

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Numerická analýza chlazení elektrického zařízení

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Vít KUBÍN**
Osobní číslo: **E18N0052P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Numerická analýza chlazení elektrického zařízení**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte teoretický úvod zaměřený na oteplení proudové dráhy elektrického zařízení, způsoby šíření tepla a jejich matematický popis včetně metod výpočtu.
2. Vytvořte geometrický a výpočetní model pro zadané elektrické zařízení, provedte numerický výpočet.
3. Analyzujte vypočtené výsledky s ohledem na postup a parametry výpočtu a na dovolené oteplení elektrického zařízení.
4. Navrhněte možná opatření vedoucí ke zlepšení chlazení elektrického zařízení.


Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Rada, Josef. Elektrotepelná technika. 1. vyd. Praha : SNTL, 1985.
2. Uživatelský manuál a dokumentace ANSYS FLUENT.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**
Nové technologie – výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou oteplení proudové dráhy se zaměřením na numerickou analýzu přirozeného proudění v okolí odpojovače. Programem využitým k modelování proudění je Ansys Fluent. Zavedený model respektuje přirozené tepelné ztráty odpojovače a jejich přestup do okolí.

Klíčová slova

Teplo, sdílení tepla, oteplení, proudění, metoda konečných objemů, analýza chlazení, odpojovač.

Abstract

The master theses describe the issue of heating of current path with focus onto numerical analysis of natural convection around the disconnecter. Program used to simulate the convection is Ansys Fluent. The established model respects natural heat losses of disconnecter and theirs transfer into the surroundings.

Key words

Heat, heat transfer, Heating, convection, finite element method, analysis of cooling, disconnecter.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 16.6.2020

Vít Kubín

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za cenné rady a připomínky, poskytnutí literatury, a především za ochotu a čas, který strávil vedením mé práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 TEPLO	13
1.1 PŘENOS TEPLA VEDENÍM	14
1.2 PŘENOS TEPLA KONVEKCI	15
1.2.1 Zákon zachování hmotnosti	16
1.2.2 Zákon zachování hybnosti	17
1.2.3 Zákon zachování energie	19
1.2.4 Turbulence	21
1.3 PŘENOS TEPLA ZÁŘENÍM	22
2 OTEPLENÍ PROUDOVÉ DRÁHY	24
2.1 TEPelné účinky proudu	25
2.1.1 Odpor vodiče	25
2.1.2 Vliv skin efektu.....	27
2.1.3 Vliv blízkosti vodičů.....	28
3 METODY VÝPOČTU	29
3.1 ANALYTICKÉ VÝPOČTY	29
3.1.1 Zjednodušený výpočet oteplování proudové dráhy	29
3.2 NUMERICKÉ METODY	31
3.2.1 Diferenční metoda	32
3.2.2 Metoda konečných prvků.....	32
3.2.3 Metoda konečných objemů	32
3.3 DALŠÍ METODY.....	33
3.3.1 Metoda bezrozměrných čísel	33
3.3.2 Metoda tepelných sítí.....	35
4 TVORBA MODELU	36
4.1 SPECIFIKACE ODPOJOVAČE.....	36
4.2 GEOMETRICKÝ MODEL	36
4.3 VÝPOČETNÍ MODEL	43
4.3.1 Příprava výpočetní sítě.....	43

4.3.2	Nastavení výpočtů.....	48
5	VÝSLEDKY SIMULACE.....	52
5.1	PŘIROZENÉ PROUDĚNÍ	54
5.2	NUCENÉ PROUDĚNÍ V OSE X-0.25 m/s	58
5.3	NUCENÉ PROUDĚNÍ V OSE X-0.5 m/s	62
5.4	NUCENÉ PROUDĚNÍ V OSE Z-0.25 m/s	66
5.5	NUCENÉ PROUDĚNÍ V OSE Z-0.5 m/s	70
5.6	PRŮBĚH OTEPLENÍ	74
6	MOŽNÉ ZLEPŠENÍ CHLAZENÍ ODPOJOVAČE	74
7	ZÁVĚR	76
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	77

Úvod

Chlazení proudově zatížených elektrických zařízení je důležitým aspektem jejich spolehlivého provozu. Ať už z hlediska jejich životnosti, spolehlivosti či bezpečnosti. Analýza rozložení tepelného pole uvnitř a vně zařízení je v mnoha oblastech důležitou součástí zkoumání vlastností různých zařízení, nejen elektrických. Z těchto důvodů je nutné věnovat této problematice dostatečnou pozornost.

V této práci se soustředím na problematiku ochlazování elektrického zařízení pro vnější prostředí, kde se uplatňuje přirozené proudění vzduchu a vítr. V teoretické části se zaměřuji na vznik tepla a možné faktory, které ho ovlivňují. Dále na způsoby šíření tepla, jejich charakterizaci a matematický popis. Dalším bodem teoretické části je popis metod pro výpočet šíření tepla.

Praktická část je zaměřena na analýzu ochlazování zařízení pomocí výpočetního programu ANSYS Fluent. Pro začátek bylo nutné vytvořit 3D model odpojovače, k tomu jsem využil program SolidWorks. Tento model je dále upraven pro numerickou analýzu v programu Fluent Meshing. Numerický výpočet je poté řešen ve vlastním programu Fluent. Výsledky získané ze simulace jsou porovnány s mezní hodnotou oteplení části odpojovače, které je dáno normou. Závěrem jsou uvedeny možné způsoby pro zlepšení chlazení odpojovače.

Seznam symbolů a zkratek

ΔE	Rozdíl energie systému pro přenos do okolí (J)
W	Práce systému (J)
Q	Teplo systému (K)
E_m	Energie potřebná pro přenos hmoty (J)
\dot{Q}	Průtok tepla (W)
\dot{q}	Tepelný tok (W/m ²)
λ	Měrná tepelná vodivost (W/(m·K))
\dot{e}_b	Energie vyzařená na jednotku prostoru černého tělesa (W/m ²)
σ	Koeficient záření (m ² K ⁴)
ε	Emisivita reálného povrchu (-)
P_Z	Výkon ohřevu (W)
c	Měrná objemová tepelná kapacita (J·m ⁻³ ·K ⁻¹)
V	Objem (m ³)
ϑ	Okamžitá teplota (K)
P_0	Ochlazovací výkon (W)
I	Elektrický proud (A)
R	Elektrický odpor (Ω)
t	Čas (s)
$i(t)$	Časově proměnný elektrický proud (A)
ρ	Měrný elektrický odpor ($\Omega\cdot m$)
l	délka (m)
S	Průřez (m ²)
ρ_{ref}	Rezistivita při 20 °C ($\Omega\cdot m$)
α	Teplotní odporový součinitel (K ⁻¹)
$\Delta\vartheta$	Rozdíl teplot (K)

k_p	Činitel povrchového jevu (-)
δ_{ef}	Efektivní hloubka vniku (m)
ω	Úhlová rychlost ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)
μ	Magnetická permeabilita ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)
γ	Měrná elektrická vodivost ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)
k_b	Činitel blízkosti vodičů (-)
Nu	Nusseltovo číslo (-)
L	Charakteristická délka systému (m)
Re	Reynoldsovo číslo (-)
w	Objemová rychlost kapaliny (m/s)
ν	Kinetická viskozita kapaliny (m^2/s)
Gr	Grashofovo číslo (-)
g	Gravitační zrychlení (m/s^2)
β	Koeficient tepelné objemové roztažnosti (K^{-1})
Pr	Prandtlovo číslo (-)

1 Teplo

Teplo je definováno prvním termodynamickým zákonem jako energie, která je přenášena přes okraj termodynamického systému, z důvodu teplotního rozdílu mezi systémem a jeho okolím. Vztah pro vyjádření prvního termodynamického zákona lze zapsat obecně jako:

$$\Delta E = W + Q + E_m \quad (1.1)$$

Kde Q (J) je teplo systému,

W (J) je práce systému,

E_m (J) je energie potřebná pro přenos hmoty,

ΔE (J) rozdíl energie systému po přenosu do okolí.

Proces přenosu vztažený k sdílení tepla se nazývá přenos tepla. Z aplikace druhého termodynamického zákona plyne, že je teplo vždy přenášeno směrem s klesající teplotou. Problémem je, že termodynamika nám neříká nic o závislosti množství přeneseného tepla na tomto tepelném rozdílu či gradientu teploty. Ani nám neříká nic o tvaru tělesa, či jeho materiálu nebo závislosti na čase. Pro doplnění těchto znalostí zde máme dvě veličiny - průtok tepla určující množství tepla přenesené za jednotku času a tepelný tok respektující jak jednotku času, tak i plochu:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} \quad (1.2)$$

Kde \dot{Q} (W) je průtok tepla.

$$\dot{q} = \frac{d\dot{Q}}{dA} \quad (1.3)$$

Kde \dot{q} (W/m²) je tepelný tok.

V základu rozdělujeme přenos tepla do tří skupin:

- Přenos tepla vedením (kondukcí)
- Přenos tepla prouděním (konvekcí)
- Přenos tepla sáláním (radiací)

Všechny tři způsoby přenosu tepla se podílejí na ochlazování proudové dráhy. Podrobně popsáno v následujících kapitolách.

1.1 Přenos tepla vedením

Vedení je přenos energie v důsledku molekulární interakce mezi sousedícími molekulami, způsobený jejich náhodným pohybem. Přenos tepla vedením se uplatňuje v pevných, kapalných i plynných látkách, a přitom nevyžaduje žádný makroskopický pohyb, nebo tok substance. S rostoucí teplotou se náhodný pohyb molekul zintenzivňuje a s tím i kinetická energie na molekulární úrovni. Kolize mezi sousedícími molekulami způsobují přenos energie z molekul s vyšší kinetickou energií do těch s nižší kinetickou energií. V kovech k tomuto jevu přispívá dodatečně i energie přenášená pomocí volných elektronů. Pro výpočet se naštěstí nemusíme složitě zaobírat molekulárním složením, ale bude nám stačit znát jen jednu materiálovou konstantu, tzv. měrnou tepelnou vodivost a teplotní gradient, potom lze napsat vzorec zvaný Fourierův zákon:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \quad (1.4)$$

Kde λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je měrná tepelná vodivost.

Pro homogenní materiály, což jsou materiály, se stejnou hodnotou tepelné vodivosti ve všech směrech, lze zapsat Fourierův zákon ve vektorové podobě jako:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } \vartheta \quad (1.5)$$

Měrná tepelná vodivost je veličina určující schopnost materiálu vést teplo. Tato veličina závisí hodně i na skupenství materiálu – u plynů se pohybuje v rozmezí 0,015 - 0,15 W / (K · m), u kapalin je tato hodnota v rozmezí 0,1 – 0,65 W / (K · m) a u pevných látek v rozmezí 1–450 W / (K · m). Z těchto hodnot je patrné, že vedení se uplatňuje hlavně v pevných materiálech, nejlépe v materiálech jako je např. stříbro, zlato a měď. [6]

1.2 Přenos tepla konvekcí

Pro popis proudění kapalin je nutné vyjít ze základních fyzikálních zákonů zachování hmotnosti, hybnosti a energie. Fyzikálně jsou tyto zákony vyjádřením bilance určité veličiny v určitém objemu. Tato bilance popisuje změnu určité veličiny v určitém objemu V, která je rovna toku této veličiny plochou S, omezující tento objem a její produkci uvnitř objemu V.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V J dV + \int_S F_j(J) n_j dS = \int_V P(J) dV \quad (1.6)$$

Kde J je bilancovaná veličina,

$F_j(J)$ je j-tá složka vektoru hustoty toku veličiny J plochou dS,

n_j je j-tá složka normálového vektoru,

P_j je hustota produkce veličiny J (za jednotku času v objemu V).

Vztah (1.6) je nutné upravit za pomoci Gaussovy věty a dostáváme výsledné bilanční vztahy platící pro libovolný objem V.

Integrální tvar:

$$\int_S F_j(J) n_j dS = \int_V \frac{\partial F_j(J)}{\partial x_j} dV \quad (1.7)$$

Diferenciální tvar:

$$\frac{\partial J}{\partial t} + \frac{\partial F_j(J)}{\partial x_j} = P(J) \quad (1.8)$$

Nyní je již jednoduché dostat vztahy pro zákony zachování konkrétních veličin, dosazením těchto veličin za J , $F_j(J)$ a $P(J)$. [kapitola zpracována podle 7]

1.2.1 Zákon zachování hmotnosti

Zákon zachování hmotnosti je vyjádřen pomocí rovnice kontinuity, jejíž tvar pro nestacionární proudění stlačitelné kapaliny má tvar ($J = \rho$, $F_j(\rho) = \rho \cdot u_j$):

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \int_S \rho u_j n_j dS = 0 \quad (1.9)$$

a v diferenciálním tvaru:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1.10)$$

V případě ustáleného stavu je časová derivace rovna nule a rovnici (1.10) je možné zjednodušit do tvaru:

$$\frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1.11)$$

Který platí pro stlačitelné i nestlačitelné kapaliny v prostoru. Pro nestlačitelné kapaliny, u kterých lze předpokládat konstantní hodnotu hustoty, lze zanedbat ve vztahu (1.11) ρ a tím získat jednodušší tvar: [kapitola zpracována podle 7]

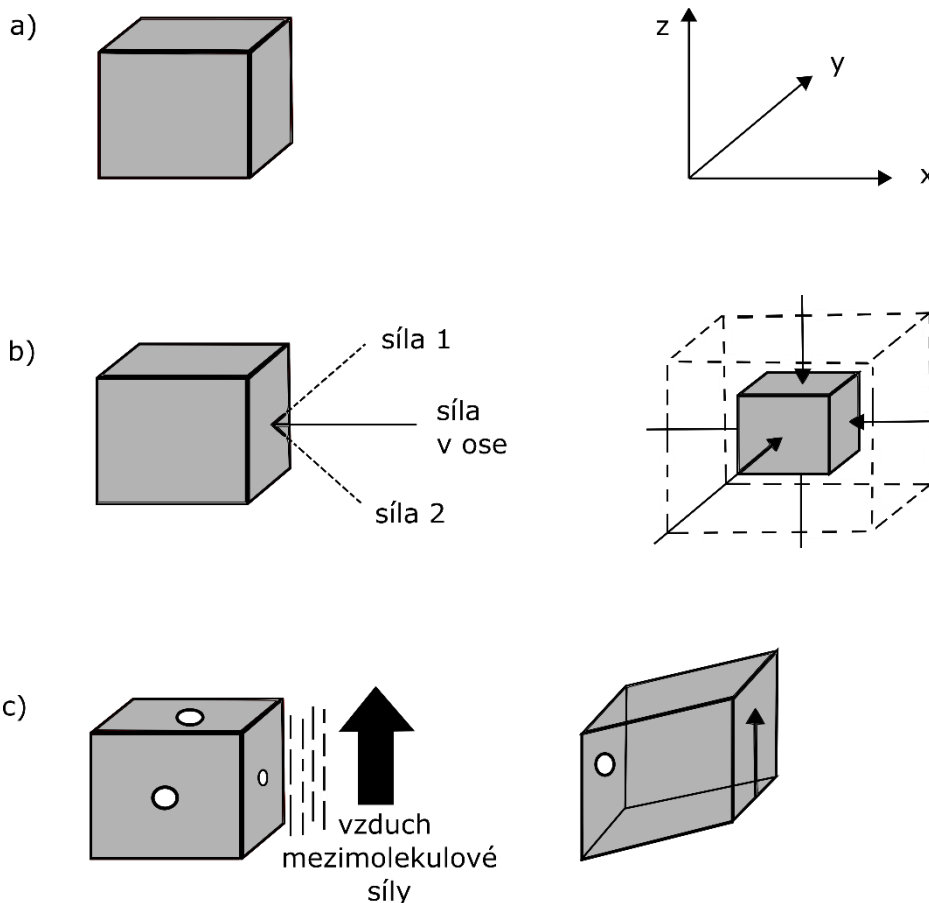
$$\frac{\partial(u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1.12)$$

1.2.2 Zákon zachování hybnosti

Dle Newtonova zákona je celková změna hybnosti kapaliny v určitém objemu V rovna sumě všech sil, které na tento objem působí, což jsou síly objemové a plošné ($J = \rho \cdot u_i$, $F_j(\rho) = (\rho \cdot u_i) \cdot u_j$):

$$\int_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) dV + \int_S (\rho u_i) u_j n_j dS - \int_S P_i dS = \int_V \rho f_i dV \quad (1.13)$$

Kde f_i je i -tá složka vektoru objemové síly,
 P_i je i -tá složka vektoru plošné síly.



Obr 1.1 Statický tlak a viskózní napětí podle [7]

Objemová síla působí na plochu elementu kapaliny V v počátečním stavu (Obr 1.1a), která nemusí být obecně kolmá k ploše. V tomto případě uvažujeme pouze jednu plochu elementu kapaliny V . Plošná síla obsahuje složku působící na tuto plochu tekutiny ve všech směrech za klidu, zobrazeno na (Obr 1.1b). Složka kolmá k ploše objemu je důležitá, z důvodu

stlačení, či zvětšení objemu, tj. jeho deformace. Tato složka je skalární a jmenuje se statický tlak. Dalšími složkami jsou viskózní napětí, která jsou důsledkem viskozity tekutin při pohybu, viz (Obr 1.1c). Tato napětí vznikají jak v laminárním, tak v turbulentním režimu. Pokud se objemový element V pohybuje, síly mezi molekulami zapříčiní posun molekuly ve směru pohybu. Velikost sil je závislá na vlastnostech kapaliny. Viskozita kapaliny je přímo úměrná těmto silám a výsledkem je zase deformace objemu V . Viskózní síly mohou působit ve směru osy x, y, z na plochy $dx.dy, dx.dz, dy.dz$ objemu dV a obsahují tedy devět složek, zároveň platí symetrie a tím pádem existuje pouze šest nezávislých složek. Celkový tenzor napětí lze nyní zapsat ve tvaru $\pi_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}$, kde p je normálová složka napětí (statický tlak), δ_{ij} je Kroneckerovo delta a τ_{ij} je tenzor viskózních napětí. Nyní můžeme rozepsat integrál pro plošnou sílu jako:

$$\int_S P_i dS = - \int_S \delta_{ij} p n_j dS + \int_S \tau_{ij} n_j dS \quad (1.14)$$

Pomocí Gaussovy věty a vynecháním operátoru integrálu lze nyní odvodit rovnici pro zachování hybnosti v diferenciálním tvaru:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (1.15)$$

Pro nestačitelnou kapalinu, což je kapalina s konstantním ρ a μ lze vztah dále zjednodušit a výsledkem je Navier-Stokesova rovnice pro proudění vazké kapaliny:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} + f_i \quad (1.16)$$

V nevazké tekutině je nulový i druhý člen, jenž vyjadřuje vliv viskozity na pravé straně, takže dostáváme Eulerovu rovnici hydrodynamiky: [kapitola zpracována podle 7]

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_i \quad (1.17)$$

1.2.3 Zákon zachování energie

V určitém objemu tekutiny V je dána celková změna energie změnou vnitřní energie a kinetické energie a zároveň tokem obou energií plochou S obklopující objem V . Celkovou změnu energie lze zapsat:

$$J = \rho \left(c_v T + \frac{1}{2} u_j^2 \right) = \rho E \quad (1.18)$$

Tato energie musí být kompenzována:

Prací vnějších objemových sil

$$\int_V \rho u_j \cdot f_j dV \quad (1.19)$$

Prací plošných sil

$$-\int_S p u_j n_j dS + \int_S \tau_{jl} u_j n_j dS = -\int_V \frac{\partial(p u_j)}{\partial x_j} dV + \int_V \frac{\partial(\tau_{jl} u_j)}{\partial x_j} dV \quad (1.20)$$

Tokem tepla hranicí S do V

$$-\int_S q_j n_j dS = -\int_V \frac{\partial q_j}{\partial x_j} dV \quad (1.21)$$

Nyní lze zapsat výslednou rovnici energie ve tvaru:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left[\rho \left(c_v T + \frac{1}{2} u_j^2 \right) \right] dV + \int_V \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho u_j \left(c_v T + \frac{1}{2} u_j \right) \right] dV = \\ = \int_V \rho u_j \cdot f_j dV - \int_V \frac{\partial (p u_j)}{\partial x_j} dV + \int_V \frac{\partial (\tau_{jl} u_j)}{\partial x_j} dV - \int_V \frac{\partial q_j}{\partial x_j} dV \end{aligned} \quad (1.22)$$

Po matematických úpravách a vynechání operátoru integrálu dostaneme rovnici v diferenciálním tvaru:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho E] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j E] = \rho u_j f_j - \frac{\partial (p u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial (\tau_{jl} u_j)}{\partial x_l} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (1.23)$$

Kde na pravé straně

- První člen představuje práci vnější objemové síly (gravitační síla)
- Druhý člen představuje termodynamický vratný tok energie do objemu V a jeho změnu vlivem tlakových sil (může nabývat hodnot kladných i záporných)
- Třetí člen představuje nevratný přírůstek energie v důsledku disipace vlivem vazkosti, vyjadřuje se pomocí disipační funkce Φ a je vždy kladný

$$\Phi = \frac{1}{2} \mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_l} - \frac{\partial u_l}{\partial x_j} \right)^2 + \left(\frac{2}{3} \mu + \xi \right) \left(\frac{\partial u_m}{\partial x_m} \right)^2$$

- Čtvrtý člen je vektor tepelného toku q_j a je dán Fourierovým zákonem

Zákon zachování energie je nejčastěji vyjadřován pomocí celkové entalpie h_0 , která je dána součtem statické entalpie a kinetické energie. Poté lze po úpravě zapsat výslednou rovnici jako:

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho h_0] + \frac{\partial}{\partial x_j} [u_j \rho h_0] = \frac{\partial p}{\partial t} + \rho u_j f_j + \frac{\partial (\tau_{jl} u_j)}{\partial x_l} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (1.24)$$

Další možností je vyjádřit zákon zachování energie pomocí statické entalpie.

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho h] + \frac{\partial}{\partial x_j} [u_j \rho h] = \frac{dp}{dt} + \rho u_j f_j + \frac{\partial (\tau_{jl} u_j)}{\partial x_l} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (1.25)$$

Rovnice v tomto tvaru obsahuje pouze jedinou neznámou veličinu, a to teplotu, resp. entalpii. Výše uvedené základní zákony zachování hmotnosti, hybnosti a energie tvoří soustavu nelineárních parciálních rovnic pro proměnné ρ , u_i a h , resp. h_0 nebo T . Tyto rovnice lze využít v různých tvarech k řešení konkrétních úloh v mechanice tekutin, důležité je zdůraznit, že až po doplnění okrajových podmínek. [kapitola zpracována podle 7]

1.2.4 Turbulence

Při proudění vazké kapaliny je možné rozlišit dva různé režimy, a to laminární a turbulentní. Navier-Stokesovy rovnice spolu s rovnicí kontinuity popisují oba tyto režimy. Rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1.26)$$

Navier-Stokesovy rovnice:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + f_i \quad (1.27)$$

Přechod k turbulenci je důsledkem ztráty stability základního laminárního řešení Navier-Stokesových rovnic, když se nelineární členy stanou mnohem větší než viskózní. Turbulence je vlastností proudění a jejími charakteristickými vlastnostmi je náhodnost, vířivost, trojrozměrnost.

Přímé řešení Navier-Stokesových rovnic (tzv. přímá numerická simulace) vyžaduje síť odpovídající rozměrům nejmenších vírů, což je i s nynější vyspělou výpočetní technikou velmi náročné. Z tohoto důvodu se u inženýrských úloh turbulentního proudění využívají statické modely turbulence. V takovémto modelu je přenos hmotnosti, hybnosti a tepla reprezentován korelacemi mezi fluktuujícími složkami, které se v rovnicích objevují po jejich časovém středování. [kapitola zpracována podle 7]

1.3 Přenos tepla zářením

Energie vyzařovaná jakoukoliv hmotou do svého okolí ve formě elektromagnetických vln se nazývá záření. Na rozdíl od přestupu tepla vedením, či prouděním není přenos energie z bodu A do bodu B vázán do žádného přenosového média, a to z důvodu, že elektromagnetické vlny mohou cestovat vakuem. Jakákoliv hmota, nebo těleso vyzařuje záření v závislosti na jejich povrchové teplotě (pro upřesnění - všechna tělesa s teplotou $T > 0 \text{ K}$). Maximální možná radiace pro danou teplotu je vyzařována černým tělesem. Černé těleso může být experimentálně bráno jako začerněný povrch, nebo dutý prostor, jehož stěny mají všude stejnou teplotu a mají malou díru, kterou propouští radiaci. Pro výpočet celkové radiace vyzářené černým tělesem na jednotku prostoru, lze zapsat vztah:

$$\dot{e}_b = \sigma T^4 \quad (1.28)$$

Kde \dot{e}_b (W/m^2) je energie vyzářená na jednotku prostoru černého tělesa,
 σ (m^2K^4) je koeficient záření, také znám jako Stefan-Boltzmannova konstanta.

Vztah výše, také známý jako Stefan-Boltzmannův zákon, byl nalezen roku 1879 jako výsledek mnoha experimentů. Vyzařování \dot{e}_b je energetický tok, a tím pádem tepelný tok s ním související vyzařovaný černým tělesem můžeme vyjádřit jako:

$$q_b = \dot{e}_b = \frac{d\dot{Q}_b}{dA} \quad (1.29)$$

Záření produkované reálnými povrchy je vždy nižší než záření působené černým tělesem za stejné teploty. Snížený energetický nebo tepelný tok záření reálného tělesa \dot{e} v porovnání s černým tělesem je vyjádřen jako:

$$\dot{e} = \varepsilon \cdot \dot{e}_b = \varepsilon \cdot \sigma T^4 \quad (1.30)$$

Kde ε je emisivita reálného povrchu.

V zásadě je emisivita funkcí povrchu materiálu. Také může být funkcí povrchové morfologie, teploty povrchu, směru radiace a vlnové délky záření. Nicméně, mnoho povrchů lze při dobré aproximaci brát jako šedá tělesa, která jsou definována $\varepsilon = \text{konst.}$ [6]

2 Oteplení proudové dráhy

Oteplení proudové dráhy je důležitým parametrem, který je nutné u elektrických zařízení podrobně sledovat. Tento parametr je úzce spjat s provozním stavem, spolehlivostí, bezpečností a životností elektrického zařízení. U mnoha zařízení tvoří omezující faktor při jejich návrhu a také provozu. Vyšší hodnoty oteplení, než je oteplení provozní, vedou k degradaci izolací vodičů, což bývá příčinou vzniku poruchových stavů. Z tohoto důvodu je velmi důležité věnovat tomuto tématu dostatečnou pozornost.

Základními faktory pro oteplení proudové dráhy jsou proudové zatížení a odpor vodiče, z kterých oteplení vychází. Mezi další parametry patří míra a způsob ochlazování vodiče, kde se projevuje hned několik způsobů přestupu tepla. Neméně důležitým parametrem jsou provozní podmínky, teplota okolí, kvalita kontaktů, rychlost a směr větru a také ohřev způsobený slunečními paprsky nebo tepelná vodivost vodičů a izolačních materiálů. Rovněž může dojít k případu, kdy se projeví některé fyzikální děje, např. skinefekt nebo vliv blízkosti vodičů, které ovlivňují celkový odpor vodiče.

Průchodem proudu vodičem vznikají ztráty, které se projevují oteplováním proudové dráhy. Část tohoto tepla se uchovává ve vodiči v závislosti na teplotě materiálu a zbylá část je předávána do okolí. V provozním ustáleném stavu při neproměnném ohřevu, kdy je teplota vodiče konstantní, je všechno generované teplo odváděno do okolí. Při přechodných dějích, kdy není hodnota proudu konstantní, je nutné zohlednit vlastní tepelnou kapacitu vodiče, popřípadě i tepelné kapacity všech součástí v teplotní analýze. K tvorbě modelu oteplení proudové dráhy je důležité zvážit, které děje se v konkrétním případě uplatní a které je možné zanedbat. Jednotlivé děje je pak nutné popsat rovnicemi zohledňujícími jejich velikost a průběh působení. Pro obecný popis děje dostáváme:

$$P_z = c \cdot V \cdot \frac{d\Delta\vartheta}{dt} + P_0(\Delta\vartheta) \quad (2.1)$$

Kde P_z (W) je výkon ohřevu,
 c ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) je měrná objemová tepelná kapacita vodiče,
 V (m^3) je objem vodiče,
 ϑ (K) je okamžitá teplota vodiče,
 P_0 (W) je ochlazovací výkon.

2.1 Tepelné účinky proudu

Ve vodiči, jímž prochází elektrický proud se mění energie elektrická v tepelnou podle Jouleova zákona. Toto teplo vzniká jako důsledek srážek částic způsobujících elektrický proud (elektrony) s částicemi, které se vedení neúčastní. Při srážce je předána část kinetické energie elektronů právě těmito částicím, tím se zvyšuje jejich tepelný pohyb a vzniká oteplování vodiče. Teplo se předává do okolí za současného růstu teploty vodiče. Množství tepla je úměrné druhé mocnině proudu a elektrickému odporu vodiče. Ve stacionárním stavu, nebo jedná-li se o ustálený stejnosměrný proud, nebo efektivní hodnotu ustáleného střídavého proudu je možné popsat toto vytvářené teplo vztahem:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (2.2)$$

Kde Q (J) je Jouleovo teplo,

I (A) je elektrický proud procházející vodičem,

R (Ω) je elektrický odpor vodiče,

t (s) je čas působení.

V případě, že průběh proudu není stacionární, tedy v případě přechodových dějů nebo při poruše, např. při spínacích procesech nebo zkratech, vycházíme poté z obecného vztahu:

$$dQ = [i(t)]^2 \cdot R \cdot dt \quad (2.3)$$

kde $i(t)$ (A) je časově proměnný elektrický proud. [1], [2], [3]

2.1.1 Odpor vodiče

Elektrický odpor je vlastnost vodiče udávající jeho schopnost vést elektrický proud. Odpor proudové dráhy, a tedy i vodiče závisí na jeho rezistivitě, délce a jeho průřezu a je dán vztahem:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2.4)$$

Kde ρ ($\Omega \cdot \text{m}$) je měrný elektrický odpor

l (m) je délka vodiče,

S (m^2) je průřez vodiče.

V elektrických obvodech, kde mají obvykle vodiče za standardních podmínek mnohem nižší odpor, než je impedance zátěže, se změna odporu v počátku výrazněji neprojeví na proudu vodičem, nicméně tato změna má významný vliv na oteplení vodiče. Pro vodiče je vyžadován materiál s hodnotou odporu co nejnižší a s dobrými mechanickými vlastnostmi – nejvhodnějším a nejpoužívanějším materiálem jsou z tohoto důvodu kovy. Odpor kovů nelineárně roste s jejich teplotou. Tento jev je důležité v mnoha případech zohlednit, a proto je definován vztah rezistivity na teplotě:

$$\rho(\vartheta) = \rho_{ref} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta\vartheta + \alpha_2 \cdot \Delta\vartheta^2 + \alpha_3 \cdot \Delta\vartheta^3 \dots) \quad (2.5)$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_{ref}$$

Kde ρ_{ref} ($\Omega \cdot \text{m}$) je rezistivita při referenční teplotě (obvykle 20°C),

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ (K^{-1}) jsou teplotní odporové součinitele pro referenční teplotu,

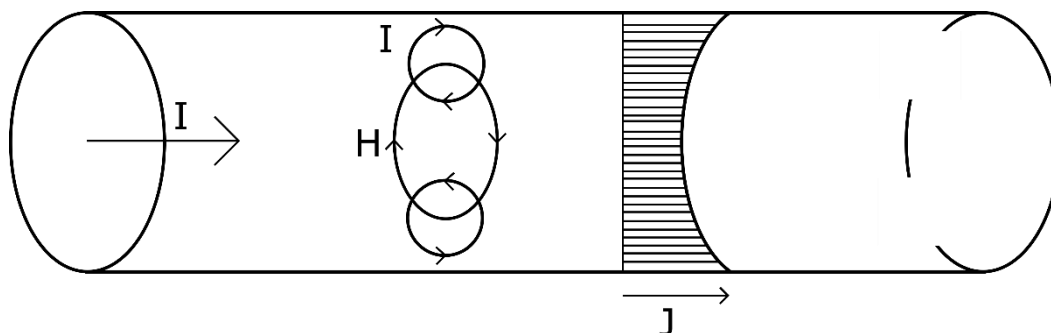
$\Delta\vartheta$ (K) je rozdíl reálné teploty oproti referenční teplotě.

V praxi se pohybuje rozsah změn teploty v jednotkách až desítkách stupňů Celsia, kde si ve většině případů vystačíme s lineární aproximací, a tedy s použitím pouze prvního odporového součinitele. [1], [4]

Vztah (1.4) pro odpor odporové dráhy platí pouze v případě konstantního průřezu. V případě nekonstantního průřezu, je třeba odpor vodiče počítat buďto po částech s konstantním průřezem nebo tuto skutečnost zohlednit jiným způsobem. Pro nejčastější případy, jako je např. kruhový otvor nebo zářezy na povrchu, je pro určitý segment vodiče možnost využít činitele zvětšení odporu zúžením udávaného tabulkami.

2.1.2 Vliv skin efektu

Skin efekt neboli povrchový jev je jedním z dalších faktorů, který může nepříznivým způsobem ovlivňovat odpor vodiče. Projevuje se pouze u vodičů, kterými protéká střídavý proud. Průchodem proudu vodičem se kolem něho uzavírá magnetické pole, jehož část může zasahovat i do části samotného vodiče. Část pole zasahující do vodiče v něm indukuje vířivé proudy, které ve středu vodiče působí proti směru procházejícímu proudu, a naopak na okrajích působí ve stejném směru. Vlivem těchto proudů tedy vzniká nerovnoměrné rozložení proudové hustoty ve vodiči tak, že se zvyšujícím se vlivem skin efektu je proud vytlačován k okrajům vodiče. Dalším důsledkem je také fázový posuv proudové hustoty v jednotlivých místech průřezu. [1], [3], [5]



Obr. 2.1 Vliv povrchového jevu podle [1], [5]

Tento jev zvyšuje celkový odpor vodiče, a tak způsobuje i jeho horší využití. Pro zohlednění tohoto jevu je nutné zavést tzv. činitel povrchového jevu. Tento činitel udává míru nárůstu odporu vodiče při přenosu střídavého proudu, oproti přenosu proudu stejnosměrného. Pro konkrétní případ lze vycházet ze vztahů zohledňujících profil vodiče, případně z tabulek pro daný profil. Činitel povrchového jevu k_p nabývá vždy hodnot od 1 a více. [1]

$$k_p = \frac{R_{\sim}}{R_{=}} \quad (2.6)$$

Veličina udávající vliv povrchového jevu je efektivní hloubka vniku, která udává vzdálenost od povrchu vodiče na rozhraní ve vodiči, kde je pokles amplitudy proudové hustoty roven e^{-1} (37 %). Účinek skin efektu se bude zvyšovat s klesající efektivní hloubkou vniku, a z toho lze usoudit, že se tento jev bude nejvíce projevovat u vodičů s velkým průřezem. Efektivní hloubka vniku lze vyjádřit vztahem:

$$\delta_{ef} = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (2.7)$$

Kde δ_{ef} (m) je efektivní hloubka vniku,
 ω (rad·s⁻¹) je úhlová rychlost,
 μ (H·m⁻¹) je magnetická permeabilita,
 γ (S·m⁻¹) je měrná elektrická vodivost.

Tento vztah nám také říká, že vliv skin efektu bude narůstat v závislosti na zvětšující se frekvenci, vodivosti materiálu a permeabilitě vodiče. Pro nejpoužívanější materiály vodičů v praxi, kterými jsou měď a hliník, je při frekvenci sítě efektivní hloubka vniku přibližně 10 mm. Povrchový jev se tedy projeví u vodičů s výrazně vyšším poloměrem. [1], [5]

2.1.3 Vliv blízkosti vodičů

U blízkých vodičů, které jsou položeny paralelně může docházet při průchodu střídavého proudu k vzájemnému ovlivňování jejich proudové hustoty. Fyzikální princip tohoto jevu je téměř totožný s tím u povrchového jevu, ovšem s tím rozdílem, že indukované vířivé proudy nejsou způsobeny vlivem vlastního magnetického pole, nýbrž magnetickým polem vyvolaným proudem procházejícím sousedním vodičem. Pokud je směr procházejícího proudu v paralelních vodičích totožný, pak indukované vířivé proudy podporují vliv skin efektu, a vytlačují tak proud k okrajům vodičů. Proudová hustota je tedy posléze ovlivňována jak vlivem povrchového jevu, tak i vlivem blízkosti vodičů. Podobně jako u skin efektu je i pro tento jev zaveden činitel blízkosti vodičů, který může v některých případech nabývat i hodnot nižších než 1, důsledkem čehož může být i zlepšení nerovnoměrnosti rozložení proudové hustoty způsobené povrchovým jevem. Vztah pro činitel blízkosti vodičů je:

$$k_b = \frac{R_{pb}}{R_p} \quad (2.8)$$

Kde R_{pb} (Ω) je odpor vodiče včetně vlivu obou výše zmíněných jevů,
 R_p (Ω) je odpor vodiče respektující pouze vliv skin efektu. [1]

3 Metody výpočtu

Výpočty proudění kapalin lze rozdělit do dvou skupin. Výpočty analytické a numerické. Popis proudění kapalin je matematicky velmi náročný, a proto se analytické výpočty uplatňují pouze na velmi jednoduché případy, a pro složitější a reálné výpočty je nutné využít numerických metod.

3.1 Analytické výpočty

Zde je důležité si uvědomit, jakou úlohu chceme řešit a na jaké povede tato úloha řešení. Zda budeme řešit úlohu v třírozměrném, či jednorozměrném prostoru, kde u vícerozměrných úloh vede řešení na parciální diferenciální rovnice, zatímco u jednorozměrné úlohy vede obvykle na obyčejné diferenciální rovnice. Zda bude úloha stacionární či časově závislá.

3.1.1 Zjednodušený výpočet oteplování proudové dráhy

Z výše uvedených znalostí je patrné, že pro oteplení proudové dráhy se uplatní hlavně přenos tepla prouděním, popř. radiací. Jelikož oteplování proudové dráhy závisí na všech zmíněných parametrech, je nutné upravit rovnici (2.1) tak, aby respektovala všechny zmíněné vlivy. Dostáváme obecnou rovnici ve tvaru:

$$[i(t)]^2 \cdot R(\vartheta) \cdot k_p k_b dt = c(\vartheta) \cdot V \cdot d\vartheta + (\alpha_k + \alpha_s) \cdot A \cdot \Delta\vartheta dt \quad (3.1)$$

Pro početní řešení je vhodné tuto rovnici zjednodušit. Toho docílíme tak, že budeme uvažovat konstantní průběh proudu, kde je ochlazování respektováno celkovým součinitelem přestupu tepla. Rovnice bude vypadat následovně:

$$I^2 \cdot R \cdot dt = c \cdot V \cdot d\vartheta + \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta dt \quad (3.2)$$

Kde α_0 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) je souhrnný součinitel přestupu tepla.

Rovnici řešíme pomocí separace proměnných a dostáváme:

$$dt = \frac{c \cdot V}{R \cdot I^2 - \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta} \cdot d\vartheta \quad (3.3)$$

$$t = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \cdot \ln(R \cdot I^2 - \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta) + K \quad (3.4)$$

Z počátečních podmínek $t = 0$, $\Delta\vartheta = 0$ lze nyní určit integrační konstantu:

$$K = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \cdot \ln(R \cdot I^2) d\vartheta \quad (3.5)$$

Dosazením výsledku do rovnice (3.4) a následného vyjádření teploty se dostáváme k výslednému vztahu:

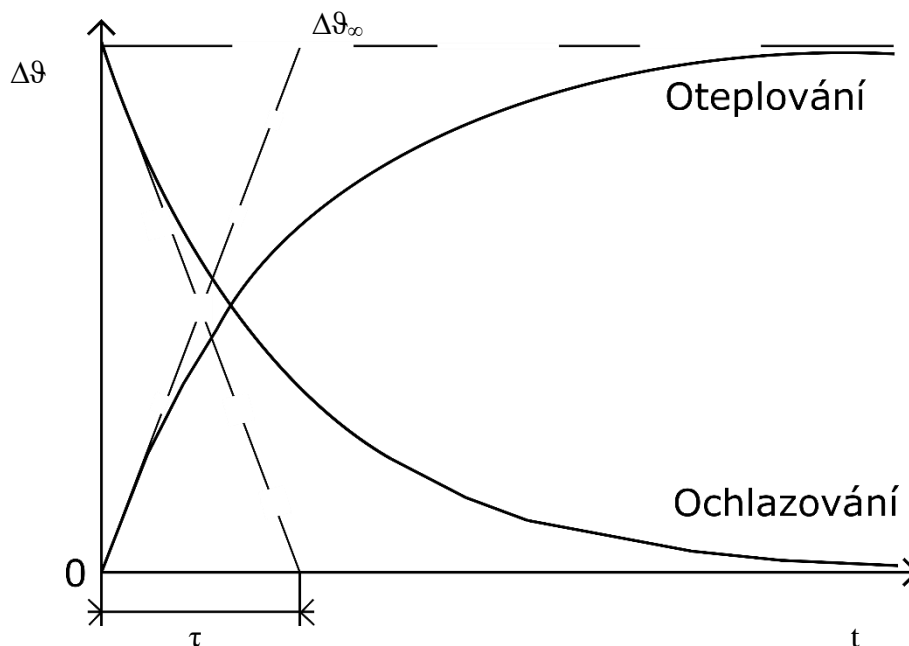
$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{max} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.6)$$

Kde lze časovou konstantu a velikost maximálního oteplení vyjádřit jako:

$$\tau = \frac{c \cdot V}{\alpha_0 \cdot A} \quad (3.7)$$

$$\Delta\vartheta_{max} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \quad (3.8)$$

Z rovnice (3.6) je patrné, že průběh oteplování bude mít exponenciální charakter, jehož maximální hodnota v ustáleném stavu je dána počáteční hodnotou před logaritmem. Časová konstanta nám udává počáteční rychlost a dobu ohřevu a také přímo odpovídá době, za kterou by se těleso v případě nulového chlazení ohřálo na maximální teplotu. [7]



Obr 3.1 Ochlazovací a oteplovací charakteristika podle [1]

Pro výpočet ochlazování lze využít rovnice (3.6) a po menší její úpravě dostáváme výsledný vztah:

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{max} \cdot (e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.9)$$

Oba průběhy popsané rovnicemi (3.6) a (3.9) jsou znázorněny na (

Obr 3.1). Na závěr je nutné dodat, že tento výpočet zanedbává teplotní závislost odporu, součinitele přestupu tepla a tepelnou kapacitu. Pro důkladnější výpočet s respektováním složitějších modelů, s reálnými vlastnostmi a s nutnou znalostí rozložení teplot v různých částech je třeba využít numerických metod. [8]

3.2 Numerické metody

Numerické metody jsou využívány pro nalezení přibližného řešení pro, případy výpočtů a simulací, pro které není možné najít řešení analyticky kvůli jejich rozsáhlosti a náročnosti. V reálných případech je většinou analytické řešení přímo nedosažitelné. V případě parciálních diferenciálních rovnic jsou nejrozšířenějšími metodami metoda konečných diferencí, metoda konečných prvků a metoda konečných objemů.

3.2.1 Diferenční metoda

Jedná se o nejstarší numerickou metodu, zvanou též jako metoda sítí. Obecný postup této metody se pokusím shrnout v následujících krocích. 1) Oblast modelu Ω , ve které řešíme okrajovou úlohu, pokryjeme sítí. Při 2D úloze se zpravidla volí síť čtvercová či obdélníková. V uzlech sítě se hledají přibližné hodnoty neznámé veličiny. 2) Ve všech vnitřních uzlech oblasti Ω se nahradí parciální derivace v řešené diferenciální rovnici diferenčními podíly získanými z přibližných hodnot neznámé veličiny v těchto uzlech. 3) V každém hraničním uzlu, ve kterém je zadána Neumannova hraniční podmínka, ji aproximujeme diferenčním podílem. Obdobně se postupuje na rozhraní dvou prostředí uvnitř oblasti Ω . 4) Využitím postupu v bodech 2) a 3) získáváme soustavu algebraických rovnic pro přibližné hodnoty veličiny v uzlech sítě. 5) Z vypočtených přibližných hodnot potenciálů je možné určit přibližné hodnoty potřebných veličin. [9]

3.2.2 Metoda konečných prvků

V současné době se jedná o nejpoužívanější metodu řešení okrajových úloh pro elektrická a magnetická pole. Uplatňuje se i v mechanice, pružnosti a pevnosti, hydrodynamice a aerodynamice, termodynamice a teorii elektromagnetického pole. Vývoj této metody úzce souvisí s vývojem výpočetní techniky v posledních 50 letech. Řešení je hledáno vhodnou aproximací v uzlech výpočetní sítě v celé vyšetřované oblasti. Není vhodná pro objemné případy a pro simulace turbulentního proudění. [9],[10]

3.2.3 Metoda konečných objemů

Tato metoda sleduje bilanci veličin na společných plochách jednotlivých konečných objemů. Již z principu je tak bližší podstatě proudění, kde se dominantně uplatňuje dosahuje lepších výsledků, než předchozí metody. Základní postup si popíšeme v následujících bodech: 1) rozdělení modelu na kontrolní objemy. 2) integrace diferenciálních rovnic přes celý kontrolní objem a aplikace teorému divergence. 3) nutná znalost hodnot na hraničních plochách ke stanovení derivovaných členů => přenos informací probíhá přes stěny a je vypočítán jako suma integrálů přes jednotlivé stěny. 4) výsledkem je soustava lineárních algebraických rovnic – jedna pro každý kontrolní objem.

Vývoj této metody proběhl zejména v 70. a 80. letech 20. století. Mezi její výhody patří, že neomezuje tvar kontrolních objemů, zákony zachování lze aplikovat i na hrubé sítě a jsou vyvinuty účinné iterační řešiče. Oproti metodě konečných prvků má výrazně nižší nároky na paměť a je výrazně rychlejší při výpočtech náročnějších úloh. [10]

3.3 Další metody

Existují i metody, které svým charakterem zasahují do obou výše zmíněných skupin jak analytických, tak numerických metod. V mé práci zmíním dvě tyto metody, a to metodu tepelných sítí a také metodu bezrozměrných čísel.

3.3.1 Metoda bezrozměrných čísel

Ve většině případů je koeficient přestupu tepla určován experimentálně a korelace pro mnoho konfigurací byly určeny z takových experimentů. Pro popis koeficientu přestupu tepla je nutné využít metody podobnosti.

Tyto popisy umožní zásadní redukci možných parametrů ovlivňujících daný koeficient a také pomůže k vytvoření výrazů pro obecný výpočet přenosu tepla pro geometricky podobné objekty různých složení. Z tohoto důvodu byl zaveden bez dimenzionální koeficient přestupu tepla, známý jako Nusseltovo číslo, který je popsán vztahem:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (3.10)$$

Kde L (m) je charakteristická délka systému

Pro odvození korelací Nusseltova čísla je nutné rozlišovat dvě situace: nucené proudění a přirozené proudění.

V případě nuceného proudění je pohyb kapaliny způsobován vnějším zdrojem, např. zařízením, které zvyšuje tlak, jako je čerpadlo. U přirozeného proudění je pohyb kapaliny způsobován rozdílem hustot v kapalině a odpovídajícím vztakovým efektem v gravitačním poli. Tyto rozdíly hustoty vznikají z důvodu rozdílů teploty a vzácně také kvůli rozdílům tlaku. Vesměs jsou rozdíly hustoty také způsobovány rozdílnou koncentrací kapaliny.

Charakteristiky proudění při nucené konvekci jsou obecně popisovány Reynoldsovým číslem:

$$Re = \frac{w \cdot L}{\nu} \quad (3.11)$$

Kde w (m/s) je objemová rychlost kapaliny,
 ν (m²/s) je kinetická viskozita kapaliny.

Charakteristiky toku při přirozené konvekci jsou obecně popsány Grashofovým číslem:

$$Gr = \frac{L^3 \cdot g \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad (3.12)$$

Kde g (m/s²) je gravitační zrychlení,
 β (K⁻¹) je koeficient tepelné objemové roztažnosti, při referenční teplotě.

Dále mohou být některé vlastnosti kapaliny, shrnuty v bezdimenzionální podobě Prandtlova čísla:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (3.13)$$

Pomocí těchto čísel je možné vyjádřit korelace koeficientu přestupu tepla α v následující podobě:

$$Nu = f_1(Re, Pr) \quad (3.14)$$

Pro nucené proudění a

$$Nu = f_2(Gr, Pr) \quad (3.15)$$

Pro přirozené proudění. [6]

3.3.2 Metoda tepelných sítí

Metoda vychází z analogie elektrického pole, kde při řešení je tepelná analýza převedena na náhradní elektrické obvody. Aplikace metody spočívá v rozdělení vyšetřovaného zařízení na náhradní články respektující jeho fyzikální vlastnosti. Výsledná soustava je spojená z dílčích schémat a řešena jako celek. Výsledkem řešení tepelné sítě jsou oteplení v uzlech sítě, tedy bodech spojení jednotlivých náhradních článků reprezentujících daný úsek proudové dráhy. Z hlediska tepla, které proudí ve směru tepelného spádu a je odváděno povrchem do okolí, je nutné matematickým popisem základního článku tuto skutečnost respektovat.

4 Tvorba modelu

K tvorbě 3D modelu odpojovače jsem využil programu SolidWorks, který je ideálním nástrojem k této činnosti. Než se však budu moci zaměřit na tento popis, je nutné uvést specifikace a vlastnosti modelovaného odpojovače, podle kterého byl geometrický a výpočetní model tvořen.

4.1 Specifikace odpojovače

Model vychází z reálného třípólového venkovního odpojovače na hladinu 110kV, dostupného v laboratoři elektrických přístrojů katedry elektroenergetiky a ekologie na Západočeské univerzitě. Základní štitkové hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4.1.

Tab. 4.1 - Vybrané štitkové hodnoty odpojovače

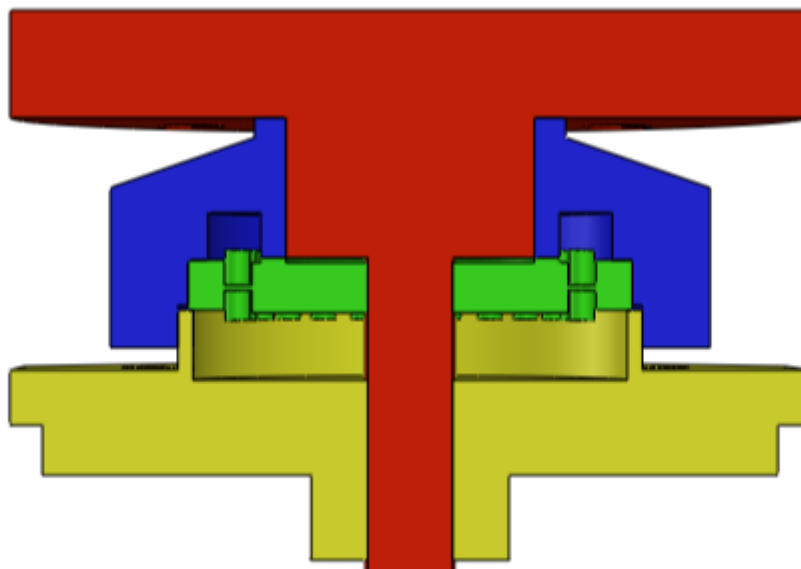
$U_n = 123 \text{ kV}$	$I_n = 2000 \text{ A}$
------------------------	------------------------

Dovolené maximální oteplení kontaktů: $\Delta T = 65 \text{ K}$

4.2 Geometrický model

Geometrický model jsem se rozhodl zpracovat v programu SolidWorks, který je ideálním nástrojem pro tvorbu 3D modelů. Model byl zpracován podle reálných rozměrů odpojovače v laboratoři. Pro tvorbu modelu je důležité rozdělit si celý model na jednotlivé díly, které je jednodušší v programu nakreslit. Z těchto dílů je následně možné složit kompletní model odpojovače. V následující části práce se zaměřím na popis těchto dílů.

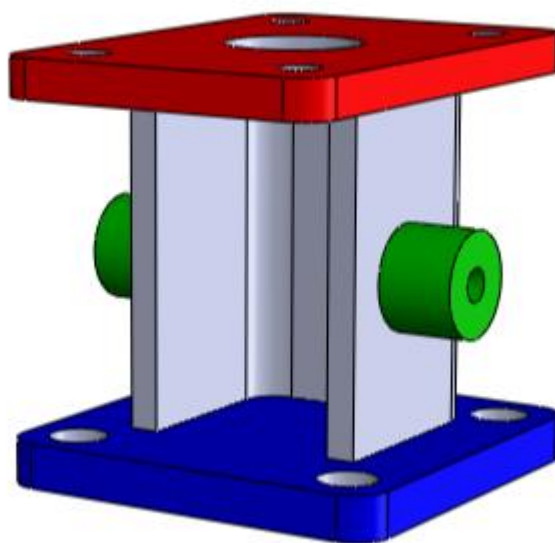
První součástí je otočná přívodní hlavice, která slouží k natáčení ramene a zároveň k přívodu, či odvodu elektrického proudu. Model tohoto dílu se skládá ze čtyř částí, z nichž tři jsou hliníkové a v podstatě slouží jako nosná konstrukce a jedna část, tzv. kuželíkové ložisko, je měděná a slouží k přenosu proudu mezi statickou a otočnou částí. Toto ložisko umožňuje zaručený přenos proudu i při natáčení ramene odpojovače. Je velmi důležité zaručit přenos proudu z důvodu snížení ztrát a zahřívání celé součásti. V podstatě by proud mohl přecházet i po hřídeli, jež je v kontaktu i se spodní částí kontaktní hlavice, která je připojena na rameno, ale jelikož se jedná o otočný systém, musí zde existovat jistá vůle mezi hřídely a ostatními částmi z důvodu volného pohybu, a kvůli těmto vůlím není možné zaručit dostatečný kontakt. Celý díl kontaktní hlavice je znázorněn na Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Řez modelu otočné přívodní hlavice

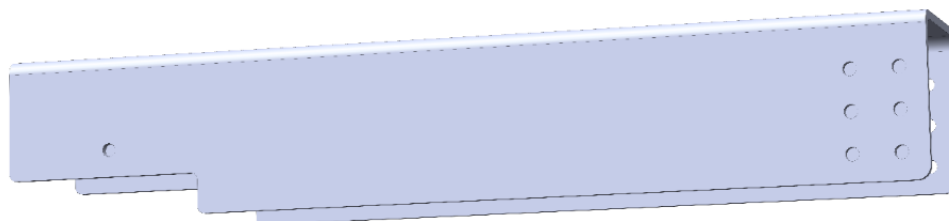
Na Obr. 4.1 jsou záměrně zbarveny jednotlivé části do nereálných barev z důvodu rozlišení jednotlivých částí. Červeně zbarvený prvek je přívodní svorkou a je hřídelí propojen se zbytkem prvků. Tento díl se nesmí otáčet, jelikož je k němu v reálné instalaci připojen přívodní vodič. Modrá část je kryt ložiska, který uvnitř ve volných prostorech udržuje vazelinu pro mazání ložiska. Tato část je pevně přichycena ke žluté části a je jedním z otočných prvků. V horní části modrého prvku, na propojení s červeným dílem je kluzný kontakt s vůlí. Zelený díl je zjednodušené kuželíkové ložisko, které je vnitřní částí spojeno vodivě s hřídelí a vnější částí přímo propojeno se žlutým dílem, vnitřní a vnější část je v reálu propojena kuželíkovými kontakty. V tomto modelu jsem zvolil jako náhradu válce. Žlutý díl je pevně přichycen k rameni odpojovače a oddělen od hřídele též kluzným kontaktem; tímto dílem je otáčeno ramenem. Díl je u obou ramen shodný.

Druhou součástí modelu je podstavná noha, díl je zachycený na Obr. 4.2. Tento díl je propojený s ramenem jak pomocí zelených částí, které jsou k rameni přišroubované, tak i červenou částí, kterou je zároveň vodivě propojený s přívodní hlavicí. Materiál použitý pro tento díl je též hliník, nicméně proud procházející tímto dílem je minimální, jelikož je mimo proudovou dráhu. Spodní modrá část je pevně připevněna k přírubě izolátoru, která nese celou konstrukci proudové dráhy odpojovače. Díl je taktéž shodný u obou ramen.



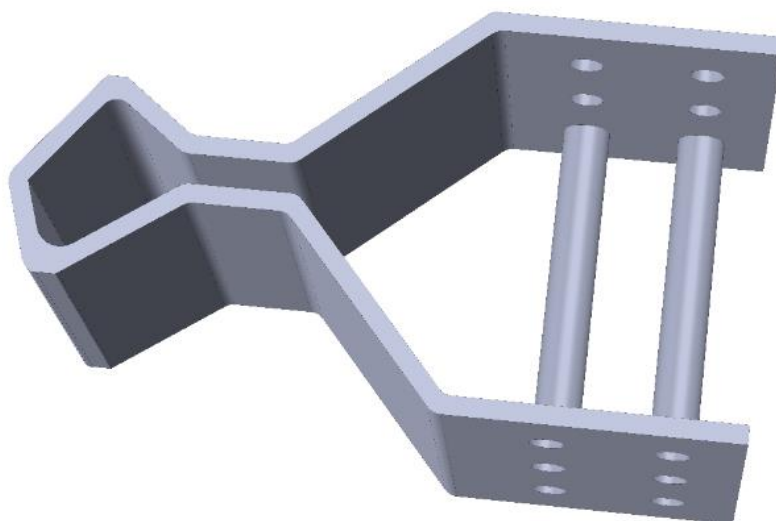
Obr. 4.2 Podstavná noha ramene

Třetím dílem modelu je samotné rameno odpojovače, jež je velmi důležité pro přenos proudu. Levé a pravé rameno jsou téměř identické jen s jediným rozdílem u propojení s kontakty, které jsou popsány níže. Levé rameno, jež můžete vidět na Obr 4.3 má v přední části na každé straně pouze 6 děr, kdežto pravé má těchto děr na každé straně 8. Popsané díry slouží k přišroubování kontaktů k rameni. Na rameni si můžete všimnout i dalších děr, které slouží k propojení s výše popsanými díly. Celé rameno je zkonstruované z hliníku a v podstatě skoro celé slouží k vedení proudu.

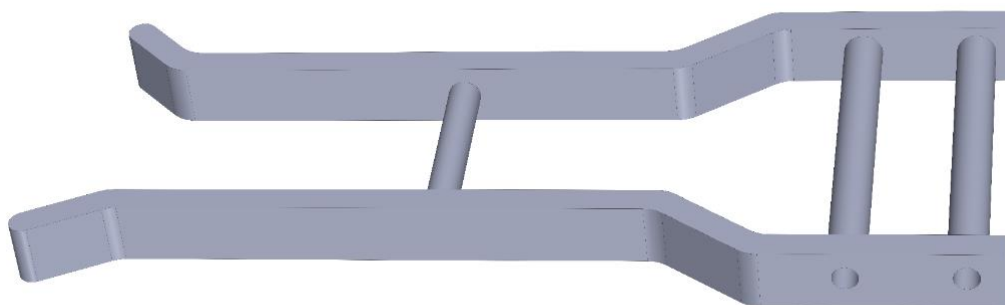


Obr 4.3 Levé rameno odpojovače

Dalšími důležitými díly modelu jsou kontakty. U typu mého odpojovače jsou dva druhy kontaktů. U levého ramene je pevný kontakt (znázorněný na Obr. 4.4), který má dvě stykové plochy s kontaktními palci tvořícími kontakt u pravého ramene. Pár kontaktních palců můžete vidět na Obr. 4.5. Pevný kontakt i palce jsou vyrobeny z mědi, a to pro její lepší vodivostní vlastnosti. Kontaktní plochy jsou postříbřeny. K převodu proudu z ramene na část pevného kontaktu slouží velké styčné plochy montážní sevření je rozepřeno pomocnými trubkami.



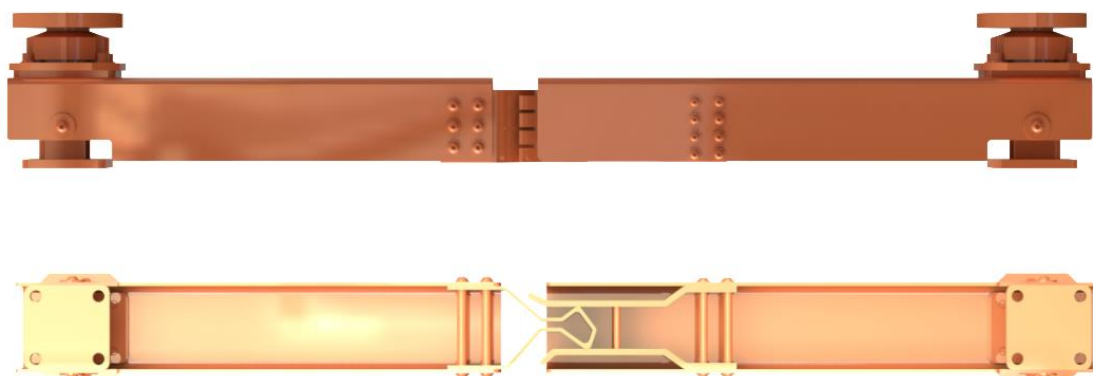
Obr. 4.4 Kontaktní hlavice



Obr. 4.5 Kontaktní palec

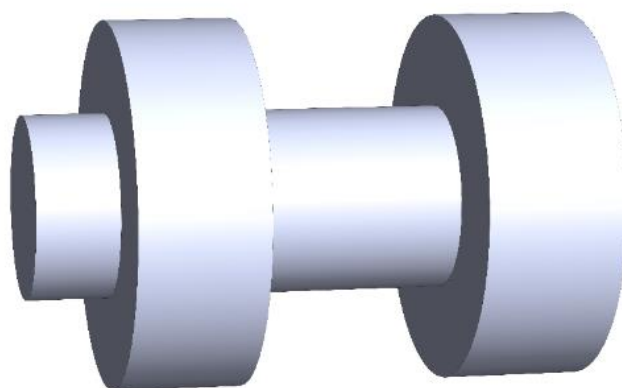
Na Obr. 4.5 můžete vidět, že i kontaktní palec je vyztužený. Toto vyztužení je velmi důležité ve spodní části ramene, kde by mohl nastat problém v důsledku dynamických sil průchozího proudu. Palce jsou v modelu celkem čtyři – jednak z důvodu snížení stykových ploch kontaktů a jednak proto, že jsou u odpojovače využívány jako pružný kontakt, který se roztáhne při připojování hlavice. Z tohoto důvodu jsou též palce na jedné straně delší a na druhé kratší.

Nyní se můžeme podívat na Obr. 4.6, kde je zobrazena soustava obou ramen čili kompletní model. Důležité je zmínit, že jako skoro reálný model obsahuje i reálné modely šroubů, což se ukázalo jako zásadní problém při tvorbě výpočetního modelu.

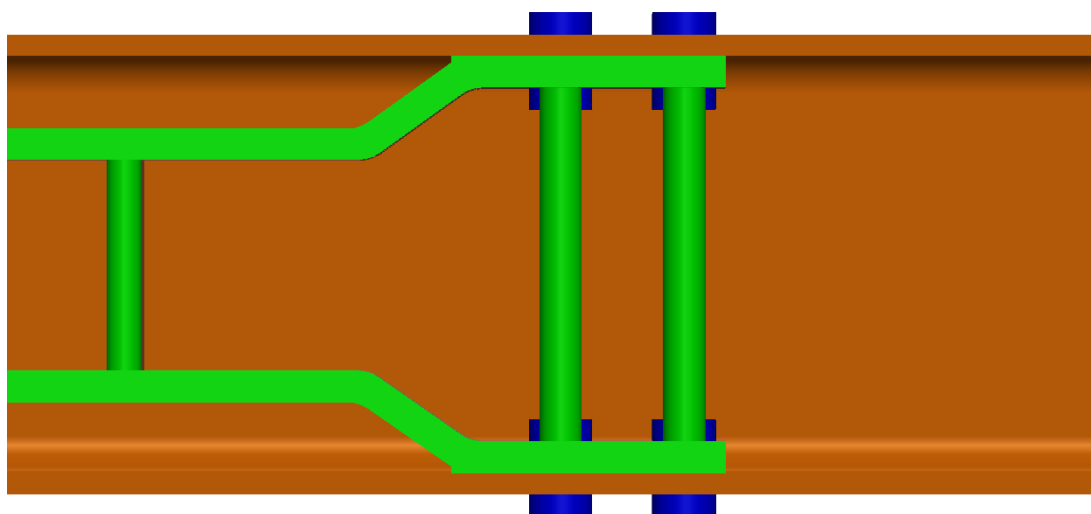


Obr. 4.6 Přední a spodní pohled na původní kompletní model

Dalším problémem tohoto modelu byly tangenciálně se sbíhající hrany a plochy některých dílů. Ač model zachycoval řadu detailů, bylo nutné ho pro simulaci převést do mírně zjednodušené, ale i tak velmi přesné podoby. Všechny matice a hlavy šroubů byly zjednodušeny. Nejideálnější se ukázalo vytvořit válcový objem o rozměrech zmiňovaných částí, úpravy je možné vidět na Obr. 4.7. A samozřejmě bylo také nutné zamezit tangenciálnímu přiblížení hran. Toho lze docílit např. u propojení palců a ramene tím, že zaoblení, které se blížilo k rameni, zanedbáme a budeme uvažovat kvádrovitý objem (tuto úpravu můžete vidět na Obr. 4.8).

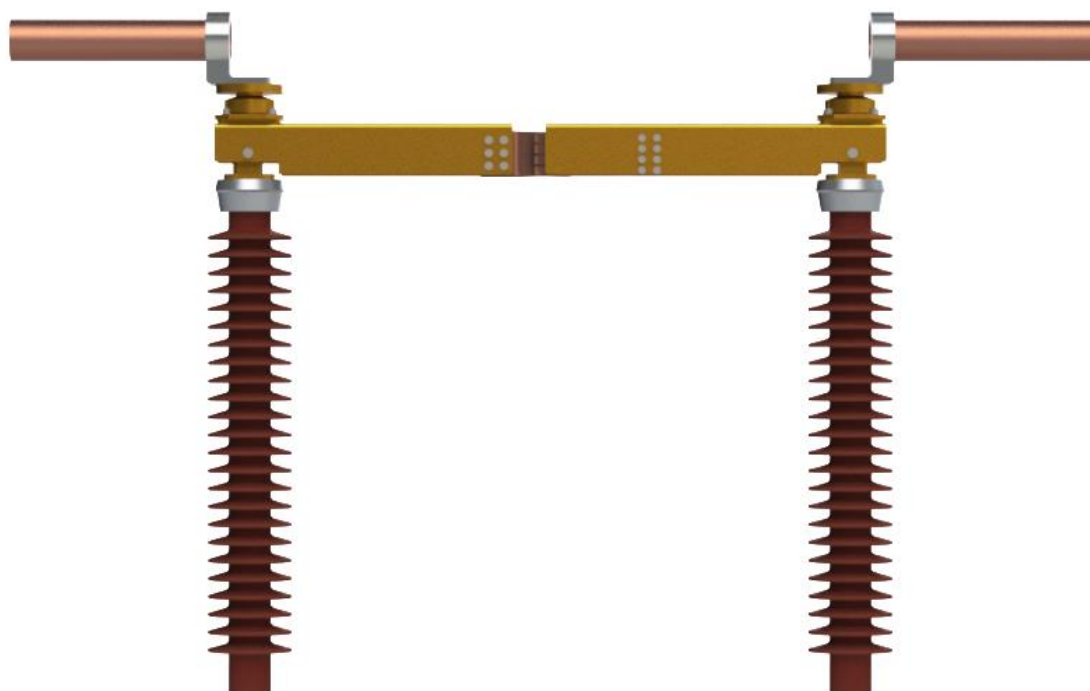


Obr. 4.7 Upravený model šroubu



Obr. 4.8 Upravené propojení palců a ramene

Tento model již byl využit pro testování v rámci úvodních simulací. Tato simulace prokázala, že model lze převést na výpočetní a lze jej simulovat, nicméně pouze se zadáním Jouleových ztrát v jednotlivých dílech modelu. Z tohoto důvodu jsme se rozhodli po konzultaci s vedoucím práce přidat do modelu přívody a přívodní svorky, aby se simulace přiblížila co nejvíce reálné situaci. Dále byly přidány také izolátory, které ovlivní proudění vzduchu ve spodní části modelu. Výsledný model je znázorněný na Obr. 4.9



Obr. 4.9 Finální model odpojovače

4.3 Výpočetní model

Tvorba tohoto modelu slouží k přípravě výše zmíněného geometrického modelu k následné simulaci. Pro simulaci i tvorbu výpočetního modelu jsem využil program Ansys Fluent, který je uzpůsobený pro simulování požadovaného přirozeného i nuceného proudění vzduchu. Fluent je rozdělený na dva subprogramy: Fluent-meshing a Fluent-solution. Pro přípravu výpočetního modelu se používá Fluent-meshing.

4.3.1 Příprava výpočetní sítě

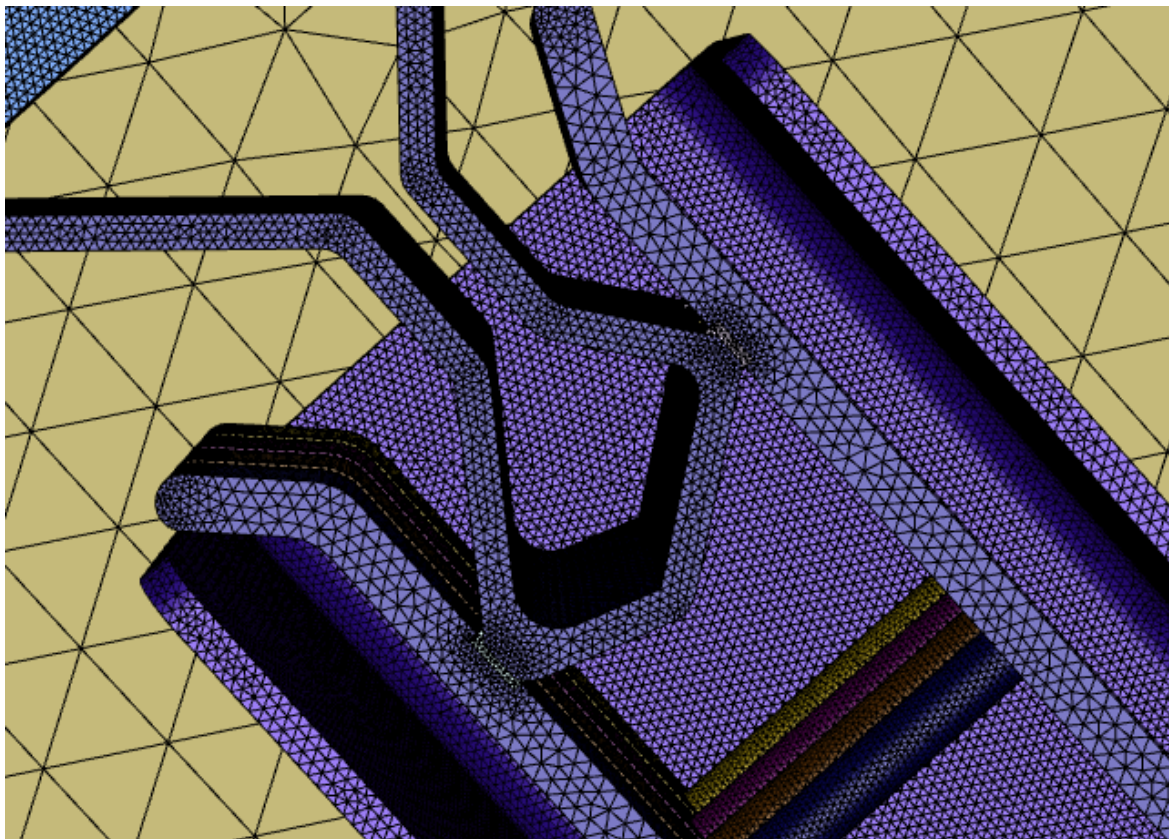
Fluent-meshing slouží k tvorbě výpočetní sítě modelu, nicméně – jak se ukázalo – bylo nutné model z programu SolidWorks náležitě upravit, jelikož při načtení do meshingu se projevila nedostatkost tohoto programu pro propojení jednotlivých dílů v sestavě. Solidworks je určen pro tvorbu CAD geometrických modelů, ale ne vždy korektně respektuje pro výpočty nezbytné propojení všech ploch a hran modelu, které na sebe navazují. Pro tvorbu výpočetní sítě je toto velmi zásadní. Pro tyto úpravy bylo nejvhodnější využít program Ansys SpaceClaim, který je uzpůsobený pro přípravu geometrických modelů pro výpočty. V tomto programu byla též vytvořena objemová obálka tvořící ve výpočetním modelu okolní prostředí odpojovače.

Program Fluent využívá k výpočtům metodu konečných objemů, která vyžaduje diskretizaci modelu výpočetní sítí. Pod tímto výrazem si můžeme představit rozdělení modelu na síť malých buněk, které tvoří model a jeho okolí.

Pro soubory typu CAD existují dva druhy importování do programu Fluent-meshing: CAD Faceting a CFD SurfaceMesh. Obě tyto metody vytvoří povrchovou síť na jednotlivých stěnách modelu a pro tvorbu sítě využívají technologii triangulace, tedy tvoří síť z trojúhelníků.

CFD SurfaceMesh je finální metoda pro importování modelů do programu Fluent, tato metoda umožňuje mnoho nastavení pro tvorbu povrchové sítě, a těmito parametry lze tedy i ovlivnit kvalitu výsledné objemové sítě. Mezi nejdůležitější parametry patří minimální a maximální velikost buněk, Growth Rate, curvate a proximity. První tři parametry přímo ovlivňují velikosti buněk. Všechny jsou velmi důležité z hlediska kvality sítě a její hustoty. Minimální velikost buněk se odvíjí od nejnižších rozměrů v modelu a bude vždy nižší než tato hodnota, maximální velikost určíme z důvodu omezení velikosti buněk, což se hodí hlavně na okraji okolního prostředí, kde nepotřebujeme tak přesné výpočty a můžete si ušetřit mnoho výpočetní paměti omezením počtu buněk jejich velikostí. Growth rate ovlivňuje křivku nárůstu mezi nejnižší velikostí buněk a tou nejvyšší. Parametrem curvature, nastavujeme úhel lomu na zaoblených a různých jinak kulatých plochách, kde se pomocí tohoto parametru výpočetní síť zahustí. Proximita je dalším velmi důležitým parametrem, který slouží k nastavení počtu buněk u tenkých stěn či mezer a umožňuje volbu buď mezi hranami či stěnami, nebo obojím. Toto je velmi důležité z hlediska přesnosti výpočtů, například u stěny odpojovačů, či kontaktů, kde je pro nás přesnost výpočtů nejdůležitější, a proto potřebujeme, aby v průřezu tohoto objemu bylo vytvořeno více vrstev buněk než jedna.

Na Obr. 4.10 si můžete všimnout zmiňovaného zhuštění sítě na stěnách odpojovače, (zbarveno fialově), kde buňka měří přibližně dva milimetry, a na stěně okolního prostředí, kde měří buňka sedmdesát devět milimetrů. Také je zde vidět uplatnění proximity i curvature. Po vytvoření povrchové sítě je důležité zkontrolovat si její kvalitu, která se ve Fluentu měří podle tzv. skewness; to nabývá hodnot mezi nulou znamenající nejvyšší kvalitu a jedničkou znamenající nejhorší kvalitu. Nejhorší doporučovanou kvalitou povrchové sítě je hodnota 0.97. Do této hodnoty je možné síť využít pro tvorbu objemové sítě.



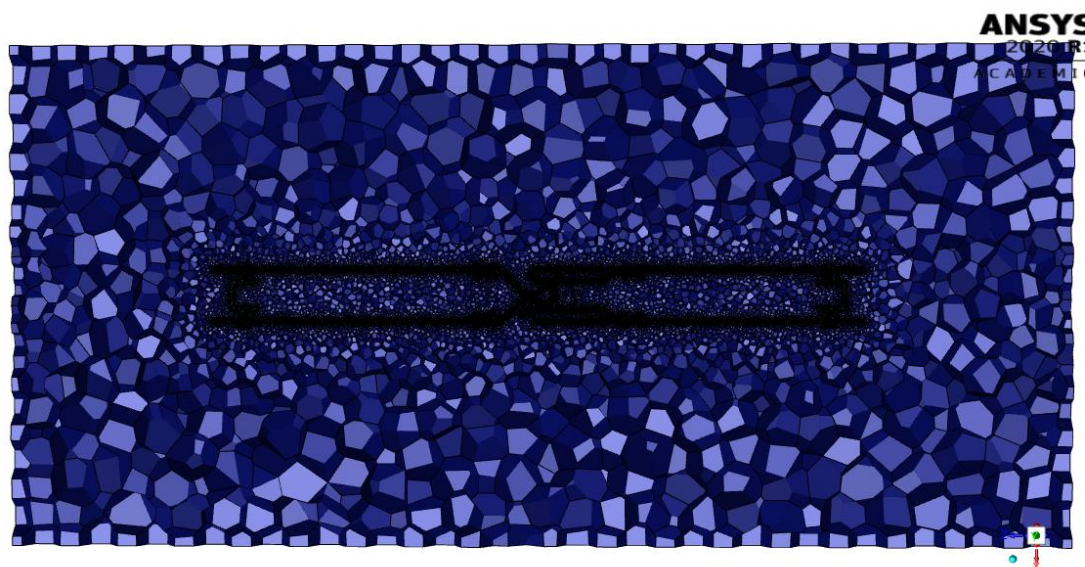
Obr. 4.10 Detail povrchové sítě

Kvalita sítě se nejlépe ovlivňuje nastavením výše zmíněných parametrů při importu, nicméně v menším měřítku lze kvalitu sítě upravit i po načtení pomocí integrovaných nástrojů programu. Povrchová síť na Obr. 4.10 dosahuje skewness 0.59, což je velmi dobrá až výborná kvalita sítě.

Před samotnou tvorbou objemové sítě a výpočtem objemových regionů je důležité definovat a pojmenovat jednotlivé potřebné okrajové podmínky. V případě mého modelu jsem využil tři typů okrajových podmínek a to pressure-inlet, pressure-outlet a wall. První dva zmiňované slouží jako vstup a výstup vzduchu na okrajích prostředí odpojovače a všechny ostatní prvky jsou nastaveny jako stěny. Dále také není od věci pojmenovat si jednotlivé části modelu, jelikož importované názvy jsou vcelku nepřehledné. Pokud máme nastavené okrajové podmínky, je možné pokračovat výpočtem jednotlivých objemových zón modelu, které jsou v modelu povrchové sítě. Tato část je velmi důležitá z hlediska nastavení typu regionu, tato nastavení jsou v programu celkem tři: pevné těleso, tekutina a tzv. mrtvá zóna. V mém modelu jsem využil všechny tři typy a rozdělení je naprosto logické; všechny prvky odpojovače kromě izolátorů jsou pevná tělesa a okolí je tekutina. Izolátory jsem se rozhodl

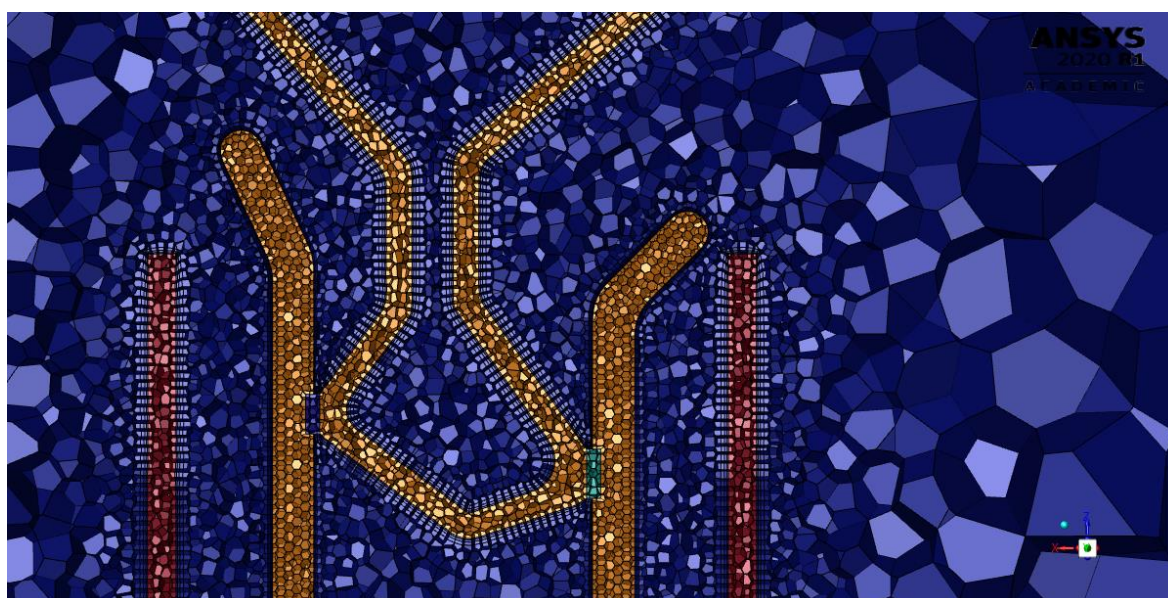
nastavit jako mrtvou zónu. Toto nastavení umožní, že se v izolátorech nevytvoří výpočetní síť, ale při výpočtu se nadále bude uplatňovat jejich vnější tvar jako překážka pro proudící vzduch. Důvodem pro odstranění sítě z izolátorů je jejich téměř nulová účast na sdílení tepla v modelu. Další důležitou věcí je vyhledání prázdných objemů v modelu, tzn. prázdných prostor uzavřených stěnami modelu. V mém případě se jednalo např. o prostory pro vazelínu v otočném kloubu, či prostor ve zpevňovacích trubkách u kontaktů. Tyto prostory je dobré si označit pro nastavení vhodných materiálových vlastností pro řešení.

Po všech předchozích přípravách je nyní možné přejít k nastavování a následné tvorbě objemové sítě modelu. V tvorbě objemové sítě je zase několik možností nastavení. Mezi základní možnosti patří výběr tvaru jednotlivých buněk. Můžeme volit mezi tetrami, což jsou trojúhelníkové čtyřstěny. Tento typ je velmi univerzální ale v poslední době bývá nahrazován takzvanými polyhedry, které jsou tvořeny prostorovými mnohoúhelníky. Výhodou je snížení počtu elementů při zachování přesnosti a nižší citlivost na směr proudění. Pro polyhedry je dále také možné nastavit jejich growth rate, který má stejný význam jako při importování povrchové sítě, velikosti buněk jsou totiž přímo odvozené od minimální a maximální velikosti buněk povrchové sítě. Dalším velmi užitečným a pro simulaci proudění žadáným nástrojem programu Fluent jsou tzv. prismy neboli síťová vrstva na povrchu stěn. Jde o vytvořenou vrstvu nezávislé sítě na povrchu stěn odpojovače rostoucí směrem do okolního prostředí. Tyto prismy vytváří jemnou přechodovou vrstvu elementů pro simulaci přechodu přenosu tepla z vedení na proudění. Vrstva velmi upřesňuje výpočty reálného proudění. Tuto vrstvu můžete vidět na Obr. 4.12 a Obr. 4.10 i s objemovou sítí v oblasti kontaktů. Řez celé objemové sítě je znázorněný na Obr. 4.11, kde si můžete všimnout výrazného zahuštění buněk v okolí odpojovače a jejich výrazný nárůst ke stěnám prostředí.



Obr 4.11 Řez objemové sítě

Kvalita této sítě je stejně jako v případě povrchové měřena pomocí skewness, horní limit je v obou případech totožný. Zásadním faktorem dobré kvality objemové sítě je kvalitní povrchová síť, ale také zde existují nástroje pro následné vylepšení sítě. Po tvorbě mé sítě jsem se dostal i s velmi kvalitní povrchovou sítí na skewness 0.9, jež se mi pomocí tohoto nástroje povedlo zlepšit na hodnotu 0.7, která už je velmi příznivá pro výpočty.



Obr. 4.12 Detail řezu objemové sítě

4.3.2 Nastavení výpočtů

Po dokončení objemové sítě je možné přejít do subprogramu Fluent-solution, kde je nutné před samotnou simulací do-určit matematický model. Mezi základní parametry simulace patří:

- Matematické modely
- Materiály
- Okrajové podmínky
- Tepelné zdroje

Primárním cílem diplomové práce je simulace přirozeného proudění a výpočet oteplení. Nicméně z důvodu napodobení přirozených podmínek jsem se rozhodl pro vytvoření pěti rozdílných simulací, kde jednou je simulace přirozeného proudění a dalšími jsou nucená proudění v osách X a Z, která přibližují působení slabého větru. Pro porovnání vlivu tohoto nuceného proudění bylo využito v simulaci dvou různých rychlostí pro proudění v každé ose.

4.3.2.1 Matematický model

Základní matematický model, který program Fluent zahrnuje, řeší pro proudění diferenciální rovnice zmíněné v kapitole 1.2. Pro zahrnutí fyzikálních jevů řešené úlohy, bylo pro výpočet důležité zahrnout do simulace následující rovnice:

- Rovnice energetické bilance
- Model turbulence
- Model elektrického potenciálu

Zahrnutí energetické rovnice je základem úspěšného řešení teplotního pole a turbulence proudění.

Jako model turbulence byl v mé simulaci využit model SST k-omega. Tento model slouží k zavedení rovnic turbulence tekutiny do simulace.

Model elektrického potenciálu umožňuje uživateli zavedení rovnice elektrického pole do simulace. Díky tomuto modelu je možné zadání proudové hustoty protékaného proudu zařízením. Tím lze simulovat reálné rozložení proudu a také jeho reálné ztráty.

4.3.2.2 Materiály

Základní rozdělení materiálů v tomto programu je na:

- Fluid (Tekutiny)
- Solid (Pevné materiály)

Jedinou použitou tekutinou v mé simulaci je vzduch, který je použit jako okolní prostředí odpojovače. Pro zlepšení výsledků simulace je dobré upřesnit vlastnosti tohoto vzduchu. K základnímu nastavení parametrů patří: hustota, tepelná kapacita, tepelná vodivost, viskozita, molekulární hmotnost a elektrická vodivost. Jako nastavení hustoty jsem využil ideální nestlačitelný vzduch přednastavený v programu. Měrná tepelná kapacita, tepelná vodivost a dynamická viskozita byly nastaveny podle Tab. 4.2. Molekulární hmotnost a elektrická vodivost byly zadány jako konstanty přednastavené programem.

Tab. 4.2 Použité parametry vzduchu podle [11]

t [°C]	Měrná tepelná kapacita c	Tepelná vodivost λ	Dynamická viskozita μ
0	1006	2,37	17,2
40	1013	2,65	19,2
100	1022	3,07	21,8
180	1034	3,57	25
200	1037	3,7	25,9
300	1049	4,29	29,7
400	1059	4,81	33

Použité pevné materiály jsou hliník, měď, ocel a doplňkovými pevnými materiály jsou měď s nízkou elektrickou vodivostí a pevný vzduch. Doplňkové materiály byly dodatečně

vytvořeny z důvodu zaručení vlastností určitých oblastí. Těmito oblastmi jsou kluzné kontakty a objemy v dutinách rozpěr ramen či dutinách v kontaktní hlavici. Pro kluzné kontakty, které nedokáží zaručit stálý průchod proudu, bylo nutné využít měď se sníženou vodivostí pro zajištění průchodu proudu skrz kuželíkové ložisko. A pro vyplnění dutin byl využit pevný vzduch, tj. pevný materiál s parametry vzduchu. Proudění uvnitř těchto dutin nemělo význam uvažovat.

Hliník, ocel a měď – jako nejdůležitější materiály bylo nutné pro přesnost simulace do – definovat. V základním nastavení je elektrická vodivost těchto materiálů konstantní, v mé simulaci byla přidána teplotní závislost elektrické vodivosti podle Tab. 4.3.

Tab. 4.3 Parametry pevných materiálů podle [12]

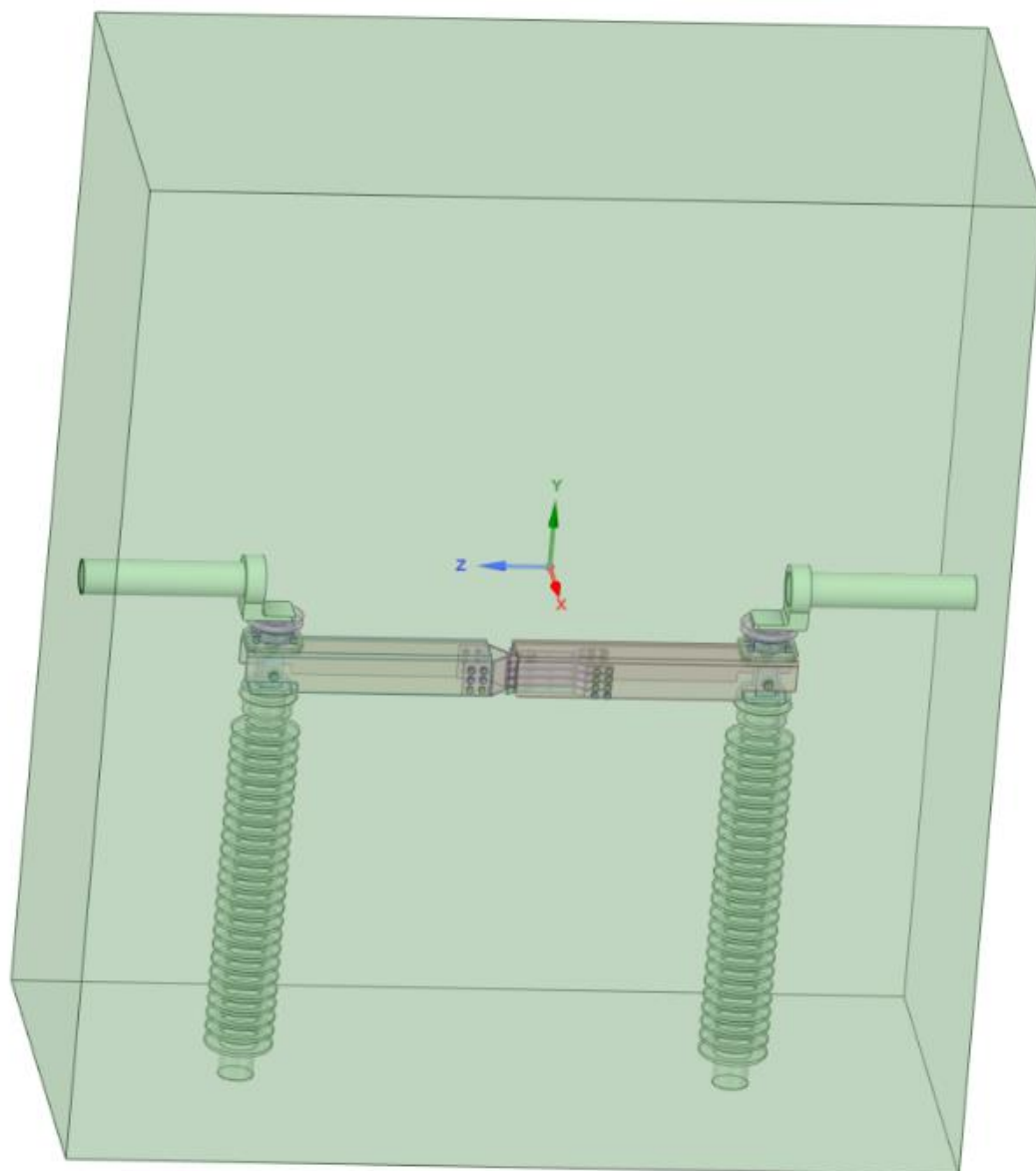
t	Elektrická vodivost γ (s/m)		
	Al	Cu	Fe
20	$3,77 \cdot 10^7$	$5,95 \cdot 10^7$	$1,03 \cdot 10^7$
200	$2,13 \cdot 10^7$	$3,51 \cdot 10^7$	$4,74 \cdot 10^6$

4.3.2.3 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky je nutné rozdělit na tři případy: přirozené proudění, nucené proudění v ose X a nucené proudění v ose Z. V mé simulaci byly využity tři typy okrajových podmínek, a to tlakový výstup, tlakový vstup a rychlostní vstup. Rozdílem mezi jednotlivými případy je volba jednotlivých typů okrajových podmínek na stěnách vnější oblasti a také hodnota rychlosti na vstupu při uvažovaném nuceném proudění.

Teplota okolního vzduchu byla nastavena na 40 °C, která je normou stanovena jako nejnepříznivější případ pro normální prostředí.

Na Obr 4.13 je zobrazena celá výpočetní oblast z předního pohledu. Na jejích stěnách se zadávají okrajové podmínky. Stěny jsou označeny takto: přední, levá, zadní, pravá, spodní a horní. Toto označení je důležité z důvodu popisu okrajových podmínek v jednotlivých případech.



Obr 4.13 Obálka prostředí odpojovače

1. V případě přirozeného proudění je rozdělení okrajových podmínek následující: spodní stěna je nastavena jako tlakový vstup a ostatní stěny jsou nastaveny jako tlakové výstupy.
2. V případě nuceného proudění v ose X je jako rychlostní vstup nastavena zadní stěna a ostatní stěny jsou tlakové výstupy.

2.1. Nucené proudění v ose X o vstupní rychlosti 0,25 m/s

- 2.2. Nucené proudění v ose X o vstupní rychlosti 0,5 m/s
3. U nuceného proudění ve směru osy Z je jako rychlostní vstup nastavena stěna levá a ostatní stěny jsou jako u ostatních případů nastaveny na tlakové výstupy.
 - 3.1. Nucené proudění v ose Z o vstupní rychlosti 0,25 m/s
 - 3.2. Nucené proudění v ose Z o vstupní rychlosti 0,5 m/s

4.3.2.4 Tepelné zdroje

Pro zadání zdrojů tepla jsem využil v simulaci dvou způsobů: Jouelovy ztráty vypočtené modelem elektrického proudového pole pro zadanou hodnotu průchozího proudu a také přímé zadání tepelných ztrát v objemu.

Elektrický proud použitý pro simulaci Joulových ztrát byl nastaven na jmenovitou hodnotu 2000 A. Hodnota proudové hustoty reprezentující jmenovitý proud na přívodním vodiči tak byla 1128978.5 A/m^2 . Tímto způsobem je dosaženo reálné rozložení proudové hustoty v objemu odpojovače.

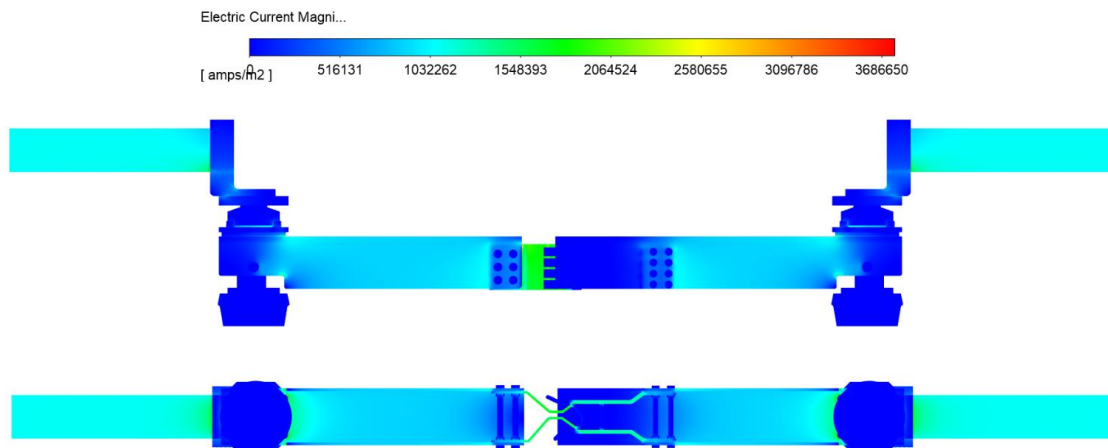
Druhý způsob byl využit pro respektování stykového odporu u kontaktů a na kuželíkových ložiscích. Hodnota ztrát v jednotlivých kontaktech byla definována hodnotami 9983672 w/m^3 a hodnota v každém ložisku 251495 w/m^3 .

Zadáním všech výše zmíněných parametrů byl model připravený k simulaci. Správnost výsledků simulace je možné hodnotit dle parametrů konvergence tzv. reziduí a zároveň sledováním ustalování počítaných veličin. Všechny výpočty byly řešeny jako stacionární úlohy.

5 Výsledky simulace

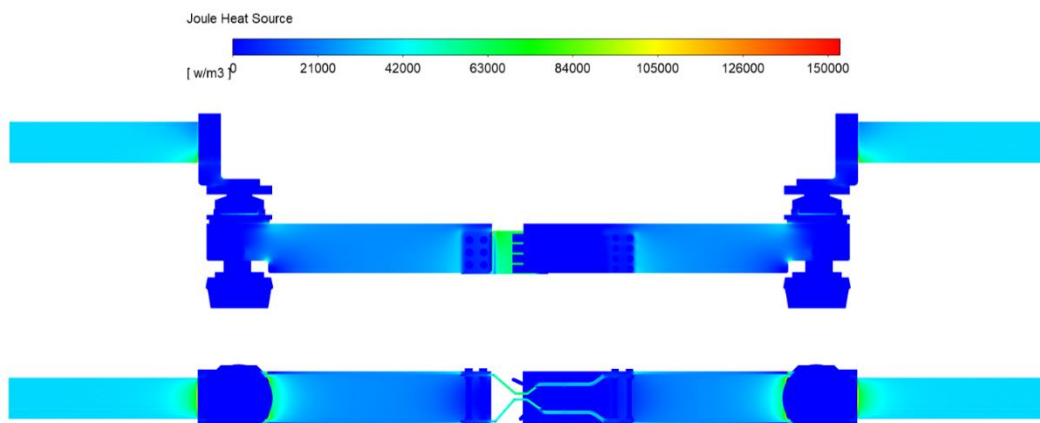
Rozložení proudové hustoty odpovídající jmenovitému proudu je zobrazeno na Obr. 5.1, kde je patrné zatížení jednotlivých částí proudové dráhy. Nejvyšších hodnot nabývá proudová hustota podle očekávání v místě kontaktů z důvodu snížení průřezu proudové dráhy. Naopak nejnižších hodnot nabývá v konstrukčních částech mimo hlavní tok proudu,

kde její hodnota klesá až k nule. Rozložení proudové hustoty na Obr. 5.1 je téměř stejné pro všechny tři případy simulací (přirozené proudění, nucené proudění v ose X, nucené proudění v ose Z), drobné odchylky mohly být vyvolány jen v důsledku teplotní závislosti rezistivity.



Obr. 5.1 Kontury proudové hustoty

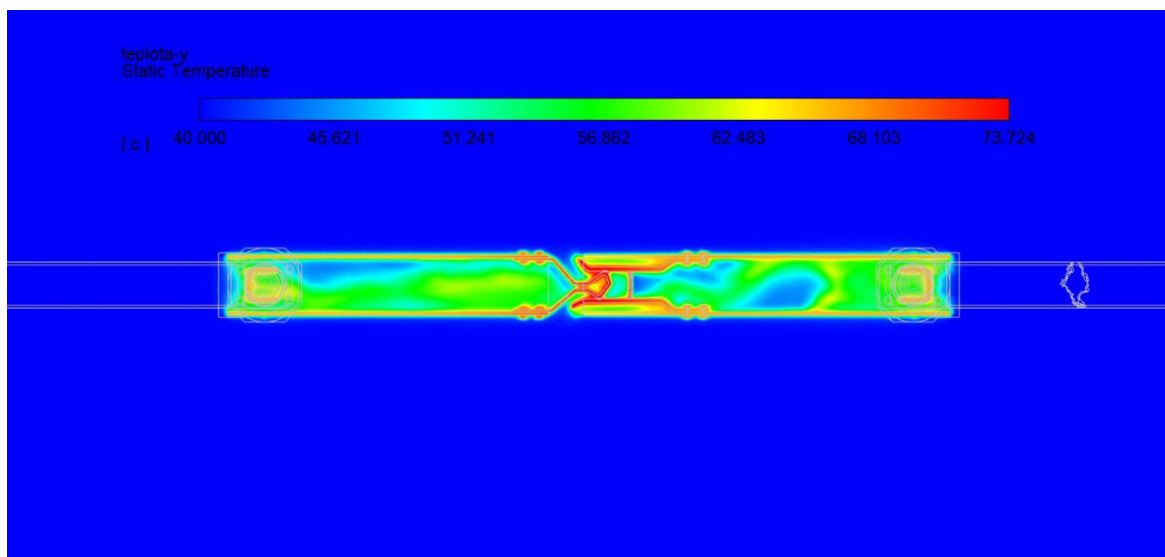
Na Obr. 5.2 je zobrazeno rozložení Joulových ztrát odpojovače. Ztráty korespondují s rozložením proudové hustoty a elektrické vodivosti. Obr. 5.1 s Obr. 5.2 jsou si tedy velice podobné.



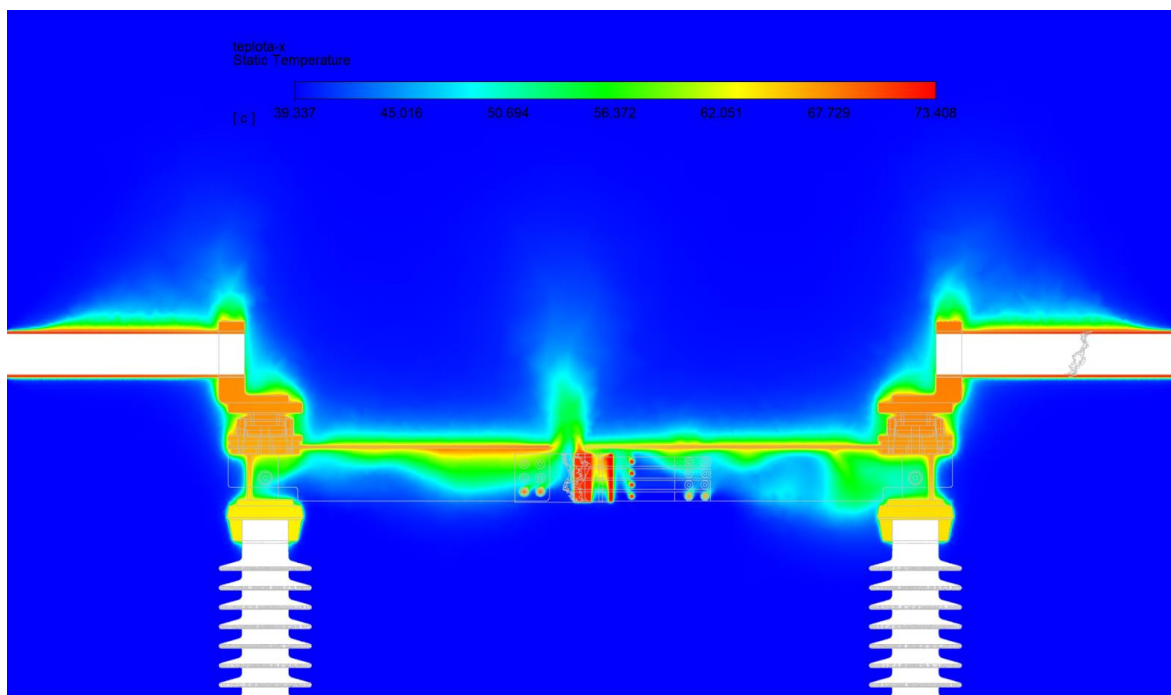
Obr. 5.2 Kontury Joulových ztrát

5.1 Přirozené proudění

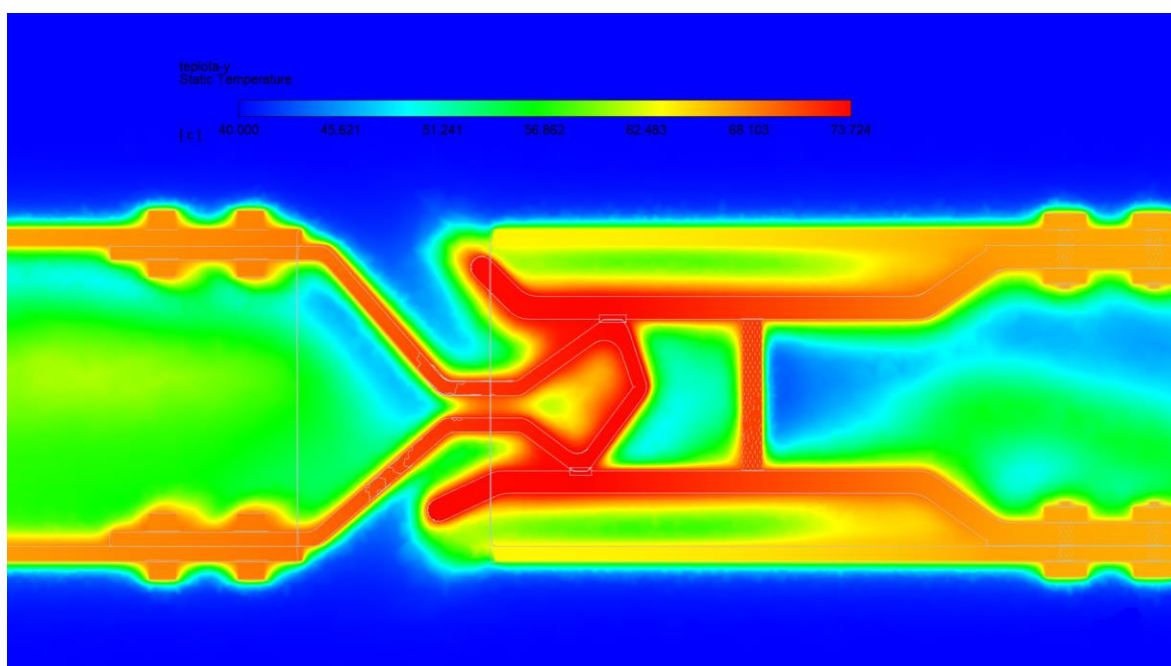
V případě této simulace bylo dosaženo ustáleného stavu po provedení 7500 iterací. Rozložení teplotního pole je vyobrazeno v řezech na Obr. 5.3, Obr. 5.4 a v detailu na Obr. 5.5. Na těchto obrázcích je patrné, že nejvyšších ustálených teplot dosahuje odpojovač – podle předpokladů – na kontaktech, kde je teplota velmi ovlivněna – navíc oproti jiným částem – stykovým odporem kontaktů. Na rozhraní kontaktů a ramene je zvýšená teplota ramen v obou případech; jedním z důvodů je šíření tepla z kontaktů a druhým zúžená cesta pro okolní vzduch. Na Obr. 5.4 je dále také vidět, kudy se šíří teplo do okolí. Nejvyšší podíl odchozího tepla je v mezeře mezi rameny, tedy přímo nad kontakty, další cestou jsou konce ramen, kde toto proudění nepatrně zvyšuje teplotu vodičů. Nutno podotknout, že odpojovač ovlivňuje teplotu okolí jen ve své bezprostřední blízkosti a minimálně. Nejchladnější částí odpojovače jsou podstavné nohy a příruby, kde nevznikají tepelné ztráty a jsou tedy pouze ohřívány od ostatních částí ramene. V dalších částech odpojovače jsou teploty téměř shodné a díky větší chladicí ploše vždy nižší než u kontaktů.



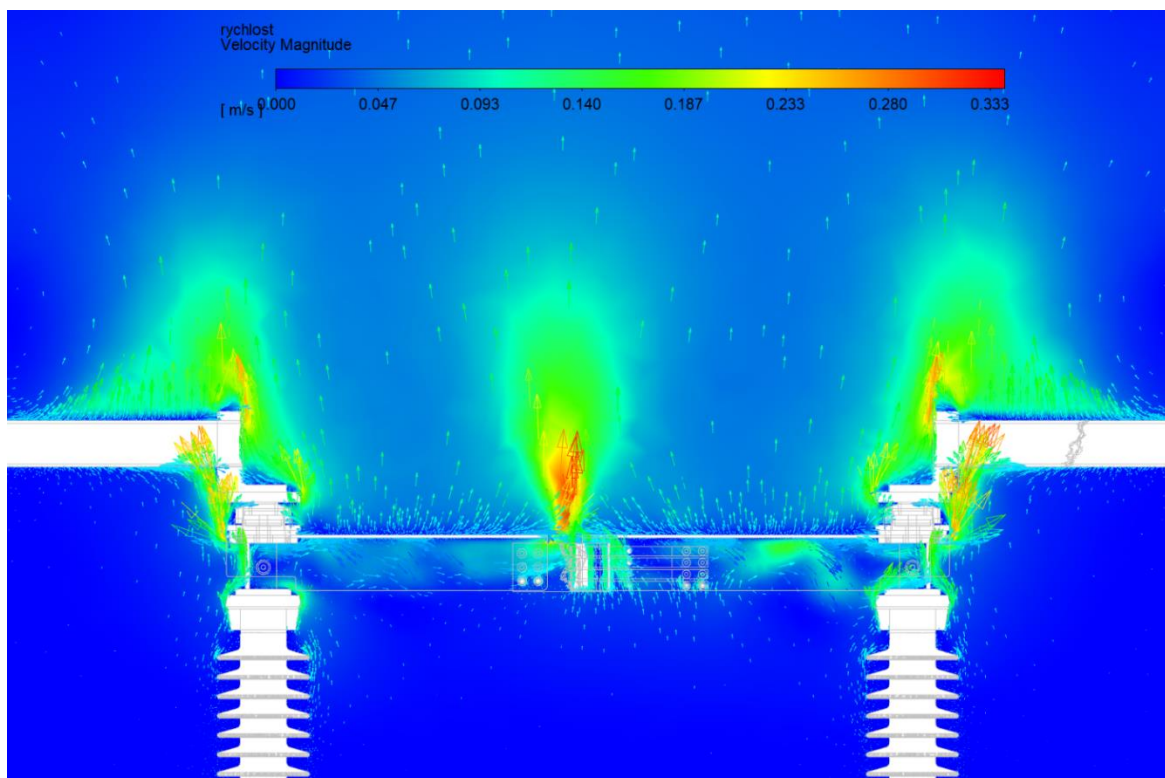
Obr. 5.3 Kontury teploty v řezu rovinou Y(°C)



Obr. 5.4 Kontury teploty v řezu rovinou X (°C)



Obr. 5.5 Kontury teploty detailu kontaktů (°C)



Obr. 5.6 Kontury a vektory rychlosti v řezu rovinou X (m/s)

Obr. 5.6 znázorňuje rozložení rychlostí proudícího vzduchu v řezu. Na obrázku je patrné, že při přirozeném proudění dochází k šíření otepleného vzduchu podle předpokladů směrem vzhůru. K nejvyššímu urychlení proudícího vzduchu dochází logicky z důvodu nejvyšší teploty v okolí kontaktů, toto zrychlení je patrné pouze v blízkosti odpojovače a se zvyšující se vzdáleností klesá. Dalšími místy výrazně přispívajícími k rychlosti proudění jsou okraje odpojovače, kudy odchází zbytek chladícího vzduchu. Vrchní plochy odpojovače svou teplotou přispívají k proudění pouze minimálně.

Tab. 5.1 Průměrné hodnoty teploty a oteplení

Název dílu	Průměrná teplota (°C)	Δt (K)
Stykový kontakt 7	73,6	33,6
Stykový kontakt 4	73,6	33,6
Stykový kontakt 6	73,5	33,5
Stykový kontakt 5	73,5	33,5
Stykový kontakt 8	73,4	33,4
Stykový kontakt 3	73,3	33,3
Stykový kontakt 1	73,2	33,2
Stykový kontakt 2	73,1	33,1
Pevný kontakt	70,6	30,6
Vodič odvod	70,5	30,5
Kontaktní palec 3	70,4	30,4
Kontaktní palec 4	70,4	30,4
Kontaktní palec 2	70,3	30,3
Vodič přívod	70,0	30,0
Kontaktní palec 1	69,6	29,6
Přívodní svorka pravá	68,3	28,3
Kluzný kontakt 1 pravý	68,0	28,0
Ložisko pravé	68,0	28,0
Přívodní svorka levá	67,8	27,8
Kontaktní hlavice pravá	67,7	27,7
Kluzný kontakt 1 levý	67,4	27,4
Ložisko levé	67,4	27,4
Kluzný kontakt 2 pravý	67,2	27,2
Kontaktní hlavice levá	67,2	27,2
Kluzný kontakt 2 levý	66,7	26,7
Rameno levé	66,4	26,4
Rameno pravé	66,1	26,1
Podstavná noha pravá	65,7	25,7
Podstavná noha levá	65,1	25,1
Příruba pravá	64,4	24,4
Příruba levá	63,8	23,8

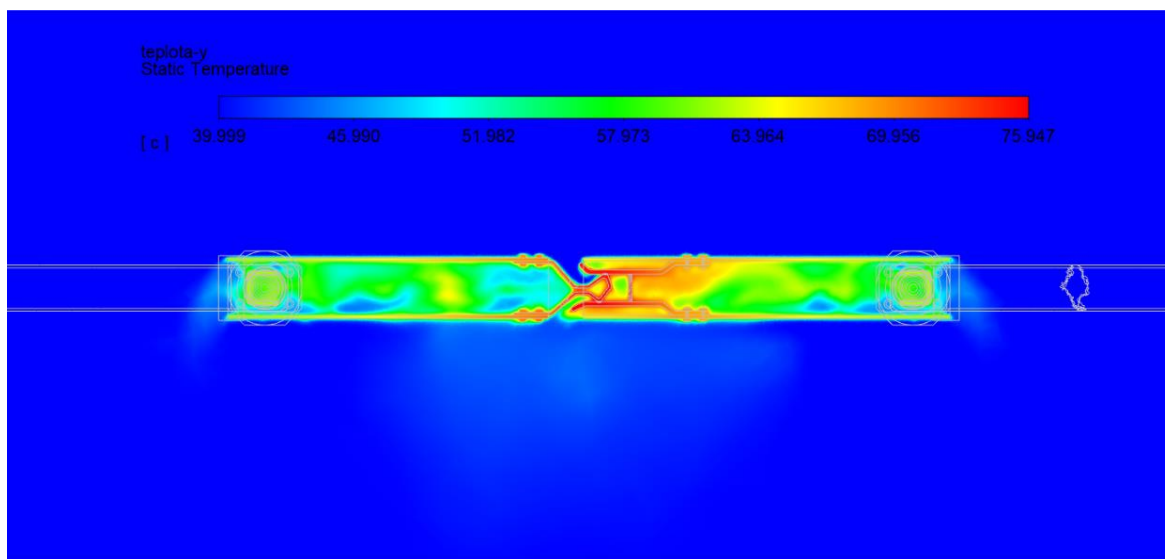
V Tab. 5.1 jsou zaznamenány průměrné teploty jednotlivých částí odpojovače a jejich oteplení vzhledem k okolnímu vzduchu. V této tabulce si můžete všimnout, že teplota všech součástí pravého ramene je nepatrně vyšší než u levého ramene. Tento problém bude důsledkem nižší teploty pevného kontaktu než jednotlivých palců, způsobené větší chladicí plochou a také lepším tvarem pro jednodušší průchod okolního vzduchu. U kontaktních palců je také vidět vliv jejich polohy v kontaktní hlavici na hodnoty jejich teploty. Palce jsou

číslovány od 1 do 4 ve směru od nejnižšího k nejvyššímu, kde je patrné, že nejnižší palec je nejlépe chlazený, a navíc přispívá k oteplení výše položených.

Oteplení odpojovače pro přirozené proudění dosáhlo nejvyšší hodnoty 31,1 K, kde tato hodnota je v souladu s normou a tím pádem odpojovač může fungovat bez problémů. V porovnání s ostatními výsledky dosahuje simulace přirozeného proudění nejhorších hodnot hned za nuceným prouděním v ose X o rychlosti 0,25 m/s.

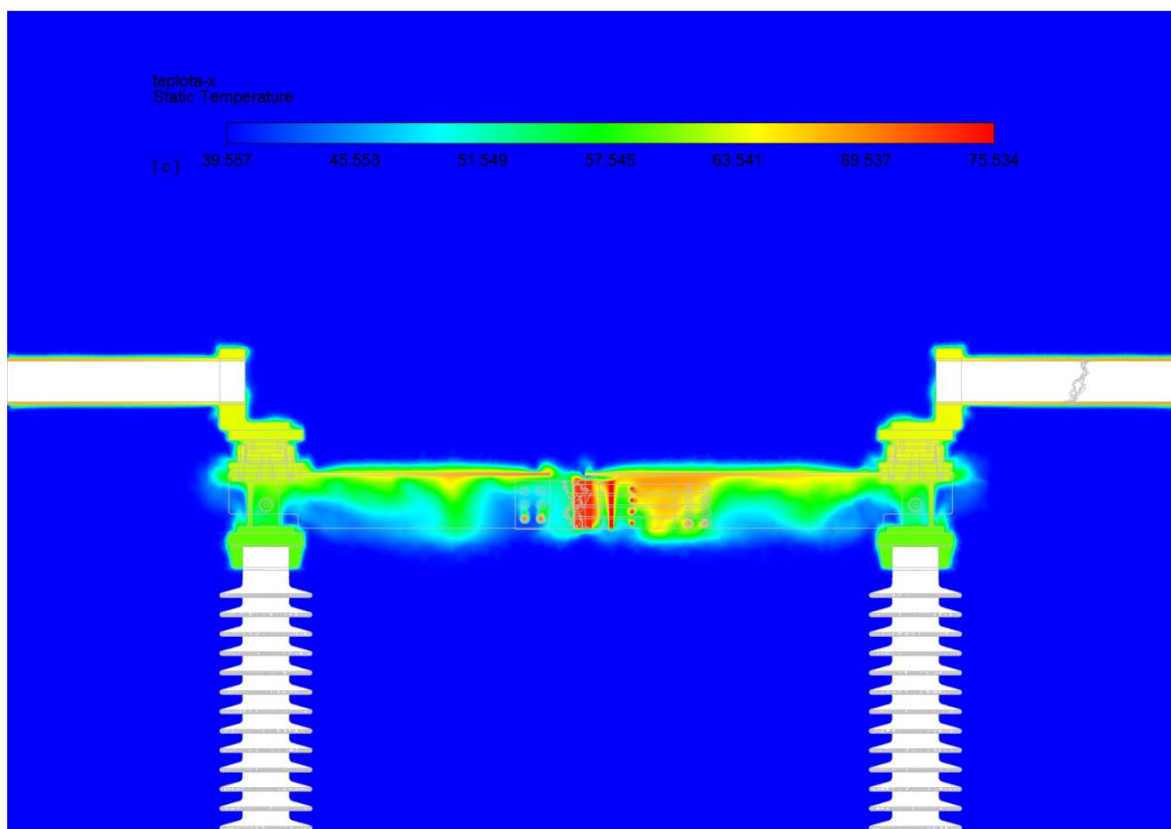
5.2 Nucené proudění v ose X-0.25 m/s

V důsledku nuceného proudění v ose X o rychlosti 0.25 m/s bylo v simulaci dosaženo vyšší teploty. Příčinou tohoto jevu je zhoršení proudění v okolí kontaktů. Na Obr. 5.7 je vidět také změna směru šíření teploty; teplota se nyní šíří ve směru nuceného proudění a nikoliv vzhůru, jako u přirozeného proudění.

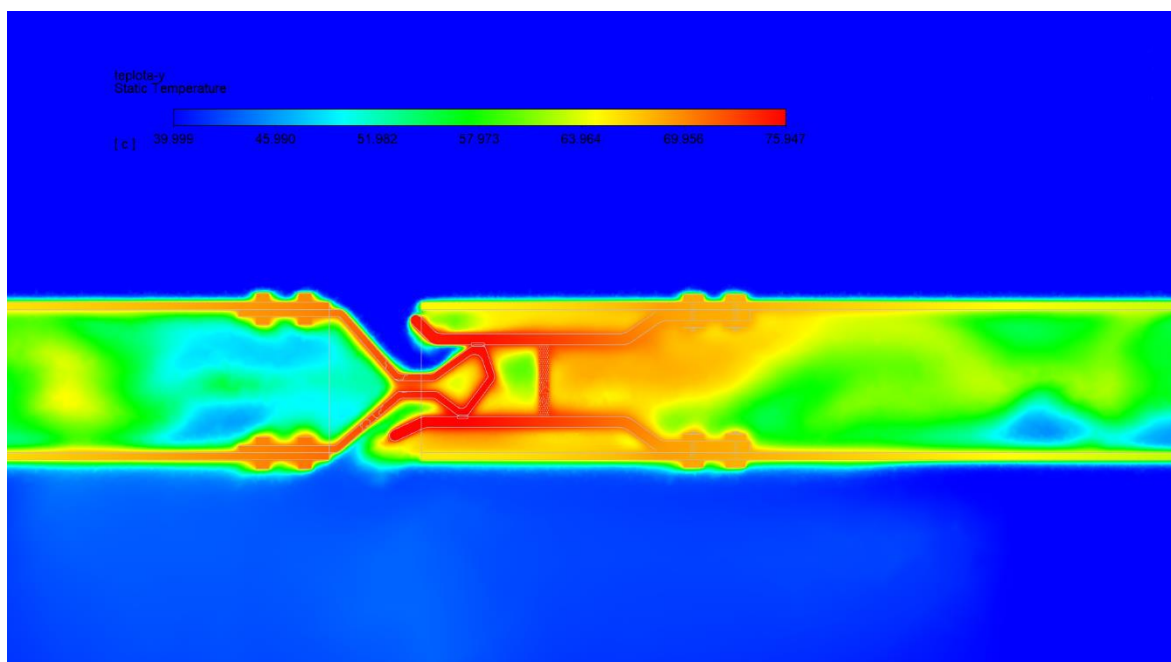


Obr. 5.7 Kontury teploty v řezu rovinou Y(°C)

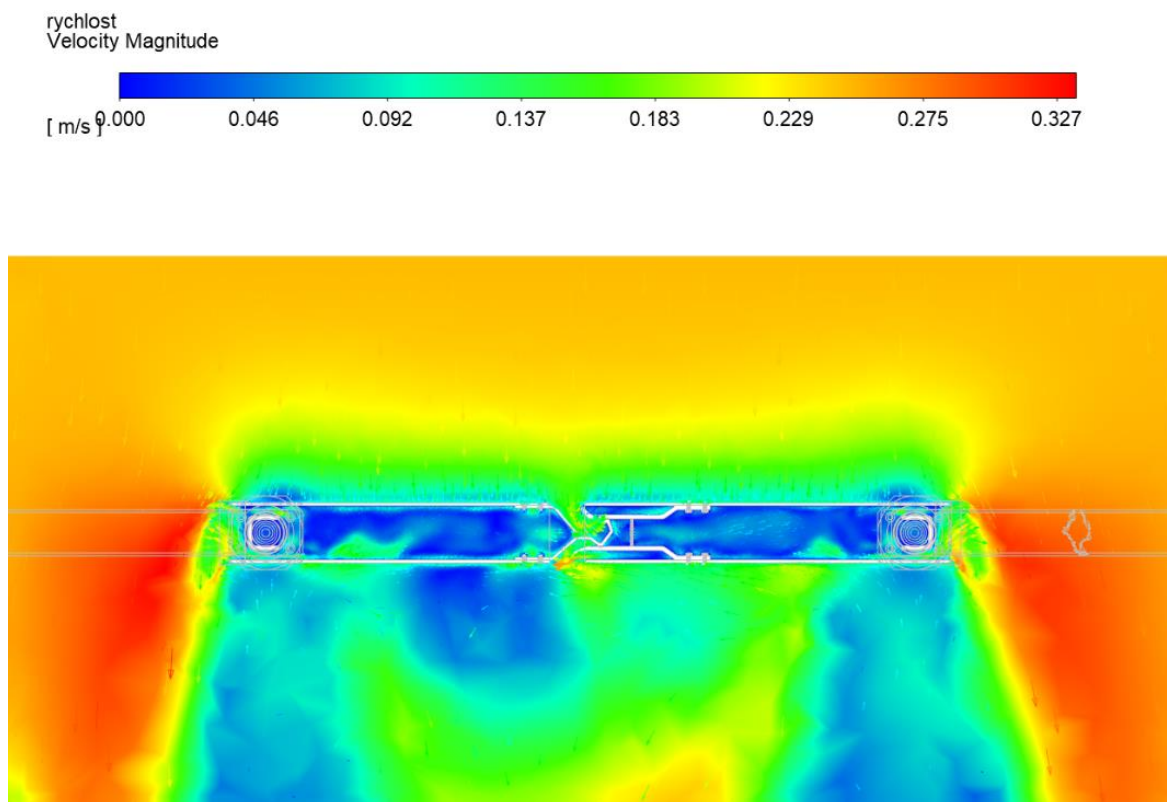
Na Obr. 5.8 a Obr. 5.9 je zobrazen průběh teplot ve stěnách odpojovače a jeho blízkém okolí. V detailu kontaktů je patrné, že se jedná o místo s nejvyšší teplotou a teplo se z nich šíří nejen do okolí, ale také pomocí vedení do ostatních částí odpojovače.



Obr. 5.8 Kontury teploty v řezu rovinou X (°C)



Obr. 5.9 Kontury teploty detailu kontaktů (°C)



Obr. 5.10 Kontury a vektory rychlosti v řezu rovinou $Y(m/s)$

Obr. 5.10 názorně zobrazuje rozložení rychlostí v okolí odpojovače, kde se v tomto případě vzduch nejvíce urychluje na okrajích odpojovače. V oblasti kontaktů je vzduch brzděn plochou ramene.

V Tab. 5.2 jsou zapsány hodnoty teplot a oteplení jednotlivých částí odpojovače seřazené od nejvyšší teploty. V této tabulce je také názorně vidět rozdíl rozložení teplot v jednotlivých částech odpojovače oproti kapitole 5.1.

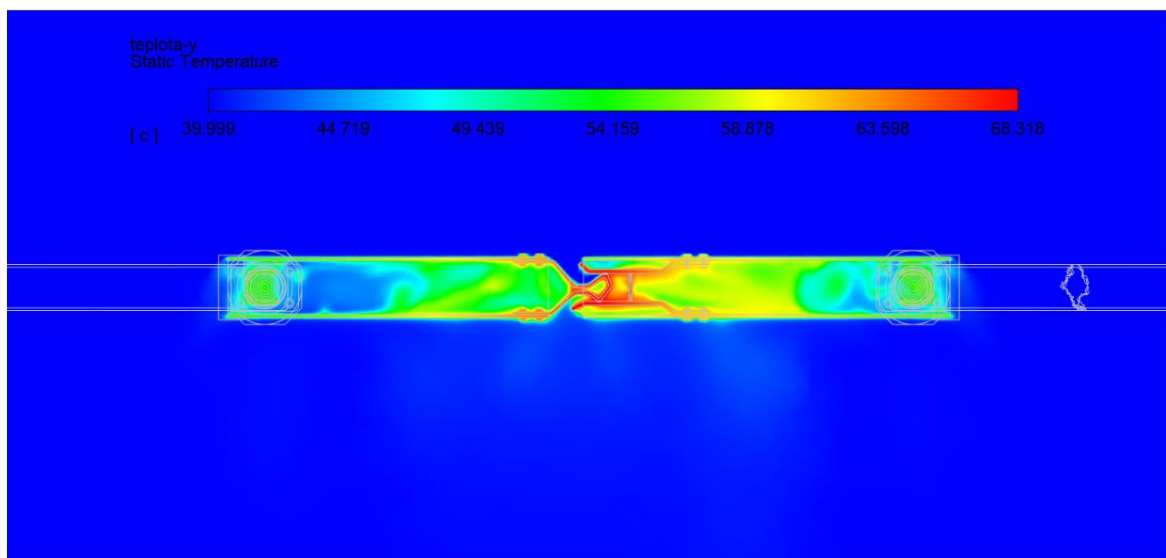
V porovnání s přirozeným prouděním se při nuceném proudění ve směru osy X nepatrně zhoršilo ochlazování odpojovače. Teplota narostla přibližně o $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, rychlost proudění se v tomto případě téměř nezměnila. Ač jsou hodnoty oteplení vyšší a dosahují maximální hodnoty $35,9\text{ K}$, jsou stále v normě. Tím pádem je odpojovač navržen správně. Hodnoty v této simulaci dosahují nejhorších výsledků z hlediska oteplení odpojovače.

Tab. 5.2 Průměrné hodnoty teploty a oteplení

Název dílu	Průměrná teplota (°C)	Δt (K)
Stykový kontakt 7	75,9	35,9
Stykový kontakt 4	75,9	35,9
Stykový kontakt 8	75,8	35,8
Stykový kontakt 1	75,6	35,6
Stykový kontakt 6	75,4	35,4
Stykový kontakt 5	75,4	35,4
Stykový kontakt 3	75,3	35,3
Stykový kontakt 2	75,2	35,2
Pevný kontakt	72,6	32,6
Kontaktní palec 3	72,4	32,4
Kontaktní palec 4	72,4	32,4
Kontaktní palec 2	72,4	32,4
Kontaktní palec 1	71,9	31,9
Vodič odvod	67,1	27,1
Vodič přívod	66,7	26,7
Rameno levé	65,9	25,9
Rameno pravé	65,8	25,8
Přívodní svorka pravá	64,4	24,4
Kluzný kontakt 1 pravý	64,1	24,1
Ložisko pravé	64,1	24,1
Přívodní svorka levá	64,1	24,1
Kontaktní hlavice pravá	63,8	23,8
Kluzný kontakt 1 levý	63,8	23,8
Ložisko levé	63,8	23,8
Kontaktní hlavice levá	63,5	23,5
Kluzný kontakt 2 pravý	63,4	23,4
Kluzný kontakt 2 levý	63,2	23,2
Podstavná noha pravá	61,8	21,8
Podstavná noha levá	61,6	21,6
Příruba pravá	60,4	20,4
Příruba levá	60,1	20,1

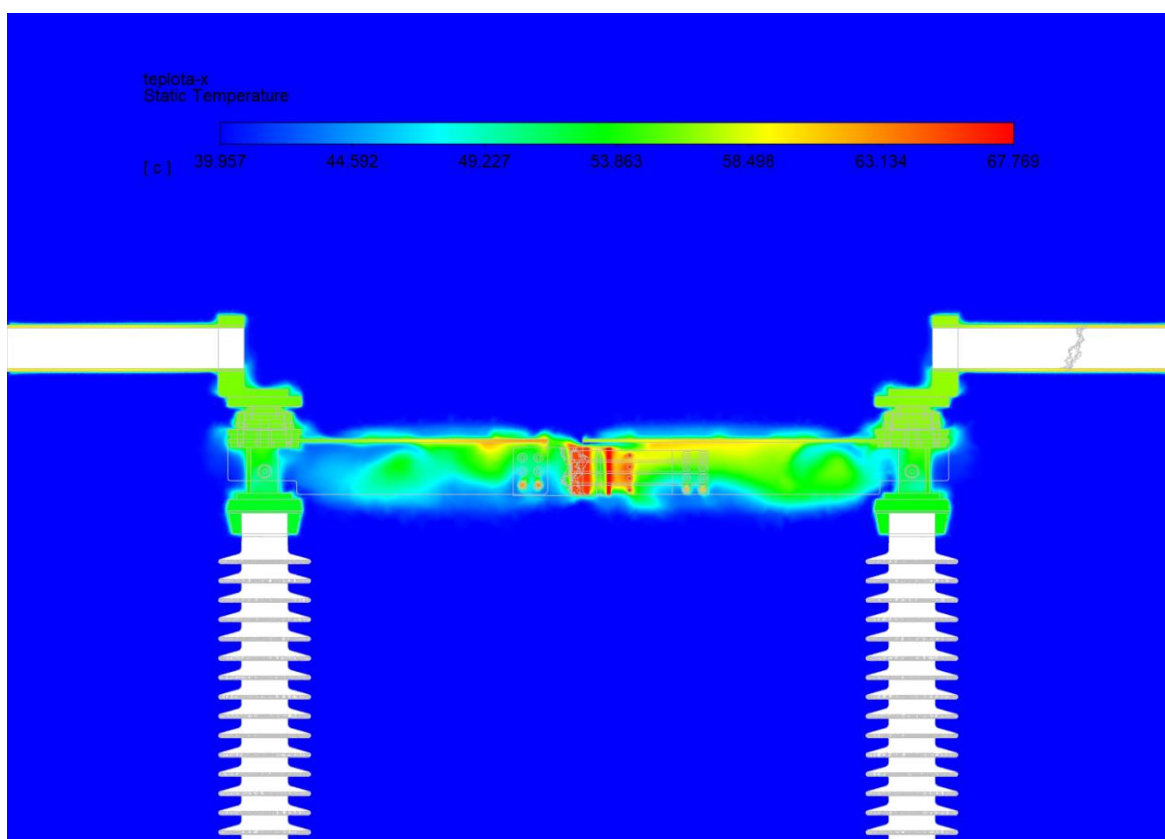
5.3 Nucené proudění v ose X-0.5 m/s

V případě nuceného proudění v ose X o rychlosti 0,5 m/s dosahuje maximální teplota odpojovače v simulaci 68,3 °C. Nižší teplota je důsledkem vyšší rychlosti nuceného proudění. Šíření tepla z odpojovače se v této simulaci shoduje principiálně s předchozím výpočtem v kapitole 5.2.

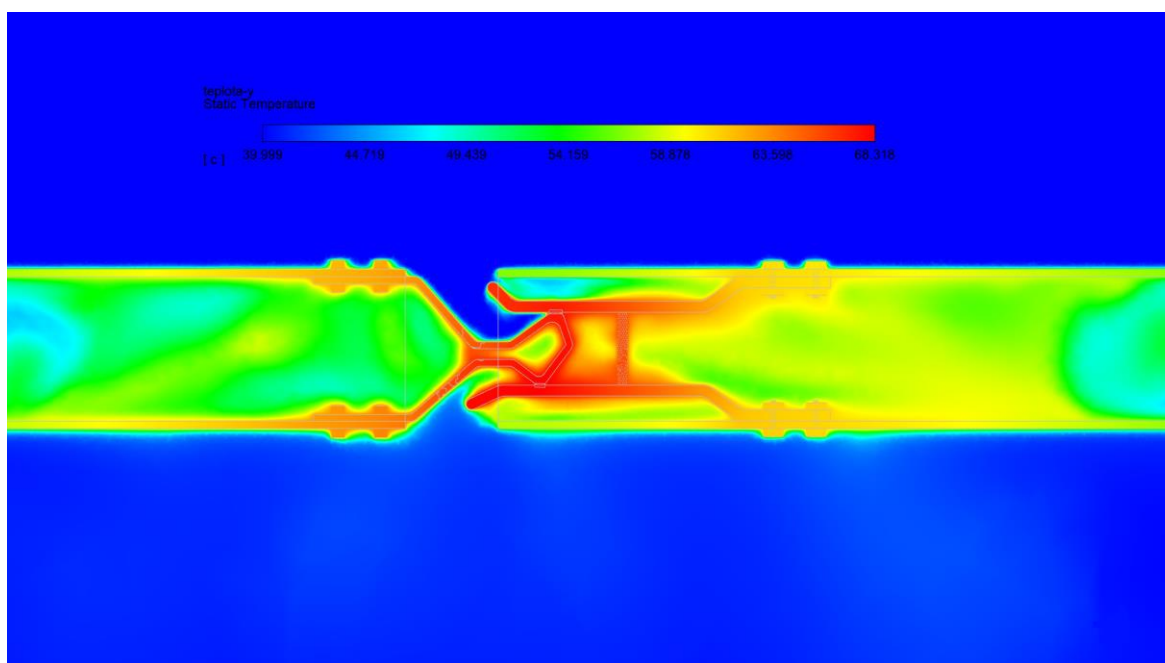


Obr. 5.11 Kontury teploty v řezu rovinou Y(°C)

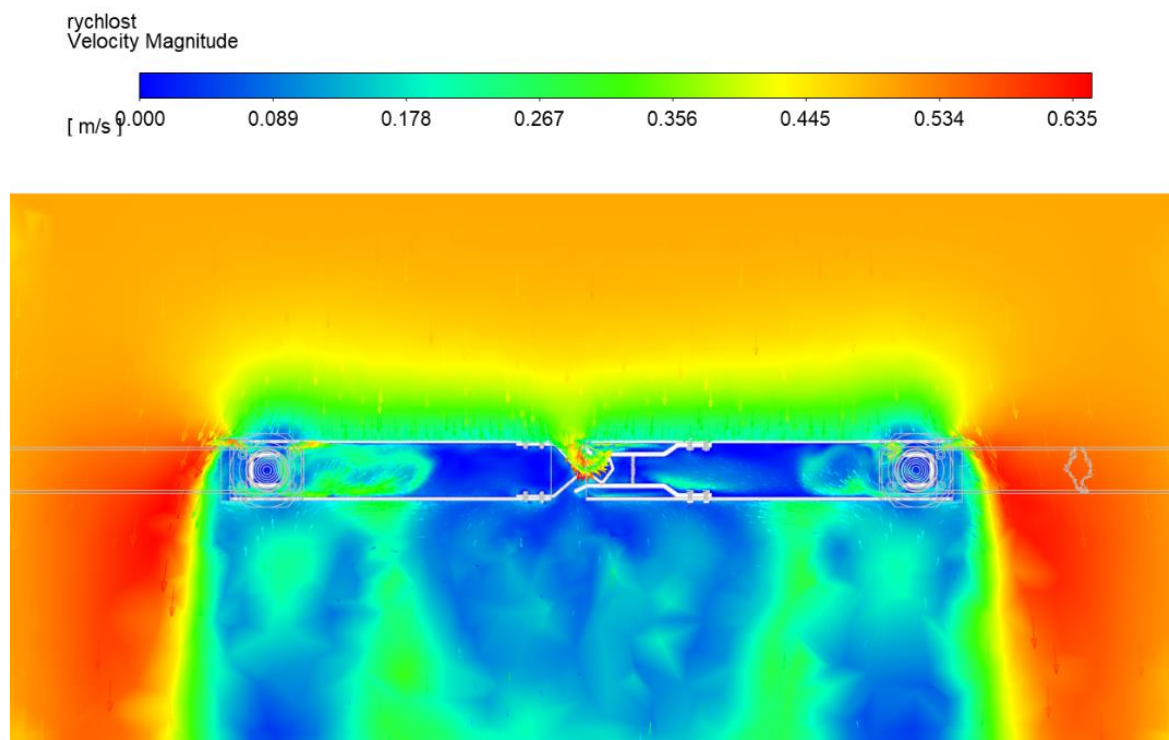
Na Obr. 5.12 a Obr. 5.13 je v tomto případě taktéž vidět rozložení teplotního pole a šíření tepla jak prouděním, tak také vedením. Teplota odpojovače klesá směrem od kontaktů k ramenům odpojovače přibližně na 60 °C a hodnoty teplot ostatních částí odpojovače klesly téměř k 50 °C.



Obr. 5.12 Kontury teploty v řezu rovinou X (°C)



Obr. 5.13 Kontury teploty detailu kontaktů (°C)



Obr. 5.14 Kontury a vektory rychlosti v řezu rovinou Y(m/s)

Na Obr. 5.14 je zobrazeno rozložení rychlostí v okolí odpojovače. V případě nuceného proudění o rychlosti 0,5 m/s dosahuje vzduch maximální rychlosti 0,635 m/s.

V Tab. 5.3 jsou průměrné hodnoty teplot a oteplení pro případ nuceného proudění 0,5 m/s. Nejvyšší hodnota oteplení je v tomto případě 28,3 K a nejnižší 13,1 K.

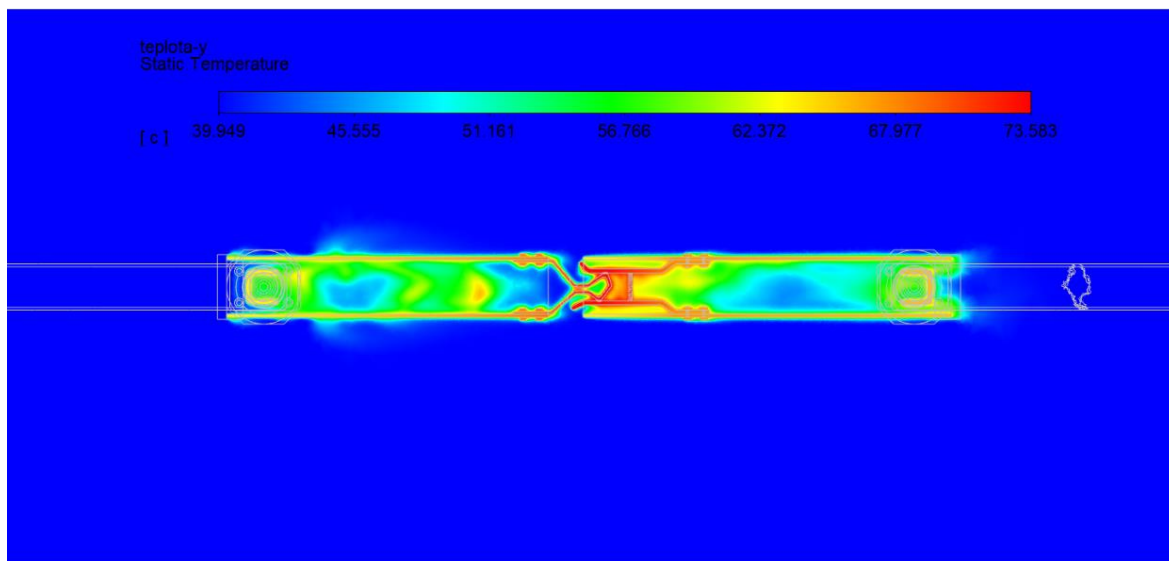
V porovnání s ostatními simulacemi dosahujeme v tomto případě nejnižších hodnot teplot a oteplení odpojovače. Rozdíl maximální teploty oproti přirozenému proudění je 5,4°C. Tato hodnota je významným zlepšením chlazení. Odpojovač tím pádem také i v tomto případě dosahuje nižších maximálních hodnot, než je hodnota mezní v normě. Z hlediska oteplení odpojovače je toto nejpříznivější případ ze všech simulací.

Tab. 5.3 Průměrné hodnoty teploty a oteplení

Název dílu	Průměrná teplota (°C)	Δt (K)
Stykový kontakt 4	68,3	28,3
Stykový kontakt 7	68,3	28,3
Stykový kontakt 8	68,3	28,3
Stykový kontakt 1	68,1	28,1
Stykový kontakt 5	67,5	27,5
Stykový kontakt 6	67,5	27,5
Stykový kontakt 3	67,4	27,4
Stykový kontakt 2	67,4	27,4
Pevný kontakt	65,2	25,2
Kontaktní palec 3	64,7	24,7
Kontaktní palec 2	64,7	24,7
Kontaktní palec 4	64,6	24,6
Kontaktní palec 1	64,2	24,2
Vodič odvod	59,4	19,4
Vodič přívod	58,9	18,9
Rameno levé	58,5	18,5
Rameno pravé	58,5	18,5
Přívodní svorka pravá	57,1	17,1
Ložisko pravé	57,0	17,0
Kluzný kontakt 1 pravý	56,9	16,9
Kontaktní hlavice pravá	56,7	16,7
Přívodní svorka levá	56,6	16,6
Kluzný kontakt 2 pravý	56,4	16,4
Ložisko levé	56,3	16,3
Kluzný kontakt 1 levý	56,3	16,3
Kontaktní hlavice levá	56,1	16,1
Kluzný kontakt 2 levý	55,8	15,8
Podstavná noha pravá	55,0	15,0
Podstavná noha levá	54,4	14,4
Příruba pravá	53,7	13,7
Příruba levá	53,1	13,1

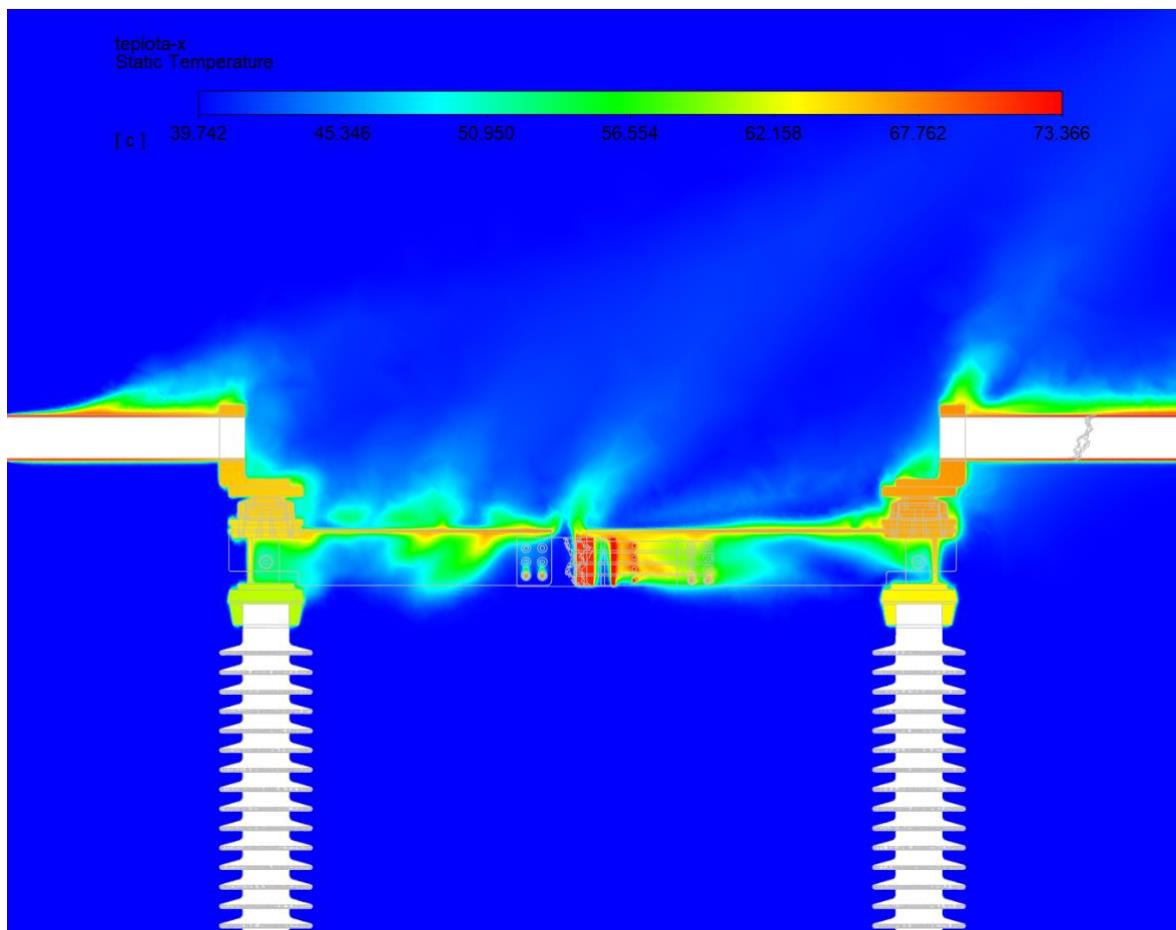
5.4 Nucené proudění v ose Z-0.25 m/s

V případě nuceného proudění v ose Z o rychlosti 0,25 m/s dosahuje hodnota maximální teploty odpojovače 73,6 °C. Na Obr. 5.15 je v tomto případě patrná změna šíření teploty do okolí, která je zde taktéž ovlivněna směrem nuceného proudění. Šíření tepla se přesunulo do směru osy Z. Tento jev je lépe patrný z Obr. 5.16. Na tomto obrázku je také zřejmé, že směr proudění negativně ovlivňuje teplotu pravého ramene oproti levému.

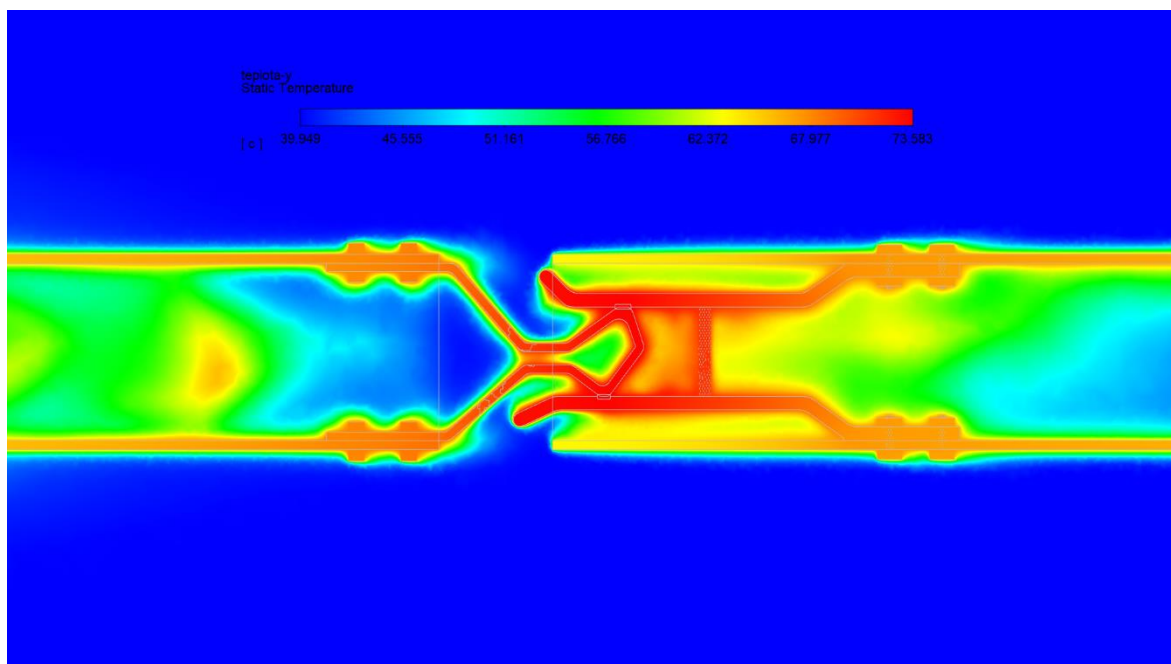


Obr. 5.15 Kontury teploty v řezu rovinou Y (°C)

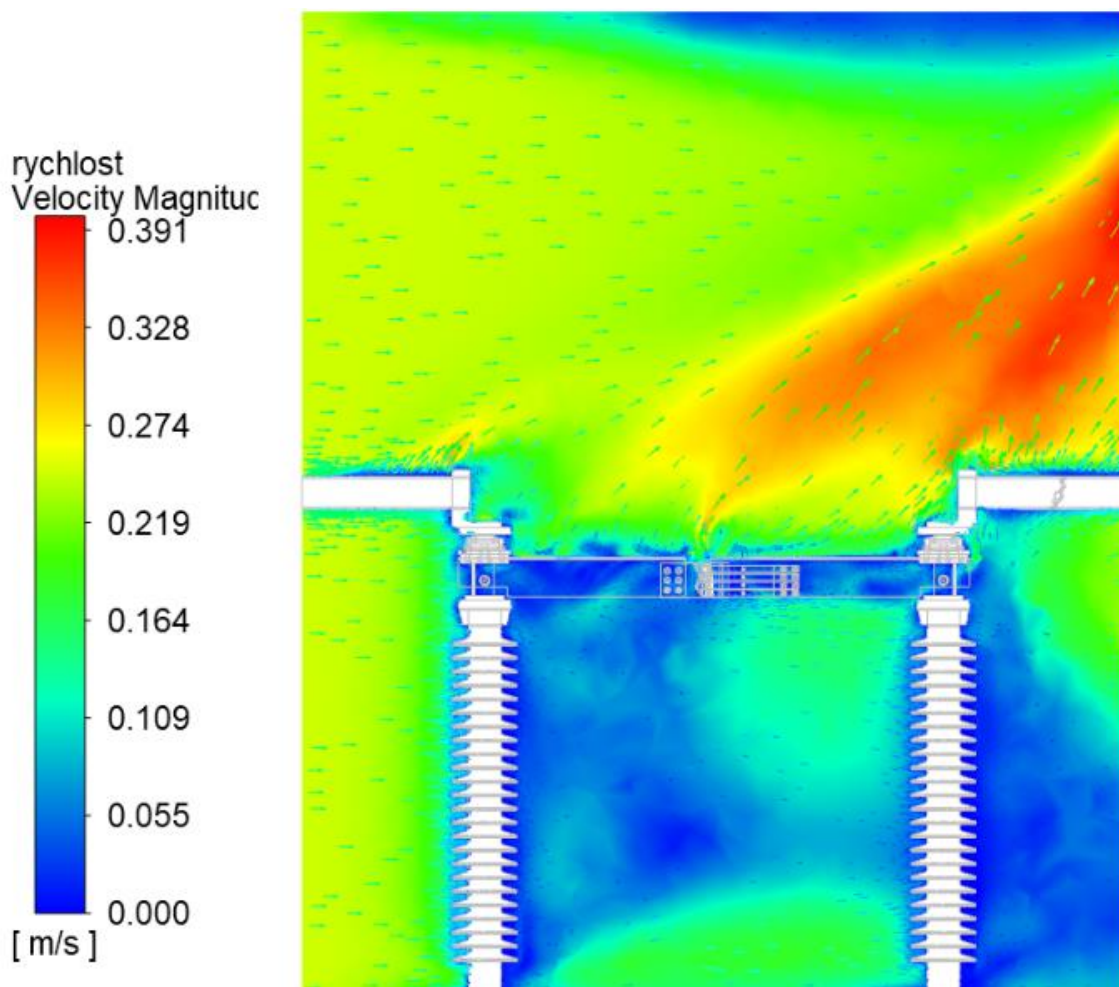
Na Obr. 5.16 je vidět, že v tomto případě se vyšší teplota pomocí vedení přenáší v odpojovači na větší vzdálenost v případě pravého ramene, u levého ramene odpojovače se hodnoty teploty oproti ostatním simulacím nezměnily.



Obr. 5.16 Kontury teploty v řezu rovinou X (°C)



Obr. 5.17 Kontury teploty detailu kontaktů (°C)



Obr. 5.18 Kontury a vektory rychlosti v řezu rovinou X(m/s)

Obr. 5.18 zobrazuje zajímavou proměnu rozložení rychlostí proudění oproti předchozím případům. V důsledku nuceného proudění v ose Z se maximální rychlost změnila o desetiny m/s. K hlavnímu urychlování proudění dochází v prostoru nad kontakty a směřuje k hornímu okraji prostředí, kde dosahuje maximální hodnoty rychlosti 0,391 m/s. V prostoru mezi izolátory jsou v důsledku proudění okolo těchto izolátorů rychlosti proudění velmi nízké.

V Tab. 5.4 jsou zobrazeny průměrné teploty jednotlivých dílů a hodnoty jejich oteplení.

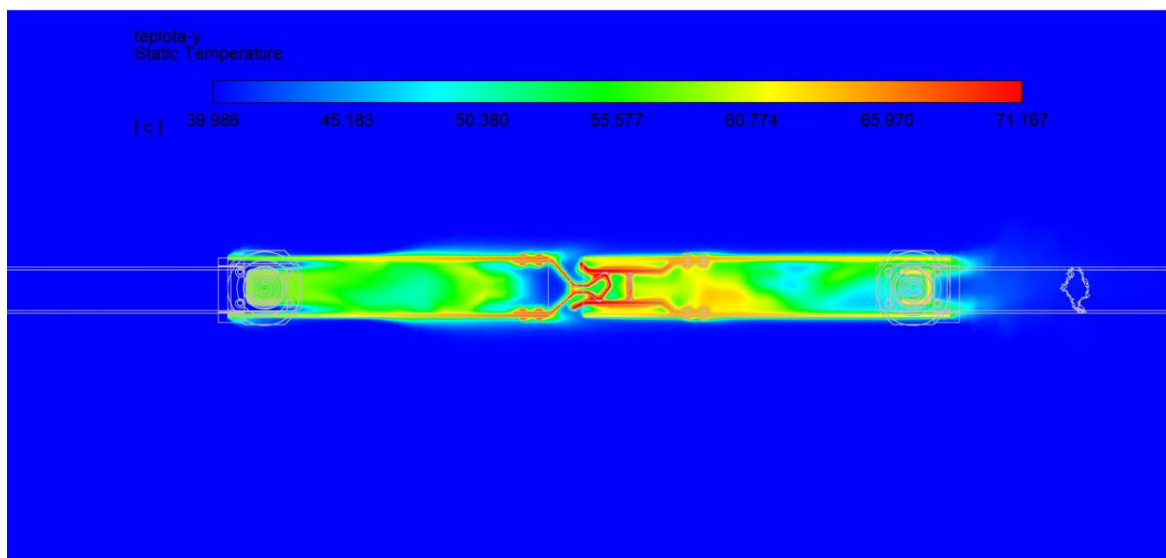
V tomto případě jsou maximální hodnoty teploty nižší pouze o 0,2 °C v porovnání s přirozeným prouděním. Hodnota maximálního oteplení je 33,5 K, a i zde je tedy v souladu s normou.

Tab. 5.4 Průměrné hodnoty teploty a oteplení

Název dílu	Průměrná teplota (°C)	Δt (K)
Stykový kontakt 7	73,5	33,5
Stykový kontakt 4	73,5	33,5
Stykový kontakt 6	73,5	33,5
Stykový kontakt 5	73,4	33,4
Stykový kontakt 8	73,3	33,3
Stykový kontakt 3	73,3	33,3
Stykový kontakt 1	73,2	33,2
Stykový kontakt 2	73,1	33,1
Kontaktní palec 3	70,6	30,6
Kontaktní palec 4	70,6	30,6
Vodič odvod	70,5	30,5
Pevný kontakt	70,5	30,5
Kontaktní palec 2	70,4	30,4
Kontaktní palec 1	69,8	29,8
Vodič přívod	69,2	29,2
Přívodní svorka pravá	67,4	27,4
Kluzný kontakt 1 pravý	67,1	27,1
Ložisko pravé	67,1	27,1
Kontaktní hlavice pravá	66,9	26,9
Kluzný kontakt 2 pravý	66,5	26,5
Rameno pravé	66,2	26,2
Rameno levé	65,9	25,9
Přívodní svorka levá	65,7	25,7
Kluzný kontakt 1 levý	65,2	25,2
Ložisko levé	65,1	25,1
Podstavná noha pravá	65,0	25,0
Kontaktní hlavice levá	64,9	24,9
Kluzný kontakt 2 levý	64,4	24,4
Příruba pravá	63,5	23,5
Podstavná noha levá	62,9	22,9
Příruba levá	61,5	21,5

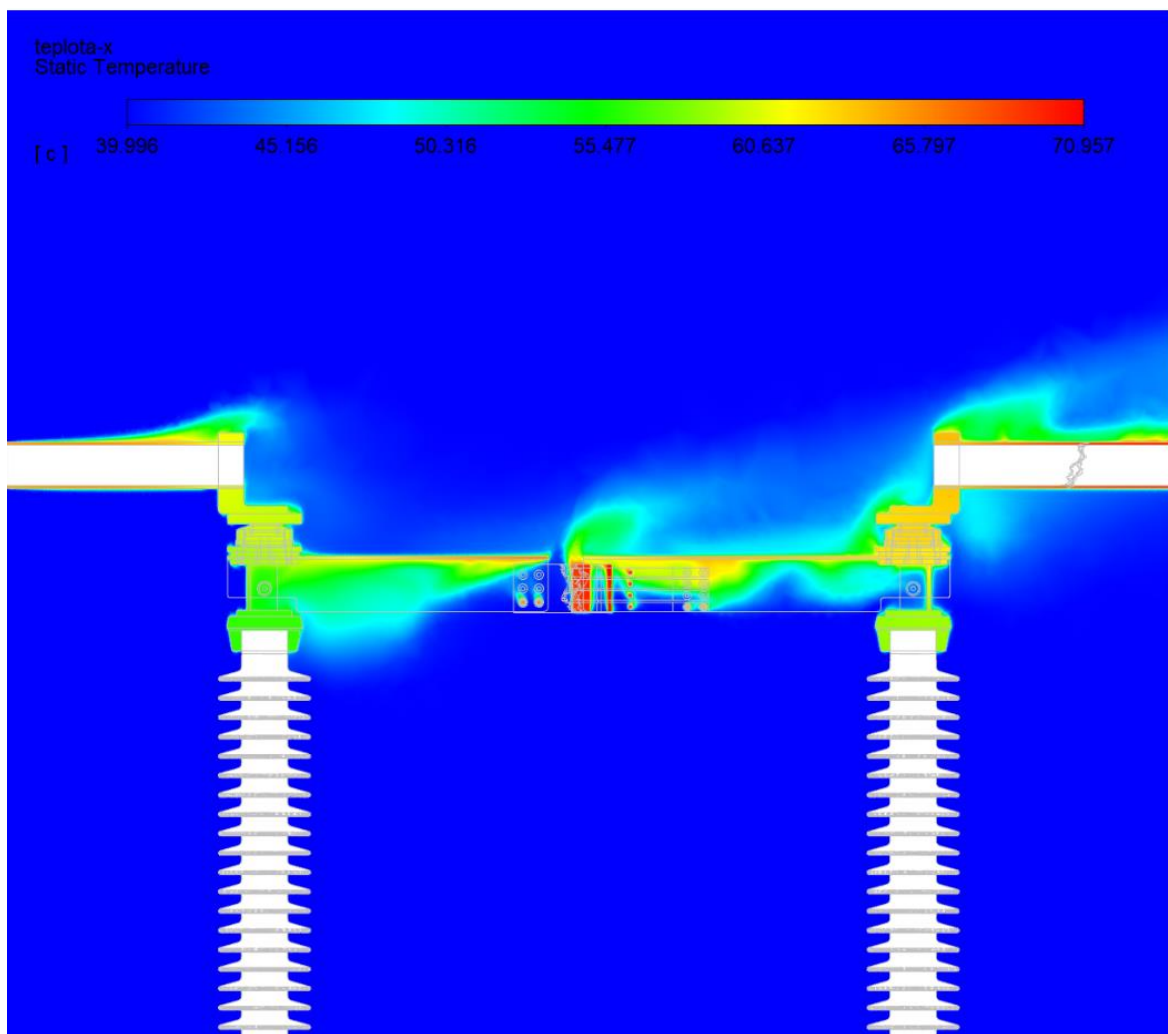
5.5 Nucené proudění v ose Z-0.5 m/s

V případě nuceného proudění v ose Z o rychlosti 0,5 m/s dosahuje odpojovač maximální teploty 71,2 °C. Na Obr. 5.19 a Obr. 5.20 je stejně jako u předchozí kapitoly patrné ovlivnění šíření tepla nuceným prouděním. V případě levého ramene jsou hodnoty teplot částí vzdálených od kontaktů velmi snižené na hodnotu přibližně 55,6 °C.

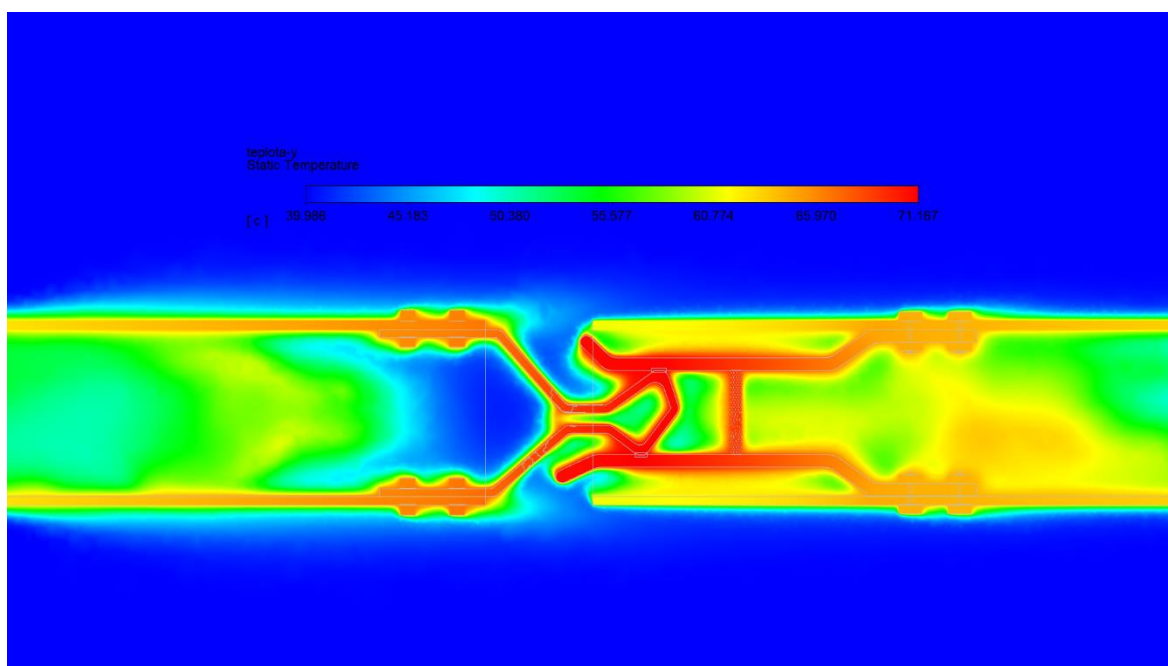


Obr. 5.19 Kontury teploty v řezu rovinou Y(°C)

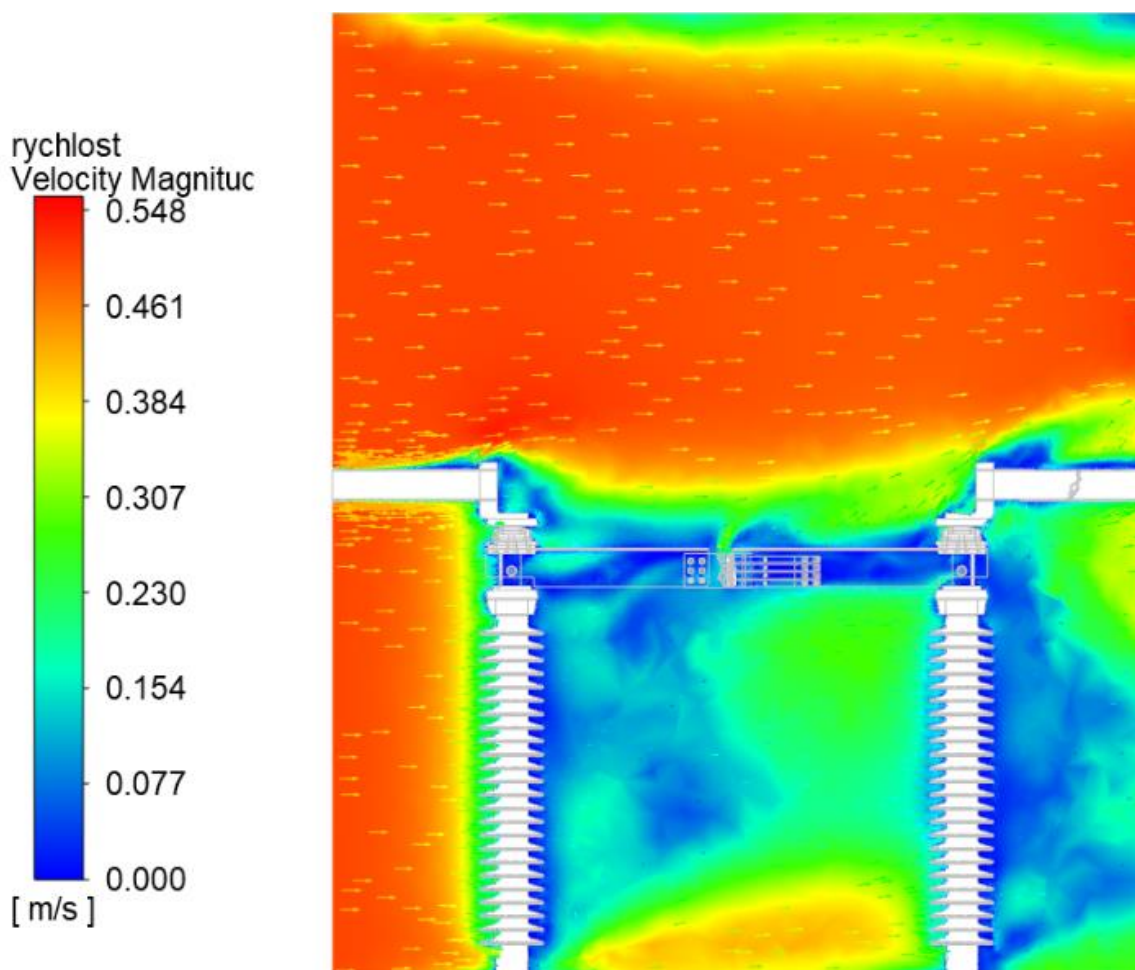
Obr. 5.21 zobrazuje detailní rozložení teplot v okolí kontaktů. Zde je také důležité zdůraznit rozdílné teploty vzduchu pro obě ramena ve vnitřním prostoru odpojovače. Tento rozdíl je důsledkem proudění ve směru osy Z.



Obr. 5.20 Kontury teploty v řezu rovinou X (°C)



Obr. 5.21 Kontury teploty detailu kontaktů (°C)



Obr. 5.22 Kontury a vektory rychlosti v řezu rovinou X(m/s)

Rozložení rychlostí vzduchu v okolí odpojovače na Obr. 5.22 je v tomto případě podobné jako v předchozí kapitole, nicméně rychlosti jsou zde výrazně vyšší. Proudění dosahuje maximální rychlosti o hodnotě 0,548 m/s.

V této simulaci dosahuje teplota odpojovače o 2,6 °C nižší hodnoty než v případě přirozeného proudění.

V Tab. 5.4 jsou opět zobrazeny průměrné teploty jednotlivých dílů a hodnoty jejich oteplení.

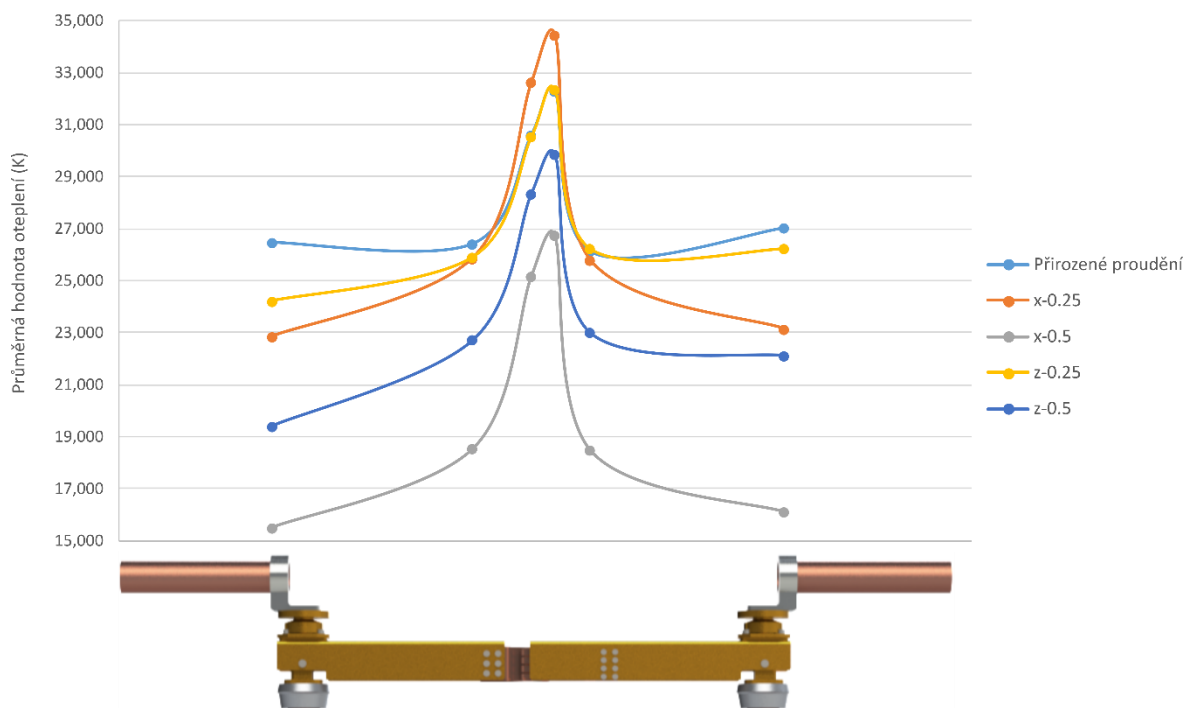
V tomto případě dosahujeme hodnoty maximální teploty o 2,6 °C nižší než v případě přirozeného proudění. Maximální hodnota oteplení v této simulaci dosahuje hodnoty 33,5 K a je i zde v souladu s normou. Tato simulace dosahuje druhých nejpříznivějších výsledků z hlediska ochlazování odpojovače.

Tab. 5.5 Průměrné hodnoty teploty a oteplení

Název dílu	Průměrná teplota (°C)	Δt (K)
Stykový kontakt 7	71,1	31,1
Stykový kontakt 4	71,1	31,1
Stykový kontakt 6	71,1	31,1
Stykový kontakt 5	71,0	31,0
Stykový kontakt 8	70,9	30,9
Stykový kontakt 3	70,9	30,9
Stykový kontakt 1	70,7	30,7
Stykový kontakt 2	70,6	30,6
Pevný kontakt	68,4	28,4
Kontaktní palec 4	68,0	28,0
Kontaktní palec 3	68,0	28,0
Kontaktní palec 2	67,8	27,8
Kontaktní palec 1	67,2	27,2
Vodič odvod	67,2	27,2
Vodič přívod	64,3	24,3
Přívodní svorka pravá	63,6	23,6
Kluzný kontakt 1 pravý	63,1	23,1
Ložisko pravé	63,0	23,0
Rameno pravé	63,0	23,0
Kontaktní hlavice pravá	62,8	22,8
Rameno levé	62,7	22,7
Kluzný kontakt 2 pravý	62,4	22,4
Přívodní svorka levá	60,9	20,9
Podstavná noha pravá	60,8	20,8
Kluzný kontakt 1 levý	60,3	20,3
Ložisko levé	60,3	20,3
Kontaktní hlavice levá	60,1	20,1
Kluzný kontakt 2 levý	59,6	19,6
Příruba pravá	59,2	19,2
Podstavná noha levá	58,1	18,1
Příruba levá	56,7	16,7

5.6 Průběh oteplení

Průběh oteplení na Odpojovači



Obr. 5.23 Graf průběhu oteplení na odpojovači

Obr. 5.23 názorně zobrazuje průběh rozložení oteplení jednotlivých částí odpojovače, pro lepší představu je zde v poměru ke grafu zobrazen též odpojovač. Graf potvrzuje výsledky výše zmíněné v předchozích kapitolách.

6 Možné zlepšení chlazení odpojovače

V případě, že odpojovač nevyhověl podmínkám, které stanovuje norma, a hodnoty oteplení ať už celého odpojovače či jeho částí jsou tedy vyšší, je třeba realizovat opatření vedoucí ke snížení oteplení. Pro zlepšení odvodu tepla do okolí obecně platí, že ho lze docílit zvětšením teplosměnné plochy či zlepšením obtékání plochy.

Zvětšení teplosměnné plochy je v mnoha případech nejjednodušším řešením pro zařízení, která nejsou omezoována prostorem. Efektivního zvětšení teplosměnné plochy lze dosáhnout přidáním chladícího žebrování nebo zvětšením některých částí zařízení. Pro zlepšení sdílení tepla sáláním je možné využít vhodnou úpravu povrchu sálavých ploch, čímž se zvýší jejich emisivita. Více možností pro zlepšení odvodu tepla však existuje pro sdílení

tepla prouděním. Nejjednodušším způsobem jeho zlepšení je vhodná konstrukce daného zařízení, kde je důležité se zaměřit na dobrý průtok chladicího média v okolí nejvíce zahříváných ploch. Přívod chladicího média by měl být zajištěn z místa s co nejnižší teplotou, aby byl docílen co nejvyšší teplotní spád. V případě, kdy je přirozené proudění nedostačující, lze zajistit nucený oběh pomocí čerpadla či ventilátoru, který zaručí tok média i v problematických místech a zvýší i rychlost média, čímž bude i odvod tepla efektivnější. Při složitějších konstrukcích zařízení je možné využít deflektor pro nasměrování toku média k problematickým částem. Ve většině případů je u elektrických zařízení jako chladicí medium využívám vzduch jako nejlevnější a nejjednodušší způsob.

Dalším možným způsobem snížení oteplení je snížení hodnot elektrického odporu proudové dráhy, čímž budou sníženy ztráty zařízení. Snížení elektrického odporu vodiče lze docílit např. zvětšením jeho průřezu, popř. volbou materiálu s vyšší elektrickou vodivostí. Větší průřez vodiče má také pozitivní vliv na jeho tepelnou vodivost a kapacitu, v důsledku čehož je zlepšena rovnoměrnost rozložení teplot a snížení rychlosti nárůstu oteplení při prudkém nárůstu proudu. Nejsložitější je situace okolo odporu kontaktu. V tomto případě lze snížit odpor zvětšením plochy kontaktu, zvýšením přitlačné síly, volbou vhodných materiálů, nebo též tvarem kontaktů. U velikých kontaktů lze využít rozdělení do více paralelních ploch.

V případě mých simulací nedosahovaly hodnoty oteplení odpojovače v žádném z případů ani zdaleka mezních hodnot. Nicméně v oblasti kontaktů, kde dosahovala teplota nejvyšších hodnot, lze navrhnout opatření, která zaručí rovnoměrnější ochlazování právě těchto míst. Tato opatření je dobré zvážit z důvodu úspory v závislosti na dimenzování odpojovače. Nejjednodušším možným řešením může být vytvoření zářezů, či děr v rameni přímo nad kontakty. Tímto způsobem dosáhneme lepší možnosti pro proudění.

7 Závěr

Hlavním cílem diplomové práce byla numerická analýza ochlazování zadaného elektrického zařízení, jímž byl distribuční odpojovač na hladinu 110 kV. Numerická analýza byla zpracována pomocí programu Ansys Fluent, který umožňuje simulovat jak problematiku oteplení proudové dráhy, tak i následné šíření tepla do okolí. Oba tyto problémy jsou zpracovány v teoretické části práce spolu s možnostmi jejich výpočtů. Na teoretickou část navazuje část praktická, zaměřená na simulaci odpojovače.

Prvním krokem praktické části byla tvorba geometrického 3D modelu odpojovače podle rozměrů reálného odpojovače. K tomuto úkolu byl využit program SolidWorks. Dalším krokem byla tvorba modelu výpočetního, která spočívá v diskretizaci geometrického modelu, a tím je vytvořena výpočetní síť modelu. Po vytvoření sítě bylo nutné dodefinovat výpočetní model nastavením mnoha parametrů, mezi něž patří např. jednotlivé materiály, okrajové podmínky a tepelné zdroje. Program Fluent též umožňuje zanesení teplotních závislostí odporu materiálů, které vede k zpřesnění výsledků. Nastavením okrajových podmínek jsem dosáhl pěti různých případů simulací, přirozeného proudění, nuceného proudění ve směru osy X o rychlostech 0,25 a 0,5 m/s a nuceného proudění v ose Z o rychlostech 0,25 a 0,5 m/s.

Výsledky simulací zobrazují rozložení oteplení v odpojovači a také ukazují rozložení teplotního a rychlostního pole okolního proudění. Nejvyšší hodnota oteplení byla dosažena v simulaci nuceného proudění v ose X o rychlosti 0,25 m/s a její hodnota je necelých 36 K. Tato simulace dosáhla z hlediska oteplení nejhoršího výsledku. Naopak nejlepšího výsledku bylo dosaženo při simulaci nuceného proudění v ose X o rychlosti 0,5 m/s, kde byla nejvyšší hodnota oteplení pouze 28,3 K.

U všech simulací byla hodnota oteplení nižší než normou udávaná mezní hodnota 65 K (kontakty na vzduchu), v důsledku tohoto lze hodnotit odpojovač jako vyhovující z hlediska oteplení. Nicméně rozložení teplot v různých částech odpojovače není rovnoměrné a z tohoto důvodu by bylo ideální vylepšit chlazení zejména v oblasti kontaktů. Tato úprava by mohla vést k úspoře materiálu a tím i finanční úspoře.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RUŠŇÁK, Š. A ŘEZÁČEK, P. *Elektrické přístroje 1. 2. přeprac. vyd. Plzeň: ZČU, 2001. ISBN 807082-825-0.*
- [2] HOFMANN, J. a URBANOVÁ, M. *Fyzika I* [online]. Verze 1.0, Praha: VŠCHT, 2005. [cit. 1.4.2017]. Dostupné z:
http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_ekniha-001/pages-img/obsah.html
- [3] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985. 344 s.*
- [4] ECKERTOVÁ, L. *Fyzikální elektronika pevných látek. Praha: UK, 1992. ISBN 80706-6535-1.*
- [5] DĚDEK, L. *Teorie elektromagnetického pole. Praha: Mezinárodní organizace novinářů, 1990. ISBN 80-214-0219-9.*
- [6] SPRINGER. *VDI Heat Atlas. Düsseldorf, 2010. ISBN 978-3-540-77876-9.*
- [7] KOZUBKOVÁ, M. a kol. *Matematické modely nestlačitelného a stlačitelného proudění. Ostrava: VŠB. 1999*
- [8] HAVELKA, O. a kol. *Elektrické přístroje. Brno: VUT. 1985*
- [9] METODA KONEČNÝCH PRVKŮ [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z:
http://www.shigley.cz/images/texts/file/prednaska1_mkp.pdf
- [10] METODA KONEČNÝCH OBJEMŮ [online]. 2008 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z:
<https://docplayer.cz/32332382-Fluent-prednasky-metoda-konecnych-objemu-mko.html>
- [11] CHYSKÝ, J., Hemzal, K. A KOL *Technický průvodce – větrání a klimatizace. Praha. 1993*
- [12] GLÜCK, B., O. *Heizwassernetze, VEB Verlag für Bauwesen Berlin. Berlin 1985*