

**ZAPÁDOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Výpočetní analýza chlazení elektrického zařízení**

**2014**

**Bc. Vojtěch Hříbal**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vojtěch HRÍBAL**  
Osobní číslo: **E12N0115P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Výpočetní analýza chlazení elektrického zařízení**  
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. Vypracujte teoretický úvod orientovaný na problematiku oteplení proudové dráhy elektrického zařízení a metod výpočtu oteplení.
2. Vytvořte geometrický a výpočetní model pro zadané elektrické zařízení, proveďte numerický výpočet.
3. Analyzujte a vyhodnoňte výsledky výpočtů.
4. Navrhněte opatření vedoucí ke zlepšení chlazení zadaného elektrického zařízení.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

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

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

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013  
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



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



V Plzni dne 14. října 2013

# **Výpočetní analýza chlazení elektrického zařízení**

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá chlazením indukční tavicí pece. V první části se zabývám teorií oteplení proudové dráhy, sdílení přestupu tepla třemi způsoby. Další část popisuje metody výpočtu oteplení. Hlavním těžištěm práce je model a numerický výpočet indukční tavicí pece a samotné cívky induktoru. V závěru popisuji opatření a zlepšení chlazení.

## **Annotation**

My thesis is focus on cooling of induction melting furnace. In first part I deal with theory about warming of current path, sharing heat transfer by three ways. The next part describes the methods of warming calculation. The main centre of gravity is model and numeric calculation of induction melting furnace and coil inductor itself. In the end I describe the procuration and improvement of cooling.

## **Klíčová slova**

chlazení elektrického zařízení, oteplení proudové dráhy, sdílení tepla, indukční tavicí pec, laminární proudění, turbulentní proudění, Reynoldsovo číslo

## **Key words**

cooling of electrical equipment, warming of current path, sharing heat, induction melting furnace, laminar flow, turbulent flow, Reynolds number

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma:

**Výpočetní analýza chlazení elektrického zařízení**

vypracoval samostatně pod odborným dohledem vedoucího diplomové práce za použití pramenů uvedených v příložené bibliografii. Použitý software byl legálně pořízen.

V Plzni dne 10. května 2014

.....

## *Poděkování*

*Chtěl bych poděkovat panu Ing. Janu Sedláčkovi Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, za průběžné, metodické vedení při řešení zadané problematiky a pomoc při řešení problémů. Dále bych rád poděkoval ostatním zaměstnancům Západočeské univerzity v Plzni za získání všech odborných znalostí, které mi předali během studia. A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu ve studiu.*

## Obsah

1. Úvod.....	9
1.1 Oteplení proudové dráhy .....	9
1.2 Sdílení tepla .....	12
1.2.1 Šíření tepla vedením .....	13
1.2.2 Šíření tepla prouděním .....	14
1.2.3 Šíření tepla sáláním.....	16
2. Metody pro výpočet oteplení .....	17
2.1 Analytické metody.....	17
2.2 Numerický výpočet.....	18
2.3 Tepelné pole .....	18
3. Předmět výpočtu .....	19
3.1 Princip indukčního ohřevu.....	21
3.2 Materiály používané indukčních pecí.....	22
3.3 Chlazení indukční pece.....	23
3.4 Analytický výpočet.....	23
3.5 Numerický výpočet oteplení cívky induktoru .....	24
3.5.1 Stanovení okrajových podmínek.....	25
3.5.2 Výsledek výpočtu v programu FLUENT.....	27
3.6 Numerický výpočet tavicí pece .....	29
3.6.1 Nastavení okrajových podmínek.....	30
3.5.2 Výsledný výpočet oteplení tavicí pece.....	31
4. Opatření pro lepší chlazení .....	32
5. Závěr .....	33
Použitá literatura .....	34

## Seznam použitých symbolů, značek a zkratek

$R[\Omega]$	- odpor proudové dráhy
$I [A]$	- procházející proud
$\alpha_0 [W/m^2.K]$	- součinitel přestupu tepla do okolí
$A [m^2]$	- ochlazovací plocha úseku
$\Delta\vartheta [K]$	- okamžité oteplení tělesa
$C [J/m^3.K]$	- objemová tepelná kapacita
$V[m^3]$	- objem objektu
$\Delta E_{vstupující} [Ws]$	- tepelná energie vstupující do systému (např. sluneční záření)
$\Delta E_{generovaná} [Ws]$	- tepelná energie generovaná v systému (např. Joulovy ztráty)
$\Delta E_{vystupující} [Ws]$	- tepelná energie vystupující ze systému (chlazení)
$\Delta E_{vstupující} [Ws]$	- změna vnitřní energie systému (akumulování energie)
$v_k [m.s^{-1}]$	- mezní rychlost změny laminárního na turbulentní
$h[m]$	- charakteristický rozměr profilu (např. šířka, průměr)
$\nu [m^2.s^{-1}]$	- kinetická viskozita tekutin
$N_U$	- Nusseltovo číslo
$G_r$	- Grashoffovo číslo
$P_r$	- Prandtlovo číslo
$\alpha_k [W.m^{-2}.K^{-1}]$	- součinitel přestupu tepla
$g [m.s^{-2}]$	- tíhové zrychlení
$\beta [K^{-1}]$	- objemový součinitel teplotní roztažnosti tekutin
$c [J.Kg^{-1}.K^{-1}]$	- měrná tepelná jímavost (hmotnostní)
$\eta [Pa.s]$	- dynamická viskozita
$h [m]$	- charakteristický rozměr chlazeného útvaru
$\lambda [W.m^{-1}.K^{-1}]$	- měrná tepelná vodivost
$z_1 [m]$	- tloušťka stěny induktoru



## 1. Úvod

### 1.1 Oteplení proudové dráhy

Změny elektromagnetického pole jsou v látkách spojeny s pohybem částic, které nesou elektrický náboj. Přitom dochází k interakci těchto částic s atomy prostředí, v pevných látkách s atomy krystalické mříže. Při této interakci předávají částice část své kinetické energie do okolí, zvyšuje se teplota látky. Jedná se tedy o přeměnu energie elektromagnetického pole v kinetickou energii tepelného pohybu atomů a molekul látky.

V souladu s dřívější fluidovou teorií tepla, kdy teplo bylo považováno za fluidum, mluvíme o množství tepla, proudění tepla. V makroskopickém pojetí zejména pevné látky tento model stále vyhovuje, proto se vybudovaný teoretický aparát stále používá.

Obecně vzato, v elektrizačních systémech vytváříme obvykle elektromagnetickou indukci elektrické pole, abychom jinde přeměnu el. energie pole v kinetickou energii mechanického pohybu těles využili ke konání práce. Na energii, přeměněnou přitom v teplo, tj. na energii neuspořádaného pohybu elementárních částic, pohlížíme jako na ztráty – mluví se o ztrátách.

#### Přehled ztrát

- pohyb elektronu ve vodičích vede na jouleovy ztráty
- střídavé magnetické pole indukuje vířivé proudy ve vodičích → ztráty vířivými proudy
- střídavé magnetické pole působí natáčení magnetických dipólů v magnetikách → hysterezní ztráty
- střídavé elektrické pole působí natáčení elektrických dipólů v dielektrikách → dielektrické ztráty urychlování částic, nesoucí el. náboj, elektrickým polem → ztráty výboji ( neúplnými, kóronou)

Při změně elektromagnetického pole dochází k pohybu částic přenášející elektrický náboj a dochází k interakci těchto částic s atomy prostředí. Tato interakce předává část svojí energie do okolí v tepelné energii. Nebo-li, prochází vodičem o určité rezistivitě elektrický proud, vznikají ve vodiči v každém časovém úseku  $dt$  ztrátové teplo v závislosti na velikosti proudu a

odporu. Toto teplo se dělíme na dvě složky. Jedna složka se odvádí do okolí (chlazení) ve stejném časovém úseku  $dt$  a druhá složka se v tělesu ukládá v závislosti na objemu a měrné tepelné kapacitě. Vždy musíme dodržet zákon zachování energie a u proudové dráhy musíme uvažovat všechny energie vstupující a vystupující [2].

$$\Delta E_{vstupující} + \Delta E_{generovaná} = \Delta E_{vystupující} + \Delta E_{vnitřní}$$

kde

$\Delta E_{vstupující}$  - tepelná energie vstupující do systému (např. sluneční záření) [Ws]

$\Delta E_{generovaná}$  - tepelná energie generovaná v systému (např. Joulovy ztráty) [Ws]

$\Delta E_{vystupující}$  - tepelná energie vystupující ze systému (chlazení) [Ws]

$\Delta E_{vnitřní}$  - změna vnitřní energie systému (akumulování energie) [Ws]

Pro popsání proudové dráhy používáme rovnici (1.x), tepelnou energii vstupující zatím zanedbáváme

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Delta\vartheta dt + cV d\vartheta$$

kde

R	- odpor proudové dráhy	[ $\Omega$ ]
I	- procházející proud	[A]
$\alpha_0$	- součinitel přestupu tepla do okolí	[W/m <sup>2</sup> .K]
A	- ochlazovací plocha úseku	[m <sup>2</sup> ]
$\Delta\vartheta$	- okamžité oteplení tělesa	[K]
c	- objemová tepelná kapacita	[J/m <sup>3</sup> .K]
V	- objem objektu	[m <sup>3</sup> ]

Rovnici řešíme separací proměnných

$$dt = \frac{cV}{RI^2 - \alpha_0 A \Delta\vartheta} d\vartheta \rightarrow t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln[RI^2 - \alpha_0 A \Delta\vartheta] + K$$

Integrační konstantu  $K$  stanovíme z počátečních podmínek: v okamžiku  $t = 0$  je oteplení  $\Delta\vartheta = 0$

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

Výsledné řešení rovnice je:

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

Rovnici antilogaritmujeme a dostaneme vztah explicitní okamžité oteplení:

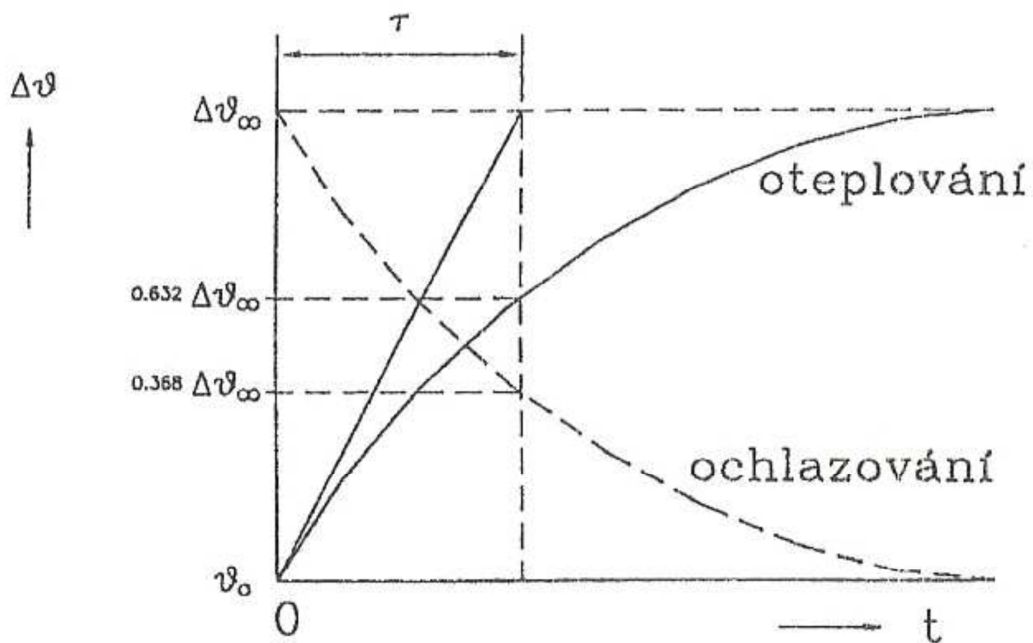
$$\Delta\vartheta = -\frac{RI^2}{\alpha_0 A} \ln \left( 1 - e^{\frac{\alpha_0 A}{cV} t} \right) = \Delta\vartheta_\infty \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Přitom jsme zavedli označení

$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \quad \tau = \frac{cV}{\alpha_0 A}$$

Kde  $\Delta\vartheta_\infty$  - oteplení vodiče při dosažení ustáleného stavu

$\tau$  - je časová konstanta ohřevu vodiče, viz. grafický průběh teploty na obr.1



Obr. 1 - Průběh oteplení vodiče při průchodu proudu v závislosti na čase

## 1.2 Sdílení tepla

Teplu se šíří vždy z místa o vyšší teplotě do míst s nižší teplotou a to nevratně, tento děj je způsoben 2. větou termodynamickou. Jsou tři základní způsoby šíření tepla:

- a) Vedením (kondukcí) – většinou v tuhých tělesech
- b) Prouděním (konvekcí) – v kapalinách nebo v plynech
- c) Sáláním (radiací) – v průrazném prostředí

Nastane-li nový stav, jedno prostředí se zahřívá jinak než druhé, vzniká uvnitř nebo okolo prostředí proudění.

Vedením se šíří teplo především v tělesech tuhých. Za určitých okolností i v prostředí tekutém a plynném, zabráníme-li současnému sdílení tepla prouděním. Jako příklad můžeme uvést zahřívání vody v hrnci, je-li zdroj tepla přiložen k povrchu hladiny. Tento jev také zabraňuje promrznutí vodních nádrží, protože voda má největší měrnou hmotnost při  $+4^{\circ}\text{C}$ .

Šíření tepla v tuhém tělese se uskutečňuje předáváním pohybové energie sousedním částicím - atomům nebo molekulám. Je to nejpomalejší způsob šíření tepla, avšak v tuhých látkách jediný možný.

Rychlost šíření tepla vedením, to je množství převedeného tepla za jednotku času, závisí na fyzikálních vlastnostech prostředí. V tuhých tělesech je rychlost šíření tepla vedením vždy značně vyšší než v prostředí tekutém a plynném, kde jednotlivé molekuly jsou lehce pohyblivé, jsou málo vzájemně vázané a jsou ve větší vzájemné vzdálenosti.

V tekutinách a plynech, díky pohyblivosti částic, nastává vlivem rozdílné teploty částic jejich přemísťování, teplé lehčí částice stoupají vzhůru. Přitom se přenáší s částicemi i jejich zásoba tepelné energie. Proto označujeme tento způsob šíření prouděním - konvekcí tepla. Je-li proudění vyvoláno pouze rozdílem teplot zahřátých částic, mluvíme o proudění přirozeném. Při umělém (nuceném) proudění se uvádí prostředí do pohybu uměle čerpadlem, ventilátorem, atd.

Třetí způsob šíření tepla je sálání, záření tepelnými paprsky. Může nastat jen v průzračném prostředí. Každý povrch, který má teplotu vyšší než je absolutní teplota -

273,15°C, vyzařuje energii tepelného záření, která se šíří všemi směry. Dopadne-li toto záření na neprůzračný povrch, je částečně pohlceno, záření se mění v teplo, zahřívá povrch. Část dopadajícího záření se od povrchu odráží.[4]

### 1.2.1 Šíření tepla vedením

Šíření tepla je složitý jev, hlavně nestacionární a obecně lze problém velmi těžce matematicky popsat. Pro zjednodušení postupu výpočtu počítáme izotropní (stejnorodé) prostředí, jejichž fyzikální prostředí je ve všech směrech stejné. Teplotní pole je takový stav, kde zkoumáme množinu okamžitých teplot všech bodů ve zkoumaném prostoru. Teplotní pole je spojité, což značí dva nekonečně blízké body - mají nekonečně malou rozdílnou teplotu. Teplotní pole je pole skalární a můžeme ho popsat obecným vztahem pro neustálený vztah:

$$\vartheta = f(x, y, z, t)$$

pro ustálený vztah můžeme předpokládat nulovou rozdílnou teplotou, a tedy platí výraz:

$$\vartheta = f(x, y, z)$$

Pro zvláštní případ šíření tepla rovnou stěnou (teoreticky nekonečných rozměrů), kterou oddělujeme dvě prostředí o dvou teplotách, potom může předpokládat tepelný tok postupující v jednom směru, kolmému k rozhraní a tedy zjednodušit rovnice

$$\vartheta = f(x, t) \text{ pro neustálený stav a } \vartheta = f(x) \text{ pro ustálený vztah}$$

Body stejné teploty, které jsou vedle sebe na ploše, se nazývají Izotermické plochy, u válcové stěny jsou to sousední válce, u rovné stěny jsou rovnoběžné plochy a u kulové stěny jsou to soustředné koule. Řez Izotermickými plochami s rovinou křivky se nazývají izotermy. Izotermy spojují body stejné teploty a udávají teplotní rozdíl  $\Delta\vartheta$ . Největší rozdíl teploty je kolmý na izotermické plochy tzn. normála izotermy. Při pohybu po kolmici normály nastávají největší teplotní změny. Teplotní spád nazýváme gradient a značíme  $\text{grad } \vartheta$  a je to limitní hodnota poměru změny teploty a změny normály.

$$\text{grad } \vartheta = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta\vartheta}{\Delta n} \vec{n}_0 = \frac{\partial\vartheta}{\partial n} \vec{n}_0 [\text{°C} \cdot \text{m}^{-1}] \text{ kde } \vec{n}_0 \text{ je jednotkový vektor ve směru normály}$$

Teplotní spád je vektor a je kolmý k izotermické ploše a má směr normály. Kladný se označuje směr růstu teplot od nižší k vyšší teplotě. Množina těchto teplotních gradientů tvoří

vektorové pole a existence tohoto pole tvoří šíření tepla v daném objemu. Je-li rozdíl teplot nulový potom  $grad \vartheta = 0$ .

Fourierový zákon udává závislost mezi tepelným tokem a teplotním spádem – gradientem

$$d\bar{Q} = -\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial n} dF dt \quad [Ws]$$

$dQ$  je množství teple, které projde kolmo elementární ploškou  $dF$  izotermické plochy za čas  $dt$ . Tento tok závisí na fyzikálních vlastnostech prostředí, což je vyznačeno součinitelem  $\lambda$ , a na teplotním spádu  $grad\vartheta$ .

$\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti prostředí (měrná tepelná vodivost). Znaménko mínus v předchozím vzorci značí, že tepelný tok jde vždy od teploty vyšší k nižší, to je obráceně než je směr gradientu  $\vartheta$ . Protože  $grad\vartheta$  je vektor, je i tepelný to  $dQ$  vektor. [4]

Rozměr měrné vodivosti  $\lambda$ :

$$[\lambda] = \left[ \frac{dQ}{dF \cdot dt \cdot grad\vartheta} \right] = [Jm^2s^{-1}K^{-1}m^1] = [Wm^{-1}K^{-1}]$$

## 1.2.2 Šíření tepla prouděním

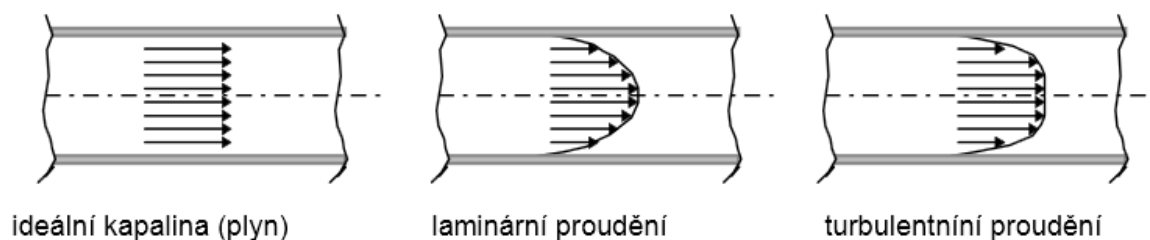
Teplo na rozhraní mezi tělesem a ovzduším se přenáší radiací nebo konvekcí, tedy prouděním. Při přenosu konvekcí má značný podíl přenosu tekutiny popřípadě plyny. V proudění tekutin rozeznáváme dva druhy proudění – laminární a turbulentní. Při laminárním proudění se jednotlivé částice pohybují rovnoběžně s proudem tekutiny, přičemž rychlost vrstvy těsně u stěny se téměř nepohybují, tloušťka těchto vrstev závisí na rychlosti proudění. Naopak při turbulentním proudění se pohyb částic chová chaoticky až na tenkou vrstvu těsně u stěny, tzn. hraniční vrstva. Rychlost u stěn je tedy nulová, avšak nárůst je strmější při poměrně malé změně rychlosti: rychlost proudění je největší v ose proudění, stejně jako u laminárního. Rozdíl mezi turbulentním a laminárním proudění popisuje tzv. Reynoldsovo číslo:

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

Kde  $v_k$  - mezní rychlost změny laminárního na turbulentní  $[m \cdot s^{-1}]$

$h$	- charakteristický rozměr profile (např. šířka, průměr)	[m]
$\nu$	- kinetická viskozita tekutin	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]

Přítom hraniční hodnota mezi turbulentním a laminárním prouděním je hodnota  $Re = 2320$ , menší než tato hodnota je laminární a nad hodnotu  $Re = 4000$  je turbulentní. V oblasti mezi  $2320 < Re < 4000$  je tzv. přechodová oblast mezi laminárním a turbulentním prouděním



Obr. 2 - Porovnání ideálního plynu s oběma typy proudění (šipky ukazují směr toku kapaliny)

Druh proudění určuje fyzikální podstatu přestupu tepla ve směru kolmém ke směru proudění. Při laminárním stavu se teplo přenáší pouze vedením, zatímco u turbulentního proudění probíhá přenos tepla pouze tenkou vrstvou hraniční vrstvy u stěny. Protože u turbulentního proudění se neustále promíchávají částice tekutiny a tím pádem probíhá intenzivnější přenos tepla. Přenos tepla v turbulentním stavu tedy řídí odpor tenké vrstvy.

Zvážením teoretických úvah a experimentálních výsledků se dospělo k obecnému vztahu

$$\frac{\alpha_k h}{\lambda} = c_k \left( \frac{g \beta \Delta \vartheta h^3 \eta c}{\nu^2 \lambda} \right)^\alpha$$

$$N_U = c_k (G_r \cdot P_r)^\alpha$$

Kde	$N_U$	- Nusseltovo číslo	
	$G_r$	- Grashoffovo číslo	
	$P_r$	- Prandtlovo číslo	
	$\alpha_k$	- součinitel přestupu tepla	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
	$g$	- tíhové zrychlení	[m.s <sup>-2</sup> ]
	$\beta$	- objemový součinitel teplotní roztažnosti tekutin	[K <sup>-1</sup> ]
	$c$	- měrná tepelná jímavost (hmotnostní)	[J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]

$\eta$	- dynamická viskozita	[Pa.s]
$h$	- charakteristický rozměr chlazeného útvaru	[m]
$\lambda$	- měrná tepelná vodivost	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\nu = \eta/m$	kde $m$ [N.s <sup>2</sup> .m <sup>-4</sup> ] je měrná hmotnost	

Pro většinu technických chladiv (voda, vzduch, transf. olej) a obvyklé rozsahy teplot se explicitně vyjádří hodnota  $\alpha_k$ . [4]

	$\vartheta_2$ [°C]	$\alpha_k$ [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
Svislá rovná stěna	15 - 85	$4,01.\Delta\vartheta^{0,13}$
	85 - 150	$2,38.\Delta\vartheta^{0,25}$
Vodorovná rovná stěna (horní povrch)	15 - 150	$2,50.\Delta\vartheta^{0,25}$
Vodorovná rovná stěna (spodní povrch)	15-150	$1,31.\Delta\vartheta^{0,25}$
	$V_{20}$ [m.s <sup>-1</sup> ]	$\alpha_k$ [Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
Svislá stěna s nucením proudění	< 5	5,82 + $3,95.v_{20}$
	> 5	$7,14.v_{20}^{0,78}$

Tab. 1 - součinitel přestupu tepla v závislosti na prostoru, teplotě a rychlosti

### 1.2.3 Šíření tepla sáláním

Všechna tělesa, mající vyšší teplotu než absolutní nulu, vyzařují z povrchu tepelnou energii. Šíří se v průzračném prostředí formou elektromagnetického vlnění všemi směry. Při průchodu z jednoho do druhého se šíří podle zákonů geometrické optiky. Každé těleso, které se nachází v průzračném prostředí, vyzařuje nebo přijímá tepelnou energii z jiných těles. To se potom chladí nebo ohřívá podle toho, jaká energie převažuje.

Hlavním zdrojem sálání je elektromagnetické vlnění, o něco větší než viditelné spektrum, tedy infračervené záření. Přenášený výkon sálání se počítá podle přeneseného tepelného toku podle zákona:



$$\phi_s = \sigma_\varepsilon E_s A (\theta^4)$$

Kde	$\phi_s$	- Tepelný tok	[W]
	$\sigma_\varepsilon$	- Stefan-Boltzmanova konstanta - $57 \cdot 10^{-9}$	[Wm <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ]
	$E_s$	- poměrný součinitel sálání povrch	[-]
	A	- plocha vyzařovaného tělesa	[m <sup>2</sup> ]
	$\Theta$	- Teplota tělesa	[K]

Stefan/Boltzmanova konstanta je součinitel sálání absolutně černého tělesa. Odvození vyzařovacího zákona se pokoušel Wien v roce 1897, ale nedosáhl úplného výsledku. Dospěl avšak ke vztahu závislosti vlnová délka-teplota, tzv. Weinův vztah:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{\theta}$$

Kde	$\lambda_{max}$	- vlnová délka vyzařovaného tělesa	[ $\mu$ m]
	$\Theta$	- teplota tělesa	[K]

Tento vztah udává, že těleso při nízké teplotě vyzařuje pouze záření dlouhovlnné, infračervené. S rostoucí teplotou se vlnová délka zmenšuje a barva tělesa se zbarvuje do červena, do oranžova až do bíla v závislosti na teplotě až do viditelného spektra.

## 2. Metody pro výpočet oteplení

Sdílením tepla můžeme vytvořit matematický model, který vede k řešení parciálních diferenciálních rovnic. V některých případech si můžeme úlohu zjednodušit na obyčejnou diferenciální rovnici. A dále pak v některých případech, kdy jsou ustálené vztahy, lze počítat analyticky. Často se pak používá empirických vztahů založených na měřeních a zkušenostech.

### 2.1 Analytické metody

Analytickou metodou můžeme řešit jednoduchý výpočet, je to základní aparát pro výpočet oteplení. Postup výpočtu zanedbává dynamické změny a používá časté zjednodušení - proto má velké omezení.

## 2.2 Numerický výpočet

Sdílení tepla popisujeme diferenciálními rovnicemi. Proto není možné počítat analyticky a je nutné použít numerické metody výpočtu. Pro řešení parciálních diferenciálních rovnic se používají metody konečných prvků: metoda konečných diferencí, metoda hraničních prvků nebo podobné metody typu Monte Carlo. Výpočetní oblast diskretizujeme a pro jednotlivé elementy sítě vytvoříme algebraické rovnice. Sestavením těchto rovnic získáme systém matic, který je dále řešen danou výpočetní metodou. Například komerční výpočetní program ANSYS FLUENT používá metodu konečných objemů. Nebo program ANSYS APDL používá metodu konečných prvků. Oba programy lze využít při řešení sdílení tepla.

## 2.3 Tepelné pole

Metoda tepelné sítě patří převážně mezi jednorozměrné úlohy a vede na soustavu obyčejných diferenciálních rovnic. V ustáleném stavu vede na algebraické rovnice a lze použít analytickou metodu výpočtu.

Elektrické zařízení si můžeme představit jako soubor těles, z nichž v některých vzniká teplo. Toto teplo pak přestupuje z místa vzniku přes sousední tělesa až na rozhraní mezi zařízením a ovzduší. Soubor těles, které jsou různě propojeny a tvoří elektrické zařízení a mají různá teplotní vodivosti, uniká teplo nejen přes teplotní spád, ale i do okolí jeho povrchem. Proto nelze jednoduše určit teplotní tok.

Metodou řešení těchto složitějších zařízení je rozložení na jednotlivé dílce použití metody tepelných obvodů, při nichž se užívají podobné postupy jako při řešení elektrických obvodů. Skládáním jednotlivých dílů tepelných zdrojů a odporů získáme tepelnou síť a až pak vyřešením celé sítě získáme oteplení jednotlivých dílů.

Elektrické zařízení jako jsou například transformátory nebo motory, mají charakter mřížový. U elektrických přístrojů jako jsou například odpojovače, počítáme spíše s jednořadou sítí, neboť můžeme z důvodu vzdálenosti u jednotlivých fází vliv ostatních prvků zanedbat. Proudovou dráhu rozdělujeme na jednotlivé díly a nahradíme vhodným schématem. Jednotlivá schémata seskládáme do sítě a řešíme jako celek. Výsledkem je oteplení uzlů, které respektují spojení dílců proudové dráhy.[3]

**Elektrické děje****Tepelné děje**

Elektrický náboj

Množství tepla

$$dQ = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta\varphi}{\delta n} \cdot S \, dt$$

$$Q = -\lambda \cdot \frac{\delta\vartheta}{\delta n} \cdot S \, dt \quad \vartheta_{12} \lambda \phi \Delta$$

Elektrický proud

Tepelný tok

$$I = \frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta\varphi}{\delta n} \cdot S$$

$$\phi = -\lambda \cdot \frac{\delta\vartheta}{\delta n} \cdot S$$

Hustota elektrického proudu

Hustota tepelného toku

$$j = \frac{I}{S} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\delta\varphi}{\delta n}$$

$$\phi_0 = \frac{\phi}{S} = -\lambda \cdot \frac{\delta\vartheta}{\delta n}$$

Elektrická vodivost

Tepelná vodivost

$$1/\rho\lambda$$

Rozdíl potenciálů (úbytek napětí)

Rozdíl teplot

$$U = \varphi^1 - \varphi^2$$

$$\Delta \vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$$

Ohmův zákon pro homogenní vodič

Ohmův zákon pro tepelný tok

$$I = \frac{U}{\rho \frac{l}{S}}$$

$$\phi = \frac{\Delta \vartheta}{\frac{1}{\lambda} * \frac{\delta}{S}}$$

Elektrický odpor homogenního vodiče

Tepelný odpor stěny stálé tloušťky

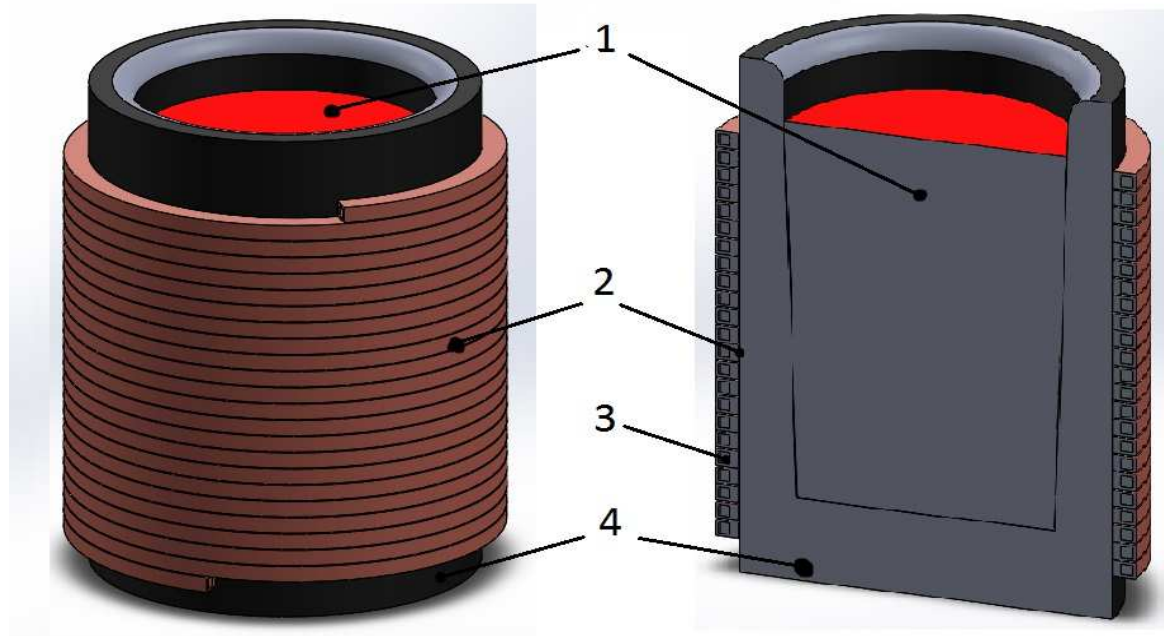
$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$R_t = \frac{1}{\lambda} * \frac{\delta}{S}$$

**3. Předmět výpočtu**

Výpočet chlazení provedeme na příkladu elektrické indukční pece pro tavení oceli. Výpočet byl aplikován na školní příklad ze skript Prof. Langer – Elektrotepelná technika část V. Hmotnost vsázky je 900 kg a roztavená ocel o měrné hmotnosti 6,85 kg/dm<sup>3</sup>. Výkon zdroje dodávaný k induktoru je 550 kW, napájecí napětí 2200 V, frekvence 825 Hz. Objem dutiny kelímku je 130 dm<sup>3</sup>. Vnitřní rozměr 49 cm, tloušťka vyzdívky je 9,5 cm a tloušťka

izolace je 0,5 cm. Výška vzdušné taveniny je 69 cm a výška cívky induktoru je 78 cm. Pec má stínící plášť z mědi o průměru 140 cm a výšce 127 cm. Tloušťka stínícího pláště je závislá na hloubce vniku, ale pro mechanickou tuhost volíme 6 mm.[5]



Obr. 3 - Indukční pec pro tavení oceli bez stínění (1- Vsázka – tavenina; 2 – Cívka induktoru; 3 – Chladící medium – voda; 4 – vyzdívka)

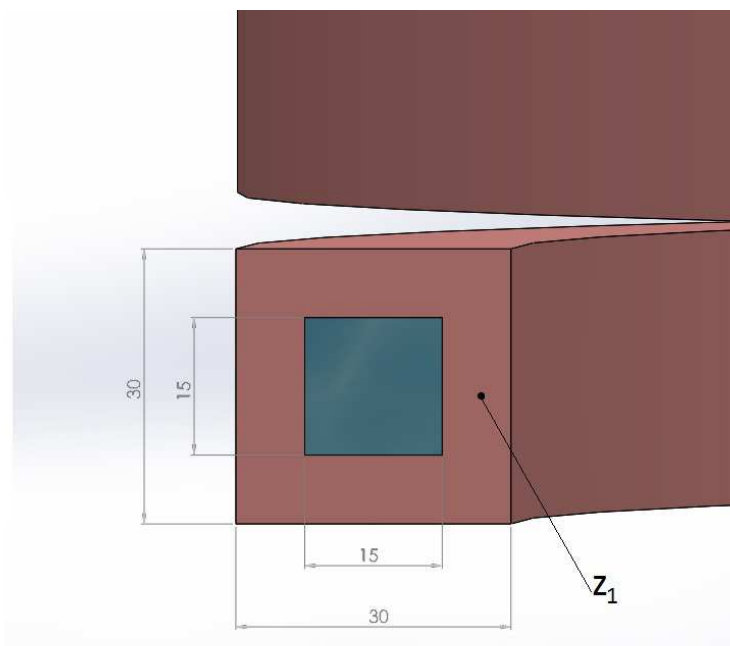
### Rozměr profilu induktoru

Přesný rozměr induktoru ve skriptech nikde nebyl zmíněn, důležité je, aby byla dodržena tloušťka vnitřní strany směrem k induktoru. Ve skriptech je tato hodnota vypočítaná podle hloubky vniku, v našem případě je to  $a_1 = 0,242 \text{ cm}$ . Tloušťka stěny se zvolí empiricky

$$z_1 = 1,57 \cdot a_1 = 1,57 \cdot 0,242 = 0,377 \text{ cm}$$

kde  $z_1$  - tloušťka stěny induktoru [m]

Vnější rozměry zvolím s ohledem na počet závitů a velikost izolační vyzdívky a vzdušné taveniny uvnitř pece na 30x30 mm. Vnitřní rozměry profilu pro vodu jsem zvolil na polovinu, tedy 15x15 mm. Čtvercový profil jsem zvolil s ohledem na tvorbu sítě v programu ANSYS.



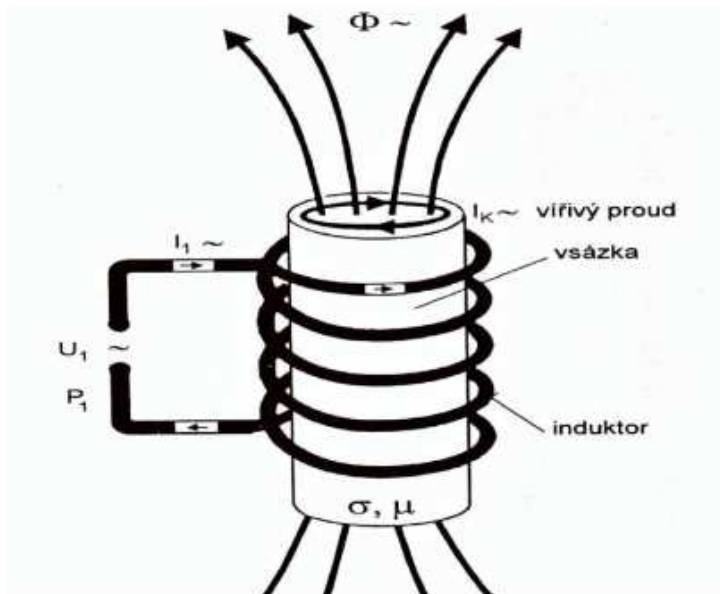
Obr.4 - Rozměr profilu měděného induktoru,  $z_1$  je vnitřní strana induktoru

#### Další parametry indukční pece:

Proud procházející cívkou	$I_1 = 3232 \text{ A}$
Odpor cívky	$R_{\text{cívky}} = 1,44 \cdot 10^{-2} \Omega$
Počet závitů cívky	$N = 22,9$ závitů
Střední délka závitů	$d_{\text{stř.}} = 720 \text{ mm}$

### 3.1 Princip indukčního ohřevu

Indukční zařízení, které je znázorněno na Obr. 5, se skládá z cívky (induktoru), zdroje střídavého proudu a z ohříváného předmětu (vsázky). Prochází-li střídavý proud rovinným induktorem, potom vzniká v jeho okolí rovinné elektromagnetické vlnění. Průchodem proudu válcovou cívkou vznikne uvnitř válcové elektromagnetické vlnění. V předmětu, který se nachází uvnitř induktoru, se indukuje napětí, jež má za následek vznik vířivých proudů. Tyto proudy se ve vodivém předmětu uzavírají a vzniklý ztrátový výkon ohřívá vsázku. Indukční zařízení si lze představit jako transformátor, kde cívka je primární stranou a vsázka sekundární.



Obr. 5 - Princip indukčního ohřevu

Induktor je koncová část zdroje, jímž protéká střídavý proud generovaný měničem kmitočtu a v jeho okolí se vytváří elektromagnetické pole. Induktor bývá vyroben z dutého měděného vodiče, jímž protéká chladicí kapalina. Pro dosažení co největší účinnosti ohřevu je potřeba, aby induktor byl co nejbližší ohřivanému tělesu. Proto podle tvaru ohřivaného materiálu se používají různé induktry.

Účinnost indukčního ohřevu závisí na vhodném impedančním přizpůsobení induktoru a na zvoleném tvaru. Nachází-li se induktor blízko roztavené vsázky, potom hrozí jeho přehřátí. [1]

### 3.2 Materiály používané indukčních pecí

Materiály používané pro stavbu elektrotepelných zařízení obsahují kromě kovových konstrukčních prvků také elektrické vodiče, základní staviva nebo tepelné izolanty. Jako elektrický vodič jsou často používány materiály s dobrou elektrickou vodivostí, tedy měď a hliník. Požadavky na nekovové stavební materiály jsou: velká chemická odolnost a stálost, dobrý tepelný a elektrický izolant, odolnost vůči změnám teploty. Těmto parametrům převážně odpovídají keramické materiály. Pro vysoké teploty se používají žáruvzdorné materiály, jejichž základními složkami jsou: oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ) žáruvzdornost okolo  $1750^\circ\text{C}$ , oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) žáruvzdornost asi  $2070^\circ\text{C}$  a v menší míře oxid hořečnatý  $\text{MgO}$  žáruvzdornost  $2800^\circ\text{C}$ . Žáruvzdorné materiály popisuje norma ČSN 72 6014. Jako tepelný izolant se dříve používal azbest, ale prokázalo se, že způsobuje rakoviny a proto se jeho

používání zakazuje. V dnešní době ho můžeme nahradit materiálem nazývaným Silcapan od firmy Silca.

### 3.3 Chlazení indukční pece

Každý tepelný proces, který vytváří určitou tepelnou práci, také produkuje tepelné ztráty. Tyto ztráty musíme odvést a co nejvíce minimalizovat. K odvodu tepla v elektrotechnických zařízeních se nejčastěji využívá vzduch, voda, nebo v případě velkých transformátorů olej. K chlazení indukčních pecí se používá voda pro její velkou schopnost odvést teplo a částečně okolní vzduch. Oteplení vody a tedy i induktoru nesmí přesáhnout 60 °C, aby v některých místech nevznikla pára, která by znemožnila průtok vody a zničení induktoru. Chladicí voda u indukčních pecí musí odvést přibližně 20 až 25 % příkonu a dále teplo, které projde stěnou kelímku. Chlazení by mělo fungovat za každé situace i v poruchovém stavu z důvodu bezpečnosti a k zamezení ekonomických škod.

### 3.4 Analytický výpočet

Ztráty induktoru stanovujeme podle Joulových ztrát, tzn. odpor induktoru krát druhá mocnina proudu. Tyto ztráty odpovídají přibližně 25 % dodávaného ze zdroje. Další ztráty jsou v kondenzátorových bateriích a v přívodním pásovém vedení. V následujícím výpočtu chceme zjistit, o kolik se oteplí jeden metr délky cívky induktoru za jednotku času. Ztráty se přenesou do vody.

$$P_{ztr.civk} = R_{civk} \cdot I^2 = 1,44 \cdot 10^{-2} \cdot 3232^2 = 150420 \text{ W}$$

Kde  $P_{ztr.civk}$  - ztráty v cívce induktoru [W]

$R_{civk}$  - odpor cívky induktoru [ $\Omega$ ]

$I$  - proud induktoru [A]

Ztrátový výkon můžeme počítat jako množství energie, tzn. výkon za čas. V případě induktoru počítáme 150,4 kW za jednu hodinu. Pro jednoduchý výpočet si zjistíme, kolik energie odvedeme za jednu sekundu.

$$P_z = \frac{Q[Wh]}{t[s]} = \frac{150420}{3600} = 41,783Ws$$

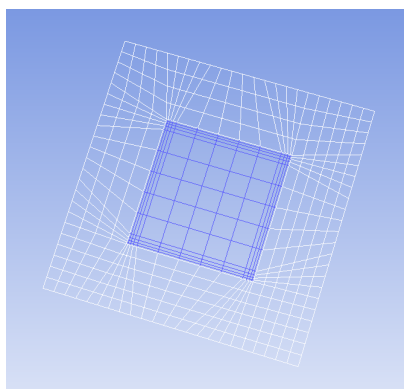
Kde  $P_z$  je výkon, který se musí odvést z celého induktoru za jednu sekundu. Dále je nutno vypočítat, jaký výkon se ztratí v jednotkové délce induktoru.

$$P_{z1m} = \frac{P_z[Ws]}{l_{civ.ind.}[m]} = \frac{41,783}{57,554} = 0,726 Ws.m^{-1}$$

### 3.5 Numerický výpočet oteplení cívky induktoru

Největším podílem na odvodu tepla z celé tavící pece budou joulovy ztráty v cívce induktoru. V první části výpočtu se budu zabývat chlazením pouze induktoru, tedy bez uvažování tepla přestupem stěny od taveniny, která má teplotu okolo 1600°C.

Prvním krokem je sestavení geometrie v programu Solidworks Obr. 6. Připravený model naimportujeme do programu DesignModeler, po upravení a vyhlazení některých objektů může postoupit ke tvorbě sítě. Tvorba sítě určuje přesnost měření výsledku. Použitím příliš malých rozměrů sítě docílíme poměrně dobrých výsledků, avšak velkou výpočetní a časovou náročnost. Síť je nutno volit s ohledem na fyzikální skutečnost a přizpůsobovat tomu velikosti prvků. Velký důraz na přesnost a velikost prvků jsou kapaliny a hlavně na rozhraní pevná látka – kapalina. V našem případě je důležitý vnitřní objem induktoru, kde protéká chladicí voda. Buňky blízko u stěny jsou vytvořeny z tenkovrstvých buněk a směrem ke středu se buňky zvětšují. Délka buněk ve směru otáčení cívky je řešena delšími prvky. Toho můžeme dosáhnout z důvodu celkové délky, která je řádově o dvě místa větší. Velikost buněk v pevné látce můžeme použít velikostně stejné.



Obr. 6 Ukázka sítě – na vstupu induktoru (modrá barva je voda, bílá ukazuje měď)





Obr. 7 - Cívka induktoru pro tavicí pec

### 3.5.1 Stanovení okrajových podmínek

Pro určení tepelných ztrát v cívce je nutné znát ztrátový výkon a objem induktoru. Ztrátový výkon známe z kapitoly 3.4  $P_{ztr.civk.} = 150420 \text{ W}$ . Objem induktoru spočítáme jako plochu základny krát výška.

$$V_{civky} = S_{civky} \cdot d_{stř.} \cdot \pi N = (0,030^2 - 0,015^2) \cdot 0,72 \cdot 3,14 \cdot 22,9 = 0,0349 \text{ m}^3$$

$$q_t = \frac{V_{civky}}{P_{ztr.civk.}} = \frac{0,0349}{150420} = 4302134,3 \text{ W} \cdot \text{m}^3$$

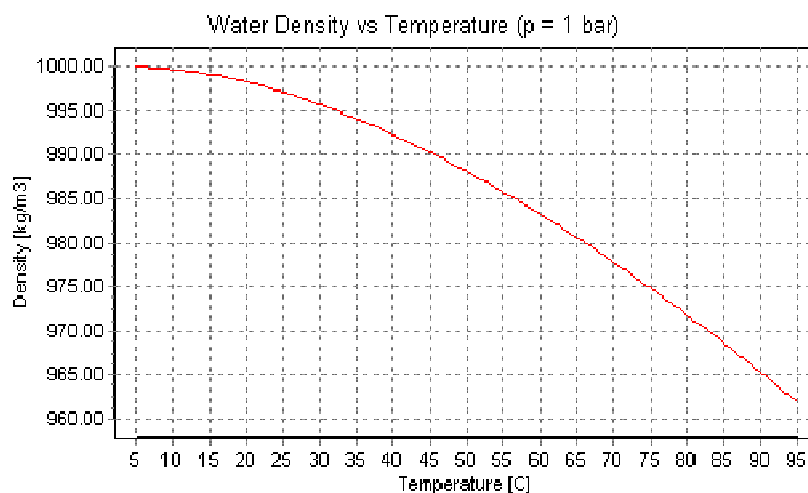
Kde  $V_{civky}$  - objem profilu induktoru  $[\text{m}^3]$

$q_t$  - měrné tepelné ztráty  $[\text{W}/\text{m}^3]$

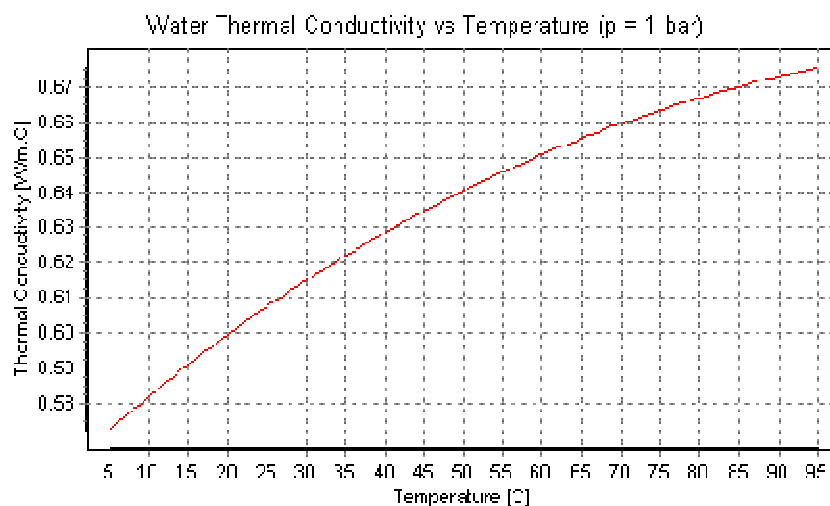
Z důvodu, že jsem u tohoto výpočtu vynechal okolní vzduch, je nutné zadat hodnoty přestupu tepla do okolí  $\alpha_k$ . Vnitřní strana induktoru bude přilepena na izolaci stěny kelímku a proto bude spíše teplo získávat. Hodnota je tedy  $\alpha_k = 0$ . Strany mezi závitů budou také ovlivněny teplotou z taveniny a zároveň teplem z předchozího závitu.  $\alpha_k$  jsem tedy mezi

závity volil  $1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Pro vnější stranu induktoru, kde bude plochu ochlazovat okolní vzduch, jsem koeficient přestupu tepla do okolí zvolil  $6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{K}^{-1}$ .

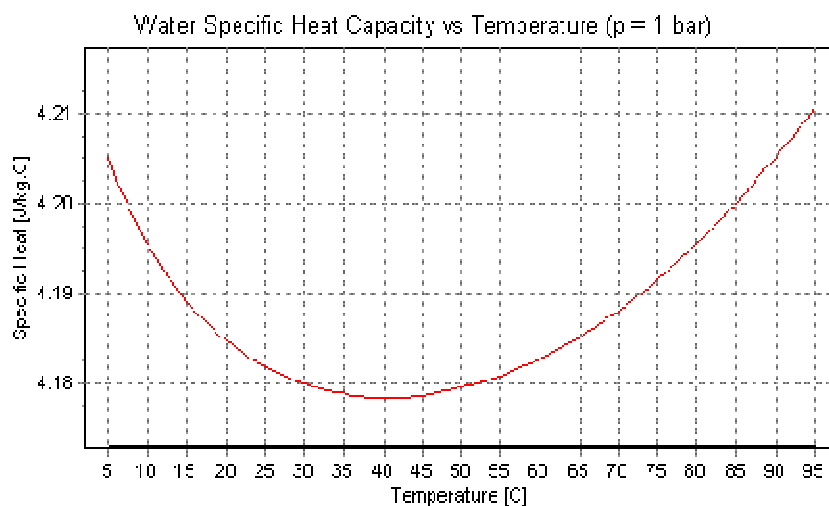
Další prvek, který je nutno nastavit, je chladící voda. Parametry vody ukazují následující grafické obrázky, kde je vidět hustota, tepelná vodivost a tepelná kapacita v závislosti na teplotě. Vstup vody jsem nastavil na tlakový vstup s parametry  $T = 300 \text{ K}$ , a  $p = 5 \text{ barů}$  (500000 pascalů).



Obr. 8 - Grafické znázornění hustoty vody v závislosti na teplotě

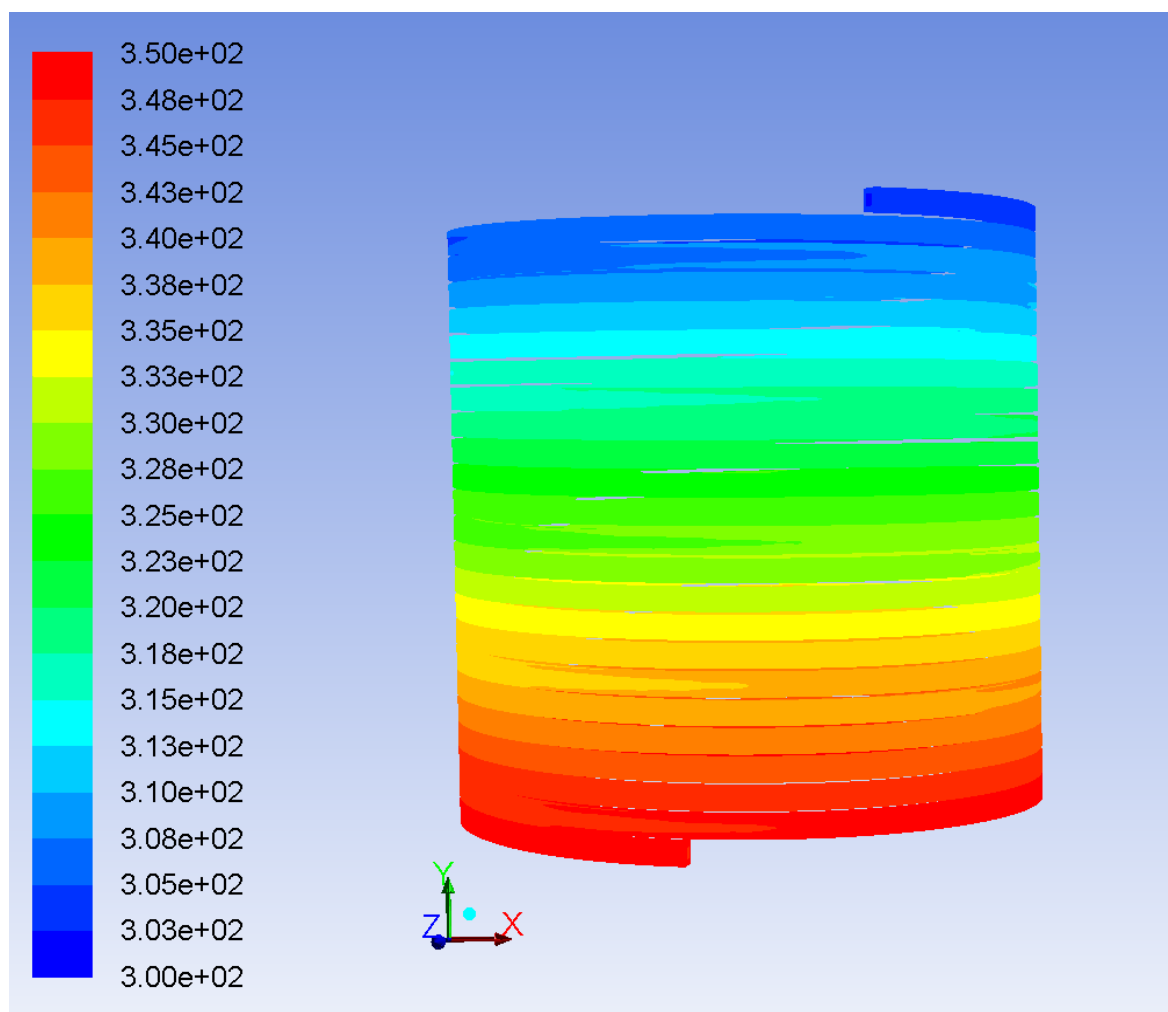


Obr. 9 - Grafické znázornění tepelné vodivosti v závislosti na teplotě



Obr.10 - Grafické znázornění tepelné kapacity vody v závislosti na teplotě

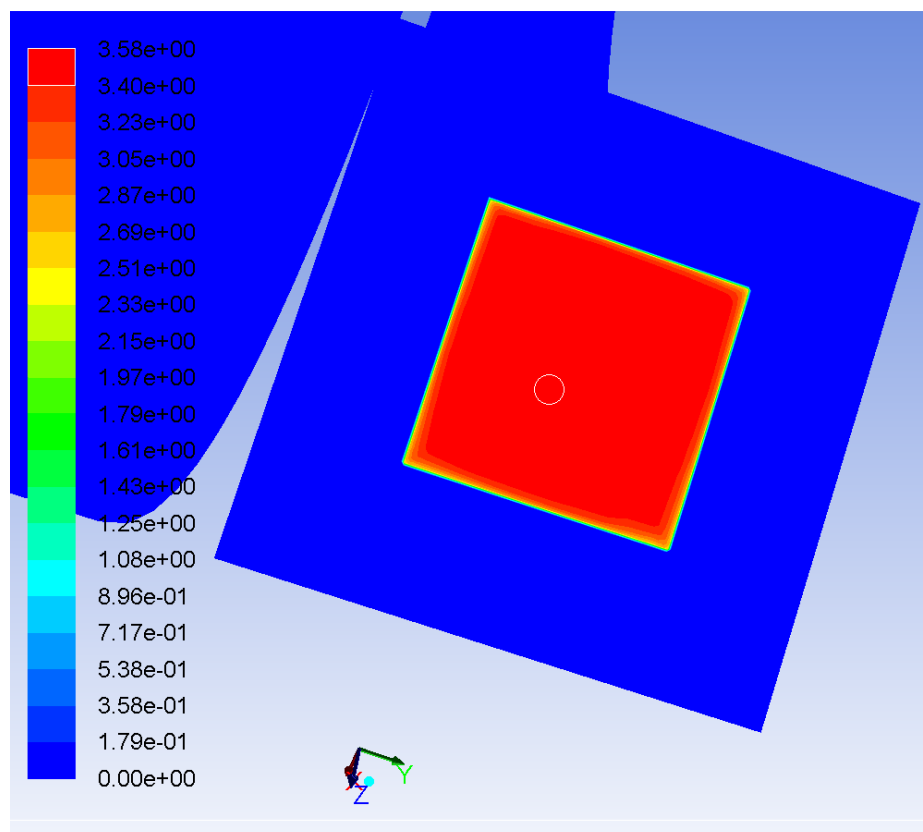
### 3.5.2 Výsledek výpočtu v programu FLUENT



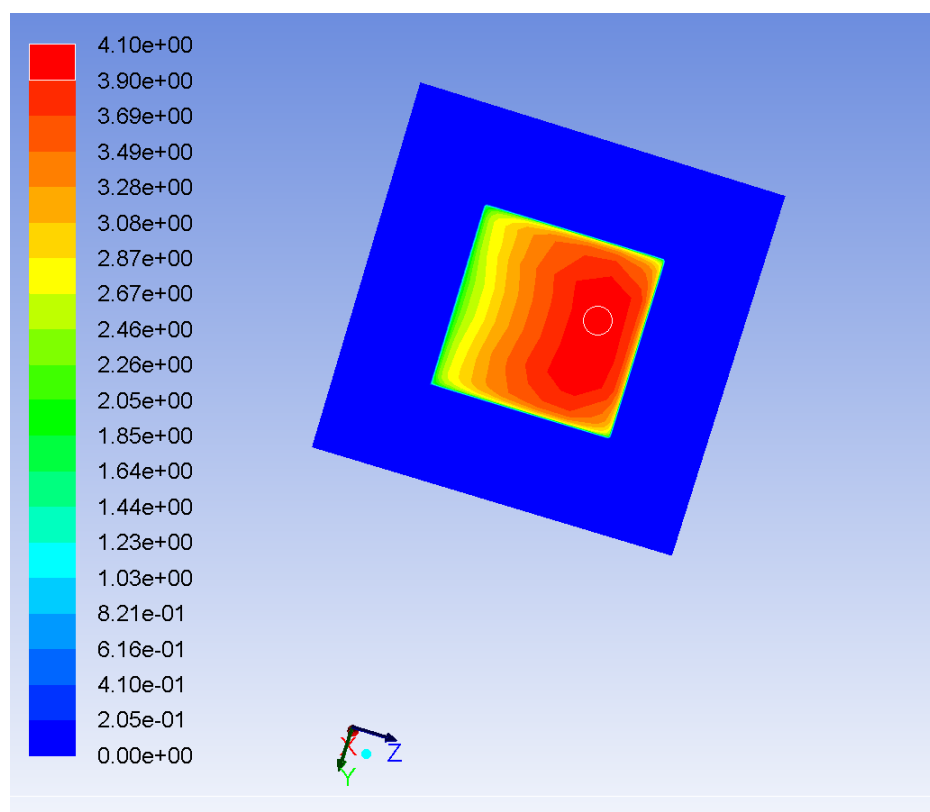
Obr. 11 - Výsledné oteplení cívky induktoru

Na výsledném obrázku je vidět oteplení cívky induktoru, ve kterém protéká chladicí medium - voda o počáteční teplotě 300 °K což odpovídá 26,84 °C. Výstupní teplota byla vypočítaná na 348 °K (74.84 °C), Rozdíl teplot je tedy 48 °K. Jestliže teplota dosáhla více jak 60 °C, je nutné udělat opatření pro snížení výstupní teploty, aby nedocházelo v některých místech ke vzniku páry. Zvolená vstupní teplota byla poměrně vysoká, v praxi se spíše používá teplota mezi 15 a 20 °C. Tlak vody na vstupu by šlo do jisté míry zvýšit.

Rychlost proudící vody na vstupu byla spočítána na 3,6 m/s a maximální výstupní hodnota rychlosti vody byla vypočítaná na 4 m/s.



Obr. 12 rozložení rychlosti vstupu cívky induktoru (tlak = 5 barů)



Obr. 13 – Znázornění rychlostního výstupu z cívky induktoru

Na tomto modelu jsem provedl několik výpočtů s různými parametry vody. Při zvýšeném tlaku na vstupu na 7 bar bylo oteplení sníženo a to na  $\Delta T = 43$ . S rostoucím tlakem se oteplení snižuje. Při pokusu jednoho extrému, kdy jsem na vstup vody zadal okrajovou podmínku rychlostního vstupu rovnající se 50 m/s mi výsledné oteplení vyšlo  $\Delta T = 5$  °K, Tlak vody byl vypočítán na 57 MPa, což je řádově o stovku víc než reálný tlak. Dalším problémem by byla mechanická pevnost mědi při tak velkém tlaku. Rychlost 50 m/s si můžeme představit, že jeden element vody přicházející na vstup by za jednu sekundu byl dopraven až na konec cívky. Samozřejmě tato hodnota je v praxi nereálná.

### 3.6 Numerický výpočet tavící pece

Při výpočtu oteplení tavící pece jsem zjednodušil geometrii a vynechal mezizávitovou izolaci stejně jako u výpočtu samotného induktoru. Při tvorbě geometrie je nutné nakreslit všechny uvažované objemy včetně vzduchu. Izolace mezi kelímkem pece a cívkou induktoru je 10 mm a tvarově je tenký válec. Uvnitř tohoto válce je umístěn objem, který reprezentuje

kelímkovou vyzdívku. Okolní vzduch je tvořen válcem o průměru představující měděné stínění induktoru.

### 3.6.1 Nastavení okrajových podmínek

Okrajové podmínky nastavujeme obdobně jako je tomu u samotné cívky, kromě součinitele přestupu tepla do okolí na plochách induktoru, to už nebudeme využívat, jelikož máme okolní vzduch. Vzduch nastavíme na ideální plyn a zadáme hodnoty do materiálových vstupů. Parametry vzduchu - hustota, tepelná kapacita a tepelná vodivost jsou v tabulce 2.

T[°C]	T[°K]	hustota[t/m <sup>3</sup> ]	c <sub>p</sub> [J/K]	vodivost [W/m.K]
-150	123,16	2,793	1026	0,0116
-100	173,16	1,98	1009	0,016
-50	223,16	1,534	1005	0,0204
0	273,16	1,293	1005	0,0243
20	293,16	1,205	1005	0,0257
40	313,16	1,127	1005	0,0271
60	333,16	1,067	1009	0,0285
80	353,16	1	1009	0,0299
100	373,16	0,946	1009	0,0314
120	393,16	0,898	1013	0,0328
140	413,16	0,854	1013	0,0343
160	433,16	0,815	1017	0,0358
180	453,16	0,779	1022	0,0372
200	473,16	0,746	1026	0,0386
250	523,16	0,675	1034	0,0421
300	573,16	0,616	1047	0,0454
350	623,16	0,566	1055	0,0485
400	673,16	0,524	1068	0,0515

Tab.2 Parametry vzduchu v závislosti na teplotě

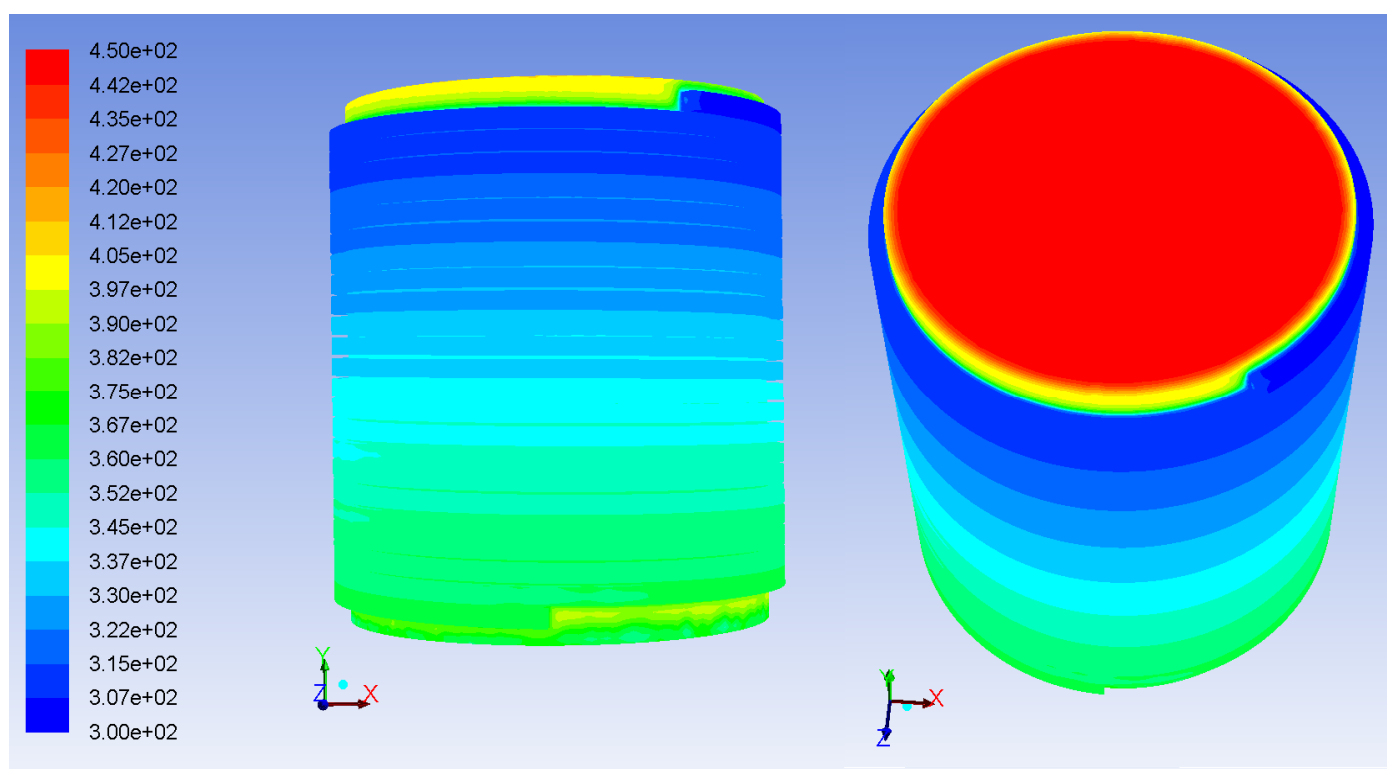
Vnitřní válec respektuje vyzdívkový kelímek, zjednodušení jsem nastavil teplotu na povrchu vyzdívky  $T = 450 \text{ °K}$ . Tato teplota vznikne na povrchu vyzdívky, přes kterou prochází tepelný tok od taveniny, která má teplotu  $1873 \text{ °K}$ . Dříve byla izolace tvořena azbestem, ten pro svoji škodlivost byl zakázán. V dnešní době můžeme azbest nahradit Silcapanem od firmy Silca. Parametry izolace ukazuje tabulka 3.

	hustota[kg/m <sup>3</sup> ]	c <sub>p</sub> [J/kg.K]	vodivost [W/m.K]
Silcapan	310	1050	0,034

Tab. 3 Vlastnosti tepelného izolantu Silcapan

Ztráty v mědi volíme stejně jako v předchozím příkladu. Teplotu vody jsem zvolil na 300 °K a rychlostí vstup  $v = 3,8$  m/s. Rychlost odpovídá tlaku 6 barů. Spodní válce, kde se přisává vzduch, jsem nastavil na rychlostní vstup  $v = 0,3$  m/s. Pro přesnější výsledky by bylo lepší nastavit tlakový vstup, avšak pro výpočetní náročnost jsem tuto variantu vynechal.

### 3.5.2 Výsledný výpočet oteplení tavicí pece



Obr. 14 – Výsledné oteplení tavicí pece bez vzduchu [°K]

Na obrázku 14 je vidět výsledek výpočtu z programu FLUENT. Vnitřní válce má teplotu 450 °K, tuto teplotu respektuje průchod energie přes stěnu vyzdívky z taveniny. Oteplení induktoru je  $\Delta T = 80$  °K, jestliže použijeme napájecí vodu o teplotě 20 °C, voda na výstupu bude mít teplotu převyšující teplotu bodu varu. V takovém případě dojde ke vzniku páry a ke snížení schopnosti chladit zařízení a mohlo by dojít k poškození celého zařízení.

Tento obrázek nám ukazuje pec, která je uzavřená horním poklopem, pro omezení ztrát sáláním do okolí. Bez použití poklopu by teplota vzrostla na 1400 °C a bylo by nutné počítat s radiací do okolí a samozřejmě okolní vzduch by se výrazně oteplil.

## 4. Opatření pro lepší chlazení

Jestliže chceme, aby oteplení cívky nepřesáhlo 60 °C, musíme učinit opatření pro lepší odvod tepla. Kromě změny parametrů na vstupu chladicí kapaliny máme několik možností.

První možnost je zvýšit cirkulaci vzduchu okolo tavící pece. Místo přirozeného proudění použijeme nucené - za pomoci silných ventilátorů. S ohledem na fakt, že samotný induktor bez uvažované tavící hmoty se oteplil víc než potřebujeme, tuto možnost bych nedoporučoval a hledal bych lepší řešení chlazení vodou.

Další řešením by byla výměna měděného profilu cívky induktoru za jiný typ s větším vnitřním profilem. Musíme ale dbát na mechanickou pevnost a minimální tloušťku stěny, což je v našem případě 4mm. V případě, že již máme stávající tavící pec a jenom zvyšujeme výkon, je tato rekonstrukce poměrně náročná. Proto bych doporučoval následující řešení.

Jestliže zjistíme, že nově postavená pec nestačí se svým měděným profilem odvádět teplo, nemusíme hned provádět výměnu celé měděné cívky včetně příslušenství. Řešení lze provést rozdělením chladicího media na dva okruhy o stejné velikosti chladicí plochy. Funkce induktoru a parametry zdroje zůstanou stejná, protože elektrický obvod nebude nijak rozpojen. Oteplení pece by se teoreticky mělo snížit na polovinu, popřípadě snížit parametry vstupní vody, aby došlo k úspoře energie pro chlazení zařízení. Druhý důvod je, aby nedocházelo k velkým teplotním rázům a tedy i teplotnímu a mechanickému namáhání. Tím pomáháme zvyšovat životnost zařízení.



## 5. Závěr

V úvodu práce jsem popsal oteplení proudové dráhy. Pro případ indukční tavící pece jsem vynechal přerušovaný chod a krátkodobé oteplení. U veškerých tepelných dějů je nezbytné nezapomenout na zákon zachování energie, kdy součet všech energií se musí rovnat nule. Dále v úvodu jsem popisoval tři způsoby tepla – vedení, proudění a sálání. Sdílení tepla vedením se uplatní v přestupu přes vyzdívkovou stěnu kelímku. Proudění má největší vliv v trubce induktoru, kde se odvádí největší část tepelných ztrát. Sálání se uplatňuje nad 300 °C, proto jeho vliv přestupu tepla má od taveniny.

Příklad indukční tavící pece jsem použil ze skript a některé parametry (profil induktoru) jsem zvolil podle svého uvážení. V případě výpočtu bez induktoru je síť tvořená tak jak by správně měla být oproti tomu u výpočtu celé tavící pece byla síť zjednodušena z důvodu časové a výpočetní náročnosti.

Výsledky oteplení proudové dráhy samotného induktoru vyšli o něco více než by bylo potřeba. Proto jsem navrhnul opatření které by zlepšil chlazení zařízení ale je nutné zvážit investiční náklady vůči provozování za vyšší náklady.

V tomto případě byla špatně zvolen profil induktoru a teplo vzniklé Joulovými ztrátami je větší než je schopnost vody odvést teplo do okolí. V případě, že stavba induktoru je zatím v stadiu návrhu doporučuji změnit velikost měděného profilu, čímž se zvýší plocha chlazení a celkový průtok vody se zvýší.

V případě, že již máme stávající tavící pec postavenou a pouze jsme zvýšili výkon, doporučuji vytvořit dva chladicí okruhy nezávisle na sobě. Oteplení by se mělo výrazně snížit.

## Použitá literatura

- [1] Milka, J. Bakalářská práce - Energetický problém indukčních tepelných zařízení, VUT Brno 2011
- [2] Sedláček, J. přednášky předmětu elektrické přístroje v SE, 2014
- [3] Havelka, O. a kolektiv: Elektrické přístroje, Praha, SNTL 1985
- [4] Langer, E.: Elektrotepelná technika I+II, VŠSE Plzeň 1974
- [5] Langer, E.: Elektrotepelná technika V, VŠSE Plzeň 1975