudi a Lehtonen [4] se zase zabývají vytvořením tepelného modelu pro predikci nejvyšší teploty olejem chlazeného transformátoru. Tento model má formu blokového schématu, jehož jednotlivé bloky obsahují analytické vztahy dávající do souvislosti výkonové a napájecí parametry transformátoru a teplotní charakteristiky jeho okolí. Celý model je pak řešen v prostředí Matlab Simulink pomocí numerické metody Runge-Kutta.

V publikaci [5] se pojednává o možnosti predikce tepelné odezvy transformátoru užitím vztahu pro výpočet teploty oleje a vinutí v ustáleném stavu, ale i v přechodovém. Teplotní odezva je závislá na teplotních poměrech v oleji transformátoru, a ty zase na velikosti celkových ztrát. Přírůstek *celkové teploty oleje*  $TO_2$  je tak dán vztahem (3-1), kde  $TO_1$  je *známá počáteční teplota oleje*,  $TL_2$  jsou *celkové ztráty za maximálního zatížení* a  $TL_1$  jsou *celkové ztráty za známého zatížení*. Teplota oleje je přímo závislá na *poměru celkových ztrát* který je vztažen do exponentu  $n$ . Jeho hodnota je určena především konstrukcí transformátoru, a jeho třídou.

$$TO_2 = TO_1 \left( \frac{TL_2}{TL_1} \right)^n \quad (3-1)$$

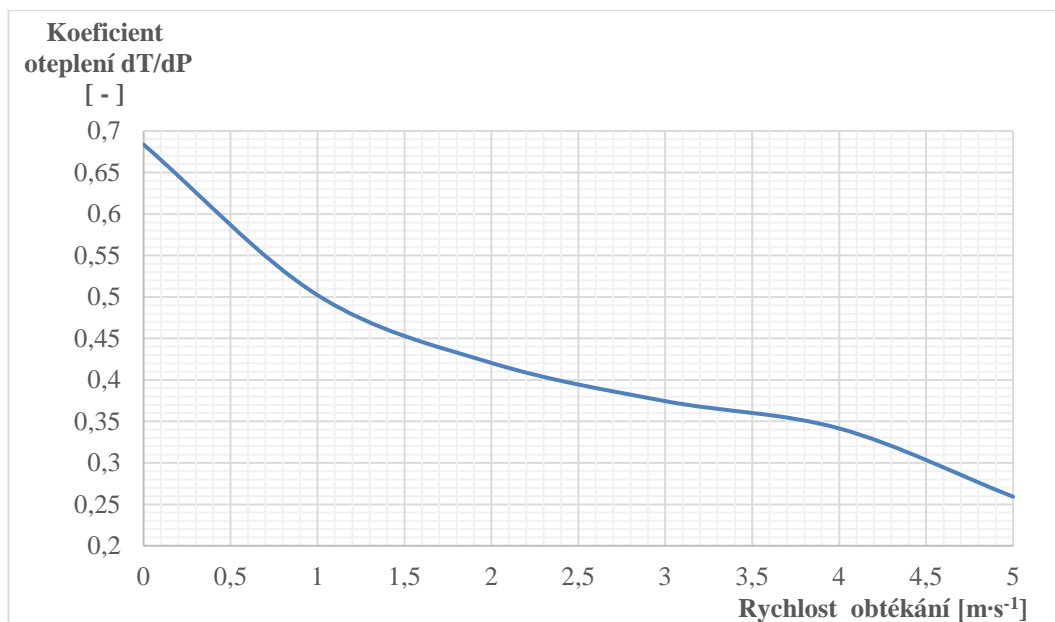
Pro zjištění přechodové charakteristiky je rovnice (3-1) dále upravována pouze do komplexnějších tvarů.

Vztah (3-2) pro výpočet *přírůstku maximální teploty vinutí HSG<sub>2</sub>* uváděný v [5] je obdobný výše zmíněnému (3-1). *HSG<sub>1</sub>* vyjadřuje *počáteční gradient teploty vinutí*, *i<sub>2</sub>* je *proud za maximálního zatížení* a *i<sub>1</sub>* *proud za počátečního zatížení*. Velikost exponentu *m* je značně závislá na hustotě proudu a optimalizaci ztrát pro konkrétní návrh transformátoru.

$$HSG_2 = HSG_1 \left( \frac{i_2}{i_1} \right)^{2m} \quad (3-2)$$

V případě výrobce SKYBERGTECH se pro určení maximálního oteplení sinusových filtrů využívají koeficienty poměru změny teploty v závislosti na změně výkonové ztráty a typu jádra. Tyto koeficienty stanovené na základě empiricky získaných dat tvoří charakteristiky specifické pro každou výrobní řadu.

Na obrázku 3.1 je zobrazen případ pro aktivní chlazení sinusového filtru, kde je vidět změna koeficientu v závislosti na rychlosti obtékání vzduchu. Poskytnutá charakteristika je platná pro řadu lakovaných sinusových filtrů s vakuovaným vinutím navrhnutých na jádře 3UI105/55 pro umístění na tepelně izolované desce.



**Obr. 2.1** Ukázka charakteristiky koeficientu oteplení dT/dP v závislosti na rychlosti obtékání [6]

Z charakteristiky odečtený koeficient je pak možno použít pro výpočet oteplení sinusového filtru dané řady podle vztahu 3-3, kde  $T_o$  je vypočtené *oteplení*,  $k_{dT/dP}$  je *koeficient oteplení  $dT/dP$*  a  $P$  jsou *celkové ztráty*.

$$T_o = k_{dT/dP} \cdot P \quad (3-3)$$

Z výše uvedených informací je možno vyvodit, že v oblasti stanovení teplotního pole odrušovacích prostředků, zejména sinusových filtrů, je jistý potenciál. Přínos oproti zde uvedeným materiálům [3] [4] [5] spočívá především v tom, že se jedná o stanovení teplotního pole sinusového filtru. V případě materiálu [3] od firmy CST, kde byly pro výpočet teplotního pole výkonové tlumivky zohledněny pouze ztráty ve vinutí, a přestup tepla do okolí byl stanoven na základě průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla, lze vidět potenciál v zohlednění dalších druhů ztrát, například ztráty v železe. Pro přesnější stanovení teplotního pole je zásadní určení odvodu tepla do okolí. To se dosáhne stanovením konkrétního součinitele přestupu tepla do okolí pro geometrické části sinusového filtru. Jeho hodnota tak nebude průměrná, ale bude se pohybovat v určitém rozmezí v závislosti na geometrické oblasti, jelikož se jedná o úlohu ve 3D. Z toho je možné zjistit vliv okolní zástavby, která definuje charakter okolního obtékání v případě volného nebo nuceného přestupu tepla do prostoru. Uvedenými podněty se budu v této disertační práci detailněji zabývat.

Metody uvedené v materiálech [4] [5] autorů Elmoudiho, Lehtonena a Harlowa se opírají o analytické vztahy pro ustálené řešení, modifikované pro výpočet přechodné charakteristiky oteplení olejem chlazeného transformátoru. Je tak zjištěn průběh maximální teploty oleje a průběh maximální teploty na vinutí za určitých podmínek. Tyto informace ale nejsou dostatečné pro detailnější tepelnou optimalizaci návrhu jednotlivých komponent sinusového filtru, protože nejsou vztažené na konkrétní místo ve výrobku. Nelze si tak udělat komplexní představu o tepelných poměrech.

**V rámci modelování 3D teplotního pole sinusového filtru v této práci je možno zjistit teplotní rozložení v jednotlivých komponentách jak v ustáleném stavu, tak i ve stavu přechodovém včetně špičkových hodnot.**

Přínos této práce oproti výše zjištěným informacím je možno shrnout do následujících bodů:

- **Stanovení 3D teplotního pole s uvažováním více druhů ztrát jako zdrojů tepla**
- **Uvažování rozmanitějších druhů okolí a jejich vliv na teplotní pole**



- **Na základě předchozích dvou bodů určení teplotního rozložení na povrchu i uvnitř jednotlivých komponent.**

## 4. Problematika návrhu sinusového filtru a určení jeho ztrát

Tato kapitola pojednává o návrhu a určení ztrát sinusového filtru SKY3FSM16-2kHz. Tento filtr byl vyroben firmou SKYBERGTECH s.r.o. a zapůjčen pro účely validačního testování a měření rozložení teplotního pole. V souvislosti s tím je tak níže uvedené pojetí návrhu a určení ztrát koncipováno pro zmíněný typ sinusového filtru.

Při návrhu vinutého dílu na magnetickém jádře složeného z jednotlivých EI transformátorových plechů, ovlivňuje kvalitu magnetického obvodu složení materiálu a tloušťka jednotlivých EI plechů. 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. [6] [7]

### 4.1 Návrh sinusového filtru

První fáze typického procesu návrhu sinusového filtru se zaměřuje na definici vstupních parametrů a podmínek, které musí zařízení splňovat. Nejčastěji se jedná o parametry uvedené v tabulce 4.1.

<i>Veličina</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
<b>Jmenovitý proud <math>I_n</math></b>	16	A
<b>Proudové přetížení <math>I_p</math></b>	$1,5 \cdot I_n$	A
<b>Fázový úbytek napětí filtru <math>\Delta u</math></b>	8-9	%
<b>Nosná frekvence <math>F_n</math></b>	0 ~50	Hz
<b>Minimální spínací frekvence šířkově pulzní modulace střídače <math>Sf_n</math></b>	$\geq 2$	kHz
<b>Napětí na kondenzátorech <math>U_n</math></b>	3x230/400	Vac
<b>Harmonické zkreslení napětí THDu</b>	$\leq 10$	%

Tab. 4.1 Zadání třífázového sinusového filtru SKY3FSM16-2kHz

Dalším krokem je určení velikosti tlumivky v mH na základě požadovaného úbytku napětí. Optimální velikost indukčnosti tlumivky je závislá na velikosti spínací frekvence střídače a na typu použitého materiálu pro magnetický obvod. Při použití plechů Fe-Si za studena válcovaných je volen úbytek napětí mezi 6 až 10%. V tomto případě výrobce zvolil fázový

úbytek napětí na filtru v rozmezí 8-9%. Při jmenovitém efektivním proudu 16 A je velikost indukčnosti tlumivky 4 mH. Tato hodnota indukčnosti tlumivky musí být zachována i při přetížení  $1,5 \cdot I_n$  (při 24 A). [6]

Po určení hodnoty indukčnosti tlumivky lze provést výpočet vysokofrekvenční složky proudu z hodnot velikosti napětí na kondenzátorech, nosné frekvence a frekvence PWM. Hodnota vysokofrekvenčního proudu tekoucího tlumivkou a kondenzátory se přičítá k jmenovitému proudu  $I_n$ . Společně tak vytváří celkový proud tekoucí tlumivkou sinusového filtru.

Pro výpočet ztrát je důležité znát frekvence jednotlivých složek vysokofrekvenčních proudů a zahrnout je do výpočtu. V tomto případě, vysokofrekvenční ztráty výrobcem použitého materiálu tvoří přibližně 70~80% ztrát v jádře. [6]

Velký vliv na velikost ztrát v jádře má nastavená spínací frekvence PWM střídače. Čím je frekvence PWM vyšší, tím se zvětšuje impedance tlumivky a vysokofrekvenční proud klesá a ztráty v jádře se snižují. Dle vyjádření výrobce, je tak možno tlumivku zatěžovat trvale 1,5 násobkem jmenovitého proudu při spínací frekvenci střídače nastavené na 4 kHz namísto 2 kHz. [6]

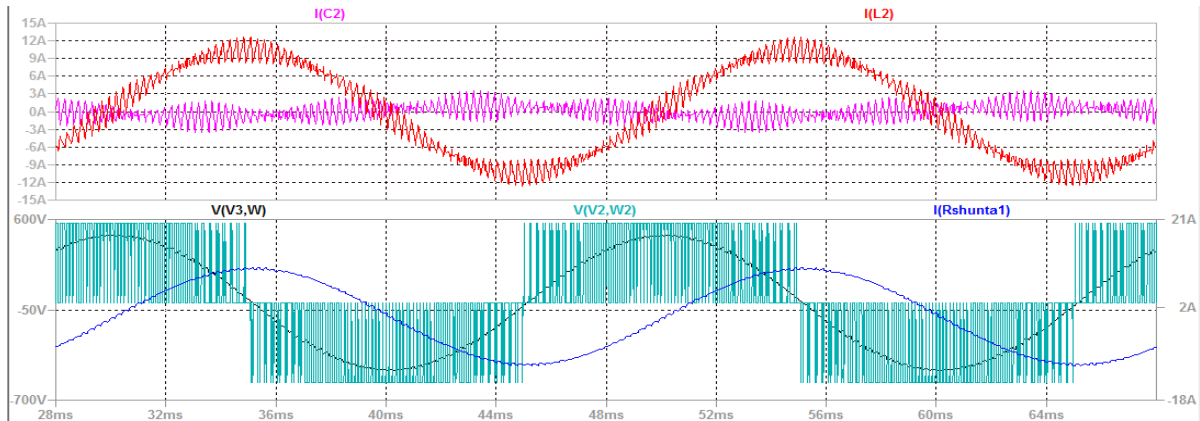
Určení velikostí kapacit je závislé na požadovaném harmonickém zkreslení napětí na kondenzátorech. Harmonické zkreslení napětí THDu (Total Harmonic Distortion) se mění v závislosti na spínací frekvenci střídače a velikosti kapacit kondenzátorů při sinusové modulaci. Čím vyšší je spínací frekvence PWM a čím větší jsou kapacity kondenzátorů, tím čistší je sinusový průběh a tím menší je harmonické zkreslení napětí THDu. Matematické vyjádření THDu popisuje vztah 4-1, kde  $V_n$  představuje *napětí jednotlivých harmonických*.

$$THD_u = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \cdot 100[\%] \quad (4-1)$$

## 4.2 Ztráty kondenzátorů

Pro určení ztrátového výkonu kondenzátorů byla výrobcem sinusového filtru provedena harmonická analýza proudů. Na základě této analýzy byl vybrán vhodný typ kondenzátoru o velikosti  $3 \times 10 \mu\text{F}$ . Předběžný ztrátový výkon byl určen na hodnotě 1 W, avšak později byla tato hodnota na základě výsledků tepelné simulace a s ohledem na nižší napětí na kondenzátorech než bylo původně uvažováno, revidována. Z tohoto důvodu musely být později také revidovány

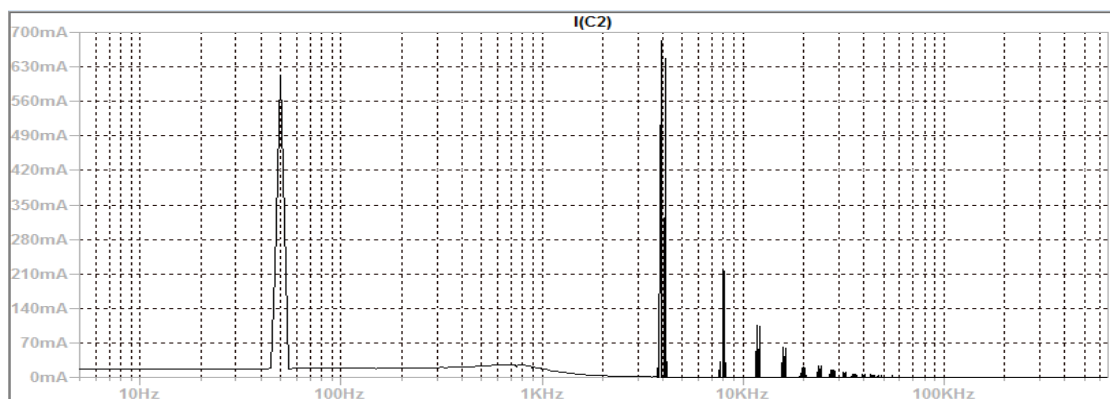
ztráty v tlumivce sinusového filtru. Na obrázku 4.1 jsou vidět průběhy proudů a sdružených napětí jako výstupy ze simulace v softwaru LT Spice.



**Obr. 4.1** Průběhy proudů a sdružených napětí [6]

Jednotlivé značení průběhů veličin je zobrazeno níže:

- I(C2) – celkový proud tekoucí kondenzátorem
- I(L2) - celkový proud tekoucí tlumivkou
- I(Rshunta1) – proud tekoucí zátěží
- V(V3,W) – sdružené napětí na kondenzátorech (na zátěži)
- V(V2,W3) – sdružené napětí PWM mezi střídačem a sinusovým filtrem



**Obr. 4.2** Harmonická analýza proudů z průběhu I(C2) [6]

### 4.3 Ztráty tlumivky

Vyčíslení hodnot celkových ztrát, které jsou později aplikovány na okrajové podmínky v numerické analýze je uvedeno níže v tabulce 4.2.

<i>Ztráty na jádře: 17,2W/cívku; ztráty ve vinutí: 15,9W/cívku</i>						
<b>harmonická (50Hz)</b>	1	78	82	159	161	<b>Σ</b>
$P_{cu}$ [W]	14,8	0,426	0,303	0,185	0,186	<b>15,9</b>
$P_{fe}$ [W]	8,66	2,73	2,035	1,874	1,907	<b>17,206</b>
$P_{celkové/fázi}$ [W]						<b>33,106</b>

Tab. 4.2 Vyčíslení ztrát třífázového sinusového filtru SKY3FSM16-2kHz

#### 4.3.1 Ztráty v magnetickém obvodu

Ztráty v magnetickém obvodu se dělí na ztráty hysterezní a na ztráty vířivými proudy. Jejich výpočet je dán obecně známým Steinmetzovým vztahem a je nutné je spočítat pro jednotlivé harmonické složky proudu. Ztráty první harmonické se mění se zatížením sinusového filtru avšak ztráty vysokofrekvenční (ostatních harmonických složek) se nemění a jsou stejné jak při velkém tak při malém odběru. Tyto ztráty tvoří podstatnou část ztrát v železe až 70%. [6]

#### 4.3.2 Ztráty ve vinutí

Ztráty ve vinutí byly počítány výrobcem pro každou harmonickou složku s ohledem na:

- Ztráty vlivem skinefektu
- Ztráty vířivými proudy
- Jouleovy ztráty (DC ohmické)
- Ztráty vlivem blízkého vodiče (proximity efekt)

Podrobnější informace o ztrátách lze nalézt v publikaci. [1]

## 5. Přehled teorie přenosu hybnosti, tepla a CFD

Obsah této kapitoly je koncipován jako souhrn a výběr nejdůležitějších vztahů použitých v numerických simulacích. První část se týká zejména vztahů souvisejících s přenosem hybnosti, tepla a jeho mechanismů. Jsou uvedeny ve své konečné nejobecnější formě bez ukázky odvození. Další informace o odvozeních, je možné dohledat v příslušných publikacích [2] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [35] uvedených v seznamu literatury této práce.

Dále je zde pojednáno o tom, jakým způsobem fungují numerické CFD simulace pro řešení proudění a přestupu tepla. Je zde uveden obecný popis, jakými kroky lze simulaci provést a jakým způsobem funguje numerické řešení s ohledem na tvorbu sítě, modelování turbulence a s tím související výběr turbulentního modelu. Ohled je brán také na způsob modelování proudění u stěny pro případ řešení v této práci.

### 5.1 Teorie přenosu hybnosti a tepla

#### 5.1.1 Bilanční rovnice přenosu

Pro přenos obecné fyzikální veličiny lze sestavit univerzální bilanci mechanismů, pomocí kterých přenosový jev probíhá. Na základě tohoto obecného schématu jsou následně postaveny a odvozeny bilance pro konkrétní podmínky. Obecný bilanční tvar je vyjádřen dle (5-1). [14]

$$\text{Rychlost akumulace} = \text{Rychlost přívodu} - \text{Rychlost odvodu} + \text{Rychlost vzniku} \quad (5-1)$$

Jedním z nejdůležitějších mechanismů je mechanismus konvektivního přenosu, který se uplatňuje při objemovém proudění tekutin. V případě existence teplotního, rychlostního nebo koncentračního gradientu se v pevných látkách a tekutinách uplatňuje molekulární mechanismus přenosu. *Rychlost vzniku* či též *objemový zdroj*, značený  $\dot{P}^{(g)}(x_i, t)$ , vyjadřuje způsob, jakým veličina v kontrolním objemu může vznikat nebo zanikat. Jako příklad lze uvést pole hybnosti vyvolané gravitační nebo odstředivou silou. Teplo lze generovat například exotermní chemickou reakcí či průchodem elektrického proudu vodičem jako Jouleovo teplo. [14] [11]

Pro pevný kontrolní objem  $V$  daného povrchu  $A$  v kartézském souřadném systému má univerzální bilance obecné fyzikální veličiny tvar dle (5-2).

Člen  $\frac{d}{dt} \int_V P dV$  na levé straně vyjadřuje rychlost akumulace v *objemu V*, kde *P* je *obecná fyzikální vlastnost*. Na pravé straně rovnice je rychlost konvektivního přívodu *povrchem A* vyjádřena členem  $-\int_S \vec{n} \cdot \vec{u} P dA$ , kde  $\vec{n}$  je *jednotkový vektor ve směru normály* a  $\vec{u}$  je *rychlost proudění*. Rychlost nekonvektivního přívodu *povrchem A* je vyjádřena členem  $-\int_S \vec{n} \cdot \mathbb{p} dA$ . Symbol  $\mathbb{p}$  zde značí *hustotu toku*. Nakonec rychlost vzniku v *objemu V* odpovídá poslednímu členu na pravé straně rovnice  $\int_V \dot{P}^{(g)} dV$ . [14]

$$\frac{d}{dt} \int_V P dV = - \int_S \vec{n} \cdot \vec{u} P dA - \int_S \vec{n} \cdot \mathbb{p} dS + \int_V \dot{P}^{(g)} dV \quad (5-2)$$

Většina dalších základních vztahů s platností pro přenos tepla a hybnosti, jež jsou užity pro potřeby této práce, je odvozena z bilanční rovnice přenosu dle (5-1). Diferenciální bilance pak slouží po úpravě k formulování parciálních diferenciálních rovnic pro výpočty teplotních a rychlostních polí. [14]

### 5.1.2 Rovnice kontinuity

Z empirických pozorování vyplývá, že hmota v průběhu mechanického jevu nemůže vznikat ani zanikat. Na základě toho faktu je stanoven zákon o zachování hmoty, jenž má axiomatický charakter [8]. Součet časové a konvektivní změny průtoku je tak roven nule. Při odvození skalární rovnice kontinuity je bilancovanou veličinou hmotnost s fyzikální vlastností *hustotou*  $\rho$ . Diferenciální tvar rovnice kontinuity v pevném kontrolním objemu pro prostorové neustálené stlačitelné proudění má tvar dle (5-3). Člen  $\frac{\partial \rho}{\partial t}$  vyjadřuje *rychlost akumulace hmotnosti*. Rychlost konvektivního přívodu hmotnosti je vyjádřena členem  $\nabla \cdot (\rho \vec{u})$ . [12] [14]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (5-3)$$

### 5.1.3 Navier – Stokesova rovnice

Vyjadřuje souvislost, kdy součet tlakové a třecí síly je roven síle setrvačné. Navier-Stokesova rovnice se získá aplikací Newtonova pohybového zákona na síly ve vazkém tření [8]. Dosazením Newtonova pohybového zákona (5-5) do dynamické rovnice (Cauchyova rovnice) (5-4) lze snížit počet rovnic eliminací neznámé složky tenzoru dynamických napětí.

Na levé straně (5-4) člen  $\rho \cdot \frac{D\vec{u}}{Dt}$  vyjadřuje setrvačné síly. Pravá strana obsahuje složku tlakových sil  $-\nabla p$ , kde  $p$  vyjadřuje tlak, síly vazkého tření  $\nabla \cdot \vec{\tau}$ , kde  $\vec{\tau}$  vyjadřuje dynamické napětí a složku objemových sil  $\rho \cdot \vec{f}$ , kde v případě působení gravitačního pole  $\vec{f} = \vec{g}$ .

Newtonův pohybový zákon pro stlačitelné tekutiny je vyjádřen dle (5-5), kde  $\mu$  je dynamická viskozita,  $tr \vec{\Delta}$  je stopa tenzoru rychlosti deformace a  $\vec{\delta}$  je tenzor normálových napětí.

Po aplikaci a úpravách se dostane výsledný tvar pro stlačitelné tekutiny dle (5-6). [12] [14]

$$\rho \cdot \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \cdot \vec{f} = 0 \quad (5-4)$$

$$\vec{\tau} = -\frac{2}{3}\mu\vec{\delta} \cdot tr \vec{\Delta} + 2\mu\vec{\Delta} \quad (5-5)$$

$$\frac{D(\rho\vec{u})}{Dt} = -\nabla p + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \nabla \nabla \cdot \vec{u} + \mu \cdot \nabla^2 \vec{u} + \rho \cdot \vec{f} \quad (5-6)$$

#### 5.1.4 Energetická rovnice

V technické praxi většina procesů probíhá při konstantním tlaku [12]. Úlohy řešené v této práci jsou případem obdobným. Z tohoto důvodu se pracuje s funkcí entalpie. Bilancovanou veličinou je *vnitřní energie*, kterou v případě vztažení k jednotce hmotnosti lze označit  $u_e$ . Fyzikální vlastností je pak součin  $\rho u_e$ . Vazba entalpie na vnitřní energii je vyjádřena vztahem (5-7), kde  $p$  je tlak a  $v$  měrný objem. [11] [14]

$$h = u_e + pv \quad (5-7)$$

Po řadě úprav se lze dopracovat ke tvaru (5-8) rovnice diferenciální entalpické bilance materiálního elementu spojitého prostředí. Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku je značena  $c_p$ , termodynamická teplota je značena  $T$ , hustota tepelného toku je vyjádřena pomocí symbolu  $\vec{q}$ . Symbol  $\dot{Q}^{(g)}$  značí rychlost vzniku tepla v objemové jednotce. [12] [14]

$$\rho \cdot c_p \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot \vec{q} + \rho \cdot T \cdot \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \cdot \frac{Dp}{Dt} + \vec{\tau} : \vec{\Delta} + \dot{Q}^{(g)} \quad (5-8)$$



### 5.1.5 Turbulence

Pro turbulentní proudění jsou typické pulsace všech veličin [10]. Vykazuje chaotické fluktuace s nenulovou vířivostí [11]. Trajektorie částic jsou nepravidelného charakteru, tím také dochází ke značnému promíchávání objemu tekutiny. Bez dodávání další energie má tendenci se rychle utlumovat [10]. Měřená veličina v turbulentním proudění má oscilační charakter. Lze například rychlost  $u$  změřenou v čase  $t$  rozložit na její střední hodnotu podle času  $\bar{u}$  a flukтуаční složku  $u'$ . Vektor okamžité rychlosti je tak zapsán dle (5-9). [14]

$$\vec{u} = \bar{\vec{u}} + \vec{u}' \quad (5-9)$$

Pro turbulentní víry platí rovnice kontinuity i Navier-Stokesova rovnice. Uplatněním vztahu (5-9) a následnou úpravou Navier-Stokesovy rovnice a rovnice kontinuity lze dostat tvar rovnice pro turbulentní proudění (5-10), kde  $\bar{\vec{\tau}}^{(t)}$  vyjadřuje časově střední hodnotu tenzoru celkových dynamických napětí. Ten se skládá ze střední hodnoty tenzoru vazkých napětí  $\bar{\vec{\tau}}$  a ze střední hodnoty tenzoru turbulentních napětí  $\bar{\vec{\tau}}^{(t)}$  dle (5-11). Tenzor turbulentních napětí  $\bar{\vec{\tau}}^{(t)}$  je definovaný dle (5-12). Napětí definovaná touto rovnicí se nazývá Reynoldsova napětí. [11] [14]

$$\rho \cdot \frac{D \bar{\vec{u}}}{Dt} = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \bar{\vec{\tau}}^{(t)} + \rho \cdot \vec{f} \quad (5-10)$$

$$\bar{\vec{\tau}}^{(t)} = \bar{\vec{\tau}} + \bar{\vec{\tau}}^{(t)} \quad (5-11)$$

$$\bar{\vec{\tau}}^{(t)} = -\rho \bar{\vec{u}}' \bar{\vec{u}}' \quad (5-12)$$

Při turbulentním proudění nestlačitelné tekutiny lze definovat součinitel turbulentní viskozity  $\mu^{(t)}$ , jenž je obsažen ve vztahu (5-13), kde  $\bar{\vec{\Delta}}$  označuje střední hodnotu tenzoru rychlosti deformace pro elementární materiální úsečku v proudovém poli. [14]

$$\bar{\vec{\tau}}^{(t)} = 2\mu^{(t)} \bar{\vec{\Delta}} \quad (5-13)$$

## 5.2 Přenos tepla a jeho mechanizmy

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. [2] [9]

*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. [2]

### 5.2.1 Sdílení tepla vedením – Fourierův zákon

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, jehož mírou je teplota. Mechanismus vedení se i v malé míře může vyskytovat v tekutinách, ale je zaštitěno prouděním, které má v tomto případě majoritní převahu. [2] [9]

Pro teplotní pole lze určit v konkrétním místě a okamžiku *tepelný tok*  $\dot{Q}$ . *Hustota tepelného toku*  $\vec{q}$  resp. její vektor se obdrží vztažením tohoto toku na jednotku plochy v rovině kolmé na směr toku. Vazba mezi hustotou tepelného toku a rozložením teploty je axiomatického charakteru. V homogenních izotropních látkách je tento vztah vyjádřen tzv. Fourierovou rovnicí dle (5-14). [14]

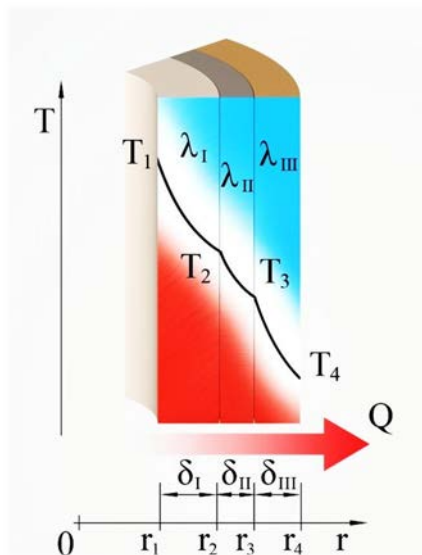
$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (5-14)$$

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  $z$  dle (5-15). [9]

$$\dot{Q} = -A\lambda \frac{dT}{dz} [W] \quad (5-15)$$

Figuruje zde součinitel úměrnosti přestupu tepla *tepelná vodivost*  $\lambda$ . 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 taktéž nižší. Tato látková charakteristika je závislá na teplotě. [2]

Obecně nejnižší tepelná vodivost je u plynů, kdy se zvyšující se teplotou hodnota tepelné vodivosti roste. Řádově se pohybuje v  $0,01 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . U kapalin je řádově v  $0,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a s rostoucí teplotou mírně klesá s výjimkou vody, kde v rozmezí od  $0^\circ\text{C}$  do  $100^\circ\text{C}$  roste. Tepelná vodivost u kovových materiálů se pohybuje přibližně od  $10 - 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  a je nepřímo úměrná změně teploty. [14]



Obr. 5.1 Schematické znázornění vedení tepla vícevrstvou válcovou plochou [33]

Pro názornou ukázkou zde bude uveden vztah pro jednorozměrné sdílení tepla vedením ve **válcové stěně**.

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 (5-16) a dosazením okrajových podmínek za předpokladu, že *tepelná vodivost*  $\lambda$  je konstantní, po úpravě dostáváme vztah pro složenou válcovou plochu z více vrstev. [2]

$$\dot{Q} = \frac{2\pi L(T_1 - T_n)}{\sum_j \frac{1}{\lambda_j} \ln\left(\frac{d_{j+1}}{d_j}\right)} [W] \quad (5-16)$$

## 5.2.2 Fourier – Kirchoffova rovnice

Východiskem pro stanovení hustoty tepelného toku  $\vec{q}$  je získání teplotního rozložení  $T(x_i, t)$  v tuhé látce nebo tekutině. Při výchozím zvolení rovnice diferenciální entalpické bilance bude v nestlačitelné kapalině se zanedbatelnou objemovou roztažností člen  $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = 0$ , čímž se bilance zjednoduší. Po vyjádření hustoty tepelného toku  $\vec{q}$  z Fourierova zákona (5-14), tenzoru dynamických napětí  $\vec{\tau}$  z Newtonova pohybového zákona a po provedení materiální

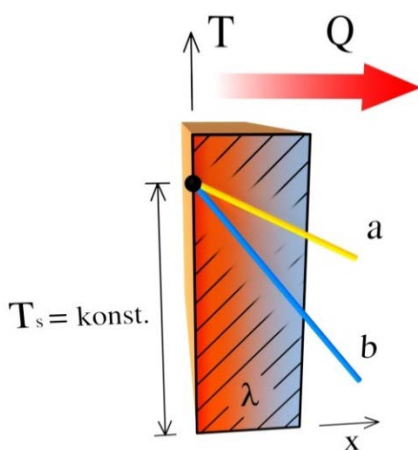
derivace v akumulacním členu lze obdržet tvar (5-17) platný pro konstantní tepelnou vodivost nazývaný Fourier-Kirchoffova rovnice. [14]

Na levé straně rovnice člen  $\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$  vyjadřuje rychlost akumulace entalpie v pevném kontrolním objemu všemi mechanismy s výjimkou záření. Rychlost konvektivního přívodu entalpie povrchem kontrolního objemu vyjadřuje člen  $\rho \cdot c_p \cdot \vec{u} \cdot \nabla T$  taktéž na levé straně. Do rovnosti jsou dány následující tři členy, které obsahuje pravá strana rovnice. Člen  $\lambda \cdot \nabla^2 T$  vyjadřuje rychlost konduktivního přívodu entalpie povrchem kontrolního objemu, v následujícím členu  $2\mu \cdot \vec{\Delta} : \vec{\Delta}$  je vyjádřena rychlost disipace mechanické energie v pevném kontrolním objemu a výkon objemového zdroje energetické přeměny uvnitř kontrolního objemu odpovídá poslednímu členu  $\dot{Q}^{(g)}$ . [13] [14]

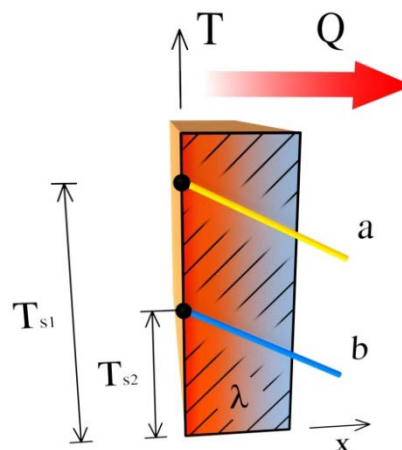
$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot c_p \cdot \vec{u} \cdot \nabla T = \lambda \cdot \nabla^2 T + 2\mu \cdot \vec{\Delta} : \vec{\Delta} + \dot{Q}^{(g)} \quad (5-17)$$

### 5.2.3 Okrajové podmínky na stěně

Okrajové podmínky na stěnách těles jsou dány dvojnásobkem počtu prostorových souřadnic. U třírozměrného tělesa je tak možno mít až šest okrajových podmínek. Pro určení teplotních polí a tepelných toků jsou zde uvedeny čtyři nejdůležitější typy (14).



Obr. 5.2 Okrajová podmínka prvního druhu



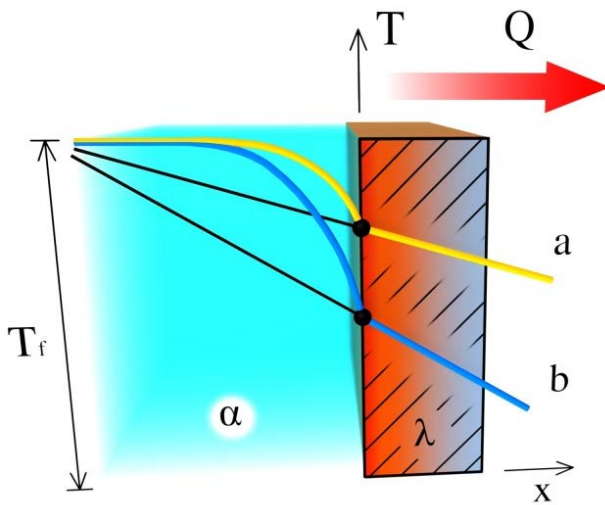
Obr. 5.3 Okrajová podmínka druhého druhu

První z nich je podmínka konstantní teploty (5-18) na povrchu tělesa. Zde se mění pouze teplotní gradient, a díky tomu i teplotní profil, jak je znázorněno na obrázku 5.2. Teplota je funkcí souřadnic a může být i časově závislá. [14]

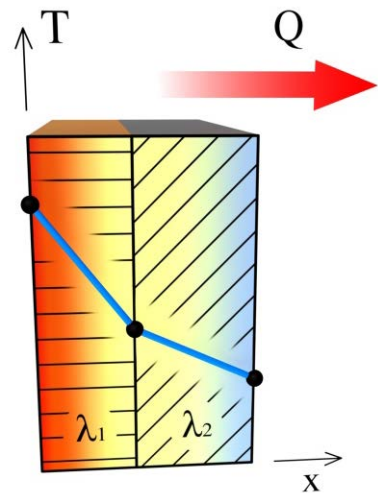
$$T_{x=0} = T_s = konst \quad (5-18)$$

Druhou podmínkou je stav, kdy je na stěně jako funkce polohy předepsána hustota tepelného toku. V tomto případě se mění povrchová teplota a teplotní gradient zůstává konstantní dle obrázku 5.3. Platí zde tak (5-19). [14]

$$q_{x_{x=0}} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_{x=0}} = q_0 \quad (5-19)$$



Obr. 5.4 Okrajová podmínka třetího druhu



Obr. 5.5 Okrajová podmínka spojitosti teplotního rozložení

Třetí okrajová podmínka hovoří o spojitosti hustot tepelných toků. V případě, že je těleso o teplotě  $T_0$  ohříváno okolním prostředím o teplotě  $T_f$  a současně je znám *součinitel přestupu tepla*  $\alpha$ , platí, že teplo přivedené tělesu kondukcí je rovno teplu odvedenému z prostředí konvekcí (5-20). Změna teplotního profilu je znázorněna dle obrázku 5.4 a matematická formulace okrajové podmínky je vyjádřena dle (5-21). [14]

Teplo přivedené tělesu kondukcí	=	Teplo odvedené z prostředí konvekcí	(5-20)
------------------------------------	---	--	--------

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x_{x=0}} = \alpha(T_f - T_{x=0}) \quad (5-21)$$

Podmínka spojitosti hustot tepelných toků platí také v místě styku dvou těles o tepelných vodivostech  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$ . V případě ideálního kontaktu lze uplatnit také podmínku spojitosti teplotního rozložení. Tento fakt vyjadřuje čtvrtá okrajová podmínka dle matematického popisu (5-22). [14]

$$\lambda_1 \frac{\partial T^1}{\partial x} \Big|_{x=H} = \lambda_2 \frac{\partial T^2}{\partial x} \Big|_{x=H} \quad (5-22)$$

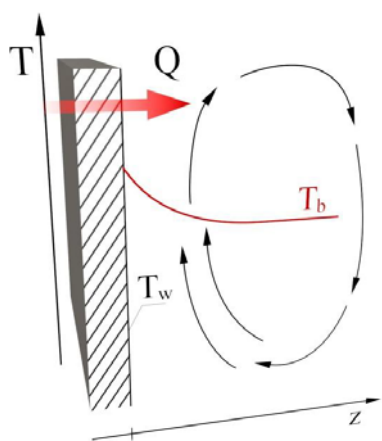
#### 5.2.4 Sdílení tepla konvekcí

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**. Na velikost součinitele přestupu tepla, který je funkčně závislý na Nusseltově čísle, má tak vysoký vliv hodnota Reynoldsova čísla, jak je naznačeno v (5-23). [2]

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (5-23)$$

Jestliže částice odplývají do poloh, kde je výskyt potenciálově vyšší energie, jedná se o **konvekci volnou** [2]. V Nusseltovo čísle, a sním i v součiniteli přestupu tepla, má hlavní vliv gravitační zrychlení projevující se vlivem Grashofova čísla viz (5-24).

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (5-24)$$



**Obr. 5.6** Schematické znázornění sdílení tepla prouděním [33]

Tyto způsoby konvekce popisuje *Newtonův ochlazovací zákon*, dle něhož je možno zjistit tepelný tok mezi pevnou stěnou a okolo ní proudící tekutinou . [9]

$$\dot{Q} = \alpha A (T_b - T_w) [W] \quad (5-25)$$

Zásadní vliv zde má *součinitel přestupu tepla*  $\alpha$  , 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]

### 5.2.5 Podobnostní kritéria

Při početním určování *součinitele přestupu tepla*  $\alpha$  se využívá podobnostních čísel (kritérií), jež jsou bezrozměrná. Tato 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: [2] [9]

$$\text{Nusseltovo číslo:} \quad Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \quad (5-26)$$

Vyjadřuje podíl charakteristické hodnoty toku tepla a charakteristické hodnoty toku tepla v hypoteticky nehybném prostředí. [9]

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

$$\text{Reynoldsovo číslo:} \quad Re = \frac{\bar{u}l}{\nu} \quad (5-27)$$

Popisuje vynucené proudění. Určuje jeho charakter, jenž se může pohybovat v laminární nebo turbulentní oblasti. Vyjadřuje v podstatě poměr setrvačných a viskózních sil. [2]

$$\text{Prandtlovo číslo:} \quad Pr = \frac{\nu}{a} \quad (5-28)$$

Vyjadřuje látkovou vlastnost při sdílení tepla (2).

$$\text{Grashofovo číslo:} \quad Gr = \frac{\gamma \bar{g} \Delta T L^3}{\nu^2} \quad (5-29)$$

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

$$\text{Rayleighovo číslo:} \quad Ra = \frac{\gamma \bar{g} \Delta T L^3 \rho}{a \mu} \quad (5-30)$$

Rayleighovo číslo je výsledkem součinu Grashofova a Prandtlova čísla, kde *součinitel objemové roztažnosti*  $\gamma$  a *součinitel teplotní vodivosti*  $a$  jsou definovány dle (5-31)

$$\gamma = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right); a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (5-31)$$

V případě že je hodnota Rayleighova čísla menší než  $10^8$ , proudění vyvolané vlivem vztlačkových sil vykazuje laminární charakter. Přejídná oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním se pohybuje v rozmezí  $10^8 < Ra < 10^{10}$ . [15]

### 5.3 Počítačová dynamika tekutin (CFD)

Computational Fluid Dynamics (CFD) je podobor mechaniky tekutin, který využívá algoritmy numerické analýzy k řešení fyzikálních úloh zahrnující proudění tekutin, přestupy tepla, hmoty, průběhy chemických reakcí a dalších souvisejících jevů [16]. V definované oblasti pokryté sítí z konečného počtu elementů je cílem najít diskrétní řešení, kterého je dosaženo na základě numerické diskretizace parciálních diferenciálních rovnic. Rozdíl mezi diferenčním a diferenciálním řešením rovnic je definován jako diskretizační chyba. Míra přesnosti diskretizační chyby společně s mírou stability jsou pak elementárními vlastnostmi numerických metod. [11]

Charakter výsledného řešení závisí již na počáteční definici cílů, které mají být dosaženy [16]. Jedním z nich může být následná forma dalšího použití výsledků nebo jejich požadovaná přesnost či rychlost řešení. Na základě toho lze tyto představy implementovat do vytváření spojité výpočetní sítě, jež se mohou projevit v její hustotě pro jednotlivé oblasti nebo typu použitých buněk. Numerický výpočet v definované oblasti pokryté sítí je proveden pomocí řešiče. Mezi komerčně distribuované řešiče patří například ANSYS Fluent nebo STARCCM+, naopak open source řešičem je například OpenFOAM. V něm je možnost nastavit vhodný fyzikální model a jeho parametry včetně materiálových vlastností, okrajových podmínek, počáteční inicializace nebo nastavení diskretizačního schématu. Řešení mohou být stacionárního nebo nestacionárního typu. Po zkonvergování je v závěrečné fázi možno pokračovat jejich postprocessingem a dále je zpracovávat nebo adaptovat výpočetní síť a provést další výpočet. [16] [35]

Tímto způsobem lze získat informace o fyzikálních dějích probíhajících ve zkoumané oblasti při respektování fyzikálních zákonů.

#### 5.3.1 Řešení metodou konečných objemů (Finite Volume Method)

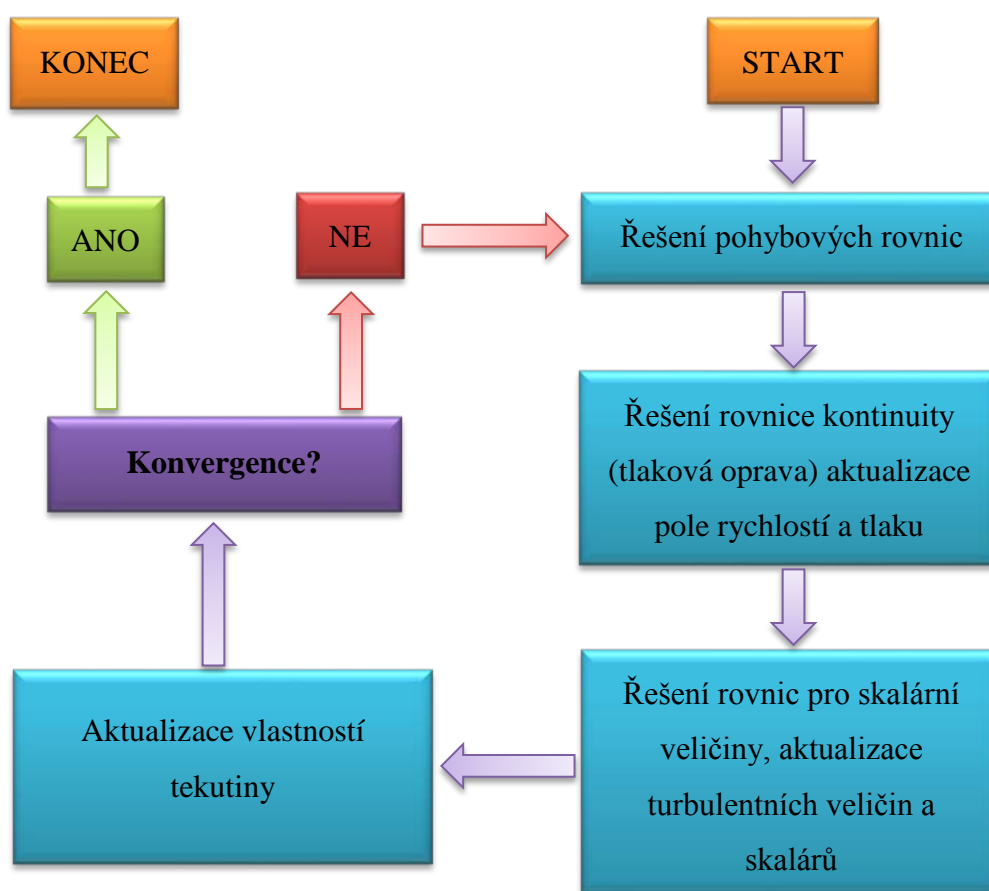
Tato metoda je používána přibližně u 80 procent komerčních řešičů s využitím integrálního tvaru rovnic [16]. Oblast, v níž je hledáno řešení, je rozdělena na konečný počet kontrolních objemů.

Do jejich geometrických středů jsou uloženy složky rychlosti a skalárních veličin. Na hranicích kontrolních objemů jsou tyto hodnoty interpolovány [11]. Aproximace toku probíhá přes hranice těchto kontrolních objemů integrálním součtem přes čtyři nebo šest ploch v závislosti na tom, zdali se jedná o dvourozměrnou nebo třírozměrnou úlohu [16]. Toho je



dosazeno interpolačním schématem. Existují různé varianty interpolačních schémat lišící se řádem přesnosti a stabilitou výpočtu. Příkladem lze uvést mocninovou interpolaci, upwind interpolace prvního a druhého řádu, centrální diference nebo interpolační schéma QUICK. [11]

Obecně lze říci, že schémata vyšších řádů jsou přesnější, výpočet je ale delší a stabilita nižší [16]. Stabilitu lze zvýšit počátečním použitím first order upwind schématu a následně po několika desítkách interpolací přepnout na second order upwind [11]. Pro proudění s vysokou vířivostí není vhodné používat lineární interpolaci. Aproximační schéma QUICK je vhodné použít při potřebě vysoké přesnosti s výjimkou oblastí, kde se vyskytují vysoké gradienty. Zde se mohou vyskytnout problémy se stabilitou. [16] [35]



Obr. 5.10 Schéma řešení numerického výpočtu

Řešení znázorněné na obrázku 5.10 ukazuje kroky řešení pomocí tzv. Pressure-Based Segregated algoritmu, ze kterých se skládá každá iterace, dokud řešení nezkonverguje. Tento algoritmus řeší postupný výpočet všech proměnných. Klade tak menší nároky na využití operační paměti, protože každá diskretizovaná rovnice je uložena samostatně, nicméně konvergence řešení trvá déle. K urychlení konvergence je možné použít tzv. Pressure-Based

Coupled algoritmus. Jeho výhoda spočívá v řešení všech pohybových rovnic a jejich proměnných současně však za cenu 1,5 – 2 násobně zvýšených nároků na operační paměť. [15]

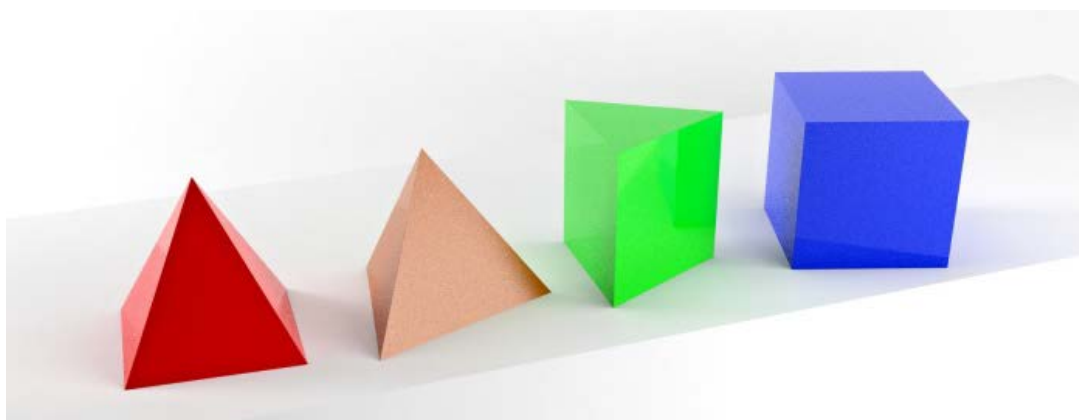
Dosažení konvergence při záměru získat vysoce přesné řešení může být extrémně zdoluhavé. Existují ale metody, jimiž lze dosáhnout i značného urychlení. Jednou z nich je počáteční odhad proměnných. V případě řešení přirozené konvekce je vhodné provést počáteční odhad teplot a rychlostí. V případě velkého počtu buněk taktéž odhad rychlosti. Vhodné je také postupovat způsobem od jednoduchého případu a postupně provádět modifikace k dosažení vyšší komplexnosti. [11]

Pro redukci změn každé proměnné v každé iteraci lze využít tzv. relaxace, a tím dosáhnout konvergence. Hodnotu relaxačního faktoru je možné nastavovat během výpočtu. Ta je závislá na změnách reziduálů podle kterých je vhodné hodnotu relaxačního faktoru upravovat. [11]

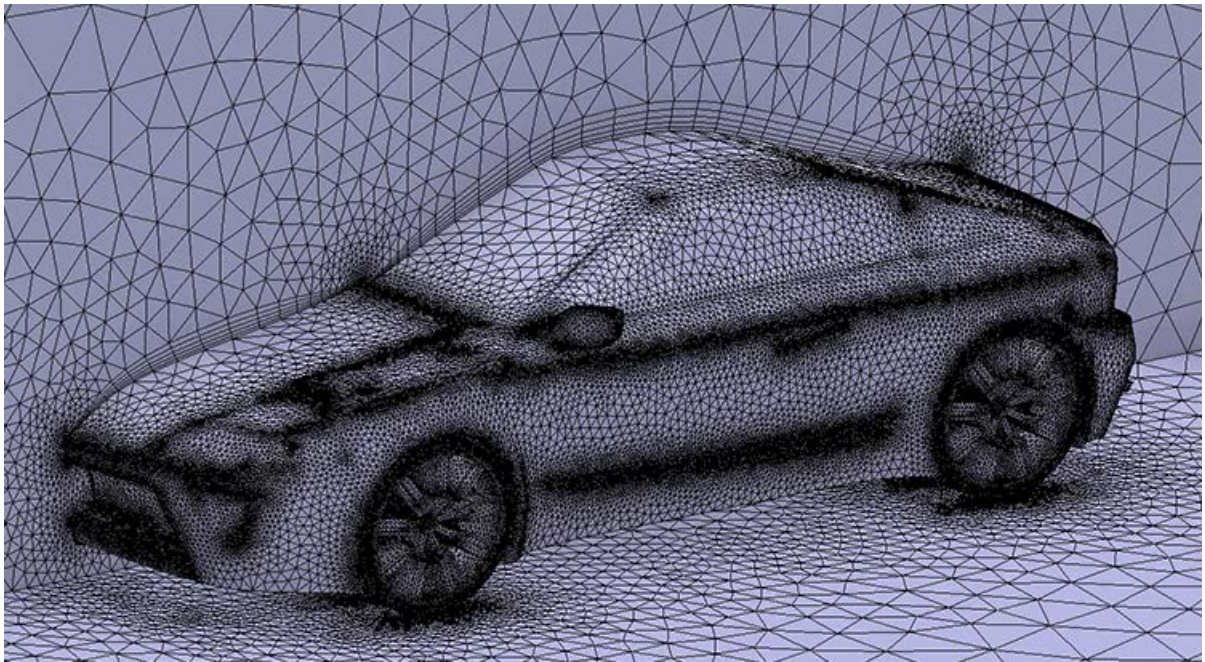
## 5.4 Síť (Meshing)

Síť je souborem bodů, hran a ploch, které definují tvar dvourozměrného nebo třírozměrného objektu. Tímto systémem je výpočtová oblast rozdělena na dílčí na sebe navazující buňky. Jejich počet má významný vliv na přesnost výpočtu avšak současně je i limitujícím faktorem z hlediska hardwarové a časové náročnosti. Cílem je tak redukovat počet buněk na nutné minimum takovým způsobem, který by nesnižoval kvalitu sítě. [17]

Buňky mohou být v rámci tvaru geometrie tvořeny různými geometrickými prvky, jako například kvádr, pyramidový prvek, čtyřstěn nebo prizmatický prvek. Jejich kombinací lze získat optimální síť [11]. Příklady základních prvků a ukázkou jimi tvořící síť lze vidět na obrázku 5.11 a 5.12.



**Obr. 5.11** Příklady základních prvků pro tvorbu sítě  
zleva – jehlan (pyramidový prvek), čtyřstěn, pětistěn (prizmatický prvek), šestistěn (kvádr)

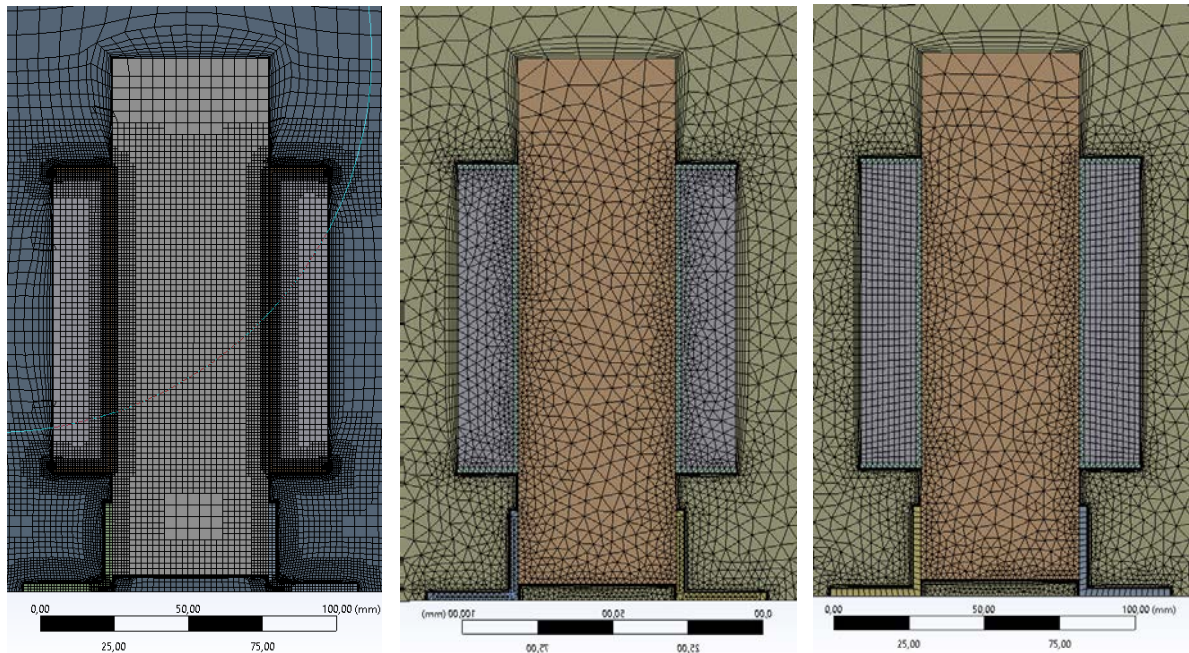


Obr. 5.12 Příklad sítě tělesa tvořené ze základních prvků [36]

#### 5.4.1 Kategorizace sítí

Existují tři hlavní typy sítí, které se běžně používají pro sítování geometrií. Jedná se o síť strukturovanou, nestrukturovanou a případně hybridní. Strukturovaná síť je tvořena kvádry či obecnými šestistěny. V jejím případě se rovnice jednodušeji diskretizují a je tak vhodná pro řešení úloh s vysokou komplexností geometrie. Nestrukturovaná síť tvořená nejčastěji jehlany, čtyřstěny nebo pětistěny nevytváří implicitní strukturu souřadnicových linek jak je tomu v případě strukturovaného typu. Lépe se pak koncentruje v místech geometrie, kde to je nutné. Čas nutný k mapování geometrie je tak znatelně kratší než v případě strukturované sítě. Hybridní síť je tvořena současně tetrahedrálními a hexahedrálními elementy ze strukturovaného i nestrukturovaného typu sítě. [18]

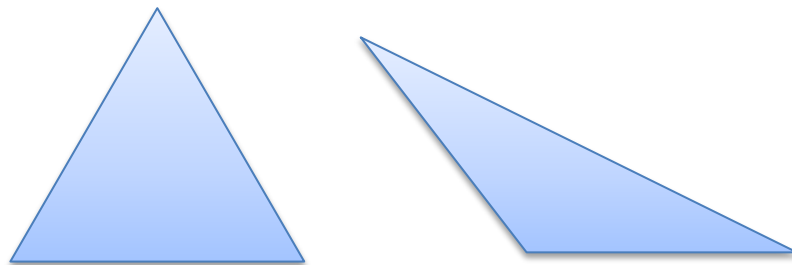
Porovnání strukturovaného, nestrukturovaného a hybridního sítování stejné geometrie ukazuje obrázek 3.10. Na něm je možné si všimnout, že region v oblasti mezní vrstvy u stěn je ve všech případech tvořen prvky strukturované sítě. V blízkosti stěn dochází ke značným změnám rychlosti. Aby bylo možné správně zohlednit změnu gradientu rychlosti, je nezbytné v rámci sítě tento region vždy vytvořit. [18]



**Obr. 5.13** Strukturovaná síť (vlevo), nestrukturovaná síť (uprostřed), hybridní síť (vpravo)

#### 5.4.2 Kvalita sítě

Dle dokumentace k softwaru Ansys Meshing [19] je míra zkosení buňky jeden z hlavních parametrů určující kvalitu sítě. Tento parametr určuje, jak moc se plocha nebo buňka blíží svým tvarem ideálnímu pravidelnému geometrickému tvaru. Míra zkosení je ohodnocena v rozsahu od 0 (nejlepší) do 1 (nejhorší), kde 0 označuje rovnostranný geometrický tvar a 1 naopak zdegenerovaný tvar buňky. Zdegenerované buňky jsou charakteristické tím, že uzly které je tvoří, leží téměř v jedné rovině. Vysoce zkosené plochy a buňky v síti jsou neakceptovatelné z hlediska řešení rovnic, protože by následně docházelo k snížení přesnosti výpočtu [19] [17] [18]. Obrázek 5.14 uvádí příklad ideálního geometrického tvaru 2D rovnostranné plochy v porovnání s vysocí zkoseným tvarem.



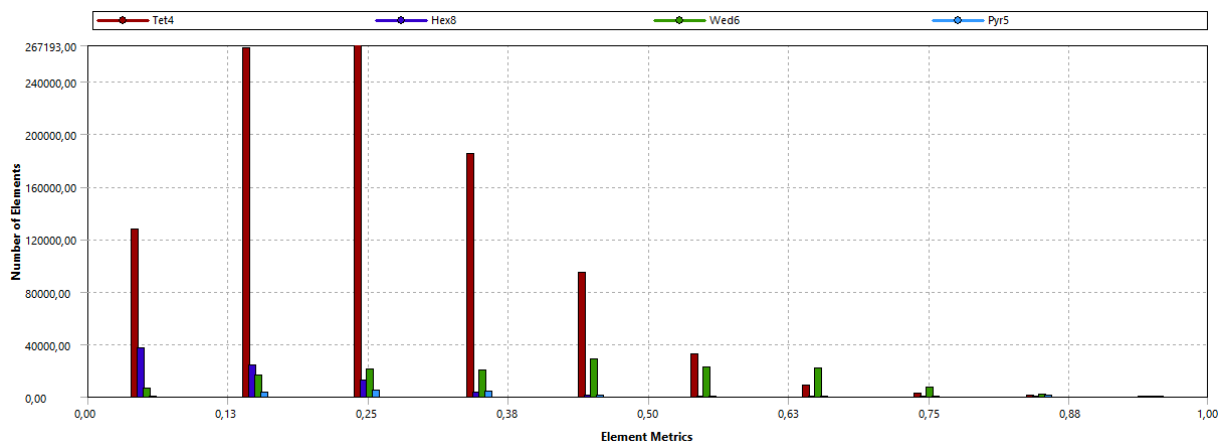
**Obr. 5.14** Rovnostranný trojúhelník (vlevo), vysocí zkosený trojúhelník (vpravo)

Hodnotu míry zkosení jak pro 2D tak i pro 3D prostorovou síť lze určit ze vztahu (5-32), kde *optimální velikost buňky* je plocha nebo objem optimálního tvaru buňky a *velikost buňky* je plocha nebo objem uvažované buňky. [19]

$$\text{Míra zkosení} = \frac{\text{Optimální velikost buňky} - \text{Velikost buňky}}{\text{Optimální velikost buňky}} \quad (5-32)$$

Většina buněk by měla ve 3D prostorových úlohách dosahovat hodnoty míry zkosení 0,5 nebo nižší. Lze očekávat, že malé procento buněk bude mít vždy hodnotu 0,9 nebo vyšší [19]. Jako příklad lze uvést oblast, kde část geometrie L-profilu dosedá na vodorovnou plochu. Horizontální i vertikální hrana L-profilu je zaoblená. V místě kontaktu tohoto zaoblení s vodorovnou plochou tak vzniká v síti výpočetní domény pro vzduch buňka s vysokým zkosením.

Na obrázku 5.15 lze vidět statistické rozložení počtu buněk tetragonálních, hexagonálních a pyramidových tvarů ve 3D prostorové síti a jejich hodnot míry zkosení z programu Ansys Meshing. Většina buněk se pohybuje v rozmezí od 0 až do 0,6 a naznačuje tak dobrou kvalitu sítě.



Obr. 5.15 Rozložení počtu buněk a jejich hodnot míry zkosení ve 3D prostorové síti.

## 5.5 Modelování turbulence

Řada matematických modelů v numerických softwarech využívá po modelování turbulence metodu Reynoldsova časového středování, která spočívá v rozložení okamžitých veličin v turbulentním proudění na část časově středovanou a fluktuální, jak je popsáno v kapitole 5.1.5. Aplikací metody Reynoldsova časového středování na veličiny obsažené v rovnici kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice se získají tzv. Reynoldsovy rovnice, běžně známé pod zkratkou RANS (z anglického Reynolds-averaged Navier-Stokes). Pro modelování turbulence

s využitím metody Reynoldsova časového středování je nutné získání relevantních hodnot Reynoldsových napětí. Ty lze získat pomocí Boussinesqovi hypotézy, kdy je možné tato napětí vztáhnout úměrně ke gradientu střední rychlosti. Tato hypotéza je využita v turbulentních modelech Spalart-Allmaras, k- $\epsilon$  a k- $\omega$ . Výhodou tohoto přístupu je relativně nízká výpočetní náročnost související s výpočtem *turbulentní viskozity*  $\mu^{(t)}$ . V případě modelu k- $\epsilon$  je *turbulentní viskozita*  $\mu^{(t)}$  řešena jako funkce *turbulentní kinetické energie*  $k$  a *rychlosti turbulentní disipace*  $\epsilon$  pomocí dvou transportních rovnic. Nevýhodou Boussinesqovy hypotézy může být předpoklad, že *turbulentní viskozita*  $\mu^{(t)}$  je isotropní skalární veličinou, což není ve všech případech pravda. Pro proudění, kde je dominantní pouze jedno z turbulentních smykových napětí (např. mezní vrstva na stěně), je tento předpoklad však dostačující. [15] [20]

## 5.6 Turbulentní model Realizable k- $\epsilon$

Jedním z modelů používaných pro modelování turbulentního proudění je model Realizable k- $\epsilon$ . Od ostatních k- $\epsilon$  modelů (např. Standard k- $\epsilon$  nebo RNG k- $\epsilon$ ) se liší především modifikovanou transportní rovnicí pro *rychlosti turbulentní disipace*  $\epsilon$  a tím, že obsahuje alternativní formulaci *turbulentní viskozity*  $\mu^{(t)}$ . Vykazuje tak podstatné zlepšení v oblastech kde je charakteristickým rysem částic proudu vysoká vířivost, rotace a zakřivení proudnic. Slabinu tradičních k- $\epsilon$  modelů lze spatřit v samotné rovnici *rychlosti turbulentní disipace*  $\epsilon$ . Ta způsobuje nedostatečnou predikci míry šíření například v osově symetrických tryskách. Pro odstranění tohoto nedostatku byl do výpočetního modelu implementován vztah turbulentní viskozity obsahující proměnou  $C_\mu$  a nová forma rovnice pro *rychlost turbulentní disipace*  $\epsilon$  založená na dynamické rovnici střední kvadratické vířivosti. [15] [20]

Transportní rovnice pro  $k$  a  $\epsilon$  zahrnují členy, které fyzikálně interpretují: [35]

- rychlost změny
- konvektivní transport
- turbulentní transport  $k$  a  $\epsilon$  vlivem rychlostních a tlakových fluktuací
- produkci a destrukční míru disipace v důsledku rychlostní fluktuace a třecích napětí
- viskózní a molekulovou difuzi.

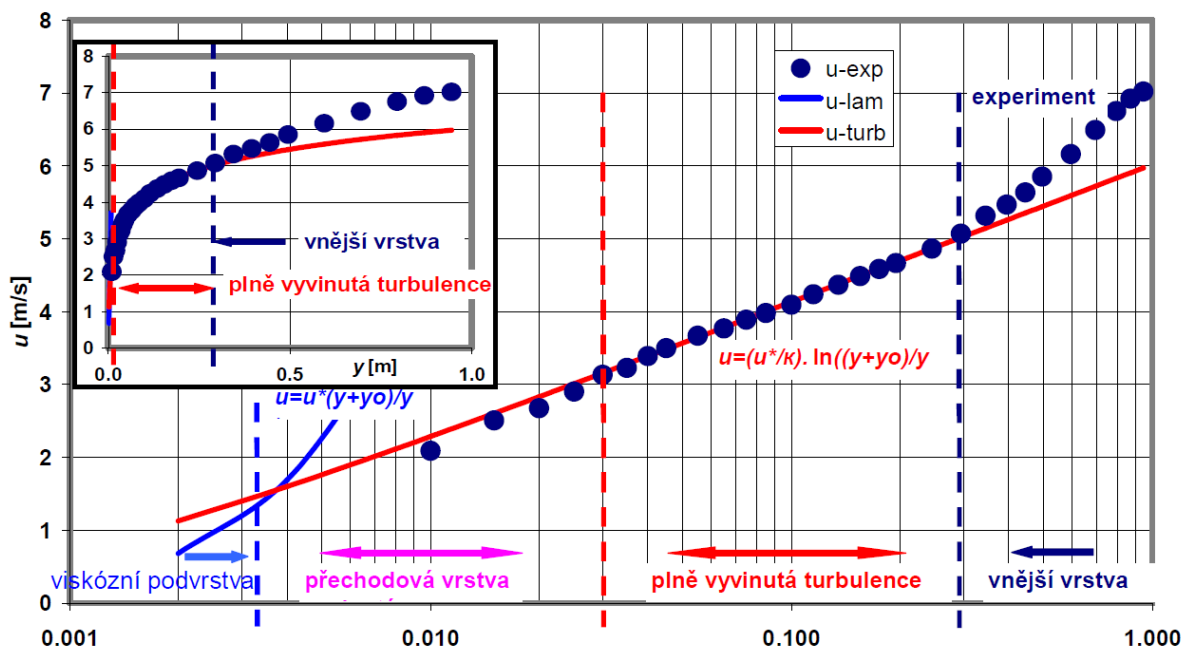
Ve své základní diferenciální formě však není možné některé z výše uvedených členů přímo řešit. Jedná se hlavně o členy turbulentního transportu a produkce a destrukční míry disipace. Pomocí zavedení řady aproximací, korelačních vztahů a konstant je však možné docílit již

řešitelné formy transportních rovnic pro  $k$  a  $\varepsilon$ . Tyto rovnice využívané v Ansys Fluent jsou uvedeny v publikaci [15; str.52].

Turbulentní viskozita je pak určena pomocí vztahu uvedeného v publikaci [15; str.53]. Ta je závislá především na proměnné  $C_\mu$ , kvadrátu *turbulentní kinetické energie*  $k$ , *rychlosti turbulentní disipace*  $\varepsilon$  a hustotě.

## 5.7 Modelování proudění u stěny – Dvouvrstvý model (Enhanced Wall Treatment)

V případě modelování proudění v blízkosti stěn je nutné zohlednit rychle se měnící veličiny v této oblasti. Nachází se zde mezní vrstva, v jejíž části, která se nachází těsně u stěny je potlačena turbulence a kde se značně projevuje přenos hybnosti a skalárních veličin. Reynoldsova napětí včetně gradientu střední rychlosti zase způsobují ve vnější části značnou produkci turbulentní kinetické energie. Způsob, jakým se zohlední výše uvedené účinky, je zásadní pro výslednou přesnost numerického řešení. [17]



Obr. 5.16 Rozdělení oblasti v blízkosti stěny. [17]

Obrázek 5.16 ukazuje rozložení oblasti v blízkosti stěny. Nejbližše stěně se nachází viskózní podvrstva, ve které je proudění téměř laminární. Na přenos hybnosti, tepla a hmotnosti má hlavní vliv molekulová viskozita. V přechodové vrstvě se vyskytují jak účinky molekulové viskozity, tak i turbulence. Tato vrstva s rostoucí vzdáleností od stěny následně přechází v oblast již plně vyvinuté turbulence. [17]

Podle charakteru proudění nebo dle potřeb úlohy lze tuto oblast zohlednit v numerickém řešení pomocí stěnových funkcí nebo pomocí dvouvrstvého modelu. Použití stěnových funkcí je vhodné v případech proudění s vysokými Reynoldsovými čísly nebo tam, kde je proudění vystaveno účinkům tlakového gradientu a nerovnováhy. Jestliže ale proudění neodpovídá těmto předpokladům a vykazuje známky silných tlakových gradientů vedoucí k odtržení mezní vrstvy, značného vlivu stěny, nízkých  $Re$  nebo významného působení objemových sil, je pak vhodné použít dvouvrstvý model. [15] [17]

Tento model pokrývá oblast, která je rozdělena na dvě části. Jedna zahrnuje projevy viskozity a druhá projevy turbulence. Vzájemná hranice je definována pomocí *turbulentního Reynoldsova čísla*  $Re^{(t)}$  viz vztah (5-43)

$$Re^{(t)} \equiv \frac{\rho \sqrt{k \bar{n}}}{\mu} \quad (5-33)$$

kde  $k$  je *turbulentní kinetická energie* a  $n$  je *normálová vzdálenost středu buňky od stěny*.

Wolfensteinův jednorovnicový model je aplikován v oblastech ovlivněných viskozitou v blízkosti stěny, kde *turbulentní viskozita*  $\mu^{(t)}$  a *rychlost turbulentní disipace*  $\varepsilon$  jsou počítány vztahy (5-44). [17]

$$\mu^{(t)} = \rho C_{\mu} k^{\frac{1}{2}} l_{\mu}; \quad \varepsilon = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l_{\varepsilon}} \quad (5-34)$$

kde *délková měřítko*  $l_{\mu}$  a  $l_{\varepsilon}$  jsou definována na základě vztahů uvedených v publikaci [17; str. 56]



## 6. Numerické simulace sinusového filtru

V následujícím textu je uveden detailní popis a nastavení případů numerické simulace teplotního rozložení sinusového filtru během jeho funkce. 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 v modulech Transient Thermal a Fluent a pro vybraný případ v software STAR-CCM+ za účelem vzájemného porovnání. Simulace byly realizovány jak pro případy přirozené konvekce tak i nucené s postupným zvyšováním komplexnosti geometrie modelu sinusového filtru. V jednotlivých simulacích je také zohledněn vliv otevřeného i částečně uzavřeného prostředí s aktivním chlazením.

### 6.1 Přehled simulovaných variant

Pro jednodušší orientaci byl vytvořen tabulkový přehled všech geometrií sinusového filtru, které byly implementovány do numerických simulací teplotního pole. Lze v něm nalézt, pro jaký případ konvekce byla použita daná geometrie a v jakém softwaru byla provedena numerická analýza. Všechny uvedené varianty jsou detailně popsány v následujících kapitolách.

<i>Úroveň detailů geometrie</i>	<i>Přirozená konvekce (otevřené prostředí)</i>			<i>Nucená konvekce (aktivní chlazení)</i>
<b>Zjednodušená</b>	Ansys Transient Thermal (A1)	Ansys Fluent (A2)	STAR-CCM+ (A3)	---
<b>Středně detailní</b>	---	Ansys Fluent (B1)	---	---
<b>Detailní</b>	---	Ansys Fluent (C1, C2)	---	Ansys Fluent (D1)

Tab. 6.1 Přehled simulovaných variant

### 6.2 Varianta A1 – zjednodušená geometrie v Ansys Transient Thermal

Ansys Mechanical je aplikace v prostředí Workbench ve kterém lze provádět řadu numerických simulací včetně simulací napětí, vibrací, tepelných, termoelektrických a magnetostatických [21]. Jedním z podmodulů pro tepelné simulace je Transient Thermal ze kterého je možné získat časově závislé teplotní pole.

Varianta A1 má za cíl simulovat teplotní pole sinusového filtru v otevřeném prostředí (například místnosti) bez aktivního chlazení. Přestup tepla do okolí je tak realizován jen

s pomocí přirozené konvekce. Zahrnuje zjednodušený geometrický model tlumivky sinusového filtru s charakteristickými rozměry dle produktové specifikace sinusového filtru. V této variantě jsou zanedbány některé geometrické prvky včetně kondenzátorů. Z tohoto důvodu bude model nazýván „tlumivkou sinusového filtru“ avšak v ostatních simulacích kde jsou již kondenzátory zohledněny, bude používán termín „sinusový filtr“.

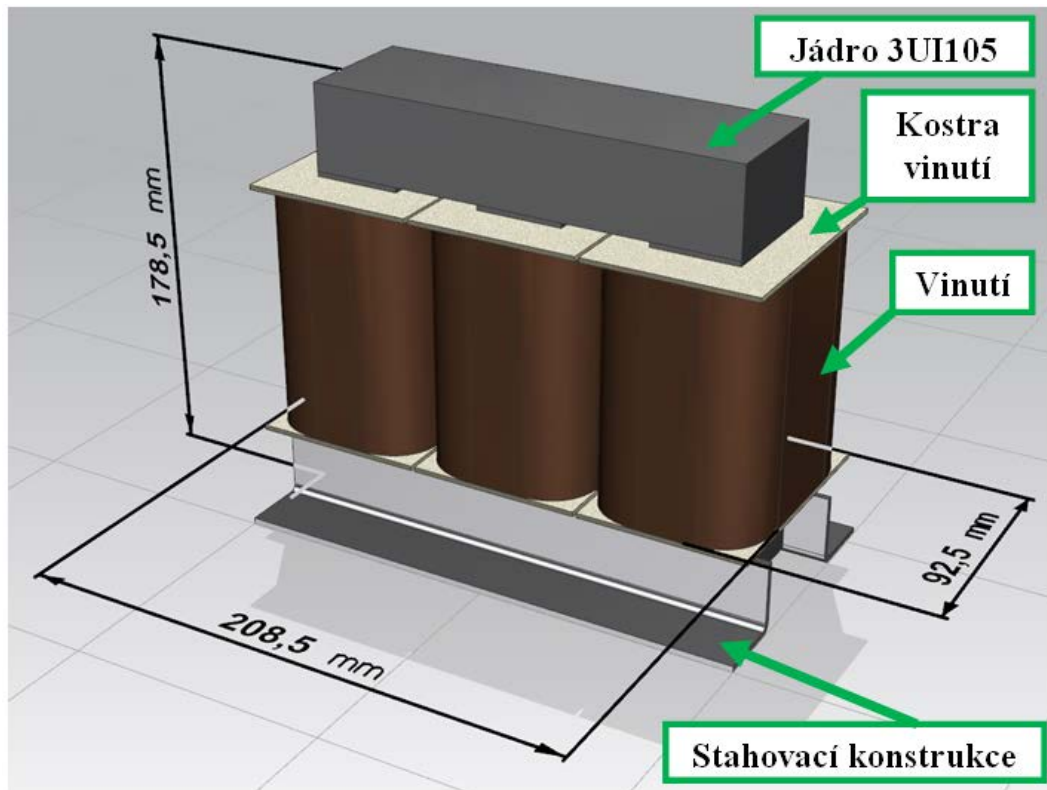
Lze tak očekávat, že výsledné teplotní rozložení nemusí v porovnání s experimentálními validovanými výsledky být zcela totožné, avšak použití této koncepce výpočtu v případě předběžných návrhů sinusových filtrů může být díky sníženým nárokům na výpočetní hardware dostačující.

Další specifikum této varianty spočívá ve výpočtu *součinitele přestupu tepla  $a$*  na základě kritériálních rovnic (kapitola 5.2.5) a dosazením jeho hodnot do simulace jako okrajové podmínky. Vliv okolního prostředí na přestup tepla z tlumivky sinusového filtru je tak již definován touto hodnotou a není potřeba ho „fyzicky“ modelovat sítí.

Úskalí tohoto postupu však spočívá v nutnosti spolehnout se na výpočetní vztahy, které jsou tvořeny korelací experimentálních dat získaných z experimentálních měření řady jiných autorů. Jelikož tyto vztahy nebyly cíleně tvořeny pro úlohy prezentované v této práci, je tak potřeba prostudovat řadu publikací a vyhledat takové vztahy, které nejlépe této úloze odpovídají, například [14], [22], [23] nebo [24]. Do simulace se tak v již rámci tohoto postupu zanáší chyba, která se projeví i ve výsledném teplotním poli. Řešením by mohla být realizace řady vlastních experimentů koncipovaných pro konkrétní úlohu a na základě získaných dat korelovat nové vztahy pro výpočet součinitele tepla. Tyto experimenty však vyžadují značné množství hmotných prostředků a spadají tak nad rámec této práce.

### **6.2.1 Geometrie a materiály**

Jak již bylo naznačeno v úvodu této kapitoly, geometrie pro výpočetní síť této simulace je značně zjednodušená z důvodu snížení hardwarových nároků a urychlení výpočetního času. Celá sestava se skládá z jádra, koster vinutí, vinutí a L-profilů stahovací konstrukce. Neuvažoval se tak přestup tepla přes spojovací elementy a jejich izolace, kondenzátory, držák kondenzátorů a napájecí kabely. Povrch vinutí tvoří v tomto případě hladká stěna. Kompletní model včetně jeho rozměrů je možno vidět níže na obrázku 6.1.



Obr. 6.1 Zjednodušený CAD model tlumivky sinusového filtru

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. Parametry jednotlivých materiálů je možno najít v tabulce 6.2. Pro optimalizaci modelové sítě nebylo uvažováno žebrování na horizontálních plochách kostry. Materiál L-profilu stahovací konstrukce odpovídá vlastnostem uhlíkové oceli.

<i>Komponenta</i>	<i>Hustota <math>\rho</math> [<math>kg \cdot m^{-3}</math>]</i>	<i>Měrná tepelná kapacita <math>c_p</math> [<math>J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}</math>]</i>	<i>Tepelná vodivost <math>\lambda</math> [<math>W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}</math>]</i>
<b>Jádro 3UI105</b>	7850	490	60,5
<b>Kostra vinutí</b>	1500	1040	0,25
<b>Cívka</b>	8933	386	400
<b>Stahovací konstrukce (L-profilu)</b>	8030	502,5	16,3

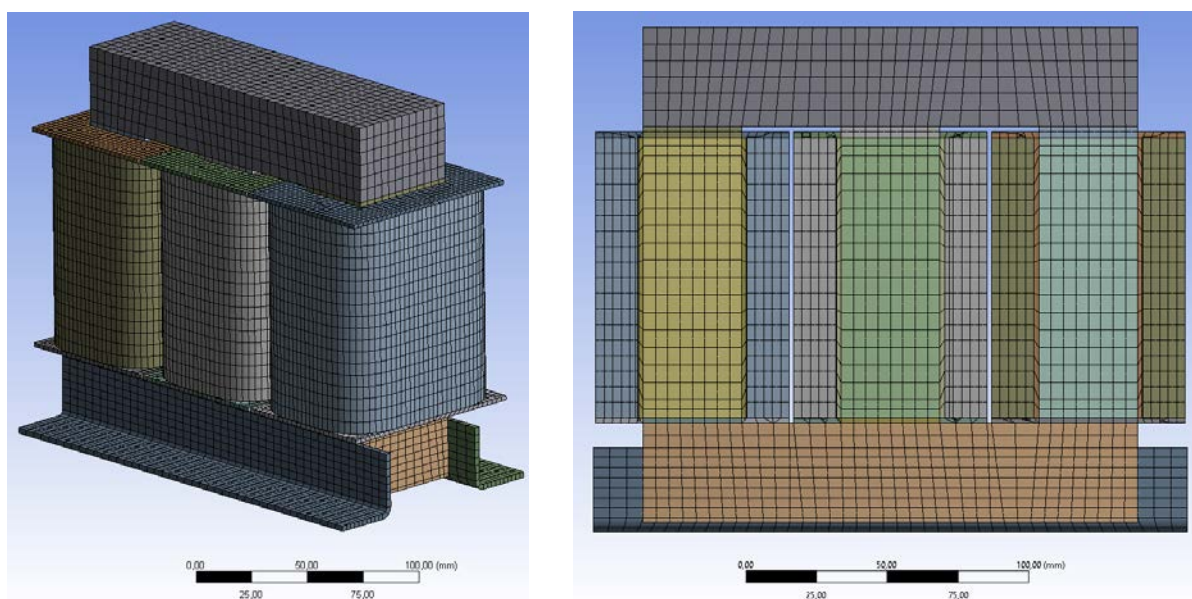
Tab. 6.2 Materiálové vlastnosti

## 6.2.2 Síť (Meshing)

Síťování proběhlo v prostředí Ansys Workbench za použití integrované aplikace Ansys Meshing. Značná většina geometrie je vysíťována pomocí šestistěnných elementů. Dosáhne se tak výrazného snížení počtu elementů oproti případu, kdy jsou například použity elementy jehlanovitého tvaru. Základní velikost elementu byla nastavena na hodnotu 6 mm. V případě geometrie koster vinutí se dosáhlo vysíťování pomocí šestistěnných elementů aplikací funkce „Hex Dominant Method“. Tato geometrie se také vyznačuje relativně tenkou tloušťkou stěn v poměru k ostatním rozměrům. Z tohoto důvodu byla současně na tuto geometrii aplikována i funkce „Body Sizing“ pomocí které se snížila hodnota velikosti elementu na 3 mm. Výběr dalších nastavení je uveden v tabulce 6.3. Ukázka sítě včetně podélného řezu je zobrazena na obrázku 6.3.

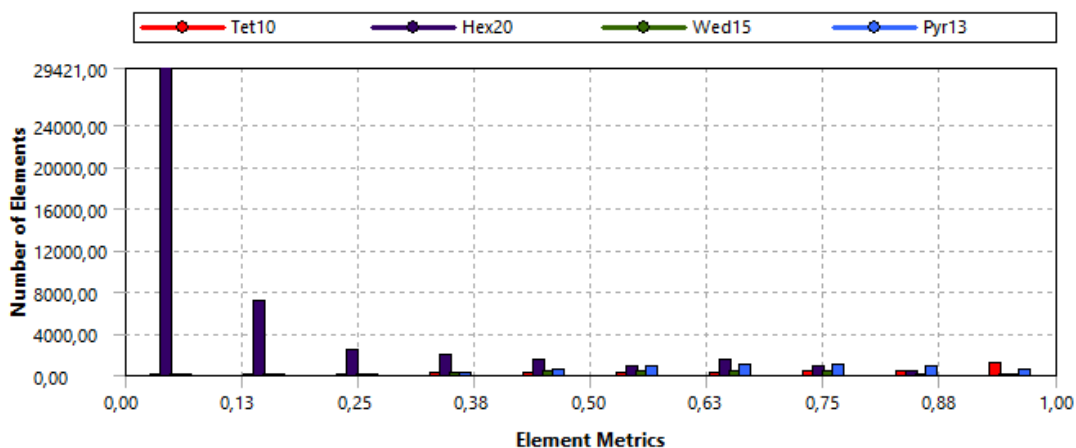
<i>Parametr</i>	<i>Nastavení</i>
<b>Physics Preference</b>	Mechanical
<b>Size function</b>	Adaptive
<b>Relevance Center</b>	Coarse
<b>Smoothing</b>	Medium
<b>Element size</b>	6 mm
<b>Automatic Inflation</b>	None

Tab. 6.3 Výběr dalších parametrů nastavení sítě



Obr. 6.2 Vlevo - síť modelu tlumivky sinusového filtru; vpravo – podélný řez sítě

Celkový počet elementů sítě dosáhl hodnoty 53 936. Míra zkosení většiny elementů se pohybuje v rozmezí od 0,05 do 0,25. Toto indikuje celkově dobrou kvalitu sítě. Element s největší mírou zkosení má hodnotu 0,95. Statistika míry zkosení pro tuto síť je zobrazena na obrázku 6.3.



Obr. 6.3 Statistika míry zkosení elementů sítě

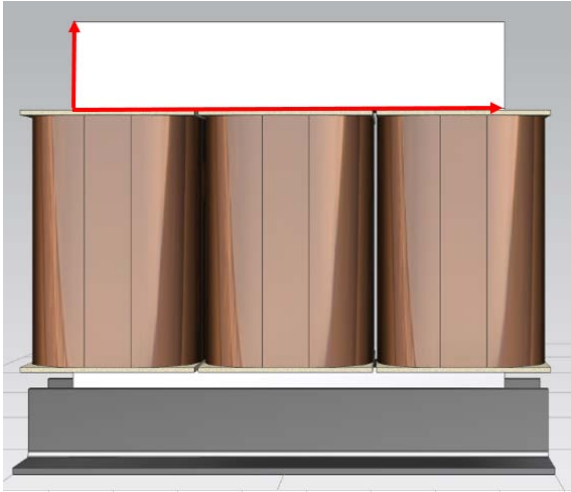
### 6.2.3 Okrajové podmínky

Do popisovaného způsobu simulace vstupují celkem tři druhy parametrů ve formě okrajových podmínek. Jedná se o teplotu okolí, tepelný tok a součinitel přestupu tepla.

Jedním z parametrů vstupujícím do výpočtu je počáteční teplota okolního prostředí. Protože při experimentální validaci byla teplota okolí 15°C, do simulace byla tedy uvažována taktéž.

Okrajová podmínka tepelného toku byla plošně aplikována na jádro a cívky sinusového filtru. Podle dat z kapitoly 4.3 je na jádře ztrátový výkon 17,2W/vinutí. Ztrátový výkon na samostatném vinutí je 15,9W. Pro každý z těchto komponent byla použita samostatně funkce „Heat Flux“ pomocí které se hodnota ztrátového výkonu přepočtená úměrně vzhledem k ploše aplikovala na danou geometrii jádra a vinutí.

Okrajová podmínka pro konvektivní přenos tepla je definována hodnotou *součinitele přestupu tepla*  $\alpha$ . Pro výpočet všech součinitelů přestupu tepla je uvažován výpočetní model a vztahy přirozené konvekce. Za okolní médium je uvažován vzduch a jeho vlastnosti jsou teplotně závislé. Na geometrii modelu tlumivky sinusového filtru bylo vybráno 12 geometrických regionů s ohledem na korelace uvedené v publikacích [14], [22], [23] a [24]. Díky tomu dostáváme pro každou geometrickou oblast jiné hodnoty Grashofova, Prandtlova, Rayleighova a Nusseltova čísla na nichž je součinitel přestupu tepla závislý.

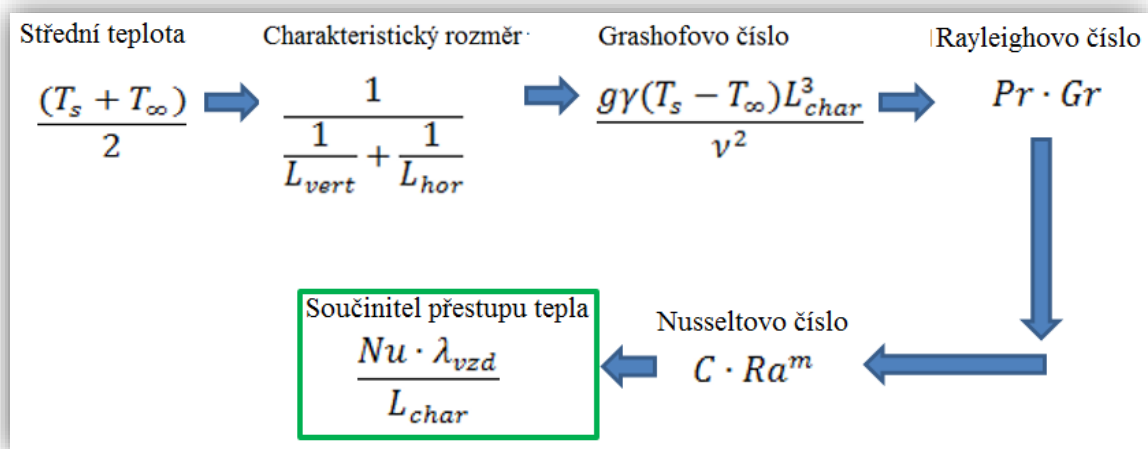


**Obr. 6.4** Ukázka plochy geometrického regionu obrázku 6.4.

Schéma výpočtu je naznačeno na obrázku 6.5. Zde se nejprve se určí střední teplota média, na základě které se stanoví parametry vzduchu vstupující do dalšího výpočtu, například *kinematická viskozita*  $\nu$ , *součinitel objemové roztažnosti*  $\gamma$ , *tepelná vodivost*  $\lambda$  nebo Prandtlovo číslo.

Charakteristický rozměr je následně určen vztahem uvedeným ve schématu s dosazenými horizontálními a vertikálními rozměry podle

Nyní jsou již připraveny všechny vstupní veličiny pro výpočet Grashofova čísla a následně pak Rayleighova čísla. Jejich součin se dosadí do korelačního vztahu pro výpočet Nusseltova čísla pro laminární proudění volné konvekce. To je neznámá v posledním vztahu, který určuje hodnotu *součinitele přestupu tepla*  $\alpha$ .



**Obr. 6.5** Schéma výpočtu součinitele přestupu tepla

Rozmezí hodnot součinitele přestupu tepla pro 12 geometrických regionů se pohybuje v rozmezí od 1,3 do 12,9 [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]. Tyto hodnoty jsou typické pro režim laminárního proudění vzduchu přirozené konvekce. V prostředí programu Ansys Transient Thermal se následně každá z těchto hodnot aplikovala pro konkrétní region pomocí funkce „Convection“.

#### 6.2.4 Nastavení numerického řešení

Průběh ohřevu tlumivky sinusového filtru je simulován jako časově závislý. Za míru konvergence řešení se považuje ustálení maximální dosažené teploty v geometrii tlumivky sinusového filtru, nebo pokud přírůstek teploty za jeden časový krok nepřekročí 0,001 °C. Maximální čas, pro který je řešení simulováno má hodnotu 80000 s (přibližně 22,2 h). Po dosažení této hodnoty se výpočet bez ohledu na ustálený stav teploty přeručí. Na základě zkušeností s ohřevem obdobných sinusových filtrů je však očekáváno, že tato hodnota je více než dostatečná.

Časový krok se v celém časovém úseku, pro který je řešení simulováno mění adaptivně. Na začátku řešení, kdy teplota má tendenci strmě růst, je krok automaticky v průběhu simulace nastaven jemněji, avšak ke konci, kdy je teplota téměř ustálená se krok prodlužuje. Velikost časového kroku byla omezena limitně. Může se tak měnit v rozmezí 30 až 3000 s.

### 6.3 Varianta A2 – zjednodušená geometrie v Ansys Fluent

Účelem varianty A2 je otestování alternativního způsobu návrhu simulace teplotního pole tlumivky sinusového filtru. Její podobnost z variantou A1 je záměrná, liší se ale v několika podstatných skutečnostech, u kterých lze očekávat zásadní vliv na finální rozložení teplotního pole. Hlavní motivací testování této koncepce je fakt, že v předešlé variantě A1 se množství tepla odvedené přirozenou konvekcí do okolního prostředí definuje součinitelem přestupu tepla  $\alpha$ . Ten, jak bylo již vysvětleno v úvodu kapitoly 6.1, je definován za pomoci kritériálních rovnic, které v případě, že nejsou korelované na geometrii konkrétního případu tak zanášejí do výpočtu jistou nepřesnost, která se jistě projeví ve výsledném teplotním poli. Krom realizace experimentálního měření, následné korelace získaných dat a vytvoření tak vlastního vztahu cíleného na konkrétní případ, existuje ještě další způsob jak tuto potenciální nepřesnost téměř eliminovat. Jedná se o využití numerických CFD softwarů pro výpočet dynamiky tekutin.

Na trhu existuje celá řada komerčních i volně šiřitelných CFD softwarů. Mezi tyto softwary rovněž patří i Ansys Fluent. Používá se na modelování celé řady multifyzikálních případů které mají souvislost s dynamikou tekutin. Do této oblasti náleží například modelování turbulentního proudění, přestupu tepla, spalovacích procesů nebo multifázových změn.

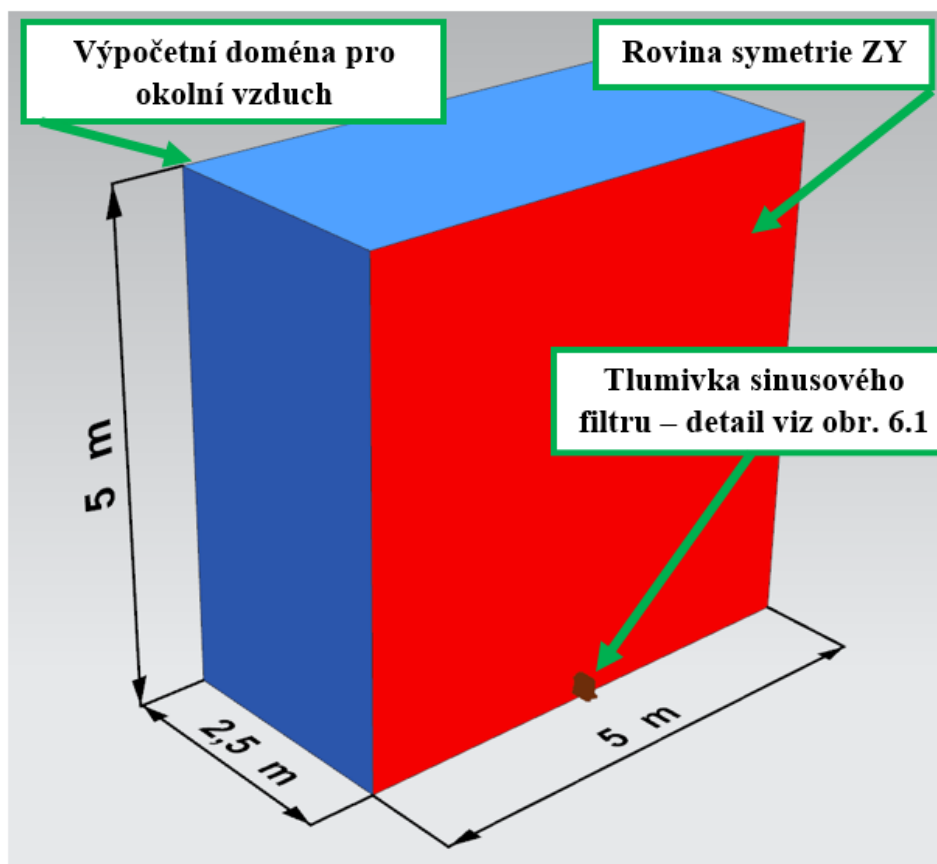
V případě modelování přestupu tepla do okolí, spočívá tak výhoda v numerickém řešení veličin proudového pole obklopujícího zdroj tepla, v tomto případě tlumivku sinusového filtru. Na základě hodnot těchto veličin (rychlost, tlak, popř. turbulentní kinetická energie a rychlost

turbulentní disipace) je určen součinitel přestupu tepla v každém bodě sítě na rozhraní pevného tělesa a tekutiny již jako výsledek simulace. Na jeho korektnost má pak zásadní vliv přesnost geometrie modelu a tepelný tok generovaný zdrojem tepla.

Vhodnost tohoto přístupu se projeví především při řešení geometricky komplikovanějších geometrií, kdy při dostatečné hustotě sítě zahrnující i jemné detaily lze dosáhnout výpočtu přesnějšího rozložení teplotního pole s několikanásobně nižším úsilím než v případě využití korelovaných vztahů.

### 6.3.1 Geometrie a materiály

Rozměry modelu tlumivky sinusového filtru jsou totožné jako v případě varianty A1. Z důvodu výpočtu proudového pole v okolí, byla do modelu přidána geometrie reprezentující výpočetní doménu vzduchu a plně obklopující geometrii tlumivky sinusového filtru. Rozměry této domény (5 x 5 x 5 m) odpovídají přibližným rozměrům laboratorního prostředí, ve kterém se ohřev experimentálně ověřoval. Řešení bylo koncipováno jako symetrické v rovině ZY pro snížení výpočetního času. Kompletní CAD model lze vidět na obrázku 6.6.



Obr. 6.6 CAD model symetrický podle roviny ZY



Materiálové parametry aplikované na geometrii tlumivky sinusového filtru jsou totožné s materiály uvedené v tabulce 6.2.

Řešení případů proudění přirozené konvekce klade zvýšené časové nároky k dosažení konvergence řešení. Běžně se teploty ustalují a po několika tisících iteracích. Konvergenci lze urychlit využitím Boussinesqova modelu. Tento model považuje hustotu látky za konstantu oproti standardnímu přístupu, kde je hustota látky funkcí teploty. V případě že změny hustoty jsou malé, přesnost Boussinesqovy aproximace je dostačující. Momentová rovnice má pak tvar (6-1). [25]

$$(\rho - \rho_0)g \approx -\rho_0\gamma(T - T_0)g \quad (6-1)$$

kde  $\rho_0$  je konstantní hustota,  $T_0$  operační teplota,  $\gamma$  je součinitel objemové roztažnosti a  $g$  je gravitační zrychlení. [25]

Nastavení Boussinesqova modelu má přímou návaznost na parametry vzduchu vstupující do výpočtu a jsou uvedeny v tabulce 6.4.

<i>Médium</i>	<i>Hustota <math>\rho</math></i> [kg · m <sup>-3</sup> ]	<i>Měrná tepelná kapacita <math>c_p</math></i> [J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	<i>Tepelná vodivost <math>\lambda</math></i> [W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	<i>Dynamická viskozita <math>\mu</math></i> [kg · m <sup>-1</sup> · s <sup>-1</sup> ]	<i>Součinitel objemové roztažnosti <math>\gamma</math></i> [K <sup>-1</sup> ]
<b>Vzduch</b>	1,22 (boussinesq)	1006,43	0,0242	1,7894e-0,5	0,003

Tab. 6.4 Parametry vzduchu

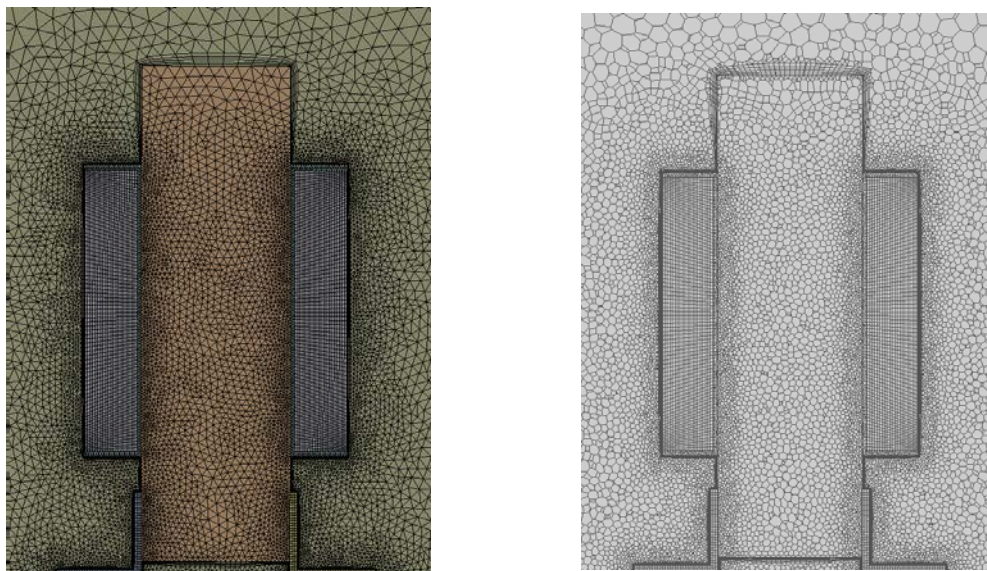
### 6.3.2 Sít' (Meshing)

Stejně jako v případě varianty A1, sít'ování proběhlo v prostředí Ansys Workbench za použití integrované aplikace Ansys Meshing. Geometrie vinutí a L-profilů stahovací konstrukce je vysít'ována pomocí šestistěnných elementů, zbytek modelu pak pomocí elementů jehlanovitého typu. Ve výpočetní doméně pro okolní vzduch byla na jejím rozhraní s objektem a vygenerována tzv. „inflation“ vrstva, která slouží pro výpočet veličin proudění na stěně a v mezní vrstvě.

<i>Parametr</i>	<i>Nastavení</i>
<b>Physics Preference</b>	CFD
<b>Solver Preference</b>	Fluent
<b>Size function</b>	Proximity and Curvature
<b>Relevance Center</b>	Fine
<b>Smoothing</b>	High
<b>Min. Size</b>	0,9 mm
<b>Max. Tet Size</b>	64 mm
<b>Growth Rate</b>	1,1

Tab. 6.5 Výběr parametrů nastavení sítě

Po vysíťování geometrie v Ansys Meshing se celá síť importovala do programu Ansys Fluent, kde byly všechny jehlanovité elementy překonvertovány na elementy polyhedrálního typu. Tato konverze má za následek snížení celkového počtu elementů sítě, zvýšení její kvality a snížení výpočetního času.

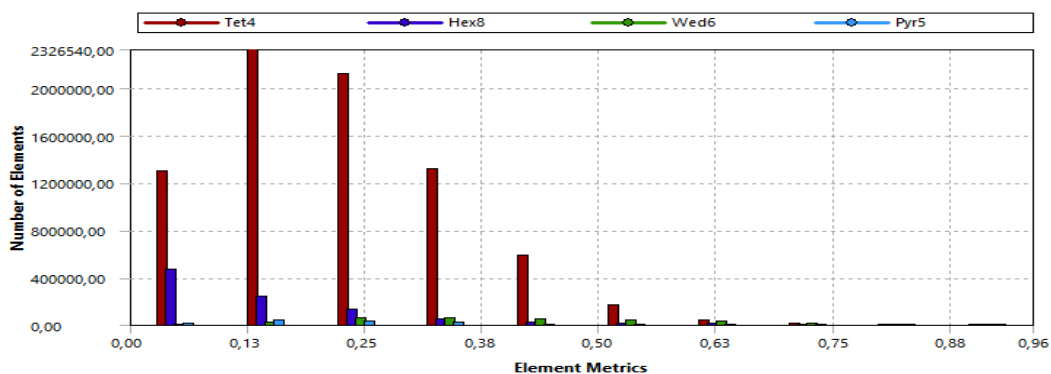


**Obr. 6.7** Vlevo – řez sítě z Ansys Meshing; vpravo řez sítě po konverzi v Ansys Fluent

Přehled nastavení sítě a dalších parametrů je uveden v tabulce 6.5. Porovnání příčného řezu sítě tlumivky sinusového filtru a přilehlým okolím z programu Ansys Meshing a finální sítě z programu Ansys Fluent je zobrazen na obrázku 6.7.

Celkový počet elementů sítě z Ansys Meshing dosáhl hodnoty 9 116 044. Míra zkosení většiny elementů se pohybuje v rozmezí od 0,04 do 0,52. Statistika míry zkosení pro tuto síť je zobrazena na obrázku 6.8.

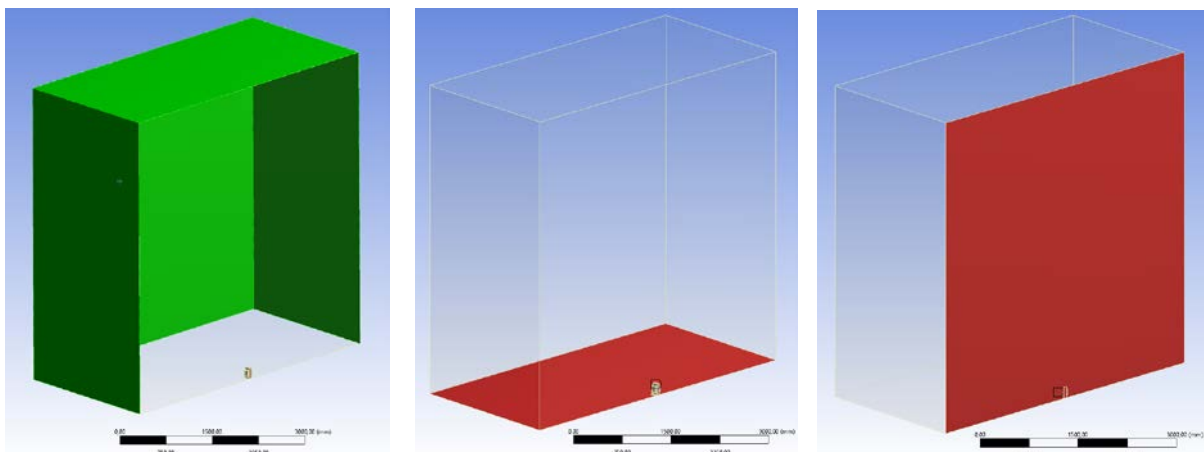
Konverze tetrahedrálních elementů na polyherdrální snížila celkový počet elementů v síti přibližně o 57% na hodnotu 3 906 443.



**Obr. 6.8** Statistika míry zkosení elementů sítě

### 6.3.3 Okrajové podmínky a tepelné zdroje

Na výpočetní doménu vzduchu jsou aplikovány okrajové podmínky pressure outlet, wall a v rovině ZY okrajová podmínka symetrie. V rámci podmínky pressure outlet je na krajích výpočetní domény specifikován statický tlak na hodnotu 0 Pa a současně teplota 15 °C.



Obr. 6.9 Vlevo – OP pressure outlet; uprostřed – OP wall; vpravo – OP symetrie

Podmínka wall je přiřazena krajní ploše domény rovnoběžné s rovinou XY. Ukázka přiřazení okrajových podmínek (OP) je vidět na obrázku 6.9.

Tepelný tok ve formě ztrátových výkonů je objemově aplikován na geometrii jádra a vinutí. Jeho hodnoty jsou totožné s hodnotami v kapitole 6.1.3.

### 6.3.4 Nastavení numerického řešení

Řešení úlohy bylo provedeno v Ansys Fluent v režimu double precision jako časově závislé. Uvažován byl i vliv gravitačního zrychlení v ose Z o hodnotě  $-9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

Z předchozího řešení varianty A1 je známo, že Rayleighovo číslo pro danou geometrii nepřesahuje hodnotu  $2 \cdot 10^6$ . V dokumentaci k Ansys Fluent [15] je uvedeno, že laminární charakter proudění stále převažuje do hodnot Rayleighova čísla až  $10^8$ . Vzhledem k této skutečnosti byl v simulaci použit laminární model proudění.

Výpočet přestupu tepla byl zajištěn pomocí zapnutého energetického modelu. Mezi parametry do Boussinesqova modelu byla uvažována operační teplota 288 K (15 °C) a operační hustota  $1,22 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . K urychlení konvergence

<i>Parametr</i>	<i>Nastavení</i>
<b>Courant number</b>	200
<i>Relaxation factors</i>	
<b>Momentum</b>	0,75
<b>Pressure</b>	0,75
<i>Under-relaxation factors</i>	
<b>Density</b>	1
<b>Force</b>	1
<b>Energy</b>	1

Tab. 6.6 Přehled relaxačních faktorů

byl nastaven Pressure-based Coupled algoritmus kde interpolační schéma pro tlak je nastaveno na Second Order. Moment a energie využívají shodně interpolačního schématu Second Order Upwind. V rámci počátečních (iniciačních) podmínek řešení úlohy byla shodně nastavena hodnota rychlosti proudění ve směrech X, Y a Z na  $0,001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , statický tlak na 0 Pa a teplota na 288 K (15 °C). Časový krok v řešení simulace byl nastaven na hodnotu 1200 s. Během toho kroku je řešičem provedeno 8 iterací. V tabulce 6.6 je uveden přehled použitých výchozích hodnot relaxačních faktorů a Courantova čísla.

## **6.4 Varianta A3 – zjednodušená geometrie ve STAR-CCM+**

Koncept provedení varianty A3 odpovídá již dříve provedenému konceptu návrhu simulace teplotního pole tlumivky sinusového filtru varianty A2. Záměrem je realizovat stejnou simulaci teplotního pole v případě přestupů tepla do okolí přirozenou konvekcí, při uvažování totožných okrajových podmínek, za účelem porovnání dvou CFD softwarů z různých hledisek.

Jedním z aspektů může být například dosažená přesnost výsledků a jejich shoda s experimentem. Dalším jsou požadavky na hardware a s tím související časové nároky celkového řešení. S touto oblastí souvisí i uživatelská přívětivost softwaru současně s náročností implementace koncepce simulovaného případu.

Za tímto účelem byla simulace provedena v softwaru STAR-CCM+. Tento program vytváří komplexní platformu pro multifyzikální simulace. Zahrnuje tak oblasti výpočtů aeroakustiky, dynamiky tekutin, pevnostních výpočtů, výpočtů přestupů tepla, elektromagnetismu a dalších.

### **6.4.1 Geometrie a materiály**

Geometrie modelu výpočetní domény vzduchu a tlumivky sinusového filtru je totožná s geometrií použitou ve variantě A2, kapitole 6.2.1. Její rozměry jsou tak odpovídají obrázku 6.6.

V rámci urychlení konvergence byl rovněž využit Boussinesqův model. Parametry vzduchu tak byly nastaveny dle tabulky 6.4. Parametry ostatních materiálů definovány dle tabulky 6.2.

### **6.4.2 Síť (Meshing)**

V softwaru STAR-CCM+ je koncepce tvorby a nastavení numerických simulací z uživatelského hlediska odlišná v porovnání se softwarovými produkty firmy Ansys. Veškerá nastavení týkající se úprav a tvorby geometrie, síťování, definice fyzikálních modelů, definice parametrů řešení a finálního postprocessingu jsou zahrnuta v jednom stromě funkcí náležitěmu k dané úloze. Strom obsahuje řadu složek, ve kterých se následně vytvářejí nastavení dané

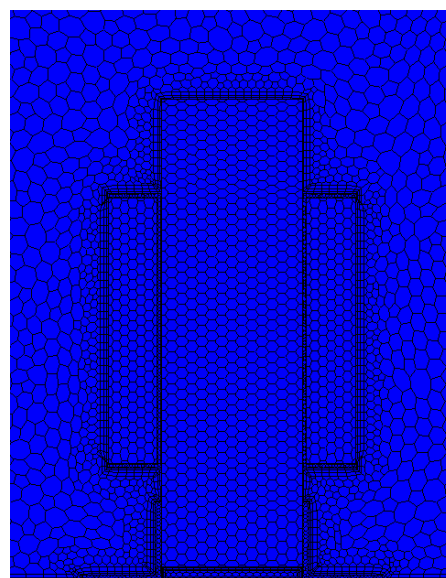
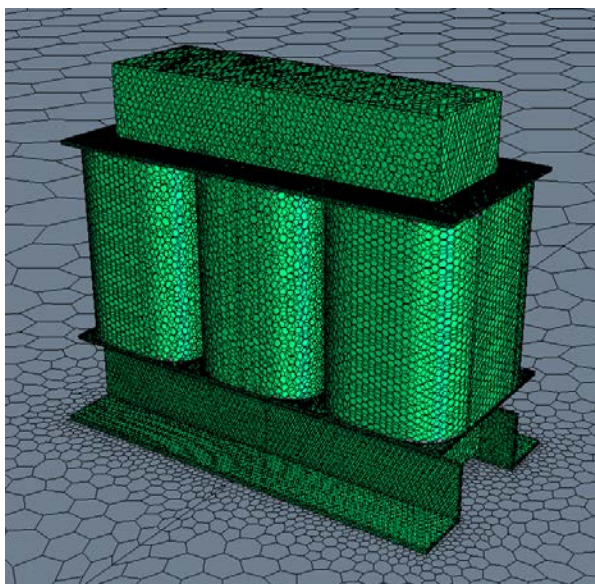
kategorie. Definice sítě pro simulaci tlumivky sinusového filtru je tak tvořena výše popsaným způsobem.

Do procesu vytvoření sítě je nejprve nutné zahrnout tzv. operaci „Imprint“. Ta vytvoří v místech, kde se jednotlivá geometrická tělesa stýkají kontaktní plochy, které budou dále využity pro výpočet fyzikálních veličin napříč celou geometrií.

Síť celé geometrie je tvořena elementy polyhedrálního typu. Na povrchu tlumivky sinusového filtru je rovněž vytvořena vrstva pro výpočet veličin v mezní

<i>Parametr</i>	<i>Nastavení</i>
<b>Mesher</b>	Surface Remesher
	Automatic Surface Repair
	Polyhedral Mesher
	Prism Layer mesher
<b>Mesher execution Mode</b>	Concurrent
<b>Base size</b>	400 mm
<b>Target Surface Size</b>	80 mm
<b>Minimum Surface Size</b>	1 mm
<b>Number of Prism Layers</b>	3

Tab. 6.7 Výběr parametrů nastavení sítě



**Obr. 6.10** Vlevo – polyhedrální síť tlumivky sinusového filtru; vpravo - řez sítí s přilehlým lokálním zjemněním vrstvě vysít'ovaná elementy hexahedrál'ního typu. V doméně pro výpočet veličin proudu vzduchu je zahrnuto lokální zjemnění sítě. Velikost elementu v této oblasti je 7 mm. Výběr dalších parametrů nastavení sítě je uveden v tabulce 6.7. Ukázka finálního vysít'ování geometrie je vidět na obrázku 6.10.

Celkový počet elementů sítě dosáhl hodnoty 598 215. V rámci kontroly kvality sítě je průměrná hodnota úhlu zkosení elementu 24,3°. Podle dokumentace [26] je element, u kterého hodnota úhlu zkosení překračuje 85° považován za špatný. Analýza kvality sítě však žádný element s touto nebo vyšší hodnotou neodhalila.

### 6.4.3 Okrajové podmínky a tepelné zdroje

Nastavení okrajových podmínek a jejich hodnot je totožné jako v případě kapitoly 6.2.3. Jediný rozdíl spočívá v aplikaci okrajové podmínky pressure inlet namísto pressure outlet. Lokace na krajích výpočetní domény, specifikace statického tlaku na hodnotu 0 Pa a současně teploty 15 °C je však také totožná.

Hodnoty ztrátových výkonů jsou rovněž identické s hodnotami uvedenými v kapitole 6.1.3.

### 6.4.4 Nastavení numerického řešení

Cílem nastavení numerického řešení a řešiče v softwaru STAR-CCM+ bylo dosáhnout pokud možno identického nastavení, jako v případě Ansys Fluent, pro účely pozdějšího porovnání. Pro úspěšné provedení simulace byl však brán ohled na doporučení, vycházející z dokumentace [26] pro daný typ úlohy. Některá nastavení se tak mohou lišit.

Řešení úlohy bylo provedeno v režimu double precision jako časově závislé. V případě nastavení kontinua vzduchu byl uvažován laminární režim proudění se zohledněním vlivu gravitačního zrychlení v ose Z o hodnotě  $-9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . Pro urychlení konvergence byl zapnut Boussinesqův model a řešič nastaven na coupled algoritmus. V kontinuu pevných materiálů byl uvažován model konstantní hustoty a rovněž coupled algoritmus řešiče. Pro výpočet bylo použito interpolační schéma prvního řádu. Courantovo číslo má hodnotu 200.

Hodnoty počátečních podmínek řešení úlohy jsou totožné s 6.2.4. tedy, rychlost proudění ve směrech X, Y a Z je  $0,001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , statický tlak na 0 Pa a teplota na 288 K (15 °C). Časový krok byl nastaven na hodnotu 1000 s kde během toho kroku je řešičem provedeno 5 iterací. Kritériem k ukončení simulace je s výjimkou ustálení teploty také maximální čas, pro který je řešení simulováno. V tomto případě je nastaven na hodnotu 60000 s (přibližně 16,7 h). Po dosažení tohoto času dojde k automatickému přerušení výpočtu.

## 6.5 Varianta B1 – středně detailní geometrie v Ansys Fluent

Varianta B1 je specifická především implementací vyššího stupně detailů do své geometrie. To se dotklo v první řadě geometrie vinutí, kde na povrchu bylo přidáno drážkování a vývody pro upínací oka. Na kostrách vinutí přibýlo podélné i příčné žebrování. Drobné modifikace byly také provedeny jak na jádře, tak i na stahovací konstrukci.

Došlo také k přidání dalších součástí a to především kondenzátorů včetně jejich držáku, upínacích ok pro napájecí kabely a v neposlední řadě také spojovacího a izolačního materiálu. V této fázi je tak již možné nazývat geometrii modelem sinusového filtru.

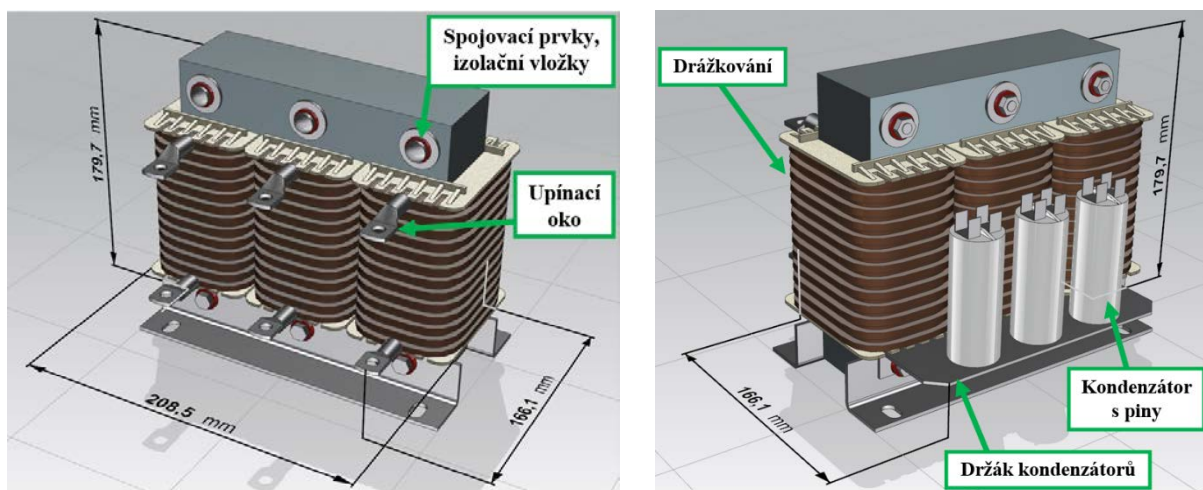
Účelem je zjistit, jakým způsobem se projeví geometrické změny na výsledném rozložení teplotního pole sinusového filtru. Koncept simulace tak zůstává stejný jako v případě varianty A2, tzn. numerický výpočet veličin proudového pole obklopujícího zdroj tepla a následně součinitelů přestupu tepla v každém elementu na rozhraní pevných a tekutinových domén.

### **6.5.1 Geometrie a materiály**

Základní komponenty tohoto modelu rozměrově vychází z varianty A1. Na geometrii jádra bylo promodelováno šest otvorů pro spojovací materiál. Geometrie kostry vinutí nyní zahrnuje podélné i příčné žebrování s viditelným zaoblením krajních rohů. Vnitřní struktura modelu kostry vinutí je beze změn. Vlivem technologie způsobu navíjení drátu tvořícího cívku vznikla na její vnější straně struktura drážek. Drážkování na vnější straně vinutí o průřezu 4 x 4,2 mm odpovídá svou velikostí průměrným hodnotám drážek na reálném filtru. Modifikací geometrie tímto způsobem lze očekávat přímý dopad na změnu součinitele přestupu tepla a tím i zlepšení odvádění tepla do okolí. Další úprava geometrie vinutí spočívá v promodelování vývodu, který bude následně v kontaktu s upínacími oky pro napájecí kabely. L-profily stahovací konstrukce nyní zohledňují oválné otvory sloužící pro upnutí sinusového filtru k základně a podélné zaoblení vzájemně kolmých stěn.

Do modelu bylo zahrnuto i několik dalších součástí, které v předchozí zjednodušené variantě nebyly zohledněny. Mezi tyto součásti patří i prvky spojovacího materiálu. Jedná se o standardizované ocelové šrouby, matice a podložky průměru M6. V modelu se nachází i izolační vložky vyrobené z PA6, které jsou v kontaktu s jádrem s šrouby. Měděná upínací oka tvoří kontaktní vazbu s vývody z vinutí. Na opačné straně modelu sinusového filtru byly přimodelovány kondenzátory včetně pinů a ocelový držák. Spodní kruhovitá plocha kondenzátorů je v tomto případě modelována tak, že doléhá na plochu držáku kde tak vzájemně tvoří těsný kontakt.

Středně detailní CAD model sinusového filtru je zobrazen na obrázku 6.11. Materiálové parametry lze nalézt v tabulce 6.8.



Obr. 6.11 Vlevo – středně detailní CAD model sinusového filtru – pohled I;  
vpravo – středně detailní CAD model sinusového filtru – pohled II

Geometrie domény pro výpočet vzduchu je totožná s doménou varianty A2. Rozměry jsou uvedené na obrázku 6.6 v kapitole 6.2.1. Model je znovu koncipován jako symetrický s rovinou ZY. Parametry vzduchu jsou rovněž totožné s variantou A2 a jsou uvedeny v tabulce 6.4. V doméně je opět využit Boussinesqův model.

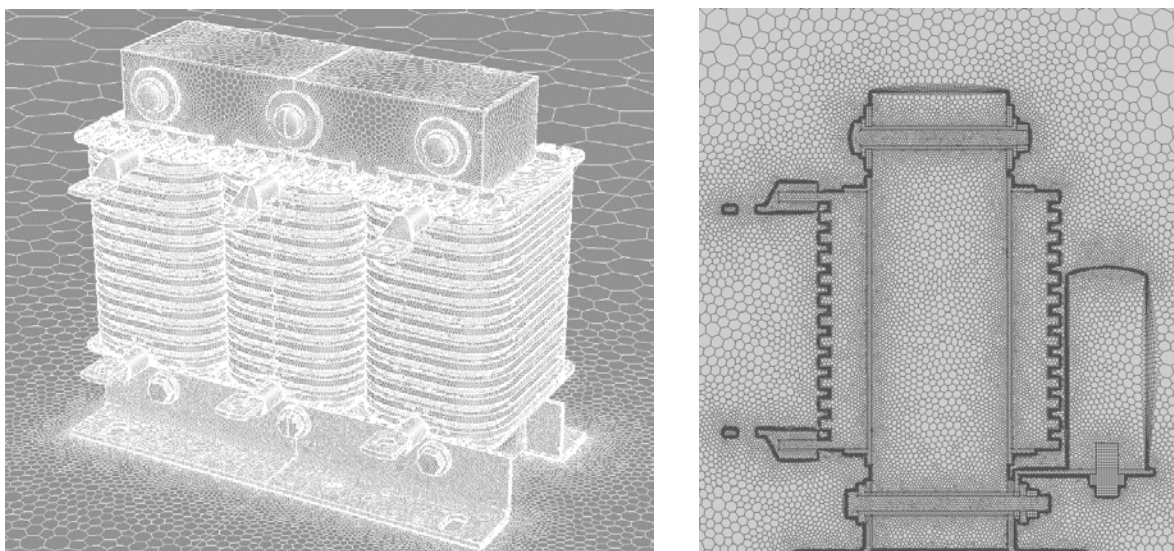
Komponenta	Hustota $\rho$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ]	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	Tepelná vodivost $\lambda$ [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
Jádro 3UI105	7850	490	60,5
Kostra vinutí, izolační vložka	1500	1040	0,25
Cívka, upínací oka	8933	386	400
Stahovací konstrukce, spojovací prvky, držák kondenzátorů	8030	502,5	16,3
Kondenzátor	1005	1765	0,19
Piny kondenzátorů	8978	381	387,6

Tab. 6.8 Materiálové vlastnosti

### 6.5.2 Síť (Meshing)

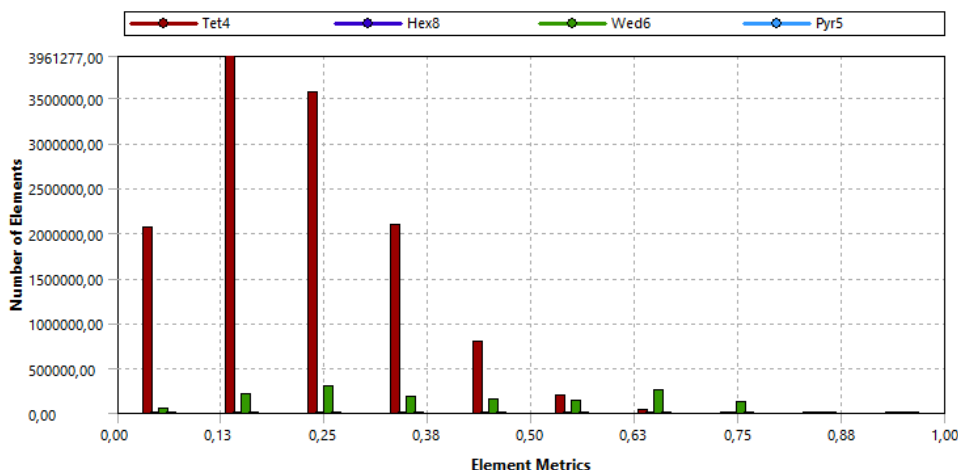
Stejně jako v případě varianty A2, síťování proběhlo za použití integrované aplikace Ansys Meshing. Celá geometrie je vysítována elementy jehlanovitého typu a následně převedena v programu Ansys Fluent na elementy polyhedrálního typu. Výpočetní doména pro okolní vzduch rovněž obsahuje inflation vrstvu. Přehled nastavení sítě a dalších parametrů je uveden v tabulce 6.6. Po stránce kvality sítě se totožné nastavení s verzí A2 projevilo jako dostatečné. Na obrázku 6.12 je vidět finální polyhedrální síť z programu Ansys Fluent včetně příčného řezu modelem.





**Obr. 6.12** Vlevo – polyhedrální síť sinusového filtru; vpravo - příčný řez sítí

Síť vytvořená v Ansys Meshing obsahuje 14 059 477 elementů. Míra zkosení většiny elementů se pohybuje v rozmezí od 0,04 do 0,44. Statistika míry zkosení je zobrazena na obrázku 6.13.



**Obr. 6.13** Statistika míry zkosení elementů sítě

Celkový počet elementů v síti se konverzí tetrahedrálních elementů na polyherdrální snížil přibližně o 62% na hodnotu 5 348 395.

### 6.5.3 Okrajové podmínky a tepelné zdroje

Okrajové podmínky jsou identické s variantou A2. Jejich popis lze najít v kapitole 6.2.3.

Okrajová podmínka tepelného toku nyní zahrnuje navíc v porovnání s variantami A1, A2 a A3 ztrátový výkon kondenzátorů, který byl objemově aplikován na geometrii o hodnotě 1W/kondenzátor.

#### **6.5.4 Nastavení numerického řešení**

Nastavení numerického řešení je identické s variantou A2. Nastavení je popsáno v kapitole 6.2.4.

### **6.6 Varianta C1 – detailní geometrie v Ansys Fluent**

Na základě průběžně získávaných zkušeností s numerickými analýzami předchozích variant vzešel impuls, realizovat simulaci teplotního pole sinusového filtru se zohledněním navazujících detailů. Úroveň propracovanosti geometrického modelu se tak ještě zvýšila. Změny na geometrii byly provedeny především formou dalšího rozpracování stávajících součástí, za účelem maximálního přiblížení se tvaru reálného výrobku a také přidáním geometrie těles z okolí, které mají potenciál ovlivnit výsledné teplotní pole sinusového filtru.

Jedním z těchto těles jsou napájecí kabely sinusového filtru včetně spojovacího materiálu. Dále také deska, na které byl sinusový filtr umístěn při validačním měření. Částečně jsou zohledněny i kabely kondenzátorů.

V rámci úprav stávajících komponent byly zohledněny vzduchové prostory, vznikající mezi kostrou vinutí a vinutím v důsledku navíjení drátu.

Účelem úlohy je opět simulovat situaci přirozené konvekce, je tak s výjimkou geometrických modifikací totožná s variantami A2 nebo B1.

#### **6.6.1 Geometrie a materiály**

Z hlediska geometrie lze o této variantě uvažovat jako o větší měrou propracované variantě B1. Byl brán důraz na provedení dalších modifikací, které by měly přímý dopad na zpřesnění rozložení teplotního pole.

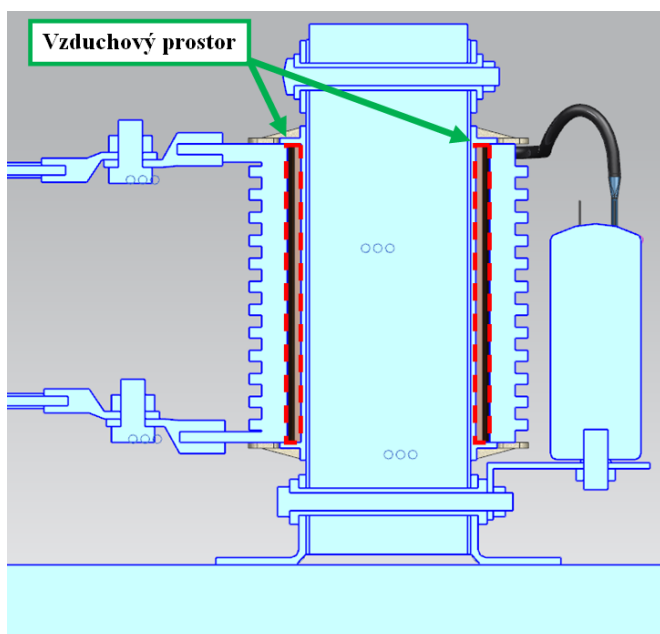
Geometrie jádra zde zůstává beze změn. Mezi jádrem a kostrou vinutí byla zohledněna deska vrstveného izolantu. Kostra vinutí se liší od varianty B1 přidáním dalších zaoblení na žebrování. Výstupy pro upínací oka byly modifikovány s ohledem na připojení kabelů od kondenzátorů. L-profilu stahovací konstrukce byla přidána zaoblení dalších hran. Spodní část modelu kondenzátoru byla upravena takovým způsobem, aby celou svou plochou již nebyla v kontaktu s držákem kondenzátorů ale pouze pomocí kruhového výstupku. Držák kondenzátorů zůstává geometricky beze změn, avšak je modifikován způsob jeho uchycení. V případě varianty B1 byla vertikální část držáku v přímém kontaktu s L-profilem stahovací konstrukce. Nyní je držák vzdálen a přímý kontakt tvoří pouze s izolačními vložkami a šrouby.

Vinutí sinusového filtru doposud v simulacích představoval monolitický solid s materiálovými vlastnostmi mědi. Ve skutečnosti je vinutí složeno z vrstev navinutého drátu. Tepelná vodivost tak není izotropní napříč vinutím. Zohlednění této skutečnosti v geometrii modelu by vyžadovalo fyzické modelování vrstev drátu ve vinutí včetně prostor mezi dráty vyplněných vzduchem. Tento způsob by však následně vyžadoval vytvoření sítě se značnou jemností a vysokým počtem elementů v oblasti vinutí. Namísto předchozího postupu byl zvolen alternativní způsob výpočtu, který zohledňuje anizotropnost ve vinutí tzv. *efektivní tepelnou vodivostí*  $\lambda_{ef}$ . Její závislost na ostatních veličinách popisuje vztah 6-1. [27]

$$\lambda_{ef} = \phi \cdot \lambda_{vzd} + (1 - \phi) \cdot \lambda_m \quad (6-1)$$

kde za  $\lambda_{vzd}$  představuje *tepelnou vodivost vzduchu*,  $\lambda_m$  *tepelnou vodivost mědi* a  $\phi$  představuje *objemový zlomek*.

Model vinutí byl dále geometricky modifikován s ohledem na vzduchové prostory (obrázek 6.14). V důsledku navíjení drátu na kostru vinutí není první vrstva drátu po celé své délce v kontaktu s plochou kostry. To má za následek vytvoření prostor, kde nedochází k přímému kontaktu dvou materiálů a přestup tepla je tak realizován konvekcí.

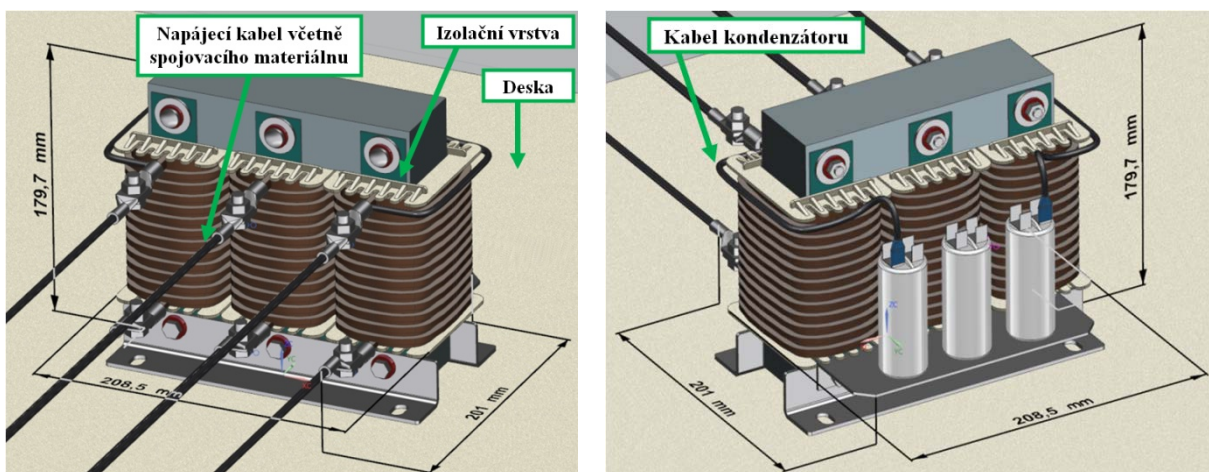


**Obr. 6.14** Řez vzduchovým prostorem mezi kostrou vinutí a vinutím  
požadavku na zohlednění zbývajících kabelů by však nebylo možné využít symetričnosti tělesa a tím tak urychlit řešení simulace.

Zohledněn byl také vliv odvodu tepla pomocí napájecích kabelů sinusového filtru. Geometrie kabelu je pro účely síťování zjednodušena. Kabel je tak tvořen měděným jádrem a vrstvou izolace na jeho povrchu. Pro účely připojení byly přidány další nezbytné prvky včetně upínacích ok a spojovacího materiálu. Do modelu byl také vložen kabel kondenzátorů. Vzhledem k opětovnému využití symetrie v rovině ZY, byl zohledněn pouze jeden kabel propojující krajní kondenzátor a vinutí. V případě

Změněna byla také vzájemná pozice umístění sinusového filtru vzhledem k prostoru výpočetní domény vzduchu. Sinusový filtr se nyní nachází ve výšce 0,75 m odpovídající úrovni desky, na které byl v rámci experimentální validace umístěn. Současně je zohledněna geometrie této dřevěné desky.

Detailní CAD model sinusového filtru je zobrazen na obrázku 6.15. Materiálové parametry lze nalézt v tabulce 6.9.



Obr. 6.15 Vlevo – detailní CAD model sinusového filtru – pohled I;

vpravo – detailní CAD model sinusového filtru – pohled II

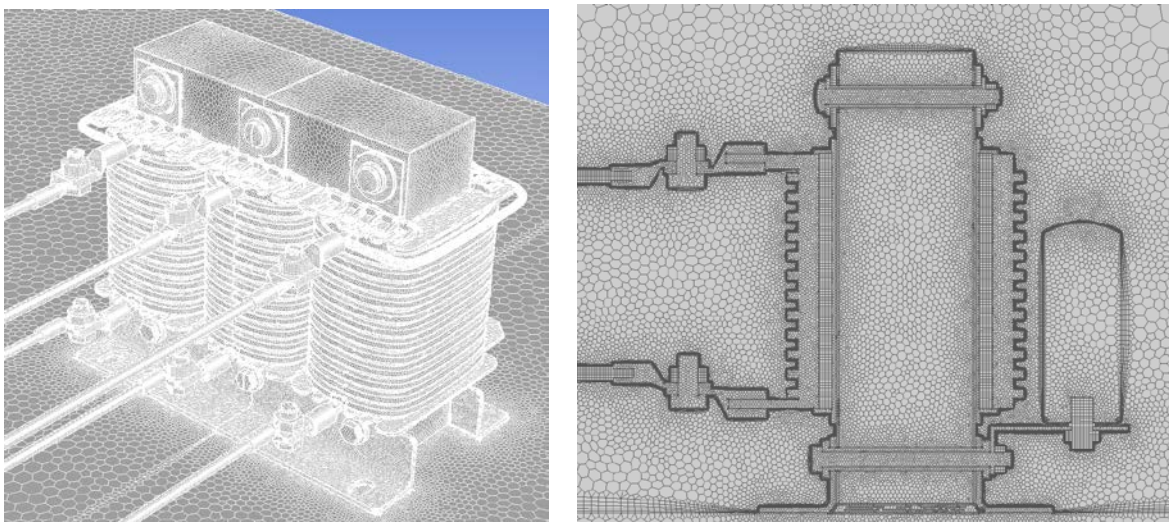
Geometrie domény pro výpočet vzduchu je totožná s doménou varianty A2. Rozměry jsou uvedené na obrázku 6.6 v kapitole 6.2.1. Parametry vzduchu jsou uvedeny v tabulce 6.4. V doméně je využíván Boussinesqův model.

<i>Komponenta</i>	<i>Hustota <math>\rho</math> [<math>\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}</math>]</i>	<i>Měrná tepelná kapacita <math>c_p</math> [<math>\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}</math>]</i>	<i>Tepelná vodivost <math>\lambda</math> [<math>\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}</math>]</i>
<b>Jádro 3UI105</b>	7850	490	60,5
<b>Kostra vinutí, izolační vložka</b>	1500	1040	0,25
<b>Cívka</b>	8933	386	Směr X: 400 Směr Y,Z: 354,9
<b>Upínací oka</b>	8933	386	400
<b>Stahovací konstrukce, spojovací prvky, držák kondenzátorů</b>	8030	502,5	16,3
<b>Kondenzátor</b>	1005	1765	0,19
<b>Piny kondenzátorů, drát</b>	8978	381	387,6
<b>Vrstvený izolant</b>	1560	1180	0,39
<b>Deska</b>	700	2310	0.173
<b>Izolace drátů</b>	1420	1000	0,16

Tab. 6.9 Materiálové vlastnosti

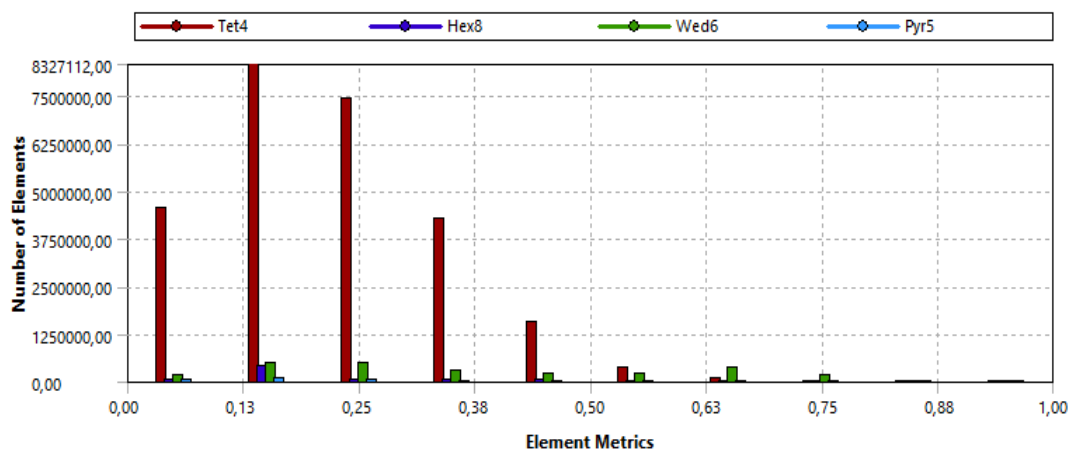
## 6.6.2 Síť (Meshing)

Proces síťování a nastavení parametrů je stejný jako v případě varianty A2 (kap. 6.2.2) nebo B1 (kap. 6.4.2). Přehled nastavení sítě je uveden v tabulce 6.5. Na obrázku 6.16 je vidět finální polyhedrální síť z programu Ansys Fluent včetně příčného řezu modelem.



Obr. 6.16 Vlevo – polyhedrální síť sinusového filtru; vpravo - příčný řez sítě

Síť detailního modelu vytvořená v Ansys Meshing obsahuje 29 579 142 elementů. Míra zkosení většiny elementů se pohybuje v rozmezí od 0,04 do 0,53. Statistika míry zkosení je zobrazena na obrázku 6.17.



Obr. 6.17 Statistika míry zkosení elementů sítě

Celkový počet elementů v síti se konverzí tetrahedrálních elementů na polyherdrální snížil přibližně o 62% na hodnotu 11 224 568.

### **6.6.3 Okrajové podmínky a tepelné zdroje**

Okrajové podmínky jsou identické s variantou A2. Jejich popis lze je uveden v kapitole 6.2.3.

Hodnota ztrátového výkonu kondenzátoru je totožná s variantou B1, tedy 1W/kondenzátor.

### **6.6.4 Nastavení numerického řešení**

Nastavení numerického řešení je identické s variantou A2. Nastavení je popsáno v kapitole 6.2.4.

## **6.7 Varianta C2 – detailní geometrie v Ansys Fluent; aktualizované ztráty**

Výsledky tepelných simulací B1 a C1 naznačily, že další oblast vyžadující další zpřesnění pro dosažení měřeného teplotního pole se týká ztrátových výkonů. Ztrátové výkony na jádře a ve vinutí byly přezkoumány a s ohledem na nižší napětí na kondenzátorech výrobce aktualizoval jejich hodnoty. Podrobnější informace o určení ztrát lze nalézt v publikaci [1].

Realizována byla simulace označená jako varianta C2, která je identická s variantou C1 s výjimkou hodnot okrajové podmínky tepelného zdroje. Aplikován byl ztrátový výkon na jádře o hodnotě 11,6W/vinutí. Ztrátový výkon ve vinutí je 13,67W a ztrátový výkon kondenzátorů je 1 W/kondenzátor. Geometrie, materiály, okrajové podmínky a nastavení numerického řešení jsou popsány v kapitole 6.6.

## **6.8 Varianta D1 – detailní geometrie v Ansys Fluent – aktivní chlazení**

Numerické analýzy popsané v předchozích kapitolách (6.1-6.6) byly provedeny především pro získání znalostí o interakcích mezi vstupy a výslednými výstupy ve formě teplotního pole na modelu sinusového filtru a v jeho okolí. Vnější podmínky však nebyly typické běžnému použití tohoto zařízení. Za standardních podmínek se většina těchto zařízení nachází v instalovaných rozváděcích zahrnujících určitý systém aktivního odvodu tepla. Z tohoto důvodu byla po dokončení simulací předchozích případů přirozené konvekce započata příprava numerické analýzy teplotního pole sinusového filtru s aktivním chlazením.

V tomto případě dochází z hlediska přestupu tepla do okolí k vynucené konvekci. Vzhledem k použití aktivního chlazení se v porovnání s předchozími variantami mění charakter proudění v okolí sinusového filtru a proudění tak vykazuje chaotické fluktuace veličin v prostoru a čase. Tento druh proudění a jeho vlastnosti je v softwaru Ansys Fluent modelován vhodným turbulentním modelem.

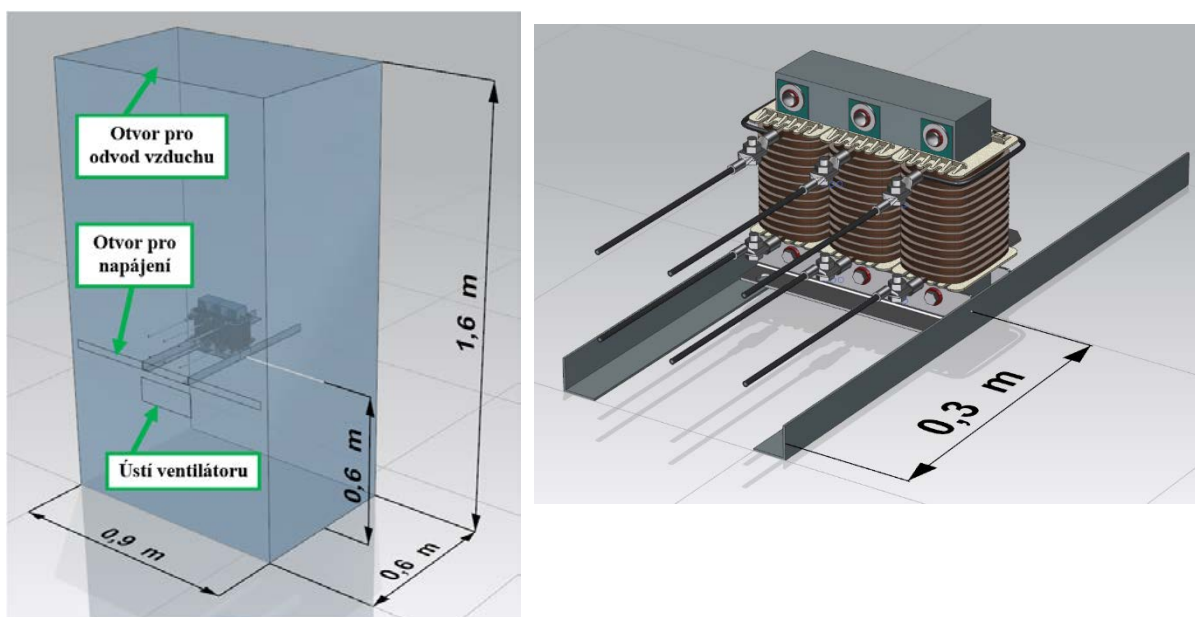
Sinusový filtr je umístěn v měřicí rozváděčové skříni, kde je distribuce vzduchu zajištěna pomocí AC radiálního ventilátoru umístěného ve spodní části skříně. Odvod vzduchu do okolí je zajištěn pomocí otevřené stropní stěny. Uvnitř této skříně je sinusový filtr umístěn ve středu na dvou hliníkových nosících profilu L.

### 6.8.1 Geometrie a materiály

Pro snížení hardwarových nároků bylo řešení koncipováno jako symetrické v rovině ZY. Geometrický model použitý v této simulaci zahrnuje detailní geometrii sinusového filtru použitou ve variantě C1 společně s modifikovanou délkou napájecích kabelů. Napájecí kabely jsou vedeny od sinusového filtru směrem kolmým ke stěně skříně a zkráceny na vzdálenost mezi sinusovým filtrem a protilehlou stěnou. Přidány byly dva nosné hliníkové L-profil, na kterých je sinusový filtr umístěn. Další nosné konstrukční prvky měřicí skříně s ohledem na snížení výpočetního času nebyly ve výpočtu uvažovány. Tloušťka stěn skříně nebyla modelována, její zohlednění včetně jejího materiálu však bylo provedeno v rámci aplikace okrajových podmínek. Materiálové parametry sinusového filtru jsou totožné s variantou C1 a lze je nalézt v tabulce 6.9. Materiálové parametry hliníku jsou uvedeny v tabulce 6.10 níže.

<i>Komponenta</i>	<i>Hustota <math>\rho</math> [<math>kg \cdot m^{-3}</math>]</i>	<i>Měrná tepelná kapacita <math>c_p</math> [<math>J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}</math>]</i>	<i>Tepelná vodivost <math>\lambda</math> [<math>W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}</math>]</i>
<b>Nosný L-profil, stěny rozváděčové skříně</b>	2719	871	202,4

Tab. 6.10 Materiálové vlastnosti



Obr. 6.18 Vlevo – CAD model rozváděčového prostoru včetně sinusového filtru; vpravo - detail pozice sinusového filtru

Doména pro výpočet veličin proudění vzduchu rozměrově odpovídá vnitřnímu prostoru rozváděčové skříně a obsahuje rozdělené plochy pro budoucí aplikaci okrajových podmínek. Doména je zobrazena na obrázku 6.18 včetně celkových rozměrů, vstupu pro proudění z ventilátoru a otvoru pro vedení napájecích kabelů. Na obrázku 6.18 vpravo je rovněž vidět detailní model sinusového filtru a jeho pozice na L-profilech. V doméně je rovněž využíván Boussinesqův model.

### 6.8.2 Síť (Meshing)

Síťování celé geometrie i výpočetní domény proběhlo v Ansys Meshing. Záměrem bylo dosažení stejné jemnosti sítě na modelu sinusového filtru jako v případě varianty C1. Vzhledem k jinému charakteru okolního proudění byl pro výpočetní doménu vzduchu nastaven limit pro maximální velikost elementu na hodnotě 8 mm. V porovnání s předchozími variantami je tak geometrie okolního prostředí vysíťována jemněji. Inflation vrstva byla vytvořena ve výpočetní doméně na jejím rozhraní s objektem i na stěnách rozváděčové skříně.

Po dosažení první konvergence řešení bylo záměrem provést adaptaci (zjemnění) sítě. Síťové elementy v tomto případě tak nebyly převáděny z tetrahedrálních na polyhedrální. Tato možnost není v Ansys Fluent podporována pro konvertované elementy. Simulace tak byla provedena se sítí tvořenou z tetrahedrálních elementů.

<i>Parametr</i>	<i>Nastavení</i>
<b>Physics Preference</b>	CFD
<b>Solver Preference</b>	Fluent
<b>Size function</b>	Proximity and Curvature
<b>Relevance Center</b>	Fine
<b>Smoothing</b>	High
<b>Min. Size</b>	0,9 mm
<b>Max. Tet Size</b>	8 mm
<b>Growth Rate</b>	1,3

Tab. 6.11 Výběr parametrů nastavení sítě

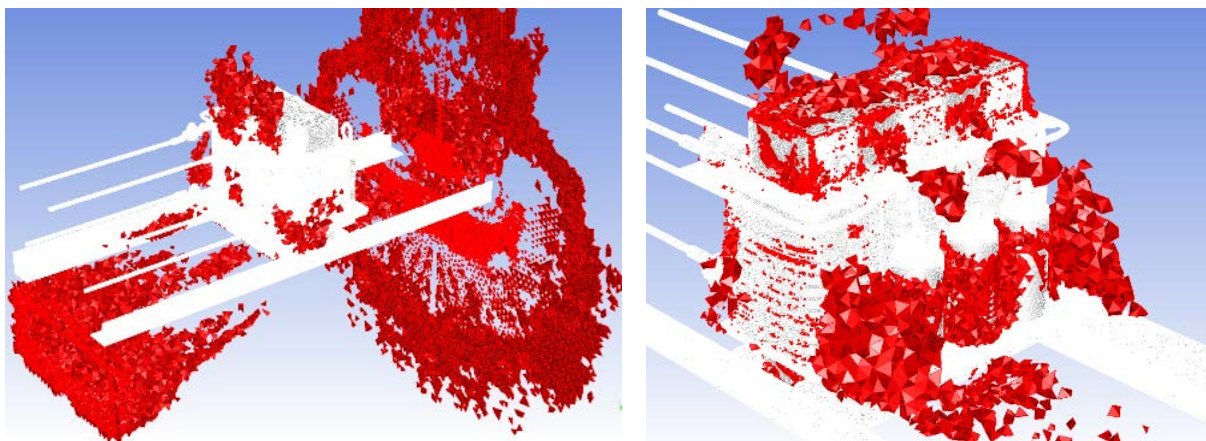
Přehled nastavení sítě a dalších parametrů je uveden v tabulce 6.11.

Kontrola kvalita sítě v blízkosti stěn byla po výpočtu provedena s pomocí bezrozměrné hodnoty  $y^+$ . V případech rychlostí proudění vzduchu na výstupu ventilátoru v rozmezí od 4 do 15  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  byla hodnota  $y^+$  přibližně 9. Jedná se o nízkou hodnotu a dle dokumentace k Ansys Fluent [15] je tak vhodné použít dvouvrstvý model pro predikci proudění v blízkosti stěny.

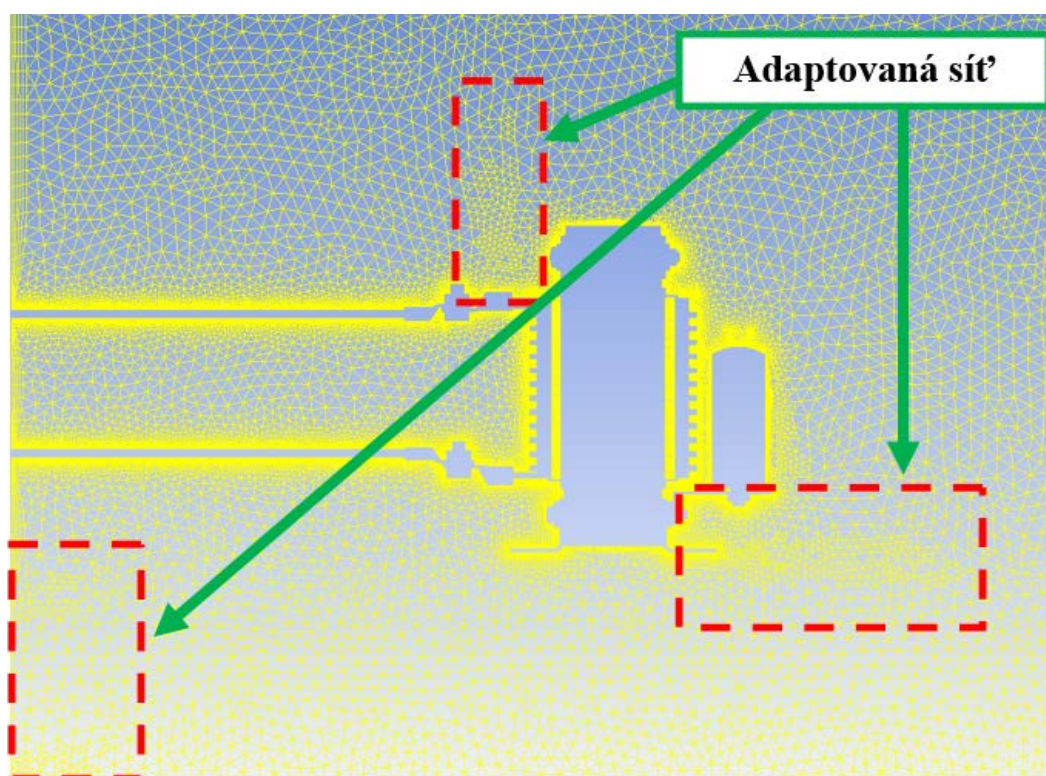
Na základě kontroly kvality sítě uvnitř domény, byla provedena její adaptace z hlediska velikosti gradientu rychlosti a gradientu teploty. Na levé straně obrázku 6.19 je vidět návrh adaptace elementů podle gradientu rychlosti. Ty se nachází především v oblasti otvoru pro ventilátor a podél proudu vzduchu generovaného ventilátorem, nad čelem sinusového filtru a krajních vinutích. Rozsáhlejší oblast určená k adaptaci se nachází na stěně rozváděčové skříně



za sinusovým filtrem. V této oblasti dochází náhle ke změně směru proudění vzduchu generovaného ventilátorem, kde je jeho značná část dále usměrněna podél této stěny. Na pravé straně obrázku 6.19 se nachází označené elementy k adaptaci podle gradientu teploty. Ty se nachází především v blízkosti povrchu sinusového filtru a to mezi drážkami vinutí, za kondenzátory a také u horní části jádra.



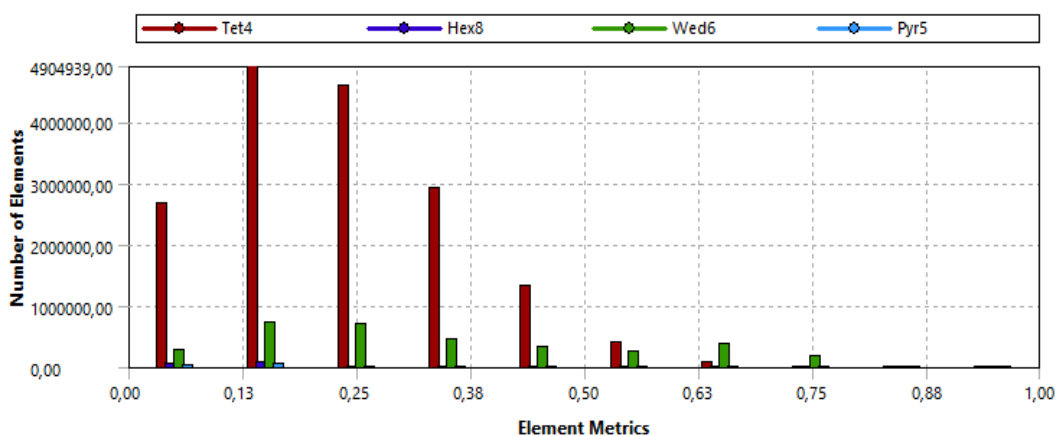
**Obr. 6.19** Vlevo – adaptace sítě podle gradientu rychlosti; vpravo - adaptace sítě podle gradientu teploty



**Obr. 6.20** Řez adaptovanou sítí výpočetní domény rozváděčové skříně

Řez adaptovanou sítí je možné vidět na obrázku 6.20, kde jsou vyznačeny oblasti, kde došlo ke zjemnění podle gradientů rychlostí vypočtených na základě prvního řešení úlohy.

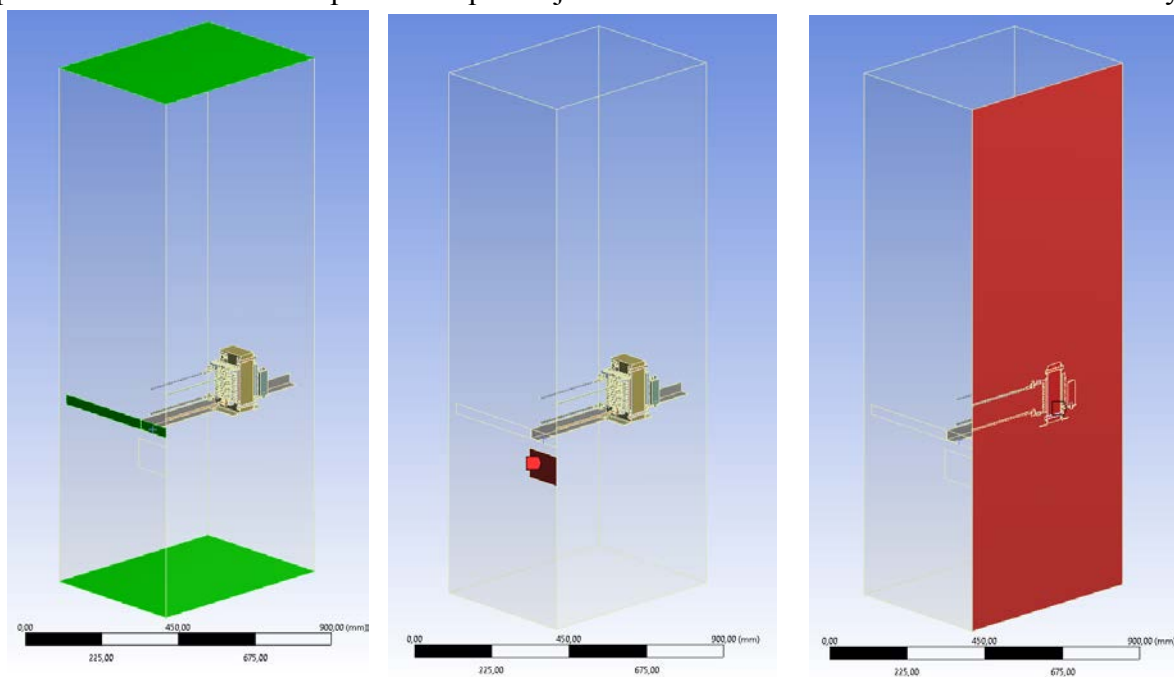
Celkový počet elementů sítě z Ansys Meshing dosáhl hodnoty 20 360 909. Míra zkosení většiny elementů se pohybuje v rozmezí od 0,04 do 0,63. Statistika míry zkosení pro tuto síť je zobrazena na obrázku 6.21.



Obr. 6.21 Statistika míry zkosení elementů sítě

### 6.8.3 Okrajové podmínky a tepelné zdroje

Výpočetní doména vnitřního prostoru měřicí rozváděčové skříně zahrnuje aplikované okrajové podmínky pressure outlet, velocity inlet a v rovině ZY okrajovou podmínku symetrie. Teplota okolí 22,5 °C a statický tlak 0 Pa jsou zohledněny v rámci podmínky pressure outlet v oblasti otvoru pro napájení a otvorech pro odvod vzduchu na horní a spodní straně skříně. Proud vzduchu generovaný ventilátorem je specifikován podmínkou velocity inlet která je přiřazena obdélníkovému průřezu odpovídajícímu rozměrům ústí ventilátoru. Uvažováno bylo



Obr. 6.22 Vlevo – OP pressure outlet; uprostřed – OP velocity inlet; vpravo – OP symetrie

rovnorné rozložení rychlosti proudu vzduchu napříč celým průřezem. Tyto rychlosti byly zvoleny na hodnotách 0, 4, 5, 10 a 15 m·s<sup>-1</sup>. Úhel proudění byl nastaven na hodnotu 12° vůči rovině XY, teplota pak rovněž na 22,5 °C. Ukázka přiřazení okrajových podmínek je vidět na obrázku 6.22.

Plochy představující stěny rozváděčové skříně jsou definovány okrajovou podmínkou wall, která zahrnuje materiálovou definici hliníku a parametr tloušťky stěn na hodnotě 2 mm.

V případě varianty s aktivním chlazením byl sinusový filtr zatěžován proudem 7 A. V návaznosti na tuto skutečnost a na kapitolu 4 byl ztrátový výkon na jádře určen výrobcem na hodnotu 9,65W/vinutí a 2,26W na samostatném vinutí. Ztrátový výkon na kondenzátorech odpovídal 0,35 W/kondenzátor.

#### 6.8.4 Nastavení numerického řešení

Úloha je simulována pomocí Ansys Fluent v režimu double precision jako pseudo-transientní řešení. Výhodou tohoto přístupu je automatický výpočet pseudo-časového kroku jak pro pevný objem, tak i pro objem tekutiny. Délkové měřítko pro pevný objem a pro tekutinu je tak počítáno zvlášť což umožňuje dosažení rychlejší konvergence. Rovněž je zde zohledněno gravitační zrychlení v ose Z o hodnotě -9,81 m · s<sup>-2</sup> a výpočet přestupu tepla pomocí zapnutého energetického modelu.

Turbulentní proudění je řešeno dvourovnicovým modelem Realizable k-ε, kde modelování proudění v blízkosti stěn je zohledněno dvouvrstevným Enhanced Wall Treatment modelem. Operační teplota byla v Boussinesqově modelu nastavena na 295,5 K (22,5 °C) a operační hustota na 1,22 kg · m<sup>-3</sup>. Nastavení interpolačních schémat Pressure-based Coupled algoritmu a relaxačních faktorů je uvedeno v tabulce 6.12.

Počáteční hodnota rychlosti proudění ve směrech X, Y a Z byla

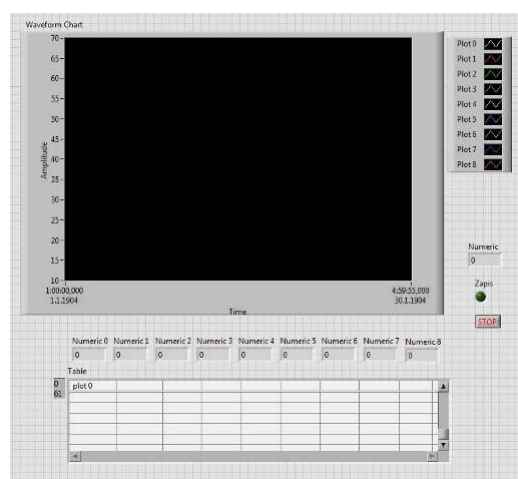
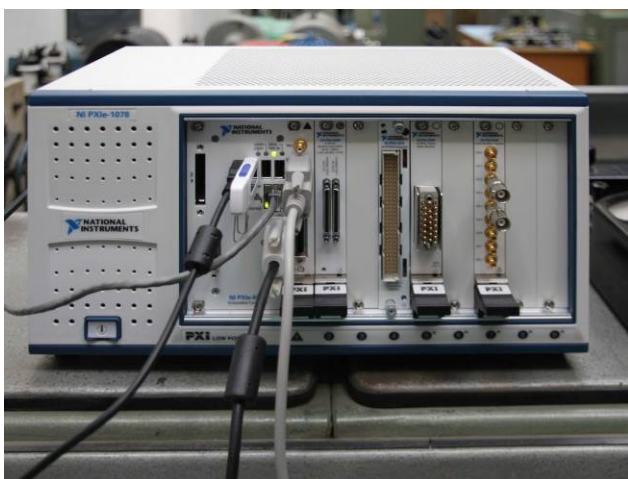
<i>Parametr</i>	<i>Nastavení</i>
<b>Interpolační schémata</b>	
<b>Pressure</b>	<i>Second order</i>
<b>Momentum</b>	<i>Second order Upwind</i>
<b>Turbulent Kinetic Energy</b>	<i>Second order Upwind</i>
<b>Turbulent Dissipation Rate</b>	<i>Second order Upwind</i>
<b>Energy</b>	<i>Second order Upwind</i>
<b>Flow Courant number</b>	200
<b>Explicit Relaxation factors</b>	
<b>Momentum</b>	0,5
<b>Pressure</b>	0,5
<b>Under-relaxation factors</b>	
<b>Density</b>	1
<b>Body Forces</b>	1
<b>Turbulent Kinetic Energy</b>	0.8
<b>Turbulent Dissipation Rate</b>	0.8
<b>Turbulent Viscosity</b>	1
<b>Energy</b>	1

Tab. 6.12 Přehled relaxačních faktorů a interpolačních schémat

nastavena na  $0,001 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , statický tlak na  $0 \text{ Pa}$  a teplota na  $295,5 \text{ K}$  ( $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Turbulentní kinetická energie má výchozí hodnotu  $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , turbulentní rychlost disipace je nastavena na  $1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Volbu časového měřítka tekutiny a pevné látky si software určuje automaticky. Limitní počet iterací simulace by nastaven na 2000.

## 7. Experimentální validace numerických analýz

Pro ověření koncepcí numerických analýz teplotního pole sinusového filtru a jejich nastavení, byla provedena série měření povrchových teplot na reálném filtru. Data filtru SKY3FSM16-2kHz jsou uvedena v tabulce 4.1. Měřicí technologie byla tvořena frekvenčním měničem, sinusovým filtrem a trojfázovým asynchronním motorem. Teploty byly měřeny pomocí termočlánků a jejich hodnoty byly automaticky digitalizovány ústřednou NI PXI (viz obrázek 7.1) se speciálními termočlánkovými vstupy. Pro měření oteplovací charakteristiky byla použita termočlánková 32 vstupová jednotka PXIe4353 osazená 9 termočlánky s interní kompenzací studeného konce. Vzorkování teplot při měření oteplovacích charakteristik probíhalo každých 20 s.



Obr. 7.1 Autokalibrační ústředna National Instruments PXI [1]

Obr. 7.2 Panel pro měření oteplovacích charakteristik [1]

Na obr. 7.2 je znázorněn panel vytvořený v prostředí LabView pro měření oteplovací charakteristiky. Při činnosti jednotky jsou v horní části zobrazovány průběhy teplotních křivek. Pole uprostřed zobrazují aktuálně dosaženou teplotu, v tabulce pod nimi jsou pak zaznamenávány hodnoty teplot z předešlých vzorkování.

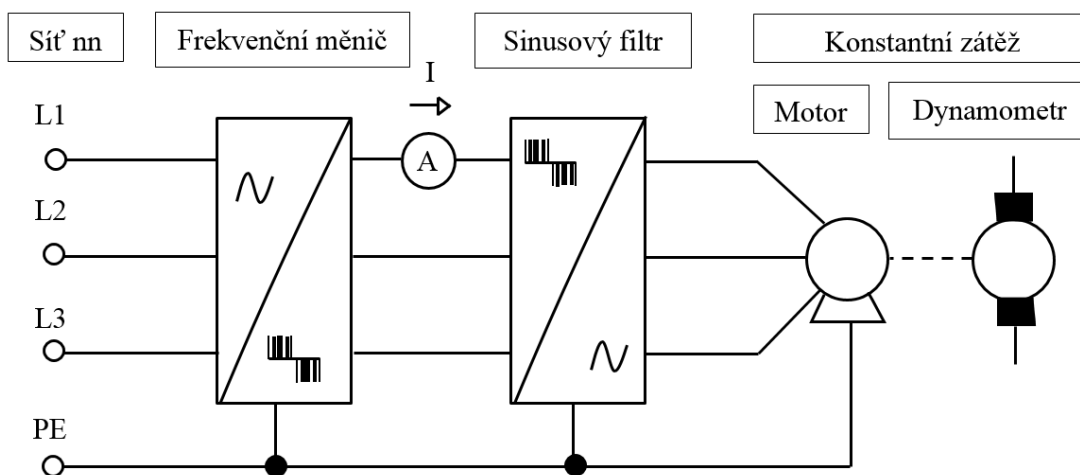
Zapojení sinusového filtru je totožné jak v případě měření v otevřeném prostředí, tak i v uzavřeném. Schéma je zobrazeno na obrázku 7.3. Přívodní kabel ze sítě nn 3x230/400V byl přiveden do frekvenčního měniče kde na výstupní svorky byl připojen sinusový filtr. Za sinusovým filtrem byla zapojena konstantní zátěž. Frekvenční měnič

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
<b>Nominální výkon</b>	15 kW
<b>Nominální napětí</b>	3x380 V
<b>Frekvence</b>	50 Hz
<b>Proud</b>	31 A
<b>Otáčky</b>	1455 min <sup>-1</sup>

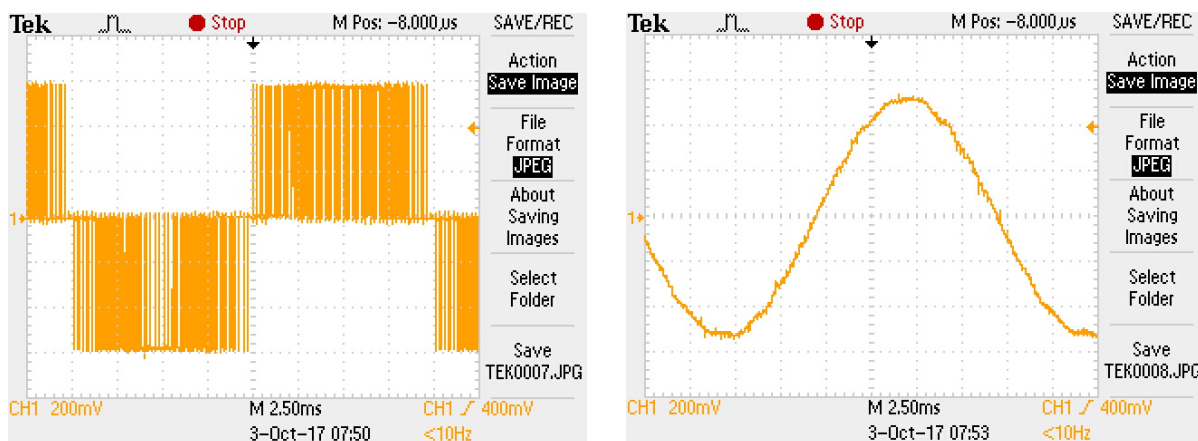
Tab. 7.1 Štítkové hodnoty elektromotoru

Siemens Masterdrives (štitkové parametry: 11kW, 400V, 27A) vytvářel na výstupu sružené šířkově pulsní modulované napětí PWM spínané 4kHz. Toto napětí bylo filtrováno dolní propustí typu LC pod hranicí 1kHz. Štitkové hodnoty elektromotoru jsou uvedeny v tabulce 7.1.

Za touto propustí, tedy sinusovým filtrem, bylo přivedeno napětí na konstantní zátěž. Pro snímání napětí byla použita napěťová sonda 1:1000 připojená na osciloskop Tektronix 350MHz/5Gs [28]. Porovnání průběhů sruženého napětí před a za sinusovým filtrem je vidět na obrázku 7.4.



Obr. 7.3 Schématické znázornění zapojení sinusového filtru



Obr. 7.4 Vlevo – naměřený průběh sruženého napětí PWM na střídači; vpravo - sružené napětí za sinusovým filtrem

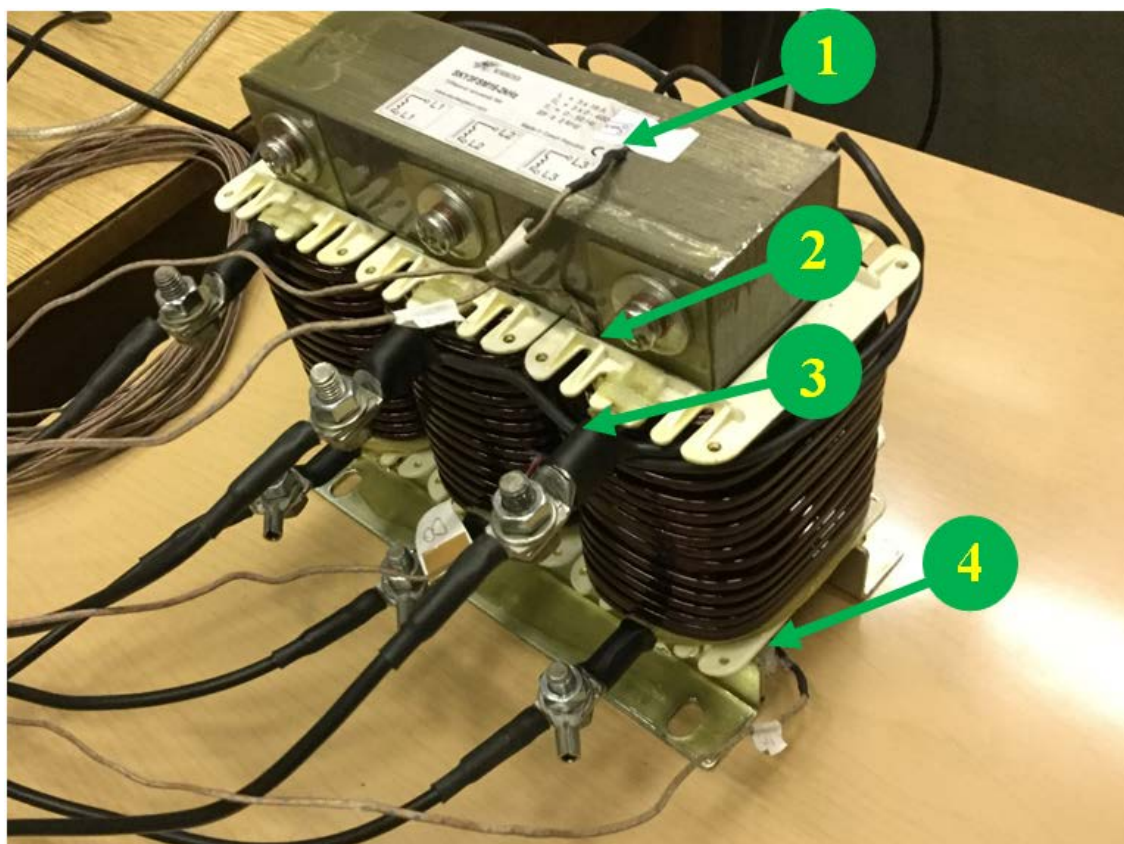
## 7.1 Validace v otevřeném prostředí

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

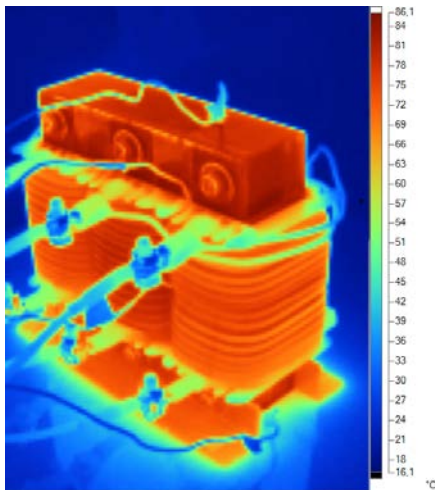
tak odpovídá volné konvekci. Sinusový filtr byl napájen střídavým proudem o frekvenci 50Hz se superponovanou vysokofrekvenční složkou vznikající od spínací frekvence měniče. Měření teplot sinusového filtru zatíženého proudem 23A proběhlo za pomoci termočlánků a termokamery.

V úvahu lze vzít také měření teploty odporovou metodou, díky které lze získat střední oteplení vinutí cívky. V tomto případě bylo však pro validaci více přínosné zobrazení rozložení teplotního pole po povrchu. Střední hodnota by tak byla pouze orientační [28].

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. Byly použity celkem čtyři termočlánky rozmístěné na odlišných měřicích bodech jak na povrchu, tak i vně filtru (viz obrázek 7.5). 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. [28]



**Obr. 7.5** Sinusový filtr SKY3FSM16-2kHz s nainstalovanými termočlánky [34]



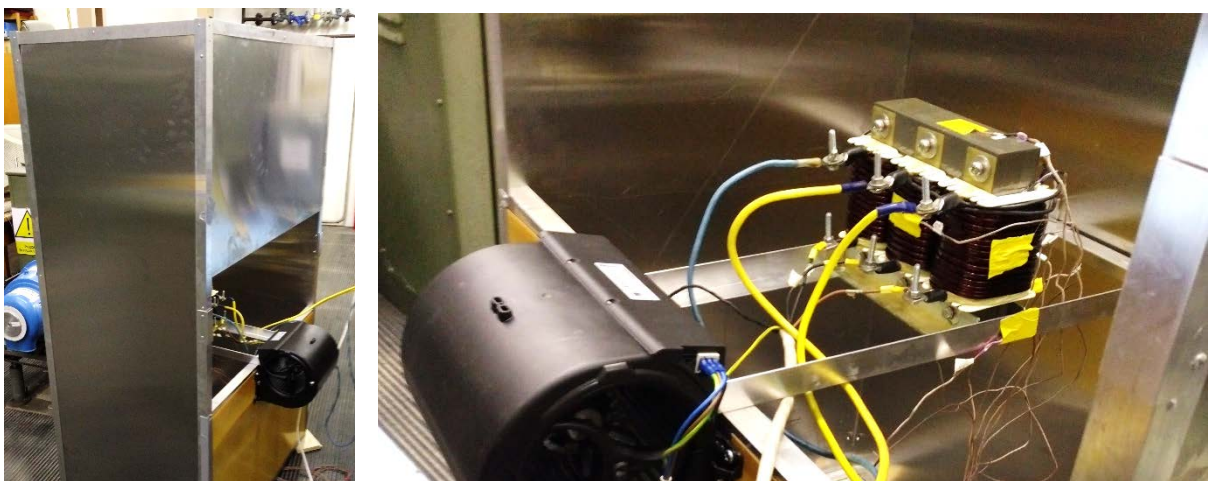
**Obr. 7.6** Ukázka zobrazení rozložení teplotního pole [34]

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 kalibrována na hodnotu 0,96 na základě porovnání změřeni druhého kusu sinusového filtru, jehož teplota byla ustálena na teplotu okolí. S termokamerou lze měřit v rozmezí teplot od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $350^{\circ}\text{C}$  s přesností  $\pm 2^{\circ}\text{C}$

nebo 2 % podle toho, která hodnota je větší. Tepelná citlivost detekce je  $0,1^{\circ}\text{C}$  při teplotě cíle  $30^{\circ}\text{C}$  [29]. Jak je vidět na obrázku 7.6, v průběhu celého měření byla použita pro zobrazení zachycených snímků barevná paleta se spektrem modrá-červená. Důvodem využití tohoto spektra je pak lepší názornost při porovnávání s numerickou simulací teplotního rozložení.

## 7.2 Validace v uzavřeném prostředí

Pro případ validace výsledků simulace v uzavřeném prostředí byla svépomocí zkonstruována měřicí rozváděčová skříň. Jejím účelem bylo vytvoření vhodného prostředí, ve kterém by byly simulovány podmínky přestupu tepla při vynucené konvekci v případě umístění sinusového filtru. Rozváděčovou skříň včetně instalovaného sinusového filtru a ventilátoru je možné vidět na obrázku 7.7.



**Obr. 7.7** Vlevo – měřicí rozváděčová skříň (otevřený instalační prostor); vpravo – detail instalačního prostoru se zapojením filtru



Konstrukce rozváděčové skříně je tvořena hliníkovými L-profilů o rozměrech průřezu 30x30x2 mm. Stěny tvoří hliníkový plech o tloušťce 2 mm. Skříň o rozměrech 0,6x0,9x1,6 m je pak snýtována hliníkovými nýty o průměrech 3 a 4 mm.

Hlavním a jediným zdrojem aktivního chlazení je radiální ventilátor D3G146-LV13-01 výrobce EBM-PAPST. Ten je umístěn ve výšce 0,45 m nad zemí ve střední části skříně. Ventilátor je regulovatelný až do výše maximálních otáček  $1550 \text{ min}^{-1}$ . Ústí ventilátoru je obdélníkového průřezu kde nejvyšší objemový průtok činí  $600 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Další informace a parametry je možno nalézt v příloženém datasheetu v přílohové části této práce.

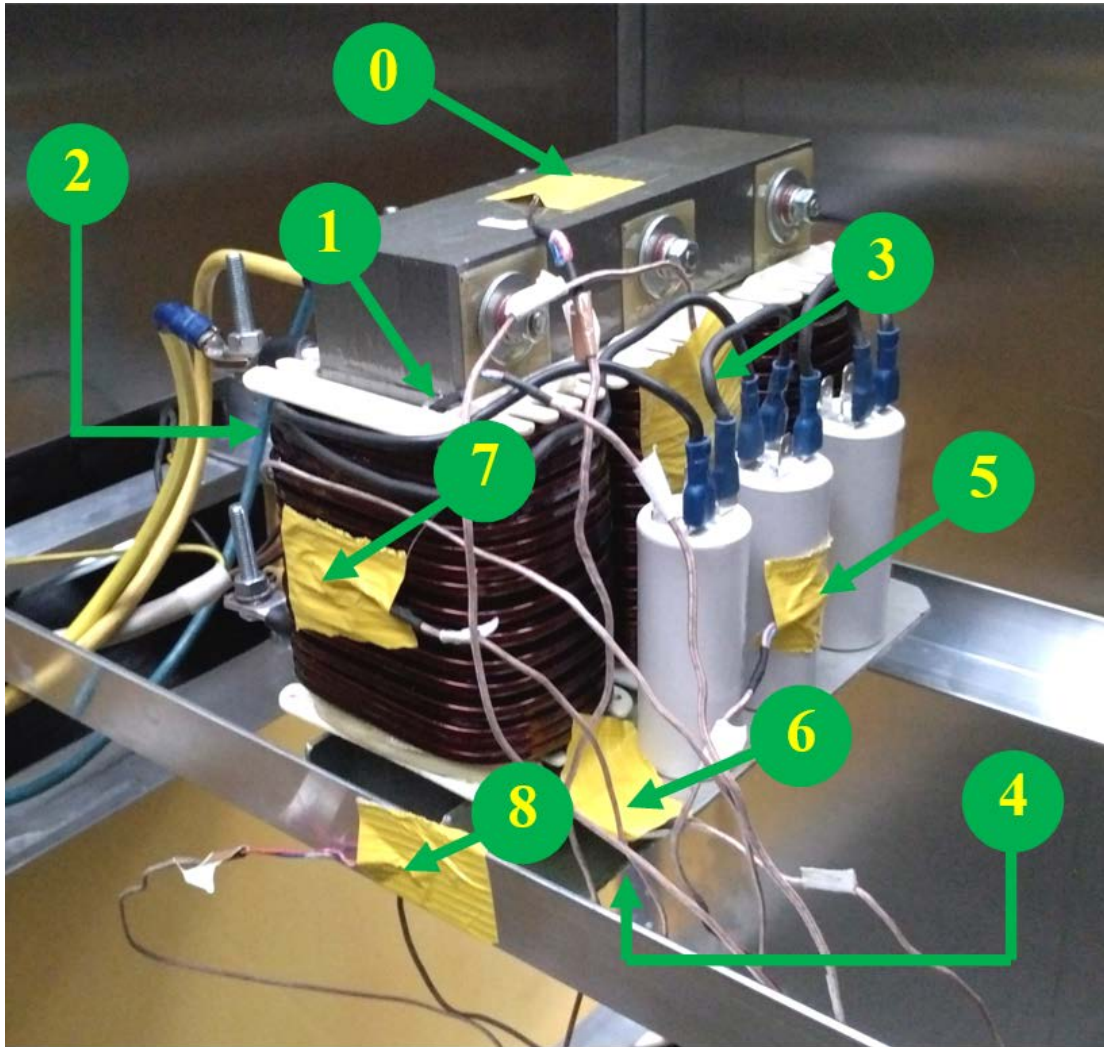
Sinusový filtr je umístěn přibližně ve středu rozváděčové skříně pomocí dvou hliníkových L-profilů ve výšce 0,6 m nad zemí. Do skříně je umožněn přístup instalačním otvorem. Tento otvor je v průběhu experimentu téměř zcela uzavřen. Otevřená je ponechána jen nezbytná část pro vedení napájecích kabelů sinusového filtru.

Stejně jako v případě měření v otevřeném prostředí byl sinusový filtr napájen střídavým proudem o frekvenci 50Hz se superponovanou vysokofrekvenční složkou vznikající od spínací frekvence měniče. Frekvenční měnič Siemens 6SE7021-0EA20 vytvářel na výstupu sdružené šířkově pulsní modulované napětí PWM spínané 4kHz. V průběhu měření teplot byl však sinusový filtr zatížen proudem 7A. Štítkové hodnoty elektromotoru včetně zatěžovacího momentu jsou uvedeny v tabulce 7.2.

<i>Parametr</i>	<i>Hodnota</i>
<b>Nominální výkon</b>	4,4 kW
<b>Nominální napětí</b>	3x380V
<b>Frekvence</b>	50 Hz
<b>Proud</b>	9,6 A
<b>Otáčky</b>	1370 $\text{min}^{-1}$
<b>Zatěžovací moment</b>	21 Nm

Tab. 7.2 Štítkové hodnoty elektromotoru

Teplota okolí byla  $22,5^\circ\text{C}$ . Měření povrchových teplot bylo provedeno pro pět situací nastavení rychlostí proudu vzduchu ( $0, 4, 5, 10$  a  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Tyto rychlosti byly změřeny na výstupu ventilátoru pomocí termického anemometru Testo 405i. Data z anemometru jsou přenášena do Android zařízení pomocí technologie Bluetooth. Měřicí rozsah rychlostí je v rozmezí od 0 do  $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  s přesností od 0,1 do  $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a rozlišením  $0,01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . [30]



**Obr. 7.8** Sinusový filtr SKY3FSM16-2kHz s nainstalovanými termočlánky uvnitř rozváděčové skříně

Pro měření teplot na povrchu sinusového filtru bylo použito devět termočlánků stejného typu popsaného v předcházející kapitole 7.1. Jejich rozmístění je vidět na obrázku 7.8. Termočlánek č.0 je připevněn na horní povrch jádra. Termočlánek č.1 je vložen do drážky mezi jádrem a kostrou vinutí. Uprostřed, na přední a zadní straně středního vinutí jsou přichyceny termočlánky č.2 a č.3. Termočlánek č.4 měří teplotu na spodní straně jádra. Na povrchu prostředního kondenzátoru je teplota snímána termočlánkem č.5. Teplota držáku kondenzátorů je měřena termočlánkem č.7 a teplota na hliníkového L-profilu v blízkosti sinusové filtru je snímána termočlánkem č.8.

Snímání teplotního pole bylo provedeno rovněž pomocí termokamery Fluke® Ti125 i pomocí termokamery Flir i50. Termokamera Flir i50 má měřitelný rozsah teplot od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $350^{\circ}\text{C}$  a tepelnou citlivost detekce  $0,1^{\circ}\text{C}$  při teplotě cíle  $25^{\circ}\text{C}$ . [31]

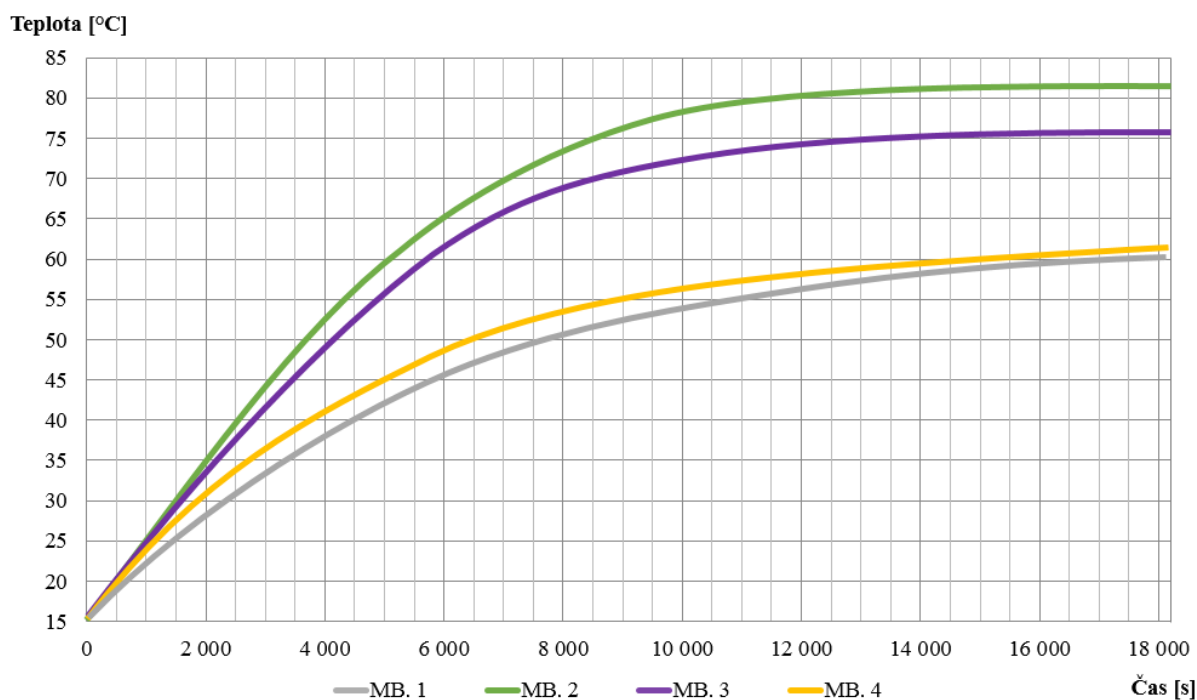
## 8. Vyhodnocení získaných dat

Vyhodnocení dosažených teplot bylo provedeno na základě dat, získaných z numerických simulací popsaných v kapitole 6 a experimentálních měření uvedených v kapitole 7. Vyhodnoceny jsou případy ohřevu sinusového filtru v otevřeném prostředí s odvodem tepla do okolí vlivem přirozené konvekce a uzavřeném prostředí, kde je teplo odváděno pomocí aktivního chlazení. Pozornost je věnována aspektům výsledných teplotních polí sejmutých s pomocí termokamery a jejich vzájemnému porovnání se simulacemi. Současně, je pro vybraný bod vyhodnocena oteplovací charakteristika získaná z termočláňkového měření a porovnána s oteplovacími charakteristikami ze simulací.

### 8.1 Ohřev v otevřeném prostředí – přirozená konvekce

#### 8.1.1 Vyhodnocení oteplovacích charakteristik a dosažených teplot

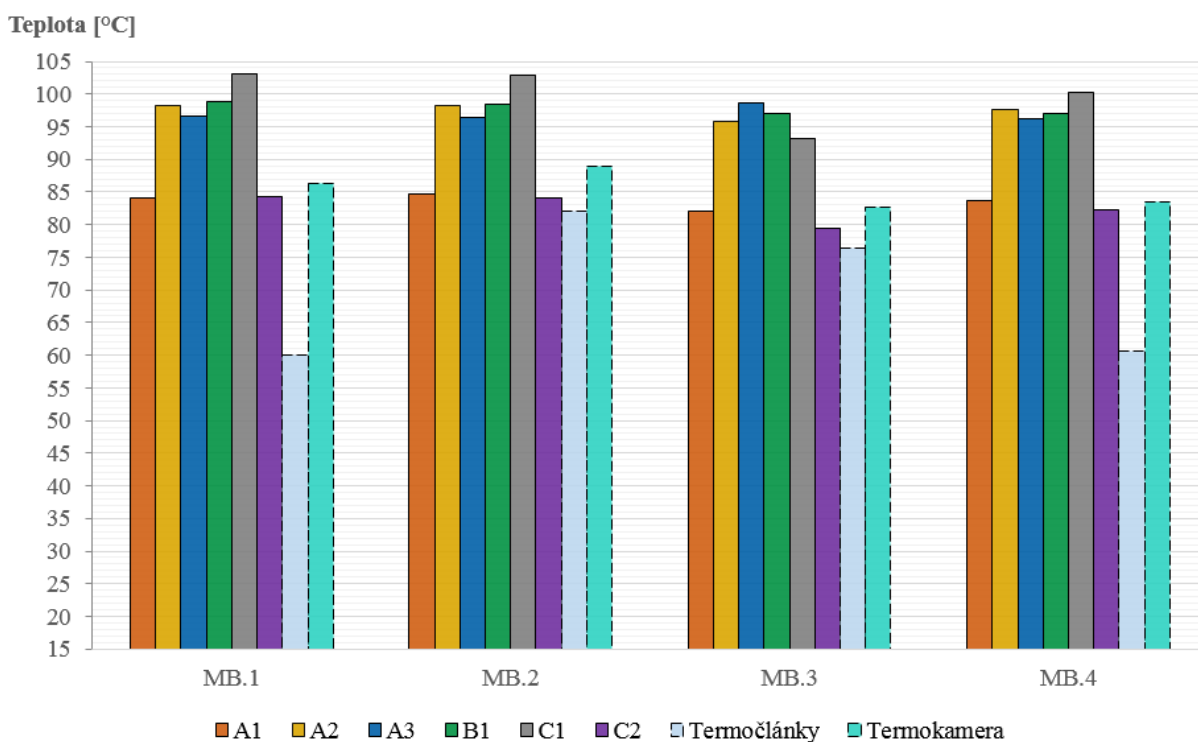
Z měření pomocí termočláňků v bodech 1-4 (obrázek 7.5) byly zjištěny oteplovací charakteristiky zobrazené na obrázku 8.1. Monitorování teplot trvalo od spuštění zátěže po dobu 5 hodin. Na základě naměřených dat byla pro vyhlazení provedena regrese trendu. Nejvyšší naměřená teplota po 5 hodinách (18 000s) byla zjištěna v měřicím bodě (MB.) 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 je teplota 60,6°C.



Obr. 8.1 Oteplovací charakteristiky sinusového filtru SKY3FSM16-2kHz v měřicích bodech 1-4

Z časově závislých simulací variant A1, A2, A3, B1, C1 a C2 byly pro totožné měřicí body v čase 5 hodin pod zátěží odečteny nejvyšší dosažené teploty. Jejich vzájemné porovnání včetně teplot změřených termočláanky a teplot sejmutých termokamerou je možné vidět na obrázku 8.2. Při srovnání dosažených teplot ze všech čtyř bodů je zřejmé, že nejnižších odchylek vůči změřeným teplotám dosahují varianty A1 a C2. Například v bodě 2, kde dle dat z termokamery byla odečtena teplota na hodnotě 88,9°C, je teplota dle varianty A1 84,6°C a dle C2 je 84°C. Pomocí termočláanky byla v totožném místě zjištěna hodnota 82,1°C. Teploty ostatních variant se pohybují v rozmezí od 96,5°C do 102,8°C kde největší odchylku od změřených hodnot má varianta C1.

Vzhledem ke své vlastní tepelné vodivosti lze očekávat, že teploty změřené termočláanky budou mírně nižší nežli teploty sejmuté termokamerou. Tento předpoklad je možné vidět rovněž na obrázku 8.2 a to zejména v bodech 2 a 3. Nelze jím však vysvětlit značně nižší změřené teploty v bodech 1 a 4, tedy na horním a spodním vodorovném povrchu jádra. Vysvětlení by se dalo nalézt ve způsobu uchycení termočláanky, jehož kontakt s povrchem jádra nemusel být ideální.



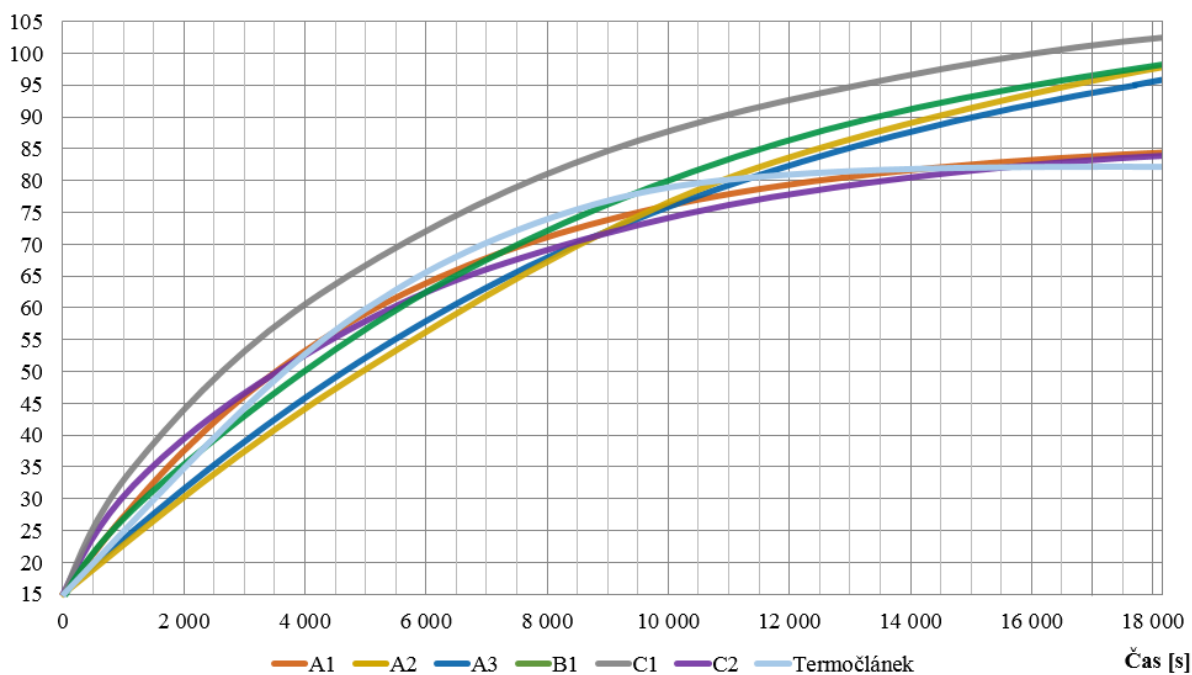
**Obr. 8.2** Porovnání dosažených teplot v měřících bodech 1-4 – 5 hodin zátěže

Obrázek 8.3 zobrazuje oteplovací charakteristiku z měřicího bodu č. 2. Její průběh zobrazuje

stav pod zátěží 5 hodin z počáteční teploty okolí. V grafu jsou vzájemně porovnány jednotlivé varianty, včetně oteplovací charakteristiky změřené termočlánkem. Je vidět, že významnou tendenci ustálení v čase 5 hodin pod zátěží projevuje právě charakteristika změřená termočlánkem. Přírůstek její teploty v rozmezí 4 (14 400s) až 5 hodin činí pouze 0,3°C. Česká technická norma ČSN EN 60076-11 [32] v části pojednávající o suchých transformátorech uvádí, že pokud se oteplení nezmění o více než 1K za hodinu, je oteplení konečné. Na základě tohoto tvrzení je tak teplota považována za ustálenou.

Ze simulovaných variant se tomuto trendu nejvíce blíží oteplovací charakteristika verze A1 a C2. Obě dvě však vykazují tendenci mírného růstu, jelikož přírůstek teplot mezi časem 4 a 5 hodin zatěžování činí 3,2°C v případě varianty A1 a 3,6°C v případě varianty C2. Ostatní varianty dosahující vyšších teplot zjevně vykazují tendenci dále růst i po 5 hodinách zátěže.

**Teplota [°C]**

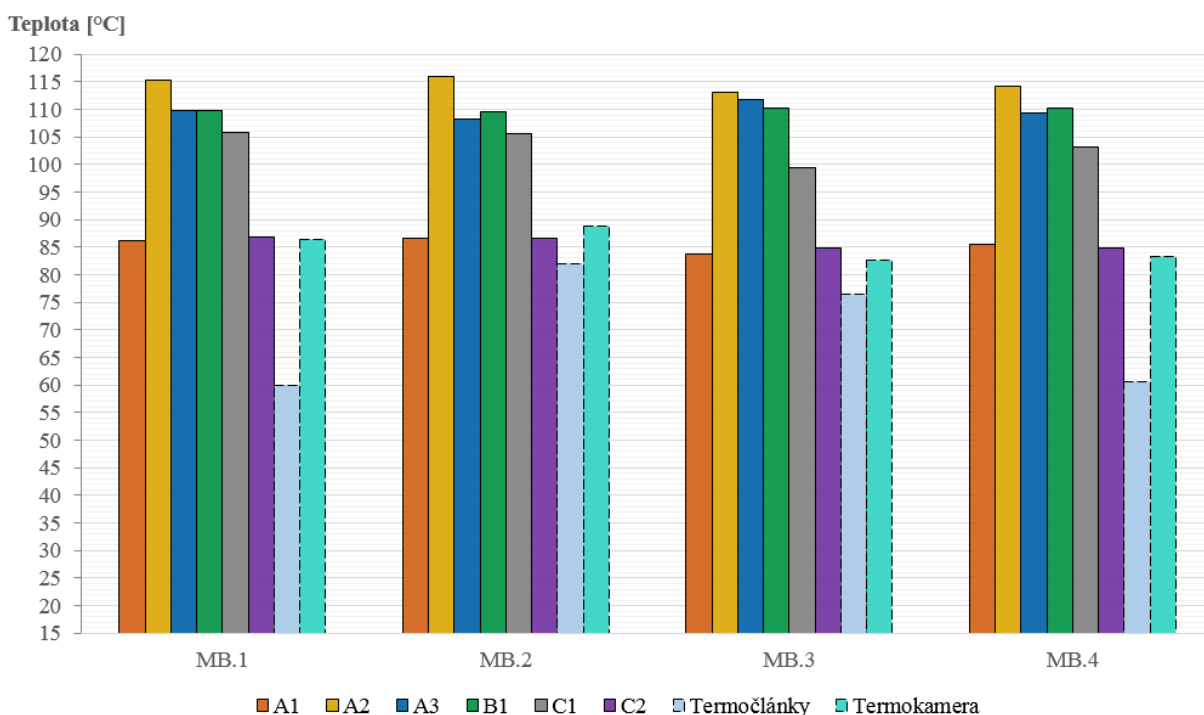


**Obr. 8.3** Porovnání oteplovacích charakteristik měřícího bodu 2 – 5 hodin zátěže

Nejvyšší hodnoty ustálených teplot ze simulovaných variant v měřících bodech 1 až 4 zobrazuje obrázek 8.4. Teploty získané pro tyto body pomocí termočlánků a termokamery jsou zohledněny rovněž. Jelikož jsou již však považovány za ustálené, jejich hodnoty se oproti hodnotám z obrázku 8.2 nemění. Stejně jako v případě ohřevu po 5 hodinách zátěže, varianty A1 a C2 jsou nejbližší shodě s experimentálně naměřenými daty. V případě A1 dosahuje teplota v bodě č. 2 hodnoty 86,7°C. Teplota varianty C2 po svém ustálení dosahuje rovněž hodnoty

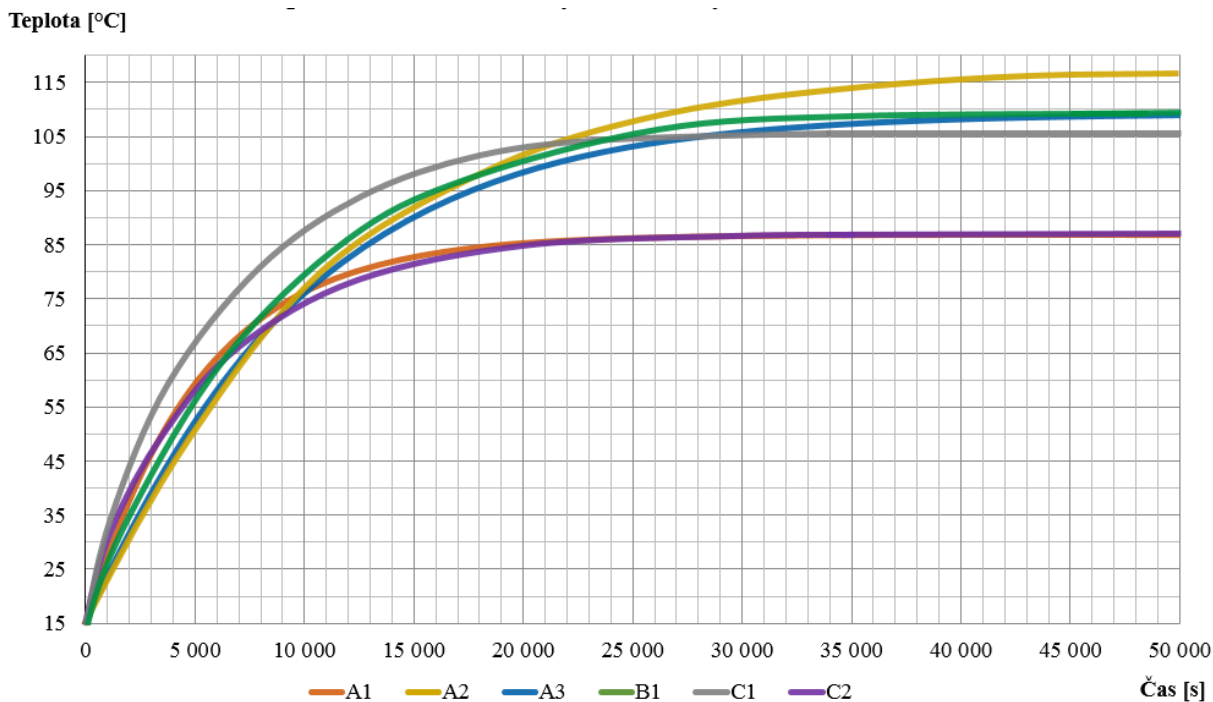
86,7°C. Rozmezí teplot ostatních variant je nyní mezi 105,5°C a 115,9°C. Největší odchylky však nyní dosahuje varianta A2.

Při zohlednění výsledků ze všech čtyř měřících bodů je možné si udělat představu o vlivu komplexnosti geometrie a jejích detailů na konečné hodnoty teplot. V případě, že se vezmou v úvahu varianty A2, B1 a C1 vzájemně se lišící pouze propracovaností detailů geometrie, je tak možné rovněž z obrázku 8.4 vidět, že varianta A2, která obsahuje model zjednodušené geometrie tlumivky sinusového filtru a která je simulovaná v Ansys Fluent, dosahuje pokaždé nejvyšších teplot v porovnání s variantou B1 zahrnující středně detailní geometrii a C1, která simuluje přestup tepla v nejdetailejší geometrii. Varianta C1 naopak dosahuje nejnižších teplot ve všech bodech v porovnání s A2 a B1 při uvažování stejných hodnot ztrátových výkonů. V případě bodu č. 2, tak dochází u varianty B1 ke snížení teploty o 6,4°C vůči A2 a u C1 ke snížení o 10,4°C vůči variantě A2.



Obr. 8.4 Porovnání dosažených teplot v měřících bodech 1-4 – ustálený stav

Čas, ve kterém došlo k ustálení teplot jednotlivých variant je pro měřící bod č. 2 zobrazen pomocí oteplovací charakteristiky na obrázku 8.5. Varianta A1 dosáhla ustálení po 8 hodinách (29 000s), varianta C2 po 8,3 hodinách (30 000s) a varianta C1 po 9,4 hodinách (34 000s). Teploty variant A2, A3 a B1 dosahovaly ustálení podstatně déle. V případě varianty A2 tomu bylo až po 12,5 hodinách (45 000s), u A3 po 13,3 hodinách (48 000s) a u B1 po 10,6 hodinách (38 000s).



Obr. 8.5 Porovnání oteplovacích charakteristik měřícího bodu 2 – ustálený stav

### 8.1.2 Vyhodnocení teplotního pole

V následující části jsou uvedena povrchová rozložení teplot jednotlivých variant v porovnání s teplotním polem sejmutým termokamerou. Obrázky 8.6 až 8.9 zobrazují teplotní pole odpovídající času 5 hodin pod zátěží včetně vybraných bodů a jejich teplot. Pro orientační přehled byly vybrány body v místech na povrchu stranového a prostředního vinutí a také v místě, kde dochází ke kontaktu jádra a prostřední kostry vinutí. Zde je pak dle termokamery zaznamenána nejvyšší změřená teplota na hodnotě 87,8°C. Teplota měřeného bodu na středním vinutí dosáhla 82,5°C a na krajním vinutí 76,9°C.

Varianta A1 vykazuje stejný charakter rozložení teplotního pole, kde nejvyšší teplota je dosažena mezi jádrem a střední kostrou vinutí a kde střední vinutí dosáhlo rovněž vyšší teploty než krajní. Oproti snímku z termokamery je však teplotní pole napříč celým modelem více homogenní a tak vzájemné rozdíly teplot jsou ve vybraných bodech nižší.

V případě varianty A2 se zřetelně koncentrace nejvyšších teplot vyskytuje v oblasti jádra, kde je rovnoměrně rozložena. Oproti ostatním variantám a datům z termokamery však krajní vinutí dosahují vyšší teploty než střední vinutí. S přihlédnutím k oteplovacím charakteristikám z 8.5 je však patrné, že teploty u A2 mají ještě v čase 5 hodin pod zátěží značnou tendenci růst,

než dosáhnou ustáleného stavu. Jakmile ale k ustálení dojde, z výsledků simulace je známo že střední vinutí již dosahuje vyšších teplot v porovnání s krajními.

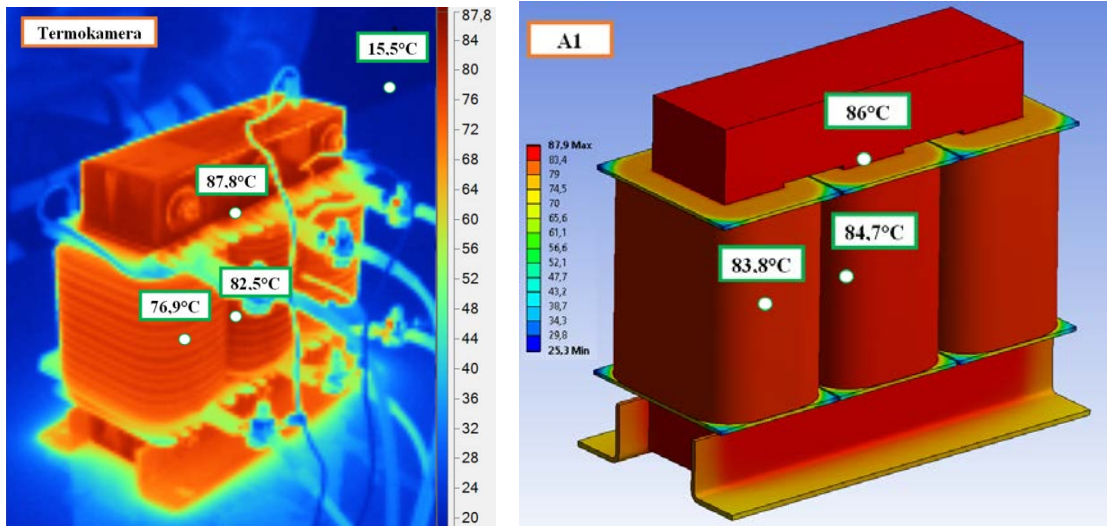
Podle simulace provedené v softwaru STAR-CCM+ (varianta A3), dochází ke koncentraci nejvyšších povrchových teplot v oblasti středního vinutí jak je vidět na obrázku 8.7. Vzájemné rozdíly mezi měřenými body jsou však do 2,2°C. Stejně jako v případě A1, je tak teplotní pole napříč geometrií značně homogenní. Homogenita a charakterističnost tohoto rozložení včetně koncentrace nejvyšších teplot v oblasti středního vinutí se až do dosažení ustáleného stavu nemění.

Zohlednění dalších detailů a přidání součástí u varianty B1 má v porovnání s variantou A2 za následek celkové snížení doby ustálení (obrázek 8.5) a rovněž snížení teplot celého modelu v ustáleném stavu (obrázek 8.4). Z rozložení teplotního pole v čase 5 hodin pod zátěží je na obrázku 8.8 vidět, že vzájemné rozdíly teplot mezi vinutími a jádrem jsou již zřetelnější než u předchozích variant. Svým rozložením se tak více blíží snímkům získaným z termokamery. V průběhu dalšího ustalování nicméně dochází k postupnému vyrovnávání teplot. Vzájemné rozdíly mezi měřenými body teplotního pole v ustáleném stavu jsou tak do 2,7°C.

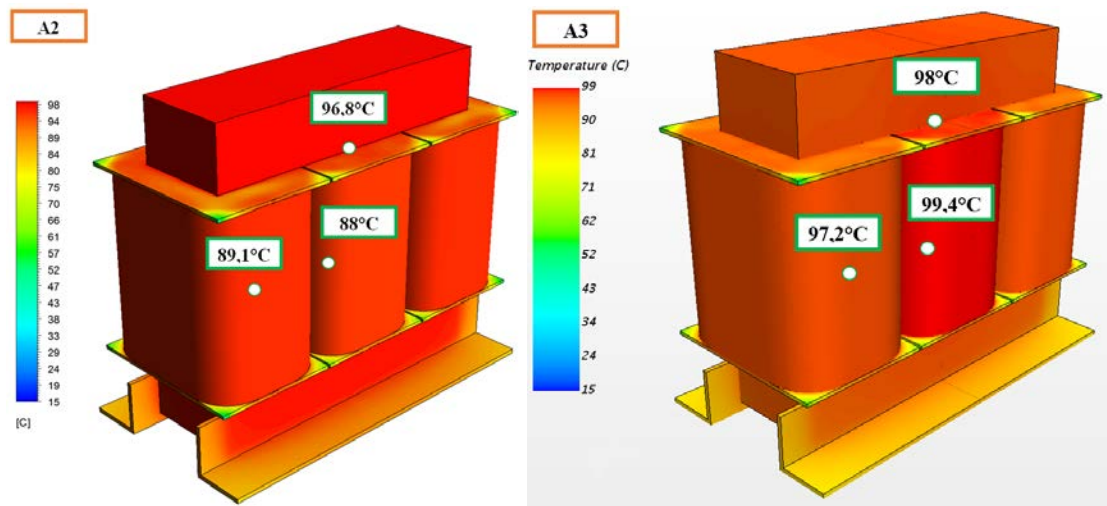
Varianta C1, která zohledňuje geometrii dalších komponent, má oproti B1 rovněž za následek snížení teplot celého modelu v ustáleném stavu a celkové doby ustálení. Vlivem vzduchových prostor se zvýšil teplotní rozdíl mezi bodem na středním vinutí a bodem na jádře v blízkosti kostry vinutí. Rozdíly mezi vinutími jsou zde minimální. Na obrázku 8.8 lze ale pozorovat vliv konduktivního přestupu tepla do desky na které je sinusový filtr umístěn. V porovnání s variantou B1 je tak teplota stahovací konstrukce a nižší. Ovlivněna je i teplota spodní části jádra, která je nyní v měřicím bodě č. 4 přibližně o 3°C nižší, než teplota na horním povrchu jádra v bodě č. 1, jak je možno vidět na obrázcích 8.2 a 8.4. Napájecí kabely rovněž zdatelně snižují teplotu na upínacích okách a drátu vedoucího z vinutí v porovnání s B1.

Aplikací revidovaných hodnot ztrátových výkonů na geometrii varianty C1 vzniká varianta C2, jejíž teplotní pole je vidět na obrázku 8.9. Ačkoliv teploty v čase 5 hodin rovněž nedosáhly ustálení, rozložení teplotního pole vykazuje svým charakterem již značnou podobnost se snímkem z termokamery. Charakter teplotního pole se i přes mírný nárůst teplot v průběhu ustalování nemění.

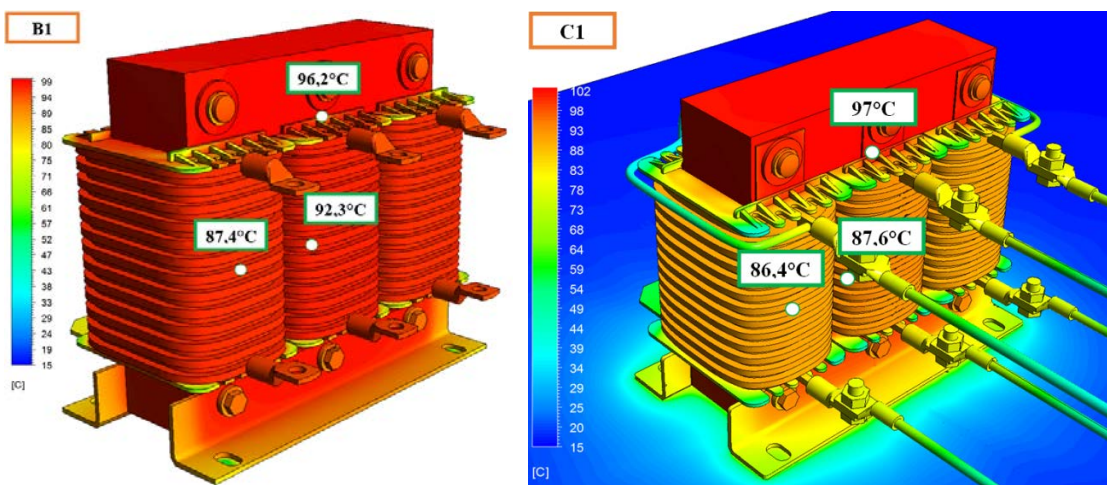




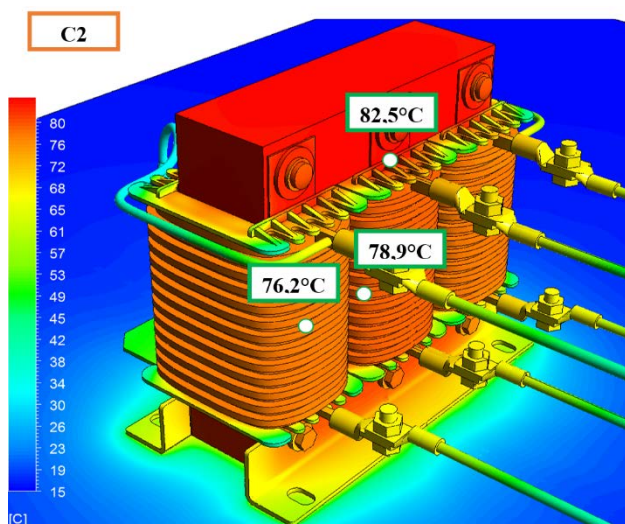
Obr. 8.6 Porovnání teplotních polí z termokamery a varianty A1 v čase 5 hodin



Obr. 8.7 Porovnání teplotních polí varianty A2 a A3 v čase 5 hodin



Obr. 8.8 Porovnání teplotních polí varianty B1 a C1 v čase 5 hodin



Obr. 8.9 Teplotní pole varianty C2 v čase 5 hodin

V rámci vyhodnocení výsledků simulací ohřevu sinusového filtru v otevřeném prostředí byla připravena řada dalších porovnání teplotních polí z jiných pohledů. Ty lze nalézt již nekomentované v přílohách B a C této práce.

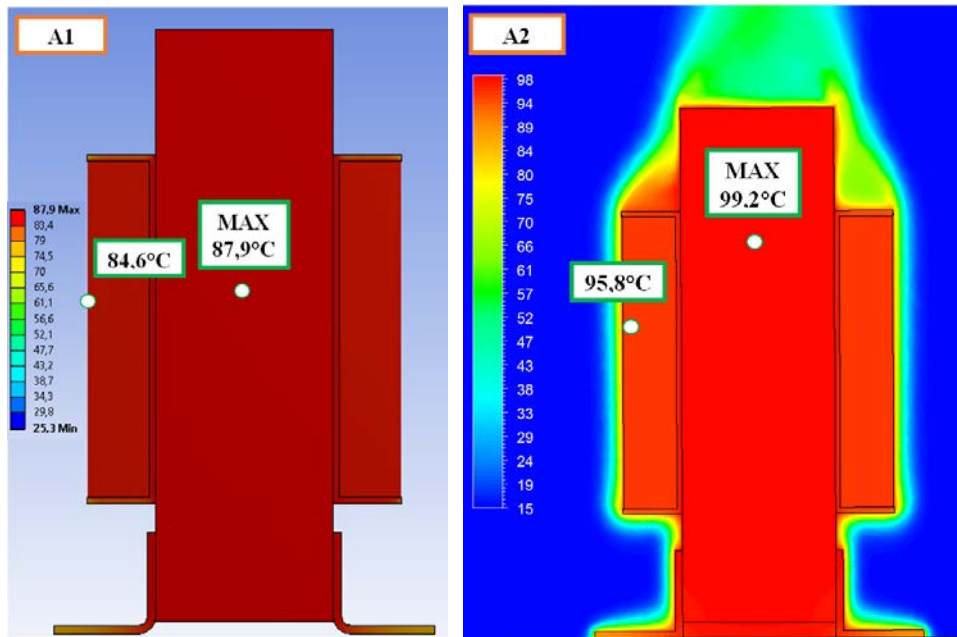
V následující sérii obrázků jsou zobrazeny příčné řezy modelem v čase 5 hodin pod zátěží. Je tak možné získat

informace o teplotním spádu mezi vnitřním zdrojem tepla a povrchem. V případě, že výsledné teplotní pole na povrchu sinusového filtru je v souladu s naměřenými daty a geometrie s materiálovými vlastnostmi odpovídá tvaru a materiálu reálného výrobku, lze předpokládat korektní určení teplotního spádu, který je numericky počítán na základě vztahu Fourierova zákona přenosu tepla vedením (kapitola 5.2).

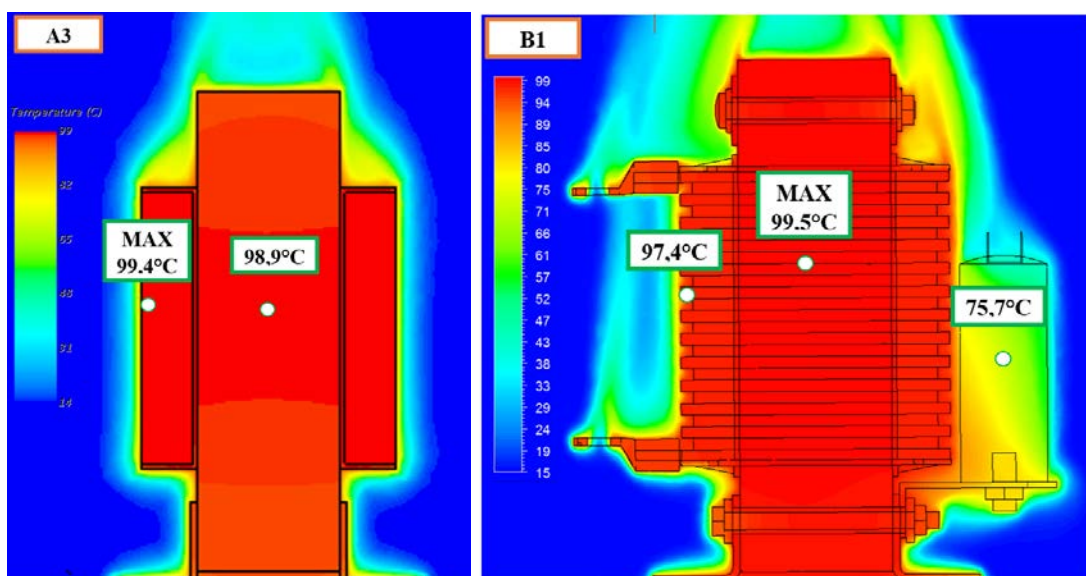
Na obrázku 8.10 je vidět, že maximální dosažená teplota celého modelu varianty A1 se nachází přibližně v jejím středu mírně nad polovinou výšky jádra. Přestup tepla do okolí nelze v tomto případě vizualizovat, jelikož je přímo určen okrajovou podmínkou součinitele přestupu tepla. Vizualizovat teploty okolního vzduchu je ale možné ve všech zbývajících variantách. V případě varianty A2 se oblast nejvyšší teploty nachází ve středu jádra přibližně ve třech čtvrtinách jeho výšky. Rozdíl mezi touto teplotou a teplotou na povrchu středního vinutí je  $3,4^{\circ}\text{C}$ . Teplotní spád je tak vyšší než u varianty A3, kde byl díky značné homogenitě teplotního pole určen na hodnotě  $0,5^{\circ}\text{C}$  a kde současně oblast nejvyšší teploty byla vypočtena v místech povrchu středního vinutí. Příčný řez středně detailní variantou B1 na obrázku 8.11 zahrnuje rovněž geometrii prostředního kondenzátoru. Zde je vidět, že vlivem těsného kontaktu jeho dosedací plochy s držákem je vytvořen značný teplotní gradient napříč celou kondenzátorovou geometrií. Oblast maximální teploty filtru se vyskytuje ve střední části jádra přibližně ve výšce připojovacích pinů kondenzátoru. Teplotní spád mezi touto oblastí a povrchem je  $2,1^{\circ}\text{C}$ . Vlivem vzduchových dutin, zohledněním geometrie napájecích kabelů a nosné desky se dosáhlo značného snížení homogenity teplotního pole celou geometrií varianty C1. Oblast maximální teploty dále leží ve střední části jádra, avšak je posunutá přibližně do třech čtvrtin jeho výšky. Teplotní spád mezi povrchem a touto oblastí se zvýšil až na  $10,5^{\circ}\text{C}$ . Zmenšením styčné plochy kondenzátoru s držákem a uvažováním vzduchové mezery došlo ke snížení

teplotního gradientu a teploty napříč kondenzátorem v porovnání s variantou B1. Charakter teplotního pole u varianty C2 je obdobný C1, dochází zde ale k přesunu oblasti nejvyšší teploty ve střední části jádra přibližně do dvou třetin jeho výšky.

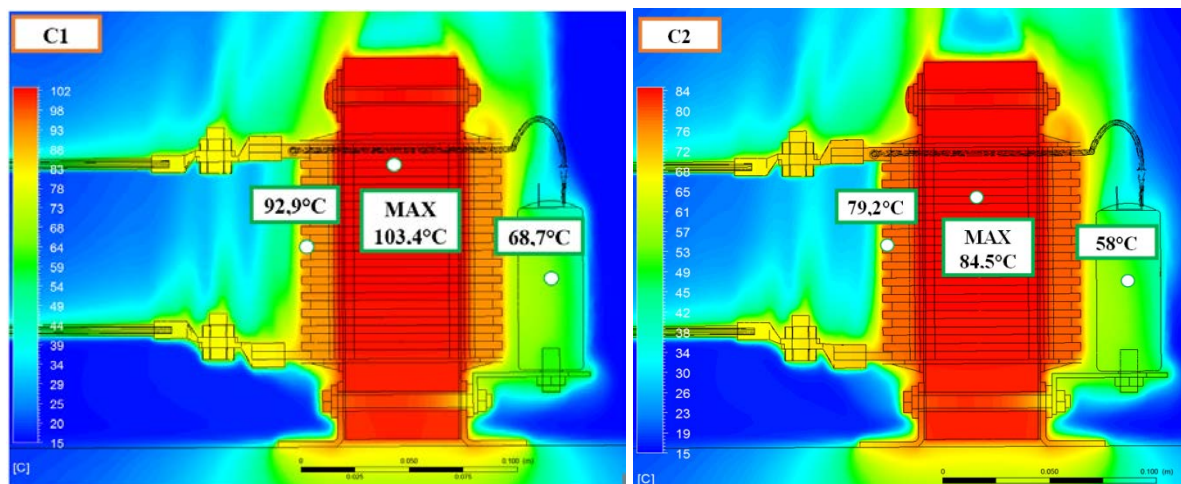
Příčné řezy variant B1, C1 a C2 ukazují, že kondenzátory jsou umístěny mimo oblast ohřívání proudy vzduchu. Ohřev kondenzátorů od vinutí je minimalizován díky charakteru obtékání okolního vzduchu a z hlediska teplené optimalizace lze říci, že v tomto případě je umístění kondenzátorů na vhodném místě.



**Obr. 8.10** Příčný řez středem tlumivky sinusového filtru varianty A1 a A2 v čase 5 hodin



**Obr. 8.11** Příčný řez středem tlumivky sinusového filtru a sinusového filtru varianty A3 a B1 v čase 5 hodin



Obr. 8.12 Příčný řez středem sinusového filtru varianty C1 a C2 v čase 5 hodin

## 8.2 Ohřev v uzavřeném prostředí s aktivním chlazením

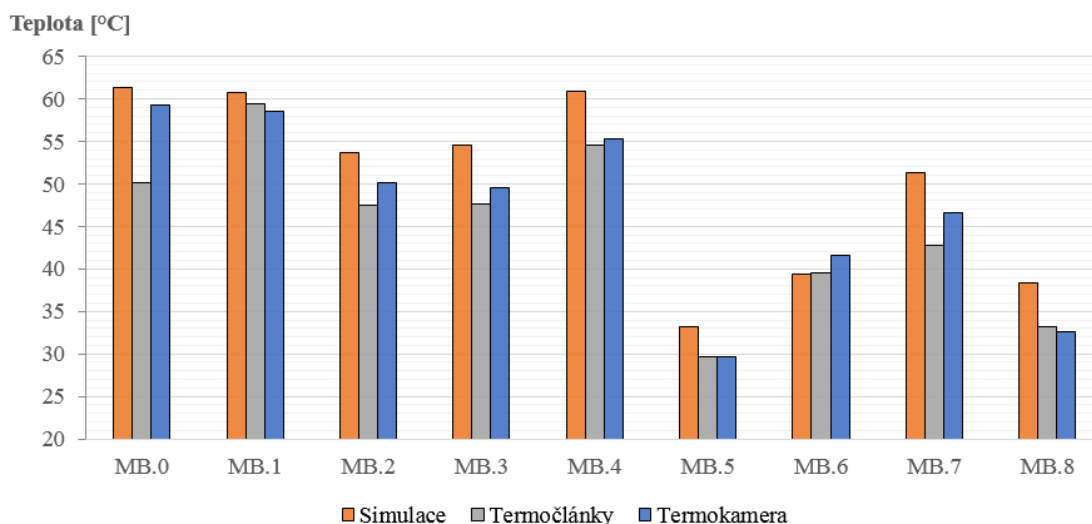
Ohřev byl analyzován na geometrické variantě D1 (kapitola 6.8), která zahrnuje detailní geometrii sinusového filtru vycházející z varianty C1 a C2, včetně geometrie rozváděčové skříně se vstupem pro proudění generované ventilátorem a s výstupy pro odvod vzduchu. Ohřev je posuzován zejména v oblasti sinusového filtru a přilehlé nosné konstrukce L-profilů. Výsledkem je i simulace přestupu tepla do stěn měřicí rozváděčové skříně, avšak vzhledem k ohřevu pouze v řádu desetin stupňů Celsia tak nevznikla potřeba tuto oblast dále analyzovat.

### 8.2.1 Vyhodnocení dosažených teplot

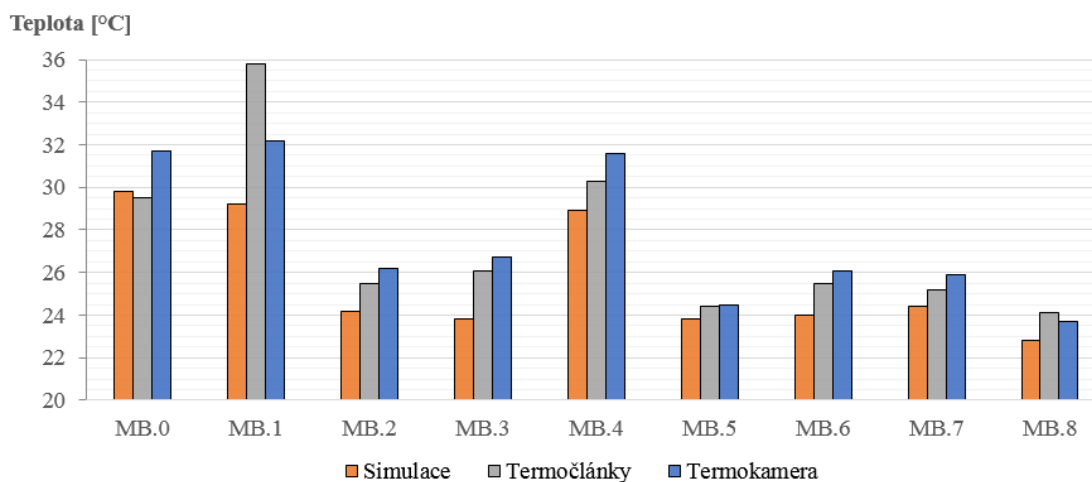
V prostředí měřicí rozváděčové skříně byl prvně vyhodnocen režim s vypnutým aktivním chlazením v momentě, kdy teploty dosáhly ustálení. Následně byla výstupní rychlost ventilátoru nastavena na  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a teploty vyhodnoceny opětovně po jejich ustálení. Stejným způsobem byla získána data o ustálených teplotách z režimů rychlostí  $5$ ,  $10$  a  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Na obrázku 8.13 je vidět vzájemné porovnání dosažených teplot získaných ze simulace, měřením termočlánky a snímáním teplotního pole termokamerou v měřících bodech 0-8 při režimu vypnutého chlazení. Ve většině případů jsou teploty změřené termočlánky opět nižší než teploty získané termokamerou. Výjimku však tvoří dva body kde tomu tak není. Podle termokamery je nejvyšší dosažená teplota  $59,2^{\circ}\text{C}$  na horním povrchu jádra, tedy v bodě 0. Ze simulace je pro ten samý bod odečtena teplota na hodnotě  $61,4^{\circ}\text{C}$ . Změřená teplota termočlánkem je však jen  $50,2^{\circ}\text{C}$ . Kontakt mezi povrchem jádra a termočlánkem tak v tomto případě nebyl ideální.

V měřicím bodě č. 1 (mezi kostrou vinutí a jádrem) je naměřená teplota z termočlánku vyšší než dle termokamery. V režimu bez aktivního chlazení je možné tento rozdíl považovat za zanedbatelný avšak v režimech zapnutého aktivního chlazení se tento rozdíl nadále zvyšuje. Tento fakt tak indikuje postupný růst teplotního spádu mezi povrchem a oblastí v šterbině mezi jádrem kostrou vinutí se zvyšující se rychlostí okolního proudění.



**Obr. 8.13** Porovnání dosažených teplot v měřicích bodech 0-8 při vypnutém aktivním chlazení – ustálený stav



**Obr. 8.14** Porovnání dosažených teplot v měřicích bodech 0-8 při rychlosti proudu vzduchu  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav

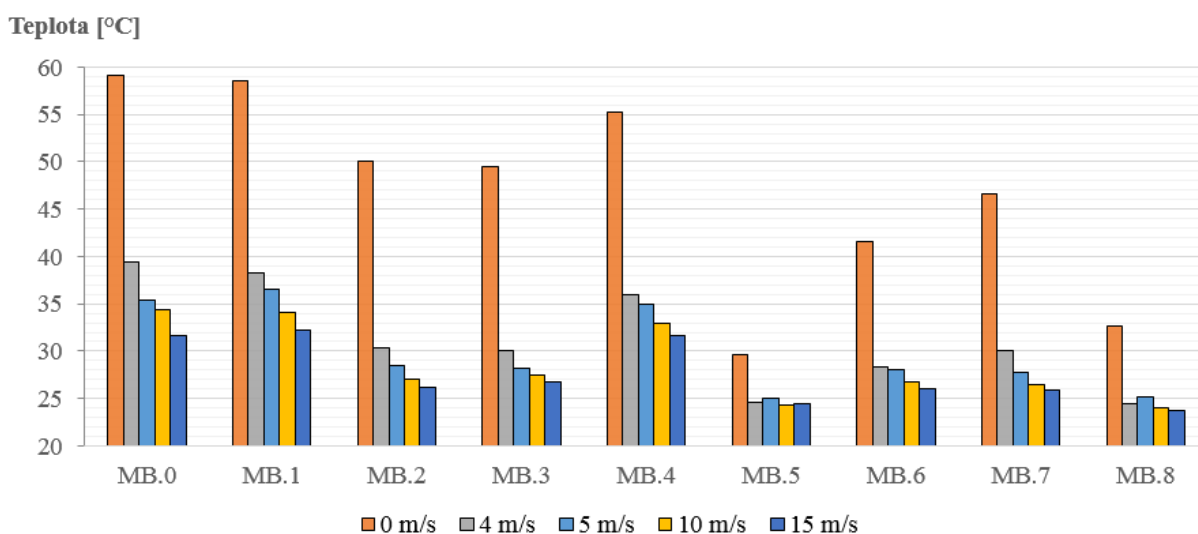
Teploty získané ze simulace dosahují v režimu bez aktivního chlazení napříč všemi body stejných, nebo maximálně o  $5^{\circ}\text{C}$  vyšších hodnot, než teploty naměřené termokamerou. Postupným zvyšování rychlosti okolního proudění se však tento trend mění. Výsledné teploty ze simulace dosahují nižších hodnot než jak je tomu v případě změřených. Na obrázku 8.14 je tak možné si všimnout, že pro body 0-8 je většina teplot odečtených ze simulace pro režim

rychlosti proudu vzduchu  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  až o  $2,9^\circ\text{C}$  nižších, než dle termokamery. To může být způsobeno proměnností úhlu, pod kterým proudí vzduch z ventilátoru do okolí. V simulacích jednotlivých režimů je po celou dobu uvažována jeho hodnota konstantní, ze zkušenosti je ale známo, že změna tohoto úhlu o jednotky stupňů způsobuje změnu teplot sinusového filtru v řádu jednotek procent. Jeho přesnější určení však vyžaduje provést sérii experimentálních měření, zaměřených na vizualizaci výstupního proudění z ventilátoru v jednotlivých režimech, či na detailní proměření veličin proudového pole. Tato aktivita je nicméně nad rámec této práce.

Další vyhodnocení dosažených teplot v měřicích bodech 0-8 při rychlostech proudu vzduchu  $4, 5$  a  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  je uvedeno v přílohách D, E a G.

Obrázek 8.15 zobrazuje porovnání dosažených teplot v měřených bodech snímaných termokamerou pro vyhodnocovanou řadu režimů. Lze si všimnout, že nastavením výstupní rychlosti proudu vzduchu z ventilátoru na  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , dochází odvodem ztrátového výkonu ke značnému snížení teplot oproti režimu bez chlazení. Zvyšováním rychlosti výstupního proudu z ventilátoru dochází k dalšímu snížení teplot, je ale patrné, že účinek chlazení tomu není úměrný. V režimu proudění  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  tak teploty klesnou průměrně o  $32,3\%$  v porovnání s režimem bez chlazení. Pro režim  $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  je hodnota průměrného poklesu získaného ze všech devíti měřicích bodů  $34,7\%$ . Navýšením rychlosti na  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  způsobí průměrný pokles teplot o  $37,5\%$ . Pro režim s  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  je hodnota průměrného poklesu  $39,4\%$  v porovnání s režimem bez chlazení.

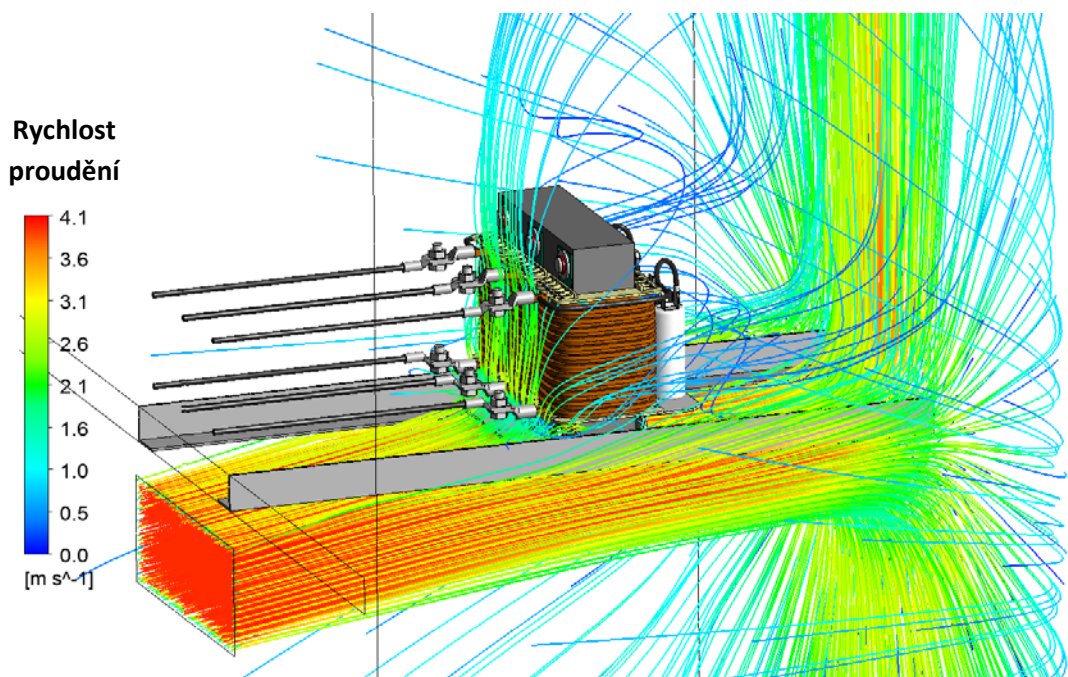
Grafické srovnání teplot měřicích bodů odečtených ze simulace a získaných měření termočlánky pro vyhodnocovanou řadu režimů je uvedené v přílohách G a H.



**Obr. 8.15** Termokamera - porovnání dosažených teplot jednotlivých režimů – ustálený stav

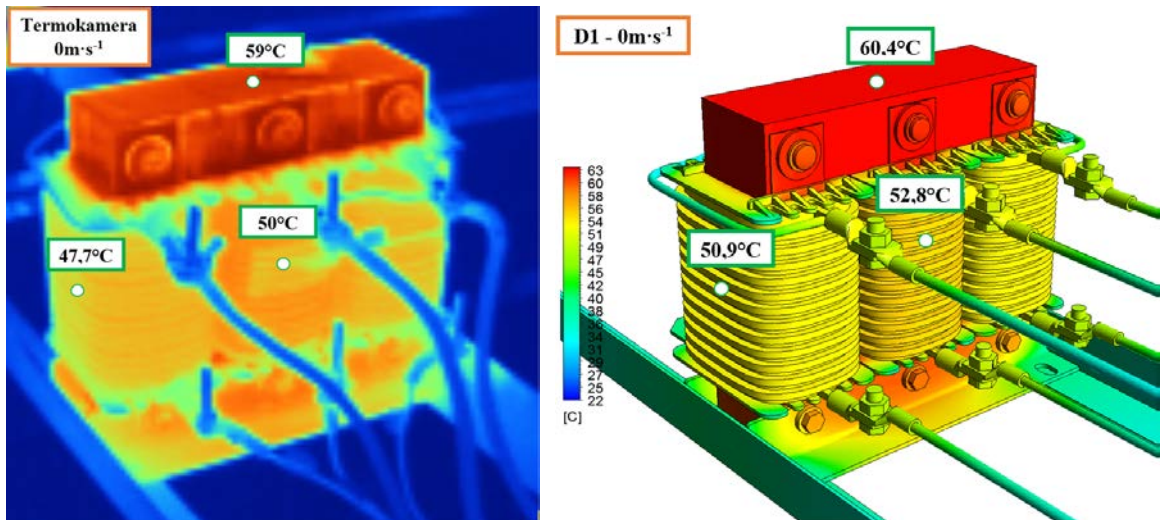
## 8.2.2 Vyhodnocení teplotního pole

Teplotní pole sinusového filtru při jednotlivých režimech chlazení je porovnáváno se snímkami z termokamery na sérii obrázků 8.17 – 8.21. Teplotní pole sinusového filtru je zobrazeno pod zátěží v čase ustálení. V tomto případě jsou ztráty ve vinutí přibližně 4 krát menší než v železe. Teplotní spády mezi vinutím a jádrem jsou tak vyšší, než v případě ohřevu v otevřeném prostředí (kapitola 8.1). Dalším vlivem je skutečnost, že spodní část sinusového filtru je přímo obtékána proudem vzduchu z ventilátoru, jak je s pomocí streamlines vidět na obrázku 8.16. Tyto křivky jsou tangentní k vektorům rychlosti proudění a ukazují směr, ve kterém se pohybuje nehmotná proudová částice v libovolném čase. Obrázek 8.16 zobrazuje proudové pole uvnitř měřicí rozváděčové skříně generované ventilátorem. Teplota z přední části sinusového filtru je odváděna prouděním usměrněného pomocí L-profilu stahovací konstrukce. Lze si také všimnout, že ačkoliv je spodní část filtru přímo obtékána proudem vzduchu, převážná část proudění z ventilátoru obtéká část nosných L-profilů a následně je usměrněna zadní stěnou měřicí rozváděčové skříně.

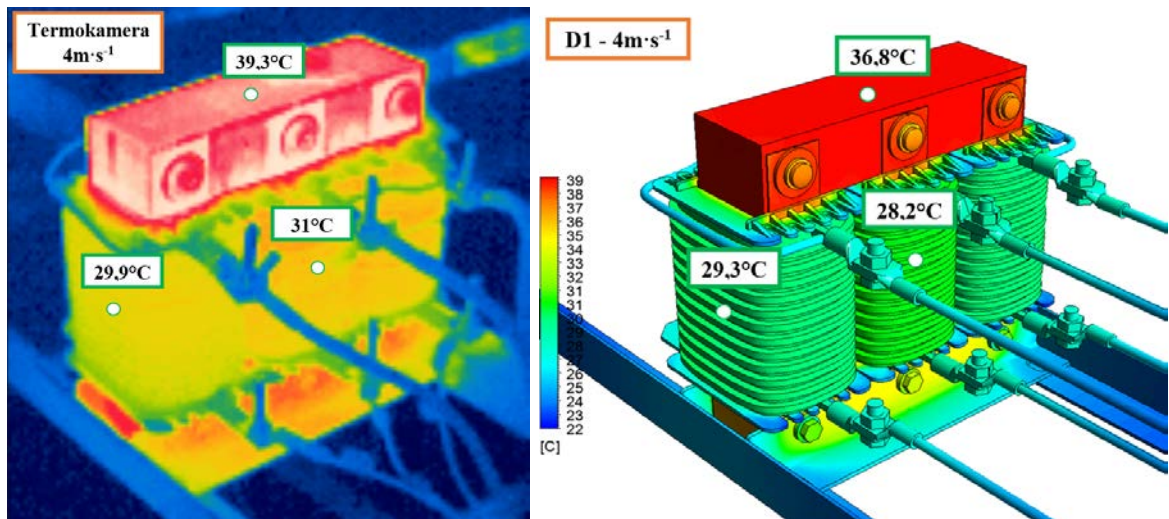


Obr. 8.16 Streamlines proudění vzduchu z ventilátoru – režim  $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

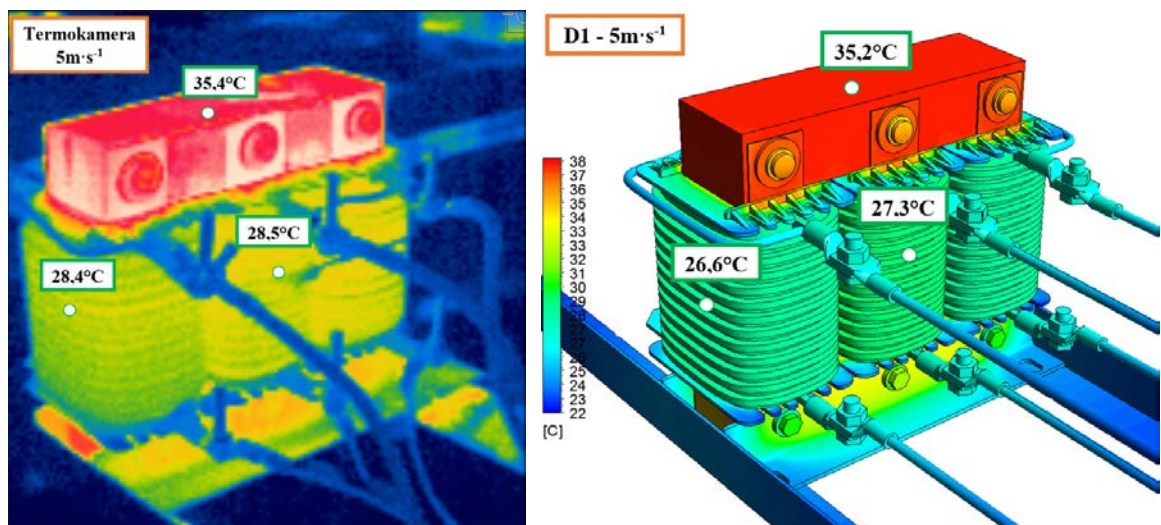
Z vybraných bodů na jádře, stranovém a středním vinutí je rovněž patrný trend pozorovatelný z obrázků 8.13 a 8.14., kdy dochází se vzrůstající rychlostí proudění z ventilátoru k výpočtům nižších teplot na povrchu filtru vzhledem k teplotám změřeným termokamerou. Charakter rozložení teplotního pole však odpovídá změřeným datům. Odchylka většiny změřených bodů se pohybuje v rozmezí 5 – 10%.



Obr. 8.17 Porovnání teplotních polí při vypnutém aktivním chlazení – ustálený stav

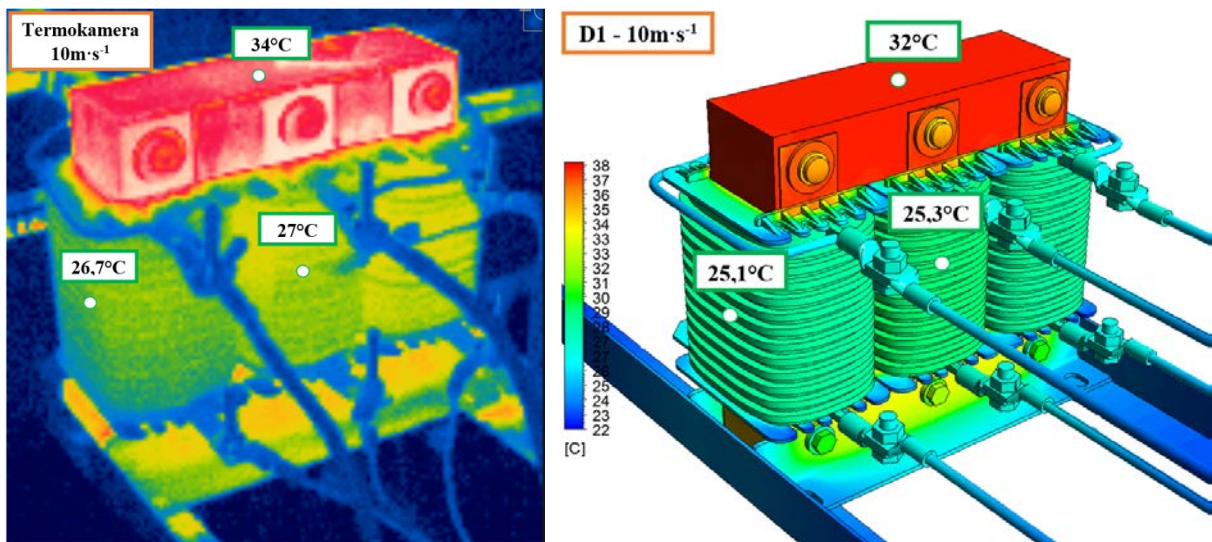


Obr. 8.18 Porovnání teplotních polí při rychlosti proudu vzduchu  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav

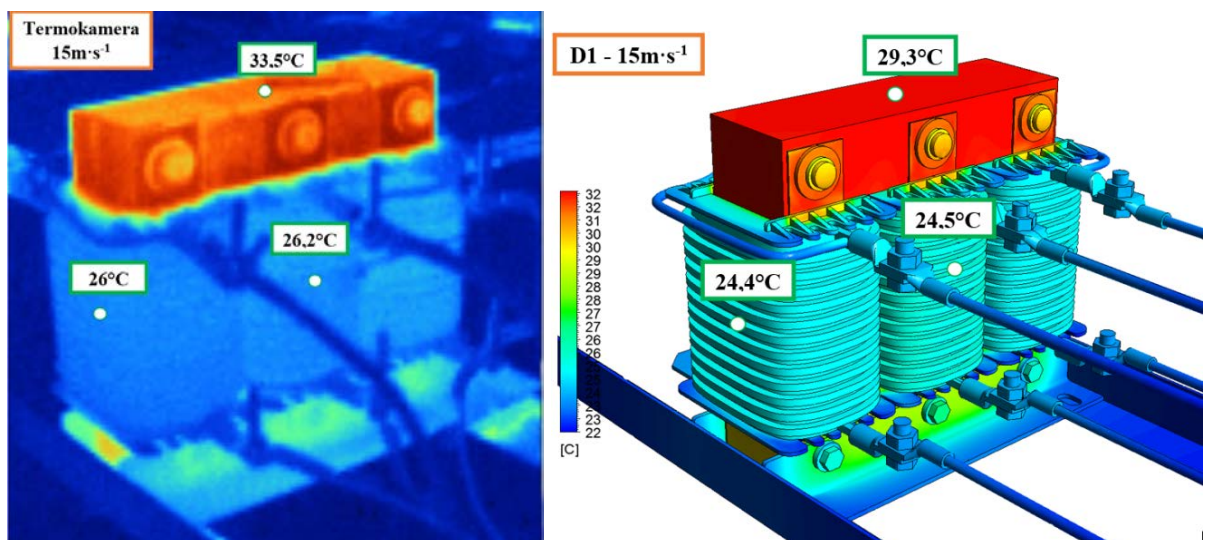


Obr. 8.19 Porovnání teplotních polí při rychlosti proudu vzduchu  $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav





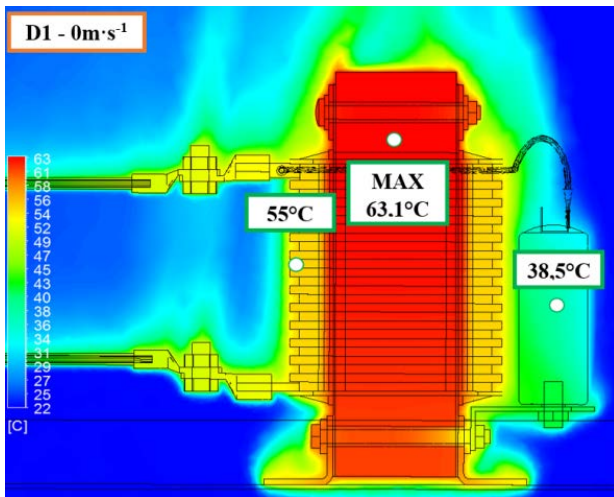
Obr. 8.20 Porovnání teplotních polí při rychlosti proudu vzduchu  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav



Obr. 8.21 Porovnání teplotních polí při rychlosti proudu vzduchu  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav

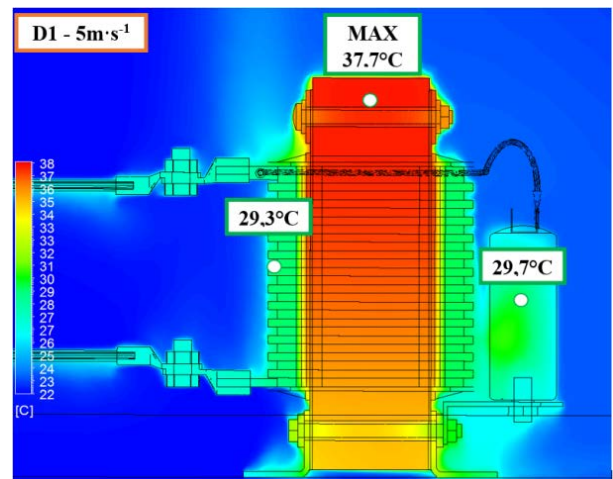
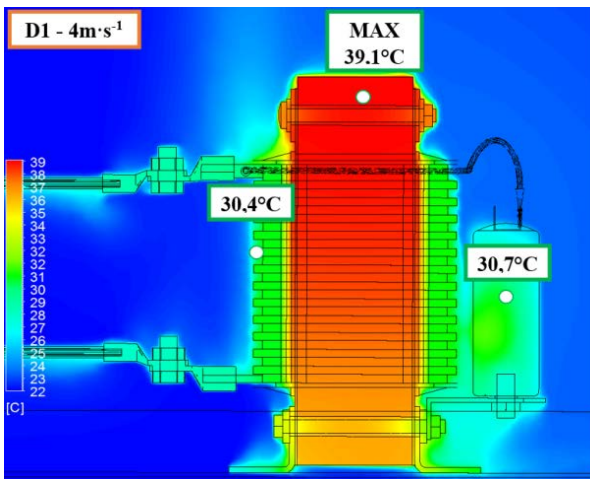
V rámci vyhodnocení výsledků simulací ohřevu sinusového filtru v uzavřeném prostředí s aktivním chlazením bylo připraveno porovnání teplotních polí z dalšího pohledu, který lze nalézt nekomentovaný v příloze I této práce.

V následující sérii obrázků jsou zobrazeny příčné řezy modelem, v čase ustálení pod zátěží. Na obrázku 8.22 je možné pozorovat teplotní spád mezi povrchem vinutí a oblastí s maximální teplotou při vypnutém aktivním chlazení. Zde je rozdíl  $8,1^{\circ}\text{C}$ . Oblast nejvyšší teploty je ve středu části jádra mezi kostrou vinutí a stahovacím šroubem. Jakmile je ale chlazení zapnuté, dochází k posunu této oblasti do horní části jádra až nad stahovací šroub. Rovněž se viditelně zvýšil spád mezi horní a spodní částí jádra. Spády mezi povrchem vinutí a oblastí nejvyšší

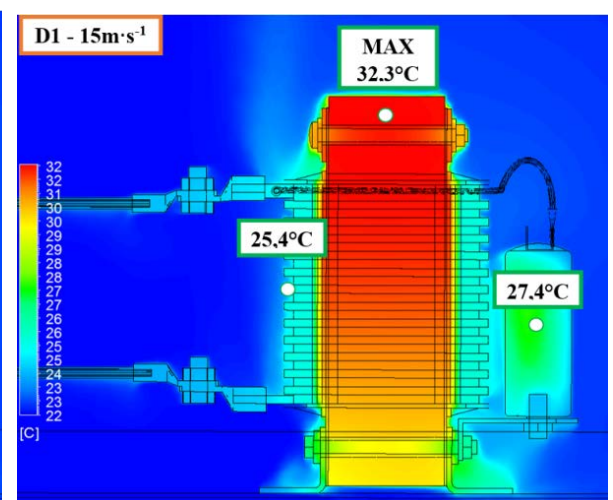
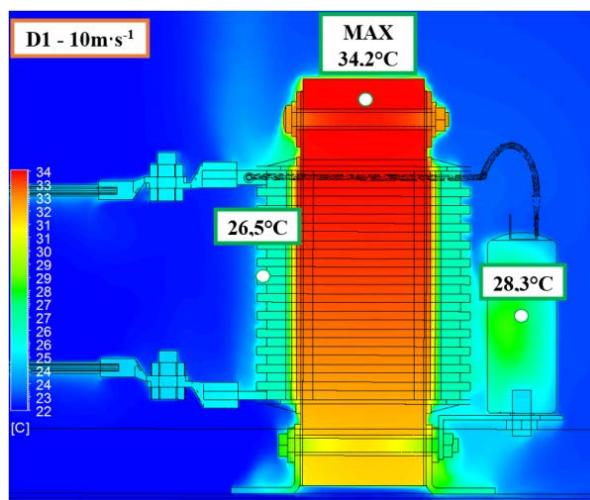


Obr. 8.22 Příčný řez středem sinusového filtru při rychlosti proudu vzduchu  $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav

teploty se pro rozmezí rychlosti proudění  $4 - 15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  pohybují mezi  $6,9^\circ\text{C} - 8,7^\circ\text{C}$ . Teplota v měřeném bodu uvnitř geometrie kondenzátoru klesá nejvýš o  $3,3^\circ\text{C}$  s výjimkou režimu bez aktivního chlazení.



Obr. 8.23 Příčný řez středem sinusového filtru při rychlosti proudu vzduchu 4 a  $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav



Obr. 8.24 Příčný řez středem sinusového filtru při rychlosti proudu vzduchu 10 a  $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav

## 9. Srovnání numerických simulací pro stanovení metodiky

V předcházející kapitole byla věnována pozornost především vyhodnocování teplotních polí ze simulací jednotlivých geometrických variant v porovnání s experimentálně získanými daty. Hledisko přesnosti predikce fyzikálních veličin lze tak považovat za nejvýznamnější. V technické praxi jsou numerické analýzy podpůrným nástrojem inženýrské činnosti, která je omezena časovým rámcem definovaným na základě projektových milníků. Se snahou docílit co nejbližší shody s experimentálně získanými daty, neúměrně narůstá výpočetní náročnost a pracnost přípravy celé simulace. Tato skutečnost však není žádoucí a důsledkem toho se tak běžně přistupuje k vypracování takové koncepce numerické analýzy, která poskytne výsledky s ještě akceptovatelnou odchylkou a současně splní daný časový rámec definovaný pro tuto aktivitu.

Tato kapitola zahrnuje vzájemné porovnání výsledků simulovaných variant z hlediska velikosti odchylek, jež vznikají srovnáním s experimentálními daty. Jsou zde rovněž uvedeny časové náročnosti jednotlivých simulací včetně nároků na použitý výpočetní hardware a současně je zde také věnován prostor obtížnosti jejich implementace a závěrečnému zhodnocení.

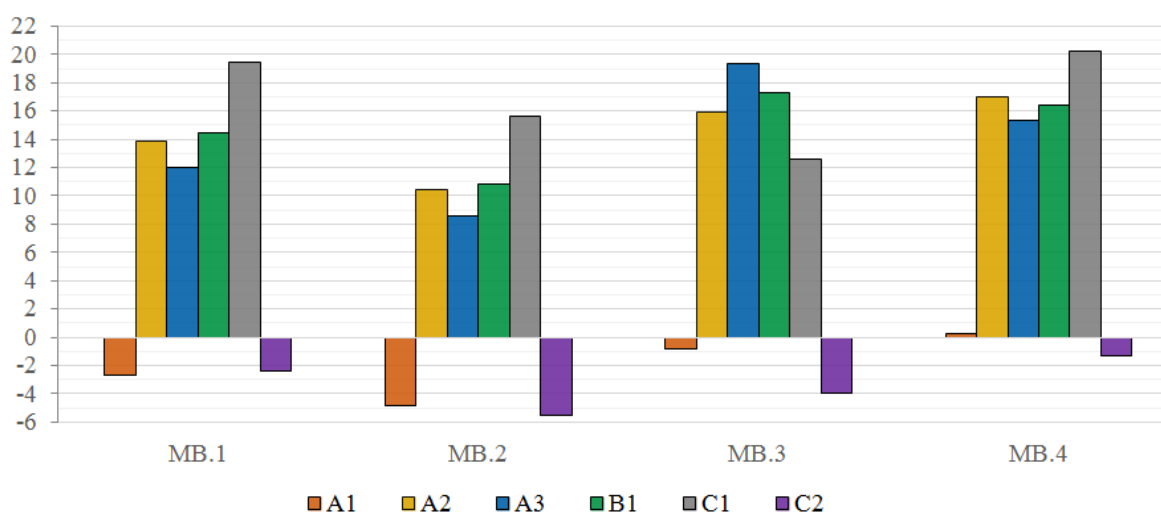
### 9.1 Přesnost výpočtu teplotního pole

Vyhodnocení přesnosti výpočtu teplotního pole navazuje na data získaná ze simulací a uvedená v předchozí kapitole 8. Shoda simulovaného teplotního pole jednotlivých variant je posuzována pomocí odchylky vzhledem k teplotě ze sejmutého snímku teplotního pole z termokamery. Obrázek 9.1 zobrazuje dílčí odchylky simulovaných variant v otevřeném prostředí v měřicích bodech 1-4. Pro výpočet odchylek byla použita data z grafu na obrázku 8.2. Je tak uvažován stav v čase 5 hodin pod zátěží. Z grafu je patrné, že v tomto čase dosahují nejnižších odchylek varianty A1 a C2, jejichž odchylky se pohybují v rozmezí 0,2 až 5,5%. Naopak nejvyšších odchylek zde dosahuje varianta C1 v rozmezí 12,6 až 20,3%. Odchylky variant A2 a B1 jsou v rozsahu 10,5% až 17,3% a v případě varianty A3 se jejich rozmezí pohybuje od 8,5% do 19,3%.

Většina variant v čase 5 hodin zátěže není ve stavu ustálení. Teploty mají tendenci ještě stoupat a tím měnit hodnoty odchylek. V případě, že je upřednostňována přesnost dosažených teplot v ustáleném stavu před validitou oteplovací charakteristiky, je možné sledovat dosažené odchylky na obrázku 9.2. Je vidět, že po ustálení došlo ke zmenšení odchylek u variant A1 a

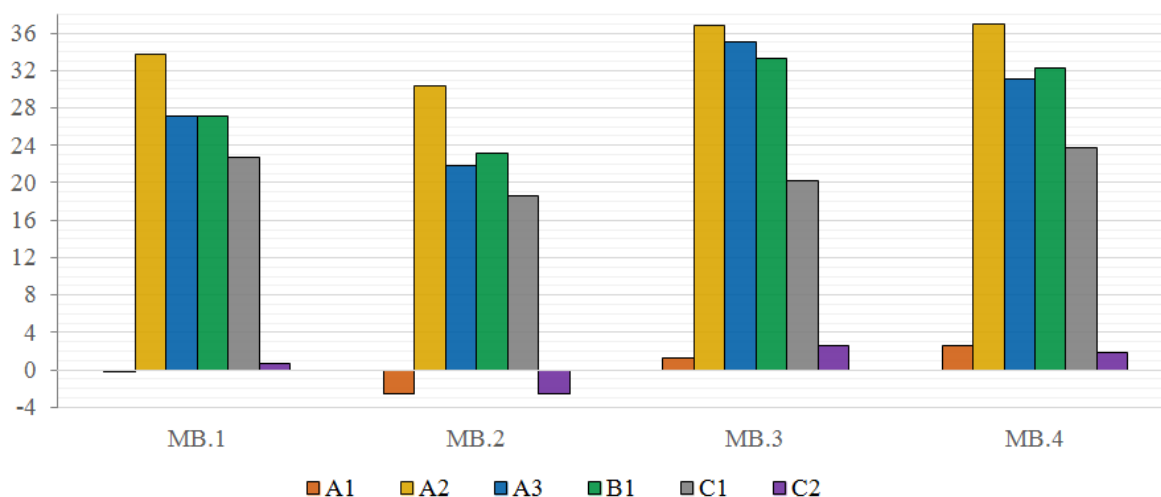
C2, jelikož v čase 5 hodin dosahovaly nižších teplot v porovnání s měřením a nebyly zcela ustálené. Nyní se jejich odchylky pohybují do 2,5% napříč všemi čtyřmi měřenými body. V důsledku ustálení a růstu teplot u dalších variant vzrostly i odchylky. Nejvyšších odchylek dosahuje varianta A2 v rozmezí od 30,4% do 36,9%. Varianta A3 provedená ve STAR-CCM+ obsahující stejnou geometrii jako A2, dosahuje nižších odchylek v rozsahu od 21,8% do 35,1%. Střední detailní geometrie varianty B1 snížila odchylky do oblasti od 27,1% do 33,3% a u detailní geometrie varianty C1 došlo rovněž ke snížení odchylek v rozmezí od 18,7% do 23,7%.

Odchylka [%]



Obr. 9.1 Porovnání odchylek teplot v měřících bodech 1-4 – 5 hodin zátěže

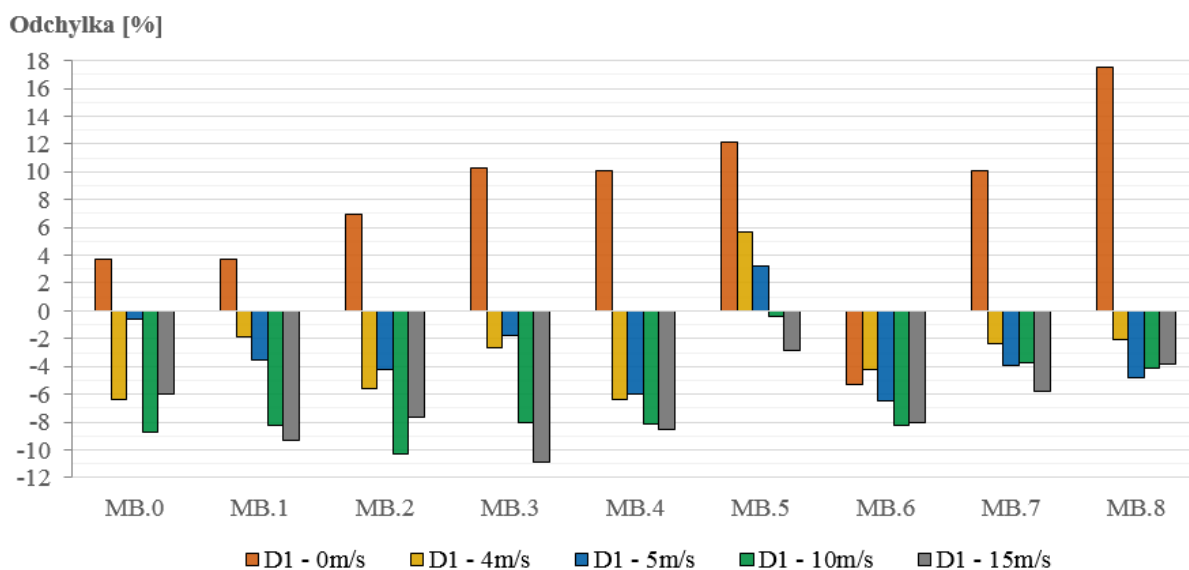
Odchylka [%]



Obr. 9.2 Porovnání odchylek teplot v měřících bodech 1-4 – ustálený stav

Odchytky pro případ ohřevu sinusového filtru v uzavřeném prostředí s aktivním chlazením jsou vidět na obrázku 9.3. Vyhodnoceny byly v 8 měřicích bodech v ustáleném stavu v porovnání s teplotami změřenými pomocí termokamery. V režimu, kdy aktivní chlazení není využíváno, dosahují teploty měřené napříč všemi osmi body průměrné odchytky 8,9%. Teplotní pole získané ze simulace se nejméně liší v místech na horním povrchu vinutí a ve štěrbině mezi kostrou vinutí a jádrem (MB.0 a MB.1) s odchylkou do 3,8%. Odchytky teplot na vinutích (MB.2, MB.3 a MB.7) je v rozsahu 7% až 10,3%. Teploty na spodním povrchu jádra a povrchu středního kondenzátoru (MB.4 a MB.5) jsou vyšší než změřené teploty o 10,1% a 12,1%. Odchytky na držáku kondenzátorů (MB.6) je 5,3%. Nejvyšší rozdíl teplot je v tomto případě v bodě č.8 na povrchu nosného L-profilu, kde odchytky dosáhla až 17,5%.

Teploty získané ze simulace v režimech s využívaným aktivním chlazením jsou naopak ve většině měřicích bodů nižší, než teploty změřené termokamerou. V režimu, kde výstupní rychlost proudění z ventilátoru je  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , dosahuje průměrná odchytky teplot 4,1%. Nejméně se teploty liší v bodech č.1, č.3, č.7 a č.8 v rozmezí od 1,8% do 2,7%. Teploty v ostatních měřených bodech se odchytky v rozsahu od 4,2% do 6,3%. Při výstupní rychlosti proudění z ventilátoru  $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , dosahuje průměrná odchytky napříč všemi osmi body hodnoty 3,8%. V bodech č.4 a č.8 se odchytky pohybují od 6% do 6,4% avšak ve zbývajících bodech se teploty liší nejvíce o 4,8%. Průměrná odchytky v režimu s výstupní rychlostí proudění z ventilátoru  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  narůstá na 6,7%. Zde, v místě na povrchu středního kondenzátoru (MB.5), bylo dosaženo téměř shodné teploty s odchylkou pouhých 0,4%. Na krajním vinutí (MB.7) a L-profilu (MB.8) jsou odchytky do 4,2%. Odchytky v ostatních bodech se pohybují v rozsahu od 8,2% do 10,3%. Režim s nejvyšší výstupní rychlostí proudění z ventilátoru má rovněž nejvyšší průměrnou odchytku simulovaných teplot vůči termokamerou změřeným teplotám. Odchytky zde dosahuje průměrně 7%. Stejně jako v případě předchozího režimu, nejméně se vzájemně liší teploty v bodě č.5 s odchylkou 2,9%. V místě na nosném L-profilu se teploty vzájemně liší o 3,8%. Ve zbývajících bodech odchytky narůstají a pohybují se v rozmezí od 5,8% do 10,9%.



Obr. 9.3 Porovnání odchylek teplot v měřicích bodech 1-8 – ustálený stav

## 9.2 Časová náročnost výpočtů

Etapa samotného výpočtu řešení běžně tvoří v rámci přípravy numerických analýz s komplexní geometrií nezanedbatelný časový úsek. Čas potřebný pro provedení výpočtu řešení uvedených variant se může značně lišit v závislosti na typech a použitém množství výpočetních jednotek. Na základě této skutečnosti bylo vytvořeno vzájemné srovnání výpočetních časů jednotlivých variant vztahované k době výpočtu varianty A2, jak je vidět na obrázku 9.4. Pro vytvoření lepší představy lze ale říci, že doby výpočtů uvedených variant se pohybují řádově od jednotek do desítek hodin. Parametrem, který definuje konvergenci řešení v případě simulace ohřevu sinusového filtru v otevřeném prostředí je teplota. Kritériem ustálení byl s přihlédnutím k ČSN EN 60076-11 (30) určen stav, kdy přírůstek oteplení není větší než 1K za hodinu viz. 8.1.1. V případě ohřevu sinusového filtru v uzavřeném prostředí s aktivním chlazením je konvergence vyhodnocena pomocí reziduálů. Kritérii dosažení konvergence jsou pak hodnoty uvedené v tabulce 9.1.

Reziduál	Absolutní kritérium
Continuity	$1 \cdot 10^{-4}$
X, Y, Z velocity	$1 \cdot 10^{-4}$
Energy	$1 \cdot 10^{-7}$
k	$1 \cdot 10^{-3}$
Epsilon	$1 \cdot 10^{-3}$

Tab. 9.1 Kritéria konvergence

Výjimku tvoří režim s vypnutým aktivním chlazením kde je kritériem konvergence opět teplota.

Na obrázku 9.4 je rovněž ke každé variantě a režimu přiřazen procentuální podíl potřebné doby síťování, který je zobrazen průhledným odstínem použité barvy. Tento podíl zahrnuje i

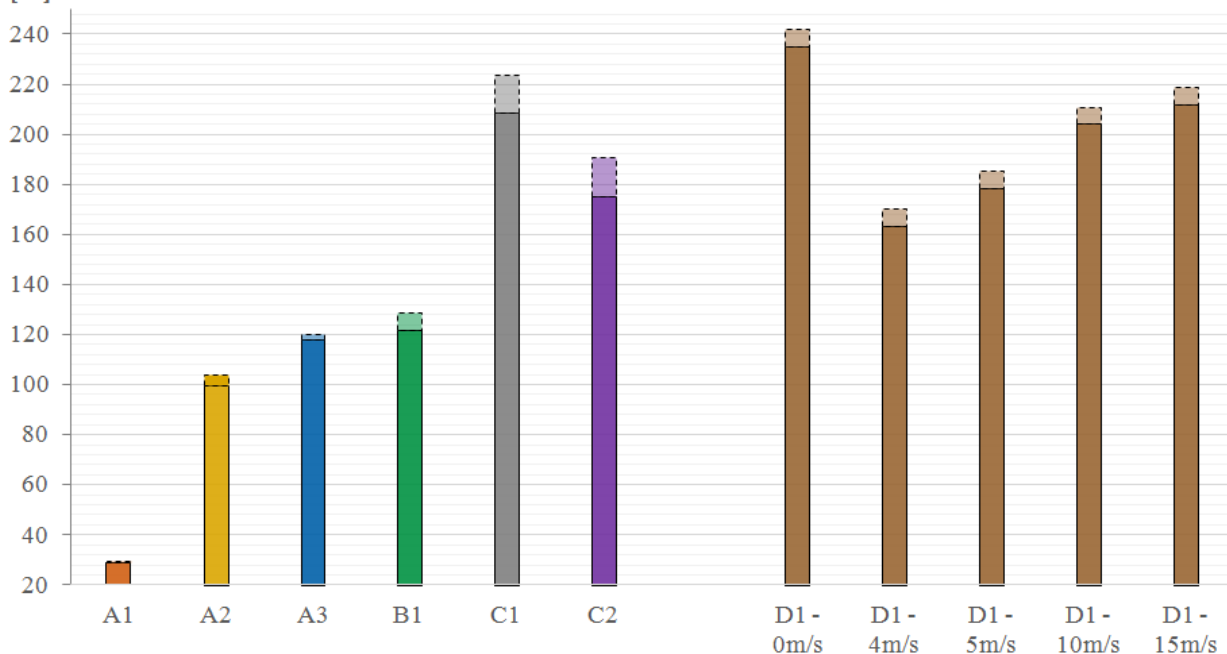
čas potřebný pro převod tetrahedrálních elementů na konečné polyhedrální elementy, jak je tomu v případě varianty A2, B1, C1 a C2.

Varianta A1 řešená v softwaru Ansys Transient Thermal zahrnující zjednodušenou geometrii vyžaduje 29% doby potřebné k řešení varianty A2 simulující rovněž ohřev zjednodušené geometrie, avšak v softwaru Ansys Fluent. Vzhledem k řádově nižšímu počtu elementů v porovnání s ostatními variantami je doba síťování u A1 zanedbatelná. Doba síťování geometrie varianty A2 tvoří přibližně 4% vzhledem k době výpočtu A2. Simulace ohřevu zjednodušené geometrie provedená ve STAR-CCM+ vyžaduje o 18% více času, než varianta A2. Síťování geometrie naopak tvoří přibližně 2% vzhledem k době výpočtu A2. Doba výpočtu ohřevu varianty B1 zohledňující středně detailní geometrii sinusového filtru je o 22% delší v porovnání s variantou A2. Doba potřebná k vytvoření sítě se prodloužila na 7% vzhledem k době výpočtu A2. Nejdelší doba potřebná k síťování je v případech variant C1 a C2 zohledňujících detailní geometrii sinusového filtru. Zde proces síťování vyžaduje u obou variant 15% času vzhledem k době výpočtu A2. Doba potřebná pro výpočet se však liší v závislosti na aplikované odlišné hodnotě ztrátových výkonů. Řešení varianty C1 vyžaduje o 109% více času a u varianty C2 o 75% více času, než řešení varianty A2.

Proces síťování varianty D1 zahrnující detailní geometrii sinusového filtru a geometrii rozváděčové skříně vyžaduje přibližně 7% času vzhledem k době výpočtu A2. Ačkoliv je počet elementů vyšší než u variant C, neprobíhá zde proces převodu na polyhedrální typ elementů. Konečná síť je tak vytvořena výrazně rychleji. Nejdelší dobu k dosažení konvergence vyžaduje režim s vypnutým aktivním chlazením, která je o 135% delší vzhledem k době výpočtu A2. U režimů s aktivním chlazením se podle výstupní rychlosti proudění z ventilátoru doba výpočtu prodlužuje. V případě  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  je výpočet delší o 63% avšak v situaci kdy je výstupní rychlost  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  je výpočet delší o 112% v porovnání s variantou A2.

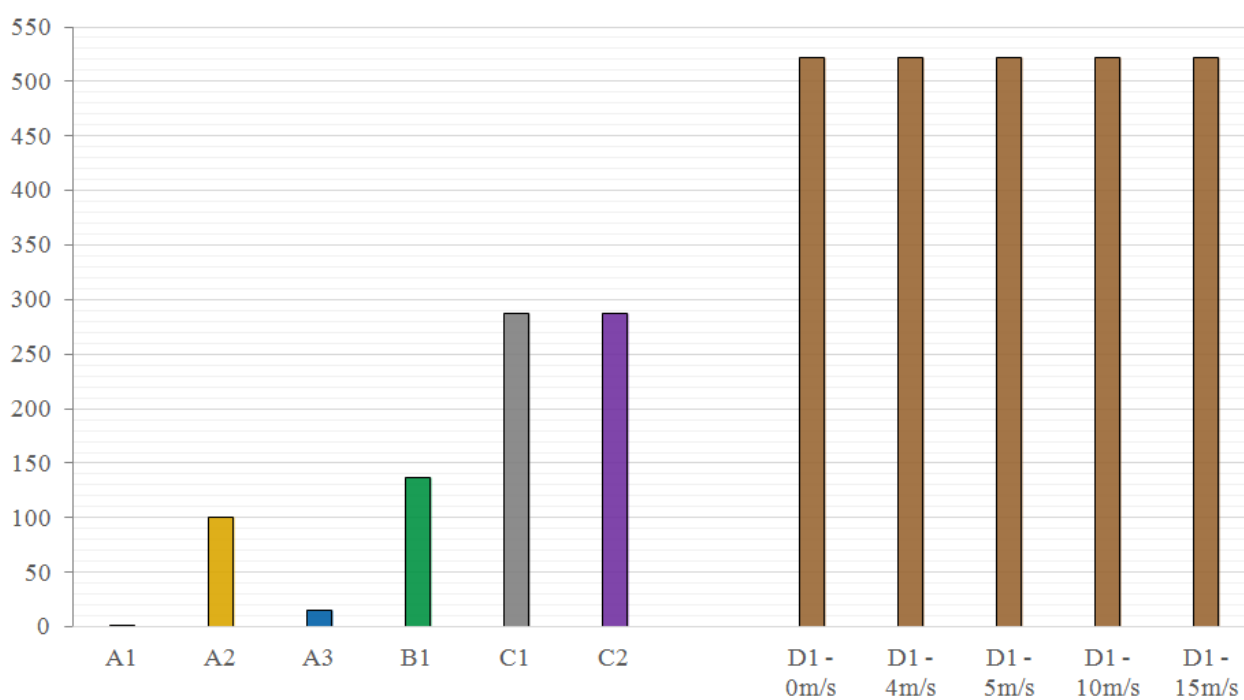
Na obrázku 9.5 je zobrazeno porovnání počtu elementů mezi jednotlivými variantami vztažených ke geometrii varianty A2. S výjimkou varianty A1 tvoří síť řádově miliony elementů. Počet elementů sítě varianty A1 je v porovnání s ostatními velice nízký a tvoří přibližně 1,4% vzhledem k počtu elementů A2. Varianta A3 obsahuje 15% elementů v porovnání s A2. Středně detailní geometrie varianty B1 způsobuje nárůst počtu elementů o 37% a varianty C nárůst až o 187% vzhledem k A2. Tento nárůst u variant C způsobuje především zohlednění geometrie 6 napájecích kabelů sinusového filtru. Varianta D1 zohledňující další prvky v uzavřeném prostředí a ve které neprobíhá proces konverze elementů, vykazuje přibližně 5 násobný nárůst počtu elementů v porovnání s A2.

**Doba výpočtu a  
síťování  
[%]**



**Obr. 9.4** Doby výpočtu a síťování vztahené k variantě A2

**Počet elementů síť  
[%]**



**Obr. 9.5** Počty elementů síť jednotlivých geometrií vztahené k variantě A2

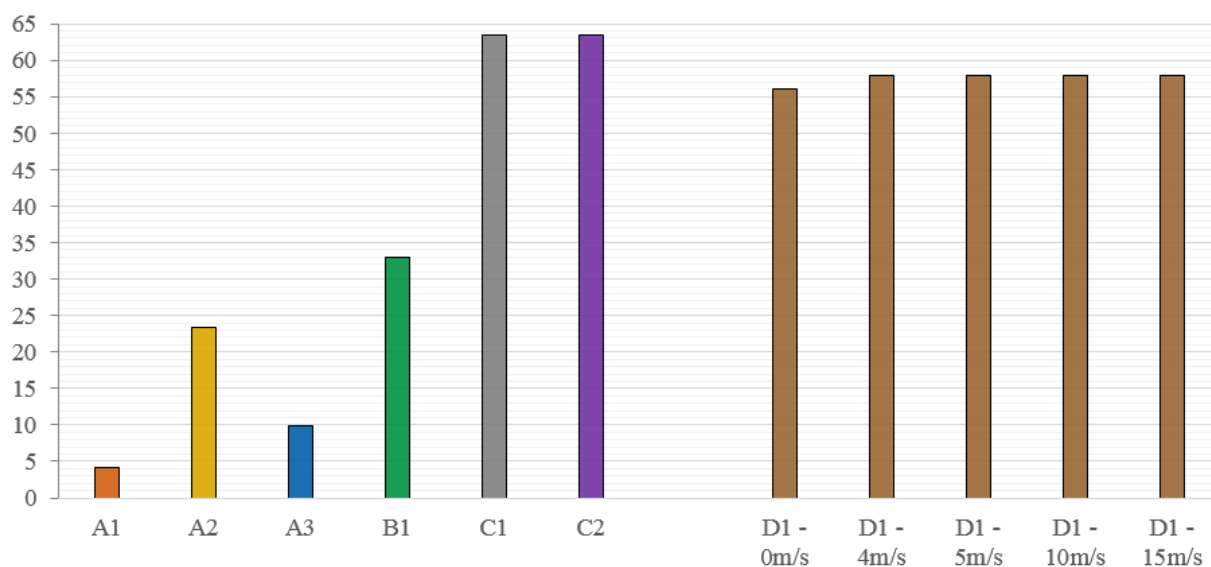


### 9.3 Hardwarové nároky

Z hlediska hardwarových nároků jednotlivých simulací ohřevu sinusového filtru může být vodítkem vzájemné porovnání využití operační paměti, které je vidět na obrázku 9.6. Lze si všimnout, že využití kapacity operační paměti u analýz A2, B1, C1 a C2 provedených v Ansys Fluent charakterově odpovídá počtu elementů sítě jak je vidět na obrázku 9.5. Využití operační paměti u variant C1 a C2 zohledňující detailní geometrii tak vzroste přibližně trojnásobně oproti zjednodušené geometrii varianty A2 až na hodnotu 63GB. Varianty A1 a A3 využívají operační paměti podstatně méně ve srovnání s ostatními variantami, avšak poměr snížení není tak výrazný jako v případě počtu elementů sítě.

V případě simulací ohřevu varianty D1 v uzavřeném prostředí je vidět, že ačkoliv je celá geometrie vysíťována elementy tetrahedrálního typu jejichž počet je přibližně 5 násobný v porovnání s celkovým počtem elementů varianty A2, obsazení operační paměti je ve všech režimech přibližně 2,5 násobné vzhledem k A2.

Využití operační  
paměti  
[GB]

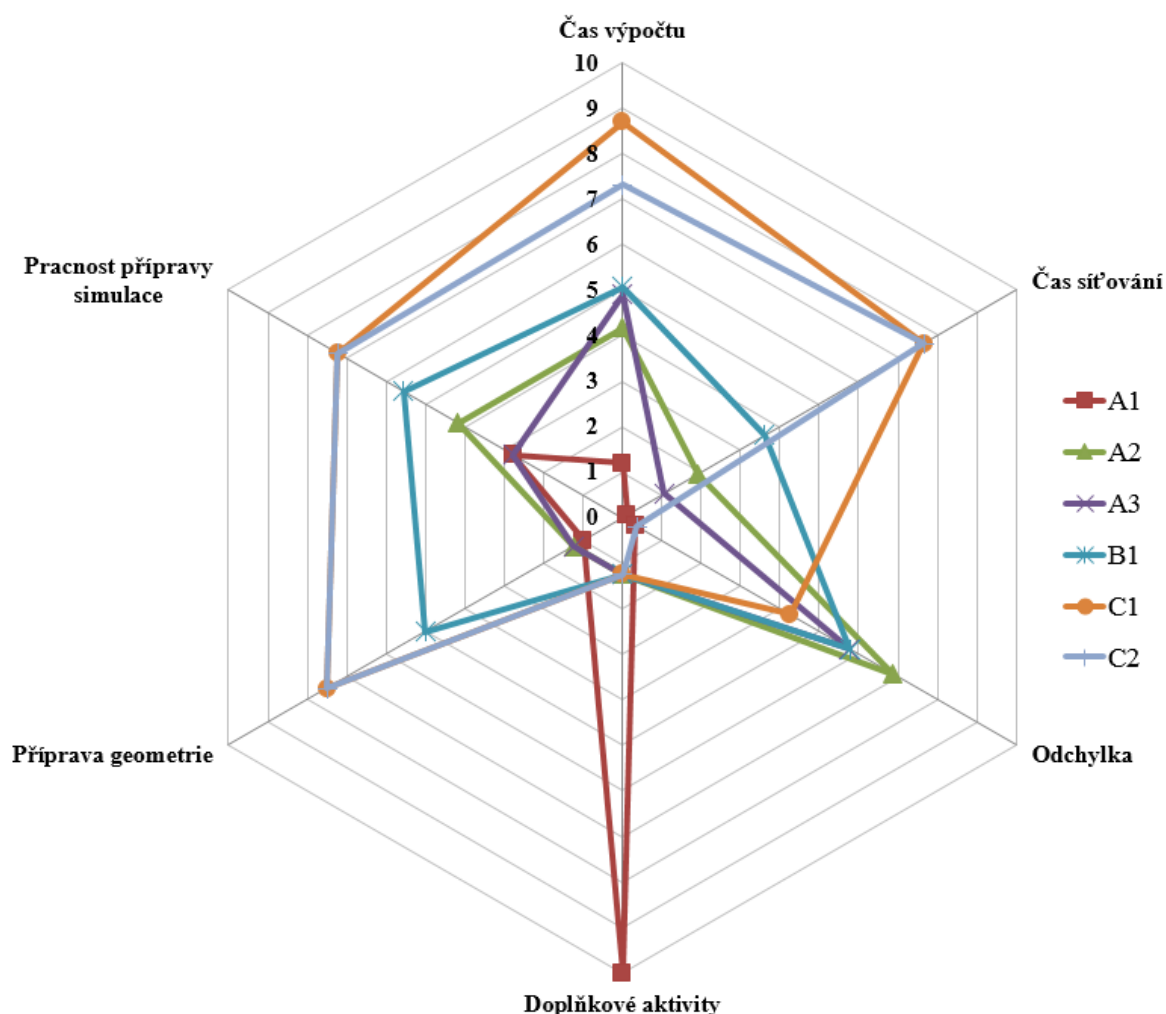


Obr. 9.6 Využití operační paměti vztahované k variantě A2

### 9.4 Zhodnocení implementace jednotlivých variant

V následujícím textu jsou shrnuty podstatné poznatky o jednotlivých variantách simulací ohřevu sinusového filtru, získávané v průběhu času přípravou jednotlivých analýz jejich vyhodnocováním a vzájemným porovnáním. Shrnutí se rovněž dotýká hlediska pracnosti

přípravy simulace, přípravy geometrie dalších souvisejících aktivit. Za tímto účelem byl vytvořen paprskový diagram, současně zohledňující výsledky prezentované v předcházejících kapitolách a další zmíněná hlediska. Na obrázku 9.7 jsou porovnány varianty simulující ohřev sinusového filtru v otevřeném prostředí, kde hlediska času výpočtu, času síťování a odchylky jsou určena z dat uvedených v kapitolách 8 a 9 této práce. Hlediska pracnosti přípravy simulace, přípravy geometrie a doplňkových aktivit jsou hodnocena na základě získaných zkušeností autora s jednotlivými variantami. Na stupnici je každá varianta ohodnocena v rozsahu od 0 do 10, kde 0 vyjadřuje nejméně časově náročnou aktivitu a 10 značně časově náročnou aktivitu. V případě odchylek je pak 0 minimální odchylka a 10 vysoká odchylka. Pro zvýšení přehlednosti je pro každé hledisko určeno vlastní měřítko zobrazení. Bodová hodnocení variant tak lze vzájemně porovnávat pouze v rámci daného hlediska. Diagram je určen zejména pro urychlení orientace mezi specifiky jednotlivých variant a v následujícím textu je na něj dále odkazováno.



**Obr. 9.7** Hodnocení posuzovaných hledisek při implementaci simulace ohřevu sinusového filtru v otevřeném prostředí

#### 9.4.1 Varianta A1 – zjednodušená geometrie v Ansys Transient Thermal

Tato varianta simulující přestup tepla na zjednodušené geometrii tlumivky sinusového filtru má podle dosažených výsledků tendenci se jevit téměř jako ideální. Jak je vidět na obrázku 9.7, čas potřebný k výpočtu a síťování je v porovnání s ostatními variantami minimální. Průměrná odchylka teplot v porovnání s měřenými body činí 1,7% a je tak nejnižší ze všech variant i přes to, že povrchové teplotní pole se jeví více homogenní než teplotní pole sinusového filtru sejmuté termokamerou. Výsledná oteplovací charakteristika je rovněž svým tvarem nejbližší té změřené. Příprava zjednodušené geometrie pro simulaci je nejméně náročná v porovnání s ostatními variantami jelikož nezahrnuje geometrii okolního prostředí. Náročnost nastavení celé simulace je rovněž jedna z nejnižších. Kritickým bodem je však určení korektní hodnoty součinitele přestupu tepla z povrchu tlumivky sinusového filtru do okolí. Tato činnost přesahuje rámec pouhého nastavení simulace a je tak zařazena do hlediska doplňkových aktivit. Ze zkušenosti provádění této varianty simulace je známo, že změna součinitele přestupu tepla o jednotky [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ] způsobuje změnu konečných teplot o jednotky až desítky °C. Z hlediska velikosti odchylky dosažených teplot vzhledem k datům z experimentálního měření se tak odchylka může velice snadno změnit a celý tepelný model tak nebude reflektovat reálný stav. Jak již bylo uvedeno v kapitole 6.2, určení hodnoty součinitele přestupu tepla tak, aby výsledné teplotní pole odpovídalo reálnému stavu, vyžaduje značné lidské úsilí a na obrázku 9.7 je tak hodnoceno stupněm 10. Celkový čas strávený provedením simulace a souvisejících činností tak jednoznačně převyšuje celkovou časovou náročnost ostatních variant. Dále je třeba zmínit skutečnost, že při potenciálním provedení simulace s aktualizovanými ztrátovými výkony lze očekávat snížení výsledných teplot a tím zvýšení odchylek od teplot změřených. Aby se tedy dalo znovu přiblížit současné nízké úrovni odchylek, bylo by nutné revidovat výpočet součinitelů přestupu tepla a použitých kriteriálních vztahů.

I přes zmíněná omezení může být vhodné použít tento typ simulace v případech, kde je hlavním cílem určení maximální kritické teploty a zároveň není bezprostředně vyžadována tepelná interakce s dalšími prvky systému. Může se například jednat o situaci, kdy je sinusový filtr umístěn v rozváděči s definovanou maximální teplotou uvnitř rozváděče. Za předpokladu použití již ověřených vztahů pro výpočet součinitele přestupu tepla je tak možné rychle získat rozložení teplotního pole napříč geometrií tlumivky sinusového filtru včetně nejvyšší teploty.

#### **9.4.2 Varianta A2 – zjednodušená geometrie v Ansys Fluent**

V případě varianty A2 je numericky vypočten přestup tepla z povrchu tlumivky sinusového filtru do okolí. Součinitel přestupu tepla je vypočten v každém bodě sítě na rozhraní domén mezi tekutinou a pevným materiálem a je tak výsledkem simulace. Zjednodušení geometrie se zde projevuje dosažením nejvyšších odchylek ze všech provedených simulací a druhou nejdelší dobou ustálení, která je v porovnání se změřenou oteplovací charakteristikou 2,5 násobná. Průměrná odchylka teplot v porovnání s měřenými body činí 34,4%. Díky zjednodušení je ale zohledňován nízký počet komponent a to se projevuje časově nenáročnou přípravou geometrie a téměř středně náročnou přípravou simulace jak je patrné z obrázku 9.7. Čas potřebný k síťování je v porovnání s ostatními variantami spíše nízký a časová náročnost výpočtu je téměř střední. Sít' geometrie této varianty má však potenciál být dále optimalizována a tím by došlo ke znatelnému snížení výpočetního času při zachování podobné úrovně odchylek. Rovněž lze předpokládat znatelné snížení odchylek při opětovném provedení výpočtu s dosazenými aktualizovanými ztrátovými výkony. Vlivem aktualizovaných ztrátových výkonů klesla průměrná odchylka u varianty C2 o 19,4% v porovnání s C1. Lze očekávat, že v případě varianty A2 by došlo ke snížení odchylek v podobné relaci.

Za předpokladu užití optimalizované sítě a obdobného stupně snížení odchylek vlivem zohlednění hodnot aktualizovaných ztrátových výkonů se tak využití této varianty může stát akceptovatelné v případech prvotních odhadů tepelných poměrů na tlumivce sinusového filtru. Současně je však možno řešit i případy vzájemné tepelné interakce s okolím nebo okolními zařízeními umístěnými v rozváděči. Celý model je možno dále rozšířit například o systém aktivního chlazení a zkoumat jeho účinky na teplotní pole vlivem změn umístění tlumivky sinusového filtru. Oblast uplatnění je v tomto případě daleko rozsáhlejší než u varianty A1.

#### **9.4.3 Varianta A3 – zjednodušená geometrie ve STAR-CCM+**

Teplotní pole simulované v softwaru STAR-CCM+ dosahuje průměrné odchylky 28,8% na zjednodušené geometrii tlumivky sinusového filtru. V porovnání s variantou A2 simulovanou v Ansys Fluent je tak dosaženo nižších teplot v ustáleném stavu. Tento stav je však dosažen za delší dobu, než dle oteplovací charakteristiky z Ansys Fluent, jak je možno vidět na obrázku 8.5. Teplotní pole je opět výrazně homogenní, avšak oblast nejvyšší teploty se v tomto případě vyskytuje na povrchu vinutí. Ačkoliv se díky homogenitě teplotního pole jedná o rozdíl v řádech desetin stupně, neodpovídá tento fakt realitě, viz snímek z termokamery na obrázku 8.6. Zjištění příčiny nebylo již dalším předmětem zkoumání. Pokud však k této aktivitě mělo

dojít, prvním krokem by bylo provedení kontroly nastavení simulace zahrnující definici okrajových podmínek, materiálových parametrů, kontaktních zón atd..

Z obrázku 9.7 je vidět, že časová náročnost výpočtu je střední v porovnání s ostatními variantami. Čas potřebný po vytvoření polyhedrální sítě je jedním z nejnižších, stejně jako pracnost přípravy simulace, která je na totožné úrovni jako u varianty A1. Sjednocené a přehledně zpracované uživatelské prostředí umožňuje intuitivně nastavovat jednotlivé fyzikální modely simulace. Praktická je možnost upravovat nastavení pohledů na jednotlivé veličiny za běhu simulace nebo uložení oteplovacích charakteristik v uživatelském prostředí. Uvedené příklady činností včetně řady dalších tak mají pozitivní vliv na snížení pracnosti přípravy simulace a koncového postprocessingu.

#### **9.4.4 Varianta B1 – středně detailní geometrie v Ansys Fluent**

Zpřesnění geometrie a zohlednění dalších detailů sinusového filtru způsobilo průměrný pokles odchylky teplot o 5,5% v porovnání s dosaženými teplotami na zjednodušené geometrii varianty A2 a rovněž snížení doby potřebné k ustálení teplot. Průměrná odchylka nyní dosahuje 28,9%. Ačkoliv se charakter rozložení teplotního pole během ohřevu blíží rozložení získanému z termokamery, po ustálení teplot se homogenita na jádře a vinutí opět zvýší. Značný je také gradient teplot viditelný v příčném řezu středního kondenzátoru (obr. 8.11).

Vlivem zpřesnění geometrie bylo tedy dosaženo celkového snížení teplot, avšak narostla pracnost přípravy geometrie a simulace. Rovněž narostla časová náročnost výpočtu a síťování. Všechna tato hlediska se pohybují na střední nebo téměř střední úrovni oproti ostatním variantám jak je vidět na obrázku 9.7.

#### **9.4.5 Varianta C1 – detailní geometrie v Ansys Fluent**

Zohledněním geometrie napájecích kabelů, vzduchových dutin a podstavné desky se dosáhlo průměrného snížení odchylky teplot o 13,1% vůči variantě A2 na hodnotu 21,3%. Tyto změny mají také kladný vliv na snížení doby potřebné k ustálení teplot. I přes dosažení vyšších teplot je charakter povrchového teplotního pole včetně ustáleného stavu blízký teplotnímu poli získaného ze snímků z termokamery. To se projevuje rovněž zvýšením teplotních spádů napříč celým modelem sinusového filtru.

V důsledku většího množství použitých komponent než v případě variant A1, A2, A3 a B1 vzrůstá pracnost přípravy simulace a časová náročnost přípravy geometrie. Způsobené zvýšení

počtu elementů sítě výrazně prodlužuje dobu výpočtu. Tato varianta je v porovnání s ostatními nejpracnější z hlediska příprav a vyžaduje nejvíce času potřebného k provedení výpočtu řešení.

#### **9.4.6 Varianta C2 – detailní geometrie v Ansys Fluent; aktualizované ztráty**

Aplikace revidovaných hodnot ztrátových výkonů na detailní geometrii sinusového filtru způsobila snížení celkových teplot napříč modelem. Průměrná odchylka teplot je nyní 1,9% a současně bylo dosaženo značné podobnosti teplotního pole s experimentálními daty získanými pomocí termokamery. Jedná se tak o nejpřesnější variantu, kterou je vhodné začlenit do tepelných simulací rozsáhlejších systému, včetně odvádění tepla vlivem nucené konvekce. Potenciál ke zpřesnění lze ale najít v průběhu simulované oteplovací charakteristiky, podle které dojde k ustálení teplot za 8,3 hodin pod zátěží avšak podle změřené charakteristiky již za 5 hodin pod zátěží. Na dobu ustálení mají rovněž vliv materiálové charakteristiky, mezi které patří tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a hustota. Pro další zpřesnění by tak bylo vhodné se zaměřit na aktualizaci jejich hodnot. Časové nároky jednotlivých hledisek uvedených na obrázku 9.7 jsou totožné s variantou C1 mimo času potřebného k výpočtu řešení, který je zde nižší vlivem aplikace snížených hodnot ztrátových výkonů.

Teplotní pole na povrchu sinusového filtru je v souladu s naměřenými daty a lze tak předpokládat i korektní určení teplotních spádů uvnitř sinusového filtru. Vhodné využití varianty C2 se nabízí například v případech simulací tepelných přestupů v aktivně chlazených rozváděcích, kde je klíčový korektní výpočet teplotního gradientu. Ten je mezi povrchem a oblastí nejvyšší teploty uvnitř sinusového filtru často vlivem aktivního chlazení zvyšován. Aby nedošlo k překročení maximální povolené teploty, korektní určení oblasti s nejvyšší teplotou je tak z hlediska tepelného dimenzování kritické. Simulace zohledňující geometrii varianty C2 může tyto informace poskytnout.

Na základě dosažení celkově nejnižších odchylek teplotního pole v porovnání s experimentálně získanými daty a na základě výše zmíněného předpokladu byla geometrie varianty C2 dále použita pro simulaci ohřevu sinusového filtru v uzavřeném prostředí s aktivním chlazením.

## 10. Směry dalšího vývoje

Analýzy tepelných poměrů odrušovacích prvků uvedené v této práci poskytují uspokojivé až velmi přesné informace o dosažených teplotách a charakteru teplotního pole. Každá z nich však byla primárně připravena pro sinusový filtr SKY3FSM16-2kHz. Za účelem širšího zevšeobecnění platnosti by bylo vhodné uvedené koncepce ověřit na dalších řadách a typech odrušovacích prvků. Koncept simulace aktivního chlazení by bylo vhodné rozšířit například i o kapalinou chlazený odrušovací prvek a validovat jeho predikci teplotního pole.

Tepelné analýzy je možné rovněž rozšířit o část výpočtu elektromagnetických poměrů ztrátových výkonů ve vinutí a na jádře sinusového filtru. Propojením elektromagnetické a tepelné analýzy by se dosáhlo dalšího zpřesnění teplotního pole v důsledku numerického výpočtu ztrátových výkonů jako jedné z okrajových podmínek.

## 11. Závěr

V rámci této disertační práce byly vytvořeny modely numerických analýz ohřevu sinusového filtru se zaměřením na vliv okolního proudění na výsledné teplotní pole. Simulace teplotního pole byly provedeny pro případ v otevřeném prostředí, kde docházelo k přestupu tepla do okolí vlivem přirozené konvekce. Zde byl zkoumán především účinek úrovně detailů výpočetní geometrie na hodnoty dosažených teplot, oteplovací charakteristiky, charakter rozložení povrchového teplotního pole a vliv na teplotní spád napříč geometrií sinusového filtru. Pro vybranou geometrii byla dále provedena simulace teplotního pole v uzavřeném prostředí měřicí rozváděčové skříně, kde byl zkoumán vliv aktivního chlazení na výsledné teplotní pole, charakter jeho rozložení včetně teplotních spádů a dosažených teplot.

Simulace teplotního pole byly validovány pomocí reálného kusu sinusového filtru. Proběhlo tak porovnání výsledků simulovaných variant s experimentálně získanými daty ze snímků povrchového teplotního pole a oteplovacích charakteristik jak pro případ přirozeného přestupu tepla v otevřeném prostředí, tak i v uzavřeném prostředí s aktivním chlazením.

Pro stanovení metodiky tepelných analýz s vazbou na konstrukci odrušovacích prvků byly využity rozborů dat a jednotlivých hledisek uvedených v kapitolách 8 a 9. Výsledky ze simulací teplotních polí, kde byla použita zjednodušená geometrie tlumivky sinusového filtru (varianta A1, A2 a A3) ukazují, že získané teplotní pole je téměř homogenní. Predikce teplotních spádů uvnitř odrušovacího prostředku a oteplovacích charakteristik je tak omezena, nikoliv však predikce nejvyšších dosažených teplot. Tepelnou analýzou zjednodušené geometrie simulované v Ansys Transient Thermal (varianta A1) lze dosáhnout predikce nejvyšší dosažené teploty s průměrnou odchylkou 1,7% s řádově nižšími časovými a hardwarovými nároky výpočtu, než u ostatních variant. Nejvyšší zaznamenaná odchylka je 2,5%. Výraznou nevýhodou je fakt, že velikost odchylky je silně závislá na určení korektní hodnoty součinitele přestupu tepla aplikovaného jako okrajové podmínky. Tato aktivita je časově náročná. Dalším nedostatkem je omezená simulace tepelné interakce v rámci komplexnějších systémů. Nevýhody varianty A1 jsou z principu eliminovány v tepelné analýze provedené v Ansys Fluent (A2) a STAR-CCM+ (A3). Oblast uplatnění variant A2 a A3 je tak mnohem rozsáhlejší než u varianty A1 a zahrnuje například možnost rozšíření o systém aktivního chlazení a simulovat vzájemné tepelné interakce s okolím nebo okolními zařízeními umístěnými v rozváděči. Varianta A2 dosahuje průměrné odchylky teplot 34,4% s nejvyšší zaznamenanou 36,9%. Nachází se zde ale potenciál k optimalizaci sítě a tím tak k výraznému snížení časových a výpočetních nároků k provedení



simulace. S přihlédnutím k aktualizované hodnotě ztrátových výkonů a její potenciální aplikaci lze tak očekávat snížení odchylek o 15% až 20%. Na tomto základě lze tak variantu A2 doporučit například pro určení prvotních odhadů tepelných poměrů tlumivky sinusového filtru v rámci poptávkových řízení. Průměrná odchylka varianty A3 dosahuje 28,8% a nejvyšší odchylka 35,1%. Zde je hlavní předností zvýšený uživatelský komfort při přípravě simulace vlivem integrovaného prostředí. Pozitivní dopad lze tak vidět ve snížení pracnosti přípravy celé analýzy.

Detailní geometrie sinusového filtru byla použita u simulací ohřevu v otevřeném prostředí (varianta C2), kde docházelo k přestupu tepla do okolí vlivem přirozené konvekce ale i v uzavřeném prostředí (varianta D1), simulující přestup tepla do okolí pomocí nucené konvekce. Varianta C2 s aktualizovanými ztrátovými výkony provedená v Ansys Fluent dosahuje v otevřeném prostředí průměrné odchylky 1,9%, kde nejvyšší odchylka je 2,5%. Charakter rozložení povrchového teplotního pole je v souladu s daty z experimentálního měření. Teplotní spády jsou nyní výraznější než u variant A1, A2 a A3. Varianta D1 dosáhla průměrné odchylky 6,1%. Nejvyšší odchylka na geometrii je 12,1%. Na zvýšení odchylky mají vliv především parametry aktivního chlazení, i přes to je však povrchové teplotní pole v dobrém souladu s měřenými daty. Lze tak předpokládat i korektní určení teplotních spádů, které jsou kritické pro predikci nejvyšší dosažené teploty. Časové a hardwarové nároky na výpočet jsou přibližně trojnásobné v porovnání s variantou A2. Provedení simulací variant C2 a D1 lze tak doporučit například v situaci, kdy je výrobek v procesu návrhu pro sériovou výrobu. Tento typ simulace je rovněž vhodné provést v případech, kdy je rozhodnuto provést tepelnou optimalizaci stávajícího výrobku nebo návrh zcela nové generace.

Neustále rostoucí trend maximalizace výkonu zařízení v elektrotechnice vytváří nové výzvy z hlediska řešení odvodu ztrátového tepla. V případě tepelného návrhu odrušovacího prvku lze pomocí zjednodušených koncepcí tepelných analýz uvedených v této práci získat snadno a rychle prvotní odhad tepelných poměrů. Za pomoci detailních tepelných analýz lze naopak predikovat tepelné poměry s vysokou přesností až na úroveň jednotlivých komponent. S jejich využitím lze tak provést vhodné konstrukční zásahy a maximalizovat odvod tepla z odrušovacího prvku.

## Summary

In the framework of this dissertation, models of numerical analysis of sinus filter heating were developed, focusing on the effect of ambient air flow on the resulting temperature field. The simulation of the temperature field was done in an open environment where the heat was transferred to the environment due to natural convection. In particular, the effect of the level of detail of the computational geometry on the characteristics of the surface temperature field distribution, the warming characteristics, and the effect on the temperature gradient across the geometry of the sinusoidal filter were examined here. For the selected geometry, simulation of the temperature field in a closed environment of the measuring cabinet was carried out, where the effect of the active cooling on the resulting temperature field, the nature of its distribution, including temperature gradients and temperatures reached, was examined.

Simulation of the temperature field was validated using a real piece of sinusoidal filter. Comparison of the results of simulated variants with experimentally obtained data from surface temperature field images and warming characteristics was performed both in case of natural heat transfer in an open environment and in a closed environment with active cooling.

To determine the methodology of thermal analyzes based on the design of the interference elements, the analyzes of the data and the individual aspects mentioned in chapters 8 and 9 were used. The results from the simulation of the temperature fields, where was used the simplified geometry of the sine filter choke (variant A1, A2 and A3) the temperature field obtained is almost homogeneous. Therefore, the prediction of temperature gradients within the interference suppressor and the warming characteristics is limited, but not the prediction of the highest achievable temperatures. Thermal analysis of simplified geometry simulated in Ansys Transient Thermal (variant A1) can achieve a prediction of the highest achieved temperature with an average deviation of 1.7% with orderly lower time and hardware computational requirements than with other variants. The highest recorded deviation is 2.5%. A significant drawback is the fact that the magnitude of the variance is strongly dependent on the determination of the correct value of the heat transfer coefficient applied as the boundary conditions. This activity is time consuming. Another drawback is limited simulation of thermal interaction within more complex systems. Disadvantages of Variant A1 are basically eliminated in the thermal analysis performed in Ansys Fluent (A2) and STAR-CCM + (A3). The area of application of variants A2 and A3 is so much more extensive than variant A1, and includes, for example, the possibility of extending the active cooling system and simulating mutual thermal interactions with ambient

or surrounding devices located in the distributor. Variant A2 achieves an average temperature deviation of 34.4%, with the highest recorded 36.9%. However, there is a potential for mesh optimization, thus significantly reducing the time and computational demands for simulation. Taking into account the updated value of loss performance and its potential application, a 15% to 20% variance reduction can be expected. On this basis, for example, A2 can be recommended for determining the initial estimates of the heat ratio of the sinusoidal filter choke in the demand process. The average variance of variation A3 is 28.8% and the highest deviation is 35.1%. Here the main advantage is increased user comfort in preparing the simulation due to the integrated environment. The positive impact can be seen in the reduction of the workload of the preparation of the whole analysis.

Detailed geometry of the sinusoidal filter was used in simulation of open-air heating (variant C2), where heat was transferred to the environment due to natural convection but also in a closed environment (variant D1), simulating heat transfer to the environment by forced convection. The C2, with updated power loss performance in Ansys Fluent, achieves an average variance of 1.9% in the open environment, with the highest deviation of 2.5%. The nature of the surface temperature distribution is consistent with experimental measurement data. Temperature gradients are now more substantial than variants A1, A2 and A3. Variant D1 reached an average variation of 6.1%. The highest deviation on geometry is 12.1%. Deviations are mainly influenced by the active cooling parameters, although the surface temperature field is in good agreement with the measured data. It is also possible to predict a correct determination of the temperature gradients that are critical for prediction of the highest reached temperature. The time and hardware requirements for the calculation are approximately three times higher than the A2 variant. Performing simulations of variants C2 and D1 can be recommended, for example, in a situation where the product is in the design process for serial production. This type of simulation should also be done in cases where it is decided to perform a thermal optimization of an existing product or a whole new generation.

The constantly increasing trend of maximizing the performance of electrical equipment generates new challenges in terms of heat dissipation. In the case of thermal design of an interference suppression element, it is possible to obtain a quick and easy estimation of the thermal ratios using the simplified concepts of thermal analyzes presented in this paper. With the help of detailed thermal analyzes, it is possible to predict heat ratios with high accuracy up to the level of individual components. With their use, suitable design interventions can be made to maximize heat dissipation from the interference suppression element.

## Literatura

- [1] Novák, Jaroslav, Chyský, Jan and Kořínek, Petr. Ztráty sinusových filtrů pro měniče se spínacími tranzistory. *Elektro*. 2013. 2013(10), pp. 46-49. ISSN 1210-0889.
- [2] Nožička, Jiří. *Základy termomechaniky*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02409-1.
- [3] CST. *Coupled EM-Thermal Modeling of Power Chokes*. s.l. : CST AG, 2016. 16N10943.
- [4] Elmoudi, A and Lehtonen, M. *Transformer Thermal Modelling and Simulation*. s.l. : ResearchGate, 2007. ISSN 1813-419X.
- [5] Harlow, James H. *Electric Power Transformer Engineering*. Boca Raton, Florida : © 2004 by CRC Press LLC, 2004. ISBN 0-8493-1704-5.
- [6] SKYBERGTECH s.r.o. Interní dokumentace a materiály. Tehovec : s.n., 2017.
- [7] P., KRISHNAMOORTHY. *Electromagnetic and Heat Transfer Modeling of Microwave Heating in Domestic Ovens*. Lincoln : Lincoln: University of Nebraska at Lincoln, May 2011.
- [8] Brož, Václav. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. Praha : ČVUT, 1990. ISBN 80-01-00198-9.
- [9] Hasal, Pavel, Schreiber, Igor and Šnita, Dalimil. *Chemické inženýrství I*. Praha : Vysoká škola chemicko-technologická, 2007. ISBN 80-7080-589-7.
- [10] Ježek, Jan, Varádiová, Blanka and Adamec, Josef. *Mechanika tekutin*. Praha : ČVUT, 2000.
- [11] Kozubková, Milada, Blejchaž, Tomáš and Bojko, Marian. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*. Ostrava : VŠB -Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN - 978-80-248-2491-8.
- [12] ČVUT, Ústav procesní a zpracovatelské techniky FS. Podkladový materiál k předmětu Přenos Hybnosti, Tepla a Hmoty. *Přenos hybnosti – přehled základních rovnic*. Praha : U218 - Ústav procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT v Praze.
- [13] ČVUT, Ústav procesní a zpracovatelské techniky FS. Podkladový materiál k předmětu Přenos Hybnosti, Tepla a Hmoty. *Přestup tepla – přehled základních rovnic*. Praha : U218 - Ústav procesní a zpracovatelské techniky FS ČVUT v Praze.
- [14] Šesták, Jiří and Rieger, František. *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1993. TA357 .Š37 1993 .
- [15] Ansys. *Ansys Fluent Theory Guide*. Canonsburg : Ansys inc, 2016.

- [16] Jahoda, M. Prezentace k předmětu Hydromechanické Procesy. *Počítačová dynamika tekutin (CFD)*. s.l. : Vysoká škola chemicko technologická, 2015.
- [17] Kozubková, Milada. Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX. Ostrava : VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA, 2008.
- [18] Li, Ning. Master of Science Thesis. *Comparison between three different CFD software and numerical simulation of an ambulance hall*. Stockholm, Sweden : KTH School of Industrial Engineering and Management, 2015.
- [19] Ansys. *Ansys Meshing Users Guide*. Canonsburg : Ansys Inc., 2016.
- [20] Versteeg, H K and Malalasekera, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics; The Finite Volume Method*. Essex : Pearson Education Limited 1995, 2007. ISBN: 978-0-13-127498-3.
- [21] Ansys. *Ansys Mechanical users Guide*. Canonsburg : Ansys Inc., 2016.
- [22] Incropera, Frank P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer 6th Edition*. USA : Wiley, 2006. ISBN-10: 0470055545.
- [23] Lienhard IV, John H. and Lienhard V, John H. *A Heat Transfer Textbook*. Cambridge, Massachusetts, USA : Phlogiston Press , 2008. ISBN-10: 0971383537.
- [24] Kreith, F, Boehm, R.F and et. al. *Mechanical Engineering Handbook*. Boca Raton, FL 33431, USA : CRC Press LLC, 1999. ISBN-10: 084939418X.
- [25] Ansys. *Ansys Fluent Users Guide*. Canonsburg : Ansys Inc, 2016.
- [26] Siemens. STAR-CCM+ documentation. s.l. : Siemens Product Lifecycle Management Software Inc, 2017.
- [27] Zemanová, Jana. Bakalářská práce. *Tepelně vodivé termoplastické materiály*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2016.
- [28] Kořínek, Jan. Písemná zpráva ke státní doktorské zkoušce. *Analýza tepelných poměrů v odrušovacích komponentách elektrických pohonů*. Pardubice : DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA, 2016.
- [29] FLUKE. Ti90, Ti95, Ti100, Ti105, Ti110, Ti125 TiR105, TiR110, TiR125 Performance Series Thermal Imagers. *fluke.com*. [Online] 2012. <http://www.fluke.com/fluke/czcs/support/manuals/default.htm>.
- [30] Testo. testo 405i - termický anemometr. *testo.com*. [Online] 2017. <https://www.testo.com/cz-CZ/testo-405i/p/0560-1405>.
- [31] Flir. *Flir ix series User's manual*. s.l. : Flir, 2011. T559733.

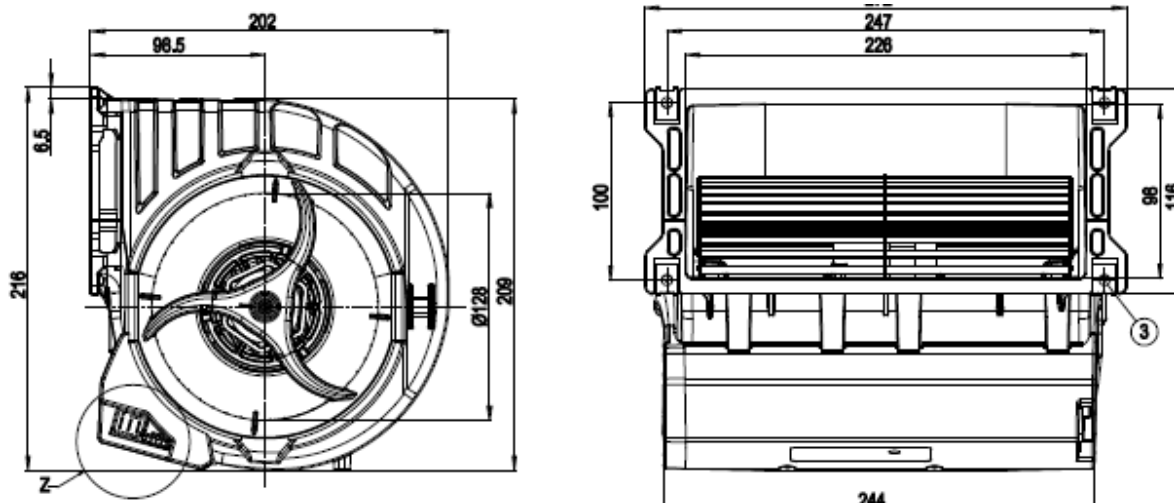
- [32] Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ). *ČSN EN 60076-11 (351001) Výkonové transformátory - Část 11: Suché transformátory*. s.l. : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), 2005. 72370. EAN: 8590963723709.
- [33] Kořínek, Jan. Bakalářská práce. *Návrh tepelné izolace motorového prostoru letounu UL 39*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2012.
- [34] TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENGINEERING. *Validation of Sinus Filter Choke Temperature Model*. Praha : ERGO NOMEN, o.p.s., CTU in Prague 2016, 2016. ISSN 1805-3386.
- [35] Andersson, Bengt, et al. *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge : Cambridge University Press, 2012. ISBN 978-1-107-01895-2.
- [36] SolidTrust. ANSYS AIM. *SolidTrust*. [Online] 10 2017. <http://www.solidtrust.in/ansys-aim/>.

## Vlastní publikace

- (1) Kořínek, Jan. Seminář Elektrotechnická zařízení v dopravě. *Validace ztrátových výkonů a teplotního modelu sinusového filtru*. Pardubice : Univerzitou Pardubice, DFJP, 2016. ISBN 978-80-7395-970-8.
- (2) Novák, Jaroslav, a další. Seminář Elektrotechnická zařízení v dopravě. *Vlastnosti a odrušení výstupu frekvenčního měniče s dlouhým kabelem k motoru*. Pradubice : Univerzitou Pardubice, DFJP, 2016. ISBN 978-80-7395-970-8.
- (3) Sadílek, Ondřej, Lelek, Tomáš a Kořínek, Jan. Proceedings of the 26th International Conference. *Interfering Influences on Electrical Cable between Frequency Converter and Electric Motor*. Košice, Slovakia : RADIOELEKTRONIKA 2016, April 19-20, 2016. ISBN: 978-1-5090-1673-0.
- (4) Kořínek, Jan. TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENGINEERING. *Validation of Sinus Filter Choke Temperature Model*. Praha : ERGO NOMEN, o.p.s., K13114 FEE CTU in Prague, 2016. ISSN 1805-3386.
- (5) Kořínek, Jan. Konference STČ 2017. *Thermal Analysis of the Sinus Filter and Verification*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2017. ISBN 978-80-01-06143-5.
- (6) Kořínek, Jan. XXXV. celostátní konference o elektrických pohonech. *Numerická simulace teplotního pole tlumivky sinusového filtru a jeho validace*. Plzeň : Česká elektrotechnická společnost - ČSVTS, 6/2017. ISBN 978-80-02-02724-9.
- (7) Kořínek, Jan, Novák, Jaroslav a Chyský, Jan. TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENGINEERING. *Heat Transfer Simulations of Sinusoidal Filter*. Praha : ERGO NOMEN, o.p.s., K13114 FEE CTU in Prague, 2017. ISSN 1805-3386.
- (8) Kořínek, Jan a Novák, Jaroslav. Časopis ELEKTRO. Roč. 2017. *Analýza účinku geometrických charakteristik CFD simulací na teplotní pole sinusového filtru*. Praha : FCC Public s.r.o., 2017. ISSN 0322-9025.

# Seznam příloh

## Příloha A Specifikace ventilátoru EBM-PAPST D3G146-LV13-01



### Nominal data

Type	D3G146-LV13-01	
Motor	M3G055-DF	
Phase	1~	
Nominal voltage	VAC	230
Frequency	Hz	50/60
Type of data definition	ml	
Speed	min <sup>-1</sup>	1550
Power input	W	182
Current draw	A	1.4
Min. back pressure	Pa	0
Min. ambient temperature	°C	-25
Max. ambient temperature	°C	+50

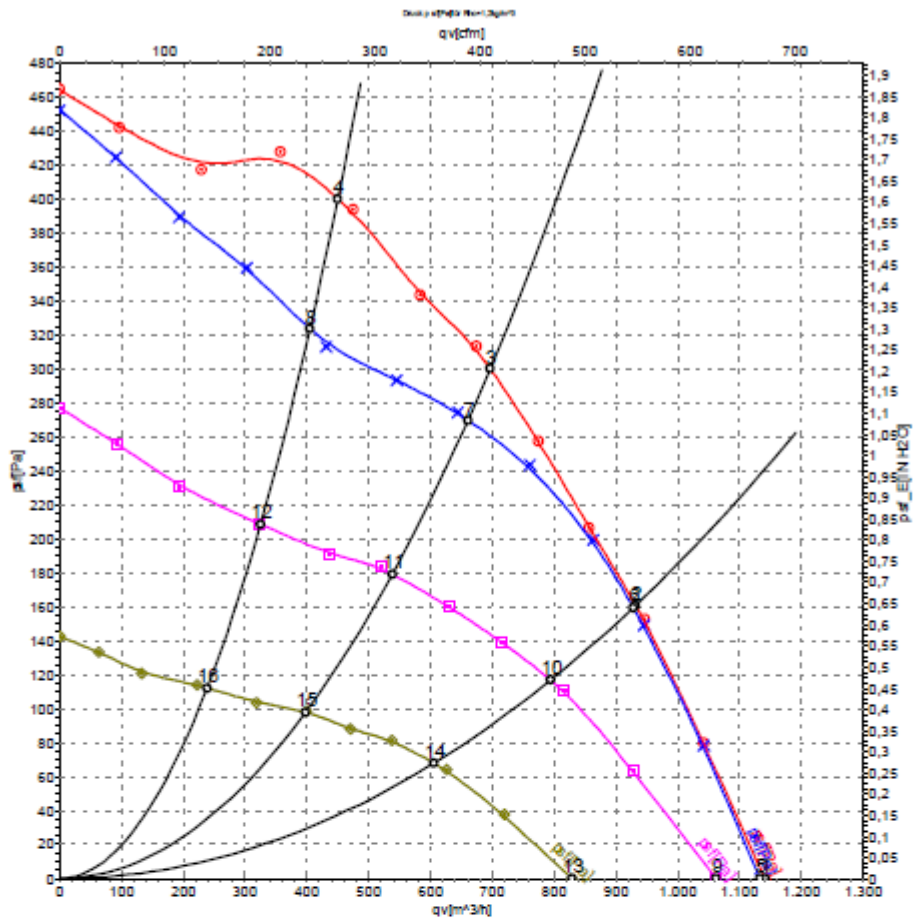
ml = max. load · me = max. efficiency · fs = running at free air · cs = customer specs · ou = customer unit  
Subject to alterations

### Data according to ErP directive

		Actual	Request 2013	Request 2015
Installation category	A			
Efficiency category	Static			
Closed-loop speed control	Integrated			
Specific ratio <sup>*</sup>	1,00			
Overall efficiency $\eta_e$		36,2	26	33
Efficiency grade N		47,2	37	44
Power input $P_e$	kW	0,18		
Air flow $q_v$	m <sup>3</sup> /h	600		
Pressure increase Total $p_{st}$	Pa	345		
Speed n	min <sup>-1</sup>	2500		

Data established at point of optimum efficiency

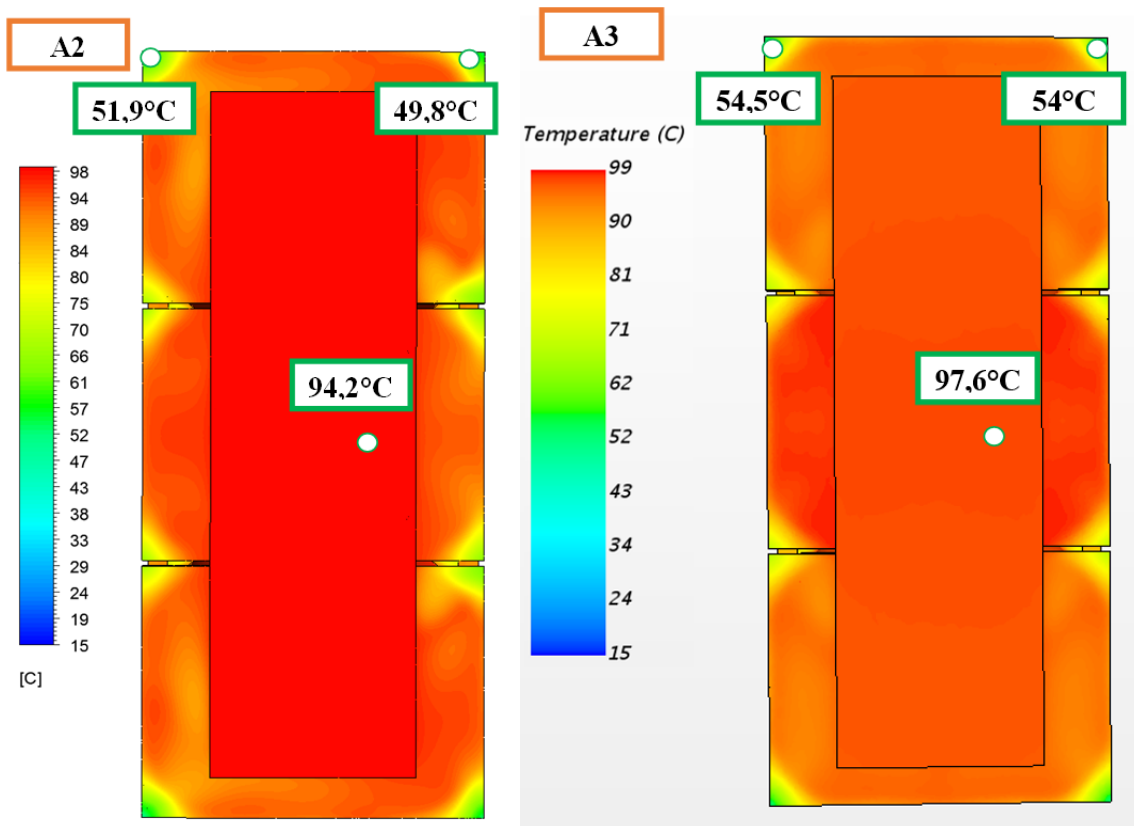
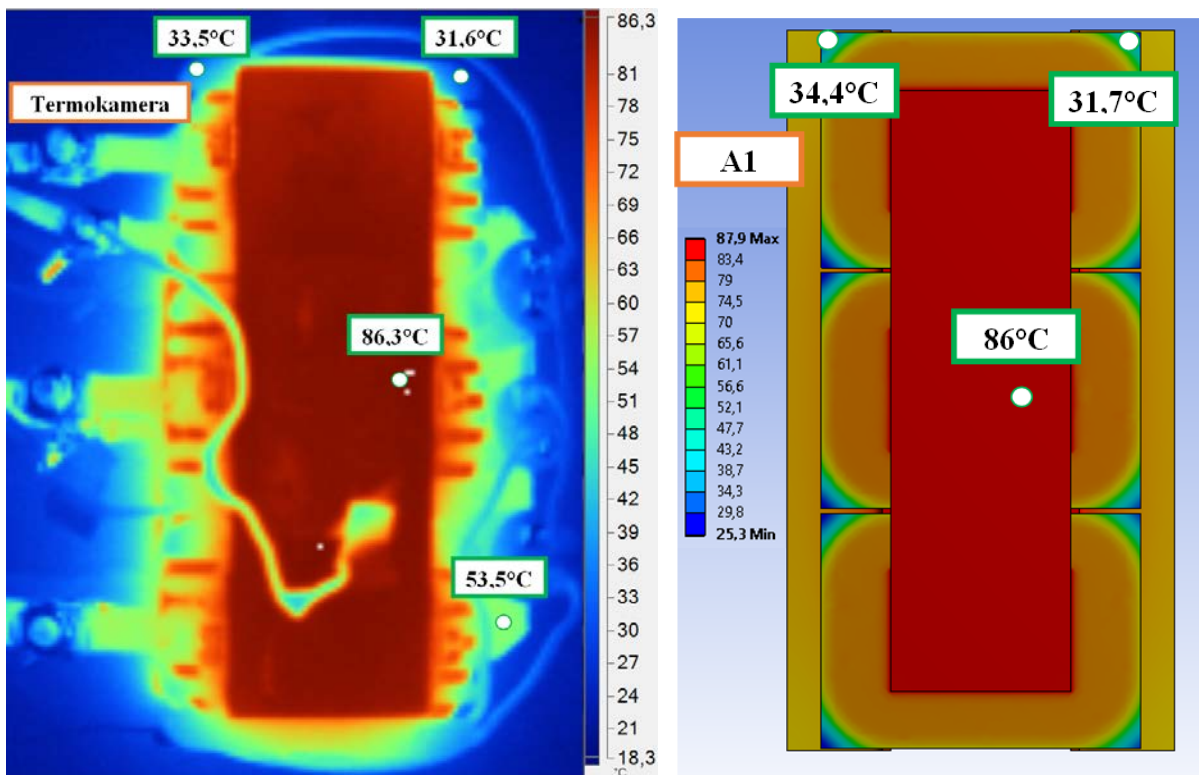


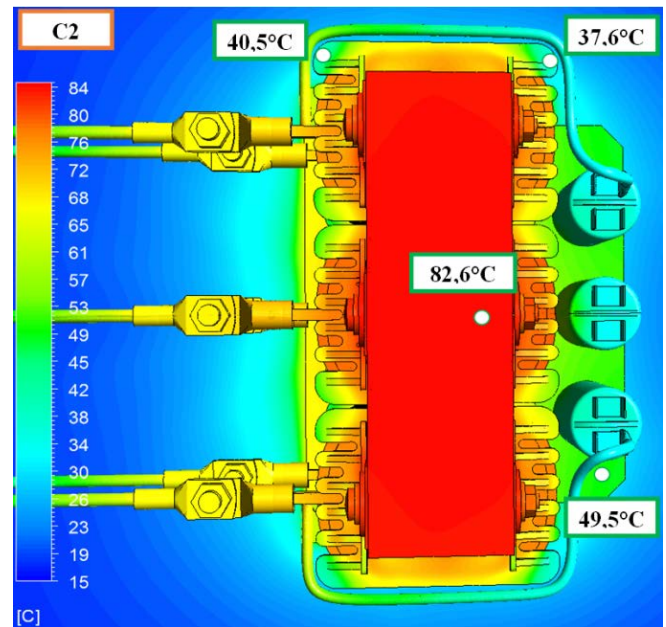
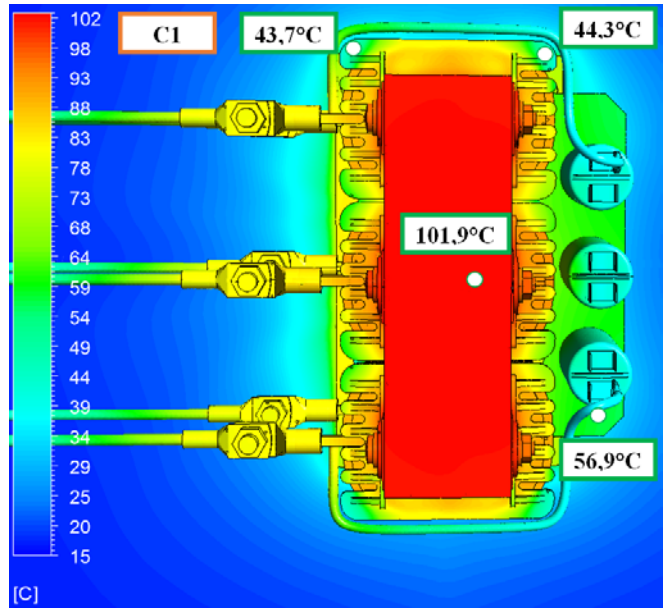
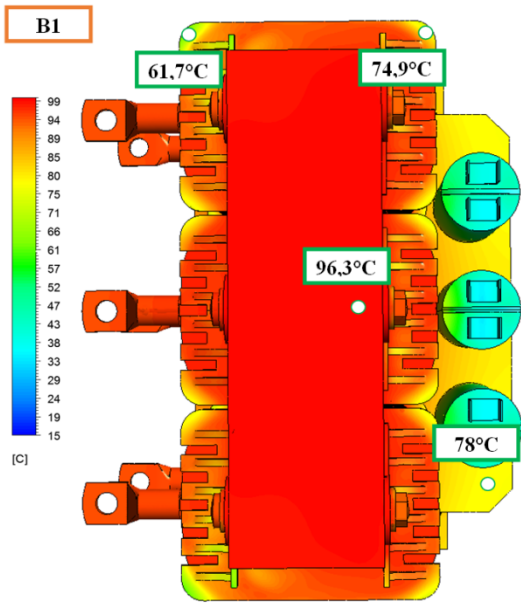


### Measured values

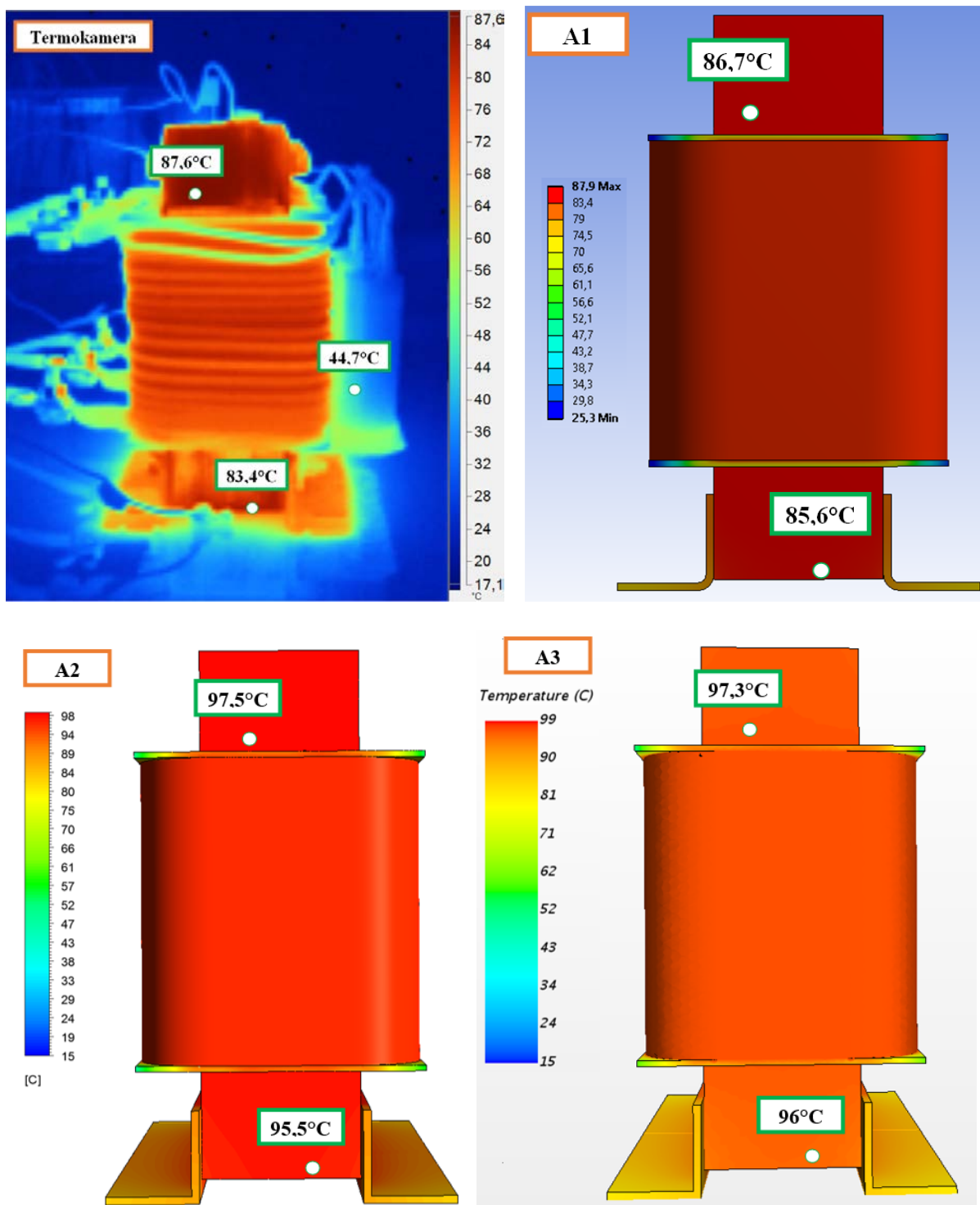
	U	f	n	$P_e$	I	$L_{pA_{in}}$	$L_{wA_{in}}$	qv	$P_{wf}$
	V	Hz	min <sup>-1</sup>	W	A	dB(A)	dB(A)	m <sup>3</sup> /h	Pa
1	230	50	1550	182	1.40	64	75	1140	0
2	230	50	1945	179	1.40	62	73	930	160
3	230	50	2340	177	1.39	62	73	695	300
4	230	50	2660	166	1.32	65	75	450	400
5	230	50	1570	174	1.34			1130	0
6	230	50	1930	177	1.40			925	160
7	230	50	2220	149	1.19			660	270
8	230	50	2395	121	0.98			405	323
9	230	50	1470	145	1.14			1060	0
10	230	50	1660	109	0.89			795	118
11	230	50	1810	81	0.67			540	180
12	230	50	1925	63	0.53			325	208
13	230	50	1140	64	0.54			830	0
14	230	50	1260	49	0.43			605	68
15	230	50	1340	36	0.31			400	99
16	230	50	1400	28	0.26			240	112

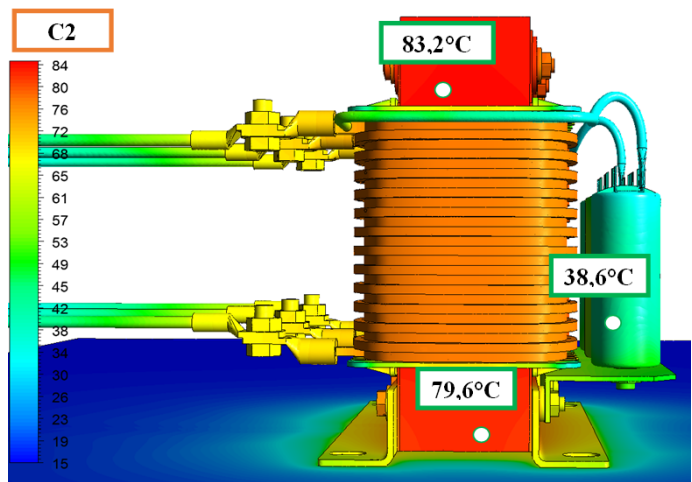
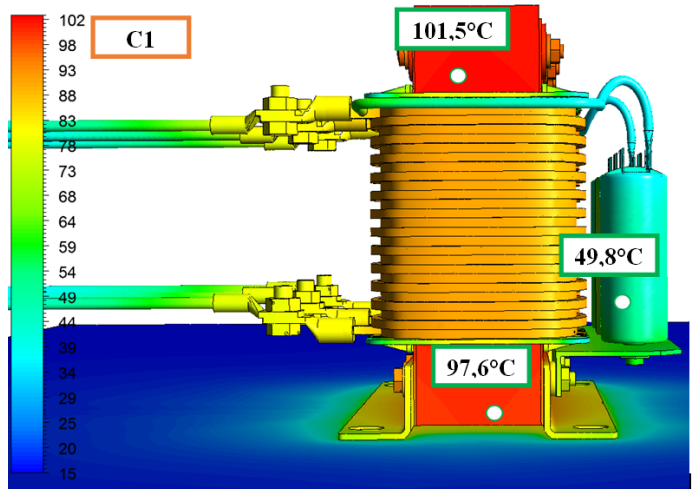
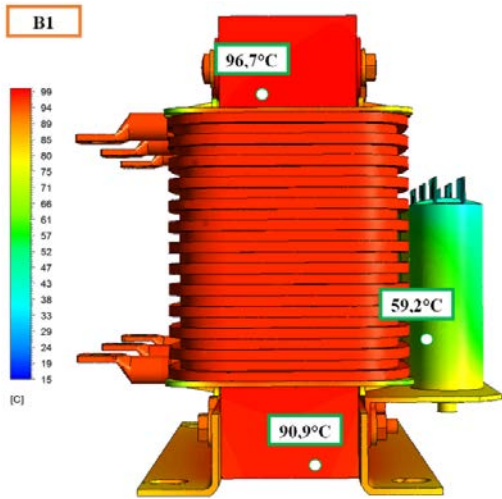
**Příloha B** Porovnání teplotních polí v otevřeném prostředí – pohled ze shora





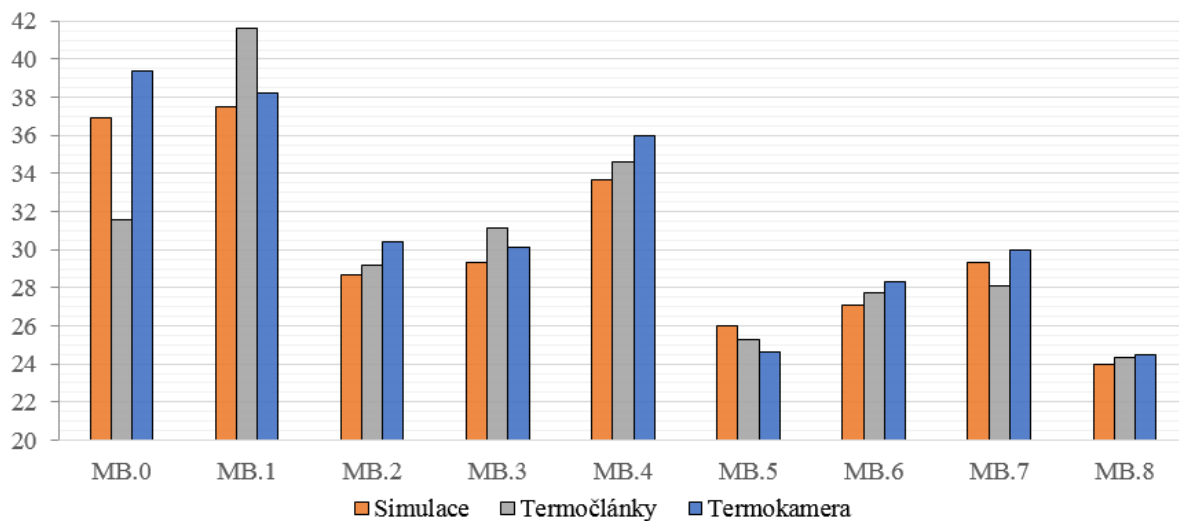
Příloha C Porovnání teplotních polí v otevřeném prostředí – pohled ze strany





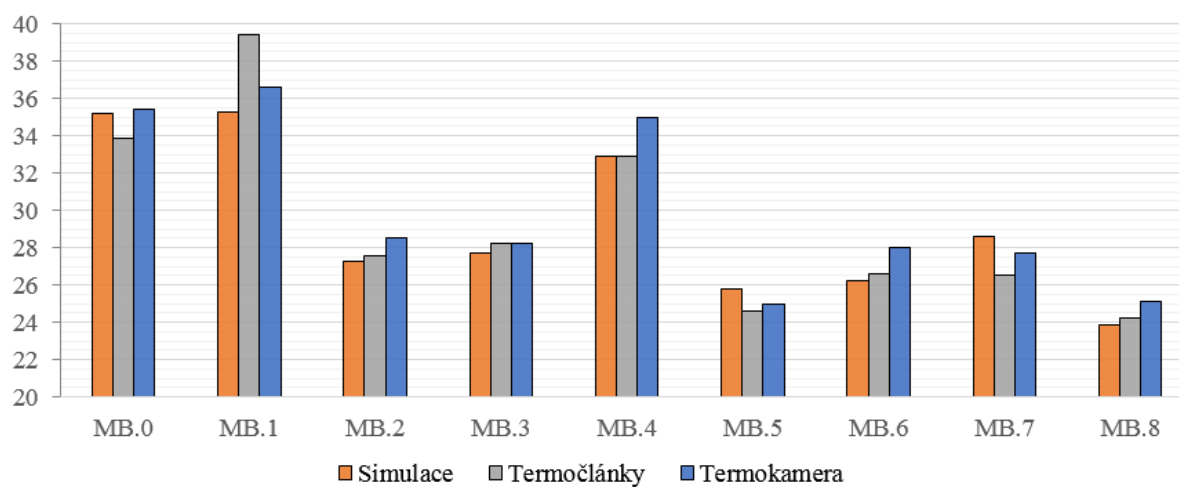
**Příloha D** Porovnání dosažených teplot v měřících bodech 0-8 při rychlosti proudu vzduchu  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav

Teplota [°C]

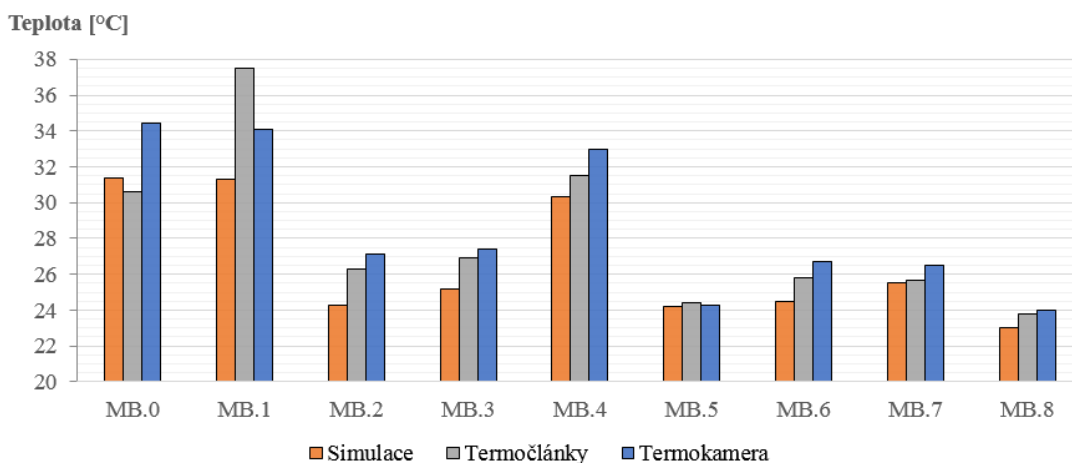


**Příloha E** Porovnání dosažených teplot v měřících bodech 0-8 při rychlosti proudu vzduchu  $5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav

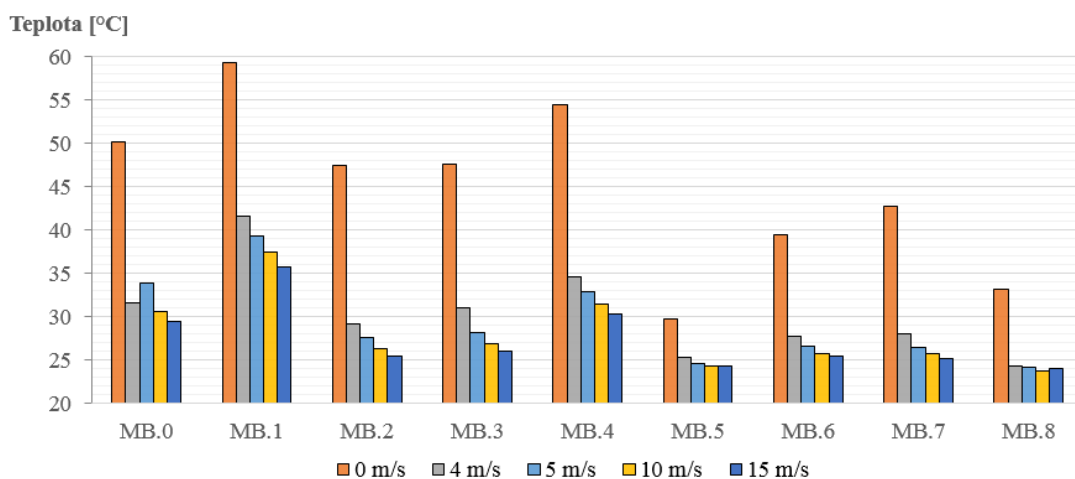
Teplota [°C]



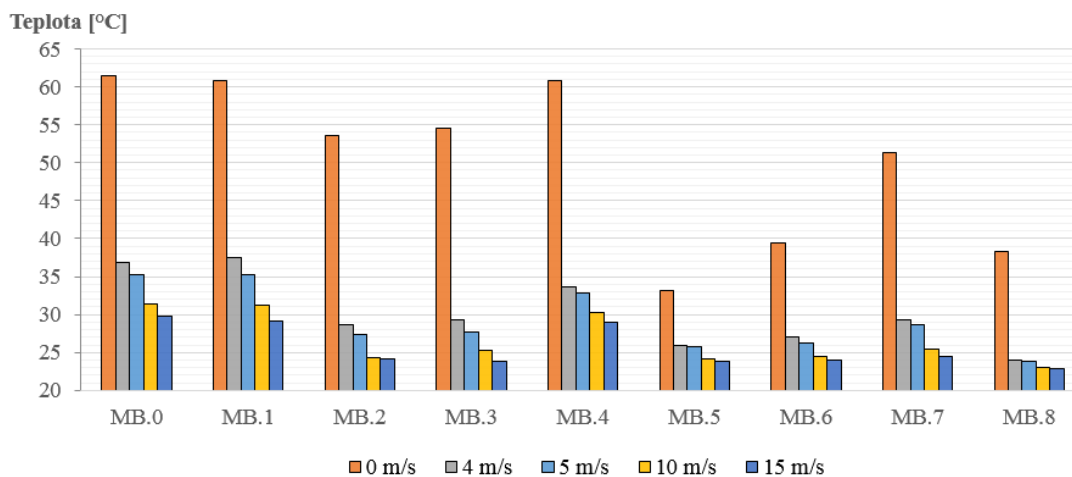
**Příloha F** Porovnání dosažených teplot v měřících bodech 0-8 při rychlosti proudu vzduchu  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  – ustálený stav



**Příloha G** Termočlánky - porovnání dosažených teplot režimů – ustálený stav



**Příloha H** Simulace - porovnání dosažených teplot režimů – ustálený stav



**Příloha I** Porovnání teplotních polí v uzavřeném prostředí s aktivním chlazením – zadní pohled

