

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Analýza chlazení elektrického zařízení v rozvaděči**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2011/2012

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jana KOLÁŘOVÁ**  
Osobní číslo: **E09N0015K**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Analýza chlazení elektrického zařízení v rozvaděči**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte teoretický úvod zahrnující rozbor oteplení proudové dráhy elektrického zařízení, způsoby šíření tepla a jejich matematický popis včetně metod výpočtu.
2. Vytvořte geometrický model zadané konfigurace, připravte okrajovou úlohu a proveďte numerický výpočet.
3. Analyzujte vypočtené výsledky s ohledem na použitý postup a parametry výpočtu a na dovolené oteplení částí proudové dráhy zařízení.
4. Navrhněte možná opatření vedoucí ke zlepšení chlazení proudové dráhy elektrického zařízení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Vostracký, Z. : Spínací přístroje velmi vysokého napětí, SNTL, Praha
2. Havelka, O., Vávra, Z., Svoboda, D. : Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů, VUT Brno
3. Rusňák, Š., Řezáček, P. : Elektrické přístroje 1, ZČU v Plzni
4. Numerické metody
5. Uživatelský manuál FLUENT

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**

Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce:

**17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce:

**11. května 2012**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na analýzu chlazení elektrického zařízení v rozvaděči. Zahrnuje teoretický úvod orientovaný na oteplení proudové dráhy elektrického zařízení a způsoby šíření tepla. Dále v práci nalezneme analytický výpočet vnitřní teploty rozvaděče, v porovnání s numerickým výpočtem v programu ANSYS Fluent. V závěru práce se nachází vyhodnocení a porovnání výsledků spolu s návrhem opatření pro zlepšení chlazení elektrických zařízení.

## **Klíčová slova**

oteplení, rozvaděč, analýza chlazení, numerický výpočet, přestup tepla

## **Abstract**

The thesis deals with cooling of electrical equipment in a switchboard. An introduction focused on heating of electrical equipment conducting paths and heat transfer process is given in the first chapter. Further, analytical calculation of the average switchboard heating and detailed numerical calculations performed in program ANSYS Fluent, are presented. The results are analyzed and compared together. Some switchboard design changes, which can improve the electric equipment cooling, are proposed in the conclusion.

## **Key words**

heating, switchboard, cooling analysis, numerical simulation, heat transfer

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

## **Poděkování**

Chci poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Mé díky patří také rodičům za podporu v době studia.

# OBSAH

<b>0</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>TEORETICKÝ ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>1.1</b>	<b>Ztráty v elektrických přístrojích</b> .....	<b>8</b>
1.1.1	<i>Druhy ztrát</i> .....	8
1.1.2	<i>Vznik tepla ve vodiči</i> .....	9
1.1.3	<i>Odpor vodiče</i> .....	9
1.1.4	<i>Odpor vodiče při střídavém proudu</i> .....	10
<b>1.2</b>	<b>Oteplování a ochlazování vodiče</b> .....	<b>11</b>
1.2.1	<i>Oteplování ustáleným proudem</i> .....	11
1.2.2	<i>Krátkodobé oteplování</i> .....	13
1.2.3	<i>Ochlazování vodiče</i> .....	13
<b>1.3</b>	<b>Chlazení vodiče okolním tekutým prostředím</b> .....	<b>15</b>
1.3.1	<i>Sálání</i> .....	15
1.3.2	<i>Přirozené proudění</i> .....	17
1.3.3	<i>Výsledný souhrn chladivosti povrchu</i> .....	19
1.3.4	<i>Přirozené proudění v omezeném povrchu</i> .....	20
<b>2</b>	<b>CHLAZENÍ ELEKTRICKÉHO ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>20</b>
2.1	<b>Tepelné ztráty v rozvaděčích</b> .....	<b>20</b>
2.2	<b>Účinný chladicí povrch rozvaděče</b> .....	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>ANALYTICKÝ VÝPOČET ROZVADĚČE</b> .....	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>NUMERICKÁ ANALÝZA OTEPLENÍ</b> .....	<b>26</b>
4.1	<b>Zadání</b> .....	<b>26</b>
4.2	<b>Nákres rozvaděče</b> .....	<b>28</b>
4.3	<b>Zadání okrajových podmínek</b> .....	<b>29</b>
4.4	<b>Výsledky numerických výpočtů</b> .....	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A MOŽNÁ OPATŘENÍ</b> .....	<b>35</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>39</b>



## 0 Úvod

Tato práce se zabývá analýzou chlazení elektrického zařízení v rozvaděči. Mým úkolem bylo popsat teorii zahrnující rozbor oteplení proudové dráhy elektrického zařízení, způsoby šíření tepla a jejich matematický popis včetně metod výpočtu. Dostala jsem zadaný konkrétní rozvaděč s konkrétními údaji a číselnými hodnotami. Nejprve jsem provedla analytický výpočet oteplení rozvaděče, kde jsem díky výpočtu dostala průměrnou teplotu nacházející se uvnitř rozvaděče.

V praktické části jsem vytvořila geometrický model zadané konfigurace, připravila jsem pro něj okrajovou úlohu a provedla jsem numerický výpočet. Protože zadaný rozvaděč je aktivně chlazen díky dvěma větracím otvorům, z nichž jeden je opatřen ventilátorem, počítala jsem pro srovnání vlivu větrání se dvěma různými množstvími ventilovaného vzduchu a také možnost, kdyby rozvaděč nebyl aktivně chlazen vůbec.

Získané výsledky jsem analyzovala. Kromě získaného podrobného přehledu o teplotách uvnitř rozvaděče pro obě možnosti ventilování a pro možnost bez ventilace jsem získala i informaci o rychlosti proudění vzduchu uvnitř rozvaděče a o směru, kudy se hlavní proud ubírá a kde naopak dochází k minimálnímu proudění a tím i chlazení. V závěru práce navrhuji pro tento konkrétní rozvaděč možnosti, jak jej úspěšněji chladit.

# 1 Teoretický úvod

## 1.1 Ztráty v elektrických přístrojích

Během změn elektromagnetického pole dochází v látkách k pohybům částic, které nesou elektrický náboj. Dochází k předávání části kinetické energie částic do okolí, kde dochází k interakci částic s atomy prostředí a dále v pevných látkách s atomy krystalické mřížky. Teplota látky se tím zvyšuje. Energie elektromagnetického pole se mění v kinetickou energii tepelného pohybu atomů a molekul látky. Obecně mluvíme o množství tepla a o proudění tepla. Díky tomu, že v elektrizačních systémech vytváříme elektrické pole, k čemuž nám slouží elektromagnetická indukce, můžeme později elektrickou energii přeměnit v kinetickou energii mechanického pohybu těles a konat tak práci. Část energie se během tohoto děje přemění v teplo. Tato energie pro nás tvoří ztráty. Jedná se vlastně o energii neuspořádaného pohybu elementárních částic. [1]

### 1.1.1 Druhy ztrát

Rozlišujeme ztráty:

- Jouleovy ztráty způsobené pohybem elektronu ve vodičích
- ztráty vířivými proudy - vířivé proudy ve vodičích indukované střídavým magnetickým polem (v podstatě jde opět o Jouleovy ztráty)
- hysterezní ztráty - natáčení magnetických dipólů v magnetikách způsobené střídavým magnetickým polem
- dielektrické ztráty – natáčení elektrických dipólů v dielektrikách způsobené střídavým elektrickým polem
- ztráty výboji – vznikají urychlováním částic nesoucích elektrický náboj elektrickým proudem

Pro elektrické přístroje jsou nedůležitější Jouleovy ztráty. Někdy mohou významnou roli hrát také hysterezní ztráty ve feromagnetickém koaxiálním zapouzdření vodičů a dielektrické ztráty v izolantech při vysokých napětích nebo vysokých frekvencích. [1]

### 1.1.2 Vznik tepla ve vodiči

Za běžného stavu protékají proudovými drahami elektrického přístroje provozní elektrické proudy. Díky přetížením a nadproudům mohou být tyto proudy krátkodobě zvýšené. Může také dojít ke zkratu. Při stacionárním stavu, tj. za ustáleného ss proudu nebo při efektivní hodnotě ustáleného střídavého proudu, můžeme Jouleovo ztrátové teplo vypočítat ze vztahu:

$$Q = I^2 R t \quad [J; A, \Omega, s]$$

Při nestacionárním proudu použijeme vztah:

$$dQ = i(t)^2 R dt$$

[1]

### 1.1.3 Odpor vodiče

Měrný odpor, nebo také rezistivita je vlastnost materiálu vodiče závislá na teplotě.

$$\rho = \rho(\vartheta)$$

$$R = \rho(\vartheta)^2 \frac{l}{S} \quad [\Omega; \Omega m, m, m^2]$$

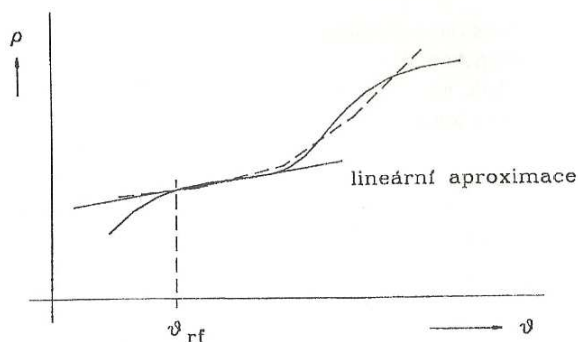
Hodnota rezistivity u kovů se stoupající teplotou roste, odpor tekuté fáze je vyšší než odpor pevné fáze. Závislost rezistivity na teplotě je možné aproximovat řadou

$$\rho = \rho_{rf} (1 + \alpha_1 \Delta \vartheta + \alpha_2 \Delta \vartheta^2 + \alpha_3 \Delta \vartheta^3 + \dots),$$

kde  $\rho_{rf}$  je rezistivita při referenční teplotě  $\vartheta_{rf}$ .

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

V technické praxi, kde využíváme úzký rozsah pásma provozních teplot vodičů odpovídající několika desítkám stupňů Celsia, nám bude obvykle stačit pouze lineární aproximace.



Obr. 1: lineární aproximace [1]

Za referenční hodnotu dosazujeme obvykle následující hodnoty:

- 20 °C - normální teplota místnosti,
- 0 °C - počátek Celsiovy stupnice
- 40 °C - maximální teplota okolí podle ČSN
- 35 °C - maximální teplota okolí podle IEC

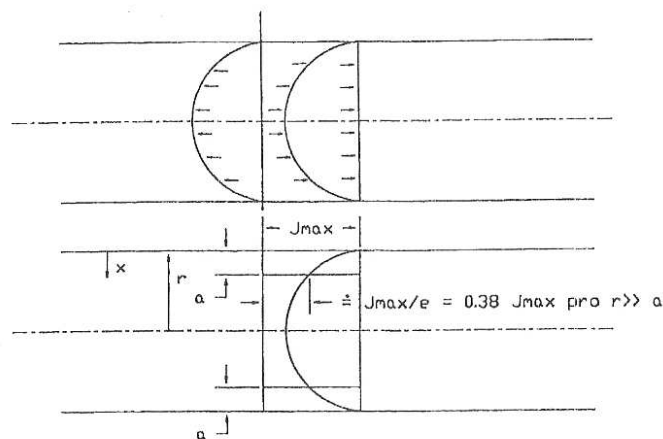
S resistivitou materiálu při referenční teplotě bývá v tabulkách vlastností látek uveden také lineární součinitel změny rezistivity s teplotou  $\alpha_1$  [K<sup>-1</sup>]. Tento součinitel bývá udáván spolu s rozsahem platnosti pásma.

Například pro Cu je  $\rho_{20}$  ( $\Omega\text{m}$ ) =  $17,86 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$ ,  $\alpha_1 = 4,1 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$  v rozmezí teplot 20 – 500 °C.

Čistota kovů silně ovlivňuje rezistivitu kovů. Již s malým množstvím příměsí v kovech se velmi zvyšuje. Nejnižších hodnot dosahujeme u ryzích kovů. [1]

#### 1.1.4 Odpor vodiče při střídavém proudu

U střídavého proudu dochází k nerovnoměrnému rozložení hustoty proudu  $J$  v průřezu vodiče. Vzniká tzv. skinefekt, kdy následkem indukce vlastním střídavým magnetickým polem ve vodiči je proud vytlačován k povrchu vodiče.



Obr. 2: Rozložení hustoty proudu ve válcovém vodiči plného průřezu [1]

Rozložení hustoty proudu ve válcovém vodiči můžeme vyjádřit:

$$J = J_{\max} \frac{e^{-x/a}}{\sqrt{1 - \frac{x}{r}}}, \text{ kde } a = \frac{2}{\sqrt{\omega\mu\gamma}} \quad [m; \text{rad}/s, H/m, S/m]$$

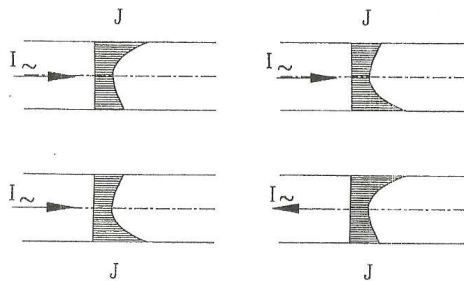
- a      efektivní hloubka vniku
- $\omega$     úhlový kmitočet proudu
- $\mu$     permeabilita prostředí
- $\gamma$     měrná elektrická vodivost

Pro určení maximální hustoty proudu na povrchu vodiče, kde  $r \geq 4a$ , použijeme

přibližný výpočet:  $J_{\max} = \frac{I}{2\pi r a (1 - \frac{a}{2r})}$ , chyba bude do 5%.

Zhuštění proudu do povrchové vrstvy závisí na úhlovém kmitočtu střídavého proudu. Pro frekvenci 50 Hz je u běžných technických materiálů jako Cu a Al hloubka vniku 10 mm. Pro pozorování skin efektu je tedy třeba mít vodič s průměrem mnohem větším než 10 mm. Skin efekt také zvětšuje odpor vodiče procházejícího střídavým proudem, který je větší, než když stejným vodičem prochází proud stejnosměrný. Je to dáno nevyužitou částí vodiče:  $R_{\sim} = k_{zh} * R_{\sim}$ , kde  $k_{zh}$  je činitel povrchového zhuštění proudu.

U střídavého proudu může dojít u paralelních vodičů také k jevu blízkosti, kde je



proud vytlačován do odlehlejších partií průřezu vodičů. Pokud je směr proudu vodičů shodný a pokud je proud opačný, bude vytlačován do přilehlých částí vodičů.

Obr. 3: jev blízkosti [1]

Odpor vodiče dopočítáme  $R_{\sim} = \rho_{rf} (1 + \alpha_1 \Delta \vartheta) \frac{l}{S} k_{zh} * k_{bl}$ , kde  $k_{zh}$  je činitel povrchového zhuštění proudu vlivem skin efektu a  $k_{bl}$  je činitel blízkosti. [1]

## 1.2 Oteplování a ochlazování vodiče

### 1.2.1 Oteplování ustáleným proudem

Mějme vodič jednotkové délky, s konstantním průřezem  $S$ , tímto vodičem prochází ustálený proud  $I$ . Jeho teplota se bude měnit podle vzorce:

$$dQ = RI^2 dt$$

$$RI^2 dt = \alpha_0 * A * \Delta \vartheta dt + c * V d\vartheta$$

R	odpor vodiče jednotkové délky [ $\Omega$ ]
$A_0$	součinitel přestupu tepla z povrchu vodiče [ $Wm^{-2}K^{-1}$ ]
$\Delta \vartheta$	okamžité oteplení vodiče proti okolí [K]
$d\Delta \vartheta$	je stejné jako $d\vartheta$
c	objemová tepelná kapacita vodiče [ $Jm^{-3}K^{-1}$ ]
A	ochlazovací povrch vodiče [ $m^2$ ]
V	objem jednotkové délky vodiče [ $m^3$ ]

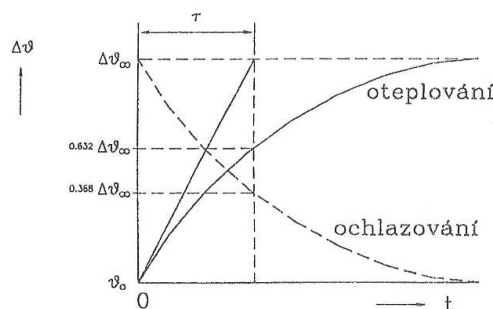
První rovnice v podstatě představuje rovnováhu množství tepel. Levá část odpovídá množství tepla, které vznikne ve vodiči během elementárního časového úseku  $dt$ , pravá část prvního vzorce odpovídá teplu, které během stejné doby unikne povrchem vodiče do okolí díky teplotní diferencii. Druhý výraz odpovídá množství tepla akumulovaného ve vodiči. Teplota vodiče vzroste o  $d\vartheta$ .

Dosazení za proměnné:

$$dt = \frac{cV}{RI^2 - \alpha_0 A \Delta \vartheta} d\vartheta$$

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln(RI^2 - \alpha_0 A \Delta \vartheta) + K$$

Za počáteční podmínky dosadíme  $t=0$  a  $\Delta \vartheta = 0$ , explicitně vyjádříme  $\Delta \vartheta$  a získáme vzorec pro okamžité oteplení vodiče proti okolí:



$$K = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln RI^2$$

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln\left(1 - \frac{\alpha_0 A}{RI^2} \Delta \vartheta\right)$$

$$\Delta \vartheta = -\frac{RI^2}{\alpha_0 A} \ln\left(1 - e^{-\frac{\alpha_0 A}{cV} t}\right) = \Delta \vartheta_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

**Obr. 4: oteplování a ochlazování vodiče v čase [1]**

$\Delta \vartheta_{\infty}$  oteplení vodiče při dosažení ustáleného stavu

$\tau$  časová konstanta ohřevu vodiče (je závislá na  $\alpha_0 = \alpha_0$  (2)) a na  $c = c$  (2))

[1]

### 1.2.2 Krátkodobé oteplování

Vodič, kterým procházel proud, je ohřátý. Po té, co přestane proud procházet, začne se vodič opět ochlazovat.

Rovnice rovnováhy množství tepel:

$$0 = \alpha_0 A \Delta \vartheta dt + cV \Delta \vartheta, \quad t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \Delta \vartheta + cV \Delta \vartheta$$

počáteční podmínka:  $t = 0, \Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max}$

$$B = \frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \Delta \vartheta_{\max}, \quad t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \frac{\Delta \vartheta}{\Delta \vartheta_{\max}}$$

Okamžitá teplota vodiče bude:

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{\max} e^{-\frac{\alpha_0 A}{cV} t} = \Delta \vartheta_{\max} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad \tau = \frac{cV}{\alpha_0 A}$$

Tento vztah odpovídá křivce ochlazování v obr. 4. [1]

### 1.2.3 Ochlazování vodiče

Pokud by elektrický proud procházel vodičem pouze velmi krátkou dobu, nedošlo by k výměně tepla s okolím a pak je možné tento děj považovat za adiabatický. Rovnice rovnováhy množství tepel.

$$RI^2 dt = cV d\vartheta,$$

Dosadíme počáteční podmínku  $t = 0, \Delta \vartheta = \Delta \vartheta_{kd} = 0$  :

$$\Delta \vartheta_{kd} = \frac{RI^2}{cV} t_{kd}$$

Jestliže doba ohřevu  $t_{kd}$  nepřekročí hodnotu  $0,2\tau$ , bude nám v technické praxi předchozí vzorec stačit jako dostatečně přesný. Pokud se bude během ohřevu měnit velikost proudu, nahradíme  $I$  proměnnou hodnotou  $i(t)$ .

$I^2 t_{kd}$  nahradíme výrazem  $\int_0^{t_{kd}} i^2(t) dt$

Pokud bude vzrůstat teplota, budou se měnit i hodnoty materiálových konstant  $\rho(\vartheta)$  a  $c(\vartheta)$ ,

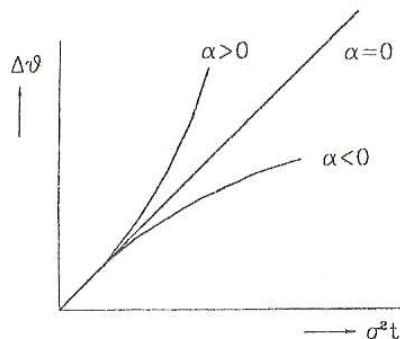
vyjádříme:  $R = \rho \frac{l}{S}$  a  $V = S * l$

dostaneme výraz:

$$\Delta \vartheta_{kd} = \frac{\rho I^2}{c V I S^2} t_{kd} = \frac{\rho}{c} \left( \frac{I}{S} \right)^2 t_{kd} = \frac{\rho}{c} \sigma^2 t_{kd}$$

$\sigma^2$  je impuls kvadratické hodnoty proudové hustoty.

Největší hustota proudu je v místě vodiče s jeho nejmenším průřezem. Měříme oteplení v tomto bodě. Pokud je vodič zapojen v obvodě s ideálním zdrojem proudu ( $I = \text{konst.}$ ), výsledný průběh nárůstu teploty vodiče bude v závislosti na rezistivitě materiálu vodiče odpovídat jedné z křivek na obr.5. Kovům odpovídá křivka s  $\alpha \geq 0$  a polovodičům  $\alpha < 0$ .



Obr. 5: teplotní závislost na rezistivitě vodiče s ideálním zdrojem I [1]

Obdobným vztah dostaneme, pokud namísto hodnoty proudu  $I$  dosadíme do rovnice:

$$\Delta \vartheta_{kd} = \frac{R I^2}{c V} t_{kd}$$

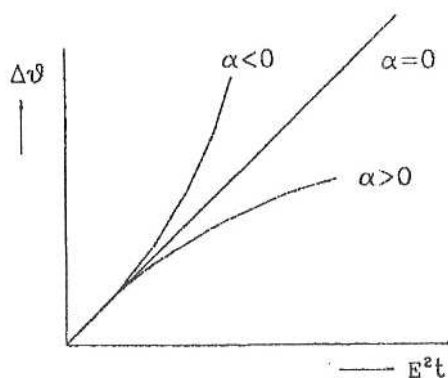
hodnotu úbytku napětí na vodiči  $U$ . Opět dosadíme  $R$  a  $V$  a získáme výraz:

$$\Delta \vartheta_{kd} = \frac{U^2}{c V} t_{kd} = \frac{U^2 S}{\rho c I^2 S} t_{kd} = \frac{1}{\rho c} E^2 t_{kd}$$

$E^2 t_{kd}$  je impuls kvadratické hodnoty intenzity elektrického pole.

Oteplení vodiče v závislosti na hodnotě koeficientu teplotní závislosti rezistivity jeho materiálu lze vidět na obrázku 6. Popisuje se zde chování po připojení vodiče do obvodu s ideálním zdrojem napětí dle zvoleného materiálu.





Obr. 6: teplotní závislost na rezistivitě vodiče s ideálním zdrojem U [1]

Pokud je vodič dlouhodobě přetížen jmenovitým proudem zařízení, může dojít ke zkratu. Tyto teploty bývají nejvyšší a vyjádříme je vztahem:

$$\vartheta_{kd} = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_{\infty} + \Delta\vartheta_{kd}$$

$\vartheta_0$  teplota okolí [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\Delta\vartheta_{\infty}$  oteplení dlouhodobě působícím jmenovitým proudem [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$\Delta\vartheta_{kd}$  adiabatické oteplení zkratovým proudem [ $^{\circ}\text{C}$ ]

Dovolené hodnoty adiabatického oteplení zkratovým proudem jsou pro hliník a jeho slitiny  $200^{\circ}\text{C}$ , pro měď a barevné kovy  $300^{\circ}\text{C}$  a pro ocel  $400^{\circ}\text{C}$ . [1]

### 1.3 Chlazení vodiče okolním tekutým prostředím

Při přestupu tepelné energie z povrchu vodiče do okolního tekutého prostředí (kapalina nebo plyn), dochází k sálání, tedy k vyzařování elektromagnetických vln v infračerveném oboru spektra. Druhý jev, který se zde uplatňuje, je vedení tepla a sním souvisí kinetická energie částic způsobená jejich tepelným pohybem, v kombinaci s přenosem entalpie při proudění kapaliny. [1]

#### 1.3.1 Sálání

Stefan – Boltzmannův zákon udává vztah pro tepelný tok z povrchu sálajícího tělesa:

$$\Phi = 57E_s A(T^4 - T_0^4) * 10^{-9}$$

Součinitel sálání absolutně černého tělesa odpovídá právě hodnotě  $57 * 10^{-9} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ .

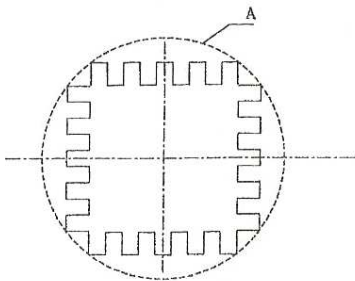
A velikost sálajícího povrchu tělesa  
 $E_s$  měrná sálavost (emisivita) povrchu

Pro absolutně černé těleso bude  $E = 1$ , zrcadlově vyleštěné kovové plochy budou mít  $E = 0,02$ , pro matný černý povrch se udává hodnota  $E = 0,98$ .

V technických výpočtech používáme pro výpočet hodnoty součinitele přestupu tepla z povrchu tělesa sáláním vztah:

$$\Phi_s = 57E_s A(T^4 - T_0^4) * 10^{-9} = \alpha_s A(T - T_0)$$

$$\alpha_s = 57E_s A(T^4 - T_0^4) * (T - T_0)^{-1} * 10^{-9}$$



Při výpočtech uvažujeme pouze „vypouklý“ obalový povrch tělesa. Teplo vyslané z prohlubní povrchu dopadá na protilehlé stěny a zůstává v tělese, viz obr. 7.

**Obr. 7: Obalová plocha vyzařování tělesa [1]**

Pokud se v okolí sálajícího tělesa nacházejí další tělesa, která sálají teplo, nebo pokud je toto těleso uzavřeno mezi sálající stěny, je potřeba člen  $\alpha_s$  doplnit o činitel zmenšení  $k_s$  [1].

Pro předávání tepla mezi stejně velkými stěnami s teplotami  $\vartheta_1$  a  $\vartheta_2$  a emisivitami  $E_{s1}$  a  $E_{s2}$ , je třeba dopočítat účinnou emisivitu  $E_{s12}$ , kterou již můžeme použít v předchozích vzorcích.

$$E_{s12} = \frac{1}{\frac{1}{E_{s1}} + \frac{1}{E_{s2}} - 1}$$

Pokud obklopuje plocha  $A_2$  plochu  $A_1$ , která je menší a teplejší než  $A_2$ , dopočítáme vzájemnou emisivitu ze vztahu:

$$E_{s12} = \frac{1}{\frac{1}{E_{s1}} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{E_{s2}} - 1 \right)}$$

[1]

### 1.3.2 Přirozené proudění

Díky termosifonového efektu dochází při přestupu tepla z povrchu pevného tělesa do okolního tekutého k přirozenému proudění tekutiny, kdy při povrchu tělesa proudí plyn nebo kapalina podél něj laminárním způsobem. Rychlost tohoto proudění roste se vzdáleností od povrchu tělesa. Proudění již nemá pouze suvný charakter pohybu, ale vznikají také víry a turbulence. Reynoldsovo číslo charakterizuje proudění:

$$Re = \frac{v_k h}{\nu}$$

- $v_k$  mezní rychlost změny laminárního proudění na turbulentní
- $h$  charakteristický rozměr (např. šířka chladícího kanálku)
- $\nu$  kinematičká viskozita tekutiny

Tyto turbulence zlepšují chlazení povrchu tělesa, protože na rozdíl od laminárního proudění těsně při povrchu tělesa toto turbulentní proudění odnáší celou vnitřní energii proudících částic kolmo od tělesa.

Pro ochlazování povrchu platí vztah:

$$\frac{\alpha_k h}{\lambda} = c_k \left( \frac{g \beta \Delta \vartheta h^3}{\nu^2} * \frac{\eta c}{\lambda} \right)^\alpha, \quad N_u = c_k (G_r P_r)^\alpha, \quad \nu = \frac{\eta}{m}$$

- $N_u$  Nusseltovo číslo
- $G_r$  Grashoffovo číslo
- $P_r$  Prandtlovo číslo
- $A_k$  součinitel přestupu tepla [ $Wm^{-2}K^{-1}$ ]
- $g$  tíhové zrychlení [ $ms^{-2}$ ]
- $\beta$  objemový součinitel teplotní roztažnosti tekutiny [ $K^{-1}$ ]
- $c$  měrná tepelná hmotnostní jímavost [ $Jkg^{-1}K^{-1}$ ]
- $\eta$  dynamická viskozita [ $Pa \cdot s$ ]
- $\nu$  kinematičká viskozita [ $m^2s^{-1}$ ]
- $h$  charakteristický rozměr chlazeného útvaru [ $m$ ]
- $\lambda$  měrná tepelná vodivost [ $Wm^{-1}K^{-1}$ ]
- $m$  měrná hmotnost [ $Ns^2m^{-4}$ ]

Pokud použijeme běžná chladiva (vzduch, SF<sub>6</sub>, transformátorový olej) a v běžných rozsazích teplot můžeme vtaž zjednodužit a vyjádřit z něj  $\alpha_k$ :

$$\alpha_k = c_k \sqrt[4]{\frac{\Delta\vartheta}{h}} \quad \text{pro } h \geq 0,3 \text{ m}$$

$$\alpha_k = c_k \sqrt[4]{\Delta\vartheta} \quad \text{pro } h \geq 0,3 \text{ m}$$

U stěn chlazených dolů a odkloněných od svislice o úhel  $\varphi \leq 80^\circ$  vztah vynásobíme činitelem  $\sqrt[4]{\cos \varphi}$

Typické hodnoty měrné tepelné jímavosti při teplotách 20 – 100°C jsou:

pro transformátorový olej:  $c_{kol} = (13 + 0,12\Delta\vartheta)c_{kvzduchu}$

pro vodu:  $c_{voda} = (110 + \Delta\vartheta)c_{kvzduchu}$

pro SF<sub>6</sub>:  $c_{kSF_6} = 2,2c_{kvzduchu}$

Chlazený útvar		$\alpha_k$ [W/Km]	Poznámka	
Vodorovný válec o průměru D		$1,3 (\Delta\vartheta/D)^{1/4}$	D ≤ 0,5 m	
Dlouhá svislá stěna		$1,8 (\Delta\vartheta)^{1/4}$	Výška stěn	h ≥ 0,3
Krátká svislá stěna		$1,35 (\Delta\vartheta/h)^{1/4}$		h ≥ 0,3
Vodorovná plocha	Rozměrná, chlaz. nahoru	$2,5 (\Delta\vartheta)^{1/4}$	Charakteristický rozměr	h ≥ 0,3
	Menší, chlaz. nahoru	$1,3 (\Delta\vartheta/h)^{1/4}$		h ≥ 0,3
	Rozměrná, chlaz. dolů	$1,3 (\Delta\vartheta)^{1/4}$		h ≥ 0,3
	Menší, chlazená dolů	$0,6 (\Delta\vartheta/D)^{1/4}$		h ≥ 0,3

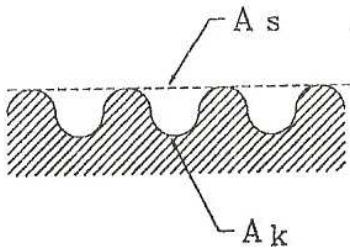
**Tab 1: měrný součinitel přestupu tepla**

V tabulce jsou uvedeny hodnoty měrného součinitele přestupu tepla přirozenou kondukcí a konvekcí z povrchu těles do vzduchu.

[1]

### 1.3.3 Výsledný souhrn chladivosti povrchu

Budeme-li mít těleso, jehož povrch se chladí plynem (např. vzduchem), kam se odvádí přebytečné teplo, může nastat kombinace odvodu tepla jak sáláním, tak i prouděním a vedením. Povrch tělesa je třeba rozdělit na části, podle toho, která část odvádí teplo sáláním  $A_s$  a která část odvádí teplo prouděním v kombinaci s vedením  $A_k$ , jak je znázorněno na obrázku 8.



Obr. 8: Povrch tělesa odvádějící teplo sáláním  $A_s$  a prouděním spolu s vedením  $A_k$  [1]

Pro blízka tělesa navíc počítáme s vlivem činitele zmenšení tepelného toku sáláním a dostáváme vztah:

$$\alpha_0 A_k \Delta \vartheta = (\alpha_k A_k + k_s \alpha_s A_s) \Delta \vartheta$$

Odtud vyjádříme  $\alpha_0$ :

$$\alpha_0 = \alpha_k + k_s \frac{A_s}{A_k} \alpha_s = \alpha_k + N \alpha_s, \quad N \leq 1$$

$N$  je opravný činitel chlazení sáláním, respektující vliv blízka těles a konkávní lokality povrchu. V technických výpočtech se vztahy pro  $\alpha_s$ ,  $\alpha_k$ ,  $\alpha_0$  nahrazují v rozsahu teplot 0 – 100 °C lineární aproximační závislostí:

$\alpha_s = 1,7 + 0,01 \Delta \vartheta$	$E_s = 0,3$	povrch je světlý, lesklý
$\alpha_s = 4,8 + 0,03 \Delta \vartheta$	$E_s = 0,85$	povrch je tmavý, matný
$\alpha_k = 6,5 + 0,05 \Delta \vartheta$		
$\alpha_0 = 8,2 + 0,06 \Delta \vartheta$	$E_s = 0,3$	povrch je spíše světlý, lesklý
$\alpha_0 = 11,3 + 0,08 \Delta \vartheta$	$E_s = 0,85$	povrch je tmavý, matný

Tab 2: Dopočet  $\alpha_0$  pro různé povrchy

[1]

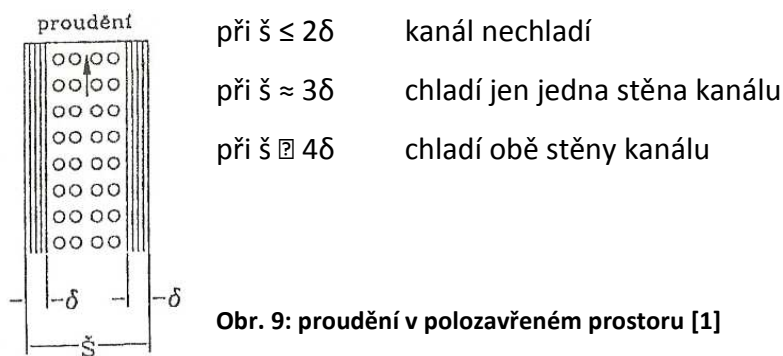
### 1.3.4 Přirozené proudění v omezeném povrchu

Pokud bude chladivo přirozeně proudit uvnitř chladícího kanálu omezeného průřezu (polozavřené prostory uvnitř přístrojů, chladící kanálky), musíme posoudit šířku kanálu. Přestup tepla přes odpor laminární hraniční vrstvy můžeme přibližně vyjádřit vztahem:

$$R_{\vartheta} = \frac{1}{\alpha_k A} \cong \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta}{A}$$

Přibližná tloušťka hraniční vrstvy bude:

$$\delta \cong \frac{\lambda}{\alpha_k}$$



Ze zcela uzavřených prostor se teplo odvádí pouze vedením a sáláním, ačkoliv přítomnost proudění by přenos tepla zlepšila. [1]

## 2 Chlazení elektrického zařízení

### 2.1 Tepelné ztráty v rozvaděčích

V každém rozvaděči se setkáváme s tepelnými ztrátami. Jedná se o ztrátový výkon proudových obvodů neboli Jouleovo teplo, které vzniká průchodem elektrického proudu. Výsledkem tohoto jevu je nárůst teploty jednotlivých prvků proudové dráhy. Teplo přestupuje z proudových obvodů do vnitřních prostor rozvaděče a tím je ohřívá. Nadbytečné teplo poté sálá do okolí rozvaděče, dokud nedojde k vytvoření tepelné rovnováhy s ustáleným rozložením teploty. Naším úkolem je vytvořit tepelný návrh rozvaděče, kde bude teplota rozložena tak, aby za normálních podmínek nedošlo k překročení tepelných mezí jednotlivých částí zařízení.

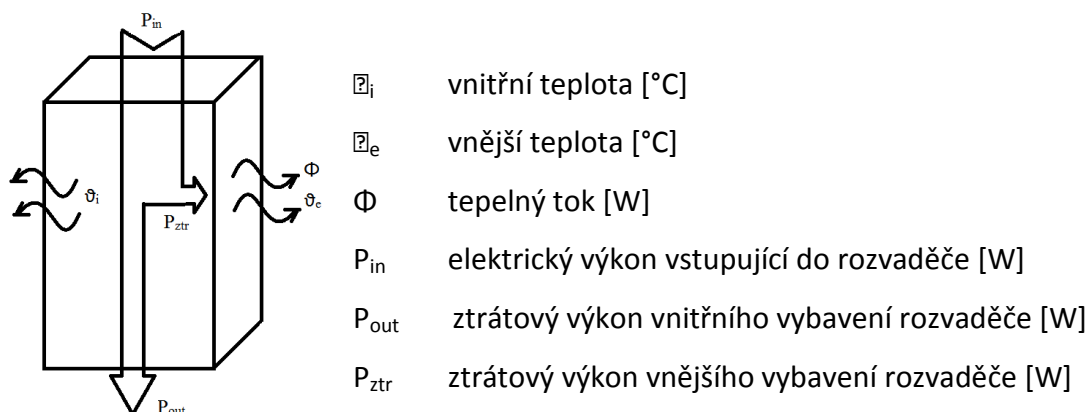
Zda je návrh správně můžeme ověřit typovou oteplovací zkouškou rozvaděče, která je nákladná a často nerealizovatelná, protože vyžaduje jmenovitou zátěž. V souladu s normou ČSN 35 7107 můžeme zkoušku provést výpočtem na základě matematické extrapolace údajů, které byly zjištěny při zkouškách jiných rozvaděčů. Postup výpočtu nalezneme v publikaci číslo 890 Mezinárodní elektronické komise IEC.

Zdroji nežádoucího tepla bývají kabely, svorky, přístroje jako jsou jističe, pojistky, zdroje apod. Pro tyto prvky určujeme při jmenovitém zatížení výkonové (P) a energetické (E) ztráty.

$$P = RI^2 \quad [W; \Omega, A]$$

$$E = Pt \quad [J; W, s]$$

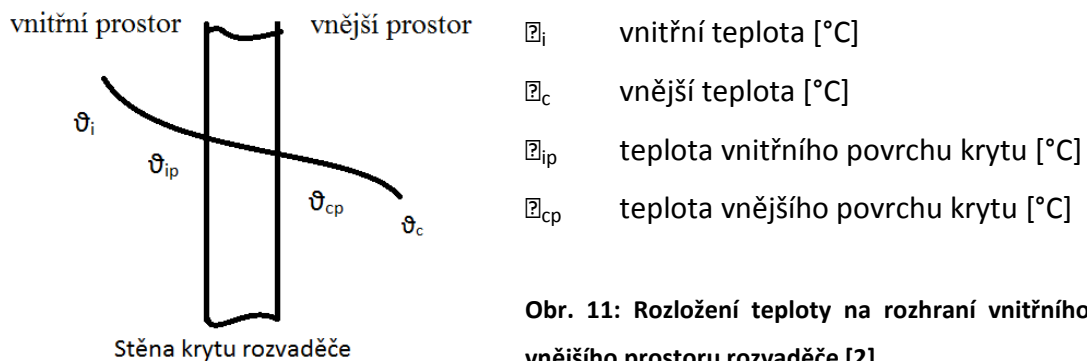
Teplotní rozdíl rostoucí teploty proudové dráhy a okolního prostředí vyvolá tepelný tok  $\Phi$  proudové dráhy do vnitřního prostředí rozvaděče. Teplota uvnitř rozvaděče roste, ohřívá se jeho kryt a díky tomu vzniká tepelný tok mezi krytem a vnějším prostředím.



**Obr. 10: Tepelné toky v rozvaděči [2]**

U rozvaděčů je vhodné, aby pracovaly při stabilní teplotě a vlhkosti. Pokud tuto podmínku nesplníme, může dojít k přehřátí vnitřního vybavení a tím k selhání jeho funkce. Nízké teploty a přítomnost vlhkosti také působí negativně na správnou funkci. Proto se doporučuje teplota v rozmezí 10° - 40°C a relativní vlhkost 30 – 90%, přičemž od 63% již dochází k elektrolytické korozi. Teploty by neměly klesat pod teplotu rosného bodu.

Každý použitý materiál v rozvaděči má jinou tepelnou vodivost a to ovlivňuje i rozložení teplot na rozhraní vnitřního a vnějšího prostředí rozvaděče. Dalším důležitým prvkem jsou tepelně výměnné pochody v mezní povrchové vrstvě uvnitř a vně krytu, viz Obr. 11.



Obr. 11: Rozložení teploty na rozhraní vnitřního a vnějšího prostoru rozvaděče [2]

Velikost tepelného toku procházejícího krytem vypočítáme ze vztahu:

$$\Phi = A * K(\vartheta_i - \vartheta_c)$$

- A plocha rozhraní [m<sup>2</sup>]
- K součinitel prostupu tepla [Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>]
- $\vartheta_i$  teplota vnitřního prostředí [°C]
- $\vartheta_c$  teplota vnějšího prostředí [°C]

V praxi je obtížné určení součinitele prostupu tepla K. Při výpočtu je nutné vzít v úvahu způsob instalace rozvaděče. Jednotlivé plochy mají různé vyzařovací schopnosti. Je rozdíl, zda rozvaděč stojí volně, je nástěnný, rohový, je instalován do volně stojící řadové zástavby nebo zda je zcela obestavěný. Rozvaděč může být montován do výklenku nebo na podložku. [2,3]

## 2.2 Účinný chladicí povrch rozvaděče

Naším úkolem je stanovit skutečné účinné chladicí plochy  $A_{ei}$ . Na základě řady měření byly určeny součinitele povrchu  $b_i$ . Ty nám umožňují respektovat podmínky prostupu tepla pozměněné způsobem instalace. Dostáváme skutečné „geometrické“ plochy krytů a můžeme tedy počítat účinné chladicí plochy  $A_{ei}$ . Nyní již můžeme při výpočtu tepelného toku počítat se součinitelem prostupu tepla K materiálu použitého



na výrobu krytu rozvaděče. Výslednou účinnou chladící plochu krytu  $A_e$  dostaneme z výrazu:

$$A_e = \sum_{i=1}^{i=n} A_{0i} b_i$$

V tabulce 3 nalezneme hodnoty součinitele povrchu  $b$  při respektování způsobu instalace vodiče.

Způsob instalace (umístění) rozvaděče	Součinitel $b$
Kryt je shora přístupný	1,4
Kryt je shora nepřístupný (např. u vestavěných rozvaděčů)	0,7
Svislý povrch krytu (přední, boční nebo zadní panel) je přístupný	0,9
Zadní a boční přístup povrchu je nepřístupný (např. při montáži na stěnu)	0,5
Boční povrch v případě řadových rozvaděčů je nepřístupný	0,5
Dno rozvaděče	nebere se v úvahu

**Tab. 3: Velikost součinitele povrchu  $b$  [2]**

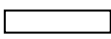
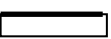
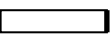
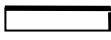
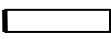

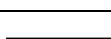
Typické hodnoty součinitele přestupu tepla  $K$  jsou:

pro celoplechový kryt rozvaděče:  $K_{Fe} \approx 5,5 \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{]}$

pro plastový kryt rozvaděče:  $K_{Plast} \approx 3,5 \text{ [Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{]}$

Po splnění předchozích předpokladů kryt o účinném chladícím povrchu  $A_e$  reprezentuje kryt, který stojí volně a má stejné ochlazovací vlastnosti, jako zastavěný kryt o ploše  $A_0$  dané jeho geometrickými rozměry.

V tabulce 4 nalezneme vztahy pro výpočet účinného chladícího povrchu  $A_e$  při respektování umístění rozvaděče.

Symbol	Způsob zástavby	Vztah pro výpočet účinného chladícího povrchu $A_e$
	Samostatný kryt přístupný ze všech stran	$A_e = 1,8 \cdot H \cdot (B + T) + 1,4 \cdot B \cdot T$
	Samostatný kryt pro montáž ke zdi	$A_e = 1,8 \cdot T \cdot H + 1,4 \cdot B \cdot (H + T)$
	Samostatný kryt umístěný bokem ke zdi	$A_e = 1,4 \cdot T \cdot (B + H) + 1,8 \cdot B \cdot H$
	Samostatný kryt umístěný v rohu	$A_e = 1,4 \cdot H \cdot (B + T) + 1,4 \cdot B \cdot T$
	volně stojící řadový rozvaděč	$A_e = 1,8 \cdot H \cdot B + 1,4 \cdot B \cdot T + T \cdot H$
	řadový rozvaděč pro montáž do zdi (vrch přístupný)	$A_e = 1,4 \cdot B \cdot (H + T) + H \cdot T$
	řadový rozvaděč pro montáž do zdi (vrch nepřístupný)	$A_e = 1,4 \cdot B \cdot H + 0,7 \cdot B \cdot T + T \cdot H$

Tab. 4: Výpočet účinného chladícího povrchu  $A_e$  [2]

Pro vztahy uvedené v tabulce 2 platí:

B šířka krytu  
H výška krytu  
T hloubka krytu

Tepelný tok  $\Phi$  přecházející z krytu rozvaděče do okolí odpovídá ztrátové energii prošlé za jednotku času plochou krytu. V ustáleném teplotním stavu je tento tepelný tok  $\Phi$  roven vnitřnímu ztrátovému výkonu  $P_{ztr}$ .

Pro jednotlivé části rozvaděče existuje hodnota dovoleného oteplení, která nesmí být překročena. Tyto mezní hodnoty oteplení pro jednotlivé díly jsou pro:

svorky pro připojení izolovaných vnějších vodičů 70 °C  
ručně ovládané kovové součásti 15 °C  
součásti z izolačního materiálu 25 °C  
přístupné vnější kryty s kovovým povrchem 30 °C  
přístupné vnější kryty s izolačním povrchem 40 °C

[2,3]

### 3 Analytický výpočet rozvaděče

V této kapitole vypočítáme teplotní diferenci mezi vnitřním a vnějším prostředím rozvaděče za předpokladu, že rozvaděč není ventilován, tedy pokud by nedocházelo k jeho aktivnímu chlazení.

Náš konkrétní rozvaděč má šířku  $B = 0,62$  m, výšku  $H = 0,82$  m a hloubku  $T = 0,26$  m.

Protože se jedná o samostatné kryty přístupné ze všech stran, vyjdeme při výpočtu účinného chladícího povrchu ze vzorce:

$$A_e = 1,8 \cdot H \cdot (B + T) + 1,4 \cdot B \cdot T$$

po dosazení:

$$A_e = 1,8 \cdot 0,82 \cdot (0,62 + 0,26) + 1,4 \cdot 0,62 \cdot 0,26 = 1,29888 + 0,22568 = 1,52456 \text{ m}^3$$

Celkový účinný chladící povrch rozvaděče  $A_e$  je tedy  $1,52456 \text{ m}^3$ .

Při výpočtu teploty vyjdeme ze vzorce:

$$\Phi = A \cdot K(\vartheta_i - \vartheta_c),$$

$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{K \cdot A_e} \quad \rightarrow \quad \Delta\vartheta = \frac{\sum P_z}{K \cdot A_e}$$

Celkový ztrátový výkon  $P_z$  dostaneme součtem výkonů všech součástí rozvaděče.

Dle zadání je rozvaděč osazen součástkami:

#### 1. blok

jistič	1A 1f	1,23W
jistič	6A 1f	1,75W
stykač	25A 3f	3 * 0,63W
jistič	25A 3f	3 * 3,08W
jistič	16A 3f	3 * 2,04W
jistič	16A 3f	3 * 2,04W
7 * jistič	16A 1f	7 * 2,04W
teplotní relé	18 A	7 W
stykač	18A 3f	3 * 0,4W

Tab 5: Hodnoty výkonů prvního bloku

$$P_{1ztr} = 1,23 + 1,75 + 3 * 0,63 + 3 * 3,08 + 3 * 2,04 + 3 * 2,04 + 7 * 2,04 + 7 + 3 * 0,4 =$$

$$= 48,83 \text{ W}$$

2. blok: Inteligentní relé Zelio

$$P_{2ztr} = 7 \text{ W}$$

3. blok: triakový regulátor Regin TTC2000

$$P_{3ztr} = 20 \text{ W}$$

4. blok: frekvenční měnič ABB ACS350

$$P_{4ztr} = 100 \text{ W}$$

5. blok: hlavní vypínač 160A; 3\*2,7W

$$P_{5ztr} = 3 * 2,7 = 8,1 \text{ W}$$

6. blok: spínaný zdroj 24V

$$P_{6ztr} = 8 \text{ W}$$

7. blok: 7\*stykač 9A 3f; 3\*0,21W

$$P_{7ztr} = 7 * 3 * 0,21 = 4,41 \text{ W}$$

8. blok: 25 \* řadové svorky

$$P_{8ztr} = 5 \text{ W}$$

$$\sum P_z = P_{1ztr} + P_{2ztr} + P_{3ztr} + P_{4ztr} + P_{5ztr} + P_{6ztr} + P_{7ztr} + P_{8ztr} =$$

$$= 48,83 + 7 + 20 + 100 + 8,1 + 8 + 4,41 + 5 = 201,34 \text{ W}$$

Dále dosadíme hodnotu pro  $K_{\text{plast}} = 3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , tedy:

$$\Delta \vartheta = \frac{\sum P_z}{K * A_e} \quad \rightarrow \quad \Delta \vartheta = \frac{\sum 201,34}{3,5 * 1,52456} = 37,7326^\circ\text{C}$$

Uvažovali jsme teplotu okolí rozvaděče  $\vartheta_c = 25^\circ\text{C}$

$$\vartheta_i = \frac{\sum P_z}{K * A_e} + \vartheta_c = 37,73 + 25 = 62,73^\circ\text{C}$$

Vnitřní teplota rozvaděče v případě, že nebude aktivně chlazen a v okolí bude  $25^\circ\text{C}$  se bude pohybovat okolo  $63^\circ\text{C}$ .

## 4 Numerická analýza oteplení

### 4.1 Zadání

Úkolem bylo provést analýzu chlazení elektrického zařízení v rozvaděči. Pro praktickou část byl určen konkrétně osázený rozvaděč i jeho konkrétní parametry.



**Obr. 12: Fotografie rozvaděče**

Prvním krokem bylo nakreslení obrysů skříňky i vnitřního vybavení rozvaděče podle zadaných rozměrů v pracovním prostředí programu Ansys. Bylo nutné zahrnout také šířku stěny krytu a otvory pro odvětrávání rozvaděče.

V druhém kroku bylo třeba navržený model rozvaděče pokrýt sítí pro výpočet, aby bylo později možné dopočítat konkrétní hodnoty v jednotlivých bodech sestavy.

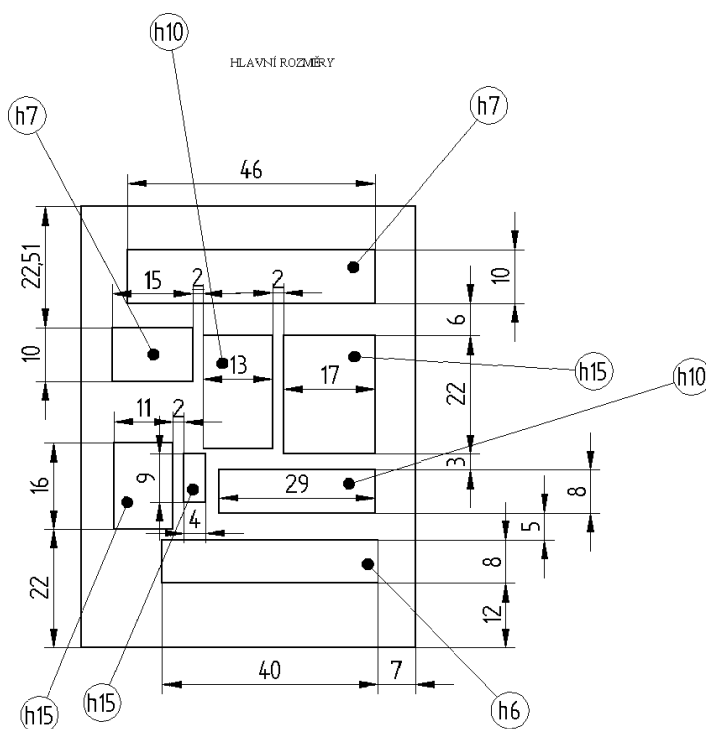
V dalším kroku bylo třeba předpřipravit si úlohu a dopočítat některé hodnoty, jako třeba objemy vnitřního osazení a celkové ztrátové výkony jednotlivých bloků a odtud dopočítat objemové zdroje energií jednotlivých bloků. Tyto hodnoty budou později potřebné pro dosazení do okrajové úlohy.

Ještě před samotným výpočtem v programu Fluent bylo třeba nastavit okrajovou úlohu obsahující informace o množství vzduchu proudícího větracím otvorem, o materiálech stěn i vnitřního vybavení, tloušťku stěn, koeficienty přestupu tepla do okolí pro stěny, okolní teplotu, gravitaci, velikost objemových zdrojů energie jednotlivých bloků. Pro každý použitý materiál byla také zadána měrná teplená jímavost  $c_p$ , měrná tepelná vodivost  $\lambda$  a hustota látky  $\rho$ .

Teprve nyní bylo možné provést výpočet v programu Fluent a analyzovat výsledky.

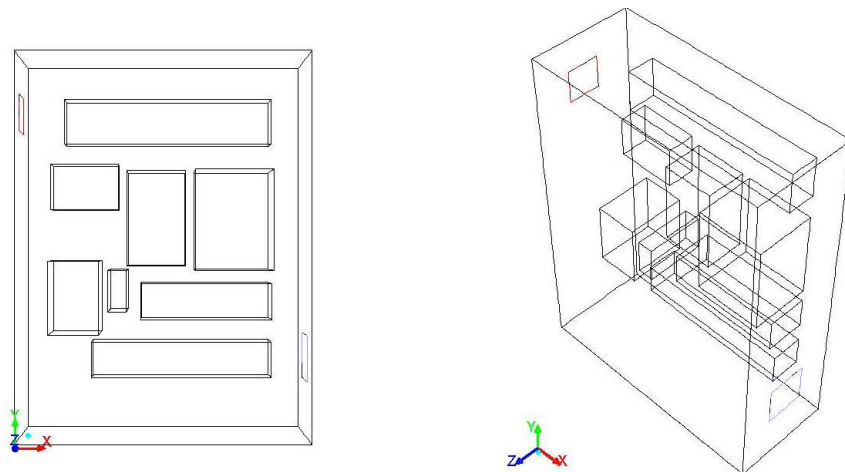
## 4.2 Nákres rozvaděče

Hlavní rozměry rozvaděče jsou výška = 0,82 m, šířka 0,62 m a hloubka 0,26 m. Na levém a pravém boku nalezneme větrací otvor. V pravé spodní části se nachází vstupní otvor s ventilátorem o rozměrech 10 x 10 cm. V levé horní části se nachází otvor o stejných rozměrech ale tentokrát bez ventilátoru, který slouží k odvodu přebytečného tepla a vzduchu. Uvnitř rozvaděče se nachází celkem 8 bloků. Jejich kóty a rozložení nalezneme na obr 13.



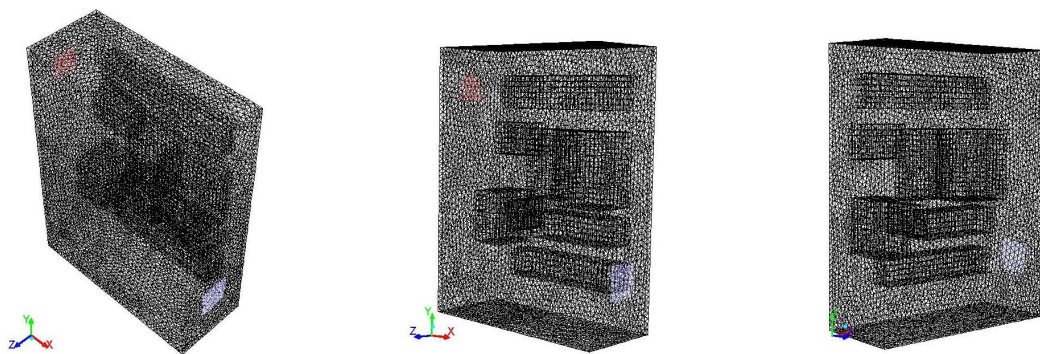
Obr. 13: Rozměry a umístění vnitřního osazení rozvaděče

Šířka stěn rozvaděče byla zvolena 0,5 cm. Výslednou podobu prostorového nákresu si můžeme prohlédnout na obrázku č. 14.



**Obr. 14: Osázená skříň rozvaděče, pohled zepředu a ze strany**

Takto připravený model již můžeme diskretizovat sítí pro následující výpočty a simulace, viz obr. 15.



**Obr. 15: Rozvaděč pokrytý výpočetní sítí, boční pohledy**

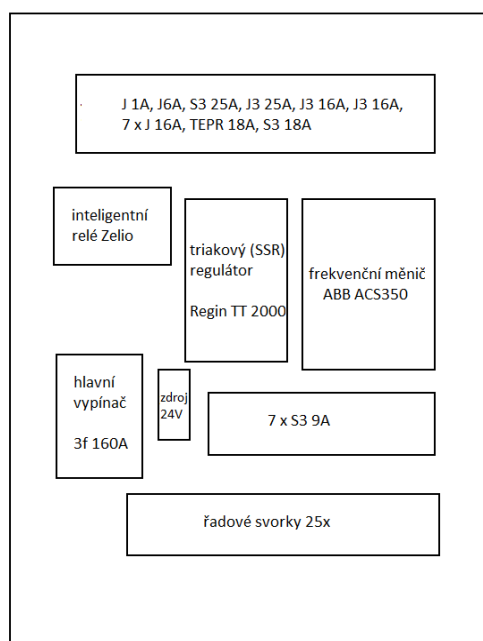
Sít' je třeba nastavit vhodně, abychom dosáhli optimálních výsledků s ohledem na složitost a čas výpočtu.

### 4.3 Zadání okrajových podmínek

Nejprve dopočítáme celkový ztrátový výkon jednotlivých bloků (viz. kapitola 3 Analytický výpočet rozvaděče). První blok je osázený jističi, tepelným relé, 25 A 3f stykačem a 18 A 3f stykačem, jak je vidět na obr. 15. Dopočítáme pro něj ztrátový výkon  $P_{1ztr} = 48,83$  W. Inteligentní relé Zelio má ztrátový výkon  $P_{2ztr} = 7$  W, triakový regulátor Regin TTC2000 má  $P_{3ztr} = 20$  W, frekvenční měnič ABB ACS350 pracuje se ztrátovým výkonem  $P_{4ztr} = 100$  W, hlavní vypínač má  $P_{5ztr} = 8,1$  W, spínaný zdroj 24V má  $P_{6ztr} = 8$  W. V sedmém bloku je sedm stykačů 9A 3f s celkovým  $P_{7ztr} = 4,41$  W a v osmém bloku je 25 řadových svorek o celkovém ztrátovém výkonu  $P_{8ztr} = 5$  W.

#### Osazení

J jistič 1f  
 J3 jistič 3f  
 S3 stykač 3f (LC1-Dxx AC)  
 TEPR tepelné relé



**Obr. 16: osazení rozvaděče součástkami**

Z objemů jednotlivých bloků a jejich ztrátových výkonů jsem dopočetla objemový zdroj energie pro každý blok. Tyto objemové zdroje energie je třeba zadat jako okrajovou podmínku pro výpočet ve Fluentu.

Blok	$P_{ztr}$ [W]	V [m <sup>3</sup> ]	$P_{ztr}/V$ [W/m <sup>3</sup> ]
Blok s jističi, stykači a relé	48,83	0,00322	15154,6
Inteligentní relé Zelio	7	0,00105	6666,7
triakový regulátor Regin TTC2000	20	0,00273	7326,0
frekvenční měnič ABB ACS350	100	0,00561	17825,3
hlavní vypínač 160A	8,1	0,00264	3068,2
spínaný zdroj 24V	8	0,00054	14814,8
7 * stykač 9A 3f	4,41	0,00232	1900,9
25 * řadové svorky	5	0,00256	1953,1

**Tab 6: Hodnoty ztrátových výkonů, objemů a objemových zdrojů energie jednotlivých bloků**



Nyní si určíme jednotlivé materiály. Každému materiálu je třeba přiřadit hustotu látky  $\rho$ , měrnou tepelnou jímavost  $c_p$  a měrnou tepelnou vodivost  $\lambda$ . Stěny rozvaděče jsou vyrobeny z polyesterového skelného laminátu. Pro něj přiřadíme hodnoty:

$$\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$c_p = 1050 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$\lambda = 0,21 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

Pro jednotlivé bloky je materiál těžko určitelný, protože jednotlivé součástky se skládají z kovových a izolačních částí. Proto byly jednotlivé hodnoty stanoveny odhadem:

$$\rho = 3000 \text{ kg/m}^3$$

$$c_p = 1050 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$\lambda = 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

Rozvaděč je vyplněn vzduchem, hustota vzduchu je zadána rovnicí ideálního plynu, navíc zadáváme viskozitu o hodnotě  $1,7894 \cdot 10^{-5}$ .

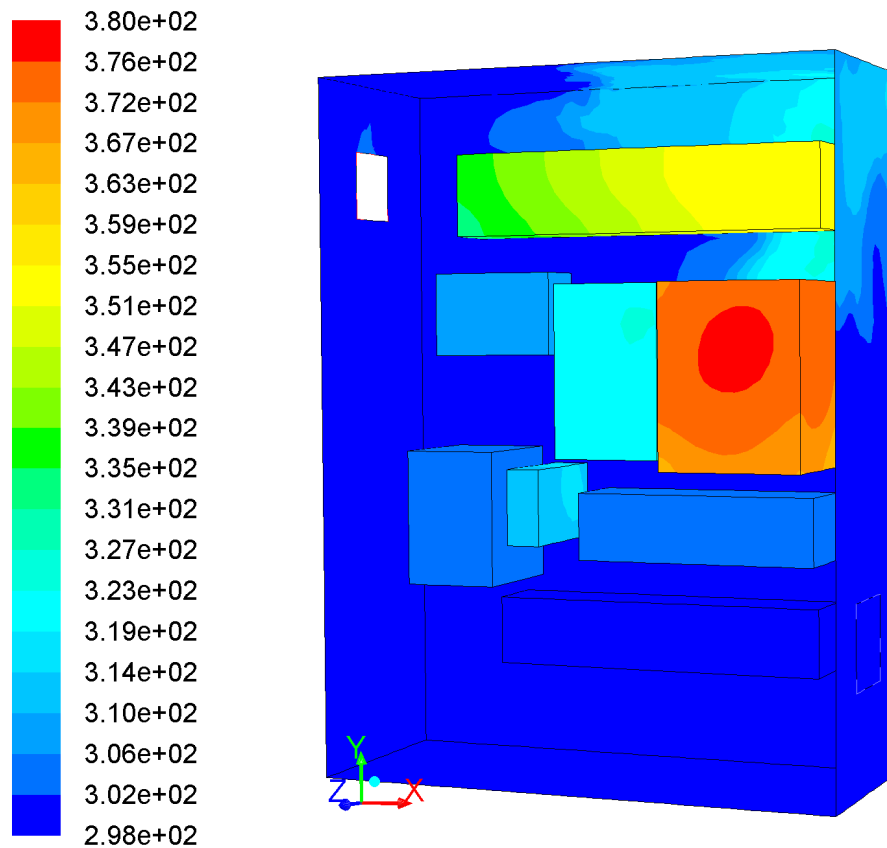
$$c_p = 1006 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$$

$$\lambda = 0,0242 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

Dále nastavíme pro každou venkovní stěnu rozvaděče součinitel přestupu tepla  $\alpha$ . Pro postranní stěny bude  $\alpha = 3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ , pro horní stěnu bude  $\alpha = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$  a pro dno bude  $\alpha = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$ . V neposlední řadě zadáme teplotu okolí  $25^\circ\text{C}$  a množství vzduchu, které bude proudit spodním ventilátorem. Zvolili jsme proudění  $0,035 \text{ kg/s}$  a pro srovnání byl celý výpočet proveden ještě znovu s prouděním  $0,02 \text{ kg/s}$  a také byla propočítána varianta, kdy rozvaděč není aktivně chlazen.

#### 4.4 Výsledky numerických výpočtů

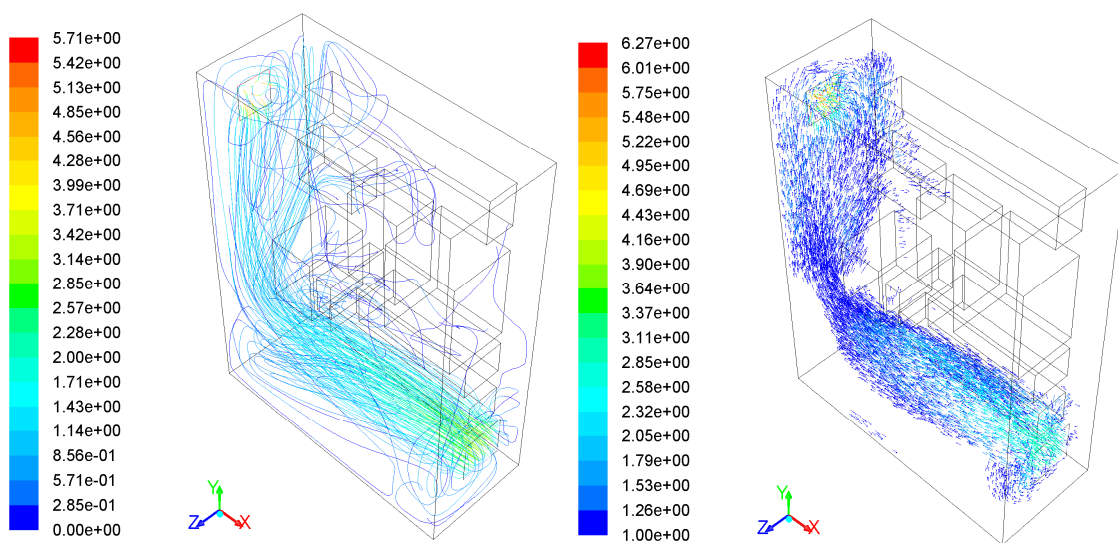
Zatímco analytický výpočet nám poskytl pouze hrubou představu o oteplení uvnitř rozvaděče na základě výpočtu bez kalkulace se všemi okrajovými podmínkami, numerický výpočet nám umožňuje prohlédnout si dění uvnitř rozvaděče detailněji. K výpočtu využíváme také daleko více známých údajů, proto můžeme výsledky považovat za věrohodnější. Nejprve byl proveden výpočet v případě, kdy do spodního otvoru ventilátor nuceně proudí vzduch v množství  $0,035 \text{ kg/s}$ . Výsledek si můžeme prohlédnout na obrázku 17, k nahlédnutí je teplotní spektrum rozvaděče, teploty jsou v Kelvinech.



Obr. 17: Rozložení teplot [K] na povrchu stěn i jednotlivých prvků uvnitř rozvaděče při chlazení nuceným prouděním vzduchu v množství 0,035 kg/s.

Na obrázku je patrné, že nejvíce se ohřívá frekvenční měnič ABB ACS350 (5. blok – přechod od oranžové do červené), jak bude dále znázorněno na modelaci proudění. Je to dáno nejen jeho vysokým ztrátovým výkonem, ale také umístěním. Ačkoliv má ve skutečnosti frekvenční měnič malý integrovaný ventilátor, má tento ventilátor velmi malý výkon a ve výpočtu nebyl kvůli náročnosti zohledněn. Nicméně frekvenční měnič má  $P_{4ztr} = 100 \text{ W}$ , což je největší zdroj oteplení v celém rozvaděči. Navíc je poměrně nevhodně umístěn. V místě, kde se nachází, dochází k poměrně malému průtoku vzduchu a tím i chlazení. Druhým největším zdrojem tepla je 1. blok s jističi. Tento blok má celkový ztrátový výkon  $P_{1ztr} = 48,83 \text{ W}$  a nachází se také v místě, kde dochází k malému proudění chladícího vzduchu. Na obrázku 18 je patrné, že hlavní proud prochází ve spodní části skříňky pod řadovými svorkami a stoupá vzhůru po levé stěně k větracímu otvoru.

Do zadní horní části, kde se nacházejí jističe a hlavně frekvenční měnič, proudí minimum chladícího vzduchu. Ten navíc nemá přirozený spád, jak je patrné na obrázku 18.

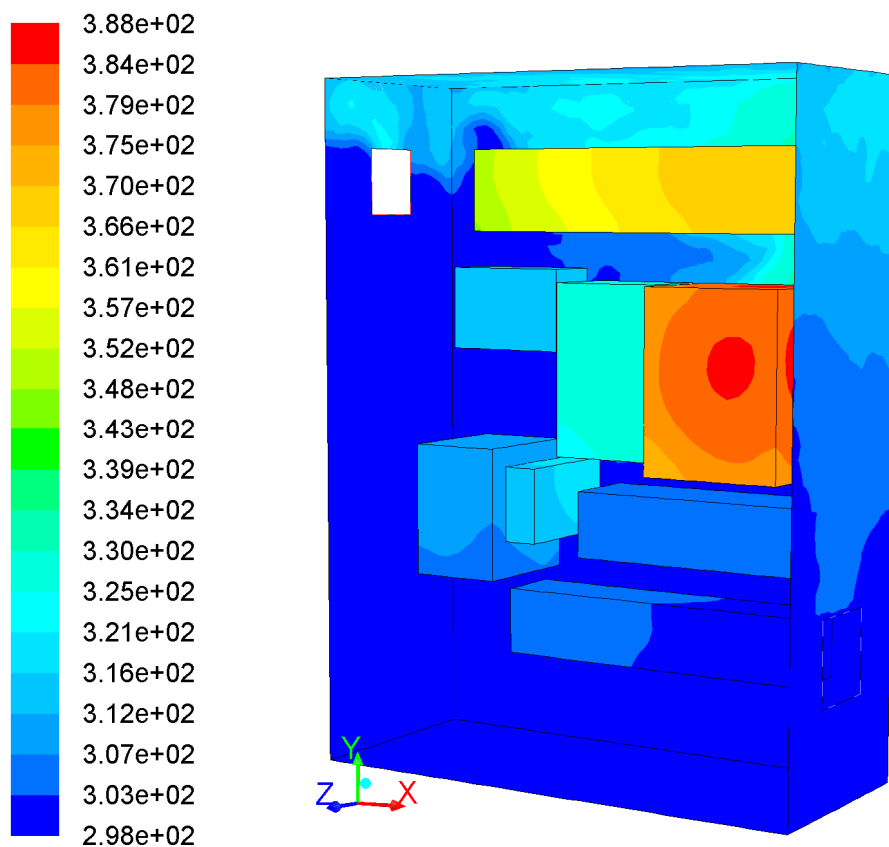


**Obr. 18:** Rychlost a směr proudění vzduchu o hmotnosti 0,035 kg/s. V levé části jsou patrné proudnice zbarvené dle rychlosti proudění a zohledňující směr proudění. V pravé části jsou vektory pro proudění rychlejší než 1 m/s.

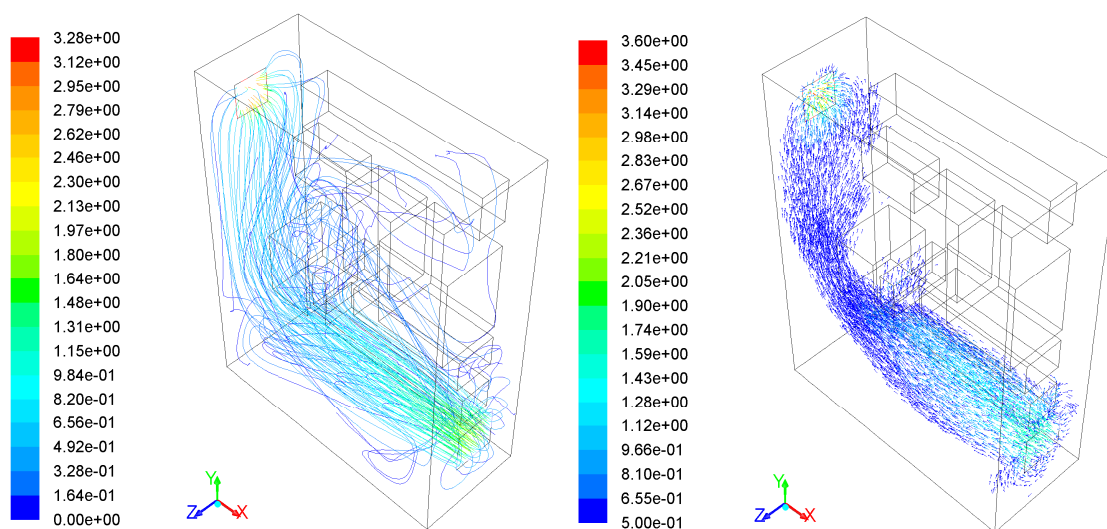
V levé části obrázku 18 vidíme směr a rychlost proudění v m/s, v pravé části je detailnější znázornění pouze částic, které jsou rychlejší než 1 m/s.

Pro srovnání byl proveden výpočet s pomalejším prouděním vzduchu o rychlosti 0,02 m/s. Z obrázku 19 je patrné, že rychlost proudění vzduchu do rozvaděče má vliv na teplotu uvnitř. Maximální teplota na frekvenčním měniči je o 8 °C větší a také teploty na všech ostatních součástkách jsou vyšší. V následující kapitole je uveden konkrétní číselný přehled o teplotách na jednotlivých komponentech rozvaděče.

Na obrázku 20 je znázorněna rychlost a směr proudění vzduchu uvnitř rozvaděče při proudění vzduchu v množství 0,02 kg/s. Hlavně v pravé části, kde je pro lepší představu o proudění zobrazen pouze tok rychlejší než 0,5 m/s, je vidět, že proudění vzduchu je v této variantě podstatně menší.

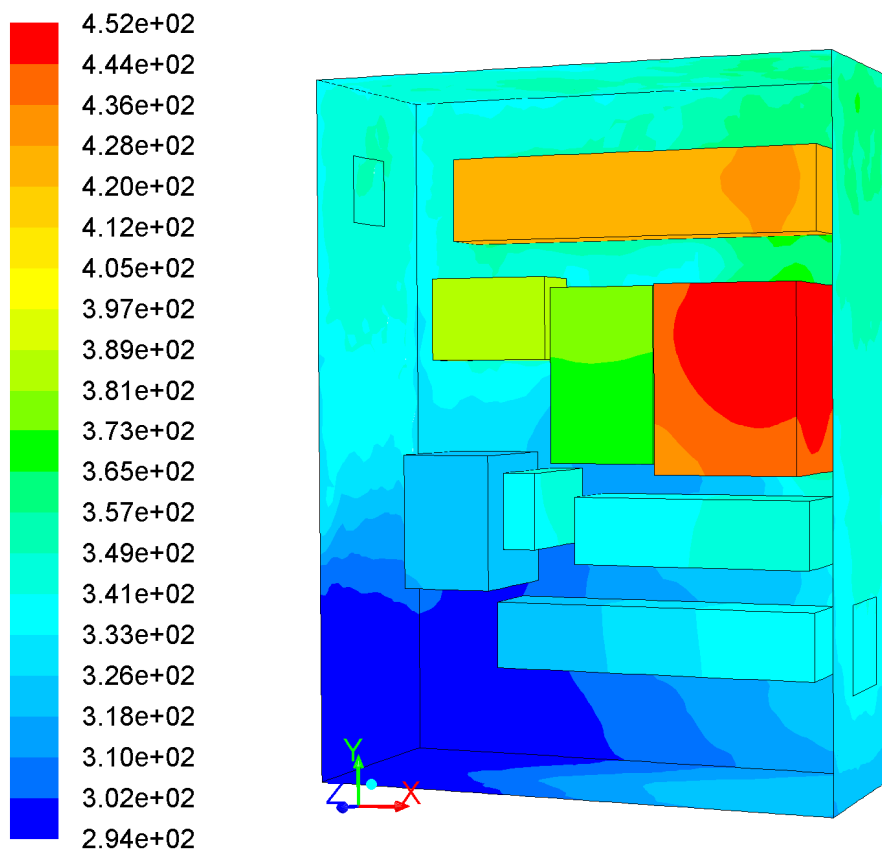


Obr. 19: Rozložení teplot [K] na povrchu stěn i jednotlivých prvků uvnitř rozvaděče při chlazení nuceným prouděním vzduchu v množství 0,02 kg/s.



Obr. 20: Rychlost a směr proudění vzduchu o hmotnosti 0,02 kg/s. V levé části jsou patrné proudnice zbarvené dle rychlosti proudění a zohledňující směr proudění. V pravé části jsou vektory pro proudění rychlejší než 0,5 m/s.

Třetí výpočet byl zhotoven pro variantu, kdy v rozvaděči nedochází k žádnému proudění vzduchu z venku. Jak je vidět na obrázku 21, nárůst teplot uvnitř rozvaděče je veliký. Frekvenční měnič se zahřívá na teplotu téměř 180 °C. Nárůst teplot je ovšem výrazný i na ostatních komponentech a překračuje povolené meze.



Obr. 21: Rozložení teplot [K] na povrchu stěn i jednotlivých prvků uvnitř rozvaděče v případě, kdy nedochází k aktivnímu chlazení.

## 5 Zhodnocení výsledků a možná opatření

Velikou výhodou numerického výpočtu a využití programu Fluent je získání náhledu do oteplování uvnitř rozvaděče. Analytický výpočet nám dává pouze hrubou představu o teplotě uvnitř. Jedná se pouze o teplotu průměrnou a výsledná hodnota nám nedokáže tedy prozradit, zda se nějaká vnitřní součástka nepřehřívá a zda nebylo překročeno povolené oteplení. Tato metoda neuvažuje všechny okrajové podmínky a výpočet vychází z menšího počtu známých dat.

Naproti tomu numerická metoda umožňuje detailní náhled do vnitřku rozvaděče, na tepelný průběh v každé jeho části a můžeme zohlednit také další výstupní data, jako je směr a množství proudění vzduchu v jednotlivých částech rozvaděče. To nám umožňuje se získanými výsledky dále pracovat a případně navrhnout vhodná opatření pro lepší teplotní průběh. V tabulce 7 vidíme teploty, které se nacházejí na jednotlivých blocích uvnitř rozvaděče i v meziprostoru zaplněném vzduchem. Také je zde uvedena velikost oteplení všech bloků a meziprostoru proti teplotě okolí 25 °C. Výsledné hodnoty jsou výsledky výpočtů pro všechny tři varianty, tedy pro aktivní chlazení množstvím vzduchu 0,035 kg/s, množstvím 0,02 kg/s a také varianty, kdy k proudění vzduchu z venku nedochází.

	0,035 kg/s		0,02 kg/s		bez ventilace	
	teplota °C	oteplení °C	teplota °C	oteplení °C	teplota °C	oteplení °C
vzduch	33,53	8,53	37,13	12,13	78,13	53,13
1. blok	73,80	48,80	89,09	64,09	152,76	127,76
2. blok	36,23	11,23	40,96	15,96	110,47	85,47
3. blok	48,10	23,10	54,05	29,05	98,29	73,29
4. blok	100,74	75,74	109,20	84,20	172,32	147,32
5. blok	31,95	6,95	34,75	9,75	48,07	23,07
6. blok	40,61	15,61	42,79	17,79	68,59	43,59
7. blok	30,84	5,84	32,43	7,43	68,31	43,31
8. blok	27,94	2,94	29,38	4,38	55,88	30,88

**Tab. 7: Průměrná teplota bloků elektrické výbroje a vnitřního vzduchu pro jednotlivé varianty ventilace (0,035 kg/s, 0,02 kg/s, 0 kg/s), oteplení vůči okolní teplotě 25 °C.**

1. blok - jističe, stykače a relé
2. blok - Inteligentní relé Zelio
3. blok - triakový regulátor Regin TTC2000
4. blok - frekvenční měnič ABB ACS350
5. blok - hlavní vypínač 160A
6. blok - spínaný zdroj 24V
7. blok - 7 \* stykač 9A 3f
8. blok - 25 \* řadové svorky

Jako možné opatření vedoucí ke zlepšení teplotního stavu uvnitř rozvaděče je možné navrhnout přidání ještě jednoho ventilátoru, který by pomohl ochladit nejvíce přehřívané části, tedy frekvenční měnič a také blok s jističi. Ventilátor by se umístil na pravou stěnu nad stávající tak, aby vzduch nuceně proudil přímo mezi frekvenční měnič a blok s jističi. Pomáhalo by to chladit nejvíce zahřívané součástky, pozitivní vliv by měl také na inteligentní relé Zelio a triakový regulátor Regin. Druhým možným opatřením je vhodné umístění deflektoru, který by pomáhal směřovat proudění do míst, kam se hůře dostává. To by mohlo způsobit deflektor snížení účinku chlazení v částech, kde je ho nyní dostatek.

## 6 Závěr

Vedle teoretické části práce zahrnuje výpočty pro zadaný konkrétní rozvaděč s konkrétními parametry. Nejprve byl proveden analytický výpočet oteplení uvnitř rozvaděče. Tento výsledek je ovšem pouze souhrnem celé teplotní škály uvnitř rozvaděče a nepoví nám nic o teplotách na jeho jednotlivých komponentech. Navíc tento výpočet neuvažuje všechny vstupní podmínky.

Jako daleko přínosnější se jeví numerický výpočet a simulace v programu Fluent. Díky němu jsme získali detailní přehled o teplotách nejen vzduchu uvnitř, ale také o teplotách všech komponentů. Z výsledků je patrné, že pokud by nedocházelo k žádnému aktivnímu větrání, některé komponenty, hlavně frekvenční měnič, by závažně přestoupily dovolenou mez oteplení. Je také patrné, že poněkud silnější ventilátor vhánějící vzduch v množství 0,035 kg/s má přínos pro lepší stav uvnitř rozvaděče než při variantě s aktivním chlazením ventilátorem o množství vzduchu 0,02 kg/s.

Program Fluent nám umožňuje také náhled na proudění, které se uvnitř rozvaděče odehrává. Můžeme pozorovat směr proudění a také jeho rychlost v každé části prostoru. Proto můžeme navrhnout opatření pro lepší výsledky chlazení rozvaděče v podobě vhodně umístěného druhého ventilátoru. Ten lépe ochladí frekvenční měnič. Případně můžeme umístit vhodný deflektor.



## 7 Seznam použité literatury

- [1] Rusňák S., Řezáček P.: Elektrické přístroje 1, ZČU v Plzni, 2001
- [2] Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava: Tepelné ztráty rozvaděčů  
[http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni\\_materialy/epez/spolecne/Tepelne\\_ztraty\\_rozvadecu.doc](http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/epez/spolecne/Tepelne_ztraty_rozvadecu.doc)
- [3] TUL Liberec: Chlazení/klimatizace rozvaděčů  
[www.mti.tul.cz/files/esy/09\\_chlazení.ppt](http://www.mti.tul.cz/files/esy/09_chlazení.ppt)