



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## VZDUCHEM CHLAZENÝ ROZVADĚČ

AIR COOLED ELECTRICAL CABINET

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ivan Rusetskyi

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav  
Student: **Bc. Ivan Rusetskyi**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Energetické inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Vzduchem chlazený rozvaděč

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při provozu elektrických zařízení dochází ke generování tepla v důsledku vnitřních ztrát zařízení. Pokud jsou tato zařízení umístěna v rozvaděči, tepelný výkon jednotlivých prvků se sčítá a teplota v rozvaděči může narůst až na hodnoty, kdy klesá spolehlivost jednotlivých zařízení. Jednou z cest, jak zabránit nárůstu teploty uvnitř rozvaděče na kritické hodnoty, je vyřešit jeho vhodné provětrávání (chlazení okolním vzduchem) a to buď přirozeným způsobem, nebo s využitím ventilátoru.

### Cíle diplomové práce:

Cílem práce je inovovat chlazení elektrického rozvaděče vysokého napětí. Rešeršní část práce bude zaměřena na seznámení se s provedením rozvaděče a vypínače VN, praktická část práce se bude zabývat analýzou současného stavu chlazení v základních prostorách rozvaděče a inovací chlazení ve vybrané části rozvaděče.

### Seznam doporučené literatury:

BERGMAN, T. L., A. S. LAVINE, F. P. INCROPERA a D. P. DEWITT. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 8th Edition. USA: John Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-35388-1.

VERSTEEG, H. K. a W. MALALASEKERA. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2nd ed. New York: Pearson Education, 2007. ISBN 0131274988.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Při provozu elektrických zařízení dochází ke generování tepla v důsledku vnitřních ztrát zařízení. Pokud jsou tato zařízení umístěna v rozvaděči, tepelný výkon jednotlivých prvků se sčítá a teplota v rozvaděči může narůst až na hodnoty, kdy klesá spolehlivost jednotlivých zařízení. Jednou z cest, jak zabránit nárůstu teploty uvnitř rozvaděče na kritické hodnoty, je vyřešit jeho vhodné provětrávání (chlazení okolním vzduchem) a to buď přirozeným způsobem, nebo s využitím ventilátoru. Tato diplomová práce zabývá nejspolehlivějším způsobem chlazení rozvaděčů UniGear ZS1 a to přirozeným způsobem.

### **Klíčová slova**

Rozvaděč, chlazení volnou konvekcí, CFD, přenos tepla, odváděný tepelný výkon z rozvaděče.

## **ABSTRACT**

During the operation of electrical equipment, heat is generated due to internal losses of the equipment. If these devices are located in the switchgear, the heat output of the individual elements adds up and the temperature in the switchboard can rise to values when the reliability of the individual devices decreases. One of the ways to prevent increase the temperature inside the switchgear from rising to critical values is to solve its proper ventilation (cooling with ambient air). By natural convection or using a ventilator. This diploma thesis deals with the most reliable way of cooling UniGear ZS1 switchgears by natural convection.

### **Key words**

Switchgear, natural cooling, CFD, heat transfer, heat output from the switchgear.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

RUSETSKYI, Ivan. *Vzduchem chlazený rozvaděč* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-01]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133291>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Hejčík.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vzduchem chlazený rozvaděč vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

.....  
Datum

\_\_\_\_\_  
*Jméno a příjmení*

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Jiří Hejčíkovi, Ph.D., Ing. Jakubu Elcnerovi, Ph.D., Ing. Emilu Kalinovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi byli poskytnuty při vypracování závěrečné práce. Dále bych poděkoval rodině a blízkým, za dlouholetou trpělivost, kterou se mnou měli a za velkou podporu.



## Obsah

ÚVOD.....	11
1 Vznik a přenos tepla v rozvaděči.....	12
1.1 Zákon Joulov-Lenzův (Jouleovo teplo).....	12
1.2 Přenos tepla v rozvaděči UniGear.....	12
1.2.1 Vedení tepla (kondukce).....	13
1.2.2 Přenos tepla konvekci.....	17
1.2.3 Radiace.....	23
1.3 Závěr analýzy tepelných pochodů, které bychom mohli použít při analýze rozvaděče UniGear ZS1 z hlediska disciplíny termodynamiky.....	25
2 Analýza jednotlivých částí rozvaděče.....	26
2.1 Rozdělení rozvaděčů.....	26
2.2 Rozdělení jednotlivých elementů rozvaděče vysokého napětí.....	27
2.3 Požadavky na VN Rozvaděč z termodynamického hlediska.....	28
2.4 Analýza rozvaděče UniGear ZS1.....	29
2.4.1 Okrajové podmínky při provozu rozvaděče UniGear ZS1.....	30
2.4.2 Normy, které musí splňovat rozvaděč UniGear ZS1.....	30
2.4.3 Materiály použité v rozvaděči UniGear ZS1.....	30
2.4.4 Konstrukce jednotlivých členů rozvaděče.....	31
3 Algoritmus řešení a analýza vhodných nástrojů.....	32
3.1 Vhodný řešič a okrajové podmínky.....	32
3.1.1 Okrajové podmínky.....	32
3.1.2 Volba řešiče.....	33
3.2 Tvorba geometrie.....	37
3.3 Síť.....	39
3.3.1 K-Epsilon Low Re.....	40
3.3.2 Standrd k-Epsilon Two Layer.....	40
3.3.3 Realizable k-Epsilon Two-Layer.....	40
3.3.4 Realizable k-Epsilon Two-Layer s nastavením konstantní hustoty.....	40
4 Analýza stávajícího stavu, návrh opatření.....	41
4.1 Volba řešiče.....	43
4.2 Návrh opatření.....	44
4.2.1 Uzavřený prostor s přípojnými.....	44
4.2.2 Kabelový prostor s transformátory, uzemněním a sílovým napojením.....	45
4.2.3 Předpoklad.....	46
4.3 Tvorba geometrie.....	46
4.4 Porous Baffle Interface.....	47
4.5 Zhodnocení první a druhé alternativy.....	48
4.5.1 Zhodnocení analýzy návrhového stavu.....	52
5 Závěr.....	53
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	54
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	55
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	57

SEZNAM TABULEK.....	58
SEZNAM PŘÍLOH.....	59

## **ÚVOD**

Neustálý rozvoj a nově kladené požadavky na energetické zařízení jsou klíčovými faktory v konkurenční schopnosti každého výrobce, kterým je i ABB. Energie musí být přenášena z elektrárny do spotřebiče. Kabely, transformátory, rozvaděče, přípojnice, kterými je přenesena elektrická energie vytvářejí ztráty. Disipace v elektrických zařízeních je způsobena Joulovým jevem, kdy je ztrátová energie transformována do formy tepla. Proud procházející vodičem obecně generuje teplo, které vede ke zvýšení jeho teploty. Tento fakt klade důraz na sledování oteplování součástí rozvaděče a to nejen z důvodu dosažení požadované účinnosti zařízení, ale také z hlediska jeho spolehlivého provozu při vysokých teplotách. Rozvaděče jsou jednou z klíčových součástí přenosové soustavy. To znamená, že rozvaděče vysokého napětí se obvykle používají v distribučních stanicích v elektrárnách nebo v infrastrukturních zařízeních, jako jsou nemocnice a průmyslové podniky. Je zřejmé, že na spolehlivost rozvaděče je kladen velký důraz. Spolehlivost závisí na mnohých parametrech během celého výrobního procesu – od vývoje rozvaděče až po jeho instalaci na místě. V praxi to znamená, že před vstupem do výroby musí rozvaděč projít dlouhou řadou zkoušek. Zkouška oteplování předepsaná normou ČSN EN 62271-1 ED. 2 je jednou z klíčových. Podle této normy nesmí být překročeny přísné teplotní limity. Tato diplomová práce se zaměřuje na rozvaděče UniGear ZS1, které jsou chlazeny přirozeně. Práce obsahuje kompletní analytický základ mechanismu volné konvekce, zvolení vhodného nástrojů pro analýzu tepelných toků uvnitř rozvaděče, popis jednotlivých částí rozvaděče z hlediska vlivu na oteplování, návrh a diskuzi možných změn v konstrukci chlazení rozvaděče, zhodnocení navržených změn.

První kapitola této práce se věnuje popisu problematiky přenosu tepla v rozvaděči.

Druhá kapitola se zabývá analýzou jednotlivých částí rozvaděče. Je tady věnovaná velká pozornost konstrukci rozvaděče, vlastnostem použitých materiálů, geometrie zařízení. Kapitola tak slouží jako podklad pro specifikaci okrajových podmínek výpočtů, provedených v dalších částech práce.

Ve třetí kapitole je zvolen algoritmus řešení a vhodné výpočetní nástroje, pro řešení dané problematiky.

Čtvrtá kapitola se věnuje analýze, postprocesingu dat, která byla získána v průběhu řešení předešle třetí kapitoly.

Poslední kapitola obsahuje závěr, kde jsou zhodnocené dopady dosažených výsledků a výhody od realizace.

## 1 Vznik a přenos tepla v rozvaděči.

### 1.1 Zákon Joulov-Lenzův (Jouleovo teplo)

Přírodní zákon, udávající kvantitativní hodnotu tepla vyvolaného elektrickým proudem ve vodiči. Stanoven v roce 1841 Joulem a současně nezávisle na Joule o rok později Lenzem v 1842.

„Teplo, které vzniká při průchodu stejnosměrného ustáleného proudu vodičem, je přímo úměrné součinu proudu, napětí a doby, po kterou proud prochází.“ – První Joulov zákon

$$dQ = I^2 \cdot R \cdot dt \quad (1.1)$$

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I^2 \cdot R \cdot dt \quad (1.2)$$

kde  $dQ$  teplo které se uvolní za časový úsek  $dt$ ,  $Q$  množství tepla [ $W \cdot s = J$ ] uvolněné za čas  $\Delta t = t_2 - t_1$  [s],  $I$  elektrický proud [A],  $R$  odpor [ $\Omega$ ]. Za předpokladu konstantních hodnot, platí:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot \Delta t \quad (1.3)$$

S použitím Ohmova zákona, lze dostat následující ekvivalentní vzorce:

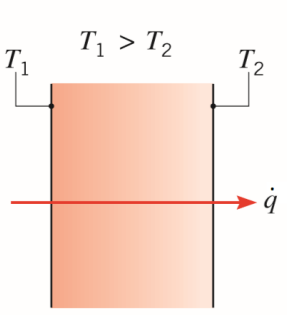
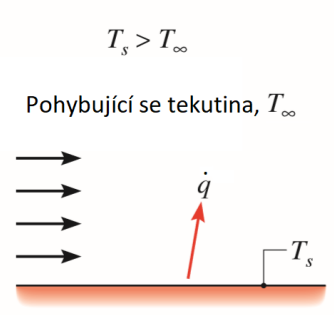
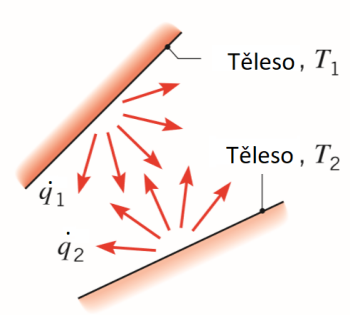
$$Q = \frac{U^2 \cdot t}{R} = I \cdot U \cdot t \quad (1.4)$$

kde  $U$  je napětí [V].

Z této formy vyjádření Joulova tepla je patrné, že vzestup odporu prvku vede k vyšším ztrátám výkonu, přičemž ztráty se přemění na tepelnou energii. Vyšší disipace tepelné energie znamená vyšší teplotu prvku, proto při návrhu rozvaděče kladen důraz na cojnižší odpor každého prvku. [1]

### 1.2 Přenos tepla v rozvaděči UniGear.

Existují tři mechanismy přenosu tepla, kondukce, volná a nucená konvekce, radiace. Diplomová práce se zabývá pasivně chlazeným typem rozvaděče, tzn. že rozvaděč je chlazen bez použití externích zdrojů – je chlazen pouze přirozenou konvekcí a zářením do okolního prostředí.

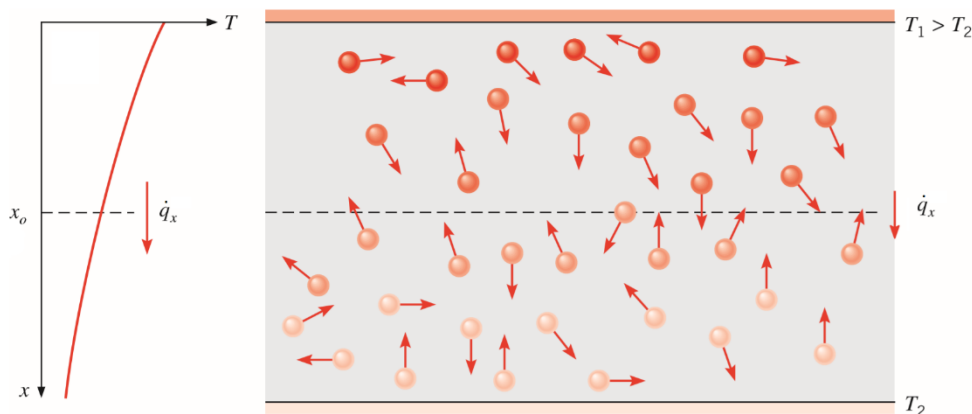
Vedení tepla přes pevnou stěnu, anebo kapalinu, plyn	Konvekce z plochy do pohybujícího se media	Salání mezi dvěma tělesy
		

Obrázek 1. Mechanismy přenosu tepla [2]

Jak je znázorněno na obrázku 1, známe různé způsoby přenosu tepla. Pokud ve stacionárním médiu existuje teplotní gradient, přičemž médiem může být pevná látka, kapalina, nebo plyn, používáme termín vodivost k označení přenosu tepla, ke kterému dochází skrz médium. Naproti tomu termín konvekce označuje přenos tepla, ke kterému dochází mezi povrchem o teplotě  $T_s$  a pohyblivou tekutinou o teplotě  $T_\infty$ . Třetí způsob přenosu tepla se nazývá tepelné záření. Všechny povrchy vyzařují energii ve formě elektromagnetických vln. Proto v nepřítomnosti interakčního média existuje čistý přenos tepla sáláním mezi dvěma povrchy při různých i stejných teplotách. Pokud je teplota všech těles stejná, nachází se systém ve stavu proměnlivé tepelné rovnováhy a to proto, že tepelná výměna sáláním mezi povrchy neustále probíhá. V daném případě každé těleso sálá a pohlcuje energii, přičemž množství pohlcené energie se rovná množství vyslaného tepla. [2], [3]

### 1.2.1 Vedení tepla (kondukce)

Je přenosem tepla na mikroskopické úrovni. Uskutečňuje se pohybem mikročastic a jich vzájemnou interakcí (molekuly v plynech, elektrony v kovech). Fyzikální mechanismus vodivosti lze přiblížit s využitím znalostí termomechaniky na příkladu látky, která se nachází mezi dvěma povrchy o různých teplotách. Pro jednoduchost uvažujme plyn, ve kterém existuje teplotní gradient, a předpokládejme, že nedochází k žádnému makroskopickému pohybu. Plyn v tomto případě vyplňuje prostor mezi dvěma povrchy, které jsou udržovány při různých teplotách, jak je znázorněno na obrázku 2. Teplota je v kterémkoli bodě závislá na energii molekul plynu v blízkosti bodu. Tato energie souvisí s Brownovým pohybem<sup>1</sup> molekul. Vyšší teploty jsou spojeny s vyššími energiemi molekul. Když se sousední molekuly srazí, jak neustále dělají, musí dojít k přenosu energie z energičtěších na méně energetické molekuly, teda z teplejší molekuly do studenější. V přítomnosti teplotního gradientu musí potom dojít k přenosu energie vedením ve směru klesající teploty. To by platilo i při neexistenci kolizí, jak je patrné z obrázku 2. Hypotetická rovina  $x_0$  je neustále procházena molekulami shora a zespodu kvůli jejich náhodnému pohybu. Molekuly shora jsou však spojeny s vyšší teplotou než molekuly zespodu, v takovém případě musí existovat čistý přenos energie v kladném směru osy  $x$ . Sračky mezi molekulami podporují tento přenos energie. O čistém přenosu energie náhodným molekulárním pohybem můžeme mluvit jako o difúzi energie. [2], [3]



Obrázek 2. Princip konvektivního přenosu tepla [2]

<sup>1</sup> Brownův pohyb je chaotický pohyb mikroskopických částic v tekutině. Rychlost Brownova pohybu je úměrná teplotě systému.

Přenos tepla je vždy souvislý se změnou teploty, to znamená že je nutno zavést pojem teplotního pole a teplotního gradientu.

- Teplotní pole

Teplota se mění v prostoru (uvažujme pravotočivou Kartézskou soustavu souřadnic) a čase,  $T = f(x_1, x_2, x_3, t)$ . Přičemž pokud teplota je závislá na čase, jedná se o pole nestacionární  $\frac{\partial T}{\partial t} \neq 0$ . V opačném případě  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$ , označujeme teplotní pole jako stacionární.

- Teplotní gradient

Se na nazývá limita poměru nárůstu teploty  $\Delta t$  k vzdálenosti  $\Delta m$  izotermických ploch ve směru normály, platí:

$$\lim_{\Delta m \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta T}{\Delta m} \right) = \frac{\partial T}{\partial m_i} = \left( \frac{\partial T}{\partial m_1}; \frac{\partial T}{\partial m_2}; \frac{\partial T}{\partial m_3} \right) = \text{grad}(T) \quad (1.5)$$

Gradient je směr nárůstu, pokud je teplota vzrůstající volí se kladný smysl vektoru  $m$ . V případě záporného gradientu se nazývá teplotním spádem. Pán Fourier zjistil, že teplo protékající tělesem je závislé na teplotovém spádu, čase a ploše, kolmé na směr proudění tepla. Proto zákon vedení tepla, Fourierův zákon je vyjádřen rovnicí:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(T) \quad (1.6)$$

kde  $q$  je množství tepla procházející přes jednotkovou plochu, tzv. měrný tepelný tok  $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ ,  $\lambda$  součinitel tepelne vodivosti  $\left[\frac{W}{mK}\right]$ .

I Zákon Termodynamika představuje zákon zachování energie (dale jen zkratka ZZT, což znamená zákon zachování tepla) a říká: „Energie nevzniká, ani nezaniká“. Celková energie systému je zachována, a proto jediný způsob, jak se množství energie v systému může změnit, je, pokud energie překročí jeho hranice. První zákon se také zabývá způsoby, jak může energie překročit hranice systému. U uzavřeného systému (oblast pevné hmoty) existují pouze dva způsoby: přenos tepla přes hranice a práce prováděné na systému nebo systémem. Pro náš případ uzavřeným systémem rozumíme proudovodné dráhy rozvaděče, které jsou chlazené okolním vzduchem, tak neprobíhá výměna částic, z kterých je složená pevná hmota rozvaděče,

$$Q'_{x_1} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_1} dx_1 dx_2 dt \quad (1.7)$$

s okolím prostředí. První zákon může být také aplikován na kontrolní objem (nebo otevřený systém), oblast prostoru ohraničená kontrolním povrchem, skrz který může procházet hmota. Hmota vstupující a opouštějící kontrolní objem s sebou nese energii. Tento proces, nazývaný energetická advekce<sup>2</sup>, udává způsob, kterým může energie překročit hranice kontrolního objemu. To je otevřený systém a částice překračující kontrolní objem jsou chladící médium. V našem případě chladícím médiem rozumíme vzduch, který chladí pevné části rozvaděče. Abychom to shrnuli, první zákon termodynamiky lze velmi jednoduše vyjádřit jak pro kontrolní objem, tak pro uzavřený systém. Nyní zvažme způsob, jakým lze určit rozložení teploty. Tento přístup se řídí metodou kontrolních objemů popsanou výše. V tomto případě definujeme diferenciální objem a identifikujeme příslušné procesy přenosu energie. Výsledkem bude

---

<sup>2</sup> Advekce je to fyzikální přenosový jev souvislý s přenosem různých skalárních poli (hmota, teplota, koncentrace, atd.) výjimečně jenom prostřednictvím pohybu prostředí.

diferenciální rovnice, jejíž řešení, za předepsaných okrajových podmínek, poskytuje distribuci teploty v médiu. Řešením diferenciální rovnice vedení tepla lze stanovit teplotní gradient, průběh teplot v přístěnné oblasti. Představme si v proudící tekutině elementární objem, který je tvořen elementárním rovnoběžnostěnem o rozměrech  $dx_1, dx_2, dx_3$  (viz obrázek 3). Pro odvození považujeme barotropickou tekutinu (zanedbáváme tlakové změny),  $\lambda = \text{const}$ ,  $C_p = \text{const}$ ,  $\rho = \text{const}$ . Za takových předpokladů se množství přivedeného tepla rovná přírůstku tepelné energie tělesa, což plyne ze ZZT. Dle Fourierova zákona lze vyjádřit množství tepla, které proteče za čas  $dt$  přes imaginární stěnu ABCD ve směru osy  $x_1$  pomocí rovnice (1.7). Obdobně stěnou EFGH o teplotě  $T + \frac{\partial T}{\partial x_1} dx_1$  proteče za stejný čas:

$$Q''_{x_1} = -\lambda \frac{\partial}{\partial x_1} \left( T + \frac{\partial T}{\partial x_1} dx_1 \right) dx_2 dx_3 dt \quad (1.8)$$

Po odečtení rovnic (1.7) a (1.8):

$$dQ_{x_1} = Q'_{x_1} - Q''_{x_1} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} dx_1 dx_2 dx_3 dt = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_1^2} dV dt \quad (1.9a)$$

Analogicky ve směrech  $x_2$  a  $x_3$ :

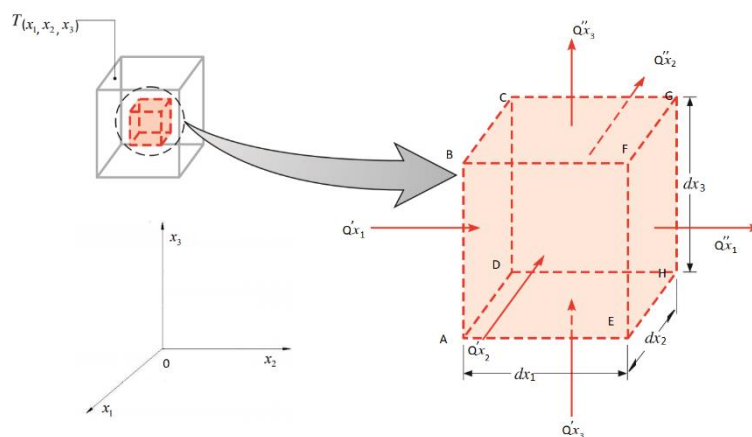
$$dQ_{x_2} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} dx_1 dx_2 dx_3 dt = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} dV dt \quad (1.9b)$$

$$dQ_{x_3} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} dx_1 dx_2 dx_3 dt = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} dV dt \quad (1.9c)$$

kde  $dV$  je elementární objem.

Celkové množství tepla, předané elementárnímu prvku v době  $dt$ :

$$dQ = dQ_{x_i} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} dV dt, \text{ kde } i = 1, 2, 3. \quad (1.10)$$



Obrázek 3. Kontrolní objem.[2]

<sup>3</sup> Daný zápis je uskutečněn v Einsteinové sumační symbolice.

Za dobu  $dt$  se změni teplota elementárního hranolu o  $\frac{dT}{dt} dt$ <sup>4</sup>, tepelná energie se zvětší o hodnotu:

$$dQ = c_p \rho \frac{dT}{dt} dV dt \quad (1.11)$$

Po dosazení vzorců (1.10) a (1.11):

$$c_p \rho \frac{dT}{dt} dV dt = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} dV dt \quad (1.12)$$

Dosadíme-li  $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$ , po úpravě:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} = a \nabla^2 T, \text{ kde } \nabla \text{ je Laplaceův operátor, Nabla.} \quad (1.13)$$

Tato rovnice je Fourier-Kirchhoffova diferenciální rovnice vedení tepla, která dává do souvislosti teplotní změny, čas, polohu.  $a$  je součinitel teplotní vodivosti. Pro lepší pochopení vedení tepla popíšeme vliv tepelné izolace na přenos tepla. Tepelné izolace sestávají z vrstev materiálů s nízkou tepelnou vodivostí kombinovaných pro dosažení ještě nižší tepelné vodivosti systému. U konvenčních izolací z vláken, prášků a vloček je pevný materiál jemně rozptýlen ve vzduchovém prostoru. Tyto systémy se vyznačují efektivní tepelnou vodivostí, která závisí na tepelné vodivosti a radiačních vlastnostech pevného materiálu, jakož i na geometrii tělesa. Zvláštním parametrem systému je jeho měrná hmotnost (hustota), která silně závisí na způsobu zpracování materiálu. Pokud se při zpracování pevného materiálu vytvoří malé dutiny nebo duté prostory, vzniká nám materiál, který se obvykle označuje jako matrice. Když jsou tyto prostory navzájem utěsněny, je systém označován jako „cellular isolation“ (pórovitá izolace). Příklady takových tuhých izolací jsou pěnové izolace, zejména izolace vyrobené z plastů a skla. Reflexní izolace se skládají z vícevrstevných, rovnoběžných, tenkých listů nebo fólií s vysokou odrazivostí, které jsou rozmístěny tak, aby odrážely zářivou energii zpět ke svému zdroji. Vzdálenost mezi fóliemi je navržena tak, aby omezovala pohyb vzduchu, a ve vysoce výkonných izolacích je prostor vakuován. U všech typů izolace bude evakuace vzduchu v prázdném prostoru snižovat efektivní tepelnou vodivost systému. Přenos tepla přes kterýkoli z těchto izolačních materiálů může zahrnovat několik režimů: vedení přes pevné materiály; vedení nebo konvekce v prázdných prostorech; a výměnu zářením mezi povrchy pevné matrice. V prováděné analýze přenosu tepla v elektrickém zařízení bude nutné použít několik vlastností hmoty (použitých materiálů). Tyto vlastnosti se obecně označují jako termofyzikální vlastnosti a zahrnují dvě odlišné kategorie, transportní a termodynamické vlastnosti. Transportními vlastnostmi jsou  $a$  je teplotní vodivost (pro přenos tepla) a kinematická viskozita (pro přenos hmoty). Termodynamické vlastnosti se naopak týkají rovnovážného stavu systému. Hustota  $\rho$  [ $\frac{m^3}{kg}$ ] a měrné teplo  $c_p$  [ $\frac{J}{kgK}$ ] jsou dvě takové vlastnosti používané v termodynamické analýze. Tepelná kapacita, měří schopnost materiálu uchovávat tepelnou energii. Látky s vysokou hustotou jsou obvykle charakterizovány malými měrnými kapacitami, mnoho pevných látek a kapalin jsou velmi dobrými médii pro uchovávání energie ( $c_p \rho = 1 \frac{MJm^3}{K}$ ). Naopak plyny s

<sup>4</sup> Celkový přírůstek libovolné veličiny  $\psi$  (teplota, tlak, měrný objem) je tvořen změnou v závislosti na čase a změnou způsobenou přemístěním prvku v prostoru, platí:  $\frac{d\psi}{d\tau} = \frac{\partial\psi}{\partial\tau} + \frac{\partial\psi}{\partial x_i} \frac{dx_i}{d\tau}$ , kde  $\frac{dx_i}{d\tau}$  má význam složek rychlosti  $v_i$ . Přičemž  $\frac{\partial\psi}{\partial\tau}$  je lokální změna hodnoty  $\psi$ ,  $v_i \frac{\partial\psi}{\partial x_i}$  konvekční změna hodnoty  $\psi$ .



velmi nízkými hustotami jsou však nevhodné pro zachování tepelné energie ( $c_p \rho = 1 \frac{\text{kJm}^3}{\text{K}}$ ). [2], [3]

### 1.2.2 Přenos tepla konvekci.

Konvenční režim přenosu tepla se skládá ze dvou mechanismů. Kromě přenosu energie v důsledku náhodného molekulárního pohybu (difúze) je energie přenášena také hromadným nebo makroskopickým pohybem tekutiny. Tento tekutinový pohyb je spojen se skutečností, že v každém okamžiku se velké množství molekul pohybuje společně nebo jako systém. Takový pohyb v přítomnosti teplotního gradientu přispívá k přenosu tepla. Protože molekuly v systému si zachovávají svůj náhodný pohyb, celkový přenos tepla je pak způsoben superpozicí přenosu energie náhodným pohybem molekul a hromadným pohybem tekutiny. Termín konvekce se obvykle používá, když se odkazuje na kumulativní transport, a termín advekce se týká transportu v důsledku hromadného pohybu tekutiny. Konvekci lze klasifikovat podle povahy vzniku toku. Mluvíme o nucené konvekci, když je tok způsoben vnějšími prostředky, například ventilátorem, čerpadlem nebo atmosférickým větrem. Jako příklad lze uvést použití ventilátoru k zajištění nuceného chlazení horkých elektrických součástí na PCB deskách (z angl. Printed Circuit Board) vzduchem. Naproti tomu pro volnou (nebo přirozenou) konvekci je tok indukovan vztlakovými silami, které jsou vyvolány rozdíly v hustotě způsobenými změnami teploty v tekutině. Může nastat případ kdy současně budou existovat proudění volné a nucené. Vliv volného pohybu je zanedbatelný při velkých rychlostech nuceného toku, naopak nucená konvekce nemá skoro žádný vliv při velmi nízkých rychlostech. Velký význam tvoří pro daný problém charakteristika proudění. Známe turbulentní a laminární typy proudění. Laminární proudění je proudění uspořádané, částice kapaliny plyně obtékají povrch bez smísení jednotlivých vrstev proudící látky, jinými slovy proudnice jsou rovnoběžné se stěnami kanálu. A naopak u proudění turbulentního je pohyb chaotický, neuspořádaný. Avšak při turbulentním proudění blízko stěny omezující tok se vždy vytvoří tenká mezní vrstva. Daná mezní vrstva je tvořena tenkou vrstvou kapaliny s laminárním charakterem proudění. Tloušťka vrstvy je závislá na střední rychlosti proudění a se vzrůstem dané rychlosti se mezní vrstva zmenšuje. Druh proudění má obrovský vliv na přenos tepla. Volná konvekce silně ovlivňuje provozní teploty výrobních a elektronických zařízení. Volná konvekce je důležitá při stanovování rozložení teploty v budovách a při určování tepelných ztrát nebo tepelných zátěží pro systémy vytápění, ventilace a klimatizace. Volná konvekce distribuuje jedovaté produkty spalování při požárech a je relevantní pro environmentální vědy, kde řídí mořské a atmosférické pohyby, jakož i související procesy přenosu tepla a přenosu hmoty. V této kapitole je pospán analytický základ pro fyzický původ a povahu toků poháněných vztlakem a získány nástroje pro provádění výpočtu souvisejícího přenosu tepla. Volný konvekční pohyb je způsoben vztlakovými silami v tekutině, zatímco při čistě nuceném proudění je daný pohyb vyvolán externím zdrojem. Vztlak je způsoben kombinací gradientu (chápeme jako např. směr nárůstu) hustoty tekutiny a působící síly, která je úměrná hustotě. V praxi je působící síla obvykle gravitační, ačkoli to může být odstředivá síla v rotujícím stroji nebo Coriolisova síla. V našem případě je daný rozvaděč nainstalovaný stacionárně. Na rozdíl od případu lodního provedení, kde může dojít k odklonům od normály v rozmezí  $\pm 10^\circ$ . Totiž pro náš případ stejně jako i pro případ instalace daného zařízení na lodi je působící silou síla gravitační. Existuje také několik způsobů, jak může v tekutině vznikat gradient hustoty, ale pro nejběžnější situaci je to způsobeno teplotním gradientem. Víme, že hustota plynů a kapalin závisí na teplotě, obvykle klesá (v důsledku expanze tekutin) se zvyšující se teplotou ( $\partial \rho / \partial T < 0$ ). Jak bylo už uvedeno v této diplomové práci se zaměřujeme na problémy s volnou konvekci, u kterých je gradient hustoty způsoben teplotním gradientem a působící síla je gravitační. Přítomnost gradientu hustoty tekutiny v gravitačním poli však nezajišťuje existenci volných konvekčních proudů. Pro pochopení

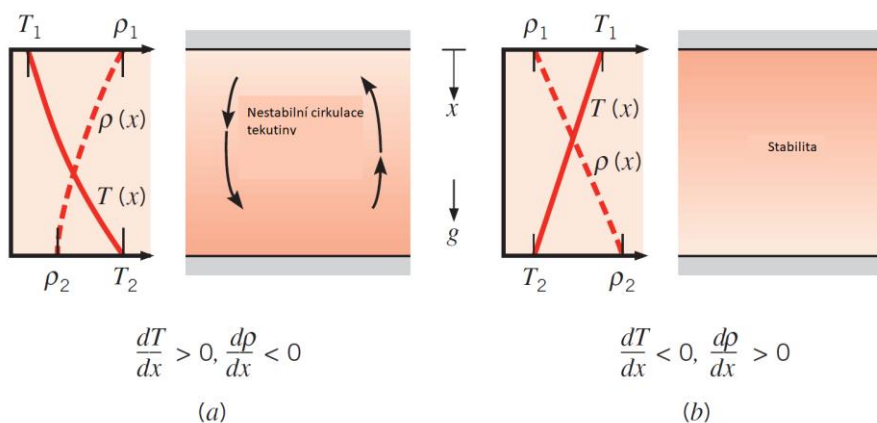
základního principu prozkoumáme jev, který je zobrazen na obrázku číslo 4, kde kapalina je uzavřena dvěma velkými horizontálními deskami různé teploty ( $T_1 \neq T_2$ ). V případě, že teplota spodní desky překročí teplotu horní desky potom hustota klesá ve směru gravitační síly. Pokud teplotní rozdíl překročí kritickou hodnotu, podmínky jsou nestabilní a vztahové síly jsou schopny překonat zpomalující vliv viskózních sil. Gravitační síla hustší tekutiny v horních vrstvách překoná sílu působící na lehčí tekutinu ve spodních vrstvách a vzniká jev zvaný cirkulace. Těžší tekutina začne klesat a bude během procesu zahřívána, zatímco lehčí tekutina stoupá a během pohybu se chladí. Tato podmínka však neplatí pro případ „b“, kde  $T_1 > T_2$  a hustota již neklesá ve směru gravitační síly. Podmínky jsou nyní stabilní a nedochází k žádnému hromadnému pohybu tekutiny. V případě „a“ dochází k přenosu tepla ze spodní na horní povrch volnou konvekcí; v případě „b“ dochází k přenosu tepla (shora dolů) vedením. Pohyb tekutiny, teploty a gradienty, koncentrace (jestli se jedná o nehomogenní médium, anebo médium s proměnlivými chemickými vlastnosti v závislosti na teplotě), musí být v souladu s několika základními přírodními zákony. Zejména v každém bodě v tekutině musí být splněna podmínka ZZT, zachování hmoty, jakož i druhý zákon Newtonův. Druhý Newtonův zákon říká: „Jestliže na těleso působí síla, pak se těleso pohybuje se zrychlením, které je přímo úměrné působící síle a nepřímo úměrné hmotnosti tělesa“. Proudění tekutiny umožní popsat tři rovnici: Bernoulliho rovnice (rovnice continuity), Navier-Stokesova rovnice a energetická rovnice. [2], [3]

- Rovnice continuity

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1.14)$$

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div}(v_i) = 0 \quad (1.15)$$

kde  $\operatorname{div}(v_i) = \nabla \cdot \mathbf{v} = \frac{\partial v_1}{\partial x_1} + \frac{\partial v_2}{\partial x_2} + \frac{\partial v_3}{\partial x_3}$ ,  $v_i$  je rychlost,  $x_i$  je poloha divergent představuje relativní změnu elementárního objemu v čase. Jinými slovy  $\operatorname{div}(v_i)$  v určitém bodě udává objemové množství tekutiny, které vyteče z jednotkového objemu za jednotku času.



Obrázek 4. Vznik cirkulace [2]

- Navier-Stokesova rovnice [4]

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j = a_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (1.16)$$

kde složka  $\frac{\partial v_i}{\partial t}$  představuje lokální zrychlení,  $\frac{\partial v_i}{\partial x_j} v_j$  konvektivní zrychlení,  $a_i$  zrychlení od objemových sil působících na kapalinu,  $\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i}$  zrychlení od tlakových sil a  $\nu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j}$  zrychlení od viskózních sil.  $\nu$  je kinematická viskozita kapaliny.

Zjednodušený tvar (1.16) platí za podmínek konstantní hustoty a viskozity. Pokud se zabýváme vlivem tepla na proudové pole je potřebné uvažovat kompletní Navier-Stokesovu rovnici:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_j} v_j = \rho a_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (1.17)$$

Vzduch je Newtonovská tekutina to znamená, že smykové napětí je úměrné gradientu rychlosti. [5]

$$\tau_{ij} = \theta \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (1.18)$$

kde  $\delta_{ij}$  je Kroneckerovo delta. Dosazením (1.19) do (1.18) dostáváme tvar:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_j} v_j = \rho a_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \theta \delta_{ij} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} + \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i \partial x_j} \right) \quad (1.19)$$

kde  $\theta$  je druhá (objemová) viskozita, o druhé viskozitě není mnoho známo, protože její účinek je v praxi malý. Pro plyny lze dobrou aproximaci získat hodnoty  $\theta = -\frac{2}{3}\mu$ . [6]

- Energetická rovnice [7]

$$\frac{\partial(\rho l)}{\partial t} + \text{div}(\rho l v_i) = -\text{div}(p v_i) + \text{div}(\lambda \text{grad}(T)) + \Phi + S_i \quad (1.20)$$

kde  $l$  je vnitřní energie,  $S_i$  vnější síly a  $\Phi$  představuje disipační funkce (smykové napětí), kterou lze pro Newtonovské tekutiny vyjádřit takto:

$$\Phi = \mu \left( 2 \frac{\partial v_i^2}{\partial^2 x_i} + \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)^2 \right) + \theta (\text{div}(v_k))^2 \quad (1.21)$$

Jak bylo již několikrát uvedeno, v naší problematice se jedná o stlačitelnou tekutinu, proto je třeba vzít do úvahy další rovnici popisující vzájemný vztah mezi teplotou a tlakem. Je to stavová rovnice. Tlak stlačitelných tekutin i vnitřní energie je funkcí hustoty a teploty. Jako pracovní látka pro chlazení rozvaděče je použit vzduch, který lze považovat za ideální plyn, pro který platí, že  $p = \rho RT$ , kde  $R$  [ $\frac{J}{kgK}$ ] je měrná plynová konstanta. Nejdůležitějším rysem stavové rovnice souvisejícím s naším problémem je to, že poskytuje spojení mezi rovnicí zachování hybnosti, zachování hmoty a ZZT. Daná rovnice umožňuje řešit změny hustoty jako součin změny tlaku a teplot. Energetická rovnice se obvykle ve formě, kde vyjadřujeme celkovou energii jako měrnou entalpii  $h = l + \frac{p}{\rho}$  [ $\frac{J}{kg}$ ]. Tato forma energetické rovnice je vhodnější pro řešení problémů se stlačitelnými tekutinami.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \text{div}(\rho h v_i) = -\frac{\partial p}{\partial t} - \text{div}(p v_i) + \text{div}(\lambda \text{grad}(T)) + \Phi + S_i \quad (1.22)$$

Tabulka 1. Vlastnosti vzduchu.

Hustota $\rho$	$1,1614 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Dynamická viskozita $\mu$	$1,846 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Měrná tepelná kapacita $c_p$	$1007 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Součinitel tepelné vodivosti $\lambda$	$0,0263 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
Teplotní vodivost $a$	$2,249 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
Tepelná roztažnost $\beta$	$0,00333 \frac{1}{\text{K}}$
Tlak v systému $p$	100 000 Pa

Pro lepší pochopení dané problematiky rozebereme případ volné konvekce ve válcových vodorovných mezerách s použitím komerčního softwaru STARCCM+. Nekonečně dlouhý válec o poloměru 1,78 cm, zahřátý na konstantní teplotu 306,3 K, je umístěn do dalšího většího válce o poloměru 4,628 cm o nižší teplotě 293,7 K. Tyto teploty jsou zvoleny tak, aby byla dosažena v mezikruží střední logaritmická teplota 300 K v mezikruží. Protože se očekává, že tok bude symetrický, je nutné pracovat pouze s polovinou geometrie, jak je ukázáno na obrázku číslo 5. Daný termodynamický model obsahuje jako pracovní látku ideální plyn s vlastnostmi popsány v tabulce číslo 1.

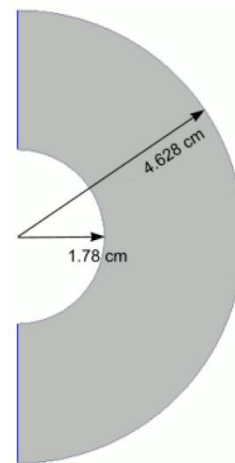
Rayleighovo číslo (-) je bezrozměrné číslo definované jako:

$$Ra = \frac{g\beta\Delta TL^3}{\nu\alpha} \quad (1.23)$$

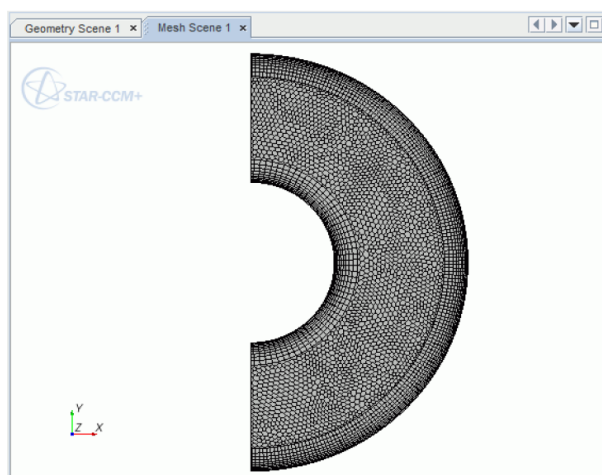
Kde  $L$  je charakteristický rozměr  $L = \text{venkovní-vnitřní radius}$ . Určit kdy se dá dosáhnout přenos tepla pomocí přirozené konvekce, je možné prostřednictvím bezrozměrného Rayleighova čísla, což je poměr vztahových a viskózních sil hybnosti a teplotní vodivosti. Při dosažení Rayleighova čísla kolem  $10^5$  a vyšší je možná přirozená konvekce.

Zvolený příklad simuluje experimenty Kuehna a Goldsteina [8]. Při použití fyzikálních vlastností dle tabulky 1, vychází Rayleighovo číslo  $Ra = 2,66 \cdot 10^4$ .

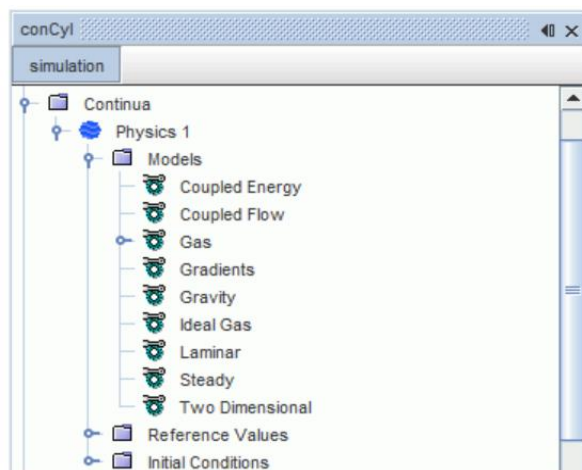
Pro řešení daného problému v prostředí STAR CCM+ je zapotřebí vytvořit (importovat) geometrii a vytvořit plošnou a objemovou síť (viz obrázek 6), nastavit parametry výpočtu (viz obrázek 7), časový krok, skalární a vektorovou scénu. V konečném důsledku spustit výpočet. Při výpočtech byl použit – laminární režim proudění a „Coupled Flow“ řešič, který řeší rovnice zachování hmotnosti a hybnosti pomocí časového (nebo pseudo-časového) kroku. Jednou z výhod této formulace je její robustnost pro řešení toků s dominantními zdrojovými podmínkami, jako je rotace. Další výhodou sdruženého řešiče je to, že se výpočetní čas se lineárně mění s počtem buněk. Jinými slovy, míra konvergence se nezhoršuje, jestli síť má dostatečně dobré vlastnosti. Je potřebné připomenout že v této kapitole ne probíráme do-podrobna vlastnosti dané polyhedrální sítě, výhody a nevýhody daného řešiče. Podstatným ale je pochopit princip práce s programem a mechanismus volné konvekce. Kuehn



Obrázek 5.  
Mezikruží.



Obrázek 6. Síť



Obrázek 7. Nastavení řešiče

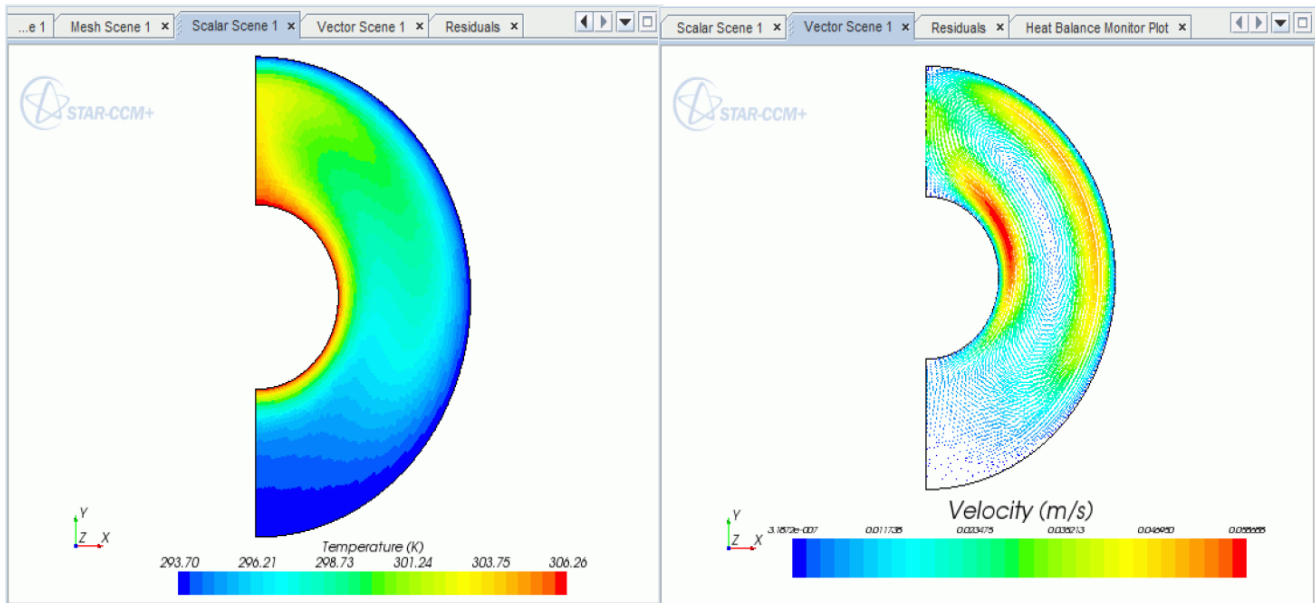
a Goldstein uváděli své experimentální a numerické výsledky ve formě ekvivalentní vodivosti. Tato ekvivalentní teplotní vodivost je definována jako poměr skutečného přenosu tepla měřeného (nebo předpovídaného) k přenosu tepla, kterého by bylo dosaženo pouze čistým vedením. To znamená,

$$\lambda_{ekv} = \frac{q_{akt}}{q_{kond}}$$

kde  $q_{kond}$  je definováno jako,

$$q_{kond} = \frac{2\pi\lambda\Delta T}{\ln(R_o/R_i)} = 2,177 \left[\frac{W}{m}\right]$$

Výsledkem provedené simulace je rozložení teploty, tlaků a rychlostí v kapalině uvnitř vodorovné válcové mezery. Dosažené výsledky jsou znázorněny na obrázku 8. Můžeme pozorovat, že se zkoumaná námi cirkulace objeví vždy nad dolním okrajem ohřívacího povrchu, kapalina, která se nachází v dolní části tělesa je v klidu. Taktéž z daného příkladu je vidět, že proudění v uzavřeném prostoru je podstatně složitější na odměnu od případu neomezeného prostoru. Za takových podmínek není prakticky možné určit součinitele přestupu tepla zvláště pro ohřívání a chlazení tekutiny. Právě proto se při zpracování výsledků měření a výpočtech, tento pochod nahrazujeme méně složitým pochodem, a to zavedením  $\lambda_{ekv}$  ekvivalentní tepelné vodivosti. Následně není potřeba v určení hodnot  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$ . Poměr ekvivalentní tepelné vodivosti k tep. vodivosti prostředí je  $\varepsilon_k$ , přičemž bereme do úvahy střední teplotu.  $\varepsilon_k = f(Gr.Pr)$ . Dle výsledku měření Bojarinceva, Mull-Reihera, Backmanna, Davisa víme že pro male hodnoty  $Gr.Pr < 1000$  je  $\varepsilon_k = 1$ . Což znamená že při tak malých hodnotách součinu je přenos tepla z teplejší do studenější stěny je zaručen výhradně tepelnou vodivostí tekutiny. Pro  $10^3 < Gr.Pr < 10^6$  je  $\varepsilon_k = 0,105(Gr.Pr)^{0,3}$ , pro  $10^6 < Gr.Pr < 10^{10}$  je  $\varepsilon_k = 0,40(Gr.Pr)^{0,2}$ . Vzájemným rušením proudění stoupajících a klesajících proudů tekutiny lze vysvětlit pokles intenzity přecházení tepla při větších hodnotách  $Gr.Pr$ . Všimněte si, Grashofovo číslo je definované poměrem vztlkových sil  $g\beta(T_s - T_{okolí})D^3$  k viskózním silám v mezní vrstvě. Kde  $g$  je gravitační zrychlení [ $m^2/s$ ],  $\beta$  je součinitel tepelné roztažnosti [ $K^{-1}$ ],  $T_s, T_{okolí}$  teplota stěny a okolí [ $K$ ],  $D$  je charakteristický rozměr [ $m$ ]. Jeho role ve volné konvekci je téměř stejná jako role Reynoldsova čísla v nucené konvekci. Prandtl udává poměr hybnosti a teplotní vodivosti. Obě čísla jsou bezrozměrná podobnostní kritéria. Z toho důvodu, že matematické řešení lze provést jen v určitých případech, mají obrovský význam zkoušky a experimenty. Při uspořádání experimentu je nutno vědět, které veličiny změříme, jakým způsobem zpracujeme výsledky, jaké mechanismy a pochody lze považovat za podobné. Na tyto tři otázky nacházíme odpověď z teorie podobnosti. V podstatě pojem podobnosti je možné rozšířit na libovolné



Obrázek 8. Průběh teplot a rychlosti ve válcové mezeře.

fyzikální jevy. Podobnosti proudění kapalin, t. j. kinematické podobnosti, podobnosti působících sil, díky kterým dosahujeme pohyb tekutiny, t. j. dynamické podobnosti, podobnost teplot, tepelných proudů atd. Když dokážeme pochopit souvislosti podmínek zkoumaných jevů potom budeme schopni využít podobnosti. Podobnosti stejného druhu lze popsat rovnicemi stejného tvaru a obsahu. Kritéria podobnosti se označují podle jména svého badatele. Např.  $Re$  (Reynolds),  $Eu$  (Euler),  $Nu$  (Nusselt), uvedené bezrozměrné veličiny jsou invariantní kritéria podobnosti.

„Jevy jsou podobné, jsou-li podobné okrajové podmínky a jsou-li z těchto podmínek odvozená kritéria číselně stejná.“-věta Kirpičevova-Guchmanova.

Závislost mezi jednotlivými podobnostními kritérii jsme běžně zvyknuti vidět například ve tvaru:

$$Nu = c \cdot Re^n \cdot Pr^m, \text{ kde } c, m, n \text{ jsou bezrozměrné konstanty} \quad (1.24)$$

kde  $c, m, n$  jsou bezrozměrné konstanty. Toto je empirický vzorec. Který platí v určitém rozsahu. Pomocí Nusselta vyjadřujeme poměr konvektivního a konduktivního přenosů tepla.

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} \quad (1.25)$$

Z analýzy vzorců (1.25) a (1.26) vyplývá že součinitel přestupu tepla je závislý na mnohých parametrech  $\alpha = f(\lambda, \mu, \rho, c_p, D, \dots)$ .  $D$  je charakteristický rozměr (viz obrázek 9).

Důležitým bodem v této diplomové práci je vysvětlení mechanismů přirozené konvekce do neomezeného prostoru. Rozlišujeme tři druhy volného proudění laminární, přechodové (vířnaté), turbulentní. Obecně při volném proudění do volného prostoru dosahujeme tři typy proudění najednou. Blíže ke zdroji tepla pozorujeme laminární tok, potom vířnatý, turbulentní. Laminární proudění převládá v případě teplotního spádu  $\Delta t < 15^\circ\text{C}$ , turbulentní  $\Delta t > 15^\circ\text{C}$ . Nastudujeme přirozenou konvekce do neomezeného prostoru na příkladu nekonečně dlouhého horizontálního válce. Pán Morgan V. T. ve své práci „The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders“ uvedl následující formu Nusseltovy kritériální rovnice:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} = C \cdot Ra^n \quad (1.26)$$

kde  $C$  a  $n$  jsou konstanty závislé na Rayleighově čísle.  $Nu$  a  $Ra$  jsou závislé na diametru cylindru. Hodnoty konstant jsou uvedené v tabulce číslo 2. Ze závislosti Nusseltova čísla na uhlu pootočení cylindru (viz obr. 10) je vidět že s narůstajícím se úhlem  $\theta$  klesá velikost



kriteriálního čísla Nusselta. Pokud je válec chlazen okolní tekutinou, vývoj mezní vrstvy při  $\theta = \pi$  probíhá tak že místní Nusseltovo číslo v tomto místě dosahuje své lokální maximum a tepelný proud sestupuje z válce.

Tabulka 2. Konstanty kritériální rovnice (1.26).

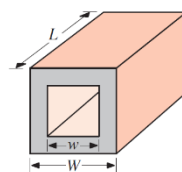
$Ra_D$	C	n
$10^{-10} - 10^{-2}$	0.675	0.058
$10^{-2} - 10^2$	1.02	0.148
$10^2 - 10^4$	0.850	0.188
$10^4 - 10^7$	0.480	0.250
$10^7 - 10^{12}$	0.125	0.333

### 1.2.3 Radiace

Tepelné záření je energie vydávaná hmotou, která má nenulovou teplotu. Přestože se zaměříme na záření z pevných povrchů, může docházet také k záření z kapalin a plynů. Bez ohledu na formu hmoty sálání existuje díky dějům v elektronových konfiguracích atomů,

přičemž vzniká na úkor jiným druhům energií. Energie radiačního pole je přenášena elektromagnetickými vlnami (nebo alternativně fotony). Zatímco přenos energie vedením nebo konvekcí vyžaduje přítomnost zprostředkujícího média, záření ne. Ve skutečnosti k přenosu záření dochází nejúčinněji ve vakuu. Zákony platné pro paprsky světla jsou platné i pro sálání, a to zákony lomu, odrazu, pohlcení.

Zvláštním příkladem záření je sálání v elektrických zařízeních, proto pro náš problém není vhodné zanedbávat danou složku přenosu tepla. Z toho důvodu, že rozvaděč se otepluje, ale rovněž i chladí se sáláním. Díky technologické revoluci v oblasti informačních technologií v posledních dvou desetiletích přinesl silný růst průmyslové produktivity, zlepšenu kvalitu života v celém světě. Díky mnohým vynikajícím řešením v oblasti informačních technologií bylo umožněno pokroky v disciplíně přenosu tepla, které zajistily přesnou regulaci teplot systémů. Od integrovaných obvodů v nanorozměrech, paměťová média v mikroskopu včetně kompaktních disků, až po velká datová střediska naplněná zařízeními, které generují teplo. Současně zařízení se zmenšily. Tepelné toky  $[W/m^2]$  se neustále zvyšují, ale provozní teploty zařízení musí být udržovány na přiměřeně nízkých hodnotách, aby byla zajištěna jejich spolehlivost. Podíl tepla odvedeného radiací v elektrických zařízeních je kolem čtyřiceti procent od celkového množství tepla. To znamená že sálání v elektrických zařízeních má skoro největší význam.



$$\frac{W}{L} < 1.4$$

$$\frac{2\pi L}{0.785 \ln(W/w)}$$

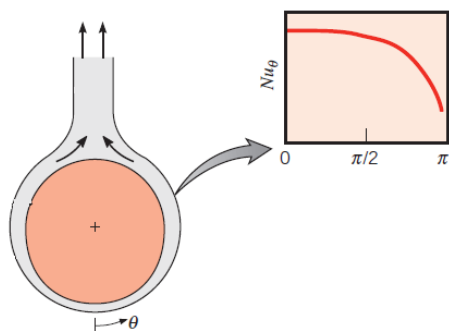
$$\frac{W}{L} > 1.4$$

$$\frac{2\pi L}{0.930 \ln(W/w) - 0.050}$$

$$L \geq W$$

Obrázek 9. Charakteristický rozměr [2]

Rozdíl pohlcené a vysávané energie udává množství odevzdaného a pohlceného tepla které se nerovná nule, platí to za předpokladu různé povrchové teploty těles podílejících se na sálavé výměně. Pro lepší pochopení přenosu tepla sáláním je důležité popsat děje na osálaném



Obrázek 10. Popis vzniku tepelného proudění z válce. [2]

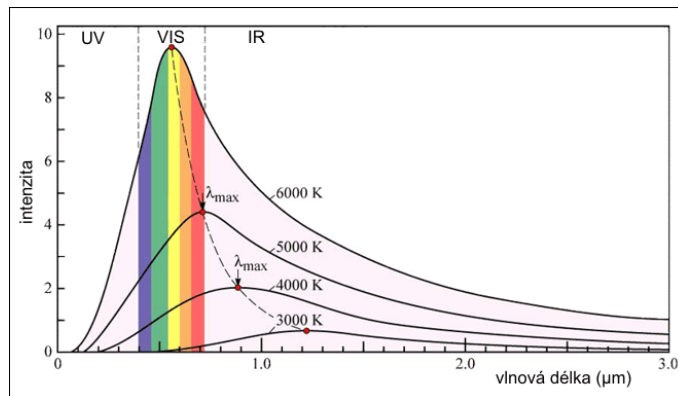
povrchu (viz obrázek 12), totiž to co se děje s sálavým teplem dopadajícím na plochu. Teplo  $Q_o$  dopadá na těleso,  $Q_A$  je teplo absorbované,  $Q_R$  je teplo odražené,  $Q_D$  je část tepla  $Q_o$  které přejde skrz těleso. Platí:

$$Q_o = Q_A + Q_R + Q_D \quad (1.27)$$

Dělením rovnice (1.27) dostaneme:

$$A + R + D = 1 \quad (1.28)$$

kde  $A$  je poměrná tepelná pohltivost tělesa,  $R$  je poměrná tepelná odrazivost,  $D$  je poměrná tepelná průteplivost. Jsou to bezrozměrné veličiny (mění se od 0 po 1). Dále rozlišujeme dokonale černé těleso  $A = 1$ .  $R = 1$  v případě difuzního odrazu je těleso dokonale bílé,



Obrázek 11. Množství energie, vyzářené z povrchu tělesa.

v případě odrazu zohledňujícího zákony geometrické optiky je těleso zrcadlové.  $D = 1$  je těleso diatermní, dokonale průteplivá. Je potřebné připomenout, že v přírodě neexistuje dokonalé černé těleso atd.. Důležitou podkapitolou jsou zákony: Plankův, Stefan-Boltzmannův, Kirchhoffův. [2]

- **Planckův zákon**

Pomocí, kterého je daná souvislost emisní mohutnosti s délkami vln pro dokonalé černé těleso. (viz obrázek 11)

$$E_{0,\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (1.29)$$

kde  $\lambda$  je délka vlny v  $m$ ,  $T$  absolutní teplota tělesa v  $K$ ,  $c_1$  a  $c_2$  jsou konstanty. Průběh emisní mohutnosti pro reálné tělesa (reálné materiály) se stanovuje na základě zkoušek. Většinou materiály, které používáme v průmyslu jsou šedá tělesa. Šedá tělesa jsou tělesa spektrum záření, kterých má podobný průběh jako pro dokonalé černé těleso.

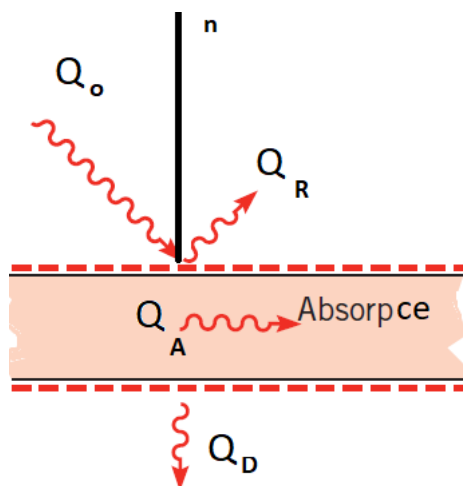
- **Stefan-Boltzmannův zákon**

$$E_0 = \sigma_0 T^4 \quad (1.30)$$

kde  $\sigma_0$  je konstanta sálání dokonalé černého tělesa. Porovnáním energie záření šedého tělesa s absolutně černým při stejné teplotě, dostaneme poměrnou pohltivost (emisivitu).  $\varepsilon$ -emisivita mění se od 0 do 1.

- **Kirchhoffův zákon**

Říká že čím je větší emisivita tělesa tím je větší sálavost tělesa.



Obrázek 12. Sálání.[2]



### 1.3 Závěr analýzy tepelných pochodů, které bychom mohli použít při analýze rozvaděče UniGear ZS1 z hlediska disciplíny termodynamiky.

Můžeme si představit obecnou diferenciální rovnici šíření tepla v následujícím tvaru. Na obr. 12 je označen imaginární objem tělesa  $V$ , který je ohraničen plochou tělesa  $A$  a plochou  $A_o$  s okolím. Uvažujemeli všechny tři složky popsané v předešle podkapitole má obecná diferenciální rovnice šíření tepla tvar:

$$\iint_A \lambda \cdot \text{grad}(T) dA - \iint_{A_o} \alpha(T - T_o) dA_o + \iiint_V \sigma dV = \iiint_V \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV \quad (1.31)$$

Kde  $\sigma$  je výkon tepla v elementárním objemu za jednotku času. Daný výkon tepla si můžeme rozumět např. indukční ohřev, anebo záření. S použitím metody per-partes a Gaus-Ostrogradského věty a integrování podle objemu  $V$  dostaneme:

$$\frac{\lambda}{\rho c_p} \cdot \text{div}(\text{grad}(T)) - \frac{\alpha}{\rho c_p} (T - T_o) \frac{\partial A_o}{\partial V} + \frac{\sigma}{\rho c_p} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1.32)$$

Takovým způsobem jsme popsali teplotové pole. Víme, že Joulovo teplo v rozvaděči je závislé na teplotovém poli a naopak  $\frac{\partial T}{\partial t} \sim \frac{\partial Q}{\partial t} = I^2 R$ .

## 2 Analýza jednotlivých částí rozvaděče.

Rozvaděče vysokého napětí jsou tvořené skupinou zařízení, které slouží ke spínání, jištění, měření v síti. To znamená že dané zařízení musí spojovat, odpojovat jednotlivé části elektrické sítě vypínat/zapínat provozní a poruchové proudy, taktéž musí spojovat/odpojovat části sítě bez proudu, naprázdno. Z toho sleduje že musíme jistit síť proti přetížení, zkratu, přepětí, poruchových stavů. Co znamená že musíme zabezpečit Měření a Regulace. V této kapitole jsme se budeme věnovat problematice rozdělení rozvaděčů a provedeme analýzu na čem závisí funkčnost jednotlivých rozvaděčů. Za každý výše uvedený nevyhnutný k provozu sítě vysokého a velmi vysokého napětí účinek je zodpovědní vypínač. Je potřebné připomenut že během vývoje rozvaděče se zjistilo, že všichni manipulace z zařízením jsou spojené se vznikem oblouku. Přičemž vznik byl v té době považován za nežádoucí jev. Víme že ke každé nepříjemné, negativní skutečnosti patří obracení z maximální účinnosti daného projevu na výhodu. Dane pravidlo platí i pro náš případ. Oblouk jako takový umožňuje „...převod proudu v proudovém intervalu vypínacího pochodu, kdy je třeba dopravit kontakty do dostatečné vzdálenosti nutné pro udržení zotaveného napětí. Oblouk při průchodu střídavého proudu nulou umožňuje také přerušeni proudu a velmi rychlou změnu vodivého sloupce plazmatu mezi kontakty na nevodivý; tím se uskuteční vypnutí obvodu.“ [10]. Otázkou je jaký jev objasní kam mizí energie uvolněna v průběhu mikrosekund, jaký jev nám objasní kam mizí energie uvolněna změnou elektrické vodivosti o 10 řádů za podmínky vysokého napětí stovky, desítku kilovoltů? Odpověď na dany dotaz je nalezena metodou analogie. Princip je stejný jako u přeměny disipace energie v čerpadle, brzdách auta atd. Všechny ztráty vyvolané podobným principem rovněž i změnu elektrické vodivosti lze vyvolovat odvodem tepla. Teda změnou tepelné vodivosti, což znamená že vodivosti tepelná i elektrická jsou na sobě závisle. [10], [11]

### 2.1 Rozdělení rozvaděčů

K uhašení oblouku používáme zhášecí principy izolantů. Rozvaděče vysokého napětí dělíme podle způsobu izolace vypínače (angl. Circuit Breaker):

- Olejová izolace
- Vzduchem izolované
- Izolované malým objemem oleje
- SF6 (plyn)
- Vakuová izolace

Za účelem obsluhy je potřebné se dostat do vnitřního prostoru rozvaděče, proto je potřebné zohledňovat hodně faktorů které mají vliv na návrh rozvaděče. Jeden z takových faktorů je teplota stěn obklopujících vnitřní prostor rozvaděče. Teplota stěn rozvaděče ne může přesahovat rozdíl v 5 K od teploty okolního prostředí. Různé konstrukce a koncepty rozvaděčů mají různé podmínky použití a cenu. Vypínače jsou schopny přerušit poruchový proud, anebo přerušit provoz zařízení. Některé vypínače mohou přerušit jenom zátěžový proud. Zatímco jiné mohou být mimo provozu pouze mimo obvodu, totiž to bez napětí. A pomocí některých vypínačů jsme schopné zaručit bezpečnost servisního technika i bez přerušeni proudu.

Zhášecí principy:

- Magnetický princip. Spočívá v pohybu oblouku magnetickým polem, přičemž pohyb se uskutečňuje v úzkých štěrbinách. Tím pádem pod silovým účinkem elektrického proudu docílíme dostatečné vzdálenosti jednotlivých ploch mezi, kterými probíhá zkrat.
- Sfouknutí oblouku. Proud plynu, který slouží jako elektrický izolant je vyvolán tlakoplynovým principem (z tlakového zásobníku přes zhášecí trysku), anebo pneumatickým principem.

- Chlazení oblouku s následným ofukováním. Plyn vzniklý rozkladem kapaliny chladí a ofukuje oblouk. Jako pracovní látka se používá olej.
- Chlazení oblouku. Plyn v tomto případě je uvolněn z pevných stěn zhašející komory.
- Zhašení oblouku vyhořením elektrovodivých makročásteček. Můžeme si tento princip představit jako např. spalování paliva. Při ponoření zápalky do skleněného poháru hoření bude trvat, dokud bude přítomné okysličovadlo uvnitř poháru a samotné palivo. To znamená že zhasíme oblouk hořící v párách kovů. Elektroda se taví a následně vypařuje. Daný princip nazývá se vakuovým.
- Zhašení oblouku. Zhasíme oblouk v zrnitém hasivu.

Dané principy byly zkoušeny začátkem 20. století. Dalších 30 let byly zatlačeny principem chlazení oblouku. Vývoj pokračoval od kotlového provedení, které potom bylo doplněné zhašecí komorou a později v průběhu dalšího zdokonalení olejového vypínače vznikl máloolejový vypínač. Kotlové provedení je uskutečněné ponořením do umístěním kontaktů v nádobě s olejem. Pod účinkem varu pracovního média vznikly oblouk zhasíná pod hladinou oleje v bublině páry. Ke tlakoplýnovému principu vývoj se vrátil v třicátých letech. Díky zkoumání fyziky oblouku, objevení nových materiálů v povaleční době se začal vývoj dalších zhašecích principů. Ve výsledku se objevily izolanty SF6 a vakuum, které jsou používány v rozvaděčích UniGear ZS1. [10], [11]

## 2.2 Rozdělení jednotlivých elementů rozvaděče vysokého napětí

Vliv na konstrukci, montáž i obsluhu má funkce elementů, přístrojů v rozvaděči. Proto lze přístroje, které tvoří rozvaděč rozdělit do třech skupin:

- Spínací
- Ochranné a jisticí. Používáme za účelem ochrany části obvodu před účinky přepětí a nadproudů.
- Měřicí

Přičemž všichni přístroje z těchto skupin jsou schopné pracovat samostatně, anebo dokážou být integrované do velkého celku – rozvaděčů. Dále rozdělíme každý element sítě, největší z nich jsou spínací přístroje. Z konstrukčního hlediska spínací přístroj rozčleníme na pět částí:

- Proudovodné
- Zhašedla
- Mechanismus
- Izolační části
- Výzbroj

Proudovodné, izolační části a mechanismus obsahuje každý spínací přístroj. Kritériem pro spínací přístroje je velikost spínacího proudu. Proto z daného hlediska víme o přístrojích, které nemají žádné zařízení pro zhašení oblouku, slouží k ochraně servisních techniků. Jsou to přístroje bez oblouku. Můžeme si jich představit jako odpojovače, uzemňovače, přepojovače. Další skupinou rozumíme prosté přístroje. Je to přechodová skupina mezi vypínače a přístroje bez oblouku. Slouží ke spínání obvodů pod jmenovitým proudem, ale nejsou konstruované pro vypínání zkratů.

Měřicí přístroje jsou to v podstatě přístrojové transformátory. Základní funkci je transformování hodnot proudů a napětí tak abychom dokázali připojit měřicí, jisticí a regulační přístroje, které jsou oddělené od silového obvodu. [10], [11]

### 2.3 Požadavky na VN Rozvaděč z termodynamického hlediska

Konstrukční provedení musí zabezpečit:

- Režimy pracovní i poruchové z hlediska izolačních vlastností, oteplení, zkratové tepelné odolnosti, zkratové dynamické odolnosti, odolnosti proti vlivům prostředí.
- Servis, to znamená zajištění ochrany proti nebezpečnému dotyku a bezpečnosti obsluhy jak při normálním provozu, tak i při poruchách a haváriích.
- Nepříznivé vlivy na okolí musí být omezené. Platí to např. pro izolant SF<sub>6</sub>, který má GWP=22000. Eliminace vzniku požárů a výbuchů. Ochrana proti vnitřnímu obloukovému zkratu, omezení jeho účinku.

Proto musí být zohledněné následující opatření, které jsou popsány příslušnými normami. Pro vzduchem izolovaný rozvaděč platí hodnoty uvedené v tabulce číslo 3.

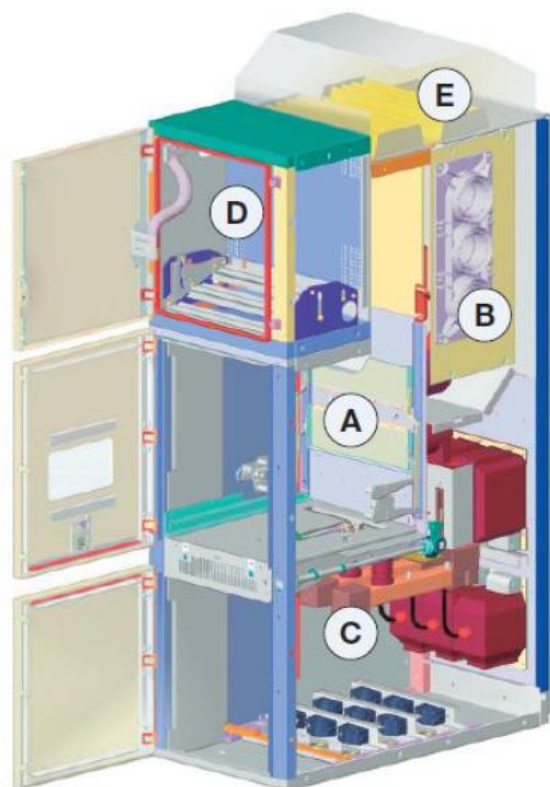
Tabulka 3. Přehled požadavků na materiály rozvaděčů.

Druh součástí	Nejvyšší dovolená teplota/Nejvyšší dovolené oteplení (°C, K)
Kontakty měděné	75/35
S povlakem Ag, Ni	105/65
S povlakem Sn	90/50
Svorky pro připojení vnějších obvodů	
Měděné holé	90/50
S povlakem Ag, Ni, Sn	105/65
Šroubové měděné holé spole	
S povlakem Ag nebo Ni	90/50
S povlakem Sn	105/65
Olej ve spínacích přístrojích kovové nebo izolační díly ve styku s olejem	90/50 100/60
Izolační díly nebo kovové díly ve styku s izolanty uvedené třídy podle ČSN EN 60085.	Y 90/50, A 100/60, E 120/80, B 130/90, F 155/115, H 180/140
Vodiče holé měděné nebo hliníkové (ocelohliníkové)	Provozní teplota 70 °C Nejvyšší teplota (při zkratu) 300 °C
Lana a trubkové vodiče měděné nebo hliníkové (pro venkovní rozvodny)	Provozní teplota 90 °C Nejvyšší teplota (při zkratu) 300 °C

Dané hodnoty vycházejí z nejvyšší teploty okolí 40 °C. To znamená, že při nižší teplotě okolí jsme schopni volit větší oteplení. Z výše uvedeného vyplývá, že musíme dimenzovat zařízení při různých podmínkách s ohledem na dovolené hodnoty, které jsou uvedené v normách. Podmínky jsou následující:

- Dimenzování na účinky zkratových proudů. V daném případě vycházíme z předepsaných hodnot tepelného a dynamického proudu. Nás zajímá kombinované namáhání, proto že pevnost vodičů je závislá i na teplotě.
- Dimenzování podle proudů v ustálených a přechodných stavech. Dáno ochlazováním a dovolenou teplotou vodičů a spojů.
- Dimenzování podle jmenovitého napětí a příslušných izolačních hladin. Rozumíme jako zohlednění napěťové pevnosti jednotlivých zařízení a celku. V takovém případě máme dvě možnosti, a to dodržet minimální vzdušné vzdálenosti, anebo musí být zaručeno, že zařízení vydrží předepsané zkušební napětí. [10], [11]

## 2.4 Analýza rozvaděče UniGear ZS1



Obrázek 13. UniGear ZS1

- A. přístrojový oddíl,
- B. přípojnicový oddíl,
- C. kabelový oddíl,
- D. pomocný oddíl,
- E. odfukový kanál.

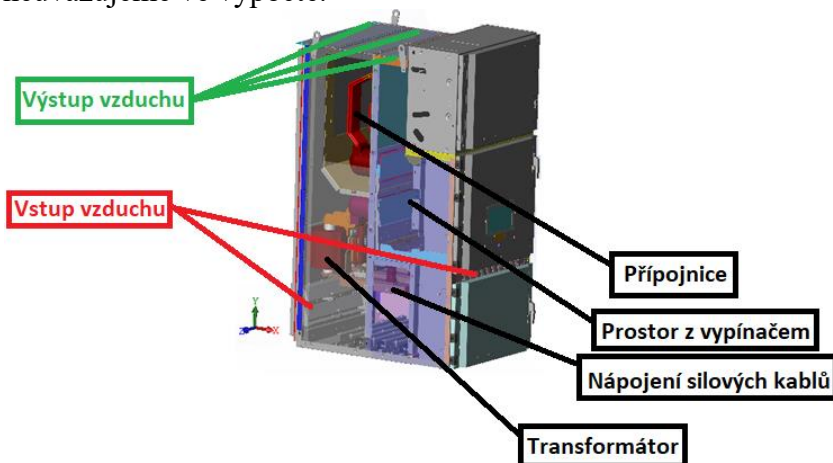
Přístrojový oddíl (A) obsahuje veškeré nutné vybavení nutné pro provoz a servis rozvaděče, je tam umístěný vypínač. V poloze zkušební/odpojené je stále vypínač ve skříni a dveře jsou uzavřené. Je vybaven tlačítky zapnuto/vypnuto a průhledítkem, mechanické ukazatele pro nastřádáno/nenastřádáno jsou vidět průhledítkem. Při spínání jsou dveře zavřené. Vypínač se posouvá mezi pracovní a zkušební/odpojenou polohou pomocí šroubového mechanismu, pohon ruční, anebo servopohon.

Prostoru přípojnic (B) je spojen s hlavním přípojnicovým systémem pomocí přípojovacích pásů. Konstrukčním materiálem je měď. Profil přípojnic závisí na proudu. Pro proud 2500 A byly použity ploché vodiče. Pro jmenovité proudy 3150 A, 3600 A a 4000 A byl zvolen „D” profil. Přípojnice jsou izolované pomocí teplem

smrštitelné izolační hadice. Ve výpočte se neuvažuje proto, že má nulový dopad na vedení tepla (tepelná vodivost) a záření (emisivita).

Kabelový oddíl (C), vodiče jsou zde ploché měděné. Vodiče mohou být opět izolovány. Kabelový oddíl obsahuje transformátory a uzemňovač. Pro transformátor uvažujeme že je zalitý epoxidovou pryskyřicí plněnou sklem v poměře 20 % vůči množství epoxidu.

V pomocném oddílu (D) jsou umístěny ovládací prvky, přičemž daný prostor neuvažujeme ve výpočte.



Obrázek 14. Popis rozvaděče.

Odfukový kanál (E) slouží pro odvod spalin vzniklých při obloukovém zkratu, odvod tepla i v běžném provozu. Pro odvedení spalin a tepla slouží vzduchotechnické potrubí. V případě že není možnost odvedení spalin a teplého vzduchu mimo prostor rozvaděče, vzduchotechnické potrubí je vybaveno filtry i odváděcími komíny. [12]

## 2.4.1 Okrajové podmínky při provozu rozvaděče UniGear ZS1

Teplota:

- Minimální okolní teplota vzduchu:  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Maximální okolní teplota vzduchu:  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Vlhkost:

- Maximální relativní vlhkost za dobu 24 hodin nesmí překročit hodnotu 95 %
- Maximální tlak vodních par za dobu 24 hodin nesmí překročit hodnotu 2,2 kPa
- Maximální relativní vlhkost za dobu jednoho měsíce nesmí překročit hodnotu 90 %.
- Maximální tlak vodních par za dobu jednoho měsíce nesmí překročit hodnotu 1,8 kPa

Normální provozní nadmořská výška je do 1000 m nad hladinou moře. Předpokladem je normální, nekorozivní a neznečištěná atmosféra v místě instalace rozvaděče. [12]

## 2.4.2 Normy, které musí splňovat rozvaděč UniGear ZS1. [12]

- IEC 62271-1 pro všeobecné aplikace a účely
- IEC/EN 62271-200 pro rozvaděč
- IEC 62271-102 pro uzemňovače
- IEC 62271-100 pro vypínače
- IEC 60071-2 pro koordinaci izolace
- IEC 60470 pro stykače
- IEC 60265-1 pro odpínače

## 2.4.3 Materiály použité v rozvaděči UniGear ZS1.

### 2.4.4

Tabulka 4. Přehled použitých materiálů.

Číslo řádku	Název	Materiál	Hustota	Tepelná vodivost	Emisivita
1	Proudovodná dráha	Cu ETP-250	8900	385	0,07
2	Konstrukční kovové díly	DX51D+ZM	7830	48	0,8
3	Ploché a ohýbané izolační díly	ABS 1631	1220	0,2	0,9
4	Odlévané izolační díly (izolátory, komory)	Epoxid, 20% sklo.	-	-	-
5	Izolační hadice na vodičích	BPTM	-	-	-

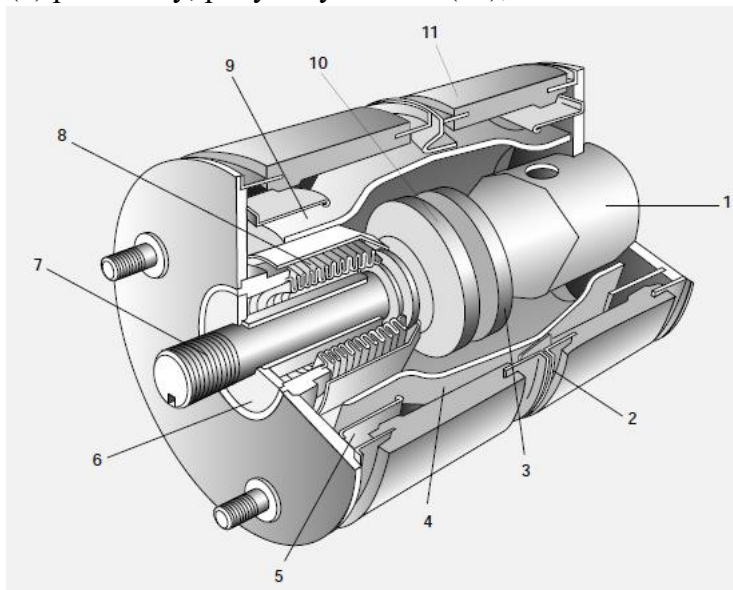
Jak je z tabulky č. 4 patrné, v řádku č. 4 a 5 ne jsou uvedeny termodynamické vlastnosti. Důvodem je neuvážování daných vlastností proto, že z naměřených dat, které poskytla společnost ABB jsou známy jenom povrchové teploty. To znamená že nás ne zajímají vlastnosti odlévaných izolačních dílů, když transformátor je zalitý epoxidem a teplota je naměřena na jeho povrchu (na kovu). V případě izolační hadice platí, zanedbatelná tepelná vodivost a tloušťka. Emisivitu izolační hadice neuvážujeme z toho důvodu, že ji naznáme, na místo toho uvažujeme emisivitu mědi.

#### 2.4.5 Konstrukce jednotlivých členů rozvaděče.

V dane podkapitole jsme podrobně popsána konstrukce hlediska složení vypínače, transformátoru. Znalost a pochopení konstrukce nám pomůže při tvorbě geometrii rozvaděčů.

##### Vypínač.

Je tvořen dvojicí kontaktů, umístěných mezi vypařovací elektrodou a vodičem. Typické provedení je znázorněno na obrázku č. 15. Kde (1) je samotný kontakt, který je napojen na kontakt (3), jenž vyhoří v případě poruchy. Hlavní výhodou vakuového vypínače je vysoká odolnost vůči abrazivním účinkem proudu, která zaručuje 30 let provozu bez žádného servisu. Pružná manžeta (2) slouží jako eliminátor dilatace. Geometrie elektrody (3) je návržená tak aby unesla hustotu toku  $106-108 A/cm^2$  a rychlost toku elektronů  $106 cm/s$ . Ochranný štít (4), elektrovedivá dráha (5), vypínač (6), pohyblivý kontakt (7), pružný vlnovec (8), ochranný štít (9) pro měchy, pohyblivý kontakt (10), sklo-keramické tělo (11). [10], [11]



Obrázek 15. Vakuový vypínač

##### Transformátor

Podle výkresové dokumentace předpokládáme instalace toroidního transformátoru.

Toroidní transformátory proudu mohou mít vzduchovou izolaci nebo izolaci z epoxidové pryskyřice. Používají se k napájení měřicích a ochranných zařízení.

Transformátory mají buď uzavřené, nebo dělené jádro. Oba typy se používají pro měření fázových proudů nebo detekci proudu zemní poruchy. Vyhovují normám IEC 61869-1 a IEC 61869-2, které plně nahrazují předchozí normu IEC 60044-1. V našem případě jsou zalité v epoxidové pryskyřice. [12]

### 3 Algoritmus řešení a analýza vhodných nástrojů.

Rozeznáváme dvě metody, používané pro termickou analýzu rozvaděčů, PCB desek, elektrických pecí, atd.. Jsou to metody založené do jisté míry na stejných principech. Každá z nich respektuje zdroj tepla, ale jenom jedna zaznamenává pohyb tekutin vyvinuty uvolněním energie. Jsou to metody TNM (angl. Thermal network method) a CFD (angl. Computational Fluid Dynamics). Metoda TNM je založená na principu modelování toků elektrického proudu ve vodiči kde dochází k disipaci energie a na základě tohoto děje uvolňuje se teplo. Dany princip je velmi dobře popsán Thomasem Maxvellem v knize Heat Transfer in Electrical equipment. Nevýhodou dané metody je nepřesnost. Důvodem je jednoduchá skutečnost, a to numerické chyby při výpočtu toku elektrického proudu a potom chyby při výpočtu šíření tepla. V případě CFD analýzy numerické chyby, vyvolané počítáním toku elektronů jsou zaměněné měřením veličin přímo na rozvaděči.

Další nevýhoda TNM metody je omezení možnosti předpokladů proudění chladicího média v rozvaděči. Což znamená, že není realizovatelné analyzovat chování celého celku proto, že není zahrnut skutečný odvod tepla. Například prostor s přípojnými v některých provedeních je tvořen uzavřeným prostorem a jenom v případě zkratu, kdy dochází k tlakově vlně, přetlakové klapky se otevřou v horní části rozvaděče. Tím pádem se prostor z časem stále otepluje a zvyšuje se odpor, disipace narůstá. TNM metoda neregistruje danou skutečnost. Právě z těchto důvodů byla k řešení dané problematiky zvolena metoda CFD.

#### 3.1 Vhodný řešič a okrajové podmínky.

Při volbě vhodného řešiče vychází především z pochopení mechanismů odvodu tepla v rozvaděčích daného typu, doporučení při modelování přirozeného proudění a vlastních zkušeností. Mechanismus volné konvekce je popsán v teoretické části diplomové práce, doporučení při modelování byla poskytnuté vedoucím diplomové práce, konzultantem a jsou uvedena a zdůvodněna dal v této kapitole. Při řešení praktické části bylo potřeba vyřešit několik problémů, souvisejících se zvoleným způsobem řešení. Nejvýznamnější problémy byly: divergence reziduí, fyzikální rozpor chování proudu (teplý vzduch klesá ve směru působení gravitační síly, chladný vzduch naopak stupa proti směru gravitační síly), zvolení správných okrajových podmínek, nastavení správné hodnoty vztlaku. Všechny problémy se podařilo odstranit cestou studia původu problému, metodou pokusů a omylů, analýzou chyb.

##### 3.1.1 Okrajové podmínky

Na základě poskytnutých dat od konzultanta, nastudování části rozvaděče, byly stanoveny součásti, které jsou anebo nejsou zdrojem tepla. Okrajovou podmínkou na vstupu a výstupu byla zvolena tlaková podmínka (angl. pressure outlet), která je definována jako okrajová podmínka na výstupu/vstupu a je definována příslušným tlakem. Tento tlak je možné považovat za statický tlak prostředí z/do kterého tekutina vstupuje/vystupuje. Za běžných podmínek volíme tlakovou podmínku na výstupu a na vstupu hmotnostní tok (angl. flow rate), anebo rychlostní podmínku (angl. velocity inlet). V našem případě neznáme hmotnostní toky, ale známe povrchové teploty povrchů rozvaděče, přes které prochází proud a musíme tedy dopočítat vztlak a následně i rychlostní pole. Proto byla zvolena okrajová podmínka „pressure outlet“. Toto nastavení může vyvolat problém spojený z fyzikálním rozporem, problémy z konvergencí. Zmíněné problémy byly odstraněny zvolením vhodného fyzikálního řešiče, výpočtem nejprve stacionárním prouděním, kdy po částečném ustálení rychlostního pole následně proveden nestacionární výpočet s příslušným časovým krokem (s ohledem na Courantovo číslo). Veškeré pevné povrchy byli definované podmínkou pevná stěna (angl. wall). Pro rovnoměrné rozložení proudu a lepší konvergenci výpočtu na vstupu a výstupu z a do rozvaděče byla zvolena specifikace zpětného toku (angl. backflow specification) s



podmínkou „normála“ (boundary normal) namísto standardního nastavení extrapolování (angl. extrapolated). Jak ukázal provedený výpočet v případě jakéhokoliv nastavení řešiče vždy v nějaké skupině buněk vznikne extrémní hodnota rychlosti, která výrazně ovlivní celý výpočet. Právě daná skutečnost je projevem jednoho z nedostatků zvolených okrajových podmínek. Dalším nedostatkem je projev fyzikálního rozporu, vyvolány neurčitostí samotného výpočtového modelu, kvůli tomu že program Star CCM+, stejně jak i jiné softwary, jsou přednastavené takovým způsobem že známe průtok, rychlost na vstupu a neznáme, jak se bude chovat model vůči geometrii a dalším podmínkám. Důsledkem byly objeveny rozpory s fyzikální podstatou problému, kdy byly vytvářeny sestupné proudy teplého a vzestupné proudy studeného média. Hlavní problém spočíval v tom, že samotný pohyb je realizován vztlak a vztlak od rozdílů gradientu teplot od ohřívajících povrchů rozvaděče. To znamená že musíme zvolit jednu okrajovou podmínku, která by respektovala nasávání vzduchu vlivem podtlaku a ještě jednu, která by odváděla vzduch z prostoru rozvaděče vlivem přetlaku. V obou případech je to podmínka „pressure outlet“. Program nerozuměl, co má proudit, jak a kam, proto v případě 2D simulací nekonečné dlouhého válce s povrchovou teplotou o 50 K vyšší od teploty okolí proud vstupoval přes horní část kontrolního objemu ve směru působení gravitace a vystopoval stejným směrem přes spodek kontrolního objemu, čímž byl vytvořen karmánový vir. Tento fyzikální rozpor se objevoval jenom v případě nevhodné zvolených řešičů, přičemž residuá dost rychle konvergovali a program se tvářil že tvoření karmánových virů v případě simulace volné konvekce je v pořádku.

### 3.1.2 Volba řešiče.

Výhodou metody CFD je schopnost řešení turbulence, která významně ovlivňuje parametry proudění a tím také přenos tepla v rozvaděči. Samotné modelování turbulence se stále rozvíjí a metody řešení daného problému se inovují. Podstata turbulence není snadno řešitelná i v dnešní době. Není žádný univerzální postup řešení, a proto daná část práce je věnovaná volbě vhodného řešiče pro danou aplikaci. Jednotlivé modely turbulence jsou založené na empirických znalostech. Známe tři typy, které jsou odvozené z Navier-Stokesove rovnice, rovnice kontinuity a dalších. Nejznámější modely turbulence jsou:

- DNS je přímá numerická simulace. S rostoucím Reynoldsovým číslem roste požadavek na výpočetní techniku. Řeší soustavu rovnic přímo, to znamená bez jakéhokoliv zjednodušení. Není pro náš případ vůbec použitelná.
- LES znamená modelování velkých virů. Lze řešit s použitím dnešní výpočetní techniky, ale stále má velké nároky na počítač. Není pro náš případ použitelná.
- RANS aplikuje statické metody při řešení zjednodušených základních rovnic. Je pro náš případ použitelná. A dál budeme popisovat tuto metodu podrobněji.

Modelem turbulence nazýváme systém řešitelných rovnic. Systém rovnic je tvořen empirickými vztahy, přídatnými rovnicemi. Musíme vyřešit Turbulentní viskozitu (je definovaná výše, viz 1.2.2) za tímto účelem použijeme hypotézu Boussinesqua, která definuje tenzor smykových napětí pomocí Turbulentní viskozity. Modely založené na této hypotéze jsou řešené pomocí dodatečných rovnic. Jednotlivé modely jsou odlišné počtem dodatečných diferenciálních rovnic. Na základě prostudované literatury a článků pro náš případ jsou použitelné dvourovnicové modely. Nejznámější je algebraický model turbulentní viskozity, formulovaný Prandtlm:

$$\mu_t = \rho l_{mixing}^2 \left| \frac{du}{dy} \right| \quad (1.33)$$

kde  $l_{mixing}^2$  je směšovací délka,  $\left| \frac{du}{dy} \right|$  je smyková rychlost (angl. Shear rate).

Prandtlův model a další podobné modely používají aproximace rychlostního profilu, kdy je v malé oblasti u stěny charakter proudění je laminární. Výška této oblasti je menší než tloušťka mezní vrstvy. Vzniká otázka, jak je možné vypočítat rychlostní profil. Za předpokladu že smykové napětí na stěně  $\tau_w = const$ . V případě laminárního proudění konstanta  $\tau_w$  může být použita pro definice referenční rychlosti:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (1.34)$$

kde  $u^*$  je referenční rychlost (anebo angl. Friction velocity).

$$\tau_w = \mu \frac{du}{dy} \Rightarrow u = \tau_w \frac{y}{\mu} \Rightarrow u = \frac{\rho u^{*2} y}{\mu} \quad (1.35)$$

Takto vyjádřená rychlost nám dává možnost lépe objasnit dimenzionální podstatu mezní vrstvy a zákon stěny (angl. Law of the wall).

$$u^* = \frac{u}{u^+} \Rightarrow u^+ = \frac{\rho u^* y}{\mu} \Rightarrow u^+ = y^+ \quad (1.36)$$

Platí to pro laminární vrstvu. Kde  $u^+$  je bezrozměrná tangenciální rychlost,  $y^+$  je stěnová funkce. Vidíme že definice  $u^+$  podobná Reynoldsovu číslu. Dále popíšeme turbulentní jádro. Smykové napětí opět předpokládáme konstantní. Z Nikuradse rovnce popíšeme směšovací délku a dosadíme do definice smykového napětí:

$$\tau_w = \rho \kappa^2 y^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \Rightarrow u^* = \kappa^2 y^2 \left(\frac{du}{dy}\right)^2 \quad (1.37)$$

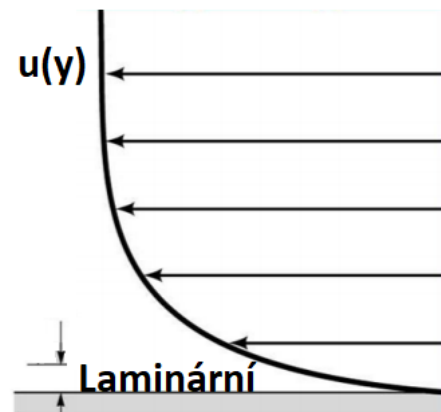
$$\int du = \int \frac{u^*}{\kappa y} dy \Rightarrow \frac{u}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln y + C_1 \Rightarrow u^* = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + C_2 \quad (1.38)$$

kde  $C_1$  a  $C_2$  jsou konstanty,  $\kappa$  je Kármánova konstanta, která vyjadřuje lineární změnu směšovací délky v závislosti na vzdálenosti od stěny. V turbulentní vrstvě rychlostní profil je logaritmický, laminární vrstva je charakterizována  $y^+$ , jehož parametrem je dimenzionální číslo 5. Jsou to velmi důležité údaje pro návrh výpočetní sítě. Algebraické modely nemůžou objasnit pohyb vírů, které závisí na pohybu tekutiny vyvolaných konvekci. Daný matematický model představuje nularovnicový model. Pro dvourovnicové modely hodnoty stěnové funkce hrají důležitou roli při definování okrajových podmínek a kladou požadavky na kvalitu sítě, která má obrovský vliv na správnost výpočtů. Známe následující typy stěnových funkcí:

- Nízké  $y^+$ .  $y^+ \leq 1$
- Vysoké  $y^+$ .  $30 \leq y^+ \leq 300$
- Kombinované  $y^+$ .
- Two-Layer All  $y^+$  doslovný překlad dvou vrstva kombinovaná.

Pohyb vírů jsou schopné popsat transportní rovnice pro  $k$  turbulentní kinetickou energii  $\left[\frac{m^2}{s^2}\right]$  a  $\varepsilon$  je rychlost disipace turbulentní kinetické energie  $\left[\frac{m^2}{s^3}\right]$ . Turbulentní viskozita může být definována:

$$\mu_t = \rho f(k, \varepsilon) \quad (1.39)$$



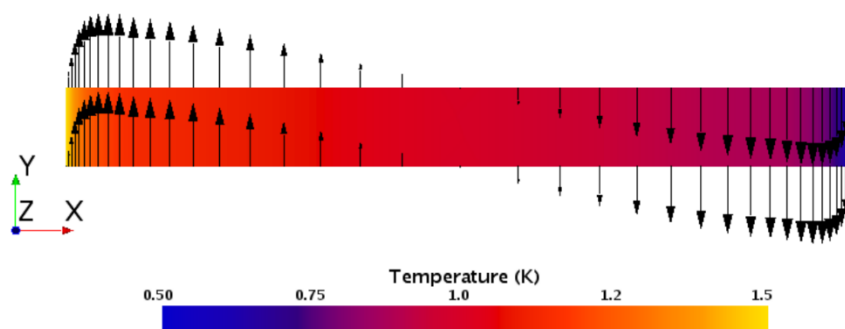
Obrázek 16. Rychlostní pole.

Dvourovnicový model k-Epsilon je relativně správný, realizovatelný a využitelný pro vysoké i nízké Reynoldsova čísla. Koncept turbulentní viskozity má hodně nedostatků, je definován pro izotropní proudy a samotná  $\mu_t$  je skalár. Důležitým je že  $\mu_t$  nezávisí na vlastnostech chladícího media, ale na rychlostním poli. [13]

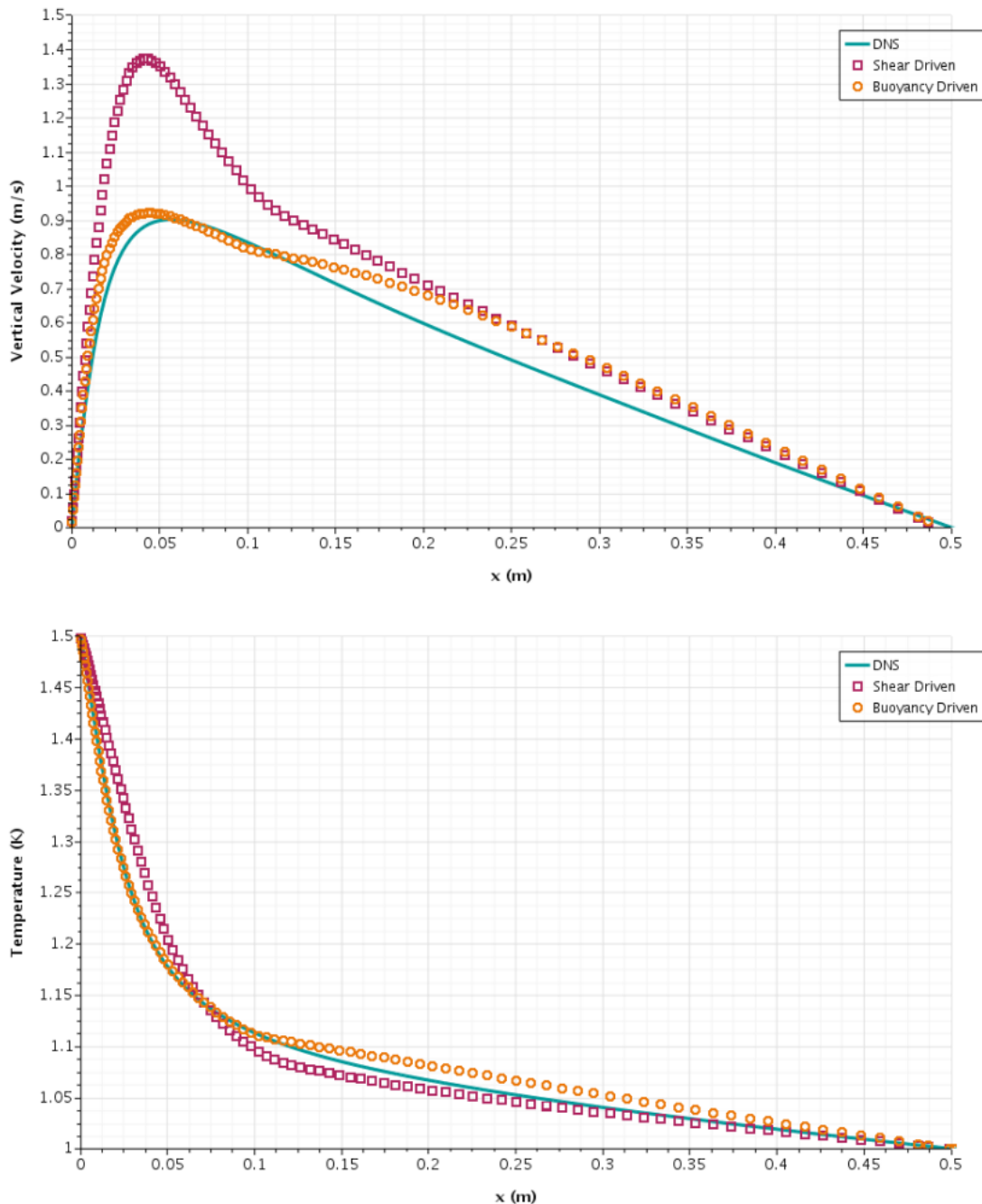
Z článku [16] vyplývá, že pro náš případ coupled řešič je stabilnější. V mnoha případech použití segregated řešiče také povede ke konvergovanému řešení, ale coupled řešič má menší nároky na počet iterací, přesnější a rychlejší. Je potřeba připomenout že segregated řešič je jednodušší než coupled řešič. Coupled řešič má následující podmínky konvergence a stability [14]:

- Správné nastavené Courantovo číslo určuje velikost časových kroků, pro řešení nestacionárních dějů, kde CFL číslo hraje roli relaxačního faktoru. Definici Courantova čísla můžeme vyjádřit jako počet buněk které proletí částice za jeden časový krok. To znamená že jestli v geometrii je překážka, kterou tekutina je vynucena respektovat (obetkat, narazit na překážku) a CFL se rovná číslu 7, avšak do překážky je například 1 buňka, tak to znamená, že částice nebude evidovat danou skutečnost v následujících pseudo-časových krocích (resp. časových krocích). Následně bude nutno změnit nastavení sítě. Anebo změnit časový krok, příp. CFL číslo.
- Turbulentní proudění vyžaduje menší Courantovo číslo, než při laminárním proudění. Jeho hodnota by se měla pohybovat kolem 5 a nejlíp kolem 1. Naopak pro laminární proudění je požadováno hodnota CFL rovno 100, 200 a víc.
- Důležitým krokem v realizaci simulací se ukázalo napočítání určitého počtu iterací ve stacionárním režimu, kdy se rychlostní pole vyvine a částečně ustali, a následně přepnutí do nestacionárního režimu, kde dojde ke konvergenci řešení.
- V některých případech je doporučováno spustit výpočet s nastaveným segregated výpočtem a až potom nastavit coupled řešič.

Dál podle článku [16] doporučuje se nastavit vztakovou podmínku podle Xu (angl. "Buoyancy Driven (Xu)), která je dostupná v případě Two layer All  $y^+$ . Z toho důvodu, že turbulence a proud jsou vzájemně ovlivněné, jedná se to kritické funkce, které jsou závislé na mezní vrstvě. Bilance mezi turbulencí, disipací, difúzí jsou velmi odlišné pro přirozenou a nucenou konvekci. Star CCM+ má na výběr tři definice mezní vrstvy. Dvě pro smykové napětí (použitelné pro nucenou konvekce) a jednu pro vztlak (použitelné pro volnou konvekce). Můžeme si představit, že dvě vertikální desky tvoří zkoumanou doménu. Jedna deska má povrchovou teplotu 0,5 K a druhá na 1,5 K.  $Ra = 5 \times 10^6$ . Tekutina v blízkosti teplejší desky se zahřeje a zmenší se její hustota, zatímco tekutina v blízkosti studenější desky se ochladí a zvýší hustotu. Působením gravitace bude teplejší tekutina stoupat a chladnější kapalina klesat, jak je znázorněno na obr. 16. Výsledky s využitím dane definice mezní vrstvy: Shear Driven (Wolfshtein) a Buoyancy



Obrázek 17. Výsledky použití modelu Buoyancy Driven (Xu)



Obrázek 18. Porovnání různých modelů při řešení přirozené konvekce [15]

Driven (Xu), jsou uvedeny níže pro horkou polovinu domény na obrázku 17. V tomto případě je pohyb tekutiny způsoben spíše jeho vlastní hmotností než jinými podmínkami. Použití verze funkce „Buoyancy Driven (Xu)“ tedy přináší přesnější výsledky.

**Z výše uvedených důvodů výpočetní model bude nastaven následujícím způsobem:**

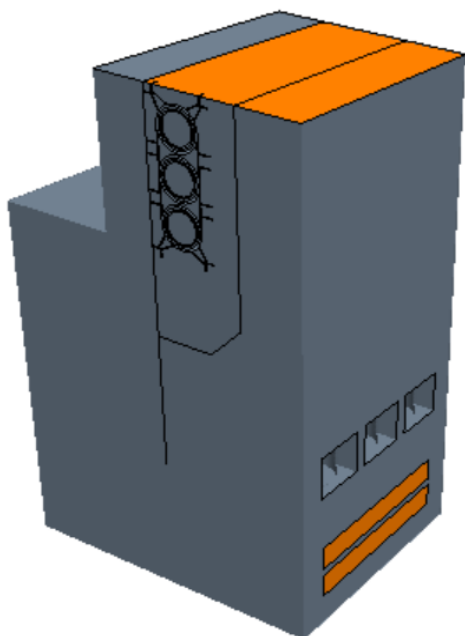
- Model turbulence bude dvourovnicový k-Epsilon
- Coupled řešič
- CFL číslo nastaveno kolem 1 až 5, v případě modelu turbulence umožňujícího použití funkce Buoyancy Driven (Xu) byla použita daná funkce.

Bylo vyzkoušeno nastavení pracovní látky nadefinované podle Boussinesqové aproximace. Hodnota  $y^+$  byla nastavená kolem jedné. Následně bylo vyzkoušeno nastavení modelu turbulence pro Standard k-Epsilon Low Reynolds, Standard k-Epsilon Two layer, Realizable K-Epsilon Two layer, Realizable K-Epsilon Two layer z Boussinesq aproximací. Na začátku byl výpočet rozběhnout stacionárně až po ustálení rychlostního pole přepnout na nestacionární řešení.

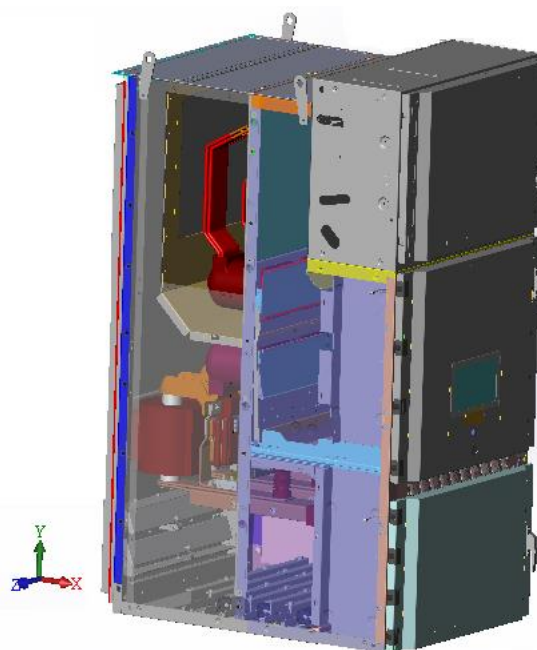
### 3.2 Tvorba geometrie

Cílem dane části diplomové práce je popis vytvoření geometrie rozvaděče a práce s ní. Naším cílem bylo vytvořit zjednodušenou geometrii která by respektovala veškerá kritéria přenosu tepla a byla kompatibilní s požadavky StarCCM+. Je potřeba uvažovat s tím že 3D model musí mít co nejméně chyb jako jsou:

- Dotýkající se plochy
- Neuzavřené hrany
- Neuzavřené vrcholy

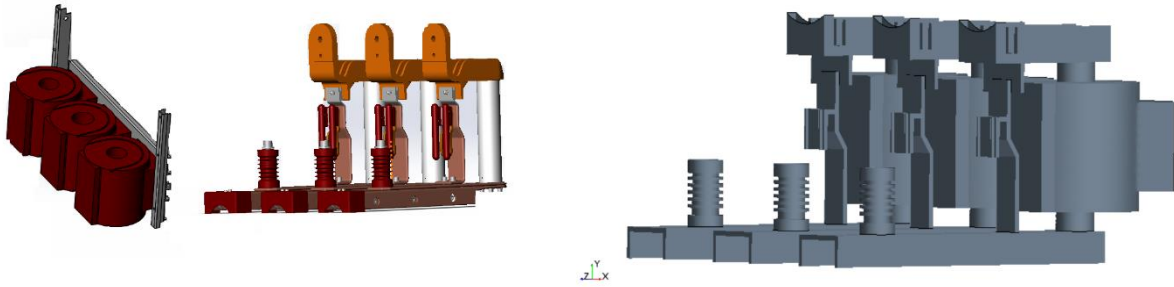


Obrázek 20. Upravená zjednodušená geometrie



Obrázek 19. Původní geometrie.

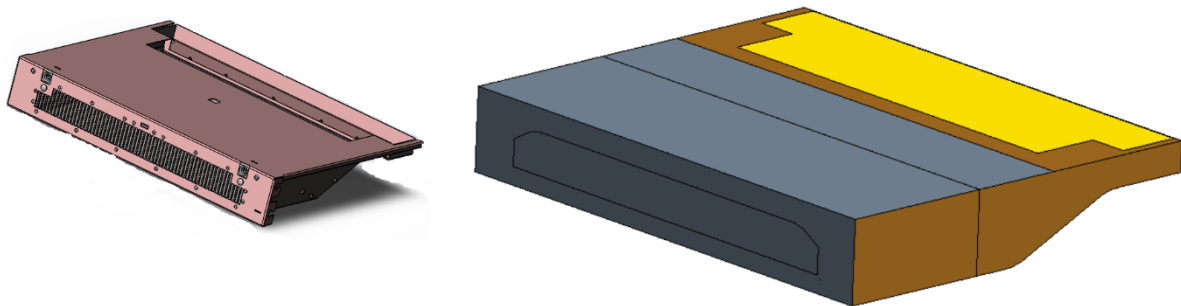
Tak těž je nutné pochopit jakými částmi se výpočet zabývá. Tak například jestli při pohledu na obrázek 19 který znázorňuje celou sestavu rozvaděče vidíme, že je tam hodně šroubů, plechů, nýtů, tak pochopíme že exportovat danou geometrii do prostředí výpočtového programu není racionální. Proto, že na to, aby upravila geometrie přímo v prostředí StarCCM+ by bylo zapotřebí hodně času, a hlavně taková geometrie kladla obrovské nároky na paměť, počet buněk. Bylo potřebné i optimalizovat model z hlediska prostorů ve kterých bude probíhat řešení. Například není vůbec nutné zabývat pomocným prostorem. Proto, že není součástí zadání. Je potřebné dat pozor na to že v případě transformátoru, který tvoří skořepinu na výpočet nevlivá prázdný objem kvůli tomu, že ten je ven z výpočtové domény (viz obrázek 20). Zjednodušenou geometrii transformátoru (obrázek 21) tvoří jako jednoduchý válec a silové napojení spolu s napojení zemnění je provedeno analogicky. Jestli se podíváme do 3D modelu kompletního rozvaděče a modelu který jsme používáme pro výpočet tak uvidíme že např. v prostoru s kabelovým oddílem žebrované těleso nedotýká se k difuzoru (obrázek 22) je to uděláno kvůli



Obrázek 21. Model transformátoru.

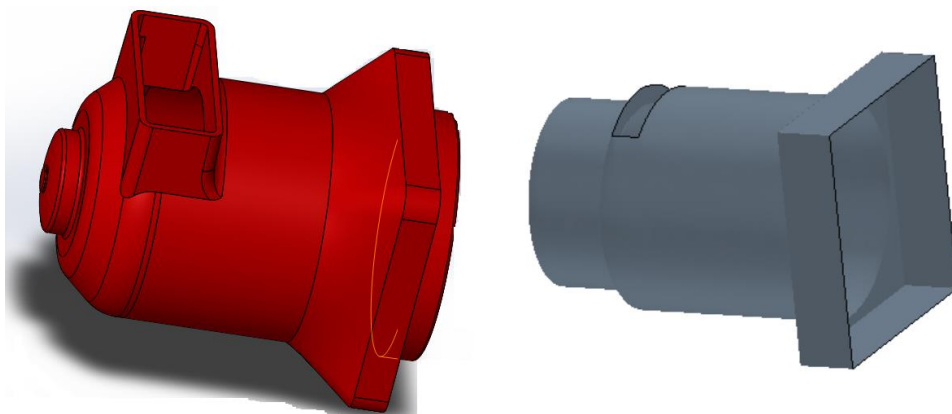
tomu abychom nepotřebovali se zabývat kontaktem mezi žebrovaným tělesem a difuzorem. Celkem v modelu bylo nadefinováno tři regiony: prostor s přípojnici, prostor s transformátory, zemnění, vypínačem, prostor s difuzorem. Mezi každým prostorem probíhá výměna tepla kondukcí přes pevnou stěnu.

Oranžovou jsou označené tlakové okrajové podmínky (obrázek 20). Prostor z přístrojovým oddílem byl také připraven k výpočtu, ale nakonec nebyl využit. Z toho důvodu že zadavatele zajímal primárně prostor s přípojnici a transformátory. Při tvorbě geometrie bylo nutno rozumět odkud kam teče elektrický proud. V našem případě proud teče od přípojnic



Obrázek 22. Difuzor.

k silovému napojení přes vypínač a následně přes transformátor. Silové napojení je napojeno kabelami na profily U-tvaru (viz obrázek 21). Samotné kabely nejsou vůbec nakresleny ani ve původním 3D modelu, při návrhu opatření je ale uvažováno a respektováno jich existence. Bylo zohledněno doporučení ze strany zadavatele požadované vzdálenosti možného prvku opatření od vodičů. Vakuový vypínač je napojen záměrně nesprávně z toho důvodu, že zadavatel



Obrázek 23. Kontakty.

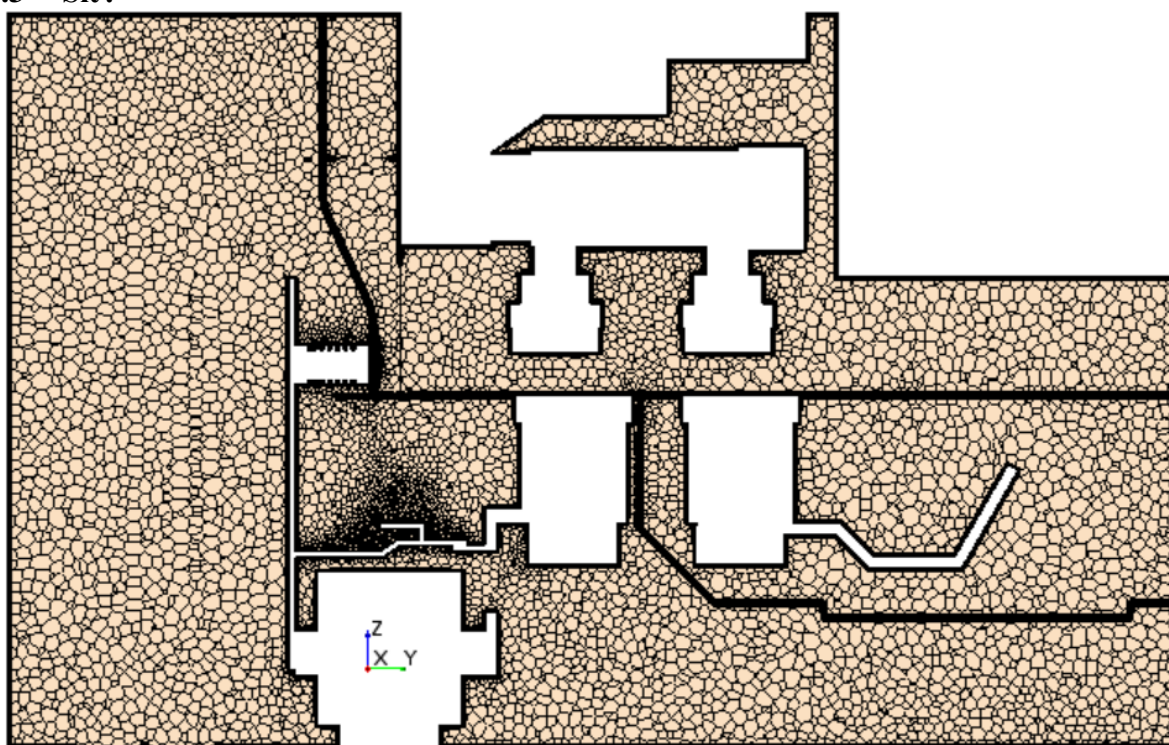


nepožaduje řešení daného prostoru, jeho připojovací kontakty nejsou napojené na kontakty přípojníc a kontakty transformátoru mezi jednotlivými prostory. V případě potřeby je ale jednoduché dopojit vypínač správně přímo v prostředí StarCCM+ v případě potřeby. Kontakty mezi jednotlivými oddíly provedené ve výpočtovém modelu jako jednoduché válce (viz obrázek 23).

Geometrie musí zohledňovat vstupní data výpočtů, tak např. v našem případě měli k dispozici naměřené povrchové teploty a vytvořený model musí umožnit jejich zadání. V případě že bychom dostali ztrátový výkon proudovodné drahý například na transformátoru tak by byla potřeba v modelu vytvořit celou sestavu transformátoru a nadefinovat veškeré koeficienty vedení tepla v závislosti na materiále.

Právě skutečnost, že byla poskytnuta naměřena data povrchových teplot umožnila nám vytvořit jednoduchou geometrii ve tvaru skořepiny. Velmi důležitým nástrojem při tvorbě geometrie bylo použití „internal interfaces“ (český interní rozhraní) a definování kontaktů.

### 3.3 Síť.



Obrázek 24

Nastavení sítě:

- Mnohostěnná buňka (polyhedrální)
- Nominální rozměr buňky 0,02 m
- Minimální rozměr buňky 0,001 m
- Počet prizmatické vrstvy je 3
- Tloušťka prizmatické vrstvy je 0,00666 m

Počet buněk je 1 183 324. Výpočet nezávislosti sítě není proveden z důvodu komplexnosti geometrie. Hodnota Face Validity je kolem 1 v 99,99 procentech buněk. Hodnota Volume Change, která definuje poměry objemu sousedních buněk je v rozmezí od 0.1 do 1 včetně. Platí to pro 96,7 procent buněk. Hodnoty  $y^+$  se pohybovali kolem 1 v každém z výpočtů. CFL číslo

pohybovalo kolem 1 až 5. V průběhu výpočtu se ukázalo, že síť je v dostatečné kvalitě na to aby výpočetní model dost rychle zkonvergoval.

### 3.3.1 K-Epsilon Low Re

Model Standard K-Epsilon s nízkým Reynoldsovým číslem kombinuje model Standard K-Epsilon s nárokem na nízká Reynoldsova čísla.

Tyto funkce umožňují jeho použití ve viskózně postižených oblastech u stěny. Tento model se doporučuje pro problémy s přirozenou konvekcí. Jak víme z předchozích kapitol uvažujeme proudění laminární v případě rozdílu teplot mezi ohřátým povrchem a okolím 15 K. Je potřebné připomenout že v případě volné konvekce charakter proudění určuje Rayleighovo číslo, což znamená že rozsah čísla  $Re$  tady není rozhodující. V případě daného modelu je nutné nastavit tloušťku mezní vrstvy menší než 2 % dimenze průřezu výpočtové domény. V oblasti blízké ke stěně produkce turbulentní kinetické energie a disipace kinetické energie dosáhne maxima. Daný model byl vyzkoušen na základě uvedených referencí v manuálu výpočtového programu. Naším cílem bylo zjistit, jaký má vliv gradient teploty na přesnost výpočtu. Jelikož v doporučeních nebyla uvedena hodnota tzv. „nízkého čísla  $Re$ “ můžeme konstatovat, že daný název má rozpor s podstatou výpočtového modelu. Podstata modelu se nevztahuje na tok v globálním měřítku, ale na region blízko stěny, kde dominují viskózní efekty. Model s nízkým Reynoldsovým číslem je model, který správně reprodukuje omezující chování různých veličin proudění, když se vzdálenost ke stěně blíží nule. Klade velké nároky na síť, ale pro náš případ je síť vyhovující.

### 3.3.2 Standard k-Epsilon Two Layer

Je standardní dvourovnicový model vyvinutý v roce 1945.

### 3.3.3 Realizable k-Epsilon Two-Layer.

Tento model se od standardního modelu k-Epsilon liší dvěma definicemi. Za prvé obsahuje novou formulaci pro turbulentní viskozitu. Za druhé novou transportní rovnici pro disipace, která je odvozena z přesné rovnice pro transport ze střední fluktuace vířivosti.

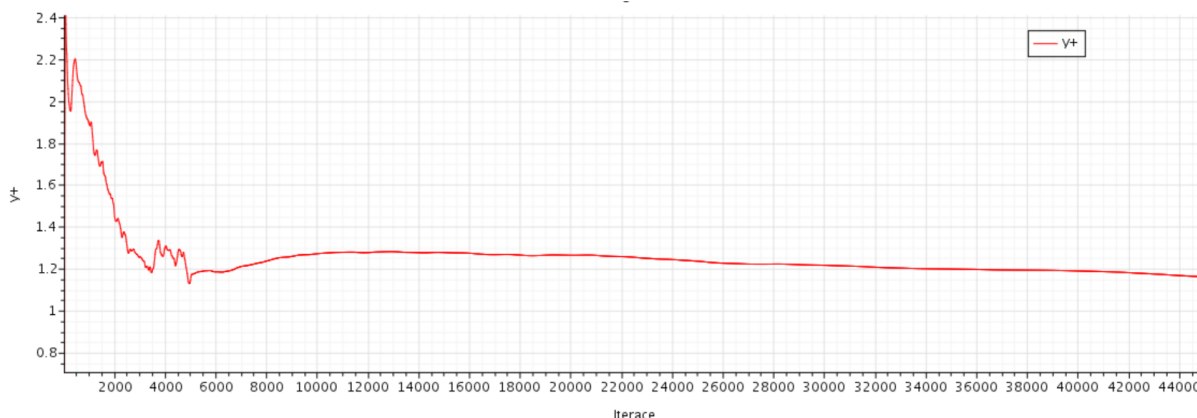
### 3.3.4 Realizable k-Epsilon Two-Layer s nastavením konstantní hustoty.

Nastavení konstantní hustoty je realizováno pomocí Bousinesqovy aproximace. Základní myšlenka aproximace popsána Bousinesqem je založená na principu lineární závislosti hustoty na teplotě.



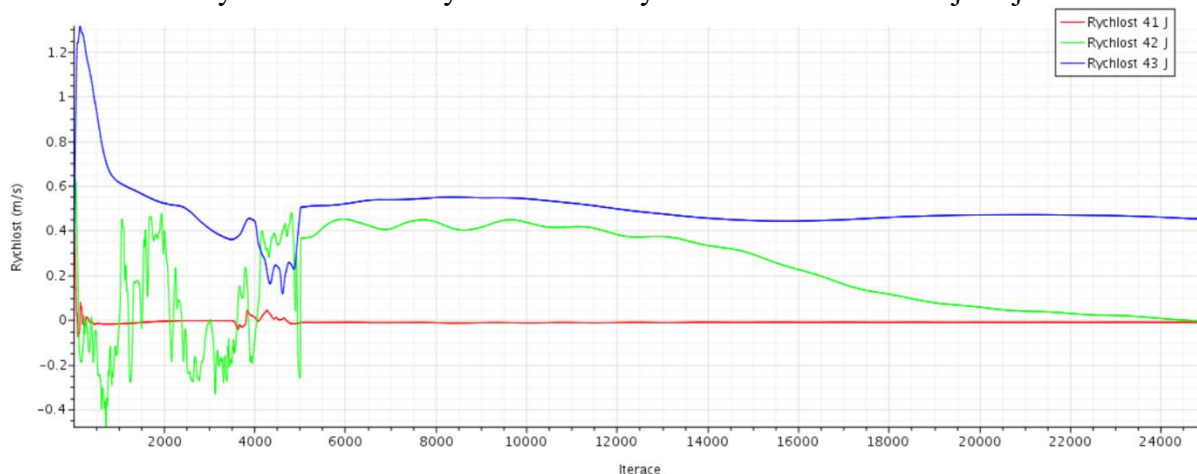
## 4 Analýza stávajícího stavu, návrh opatření.

V této kapitole je analyzován stávající stav a konečná volba vhodného řešiče. To znamená že závěrem této a předešle části diplomové práce je kompletní postup řešení oteplování rozvaděče Unigear ZS1. Jak vidíme z grafu na obrázku 25 hodnoty  $y^+$  kolísala kolem 1,12 až 1,2. Je to



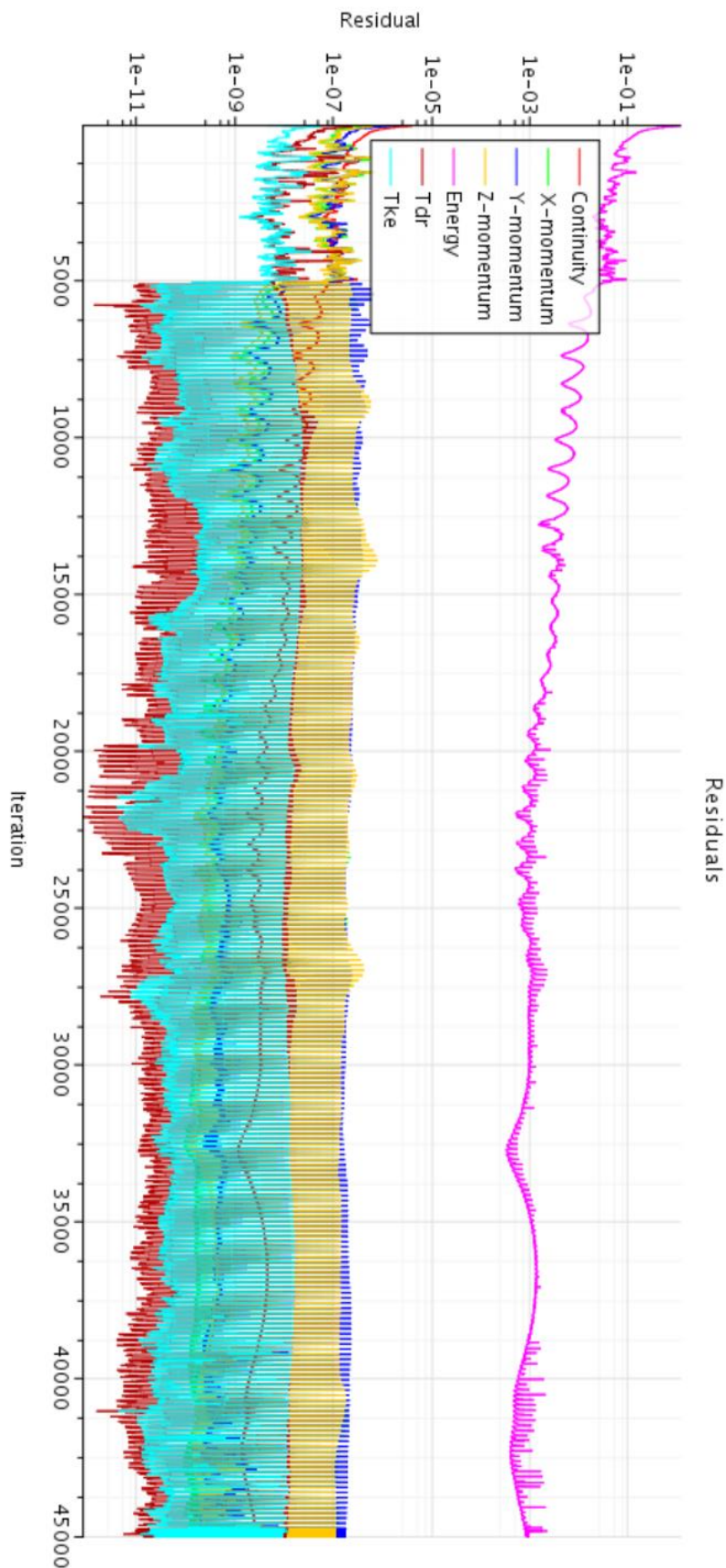
Obrázek 25. Hodnoty  $y^+$  v závislosti na iteraci.

způsobeno tím, jak se vyvíjel proud ve výpočtové doméně s časem. Uvnitř prostoru rozvaděče byly vybrány tři body, na kterých probíhalo měření rychlosti. Zvolené body byly vybrány kvůli odhalení meze, kdy můžeme považovat rychlostní pole za rovnoměrně rozložené. Z obrázku 26 je vidět že po dobu celého výpočtu (vč. nestacionárního) se v objemu s přípojnici rychlostní pole neustálilo, v porovnání s bodem 43J (modrá křivka) je od začátku nižší. V případě oddílu C se rychlost ustálila již při stacionárním výpočtu a zachovávala stabilitu od iterace 4000, následných tisíc iterací byla poté stabilní. Je to velmi důležitý ukazatel. Výpočet v nestacionárním režimu ukázal, že hodnota rychlosti osciluje. To znamená, že proud mění svůj směr. Podrobnější analýza výsledků simulací ukázala, že průběh proudu uvnitř domény je tvořen dvěma víry ve tvaru U kolmými na osu Z. Ty se následně transformují na jeden vír kolmý



Obrázek 26. Ukazatel stability rychlostního pole. Bod 41J je nastaven v prostoru s vypínačem, 42J v prostoru s přípojnici, 43J v prostoru kabelového oddílu.

na osu Z se středem vedle největší přípojnice. Dalším ukazatelem ustálení výpočtu je výkon, který můžeme rovnou srovnat s hodnotou poskytnutou od ABB. Průběh výkonu je vidět na obrázku 28. Vidíme, že se hodnoty výkonu v závislosti na čase pohybují kolem 1400 W. Konvergence vypadala následovně: rovnice kontinuity zkonvergovala na hodnoty  $10^{-7}$ , X, Y,



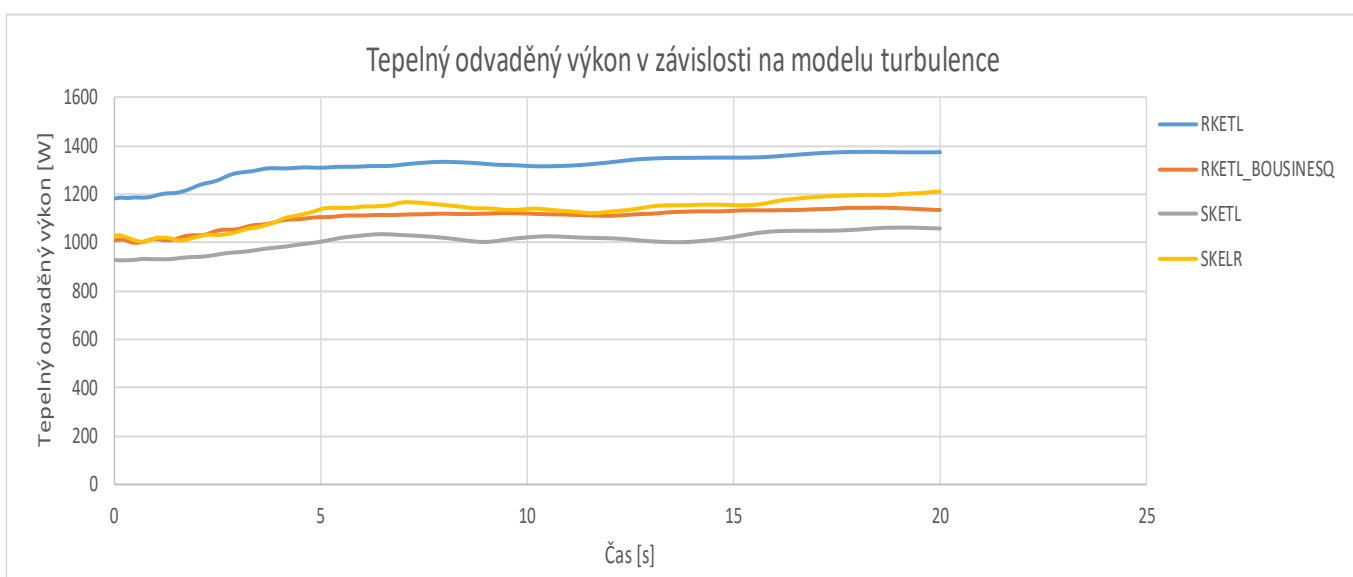
Obrázek 27. Residui.

Z momentové rovnice zkonvergovaly na hodnoty  $10^{-7}$ , energetická rovnice zkonvergovala na hodnotu  $10^{-3}$ , zbylé hodnoty zkonvergovaly. Důležitým kritériem pro výpočet je časový krok, hodnota CFL. Časový krok byl zvolen 0,005, diskretizace byla vybraná na úrovni druhého řádu. Hodnota CFL čísla byla nastavená na hodnotu 5, ale v průběhu výpočtu byla přesáhnuta hodnota 1 jenom v blízkosti některých povrchů. Což znamená, že hodnota CFL byla nastavena správně a síť byla takové kvality, že hodnota byla dosáhnuta jenom v některých místech sítě.

#### 4.1 Volba řešiče

Tabulka 5. Porovnání efektivnost jednotlivých řešičů.

Nastavení	Start (stacionární)	Stop (stacionární)	Nestacionární	Konvergence	Výkon	Počet jader
	Výpočtový čas					
RKETL	17:45	1:52	96 hodin	+	+	16
SKELR	17:45	22:07	96 hodin	- viz přílohu číslo 4.1	- viz přílohu číslo 4.1	16
RKETL_B	17:45	1:23	96 hodin	- viz přílohu číslo 4.1	- viz přílohu číslo 4.1	16
SKETL	17:45	22:03	96 hodin	- viz přílohu číslo 4.1	- viz přílohu číslo 4.1	16



Obrázek 28. Tepelný odváděný výkon v závislosti na modelu turbulence.

V tabulce číslo 5 provedeno porovnání výsledků jednotlivých uvažovaných modelů turbulence. Vidíme, že nejvíce vyhovujícím pro případ volné konvekce s gradientem teplot větším než 15 K je model turbulence Realizable k-Epsilon Two-Layer. V následujícím grafu (obrázek 28) jsou znázorněny hodnoty tepelného výkonu odváděného z rozvaděče pro zkoumané modely turbulence. Na základě poskytnutých údajů od zadavatele víme, že typická hodnota odporu proudovodné dráhy při 20 °C v jedné fázi je 40  $\mu\Omega$ . Z Joulova-Lenzova zákona můžeme uvažovat běžné hodnoty ztrát 400 W na fázi při 20 °C a při jmenovitém proudu 3150 A. Celkové ztráty tedy můžeme uvažovat 1200 W při teplotě okolí a kolem 1500 W při ustáleném stavu. To znamená že podle tabulky číslo 5 je zřejmé, že je zvolen řešič RKETL. Který dosahuje dobré shody s experimentálními daty, poskytnutými zadavatelem.

V této podkapitole bylo ukázáno, jak jsme postupovali ve studiu použití metody CFD analýzy. Byl popsán postup vytvoření zjednodušené geometrie jednotlivých částí rozvaděče na základě jejich vlastností a vstupních dat, které jsme měli k dispozici od zadavatele. Následně byla vytvořena vhodná síť a zvolili několik řešení na základě předpokladů uvedených v popisu jednotlivých modelů turbulence. Výsledkem provedené práce je kompletní geometrie připravena k aplikaci dalších změn a opatření přímo v prostředí výpočtového programu, výběr výpočtového modelu pro analýzu možných opatření, provedení kompletní analýzy stávajícího stavu.

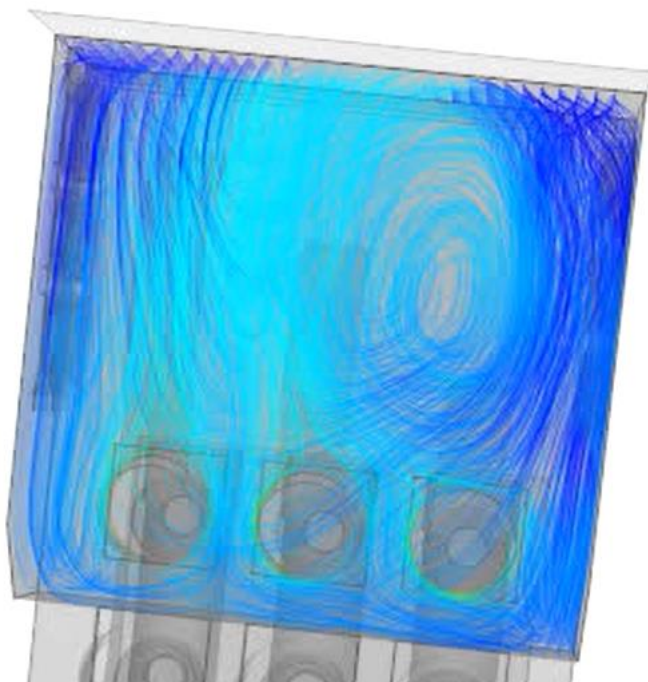
## 4.2 Návrh opatření

V této podkapitole se věnuje čas komentářem návrhu opatření na základě provedené analýzy stávajícího stavu.

### 4.2.1 Uzavřený prostor s přípojnicemi

Prostor B na obrázku číslo 14 je prostorem s přípojnicemi. Výpočtová doména, tvoří uzavřený objem, ve kterém jsou přítomné ohřívací plochy. Ohřívací plochy jsou znázorněné na obrázku číslo 30. Dochází tady k nasávání a výfuku vzduchu přes stejný otvor, který se nachází v horní části rozvaděče. Na daný otvor navazuje výfukový kanál. Chladicí vzduch vstupuje a vystupuje přes stejný otvor, což způsobuje tvorbu vírů. Víry jsou nežádoucí v rozvaděči. Vzduch z hlediska izolačních vlastností je ideální izolant za pokojových teplot 18 až 24 stupňů Celsia.

**Tak jak to, že jakýmkoliv plynem prochází proud?** Všichni jsme někdy v životě viděli blesk, obloukový výboj. Proud prochází plynem v případě, že v něm je dostatečný počet volných elektricky nabitých částic. Jinými slovy, jestli plyn obsahuje dostatečný počet iontů. Jako ionizátor může sloužit plamen svíčky, elektrické pole, ultrafialové záření, topná spirála, nebo radioaktivní záření. Takovým způsobem jakož to ohříváním dodáváme elektronům v atomech vzduchu potřebné množství energie na uvolnění. Z toho plyne že v místech stálého zvýšení teploty může dojít s větší pravděpodobností k výboji. Právě víření způsobuje podobný efekt proto, že v nějakém objemu dochází ke konstantnímu gradientu teploty. V našem případě vír, který je ukázán na obrázku 29 způsobuje lokální



Obrázek 29



Obrázek 30. Přípojnice.

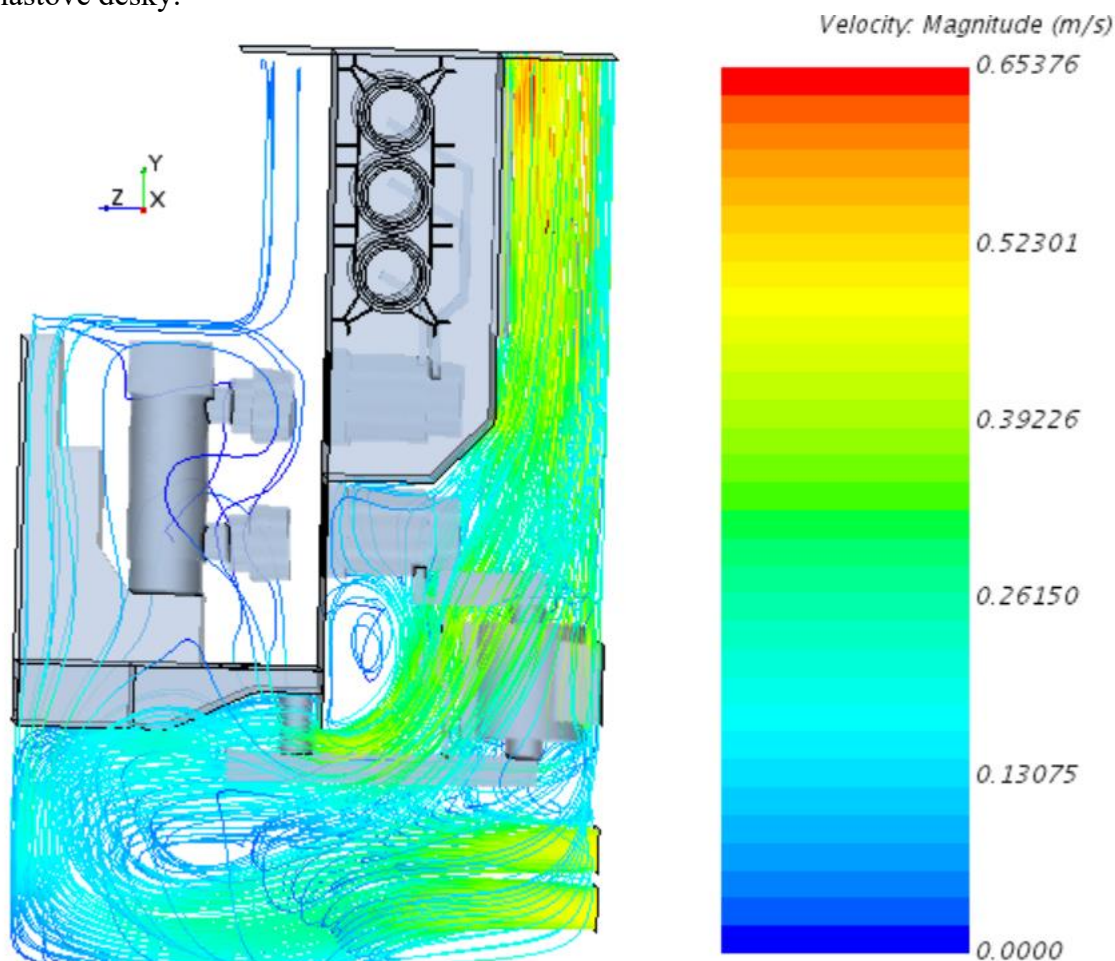
ustálení teploty vzduchu kolem 310 K. Z výše uvedených důvodů klasifikujeme danou skutečnost za problematickou. Samotný uzavřený objem sám o sobě je problematický. Jediný vstup a výstup neumožňuje efektivní odvod tepelné zátěže. Zadavatel občas zdůrazňoval, že prostor s přípojnicemi je oddělen, ale následně při dalších schůzkách zmínil že, mezi uzavřeným prostorem a prostorem s transformátory, zemněním a sílovým napojením se nachází oddělovací mřížka. Informace o oddělovací mřížce byla klasifikována za nedůvěryhodnou z toho důvodu, že v původní dokumentaci od zadavatele mřížka není. Dále podle předpokladu by mřížka vytvářela tlakovou ztrátu, kterou by proud musel překonat. Daný



předpoklad říká že tlakové ztráty mřížky budou tak velké, že proud nedokáže vyvinout potřebný statický tlak. Pro eliminaci vírů v dané doméně bylo navrženo řešení použití přepážky. Popis geometrie pro danou alternativu opatření je popsán v další podkapitole „Tvorba geometrie“. Dalším opatřením je návrh mřížky, v další podkapitole „Předpoklad“ je popsáno za jakých předpokladů by byla mřížka vyhovující pro náš případ.

#### 4.2.2 Kabelový prostor s transformátory, uzemněním a silovým napojením.

Analýza stávajícího stavu ukázala že proud vstupující do výpočtové domény musí překonat odpor, který vzniká vlivem setrvačnosti. Můžeme si to představit jako dokola uzamknuty řetěz, který je zavěšen na kladce. Uvedeme rukou do pohybu řetěz, vlivem setrvačnosti bude kopírovat řetěz trajektorie ruky. To stejné platí i pro proud vzduchu. Na obrázku číslo 31 je zobrazeno pomocí streamline trajektorie částic a jejich rychlost na úsecích trajektorie. Z obrázku je patrné, že vzduch vstupující do rozvaděče se dostává až do jeho zadní části, což prodlužuje dráhu proudění. Zvyšuje se tak tlakové ztráty. Vzduch se navíc prouděním kolem ostatních částí ohřívá, čímž klesá jeho schopnost odvodu tepla. Můžeme si nasměrovat proud na ohřívající se části rozvaděče pomocí přepážky. Materiál přepážky byl konzultován se zadavatelem a na základě toho bylo uvažováno z materiálem Maywoflam PC/ABS. Dany material má tepelnou vodivost  $0,2 \frac{W}{mK}$ , dlouhodobá provozní max. povrchova teplota  $95 \text{ }^\circ\text{C}$ , kratkodoba provozní max. povrchova teplota  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ . Jednou z dominantních složek tepla v našem případě je sálání, to znamená že je zapotřebí věnovat pozornost na povrchové teplotě plastové desky.



Obrázek 31

### 4.2.3 Předpoklad.

V podkapitolách 4.2.1 a 4.2.2 jsme popsali návrhy změn, rozdělíme dané změny na dvě alternativy. V první alternativě předpokládáme přepážku v kabelovém prostoru a mřížku na rozhraní prostoru s přípojnicemi a kabelového prostoru. Během konzultace a schvalování návrhu zadavatel doporučil umístit přepážku o minimální vzdálenosti 80 mm od silového napájení. Přičemž dle přiloženého obrázku číslo 32 je vidět, že musíme



Obrázek 32

respektovat i samotné kabely, pomocí kterých si napojíme rozvaděč na odběr elektrického proudu. Požadavky na plastovou desku, která bude sloužit jako přepážka pro usměrnění proudu, jsou popsány v předešlé podkapitole 4.2.2. Mřížka musí splňovat následující požadavky:

- Zamezení průniků výbojů do uzavřeného prostoru s přípojnicemi
- Zamezení průniků spalín do uzavřeného prostoru s přípojnicemi
- Zamezení průniků výbojů a spalín z prostoru s přípojnicemi do kabelového prostoru
- Dobré izolační vlastnosti

Dana kritéria je možné splnit jenom v případě dostatečné velké tlakové ztráty. Očekáváme, že jestli model dokáže vyvinout dostatečný proud na překonání tlakové ztráty 5 až 11 Pa budeme uvažovat že provedení s mřížkou je realizovatelné. Informace od zadavatele byli nedůvěryhodné proto, že předpokládáme že tlakové ztráty na mřížce budou tak vysoké, že vyvinout proud jich nedokáže překonat. V druhé alternativě navrhujeme usměrnit nebezpečné chování proudění uvnitř prostoru B (prostoru s přípojnicemi) přepážkou. Dana přepážka je vyrobena ze stejného materiálu jako plastová deska která je umístěná v prostoru C (kabelový prostor). To znamená že musíme projevit pozornost na dosahované povrchové teploty. Přepážka musí splňovat následující cíle:

- Minimalizovat víření
- Zmenšit teplotu vzduchu který se víří

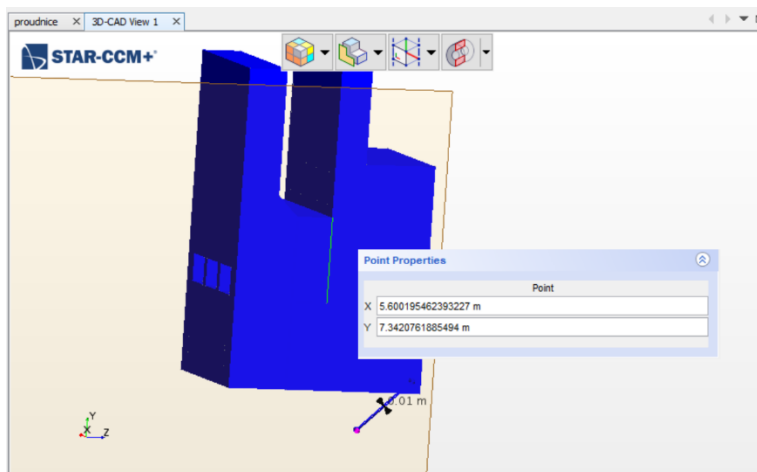
Stejně jako i první alternativě navrhujeme usměrnit proud správným směrem uvnitř prostoru C. V případě první alternativy očekáváme tepelný odváděný výkon maximální hodnotou 2,5 kW, druhá alternativa předpokládá maximální odváděný výkon 2 kW.

### 4.3 Tvorba geometrie

V dane podkapitole popsány postupy jak racionálním způsobem realizovat jednoduché úpravy uvnitř výpočtového programu StarCCM+.

Pomocí nástroje Geometry » 3D-CAD Models » New byla vytvořena přepážka. Vytvořil se scetch na potřebné pro nás ploše, nadefinovali jsme polohu pomocí souřadnic tak jak je to zobrazeno na obrázku číslo 33. Potom bylo vytvořeno těleso pomocí příkazu extrude. V tuto chvíli máme dvě tělesa, geometrie stávajícího stavu a těleso „Extrude 1“ (je možnost změnit název kliknutím pravého tlačítka myši a zvolením Rename). Dané těleso „Extrude 1“ bylo vtisknuto v těleso stávajícího stavu příkazem Imprint zvolením obou těles ve skupině Body

Groups, doposud jsme pracovali ve skupině Features. Následujícím krokem bylo převedení CAD modelu do Part, čímž byla vytvořena úplně nová geometrie prostoru B (kabelového prostoru). Následujícím kroku byla vytvořena jednoduchá ploška přepážky. Daný krok bylo možné provést díky tomu, že jsme vtisknuli v předešlých krocích geometrie přepážky do skříně rozvaděče. Dalším krokem byla zdefinovaná přepážka jako Baffle.



Obrázek 33

Veškeré vzniklé chyby související s neuzavřeným prostorem výpočtové domény prostoru s silového napojení, transformátory, uzemněním bylo opraveno ve stejném prostředí Surface Repair ve skupině Global veškeré vzniklé chyby. Automaticky se vytvořili potřebné kontakty ve skupině Global. Podobným způsobem se postupovalo při vytváření přepážky v prostoru s přípojnými. Mřížka byla vytvořena tak že, jsme vyselektovali plochu přidělenou pro mřížku a oddělili ji zvlášť příkazem Split by Patch. Znova byli nadefinované kontakty mezi doménou prostoru B a C. Všechny navrhnuté změny byly provedeny ve stejné geometrii s tím, že pro první alternativu jednoduchou plochu mřížky byla nadefinována jako Porous Baffle Interface a přepážka v prostoru s kabelovým napojením jako Baffle Interface. Pro druhou alternativu byla mřížka vypnuta tak, že byla definována okrajovou podmínkou jako Baffle Interface a přepážka pro eliminaci vírů a nežádoucích účinků ionizace Baffle Interface. To znamená že v první alternativě daná přepážka v přípojnicovém prostoru byla definována jako Internal Interface.

#### 4.4 Porous Baffle Interface

Jelikož z předešlých kapitol je zřejmé že postupovali jsme přesně stejně podle nastavení, které schválili v podkapitole 4.1 na začátku byl proveden výpočet v stacionárním stave. Daný výpočet ukázal že residui první alternativy nekonvergovali a v této podkapitole jsou vysvětleny důvody a podrobně popsány vlastnosti Porous Baffle.

Porézní médium je možné si představit jako látku obsahující póry příkladem může sloužit izolace popsaná v podkapitole 1.2.1 na straně 16. Existují situace, kdy je porézní střední tloušťka ve srovnání s ostatními rozměry malá, například průtok perforovanou deskou nebo mřížkou. Ve výsledku lze předpokládat, že odpor toku a přenos tepla jsou jednorozměrné. Zpracování odporu proudění je podobné jako u porézních médií. Platí:

$$\Delta p = -\rho(P_i|v_n| + P_v)v_n \quad (1.40)$$

kde  $v_n$  je normálová rychlost  $[\frac{m}{s}]$ ,  $P_i$  je interní odpor  $[-]$ ,  $P_v$  viskózní odpor je  $[\frac{m}{s}]$ .

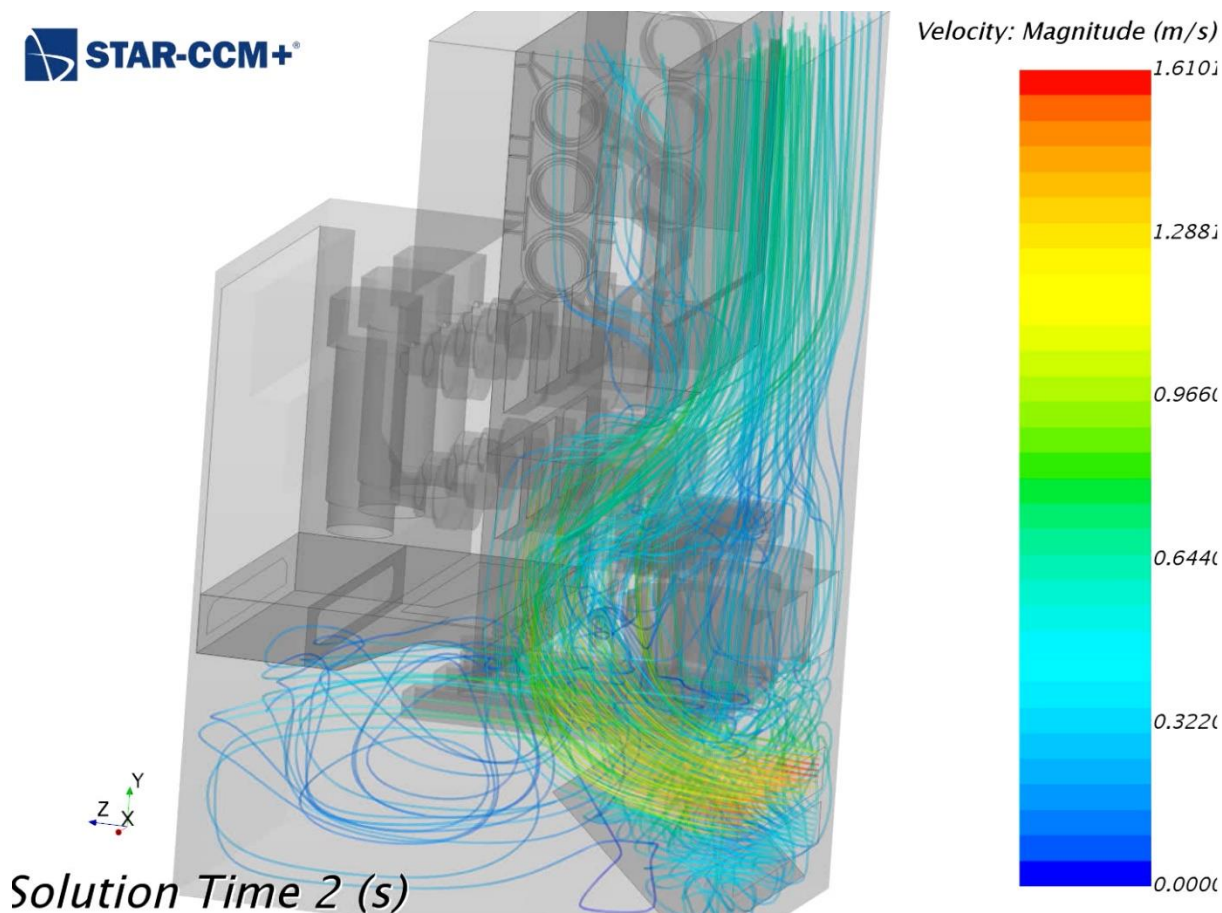
V podkapitole 4.2.3 jsme definovali tlakovou ztrátu od 5 do 11 Pa, znamená že interní odpor nastavíme jako 11 a rychlost uvažujeme kolem  $0,6 \frac{m}{s}$ . Z toho plyne, že tlaková ztráta stanoví 5 Pa, začneme ze spodní hranice. V průběhu výpočtu ve stacionárním režimu ukázalo se že složky residui modelu turbulence  $k$  a  $Epsilon$  nekonvergovali. To znamená že proud nedokázal překonat disipace a kinetická energie nebyla dostatečná k překonání tlakových ztrát. Podrobnější studium vlastností dane okrajové podmínky ukázalo že ve vytvořené zjednodušené doméně podobné mřížce plochou  $0,2 m^2$ , rychlosti na vstupu  $1 \frac{m}{s}$  a interní resistenci 5 je



potřebné vyvinout přetlak 6,3 Pa. Proto následně tlakové interní resistenci (interní odpor) byl snížen na 4. Bylo rozhodnuto vyzkoušet výpočet i přes to že prvek mřížka byl následně vyloučen ze seznamu možných opatření.

#### 4.5 Zhodnocení první a druhé alternativy.

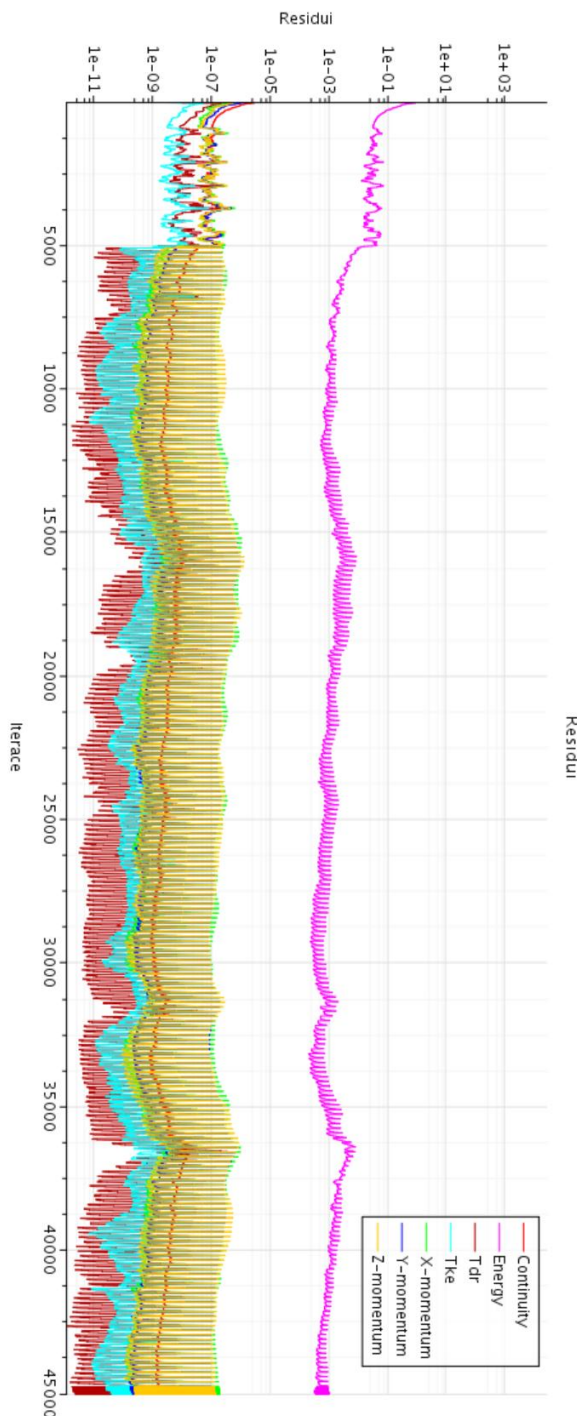
V první alternativě jsme opatřili rozvaděč přepážkou v kabelovém prostoru a mřížkou oddělující kabelový prostor a prostor s přípojnici, tlakovou ztrátu na mřížce jsme předpokládali 5 až 11 Pa. Tlaková ztráta ale ve skutečnosti překonaná nebyla, interní odpor  $P_i$  byl nastaven na hodnotu 4. Podrobnější analýza proudění vpuštěním částice přes vstup chladicího média do kabelového prostoru ukázala tok ohřátého vzduchu z prostoru C do prostoru B ze strany největší přípojnice. Můžeme to objasnit tím, že tok pracovní látky dokáže vytvořit podtlak ze strany proudu chladicího vzduchu na straně výstupu z výpočtové domény. Podrobněji je možné se seznámit s tímto jevem v příloze číslo V4.5.1, je to videomateriál scény s názvem „proudnic\_busbar“ kde jsme pustili do výpočtové domény 140 částic stejně vzdálených od sebe po šířce plochy vstupu do kabelového prostoru 7 částic a po délce 10 částic. Pro seznámení v textové části diplomové práce k dispozici je obrázek číslo 34. Daný projev proudění můžeme klasifikovat jako nežádoucí. Proud teplého vzduchu z prostoru C zahřívá chladící vzduch uvnitř prostoru s přípojnici. Pro nás to znamená zvýšení pravděpodobnosti výboje vlivem ionizace. Víření, které se tvoří ve stávajícím stavu nebylo eliminováno, naopak vlivem proudu ohřátého chladicího prostoru C vír se choval hůř. Ve srovnání se stávajícím stavem teploty uvnitř víru byly zvýšené. Tlaková ztráta mřížky, kterou dokázal vyvinutý vztlak překonat byla stanovená 2,15 Pa. To znamená že pravděpodobnost existence mřížky, která musí splňovat požadavky uvedené v podkapitole 4.2.3 je velmi nízká. Prvek mřížky se projevil



Obrázek 34

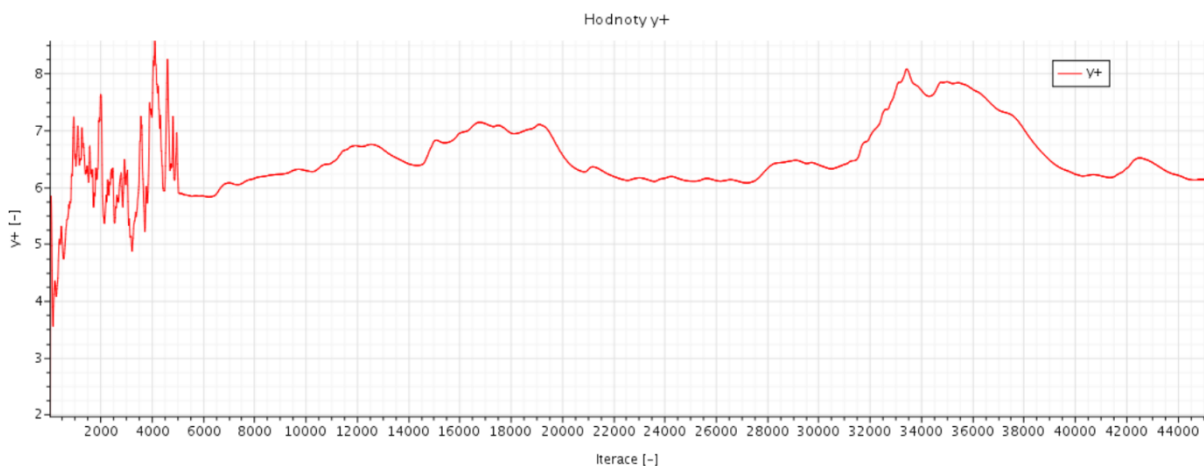


nevyhovující na rozdíl od přepážky instalované v prostoru C. Přínos od daného opatření je popsán dal ve zhodnocení druhé alternativy. Teďka se budeme věnovat samotnému výpočtu a jeho zhodnocení. Počet buněk v síti první alternativy stanoví 1186487. Přičemž v prostoru B model obsahuje 318 658 buněk, v prostoru C 827148. Síť byla nastavena v souladu s postupem při analýze stávajícího stavu, to znamená že byla zvolena polyhedrální síť a prizmatická vrstva. Rozměr buňky byl zvolen 16 mm, počet prizmatických vrstev 3, tloušťka prizmatické vrstvy 5,3 mm. Hodnoty  $y^+$  v průběhu výpočtu pohybovali od 1,88 do 1,2, v nestacionárním režimu hodnota se ustálila kolem 1,3. Časový krok byl nastaven na 0,05 s, doba výpočtu 20 s. Hodnota 5 Courantova čísla byla přesáhnutá jen v 11 buňkách, a to na plochách zemnění. Jak i v případě



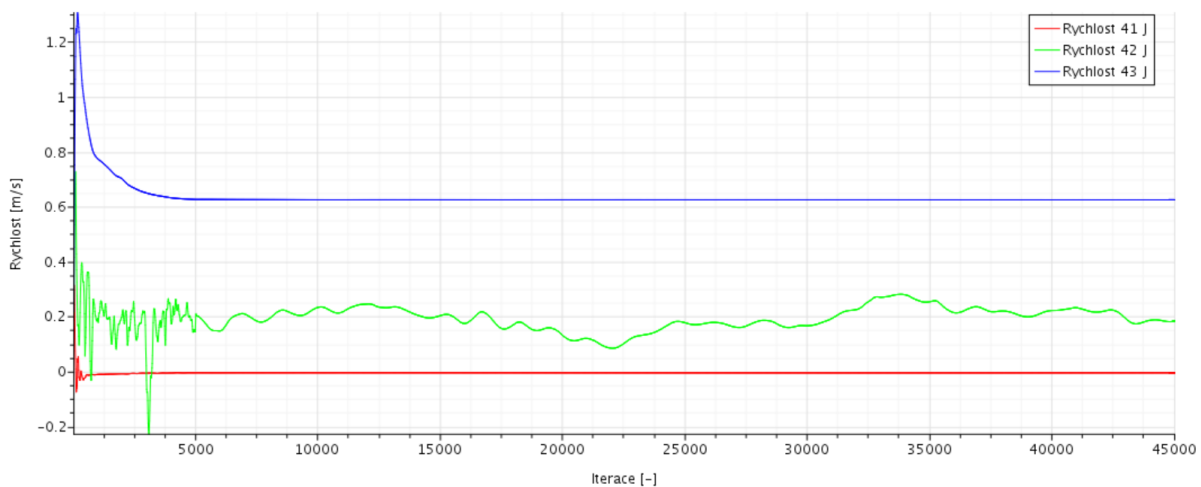
Obrázek 35

stávajícího stavu byly nastaveny tři monitorovací body v objemu rozvaděče. V prostoru C se hodnoty rychlosti ustálily ve stacionárním režimu již na 2200 iterací. V prostoru B hodnoty rychlosti ve vybraném bodu oscillovaly. Residui konvergovali a ustálili se, viz obrázek 35. V druhé alternativě jsme opatřily rozvaděč přepážkami v kabelovém i přípojnicovém prostoru. Plastová deska nasměrovací uvnitř prostoru slouží k tomu, aby nasměrovala nasátlý vzduch vlivem podtlaku na ohřívající se plochy kabelového prostoru a přispěla k jejich chlazení jich. Naším cílem bylo eliminovat negativní vliv proudění přes celý objem spodní části kabelového prostoru, jak je ukázáno na obrázku 31. Přepážka v prostoru s přípojnicemi sloužila dle předpokladu k eliminaci virů a potlačení jejich vlivu na přípojnice vzhledem k ionizaci. Výsledek daného opatření je znázorněn na video, které je uloženo v přílohách. V daném videomateriálu V4.5.2 je vidět, jak byl vytvářeny vír potlačen a snížen k minimu. Dalším pozitivním projevem přepážky je ustálení proudu, proud v U-tvaru dosáhl stability a přestal se pohybovat z jedné strany na druhou. Nastavení sítě bylo analogické první alternativě, celkový počet buněk 1134492. Přičemž prostor C obsahuje 796622 buněk, prostor B 294154 buněk. Hodnota Face Validity je kolem 1 v 99,998 procentech buněk. Hodnota Volume Change je v rozmezí od 0.1 do 1 včetně. Platí to pro 98,294 procent buněk. Hodnota  $y^+$  se pohybovala ve intervalech od 3,5 do 8,5 v stacionárním výpočtu a od 6 do 8 v režimu nestacionárního proudění. Jak je zřejmé z grafu závislosti střední průměrné hodnoty  $y^+$  na iteraci (obrázek číslo 36) hodnota  $y^+$  se v daném případě pohybovala kolem 6. Tyto



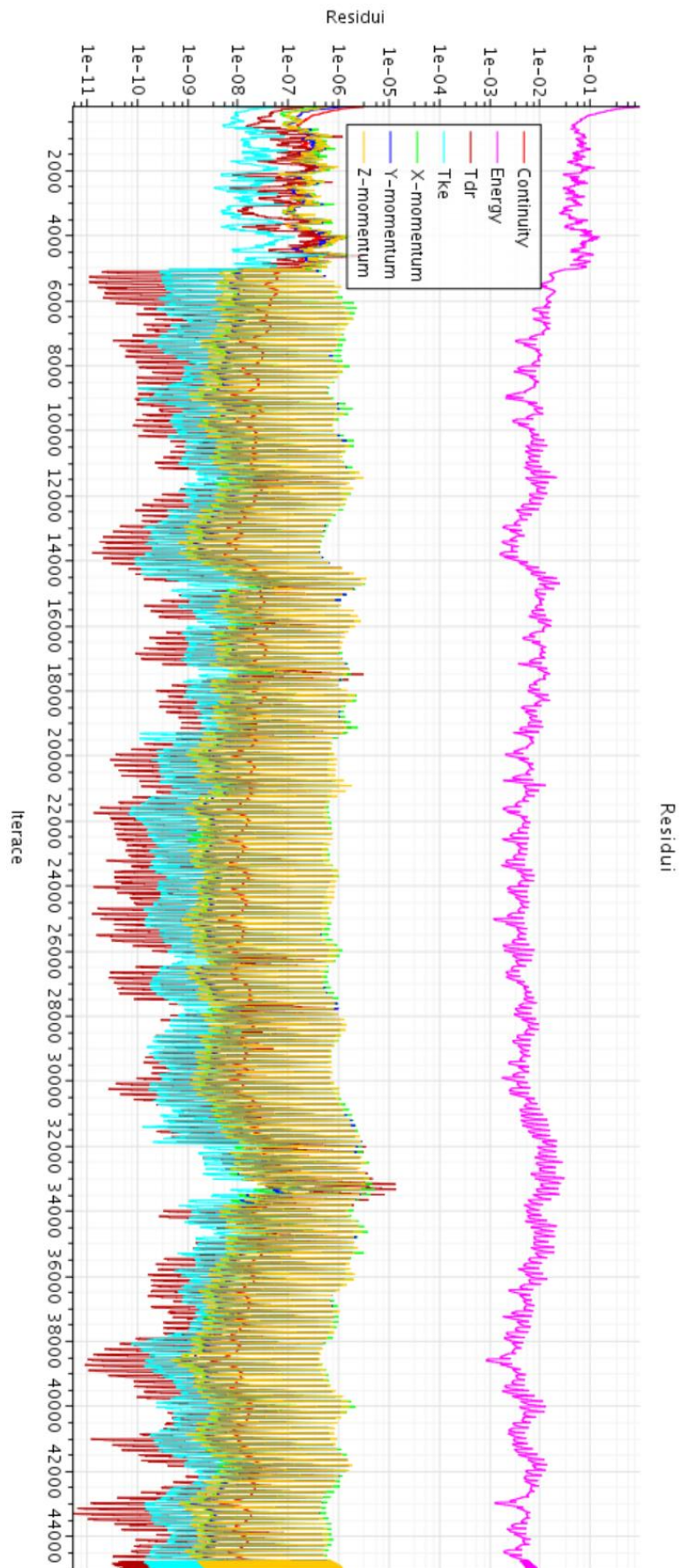
Obrázek 36

hodnoty jsou pro nás vyhovující. Hodnoty CFL přesáhli hodnotu 5 jenom ve 12 buňkách, a to na plochách zemnění. Hodnoty rychlosti ve stacionárním výpočtu pohybovali kolem hodnoty 0,2 ve vybraném bodu prostoru B (prostor s přípojnici), v průběhu nestacionárního výpočtu hodnoty oscilovaly kolem dané hodnoty. Je potřebné připomenout, že vybrané body mají stejnou polohu v každém z výpočtů, včetně analýzy stávajícího stavu. Podrobněji se můžeme seznámit z grafem závislosti rychlosti ve vybraných bodech a iteraci na obrázku číslo 37. Oscilace jsou vyvolány vlivem plastové desky v prostoru B. Použití přepážky v kabelovém



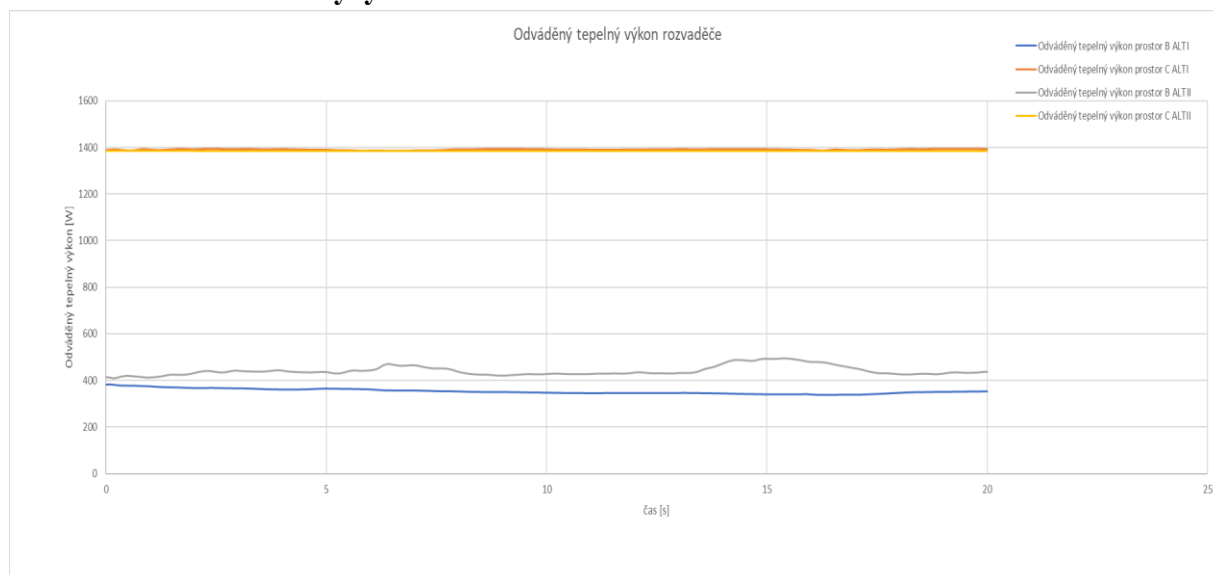
Obrázek 37

prostoru C ovlivnilo chlazení rozvaděče nejlíp ze všech přijatých opatření. Tím, že jsme nasměrovali proud přímo na ohřívající se části rozvaděče, jsme přispěli ke zvýšení odváděného tepelného výkonu o 25 procent. Víc s prouděním v kabelovém prostoru je možné se seznámit pomocí videomateriálu V4.5.3. Povrchové teploty na obou plastových deskách v kabelovém prostoru C a prostoru B s přípojnici nepřesáhly 308 K. Zajímavý je vliv záření na plastovou přepážku uvnitř kabelového prostoru, který je velmi dobře vidět na ve videu V4.5.4. Jak znázorněno ve videomateriálu V4.5.4 na úkor chladnému vzduchu, který vniká do objemu rozvaděče vlivem vyvolaného podtlaku a směřuje přímo na plastovou desku daný prvek, jejíž povrch se ohřívá skoro o 10 K. Daný jev můžeme objasnit dopadem radiace na pevné povrchy. Což ještě jednou zdůvodňuje správnost funkčnosti modelu. Velmi důležitým ukazatelem verifikace správnosti výpočtu jsou residui. Graf závislosti jednotlivých složek řešiče na iteracích je ukázán na obrázku číslo 38.



Obrázek 38

#### 4.5.1 Zhodnocení analýzy návrhového stavu



Obrázek 39

V této podkapitole byl aplikován stejný přístup jak v 4.1, to znamená že na základě výpočtu byl vyhodnocen odváděný tepelný výkon v každém z prostorů na základě přijatých opatření. Naším cílem bylo přijat takové řešení na základě, kterého bychom mohli snížit povrchovou teplotu, anebo při stejné povrchové teplotě vyšší odvést tepelný výkon. Jelikož jako jednu z okrajových podmínek jsme dostali povrchové teploty vyhodnocovali jsme odváděný tepelný výkon. Provedené opatření v alternativě číslo I jsme vyhodnotili v podkapitole 4.5, tam jsme přišli na to, že dané změny nejsou vhodné a mají negativní vliv na rozvaděč. Hodnoty odváděného tepelného toku v prostorech B a C první alternativy jsou uvedené v grafu závislosti odváděného tepelného výkonu na čase na obrázku číslo 39. To též platí i pro druhou alternativu, která je označena jako ALTII. Přičemž je potřebné připomenout že druhá alternativa je vyhovující a vhodná pro zlepšení odvodu tepla z rozvaděče. Jak je vidět na grafu závislosti na obrázku číslo 39 dokázali jsme odvést o 25 procent víc tepla v porovnání se stávajícím stavem. Ve stávajícím stavě je podle výpočtu tepelný odváděný tepelný výkon 1400 W a v navrhovaném stavě kolem 1800 W. To znamená že v porovnání se stávajícím stavem jsme schopni provozovat rozvaděč při o 13 procent vyšším proudu tj. 3500 A. Přičemž v přípojnicovém prostoru jsme navíc použili opatření pro snížení možnosti vzniku výboje a to přepážku. Proto můžeme očekávat, že v případě zvýšení proudu nedojde k výboji v prostoru B (prostoru s přípojnicemi).

## 5 Závěr

Technické řešení UniGear ZS1 je nové řešení implementované do tradičních stávajících technologií. Použití nejmodernějších a osvědčených komponent: proudové a napěťové senzory, ochranná a řídicí relé a digitální komunikace IEC 61850, ukázalo úspěšné výsledky. 150 000 kusů rozvaděčů UniGear ZS1 je instalováno po celém světě. Oblast použití daných rozvaděčů je velmi rozsáhlá:

- Rozvodný
- Papírenský, cementárenský, textilní, chemický, potravinářský, automobilový, kamenolomy, petrochemický, ropný a plynárenský, metalurgický a báňský průmysl, válcovny a kamenolomy
- Námořnictví, vrtné plošiny
- Doprava: letiště, přístavy, železnice, metro
- Nákupní centra, nemocnici, velké infrastrukturní projekty

V každé z této aplikací používají se rozvaděče chlazené volnou konvekci a nucenou konvekci. Výhodou rozvaděčů chlazených volnou konvekci je spolehlivost, jednoduchost provozování a řízení. Je ale omezen výkon daných rozvaděčů na 3150 A a 24 000 V v případě přirozeného chlazení a 4000 A i 24 000 V v případě nucené konvekce. Výsledkem dané diplomové práce je dosažení charakteristiky 3500 A a 24 000 V pomocí použití moderních nástrojů pro analýzu, jednoduchých konstrukčních změn. Což umožňuje:

- I. Rozšířit výkonovou řádu rozvaděčů UniGear ZS1
- II. Modernizace stávající technologie ve 100 zemích světa
- III. Zmenšit nároky na plochy, které jsou nutné k instalaci rozvaděčů
- IV. Zvýšení spolehlivosti i bez toho spolehlivé technologie
- V. Snížení investičních nákladů

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BÍLEK, T. Analýza teplotního pole vysokonapěťového rozvaděče. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 100 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jozef Hrabovský, Ph.D.
- [2] BERGMAN, T. L., A. S. LAVINE, F. P. INCROPERA a D. P. DEWITT. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 8th Edition. USA: John Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-35388-1.
- [3] MICHEJEV, M. A.: Základy sdílení tepla, Praha, Průmyslové vydavatelství, 1952
- [4] REDDY, J. N. 2008. An introduction to continuum mechanics: with applications. New York: Cambridge University Press.
- [5] ANDERSON, John D. 1995. Computational fluid dynamics: the basics with applications. New York: McGraw-Hill.
- [6] SCHLICHTING, H. (1979). Boundary-layer Theory, 7th edn, McGraw-Hill, New York.
- [7] VERSTEEG, H. K. a W. MALALASEKERA. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method. 2nd ed. New York: Pearson Education, 2007. ISBN 0131274988.
- [8] KUEHN, T., & GOLDSTEIN, R. (1976). An experimental and theoretical study of natural convection in the annulus between horizontal concentric cylinders.
- [9] Laboratorní moduly – katedra fyziky FEL ČVUT v Praze. OPPA CZ.2.1.7/3.100/33306.
- [10] NOVOTNÝ, Vladimír a Zdeněk VÁVRA. Spínací přístroje a rozváděče na vysoké napětí. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1986. Spínací přístroje a rozváděče na vysoké napětí: vysokoškolská příručka pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. Praha, 1986.
- [11] B. M. WEEDY; B. J. CORY; N. JENKINS; JANAKA B. EKANAYAKE; GORAN. Electric Power Systems. Edition 5. ISBN: 9781118361092.
- [12] Webové stránky ABB.
- [13] Přednáška prof. Ing. Rudolfa Žitného, CSc.
- [14] Coupled Flow Controls and General Setup Recommendation. Autor neznámý.
- [15] T. A. M. VERSTEEGH, T. M. NIEUWSTADT. A direct numerical simulation of natural convection between two infinite vertical differentially heated walls scaling laws and wall functions.
- [16] What are best practices for natural convection cases? <https://support.sw.siemens.com> [online]. Brno: Siemens, 2020 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: [https://support.sw.siemens.com/knowledge-base/KB000014394\\_EN\\_US](https://support.sw.siemens.com/knowledge-base/KB000014394_EN_US)



## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$A$	Poměrná tepelná pohltivost tělesa	–
$C_p$	Tepelná kapacita	$\frac{J}{kg \cdot K}$
$D$	Charakteristický rozměr	$m$
$D$	Poměrná tepelná průteplivost tělesa	–
$Gr$	Grashofovo číslo	–
$h$	Měrná entalpie	$\frac{J}{kg}$
$I$	Proud elektrický	$A$
$k$	Turbulentní kinetická energie	$\frac{m^2}{s^2}$
$l_{mixing}$	Směšovací délka	$m$
$\Delta m$	Vzdálenost izotermických ploch	$m$
$Nu$	Nusseltovo číslo	–
$P_i$	Interní odpor	–
$P_v$	Viskózní odpor	$\frac{m}{s}$
$Pr$	Prandtlovo číslo	–
$Q$	Teplo	$J$
$q$	Měrný tepelný tok	$\frac{W}{m^2}$
$R$	Odpor	$\Omega$
$R$	Poměrná tepelná odrazivost tělesa	–
$Ra$	Rayleighovo číslo	–
$Re$	Reynoldsovo číslo	–
$T$	Termodynamická teplota	$K, ^\circ C$
$t$	Čas	$s$
$U$	Napětí	$V$
$u^+$	Bezrozměrná tangenciální rychlost	–
$V$	Objem	$m^3$
$v$	Rychlost	$\frac{m}{s}$
$y^+$	Stěnová funkce	–
$\alpha$	Teplotní vodivost	$\frac{m^2}{s}$
$\varepsilon$	Rychlost disipace turbulentní kinetické energie	$\frac{m^2}{s^3}$
$\kappa$	Karmánová konstanta	–

$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	$\frac{W}{mK}$
$\mu$	Dynamická viskozita	$Pa \cdot s$
$\mu_t$	Turbulentní viskozita	$\frac{Pa}{s}$
$\rho$	Hustota	$\frac{kg}{m^3}$



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Mechanismy přenosu tepla [2] .....	12
Obrázek 2. Princip konvektivního přenosu tepla [2] .....	13
Obrázek 3. Kontrolní objem.[2] .....	15
Obrázek 4. Vznik cirkulace [2] .....	18
Obrázek 5. Mezikruží.....	20
Obrázek 6. Síť .....	21
Obrázek 7. Nastavení řešiče .....	21
Obrázek 8. Průběh teplot a rychlosti ve válcové mezeře. ....	22
Obrázek 9. Charakteristický rozměr [2].....	23
Obrázek 10. Popis vzniku tepelného proudění z válce. [2].....	23
Obrázek 11. Množství energie, vyzářené z povrchu tělesa.....	24
Obrázek 12. Salání.[2].....	24
Obrázek 13. UniGear ZS1 .....	29
Obrázek 14. Popis rozvaděče. ....	29
Obrázek 15. Vakuový vypínač .....	31
Obrázek 16. Rychlostní pole. ....	34
Obrázek 17. Výsledky použití modelu Buoyancy Driven (Xu).....	35
Obrázek 18. Porovnání různých modelů při řešení přirozené konvekce [15].....	36
Obrázek 19. Původní geometrie.....	37
Obrázek 20. Upravená zjednodušená geometrie .....	37
Obrázek 21. Model transformátoru. ....	38
Obrázek 22. Difuzor.....	38
Obrázek 23. Kontakty. ....	38
Obrázek 24 .....	39
Obrázek 25. Hodnoty $y^+$ v závislosti na iteraci. ....	41
Obrázek 26. Ukazatel stability rychlostního pole. Bod 41J je nastaven v prostoru s vypínačem, 42J v prostoru s přípojnici, 43J v prostoru kabelového oddílu. ....	41
Obrázek 27. Residui. ....	42
Obrázek 28. Tepelný odváděný výkon v závislosti na modelu turbulence.....	43
Obrázek 29 .....	44
Obrázek 30. Přípojnice.....	44
Obrázek 31 .....	45
Obrázek 32 .....	46
Obrázek 33 .....	47
Obrázek 34 .....	48
Obrázek 35 .....	49
Obrázek 36 .....	50
Obrázek 37 .....	50
Obrázek 38 .....	51
Obrázek 39 .....	52

## **SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1. Vlastnosti vzduchu. ....	20
Tabulka 2. Konstanty kritériální rovnice (1.26). ....	23
Tabulka 3. Přehled požadavků na materiály rozvaděčů. ....	28
Tabulka 4. Přehled použitých materiálů. ....	30
Tabulka 5. Porovnání efektivnost jednotlivých řešičů. ....	43

## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha číslo 4.1.....	Popís jednotlivých modelů dle tabulky číslo 5
V4.5.1 .....	Proudění z prostoru C do prostoru B, přes mřížku. ALTI.
V4.5.2.....	Proudění úvnitř prostoru B dle ALTII
V4.5.3.....	Proudění úvnitř prostoru C dle ALTII
V4.5.4.....	Gradient teplot na plastových deskách dle ALTII