

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Možnosti uplatnění studeného kelímku při tavení skla

Martin Rataj

2015

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

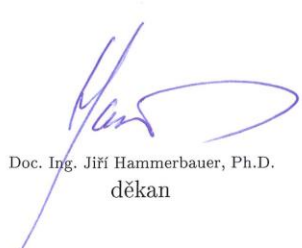
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. Langer, Emil, Teorie indukčního a dielektrického tepla , Praha : Academia 1979
2. Rudnev, Valery, Handbook of induction heating , New York : Marcel Dekker 2003
3. Starck, Axel von; Mühlbauer, Alfred; Kramer, Carl, Handbook of thermoprocessing technologies :fundamentals, processes, components, safety , Essen : Vulkan-Verlag 2005
4. Internet

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Rot, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


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




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

V Plzni dne 15. října 2014

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin RATAJ**
Osobní číslo: **E13N0083P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Možnosti uplatnění studeného kelímku při tavení skla**
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. Uveďte teorii indukčního ohřevu
2. Uveďte teorii sdílení tepla
3. Uveďte problematiku studeného kelímku s důrazem na studené kelímky používané pro tavení skla
4. Vytvořte numerický model pro řešení elektromagnetického pole studeného kelímku pro ohřev skla
5. Uveďte závěry pro praxi

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou studeného kelímku se zaměřením na využití při tavení skla. V prvních dvou kapitolách bude popsán teoretický předpoklad pro sdílení tepla a teorie indukčního ohřevu. Třetí kapitola je zaměřena na samotnou problematiku studeného kelímku, s důrazem na kelímky používané pro tavení skla.

Hlavním cílem práce je vytvořit 3D model reálného studeného kelímku za pomoci výpočetního programu ANSYS. Výsledkem práce je pak porovnání studeného kelímku při použití vodivého a nevodivého dna.

Klíčová slova

Maxwellovy rovnice, indukční teplo, hloubka vniku, tavení nevodivých materiálů, R7T7, ANSYS, Studený kelímek, Sklo

Abstract

The present thesis is focused on problematic of cold crucible with its use for melting glass. In the first two chapters will be described the theoretical hypothesis for the heat exchange and the theory of induction heating. The third chapter deals with the cold crucible itself, focusing on the crucibles that are used for melting glass.

The main objective of this thesis is creating a 3D model of the real cold crucible using the ANSYS software. The result of this thesis is a comparison of the cold crucible with conductive and nonconductive bottom.

Key words

Maxwell equations, induction heating, depth of penetration, melting of non conductive materials, R7T7, ANSYS, cold crucible, Glass

Prohlášení

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval sám, z uvedené technické literatury jsem citoval.

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

.....

Podpis

V Plzni dne 13.5. 2015

Martin Rataj

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Davidu Rotovi Ph.D. za vedení práce, pomoci při jejím zpracování a cenné profesionální rady.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam symbolů a zkratk | 9 |
| Úvod | 11 |
| 1. Teorie sdílení tepla | 12 |
| 1.1. Sálání..... | 12 |
| 1.2. Vedení | 16 |
| 1.3. Proudění | 18 |
| 2. Teorie indukčního ohřevu | 20 |
| 2.1. Vlnové rovnice..... | 20 |
| 2.2. Vektorový potenciál..... | 22 |
| 2.3. Hloubka vniku..... | 24 |
| 2.4. Poyntingův zářivý vektor | 26 |
| 3. Problematika studeného kelímku s důrazem na studené kelímky používané pro tavení skla | 28 |
| 3.1. Studený kelímek | 28 |
| 3.2. Rozdělení a typy studeného kelímku: | 28 |
| 3.2.1. Segmentový kelímek..... | 28 |
| 3.2.2. Kelímek s integrovaným induktorem | 29 |
| 3.3. Princip tavení elektricky nevodivých materiálů | 30 |
| 3.4. Tavení skel | 32 |
| 3.4.1. Vitifikace | 33 |
| 4. Numerický model pro řešení elektromagnetického pole studeného kelímku pro ohřev skla | 35 |
| 4.1 Metoda konečných prvků..... | 35 |
| 4.2 Obecná tvorba modelu | 36 |
| 5. Matematický model studeného kelímku | 38 |
| 5.1. Definování problému | 38 |
| 5.2. Vytvoření geometrie | 39 |
| 5.3. Materiálové parametry | 40 |
| 5.4. Tvorba sítě elementů – mesh | 40 |
| 5.5. Samotný výpočet..... | 41 |
| 6. Výsledky modelování | 42 |
| 6.1. Grafické porovnání | 42 |
| 6.1.2. Rozložení intenzity magnetického pole | 42 |
| 6.1.3. Rozložení Jouleových ztrát | 43 |
| 6.1.3. Rozložení vektorů proudové hustoty | 43 |

| | |
|---|----|
| 6.2 Ztráty ve Studeném kelímku | 44 |
| 7. Závěr | 46 |
| 8. Seznam použité literatury a zdrojů | 47 |

Seznam symbolů a zkratek

| Symbol/zkratka | Význam | Jednotka |
|----------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| A | poměrná pohltivost | [-] |
| B | poměrná odrazivost | [-] |
| C | poměrná průzařnost | [-] |
| c | měrné teplo materiálu | [J.kg ⁻¹ K ⁻¹] |
| c _p | měrná tepelná kapacita | [J.kg ⁻¹ K ⁻¹] |
| g | gravitační zrychlení | [m.s ⁻²] |
| L | charakteristický rozměr | [-] |
| n | index lomu na rozhraní | [-] |
| P | výkon | [W] |
| Q | tepelný tok | [W] |
| s | měrná hmotnost materiálu | [kg.m ⁻³] |
| v | rychlost šíření v prostředí | [m.s ⁻¹] |
| v' | rychlost šíření v prostředí | [m.s ⁻¹] |
| α | součinitel přestupu tepla | [W.m ⁻² K ⁻¹] |
| γ | součinitel objemové roztažnosti | [K ⁻¹] |
| ε _s | stupeň černosti | [-] |
| η | dynamická viskozita | [Pa.s] |
| Θ | termodynamická teplota | [K] |
| T | termodynamická teplota | [K] |
| ϑ | teplota | [°C] |
| λ | vlnová délka | [m] |
| λ | měrná tepelná vodivost | [W.m ⁻¹ K ⁻¹] |
| ν | kinematická viskozita | [m ² s ⁻¹] |
| σ _ε | Stefan – Boltzmannova konstanta | [W.m ⁻² .K ⁻⁴] |
| I _Q | Měrný tepelný tok | [W.m ⁻²] |
| J _Q | hustota tepelného toku | [W.m ⁻²] |
| S | Obsah plochy | [m ²] |
| E | intenzita el. pole | [V.m ⁻¹] |
| H | intenzita mag. pole | [A.m ⁻¹] |
| D | elektrická indukce | [C.m ⁻²] |
| B | magnetická indukce | [T] |
| ε ₀ | permitivita vakua | [F.m ⁻¹] |
| ε | relativní permitivita | [-] |
| μ ₀ | permeabilita vakua | [-] |
| μ | relativní permeabilita | [H.m ⁻¹] |
| γ | konduktivita | [S.m ⁻¹] |

| | | |
|-----------------------|--------------------------------|------------------------|
| S | poyntingův zářivý vektor | [W.m ⁻²] |
| A | vektorový magnetický potenciál | [Wb.m ⁻¹] |
| J | proudová hustota | [A.m ⁻²] |
| J_v | složka vnutených proudů | [A.m ⁻²] |
| J_i | složka posuvných proudů | [A.m ⁻²] |
| δ | hloubka vniku | [m] |
| f | frekvence | [Hz] |
| ω | úhlová rychlost | [rad.s ⁻¹] |
| W_m | energie magnetického pole | [J] |
| W_e | energie elektrického pole | [J] |
| I_{ef} | efektivní hodnota proudu | [A] |
| x₂ | argument | [-] |
| r₂ | vnější poloměr | [m] |
| U | napětí | [V] |
| t_{st} | teplota stěny | [K] |
| t_t | teplota tekutiny | [K] |
| t | čas | [s] |

Úvod

V dnešní době se využívá velké množství technologií pro tavení různých druhů vodivých materiálů. Tato diplomová práce se bude zaměřovat na využití tavení nevodivých materiálů se zaměřením na tavení skla. Tavení nevodivého skla s sebou přináší hned několik problémů. Jelikož indukční ohřev využívá vodivosti taveného materiálu, je logické, že při tavení nevodivého materiálu nastane velký problém v používané technologii. Tento problém byl vyřešen při nalezení technologie studeného kelímku. Studený kelímek poskytuje hned několik výhod při tavení materiálů, než obyčejný indukční ohřev, jednou z největších výhod je schopnost dosahovat velmi vysokých teplot, které se blíží až k 3000 °C. Další nespornou výhodou je, že při tavení se vytvoří v kontaktních místech vsázky a chladícího segment speciální vrstva zvaná „skull“ a můžeme říci, že se materiál taví „sám v sobě“. Díky tomu, že se materiál taví „sám sobě“ je výrazně zvýšena čistota výstupních materiálů. Velkou výhodou nese uplatnění tavení skla za pomoci studeného kelímku a to zejména v oblasti vitrifikace jaderného odpadu z jaderných elektráren.

Tato práce je rozdělena na dvě části. V první teoretické části je uvedena teorie potřebná k pochopení indukčního ohřevu a základní znalosti o teorii studeného kelímku s důrazem pro tavení skla. Druhá část práce je zaměřena na práci s programem ANSYS, vysvětlení postupu pro vytvoření modelu a následné modelování studeného kelímku, který se využívá při vitrifikaci jaderných odpadů v jaderné elektrárně Marcoule.

Cílem práce je vytvořit numerický model modelu kelímku v Marcoule, zjistit rozložení magnetického pole a rozložení proudové hustoty v roztaveném skle R7T7 a následné porovnání variant s vodivým a nevodivým dnem.

1. Teorie sdílení tepla

Tepla se šíří třemi různými způsoby a to buď sáláním (radiací), vedením (kondukcí) a prouděním (konvekci). V této kapitole budou podrobně rozebrány tyto tři typy šíření tepla.

1.1. Sálání[1]

Každé těleso, jehož teplota je vyšší než nula kelvinů, vyzařuje svým povrchem tepelnou energii. Je to elektromagnetické vlnění, které se v průzračném prostředí šíří přímočaře a všemi směry. Při průchodu z jednoho průzračného prostředí do druhého se řídí podle zákonů geometrické optiky. Každé těleso vyzařuje, ale také absorbuje energii vyzařovanou jinými tělesy. Při dopadu tepelného záření na částečně průzračné těleso se část energie pohltí, část se odrazí a část projde tělesem. Díky tomu můžeme definovat tři druhy vlastností:

$$\text{Poměrná pohltivost } A = \frac{\text{energie pohlcená}}{\text{celková dopadající energie}}$$

$$\text{Poměrná odrazivost } B = \frac{\text{energie odražená}}{\text{celková dopadající energie}}$$

$$\text{Poměrná propustnost } C = \frac{\text{energie prošlá}}{\text{celková dopadající energie}}$$

Je zřejmé, že platí vztah : $A + B + C = 1$, díky tomuto vztahu můžeme určit extrémy:

Absolutně černý povrch, který pohltí všechnu příchozí energii, má hodnoty:

$$A = 1 ; \quad B = 0 ; \quad C = 0$$

Absolutně bílý povrch, který všechnu energii odrazí, má hodnoty:

$$A = 0 ; \quad B = 1 ; \quad C = 0$$

Absolutně průzračné těleso, které všechnu energii propustí, má hodnoty:

$$A = 0 ; \quad B = 0 ; \quad C = 1$$

Obecná tělesa nemají tyto extrémy a nazývají se šedými tělesy.

Pro sdílení tepla sáláním platí následující zákony:

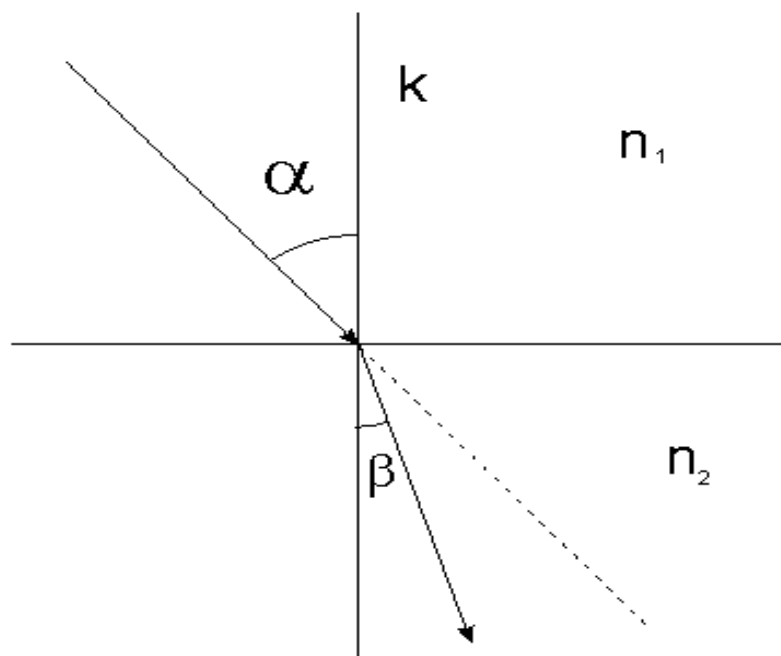
- Zákon Snellův
- Zákon Lambertův
- Zákon Stefanův – Boltzmannův
- Zákon Planckův
- Zákon Kirchhoffův

Nyní si postupně probereme všechny zákony.

Zákon Snellův:

„Při šíření záření z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího se paprsky lámou směrem ke kolmici. Při šíření záření z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího se paprsky lámou směrem od kolmice.“ [2]

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v}{v'} = \frac{n_1}{n_2} \quad 1.1.1$$

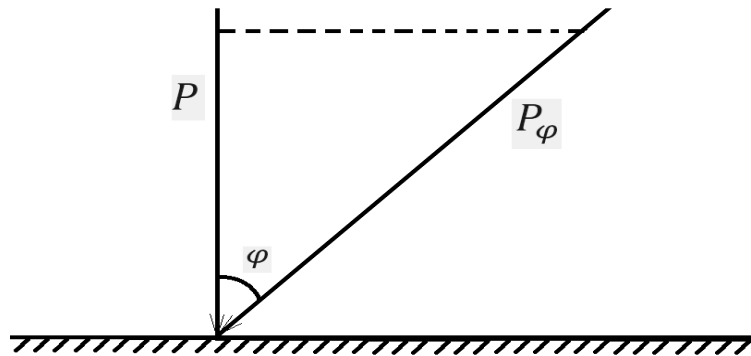


Obr.1.1 - Snellův zákon - odraz paprsků v jiném prostředí[12]

Paprsek se při přechodu z jednoho prostředí do druhého láme podle indexu lomu:

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{n} \quad 1.1.2$$

Zákon Lambertův:



Obr.1.2 - Lambertův zákon

$$P = P_{\varphi} * \cos \varphi \quad 1.1.3$$

Výkonově se uplatňuje jen kolmá složka záření [1]

Zákon Stefanův – Boltzmannův:

Úhrnná zářivost absolutně černého tělesa je úměrná Θ^4 . Měřením bylo zjištěno že

$$P_{\zeta} = \sigma_{\zeta}' * \theta^4 \quad 1.1.4$$

$$\sigma_{\zeta}' = 5,6697 * 10^{-8} \quad 1.1.5$$

Jelikož se udává konstanta $\sigma_{\zeta}' = 5,6697 \cdot 10^{-8}$ se dává do zlomku s teplotou, platí potom vztah[3]

$$P_{\zeta} = 5,6697 * \left(\frac{\theta}{100}\right)^4 \quad 1.1.6$$

Zákon Wienův:

S rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku ke kratším vlnovým délkám.

$$\lambda_m = \frac{2898}{\Theta} \quad 1.1.7$$

kde λ_m je vlnová délka, při níž je hodnota spektrální hustoty zářivého toku při dané teplotě zářiče maximální. Wienův posunovací zákon je možné získat z Planckova vyzařovacího zákona derivací spektrální hustoty zářivého toku dokonale černého tělesa, přičemž tuto derivaci je třeba položit rovnu nule. [4]

Zákon Kirchhoffův:

Představme si dvě tělesa. Jedno absolutně černé ($A_c=1$) a druhé šedé s poměrnou pohltivostí A_s . V případě že plocha černého tělesa má vyšší teplotu než těleso šedé, tak černé těleso vyzařuje na plochu šedého tělesa výkon P_c . Z tohoto výkonu se v šedé ploše pohltí výkon $A_s * P_c$ a odrazí se výkon $P_c - A_s * P_c$. Pokud budeme uvažovat stejné teploty těles tak se žádný teplotní výkon přenášet nebude a bude platit rovnice

$$P_c - A_s * P_c = 0 \Rightarrow A_s * P_c = P_s \Rightarrow \frac{P_s}{A_s} = P_c = \sigma_c * \theta^4 \quad 1.1.8$$

Kirchhoffova rovnice při spektrální i úhrnné zářivosti:

$$\frac{\text{Sálavý výkon šedého tělesa}}{\text{Poměrná pohltivost šedého tělesa}} = \text{Zářivý výkon absolutně černého tělesa}$$

Dále vyplývá, že výkon šedého tělesa je:

$$P_{\xi} = A_{\xi} * \sigma_{\xi}^{\prime} * \theta^4 = \varepsilon_{\xi} * \sigma_{\xi}^{\prime} * \theta^4 \quad 1.1.9.$$

Kde ε_{ξ} je stupeň černosti a je roven hodnotě A_{ξ} , z toho plyne, že čím je větší jeho pohltivost, tím větší je sálavost tělesa. A proto černé plochy tak dobře sálají a pohlcují tepelné záření a naopak plochy světlé a lesklé špatně pohlcují a špatně sálají teplo.[1]

1.2. Vedení

Tento typ přenosu tepla probíhá ve spojitém látkovém prostředí. Princip spočívá v tom, že si molekuly předávají kinetickou energii neuspořádaných tepelných pohybů. Takovým to přenosem se docílí toho, že se energie přesune z místa s vyšší teplotou do místa o nižší teplotě. Tento typ přenosu probíhá ve všech skupenstvích, tzn. v látkách pevných, plynných a kapalných.

Pro určení rychlosti přenosu tepla je zavedena veličina zvaná tepelný výkon respektive tepelný tok a je dán vztahem $I_Q = \frac{dQ}{d\tau}$. V tomto vztahu Q znázorňuje velikost přenášeného tepla a τ určuje čas přenášení. Po zjištění I_Q jsme schopni určit plošnou hustotu tepelného toku $J_Q \frac{dI_Q}{dS_n}$. Závislost mezi hustotou tepelného toku a gradientem teploty objevil Fourier (r. 1811) a vznikl vztah $J_Q = -\lambda \text{ grad } T$, kde koeficient λ je tzv. součinitel tepelné vodivosti a vyjadřuje schopnost látky vést teplo.[1]

Diferenciální rovnice pro vedení tepla.

Hustota tepelného toku, která je přenášená vedením, je určena podle Fourierova zákona. Pro její řešení musíme znát rozložení a průběh teplot v měřeném objektu. To znamená, abychom znali funkční závislost teploty na souřadnicích a čase.

$$T = T(x, y, z, \tau)$$

Rovnice teplotního pole

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{P_V}{c_p \rho} \quad 1.2.1$$

Obecně

$$\frac{P_V}{c_p \rho} + \frac{\lambda}{c_p \rho} \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad 1.2.2$$

tímto základním vztahem pro vedení tepla jsme schopni řešit příklady tohoto typu. Výsledkem bude nalezení závislosti teploty na poloze a čase, ze kterých jsme schopni určit velikost hustoty teplotního toku. Pro jeho určení je třeba znát počáteční a okrajové podmínky řešené úlohy. Bez nich se poté stává rovnice velmi matematicky složitá a není jisté, jestli má analytické řešení.

Ustálené vedení tepla

Prochází-li teplo prostorem tak, že se teplota v kterémkoli místě s časem nemění, nazýváme takový přenos tepla ustáleným. Vyřešením takto ustáleného vedení tepla dostáváme výsledné rovnice pro ustálený stav.

Plošná tepelná vodivost $A = \frac{\lambda}{d}$ poté pro ustálený tok tepla platí

$$I_Q = AS(t_2 - t_1) = G_t(t_2 - t_1) \quad 1.2.3.$$

a) Průchod rovinou stěnou

$$Q = -\lambda S \frac{dT}{dx} = \lambda S \frac{t_{s1} - t_{s2}}{D} \quad 1.2.4.$$

b) průchod válcovou stěnou

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot l (t_{s1} - t_{s2})}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad 1.2.5$$

1.3. Proudění

Proudění má stejný předpoklad jako přenos tepla vedením a to ten, že probíhá ve spojitém látkovém prostředí. Proudění probíhá pouze v kapalinách a plynech. A vyvolaný samovolný pohyb ohřátého plynu nebo kapaliny přenáší teplo. Samovolné proudění je vyvoláno tím, že se ohříváním v důsledku roztažnosti zmenšuje hustota látek. Vznikne-li mezi místem ohřevu a místem ochlazení v tekutině teplotní rozdíl, tak teplejší část je vytlačovaná chladnější částí a tekutina začíná proudit a využívá se pro přenos tepla.[1]

Tepelný tok se určuje z Newtonova ochlazovacího zákona kde $Q = \alpha \cdot S (t_{st} - t_t)$

Kriteriální rovnice nacházíme ve tvaru $N_u = f(R_e, G_r, P_r, P_e)$

$$N_u = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad \text{Nusseltovo číslo}$$

$$R_e = \frac{wL}{\nu} \quad \text{Reynoldsovo číslo}$$

$$P_r = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad \text{Prandtlovo číslo}$$

$$G_r = \gamma \Delta t \frac{gL^3}{\nu^2} \quad \text{Grashofovo číslo}$$

$$P_e = \frac{wL}{a} = R_e P_r \quad \text{Peeletovo číslo}$$

Kriteriální rovnice mají různý tvar závisující na změně skupenství látky a rozlišujeme konvekci na nucenou a volnou.

Používá se proto rovnice pro volnou konvekci v neomezeném prostoru a ta má tvar

$$N_u = C \cdot (G_r \cdot P_r)^n \quad 1.3.1.$$

Koeficienty C a n se určují ze součinu G_r a P_r viz tabulka

Tab.1.1 - koeficienty C a n

| $G_r \cdot P_r$ | C | n |
|--------------------------------------|-------|-------|
| $< 1 \cdot 10^{-3}$ | 0,45 | 0,0 |
| $1 \cdot 10^{-3} \cong 5 \cdot 10^2$ | 1,18 | 0,125 |
| $5 \cdot 10^2 \cong 2 \cdot 10^7$ | 0,54 | 0,25 |
| $2 \cdot 10^7 \cong 1 \cdot 10^{13}$ | 0,195 | 0,333 |

Pro nucené proudění v trubce se používají kritériální rovnice ve tvaru

$$N_u = f\left(R_e, P_r, \frac{L}{d}\right) \text{ popřípadě } N_u = C \cdot R_e^m P_r^n \left(\frac{L}{d}\right)^p \quad 1.3.2.$$

Konstanty m, n, p závisí na režimu proudění.

2. Teorie indukčního ohřevu

Teorie indukčního ohřevu je založena na elektrodynamice, vyplývající z Maxwellových rovnic. Tyto rovnice určují vlnový charakter elektromagnetického pole. Podstatou vlnových jevů je konečná rychlost šíření těchto jevů. Kdyby se daný jev šířil rychlostí nekonečně velkou, nebylo by jeho šíření postupné. Jev by byl okamžitě v celém daném prostoru a neexistovalo by proto ani vlnění. Princip indukčního ohřevu spočívá v indukování vířivých proudů do el. vodivé vsázky. Vířivé proudy začnou vsázku ohřívat a v roztavené formě vytvářejí i míchaní. Výhodou je, že můžeme ovlivňovat za pomoci kmitočtu velikost tloušťky, kde bude teplo v sázce vznikat. Dále jsou všechny části galvanicky oddělené od horké vsázky. [1]

2.1. Vlnové rovnice

Základní Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru jsou pro nás podstatnou součástí při určování vlnových rovnic.

Maxwellovy rovnice[5]

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad 2.1.1.$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad 2.1.2.$$

$$\operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad 2.1.3.$$

$$\operatorname{div} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad 2.1.4.$$

Odvození vlnových rovnic:

Rotace I M.R.

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{rot} \gamma \mathbf{E} + \operatorname{rot} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \gamma \operatorname{rot} \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial(\operatorname{rot} \mathbf{E})}{\partial t} \quad 2.1.5.$$

Dosadíme za rot E z II M.R.

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad 2.1.6.$$

$$\text{grad}(\text{div } \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad 2.1.8.$$

$$\text{div } \mathbf{H} = 0 \quad 2.1.9.$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad 2.1.10.$$

Elektrická složka se odvodí z rotace II M.R.

$$\text{rot}(\text{rot } \mathbf{E}) = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial(\text{rot } \mathbf{H})}{\partial t} \quad 2.1.11$$

$$\text{grad}(\text{div } \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad 2.1.12$$

$$\text{div } \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad 2.1.13$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \text{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad 2.1.14$$

Tyto rovnice jsou základními rovnicemi šíření elektromagnetického vlnění v prostředí kde ε_r , μ_r , γ jsou konstanty. Jsou případy kdy γ lze zanedbat, jelikož se jedná o prostředí nevodivé, nebo můžeme zanedbat ε_r pro vodivé prostředí.

Pro vodivé prostředí tedy získáváme

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad 2.1.15$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad 2.1.16$$

Pro nevodivé prostředí získáváme

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad 2.1.17$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad 2.1.18$$

Úpravou

$$\frac{1}{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0 \mu_r} \nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad 2.1.19$$

$$\frac{1}{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0 \mu_r} \nabla^2 \mathbf{E} = \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad 2.1.20$$

A využitím definice vlnové rovnice v trojrozměrném prostoru

$$\nabla^2 \mathbf{H} = v^2 \quad 2.1.21$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = v^2 \quad 2.1.22$$

Tak platí vztah pro rychlost šíření vlnění v daném prostředí

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0 \mu_r}} \quad 2.1.23$$

2.2. Vektorový potenciál [1]

Určení vektorového potenciálu vychází z prvních dvou Maxwellových rovnic. Pro určení je třeba použít diferenciální tvar těchto rovnic.

$$\mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial D}{\partial t} \quad 2.2.1$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad 2.2.2$$

Dále uvažujeme, že vektorový potenciál je definován

$$\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A} \quad 2.2.3$$

z čehož můžeme po dosazení do II. M. R. získat elektrickou intenzitu jako

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial(\text{rot}\mathbf{A})}{\partial t} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{E}_v - \mathbf{E}_i \quad 2.2.4$$

Pronásobíme-li celou rovnicí součinitelem γ získáme

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_i \quad 2.2.5$$

Zákon Wienův

$$J_{ef} \gg \epsilon\omega E \rightarrow \gamma \gg \epsilon\omega$$

Získáme z rovnic tvar

$$\text{rot}\frac{1}{\mu}\text{rot}\mathbf{A} = \gamma\mathbf{E}_v - \gamma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} \quad 2.2.6$$

Ze kterého za předpokladu, že $\mu = \text{konst.}$ získáme parciální diferenciální tvar pro vektorový potenciál

$$\Delta\mathbf{A} = \mu\gamma\mathbf{J}_v - \mu\gamma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} \quad 2.2.7$$

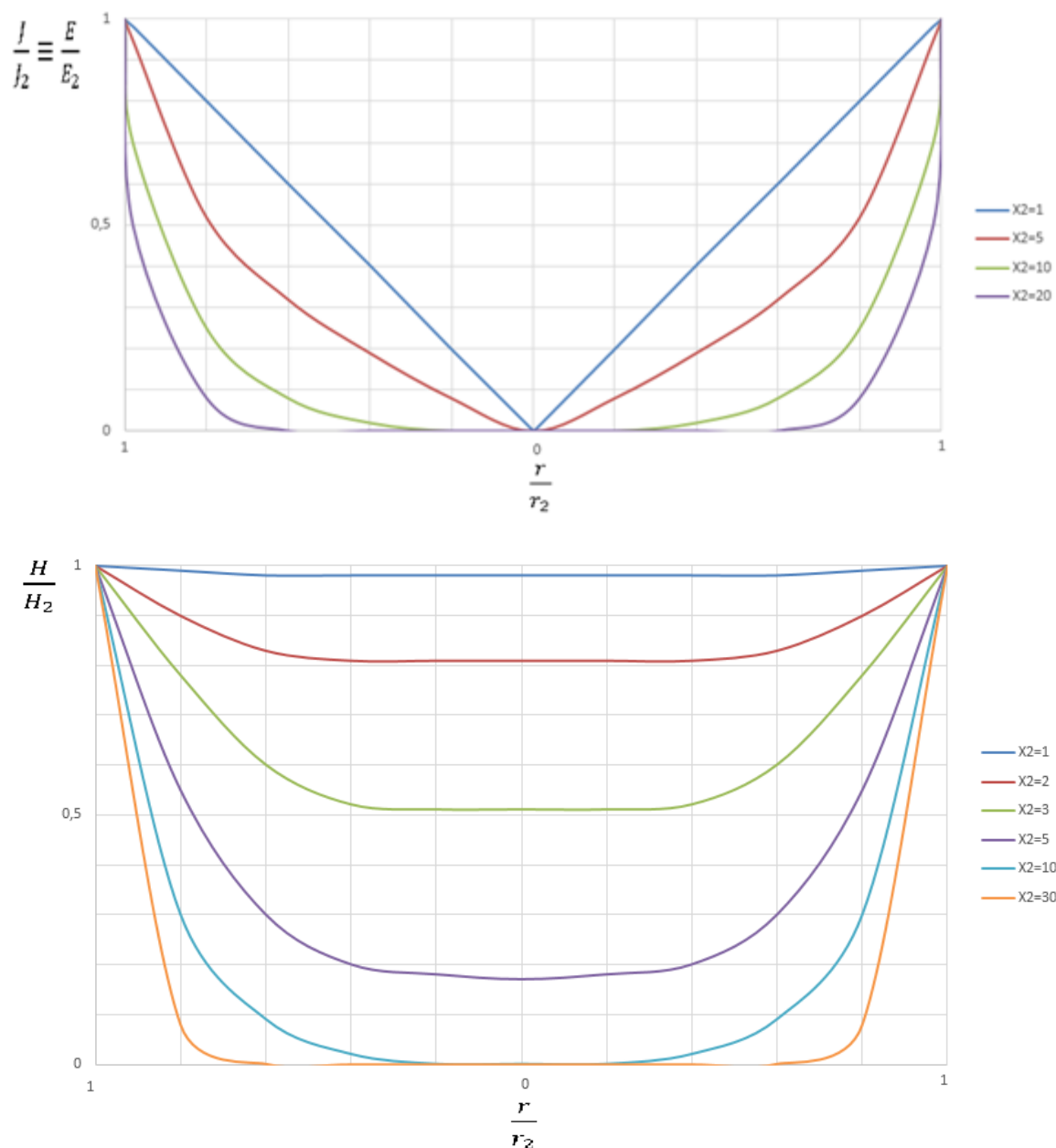
2.3. Hloubka vniku[1]

Hloubka vniku δ určuje, do jaké hloubky bude elektromagnetická energie pronikat a přeměňovat se na teplo. V praxi se nejčastěji využívá pro změnu hloubky vniku změna frekvence napájecího proudu protékajícího induktorem.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \quad 2.3.1$$

Jelikož $\omega = 2\pi f$ je patrné, že změna frekvence velmi ovlivní velikost hloubky vniku. Čím větší bude frekvence, tím menší bude hloubka vniku a naopak. K maximálně efektivnímu prohřátí materiálu v co nejkratším čase je vhodné, aby průměr byl přibližně 2,5 až 3 krát větší než δ . Úpravou a řešením vlnových rovnic pro plnou, elektricky vodivou válcovou vsázku pomocí cylindrických funkcí získáme obecně platné průběhy $\frac{H}{H_2}$ a $\frac{J}{J_2} \equiv \frac{E}{E_2}$ v závislosti na $\frac{r}{r_2}$ a argumentu x_2 , který je dán vztahem 2.3.2 průběhy jsou uvedeny na *obr. 2.1*.

$$x_2 = \frac{r_2}{\delta} \sqrt{2} \quad 2.3.2$$

Obr.2.1 - Rozložení J/J_2 a H/H_2 v závislosti na r/r_2

Z grafů lze vidět, že maximální hodnoty H_2 a J_2 jsou ve vzdálenosti r_2 od středu osy. Při malých hodnotách x_2 je průběh intenzity H_2 téměř konstantní a hustota proudu J_2 se mění lineárně s rostoucím poloměrem. Při rostoucím x_2 tudíž při zvyšující se f . Průběhy H_2 a J_2 mají exponenciální charakter.

2.4. Poyntingův zářivý vektor [1]

Poyntingův zářivý vektor \mathbf{S} udává směr a hustotu toku elektromagnetické energie v prostoru.

Množství energie, které proteče za 1 sekundu plochou 1 m^2 , kolmou ke směru šíření.

$$W_m = \frac{1}{2} \int_0^V \mathbf{B} \mathbf{H} \, dV = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r \int_0^V \mathbf{H}^2 \, dV \quad 2.4.1$$

$$W_e = \frac{1}{2} \int_0^V \mathbf{D} \mathbf{E} \, dV = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \int_0^V \mathbf{E}^2 \, dV \quad 2.4.2$$

Úbytek energie za jednotku času v daném objemu V

$$-\frac{\partial}{\partial t} (W_e + W_m) = - \int_0^V \frac{\partial}{\partial t} \left\{ \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r \mathbf{H}^2 \right\} dV \quad 2.4.3$$

$$-\frac{\partial}{\partial t} (W_e + W_m) = - \int_0^V \left\{ \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \right\} dV \quad 2.4.4$$

Z 1. a 2. Maxwellovy rovnice vyjádříme rovnice

$$\varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{H} - \gamma \mathbf{E} \quad 2.4.5$$

$$\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \quad 2.4.6$$

$$-\frac{\partial}{\partial t} (W_e + W_m) = \int_0^V \left\{ \gamma \mathbf{E}^2 + (\nabla \times \mathbf{E}) \mathbf{H} - (\nabla \times \mathbf{H}) \mathbf{E} \right\} dV \quad 2.4.7$$

$$-\frac{\partial}{\partial t} (W_e + W_m) = \int_0^V \left\{ \gamma \mathbf{E}^2 + \operatorname{div} \mathbf{E} \times \mathbf{H} \right\} dV \quad 2.4.8$$

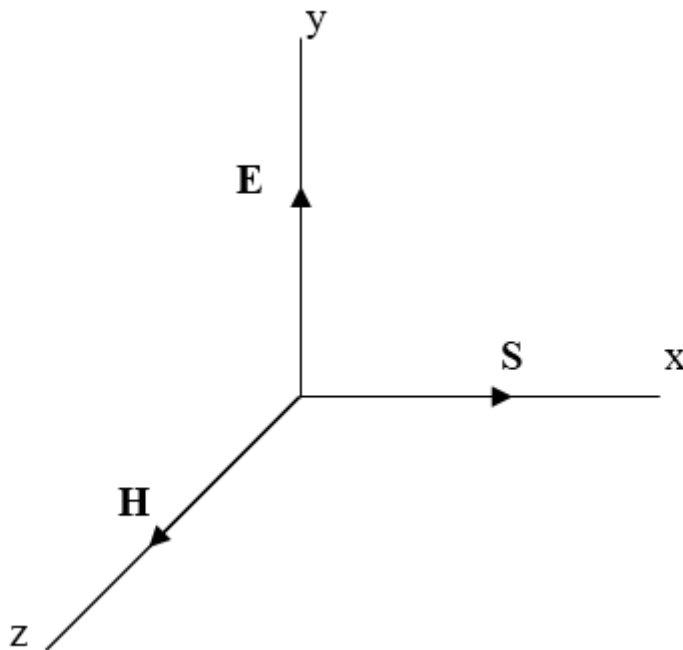
Využitím Gauss – Ostrogradské věty získáme

$$-\frac{\partial}{\partial t}(W_e + W_m) = \int_0^V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \oint_V \mathbf{E} \times \mathbf{H} dA = \int_0^V \gamma \mathbf{E}^2 dV + \oint_A \mathbf{S} dA \quad 2.4.9$$

Získáváme

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \quad 2.4.10$$

Tok energie je ve směru \mathbf{S} . Hustota toku energie je množství energie, které proteče za časovou jednotku, jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření. Obecně je zářivý vektor \mathbf{S} určen vektorovým součinem vektorů \mathbf{E} a \mathbf{H}



Obrázek 2.2 - Zobrazení vektorů H , E , S [5]

3. Problematika studeného kelímku s důrazem na studené kelímky používané pro tavení skla

3.1. Studený kelímek

Tavení ve studeném kelímku je princip, který se využívá nejčastěji pro tavení elektricky nevodivých materiálů, jako jsou například různé druhy skel a různé oxidy kovů. Studený kelímek spadá pod kategorii indukčních ohřevů, z čehož plyne, že pro tavbu využívá indukovaní vířivých proudů do vsázky. Studený kelímek využívá intenzivního chlazení a díky němu se v kontaktních místech vsázky a segmentu vytváří tenká tuhá vrstva nazývaná „skull“ o teplotě kolem 100 °C, poté se vsázka taví sama v sobě a mohou se vyskytovat teploty až 3000 °C. Využití studeného kelímku není jen pro tavení kovů, skel a jiných materiálů, ale využívá se i pro zatavování radioaktivních odpadů (vitifikace) pro jejich skladování.

3.2. Rozdělení a typy studeného kelímku:

Studený kelímek dělíme na dva základní typy. První typ je kelímek segmentový a druhý typ je kelímek s integrovaným induktorem.

3.2.1. Segmentový kelímek

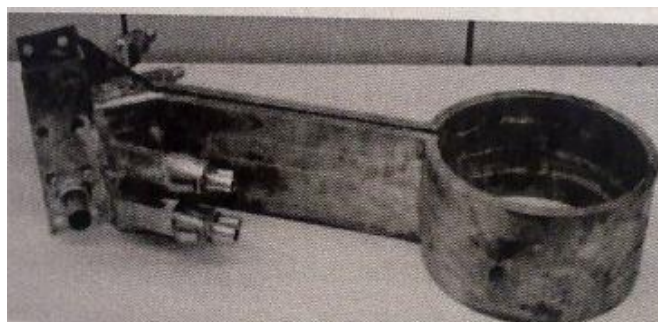
Segmentový kelímek se skládá z několika částí. První část je induktor, ke kterému je připojen vysokofrekvenční zdroj a protéká jím harmonický proud, který ve vsázce indukuje vířivé proudy. Vsázka je oddělena od induktoru takzvanými segmenty. Nejvhodnějším typem vsázky pro tento typ studeného kelímku jsou oxidy a elektricky vodivá vsázka. Segmenty jsou duté a intenzivně chlazené části studeného kelímku. Mají nejčastěji kruhový průřez, ale mohou se dělat i profily obdélníkové, které jsou konstrukčně náročnější. Segmenty protéká chladicí médium a díky tomu intenzivně ochlazují vsázku. Právě díky ochlazování od segmentů se na jeho vnitřních stranách vytváří tuhá „skull“ vrstva. Segmentový kelímek je zobrazen na *obr. 3.1.* [7]



Obr.3.1 - Segmentový kelímek[7]

3.2.2. Kelímek s integrovaným induktorem

Princip tavení je stejný jako u segmentového kelímku, ale uspořádání studeného kelímku je provedeno odlišně. Rozdíl je ten, že tento typ kelímku využívá k chlazení přímo induktor. Induktor je vytvořen z dutého jedno-závitového měděného induktoru, kde vnitřkem protéká chladící medium. Tyto duté induktory jsou válcového tvaru tak, aby vytvořily válcovitý tvar pro umístění vsázky. A velikost respektive výška kelímku je ovlivněna počtem a rozměrem právě těchto induktorů. Tento kelímek má větší účinnost tavby, nicméně je zde větší možnost zkratu mezi přívody pokud se nevytvoří ztuhlá vrstva, jelikož vsázka není oddělena segmenty od induktoru. Integrovaný kelímek je napájen pomocí tranzistorových generátorů, které jsou schopny pracovat s nižším napětím při vysoké frekvenci a nedochází tak k mezizávitovým zkratům. Tento typ kelímku se používá zejména pro tavení skla.[7]



Obr.3.2 - Kelímek s integrovaným induktorem[7]

3.3. Princip tavení elektricky nevodivých materiálů

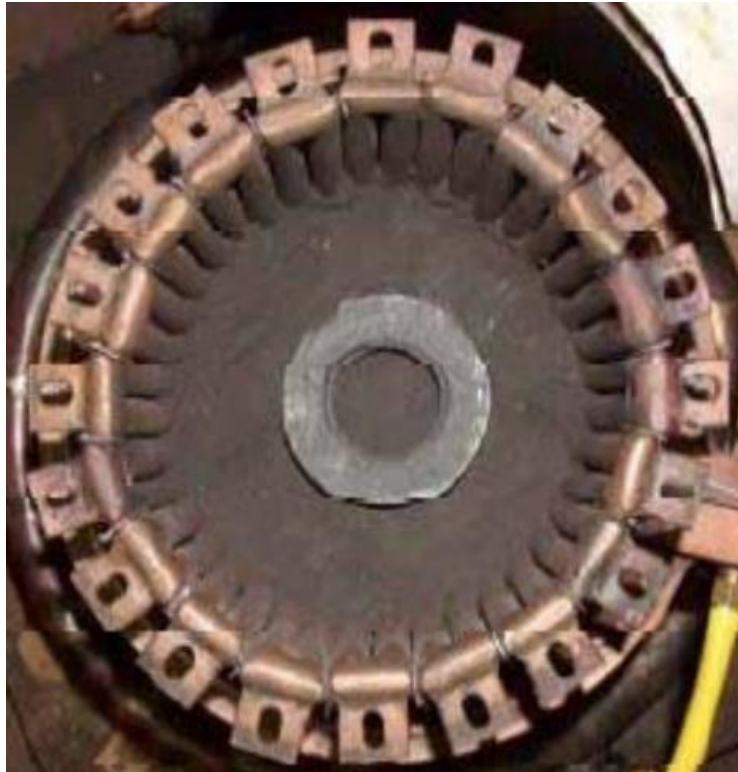
Studený kelímek, jak již bylo zmíněno, se využívá i pro tavení elektricky nevodivých materiálů. Nejčastěji pro tavení skla a oxidů. Jelikož nevodivý materiál nemá potřebné materiálové vlastnosti, aby se do něj při začátku tavení indukoval proud a materiál se začal ohřívat, je třeba využívat takzvané startovací procesy. Princip startovací fáze je zahřát nevodivý materiál na teplotu, kdy se materiál stává elektricky vodivým. V tu chvíli se do materiálu začnou indukovat proudy a materiál se dál taví vytvořeným teplem.

Máme několik typů startovacích procesů:

- Vložení elektricky vodivého kruhu
- Vložení el. induktivního prášku nebo drobných částic kovů
- Přímé ohřátí vsázky
- Pomocí koncentrované světelné záření

Vložení elektricky vodivého kruhu

Při této startovací metodě se využívá jiného materiálu, který se vloží před přidáním samotné vsázky. Základní vlastností materiálu, který se pro tuto metodu využívá, je mít vyšší hodnotu teploty tavení než tavená vsázka a musí být elektricky vodivý. Nejčastěji se používá grafit, karbidy křemíku eventuálně iridium. Poté co se vsázka roztaví a není již třeba využívat startovací proces, tak se vodivý kruh ze vsázky odstraňuje. [7]



Obr.3.3 - Použití elektricky vodivého grafitového kruhu [8]

Vložení prášku nebo drobných částeczek kovů

Základním předpokladem je, aby zvolený materiál měl dostatečný rozměr, aby v něm nedocházelo k elektromagnetické průzařnosti. Dalším důležitým faktorem je, aby i v tomto případě tavicí bod byl vyšší než tavicí bod vsázky. Lze zde využít překrytí materiálu oxidem ke zlepšení přenosu tepla a tím ke snížení tepelných ztrát. Výsledný materiál nebude znečištěn, dojde-li k dokonalé oxidaci při dostatku kyslíku.[7]

Přímé ohřátí vsázky

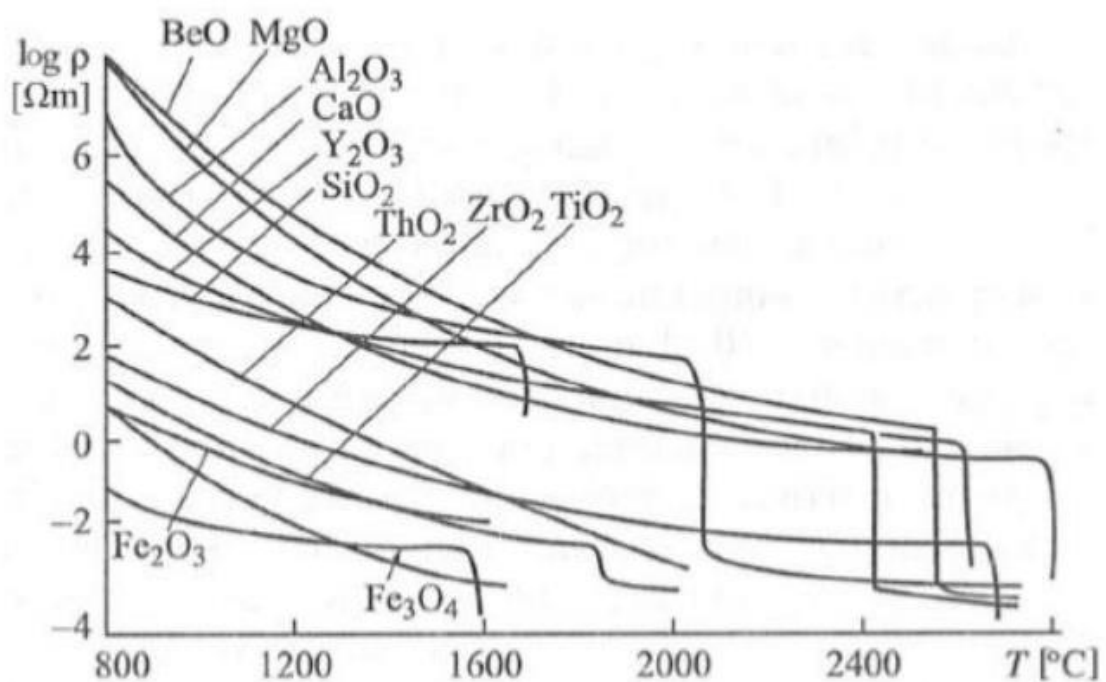
Přímé předání tepelného výkonu vsázce se provádí nejčastěji plynovým hořákem. Rozdíl od předchozích dvou metod je ten, že se vsázka ohřívá externím zdrojem před samotnou tavnou elektromagnetickou indukci. Používá se nejčastěji při tavení skla, kdy se pomocí hořáku roztaví skleněný materiál a jakmile sklo dosáhne teploty, při které v něm začnou vznikat vířivé proudy, můžeme externí zdroj tepla vypnout.[7]

Koncentrované světelné záření

Díky využití koncentrovaného paprsku z laserových systémů je tento proces velmi složitý na realizaci, ale vyznačuje se vysokou čistotou procesu.[7]

3.4. Tavení skel

Samotné tavení nastává po úspěšném splnění startovací fáze. S rostoucí teplotou se zvyšuje elektrická vodivost taveného materiálu a díky tomuto jevu dochází ke zvyšování odběru elektrického proudu a tím se zvýší i dodaný výkon. V obr. 3.4 jsou vidět závislosti měrných odporů různých materiálů na teplotě. V případě skla, které má vysoký bod tání a nízkou elektrickou vodivost při nízkých teplotách, je nejlepší možností využití „skull-melting“ tavení. Při „skull-melting“ tavení se využívají vyšší frekvence, než při tavení elektricky vodivých materiálů. Frekvence se pohybuje v jednotkách MHz. Vlivem intenzivního chlazení kelímku se vytváří ztuhlá vrstva „skull“, která obklopí tavený materiál a zabraňuje mu v kontaktu se dnem a stěnami kelímku, čímž zabraňuje možné kontaminaci taveniny. Tato „skull“ vrstva dále představuje v kelímku jak tepelný tak elektrický izolant. Jednak jeho teplota nepřesáhne řádově 200 °C a zabraňuje nežádoucímu odvodu tepla z taveniny do kelímku, ale také chrání kelímek před možnými zkraty. [9]



Obr.3.4. - závislost měrného odporu materiálů na teplotě[10]

3.4.1. Vitrifikace [9]

Jedna z možností uplatnění studeného kelímku při tavení skla je vitrifikace. Vitrifikace se využívá pro zatavování materiálů do skla, nejčastěji pro zatavování jaderného odpadu, jelikož jaderný odpad je pro nás v dnešní době velmi citlivé téma. Snažíme se ho co nejefektivněji uskladnit a za předpokladu, že jaderný odpad má dlouhou dobu rozpadu (izotop uranu ^{235}U 710 milionů let, Neptunium ^{237}Np jenž je obsaženo v jaderném palivu 2,14 miliónu let) je pro nás nutné uschovat a zabezpečit tento odpad po celé generace.

Historie vitrifikace

V 50. letech 20. století ve Francii komise pro atomovou energii CEA určila vhodný materiál pro uskladnění jaderného odpadu a tím bylo borosilikátové sklo. V roce 1968 vznikl projekt PIVER a byl založen první prototyp vitrifikačního systému pro radioaktivní odpady. CEA soustředila vývoj na hledání skla pro uskladnění jaderného odpadu z tlakovodních reaktorů a našla potřebnou skladbu skla s označením R7T7 (SiO_2 47.2%, B_2O_3 14.9%, Al_2O_3 4.4%, CaO 4.1%, Na_2O 10.6%, ostatní 18.8%), spolu s Francií pracovali na vyvinutí skla i Spojené státy, Německo, Belgie, Japonsko a Rusko. Všechny státy kromě Ruska měli za základní složku borosilikátové sklo. Rusko šlo cestou fosfátového skla, které je sice agresivnější vůči kovovým materiálům, ale má nižší teplotu tání a dokáže pojmout větší procentuální množství odpadu.

Princip vitrifikace

Do roztaveného skla se vloží vitrifikovaný materiál. Tato směs dvou materiálů se nechá rychle vychladnout a tím vznikne skelná matrice. Tato skelná matrice s jaderným obsahem má několik výhodných vlastností a to velkou chemickou odolnost, nehořlavost, vysokou mechanickou pevnost, odolnost proti radiaci, odolnost proti korozi, a žáruvzdornost.

Vlastní proces vitrifikace

Proces vitrifikace probíhá ve dvou fázích

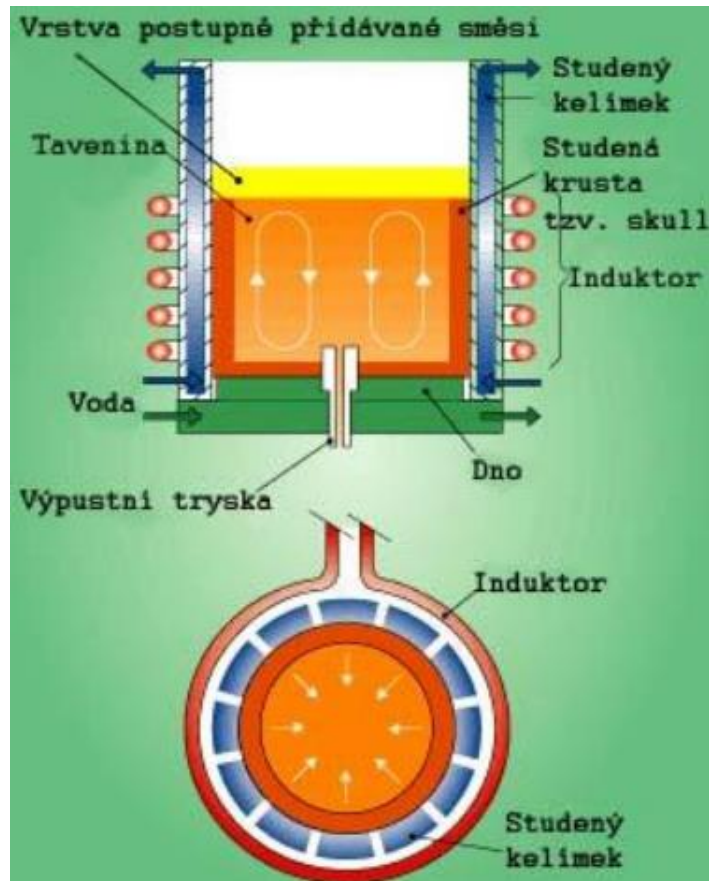
- Kalcinace
- Samotná vitrifikace

Kalcinace

Kalcinace probíhá v zařízení zvaném kalcinátor, který je ohříván za pomoci rotačních odporových pecí. Samotná kalcinace probíhá při teplotě kolem 400 °C, při tomto procesu se z tekutého odpadu odstraňuje především voda a většina solí se rozkládá na oxidy. Aby se zabránilo přilepování odpadu na stěny kalcinátoru, je před procesem přidáván dusičnan hlinitý. Poté co odpad projde kalcinačním procesem je kalcinát spolu se skelnou hmotou přiveden do indukční pece. Poměr kalcinátu a skelné hmoty je přesně 82% skelné hmoty a 18% kalcinátu.

Samotná vitrifikace

K vitrifikaci za pomoci indukčního ohřevu lze použít indukční pec nebo technologii studeného kelímku. Při využití technologie studeného kelímku jsme schopni díky „skull“ vrstvě dosáhnout vyšších teplot a tím pádem i možnosti tavení vyššího množství materiálů než u obyčejné indukční pece, která není dimenzovaná na tak vysoké teploty. Další výhodou studeného kelímku je dosažení vyšší čistoty výsledného produktu. Po přivedení sloučené hmoty do tavicí jednotky se zataví odpad do skla, postupně je přidáván další materiál a na povrchu taveniny se vytvoří vrstva, která zabraňuje přístupu vzduchu k tavenině a díky tomu je zamezeno hoření těkavých látek. Spojený materiál je poté odveden výpustní tryskou do předem připravených nádob, po jejich vychladnutí jsou uskladněny do takzvaných „Patron“.



Obr 3.5 - Studený kelímek[9]

4. Numerický model pro řešení elektromagnetického pole studeného kelímku pro ohřev skla

Z důvodu složitosti návrhu studeného kelímku, jelikož se jedná o silně sdruženou úlohu, tak jsme nuceni odstoupit od analytického řešení, které je téměř nemožné řešit a přejít k řešení pomocí numerických výpočtů. V dnešní době jsou tyto výpočty vzhledem k rostoucímu vývoji ve výpočetní technice snadno dostupné. Za pomoci výpočetní techniky a metody konečných prvků jsme schopni samotný výpočet zrealizovat.

4.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (MKP) je obecná numerická metoda, která se využívá k řešení celé řady úloh. V dnešní době se řadí mezi jeden z nejpoužívanějších výpočetních nástrojů. Kromě problémů mechaniky se běžně využívá pro úlohy vedení tepla, modelování proudění tekutin nebo k analýze elektromagnetických polí a podobně. Oblibu tato metoda získala díky poměrně velké univerzálnosti a schopnosti popsat i značně komplikované a rozsáhlé problémy. Nevýhodou této metody je poměrně velká výpočetní náročnost. MKP vyžaduje rozdělení řešené

oblasti na konečný počet podoblastí - prvků. Tudiž je třeba na modelu tělesa vytvořit síť konečných prvků (Mesh). Po vytvoření sítě prvků vznikají uzly. Uzly těchto sítí jsou body, v nichž hledáme neznámé parametry řešení. Kvalita výsledků je poté odvozena od hustoty a topologie prvků sítě. Výpočty hodnot se provádějí pomocí diferenciálních rovnic popisujících vlastnosti daného systému. Počet diferenciálních rovnic se mění se složitostí geometrie řešeného problému, tudíž pro jednoduchou geometrii, je počet rovnic ve srovnání s rovnicemi pro složitý objekt velmi malý. Principiálně se diferenciální rovnice nahrazují diferencemi a z tohoto důvodu se převádějí na soustavy algebraických rovnic popisující celý řešený problém. Počet těchto rovnic může dosahovat více než miliony rovnic.[11]

4.2 Obecná tvorba modelu

Pro tvorbu modelu je vhodné použít software ANSYS, nicméně existuje velké množství softwarů, které využívají metodu konečných prvků (ABAQUS, Cosmos, MSC software – Adams, Nastran, Patran, Marc). Za pomoci softwaru ANSYS jsme byli schopni nasimulovat daný problém studeného kelímku. Tvorba modelu je rozdělena do několika částí:

- Definice problému
- Pre-processing
- Zadání materiálových vlastností
- Tvorba sítě pro MKP
- Solution
- Post-processing

Definice problému

V první řadě je třeba si uvědomit, jaký typ výpočtu budeme provádět. Je třeba se rozhodnout, jaký bude mít úloha charakter a tím určit kvalitu MKP, která se odvíjí od zvolených parametrů modelu, okrajových podmínek a materiálových vlastností modelu.

Pre-processing

Po nadefinování problému a stanovení všech potřebných vlastností řešené úlohy přecházíme do pre-processingu. V této části vytváříme geometrii modelu. Geometrii nejsme nuceni dělat výhradně prostřednictvím programu ANSYS, ale je možno využít i jiné programy pro vytváření 2D či 3D modelů.

Zadání materiálových vlastností

Po vytvoření kompletní geometrie řešeného problému, jsme schopni jednotlivým oblastem přiřadit jejich materiálové vlastnosti. Materiálové vlastnosti můžeme buďto vkládat jako konstanty nebo jako závislosti za pomoci tabulek. V této části je velmi nutné zadat i správnou hodnotu „typu elementu“, který je nedílnou součástí správného výpočtu.

Tvorba sítě pro MKP

Program ANSYS umožňuje několik možností pro vytvoření sítě, je důležité stanovit si počet elementů tak, aby se splnily jednotlivé podmínky, které od výpočtu očekáváme, a to je například přesnost výpočtu. Nejvýhodnější rozdělení sítě pro naše účely je uvažovat vhodnou síť v místech, kde budeme chtít přesnější výsledky výpočtu a vhodnou hrubost sítě v místech, kde není třeba daný problém řešit, například okolí.

Solution

Po splnění všech předchozích kroků dochází k téměř finálnímu kroku a to je zvolení typu analýzy, stanovení přesnosti a spuštění výpočtu modelu.

Post-processing

V této části, kdy je model spočten, jsme schopni graficky zobrazovat výsledky a vyhodnocovat vyřešenou úlohu a v neposlední řadě ukládat námi vykreslené výsledky.

5. Matematický model studeného kelímku

V praktické části diplomové práce je řešen model studeného kelímku pro vitrifikaci jaderného odpadu. Model kelímku je založen na skutečném kelímku, jenž je umístěn ve francouzské jaderné elektrárně Marcoule. Tento typ kelímku je v jaderné elektrárně Marcoule nejdéle a má odpracováno více než 5000 hodin a je používán zejména pro vitrifikaci za pomoci skla „R7T7“. Kvůli složitosti výpočtu, byl použit software ANSYS, díky kterému se stalo řešení reálné. Program ANSYS má dvě varianty pro vytvoření modelu a jeho následné řešení. První možnost je zvolit grafické rozhraní, které je vhodnější spíše pro méně geometricky náročné úlohy. Druhá možnost je využít programovací jazyk softwaru ANSYS s názvem APDL (ANSYS Parametric Design Language). Pro řešení praktické části byla zvolena metoda s využitím jazyka APDL kvůli větší složitosti řešeného problému.[13]

5.1. Definování problému

Řešen bude studený kelímek, jak již bylo zmíněno dříve, který pracuje na jaderné elektrárně Marcoule. Tento kelímek bude namodelován v programu ANSYS za pomoci jazyka APDL. Reálný studený kelímek je vidět na *obr. 5.1*. Tento kelímek je dále namodelován a jsou zde porovnány dvě varianty řešení a to varianta s elektricky nevodivým dnem a elektricky vodivým dnem. Tento kelímek má 48 chladicích segmentů z korozi-vzdorné oceli. Zadaný kelímek měří 55 cm v průměru a je o výšce 70 cm. Výška tavící vsázky byla stanovena na 45 cm a použitý tavený materiál je sklo „R7T7“. Model byl pro zjednodušení namodelován pro 1 segment a efektivní hodnota proudu protékajícího závitů byla stanovena na $I_{ef} = 1500 \text{ A}$ při frekvenci $f = 280 \text{ kHz}$.



Obr. 5.1 - Modelovaný Studený kelímek[14]

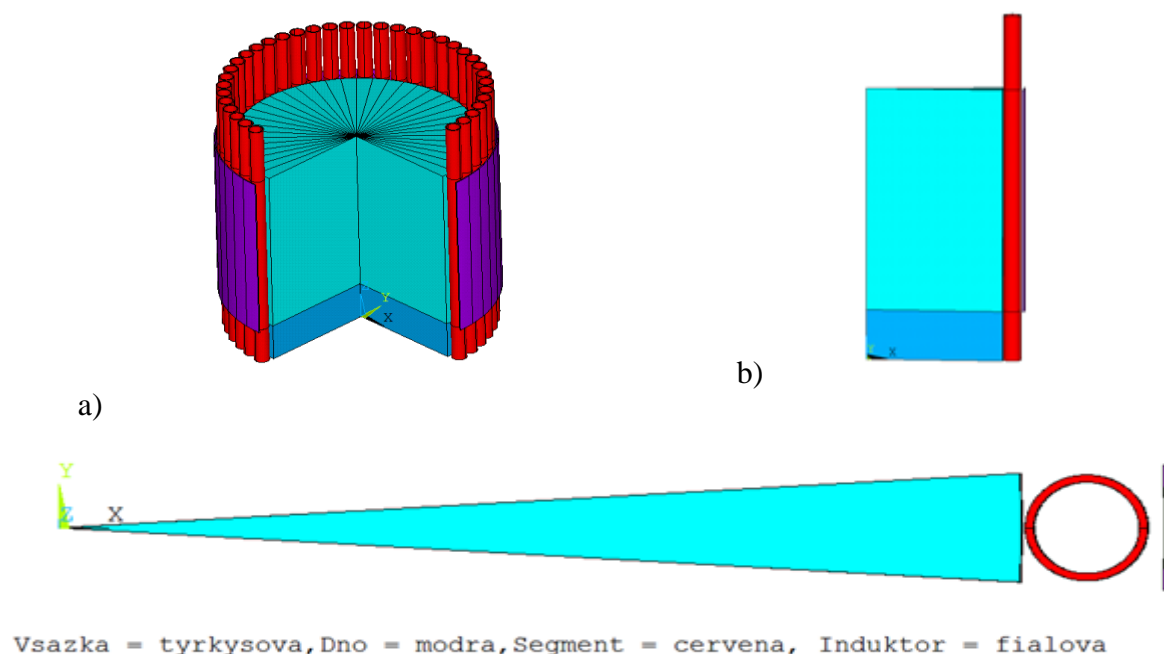
5.2. Vytvoření geometrie

Parametry pro vytvoření geometrie, byly zmíněny výše.

Tab. 5.1 - Rozměry pro geometrii kelímku

| Oblast | Rozměr |
|----------------|---------|
| Poloměr vsázky | 0.275 m |
| Výška vsázky | 0.7 m |
| Výška dna | 0.1 m |
| Výška vsázky | 0.45 m |
| Počet segmentů | 48 m |
| Okolí | 6 m |

Další parametry pro správné vytvoření geometrie nejsou pevně dané a dopočítávají se spolu s programem. Při vytváření geometrie jsem postupoval od oblasti segmentu, dále dna, vsázky, induktoru a následně vše ohraničil 6 m okolím. Při volbě tloušťky segmentu a induktoru jsem vycházel z předpokladu, že 98% Joulových ztrát vznikne ve vrstvě o tloušťce $3 \cdot$ hloubka vniku. Jako tavený materiál je zvoleno sklo, které má při dané frekvenci $f = 280$ kHz a při teplotě 2000 °C hloubku vniku $h_{vv} = 0.23$ m. Kvůli tomu je třeba využít hloubky vniku segmentu, aniž by bylo docíleno zkreslení výsledů.



c)

Obr.5.2 - 2 a) 3/4 studeného kelímku b) boční pohled c) pohled seshora

5.3. Materiálové parametry

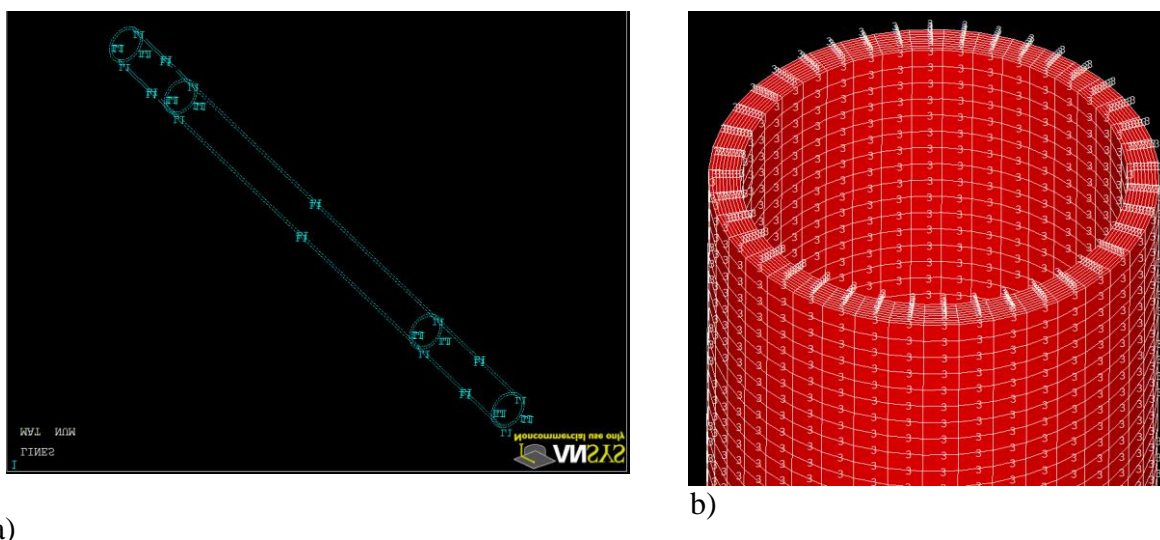
Poté co se vytvoří geometrie, je vhodné do příslušných oblastí zadat jejich materiálové konstanty viz tabulka 5.2.

Tab. 5.2 - Materiálové parametry

| Oblast | materiál | μ_r [-] | Rezistivita [$\Omega \cdot m$] |
|--------------|--------------------|-------------|----------------------------------|
| Dno vodivé | Korozivzdorná ocel | 1 | 72E-08 |
| Dno nevodivé | Keramika | 1 | - |
| Vsázka | R7T7 | 1 | 0.06 |
| Segment | Korozivzdorná ocel | 1 | 72E-08 |
| Induktor | Měď | 1 | 1,75E-08 |
| Okolí | Vzduch | 1 | - |

5.4. Tvorba sítě elementů – mesh

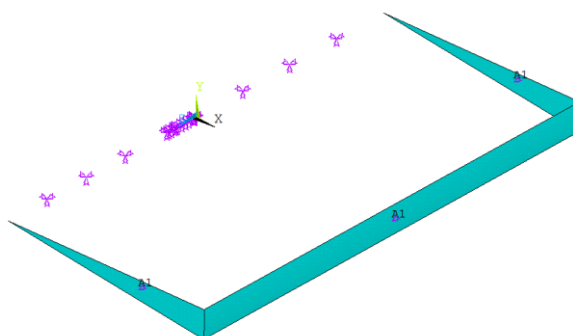
Díky zjednodušení, které nám poskytuje asymetrie, máme výhodu v tom, že nemusíme meshovat celý objekt ale pouze jeho čtyřiceti osminu. Další možnost omezení počtu elementů je nenastavovat jemnou síť v místech kde neočekáváme žádné výsledky a je možnost v těchto místech tedy volit poměrně hrubou síť. Při samotném nastavování meshe lze postupovat několika způsoby v mé diplomové práci jsem se vydal cestou rozdělování hran oblastí. Každá oblast, která je vytvořena v programu ANSYS je složena z ploch a ty následně z hran. Hrany jsou rozděleny na jednotlivé části, což nám umožňuje korigovat velikost meshe a tak výsledný počet elementů. V mém modelu byly postupně rozděleny všechny hrany dle potřeby a následně vymeshovány.



Obr.5.3 - a) rozdělení hran meshe v segmentu b) vymeshovaný segment

5.5.Samotný výpočet

Po vymeshování celého objektu je třeba přejít k řešení. Než bude objekt vyřešen, je třeba nastavit několik okrajových podmínek a to vložení proudu do induktoru, následně je nastavena hodnota nulového potenciál ($\varphi=0$) na bočních stranách vsázky a na opačné ploše induktoru než je vložen proud. V neposlední řadě nastavit okrajové podmínky ($A=0$) na plochách obálky vsázky a na ose symetrie.



Obr. 5.4 - Nastavení okrajových podmínek $A = 0$

6. Výsledky modelování

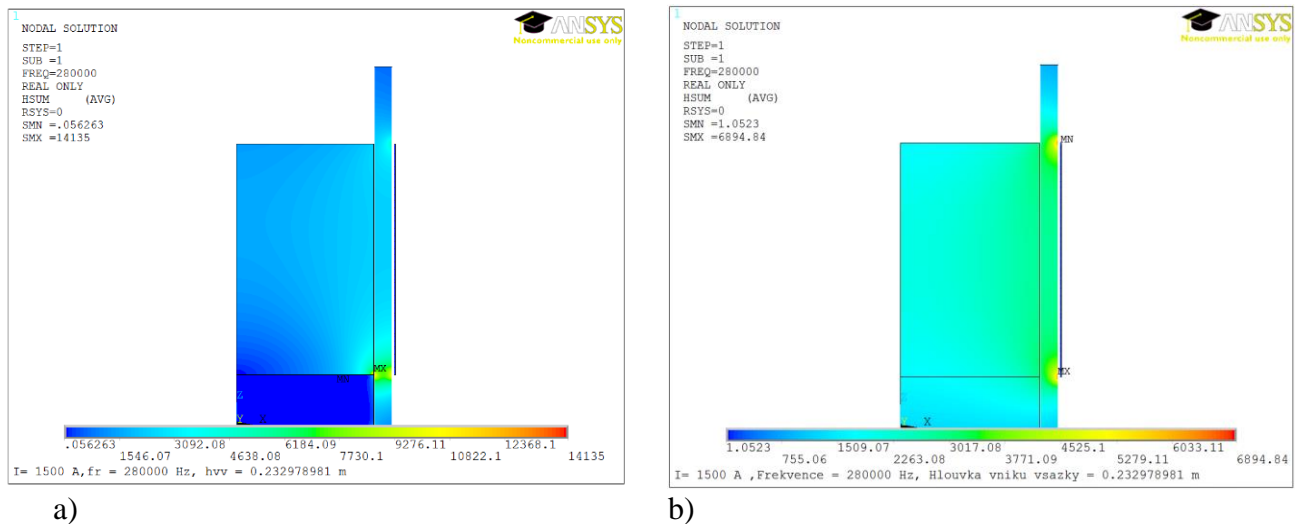
Po vymodelování jsem za pomoci programu ANSYS stanovil velikost ztrát v kelímku (ve všech jeho částech) a to jak pro kelímek s vodivým dnem tak pro kelímek s nevodivým dnem. Dále jsou zde graficky porovnány velikosti proudové hustoty, rozložení intenzit magnetického pole a Joulovy ztráty.

6.1. Grafické porovnání

V této části jsou graficky porovnány výsledky modelování v programu ANSYS.

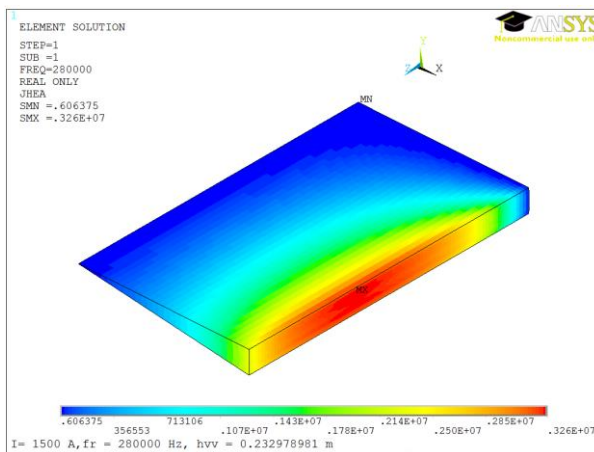
6.1.2. Rozložení intenzity magnetického pole

V *obr. 6.1* je znázorněna intenzita magnetického pole z obrázku je patrné, že při použití kelímku

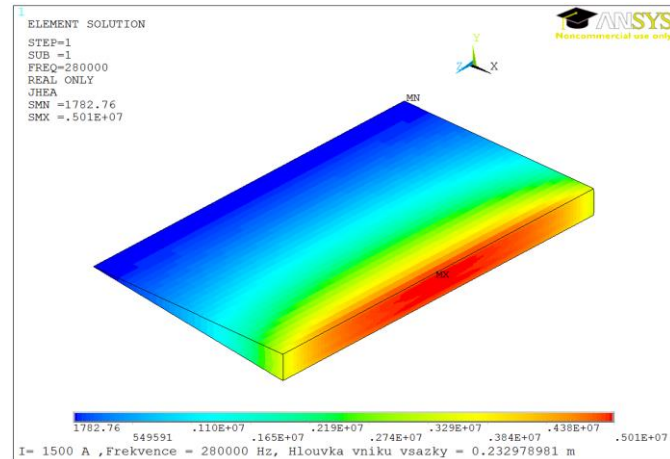


Obr.6.1 - rozložení intenzity magnetického pole [A/m] a) el. vodivé dno b) el. nevodivé dno
 s nevodivým dnem je intenzita magnetického pole rozložena stejnoměrně, kdežto při uvažování kelímku s vodivým dnem je intenzita magnetického pole na spodní části vsázky až třikrát větší.

6.1.3. Rozložení Jouleových ztrát



a)

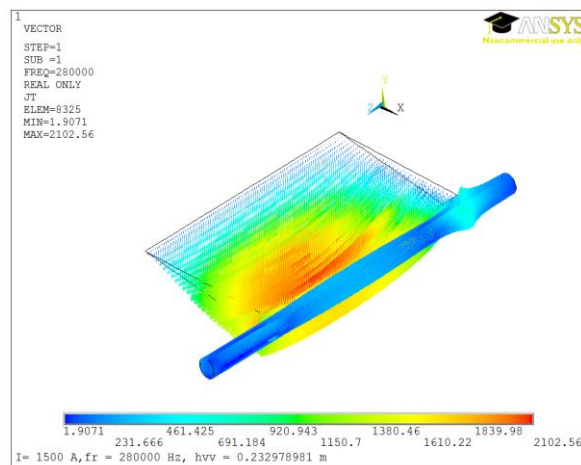


b)

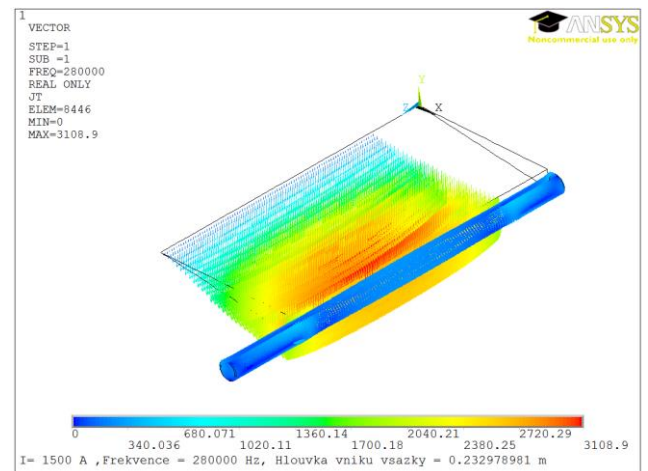
Obr.6.2 - Rozložení Jouleových ztrát [W/m^3] a) el. vodivé dno b) el. nevodivé dno

Z rozložení Jouleových ztrát na obr 6.2, jak jsme mohli očekávat je vidět, že při použití vodivého dna nebudou Jouleovy ztráty ve vsázce rovnoměrné na rozdíl od ztrát v kelímku s nevodivým dnem. Největších ztrát se dočkáme na okraji vsázky a postupně budou hodnoty slábnout, se vzrůstající vzdáleností od okraje vsázky a toto platí v obou případech.

6.1.3. Rozložení vektorů proudové hustoty

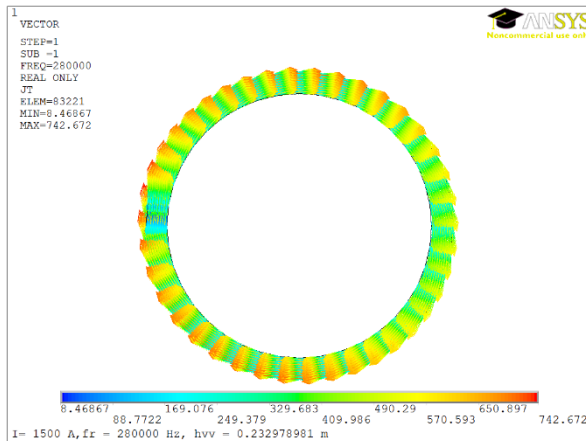


a)

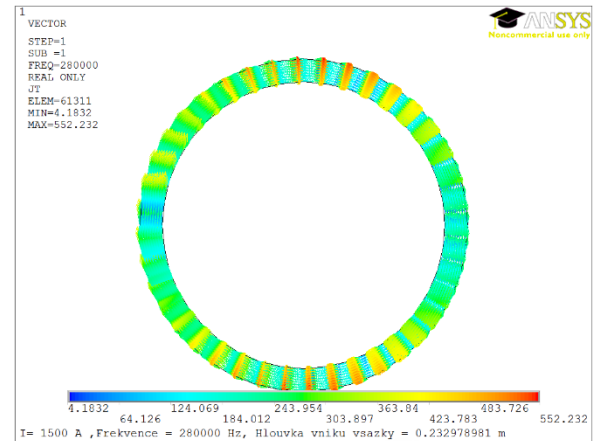


b)

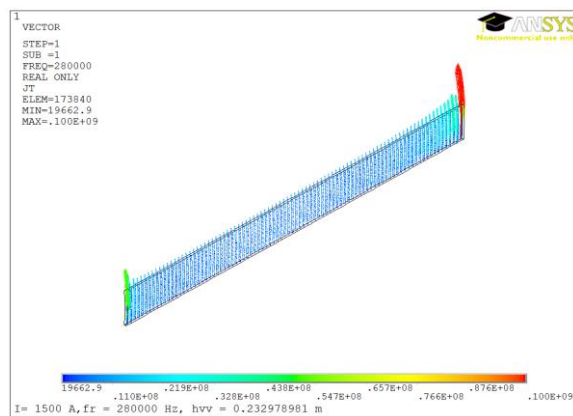
Obr.6.3 - Rozložení proudové hustoty [A/m^2] a) el. vodivé dno b) el. nevodivé dno



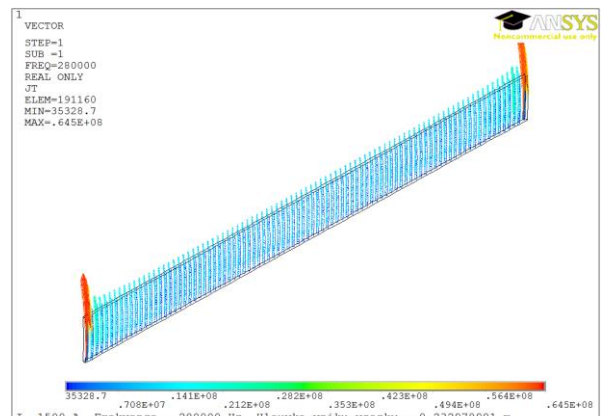
a)



b)

Obr. 6.4 - Rozložení proudové hustoty v segmentu [A/m^2] a) el. vodivé dno b) el. nevodivé dno

a)



b)

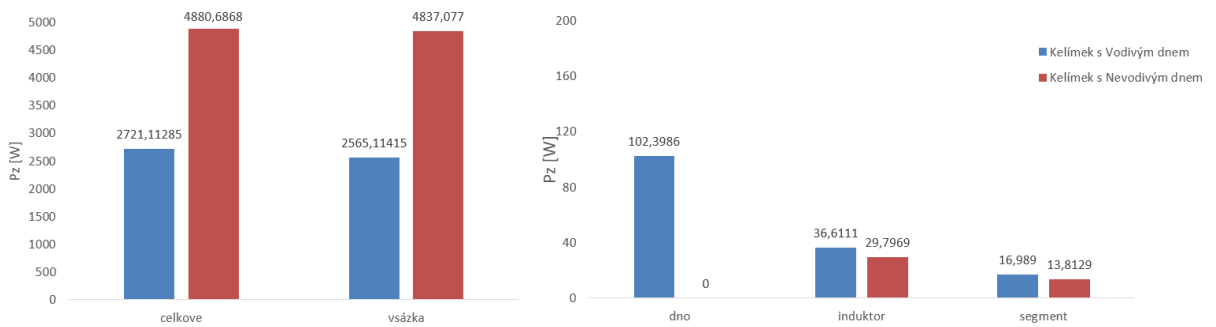
Obr. 6.5 - Rozložení proudové hustoty v induktoru [A/m^2] a) el. vodivé dno b) el. nevodivé dno

Na obr. 6.3, 6.4 a 6.5 je zachyceno rozložení proudové hustoty ve vsázce, segmentu a induktoru, z výsledných hodnot je patrné, že největší proudová hustota je obsažena v induktoru. Z tohoto důvodu byly vykresleny oblasti zvlášť, jelikož velká hodnota, jenž je obsažena v induktoru by barevně pozměnila schéma a hodnoty v segmentu a vsázce by nebyli znatelné.

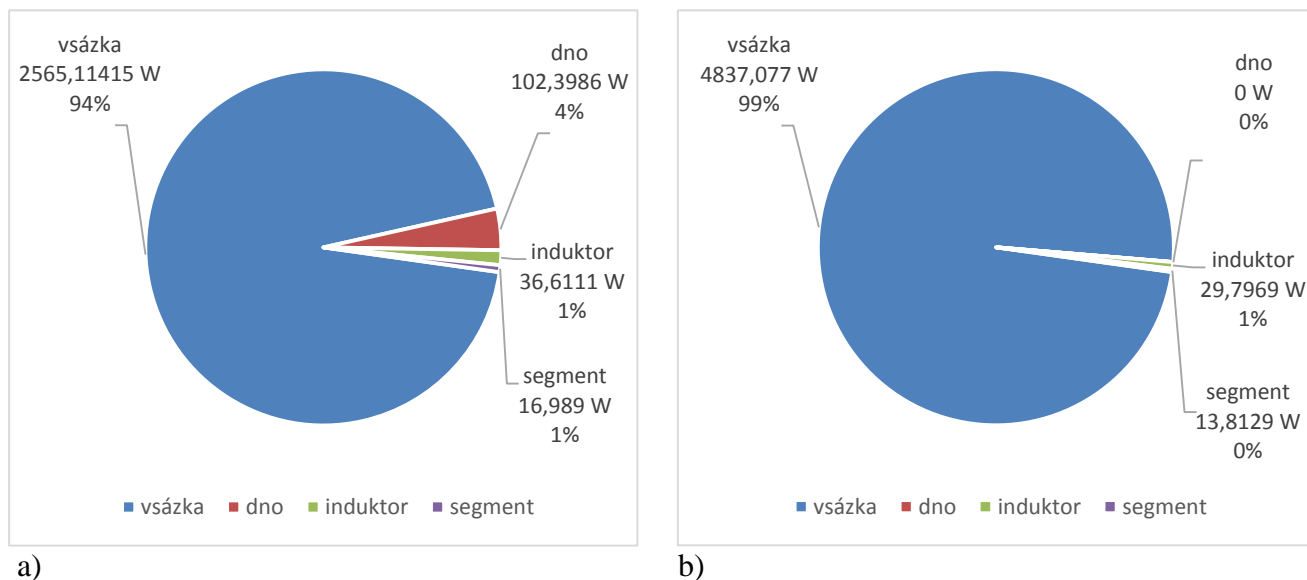
6.2 Ztráty ve Studeném kelímku

Z grafu na obr. 6.6 lze vidět rozložení ztrát v jednotlivých oblastech modelu. V grafu jsou porovnány hodnoty zjištěné pro uvažování vodivého i nevodivého dna. Dále na obr. 6.7 jsou tyto ztráty jednotlivě rozepsány a procentuálně vyhodnoceny. Z grafů si lze povšimnout, že při uvažování vodivého dna se ve vsázce ztráty sníží téměř o polovinu. Toto

snížení je docíleno rozložením proudové hustoty ve vsázce, která je znázorněna na *obr.6.3*, důvodem je odstínění vsázky díky vodivému dnu a to vede k menším ztrátám.



Obr. 6.6 – Porovnání ztrát ve studeném kelímku s el. vodivým a el. nevodivým dnem



Obr. 6.7 – Porovnání ztrát a) el. vodivé dno b) el. nevodivé dno

Při podrobnějším zkoumání zjistíme, že při uvažování nevodivého dna jsou téměř prakticky všechny ztráty ve vsázce. Ve dnu nic nevzniká a ztráty v segmentu a induktoru jsou téměř zanedbatelné. Jak je vidět z grafu na *obr. 6.7 b* nám 99% celkových ztrát vzniká ve vsázce při uvažování nevodivého dna. Při uvažování dna vodivého je to 94 % celkových ztrát ve vsázce a 4% ztrát ve vodivém dnu. (Celkové ztráty jsou zobrazeny v *obr 8.1* v příloze).

7. Závěr

Cílem práce bylo pochopit a následně namodelovat studený kelímek při tavení skla a to díky výpočetním programem ANSYS. Práce byla rozdělena na dvě části, a to na část teoretickou a část praktickou. V první teoretické části jsem popsal problematika sdílení tepla, indukčního ohřevu a teorie týkající se problematiky studeného kelímku s důrazem na jeho použití při tavení skla. Stručně jsem zde nastínil zákony pro sálání, vedení a proudění. Dále byly popsány Maxwellovy rovnice pro odvození vlnových rovnic a s tím spojená teorie indukčního ohřevu. Konec teoretické části jsem věnoval problematice studeného kelímku a jeho využití při tavení skla. Vyzdvihnuto bylo využití při vitrifikaci jaderných odpadů.

Ve druhé části této diplomové práce jsem se zabýval modelováním studeného kelímku programem ANSYS. V této části jsem se nejprve zabýval obecnou metodou pro tvorbu 3D modelu. Tento postup byl následně aplikován na zadanou úlohu namodelování studeného kelímku. Zmíněný model kelímku taví sklo typu „R7T7“ a je využíván pro vitrifikace odpadů ve francouzské jaderné elektrárně Marcoule. Kelímek byl namodelován s předpokladem, že bude bráno v potaz vodivé i nevodivé dno. Kelímek má rozměr 55cm v průměru a 70 cm na výšku, přičemž výška tavné hmoty může dosáhnout maximální hodnoty 45 cm. Při modelování bylo nutné zvážit několik zjednodušujících opatření pro modelovaný objekt z důvodu menších komplikací při řešení a problém se tedy mohl řešit na hardwarově nenáročném zařízení.

Výsledky modelování nám ukazují rozložení intenzity magnetického pole v modelu (obr. 6.1). Dále byly vyobrazeny Jouleovy ztráty (obr. 6.2) a rozložení proudové hustoty v modelu (obr. 6.3, 6.4, 6.5). Následně byly určeny ztráty, které se vytváří ve všech oblastech modelu. Z výsledku modelování jsme schopni říci, že se až 94% ztrát u varianty s vodivým dnem vyskytuje ve vsázce. Tato hodnota je velmi vysoká, zvláště v porovnání s jinými indukčními ohřevy, kde se účinnost pohybuje kolem 45%. Nicméně v praxi je tato hodnota reálná. Při použití nevodivého dna je účinnost o poznání vyšší, jelikož jsou odstraněny ztráty ve vodivém dnu a dno nestíní. Bohužel stejného výsledku za reálných podmínek nejsme schopni dosáhnout, jelikož uvažované keramické dno se používá pro tavicí teploty kolem 1300 °C a tato práce počítá s teplotu 2000 °C. V těchto teplotách, jakožto i pro tavení skla je vhodnější využít kelímek z korozi-vzdorné oceli.

8. Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha: Academia, 1979. 319 s.
- [2] 2.11 SNELLŮV ZÁKON [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0211.htm>
- [3]2.4 STEFANŮV - BOLTZMANNŮV ZÁKON [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0204.htm>
- [4]2.3 WIENŮV POSUNOVACÍ ZÁKON[online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0203.htm>
- [5]HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [6] 2.2 PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0202.htm>
- [7] JIŘINEC, S. Přenos elektrické energie do vsázky při tavení ve studeném kelímku. Plzeň, 2014, 49 s. SDZ. ZČU, Fakulta elektrotechnická.
- [8] JANDA, M. Přednosti tavení materiálů elektromagnetickou indukci ve studeném kelímku. Plzeň, 2011. 60 s. Diplomová práce. ZČU, Fakulta elektrotechnická.
- [9] Ruther, T. Vitřifikace s využitím technologie indukčního ohřevu. Plzeň, 2012. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Ing. David Rot, Ph. D.
- [10] [SINGER, Michal. 2012. *Skull-Melting jako metoda tavení materiálů*. Plzeň. Dostupné také z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2778/BP_Singer_2012.pdf?sequence=1. Bakalářská]
- [11] Metoda konečných pvků. [online] Dostupné z : http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [12]*Optika* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.fyzika.webz.cz/index.php?clanek=9>
- [13] ANSYS Modeling and Meshing Guide. ANSYS Release 10.0.002184.
- [14]JOUAN, A., R. DO QUANG a S. MERLIN. *INDUSTRIAL WASTE VITRIFICATION USING THE COLD CRUCIBLE MELTER* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.wmsym.org/archives/1998/html/sess57/57-03/57-03.htm>

Použitý software

ANSYS v14.0

Přílohy:

1. Část programu v jazyce APDL bez zobrazení výsledků:

```

finish *set,rs,((dok/ps)-vmms)/2
/CLEAR,NOSTART ! Clear model since no *set,vd,0.1! výška dna
SAVE found ! Vymaže repracovanou úlohu *set,vpre,0.15! výška nad vsázkou
/PLOPTS,DATE,0 *set,vvs,vk-vpre! polomer segmentu vnitřní
/filename,kelimek,0 ! nazev souboru *set,vind,vvs! výška induktru
/units,si *set,tvs,0.275! tloušťka vsazky
*set,pi,3.141592654 ! nastavení pi *set,umss,360/ps! uhel mezi stredy segmentu - vypocita se
*set,fr,280000! nastavení frekvence *set,vhi,tvs+0.001+rs+rs+vzdi+tli! vnejsi hrana induktoru
*set,pr,1500! nastavení proudu *set,vni,tvs+0.001+rs+rs+vzdi ! vnitřni hrana induktoru
*set,uri,1 ! nastavení relativní permeability induktoru *set,rkon,vhi+0.001 ! hrana pro okoli za induktorem
*set,urs,1 ! nastavení relativní permeability segmentu *set,gev,90
*set,urv,1 ! nastavení relativní permeability vsázky /PREP7
*set,u0,4*pi*1e-7 ! nastavení permeability vakua /units,si
*set,ri,1/57e6 ! nastavení rezistivity induktoru - med CYLIND,rs-tls,rs,0,vd,0,180, ! segmenty-spodni cast-prava
*set,rs,72e-8! nastavení rezistivity segmentu - nerez ocel CYLIND,rs-tls,rs,0,vd,180,360, ! segmenty-spodni cast-leva
*set,rv,0.06! nastavení rezistivity vsazky - sklo R7T7 (2000) CYLIND,rs-tls,rs,vd,vvs,0,180, ! segmenty - horni cast-prava
*set,rdn,72e-8 CYLIND,rs-tls,rs,vd,vvs,180,360,! segmenty - horni cast-leva
*set,hvs,sqrt(2/(2*pi*fr*(1/rs)*urs*u0)) ! nastavení hloubky vniku pro segment CYLIND,rs-tls,rs,vvs,vs+vd,0,180, ! segmenty - horni cast-prava
*set,hvv,sqrt(2/(2*pi*fr*(1/rv)*urs*u0)) ! nastavení hloubky vniku pro vsazku CYLIND,rs-tls,rs,vvs,vs+vd,180,360, ! segmenty - horni cast-leva
*set,hvi,sqrt(2/(2*pi*fr*(1/ri)*uri*u0)) ! nastavení hloubky vniku pro induktor VGEN,,all,,tvs+0.001+rs,0,0,,1 ! posunuti segmentu na pozici
CYLIND,tvs,vni-0.001,0,vd,-umss/2,umss/2
*set,prv,2*pi ! nasobek hloubky vniku pro stanoveni proudove vrstvy CYLIND,tvs,vni-0.001,vd, vvs, -umss/2,umss/2
CYLIND,tvs,vni-0.001,vvs,vd+vs, -umss/2,umss/2
CYLIND,0,tvs,0, vd,-umss/2,umss/2
CYLIND,0,tvs,vd,vvs,-umss/2,umss/2
CYLIND,0,tvs,vvs,vd+vs,-umss/2, umss/2 !
CYLIND,0,tvs,vd+vs,vd+1.5*vs,-umss/2, umss/2 !
CYLIND,tvs,vni-0.001,0,vd, -umss/2,umss/2
CYLIND,vni-0.001,vni,0,vd,-umss/2,umss/2
CYLIND,vni,vhi,0,vd,-umss/2,umss/2
CYLIND,vhi,vhi+0.001,0,vd,-umss/2,umss/2
CYLIND,vni, vhi,vd, vind,-umss/2, umss/2

```



```

CYLIND,vni-0.001 ,vni,vd,vind,-umss/2,umss/2          et,5,97,0 ! vzduch
CYLIND,vhi,vhi+0.001,vd,vind,-umss/2,umss/2          mp,murx,5,1
CYLIND,vni,      vhi,vind,vd+vs,-umss/2,umss/2 ! induktor  allsel,all
CYLIND,vni-0.001, vni,vind,vd+vs,-umss/2,umss/2 ! induktor  vsel,u,mat,,1,4
CYLIND,vhi,vhi+0.001,vind,vd+vs, -umss/2,umss/2! induktor  vatt,5,,5
CYLIND,tvs,vni-0.001,vd+vs, vd+1.5*vs,-umss/2,      umss/2  allsel,all
CYLIND,vni-0.001,vni,vd+vs,vd+1.5*vs,-umss/2,      umss/2  /title,I= %pr% A , fr=%fr% Hz, Hloubka vniku vsazka = %hvs%
m
CYLIND,vni,vhi,vd+vs,vd+1.5*vs,-umss/2,umss/2      /PNUM,MAT,1! barevne odlisi pouzite materialy
CYLIND,vhi,vhi+0.001,vd+vs,vd+1.5*vs,-umss/2,      umss/2  /REPLOT
CYLIND, 0,6,      -6,6,-umss/2,umss/2!okoli          SAVE,kelimekgeometrie,db
allsel,all      !
VOVLAP,all      ! spojíni vsech oblasti
ALLSEL,ALL      ! vybere vše
numcmp,all
et,1,97,1      ! vsazka
mp,murx,1,1      ! vsazka
mp,rsvx,1,rv      ! vsazka
vsel,s,,7
vatt,1,,1
et,2,97,1      ! induktor
mp,murx,2,1      ! induktor
mp,rsvx,2,ri      ! induktor
vsel,s,,16
vatt,2,,2
et,3,97,1      ! segment
mp,murx,3,1      ! segment
mp,rsvx,3,rs      ! segment
vsel,s,,1
vsel,a,,9,11
vsel,a,,18,19
vatt,3,,3
et,4,97,1      ! dno
mp,murx,4,1
mp,rsvx,4,rdn      !
vsel,s,,5
vatt,4,,4

```

| | |
|-----------------------|-------------------------|
| lsel,s,loc,z,vd | lsel,u,loc,z,-6,0 |
| lsel,r,loc,y,umss/2 | CSYS,0 |
| lsel,u,loc,x,tvs,6 | lesize,all,,gev,,,,,1 |
| CSYS,0 | CSYS,1 |
| lesize,all,,30,,,,,1 | lsel,s,loc,x,tvs |
| CSYS,1 | lsel,r,loc,z,vvs |
| lsel,s,loc,z,vd | lsel,r,loc,y,0 |
| lsel,r,loc,y,-umss/2 | CSYS,0 |
| lsel,u,loc,x,tvs,6 | lesize,all,,30,,,,,1 |
| CSYS,0 | CSYS,1 |
| lesize,all,,30,,,,,1 | lsel,s,loc,z,vvs |
| CSYS,1 | lsel,r,loc,x,0,tvs |
| lsel,s,loc,z,0 | lsel,u,loc,x,tvs |
| lsel,r,loc,y,umss/2 | lsel,r,loc,y,umss/2 |
| lsel,u,loc,x,tvs,6 | CSYS,0 |
| CSYS,0 | lesize,all,,30,,,,,1 |
| lesize,all,,30,,,,,1 | CSYS,1 lsel,s,loc,z,vvs |
| CSYS,1 | lsel,r,loc,x,0,tvs |
| lsel,s,loc,z,0 | lsel,u,loc,x,tvs |
| lsel,r,loc,y,-umss/2 | lsel,r,loc,y,-umss/2 |
| lsel,u,loc,x,tvs,6 | CSYS,0 |
| CSYS,0 | lesize,all,,30,,,,,1 |
| lesize,all,,30,,,,,1 | CSYS,1 |
| CSYS,1 | lsel,s,loc,y,-umss/2 |
| lsel,s,loc,y,-umss/2 | lsel,a,loc,y,umss/2 |
| lsel,a,loc,y,umss/2 | lsel,u,loc,z,0,vvs |
| lsel,u,loc,z,0,vd | lsel,u,loc,z,vs+vd,6 |
| lsel,u,loc,z,vvs,6 | lsel,r,loc,x,0,tvs |
| lsel,r,loc,x,0,tvs | CSYS,0 |
| CSYS,0 | lesize,all,,20,,,,,1 |
| lesize,all,,gev,,,,,1 | CSYS,1 |
| CSYS,1 | lsel,s,loc,y,0 |
| lsel,s,loc,y,0 | lsel,u,loc,z,0,vvs |
| lsel,u,loc,z,0,vd | lsel,u,loc,z,vs+vd,6 |
| lsel,u,loc,z,vvs,6 | lsel,r,loc,x,0 |
| lsel,r,loc,x,0 | lsel,u,loc,z,-6,0 |

| | |
|--|--|
| CSYS,0 | lsel,s,loc,z,vd+vs |
| lesize,all,,20,,,,,1 | lsel,r,loc,x,0,tvs |
| CSYS,1 | lsel,u,loc,x,tvs |
| lsel,s,loc,x,tvs | lsel,r,loc,y,-umss/2 |
| lsel,r,loc,z,vd+vs | CSYS,0 |
| lsel,r,loc,y,0 | *set,delkah,tvs |
| CSYS,0 | *set,pom,0 |
| *set,delkah,(tvs*prv) | *set,pomm,0 |
| *set,pom,0 | *do,i,0,10000 |
| *set,pomm,0 | pom=(hvs/100)*1.4**i |
| *do,i,0,10000 | pomm=pomm+pom |
| pom=(hvs/100)*1.1**i | *if,pomm,GT,delkah,THEN |
| pomm=pomm+pom | *exif |
| *if,pomm,GT,delkah,THEN | *endif |
| *exif | *enddo |
| *endif | lesize,all,,20,1/(nint(pom/(hvs/100))),1,,1, |
| *enddo | CSYS,1 |
| lesize,all,,20,-nint(pom/(hvs/100)),1,,1, | lsel,s,loc,y,-umss/2 |
| CSYS,1 | lsel,a,loc,y,umss/2 |
| lsel,s,loc,z,vd+vs | lsel,u,loc,z,0,vs |
| lsel,r,loc,x,0,tvs | lsel,u,loc,z,vd+1.5*vs,6 |
| lsel,u,loc,x,tvs | lsel,r,loc,x,0,tvs |
| lsel,r,loc,y,umss/2 | CSYS,0 |
| CSYS,0 | lesize,all,,20,,,,,1 |
| *set,delkah,tvs | CSYS,1 |
| *set,pom,0 | lsel,s,loc,y,0 |
| *set,pomm,0 | lsel,u,loc,z,0,vs |
| *do,i,0,10000 | lsel,u,loc,z,vd+1.5*vs,6 |
| pom=(hvs/100)*1.4**i | lsel,r,loc,x,0 |
| pomm=pomm+pom | lsel,u,loc,z,-6,0 |
| *if,pomm,GT,delkah,THEN | CSYS,0 |
| *exif | lesize,all,,20,,,,,1 |
| *endif | CSYS,1 |
| *enddo | lsel,s,loc,x,tvs |
| lesize,all,,20,1/(nint(pom/(hvs/100))),1,,1, | lsel,r,loc,z,1.5*vs+vd |
| CSYS,1 | lsel,r,loc,y,0 |

| | |
|--|--|
| CSYS,0 | *set,pom,0 |
| *set,delkah,(tvs*prv) | *set,pomm,0 |
| *set,pom,0 | *do,i,0,10000 |
| *set,pomm,0 | pom=(hvs/100)*1.4**i |
| *do,i,0,10000 | pomm=pomm+pom |
| pom=(hvs/100)*1.1**i | *if,pomm,GT,delkah,THEN |
| pomm=pomm+pom | *exif |
| *if,pomm,GT,delkah,THEN | *endif |
| *exif | *enddo |
| *endif | lesize,all,,10,1/(nint(pom/(hvs/100))),1,,1, |
| *enddo | CSYS,1 |
| lesize,all,,10,-nint(pom/(hvs/100)),1,,1, | lsel,s,loc,z,vd |
| CSYS,1 | lsel,r,loc,y,-umss/2 |
| lsel,s,loc,z,vd+1.5*vs | lsel,u,loc,x,0,tvs |
| lsel,r,loc,x,0,tvs | lsel,u,loc,x,vni-0.001,6 |
| lsel,u,loc,x,tvs | CSYS,0 |
| lsel,r,loc,y,umss/2 | lesize,all,,30,,,,,1 |
| CSYS,0 | CSYS,1 |
| *set,delkah,tvs | lsel,s,loc,z,vd |
| *set,pom,0 | lsel,r,loc,y,umss/2 |
| *set,pomm,0 | lsel,u,loc,x,0,tvs |
| *do,i,0,10000 | lsel,u,loc,x,vni-0.001,6 |
| pom=(hvs/100)*1.4**i | CSYS,0 |
| pomm=pomm+pom | lesize,all,,30,,,,,1 |
| *if,pomm,GT,delkah,THEN | CSYS,1 |
| *exif | lsel,s,loc,z,0 |
| *endif | lsel,r,loc,y,umss/2 |
| *enddo | lsel,u,loc,x,0,tvs |
| lesize,all,,10,(nint(pom/(hvs/100))),1,,1, | lsel,u,loc,x,vni-0.001,6 |
| CSYS,1 | CSYS,0 |
| lsel,s,loc,z,1.5*vs+vd | lesize,all,,30,,,,,1 |
| lsel,r,loc,x,0,tvs | CSYS,1 |
| lsel,u,loc,x,tvs | lsel,s,loc,z,0 |
| lsel,r,loc,y,-umss/2 | lsel,r,loc,y,-umss/2 |
| CSYS,0 | lsel,u,loc,x,0,tvs |
| *set,delkah,tvs | lsel,u,loc,x,vni-0.001,6 |

| | |
|----------------------------|----------------------------|
| CSYS,0 | CSYS,1 |
| lesize,all,,30,,,,,1 | lsel,s,loc,y,0 |
| lsel,s,,2 | lsel,r,loc,x,tvs,vni |
| lsel,a,,4,5 | lsel,r,loc,z,vvs |
| lsel,a,,7 | lsel,u,loc,x,0,tvs+0.00001 |
| lsel,a,,13 | lsel,u,loc,x,vni-0.001,6 |
| lsel,a,,15 | CSYS,0 |
| lsel,a,,17 | lesize,all,,9,,,,,1 |
| lsel,a,,19 | CSYS,1 |
| lsel,a,,84 | lsel,s,loc,y,0 |
| lsel,a,,79,81 | lsel,r,loc,x,tvs,vni |
| lsel,a,,106,107 | lsel,r,loc,z,vd+vs |
| lsel,a,,136,137 | lsel,u,loc,x,0,tvs+0.00001 |
| lesize,all,,20,,,,,1 | lsel,u,loc,x,vni-0.001,6 |
| lsel,s,,9,12 | CSYS,0 |
| lsel,a,,82,83 | lesize,all,,9,,,,,1 |
| lsel,a,,85,86 | CSYS,1 |
| lsel,a,,104,105 | lsel,s,loc,z,vs+vd |
| lsel,a,,108,109 | lsel,r,loc,x,tvs,vni-0.001 |
| lesize,all,,gev,,,,,1 | lsel,u,loc,x,vni-0.001 |
| CSYS,1 | lsel,r,loc,y,-umss/2 |
| lsel,s,loc,y,0 | CSYS,0 |
| lsel,r,loc,x,tvs,vni | lesize,all,,30,,,,,1 |
| lsel,r,loc,z,0 | CSYS,1 |
| lsel,u,loc,x,0,tvs+0.00001 | lsel,s,loc,z,vs+vd |
| lsel,u,loc,x,vni-0.001,6 | lsel,r,loc,x,tvs,vni-0.001 |
| CSYS,0 | lsel,u,loc,x,vni-0.001 |
| lesize,all,,9,,,,,1 | lsel,r,loc,y,umss/2 |
| CSYS,1 | CSYS,0 |
| lsel,s,loc,y,0 | lesize,all,,30,,,,,1 |
| lsel,r,loc,x,tvs,vni | CSYS,1 |
| lsel,r,loc,z,vd | lsel,s,loc,z,1.5*vs+vd |
| lsel,u,loc,x,0,tvs+0.00001 | lsel,r,loc,x,tvs,vni-0.001 |
| lsel,u,loc,x,vni-0.001,6 | lsel,u,loc,x,vni-0.001 |
| CSYS,0 | lsel,r,loc,y,-umss/2 |
| lesize,all,,9,,,,,1 | CSYS,0 |

| | |
|-----------------------------|---|
| lesize,all,,5,,,,,1 | lsel,u,loc,y,0 |
| CSYS,1 | lsel,u,loc,x,0,tvs+2*rs |
| lsel,s,loc,z,1.5*vs+vd | CSYS,0 |
| lsel,r,loc,x,tvs,vni-0.001 | lesize,all,,9,,,,,1 |
| lsel,u,loc,x,vni-0.001 | CSYS,1 |
| lsel,r,loc,y,umss/2 | lsel,s,loc,y,-umss/2 |
| CSYS,0 | lsel,a,loc,y,umss/2 |
| lesize,all,,5,,,,,1 | lsel,u,loc,z,0,vd |
| CSYS,1 | lsel,u,loc,z,-6,0 |
| lsel,s,loc,y,-umss/2 | lsel,u,loc,z,vind,6 |
| lsel,a,loc,y,umss/2 | lsel,u,loc,x,0,tvs |
| lsel,u,loc,z,-6,0 | CSYS,0 |
| lsel,u,loc,z,vd,6 | lesize,all,,gev,,,,,1 |
| lsel,u,loc,x,0,tvs | CSYS,1 |
| CSYS,0 | lsel,s,loc,z,vind |
| lesize,all,,20,,,,,1 | lsel,r,loc,y,0 |
| CSYS,1 | lsel,r,loc,x,vni-0.001,rkon |
| lsel,s,loc,z,0 | CSYS,0 |
| lsel,r,loc,y,0 | *set,delkah,(tvs*prv) |
| lsel,r,loc,x,vni-0.001,rkon | *set,pom,0 |
| CSYS,0 | *set,pomm,0 |
| lesize,all,,20,,,,,1 | *do,i,0,10000 |
| CSYS,1 | pom=(hvs/100)*1.1**i |
| lsel,s,loc,z,vd | pomm=pomm+pom |
| lsel,r,loc,y,0 | *if,pomm,GT,delkah,THEN |
| lsel,r,loc,x,vni-0.001,rkon | *exif |
| CSYS,0 | *endif |
| lesize,all,,20,,,,,1 | *enddo |
| CSYS,1 | lesize,all,,30,-nint(pom/(hvs/100)),1,,1, |
| lsel,s,loc,z,0 | !!horni zadni i predni!!!! |
| lsel,u,loc,y,0 | CSYS,1 |
| lsel,u,loc,x,0,tvs+2*rs | lsel,s,loc,z,vind |
| CSYS,0 | lsel,u,loc,y,0 |
| lesize,all,,9,,,,,1 | lsel,u,loc,x,0,tvs+2*rs |
| CSYS,1 | CSYS,0 |
| lsel,s,loc,z,vd | lesize,all,,9,,,,,1 |

| | |
|---|---|
| CSYS,1 | lsel,u,loc,x,0,tvs |
| lsel,s,loc,y,-umss/2 | lsel,u,loc,z,-6,0 |
| lsel,a,loc,y,umss/2 | CSYS,0 |
| lsel,u,loc,z,0,vind | lesize,all,,20,,,,,1 |
| lsel,u,loc,z,-6,0 | CSYS,1 |
| lsel,u,loc,z,vs+vd,6 | lsel,s,loc,z,vs*1.5+vd |
| lsel,u,loc,x,0,tvs | lsel,r,loc,y,0 |
| CSYS,0 | lsel,u,loc,x,0,tvs |
| lesize,all,,20,,,,,1 | CSYS,0 |
| CSYS,1 | *set,delkah,(tvs*prv) |
| lsel,s,loc,z,vs+vd | *set,pom,0 |
| lsel,r,loc,y,0 | *set,pomm,0 |
| lsel,u,loc,x,tvs+0.0000001,tvs+2*rs | *do,i,0,10000 |
| CSYS,0 | pom=(hvs/100)*1.1**i |
| *set,delkah,(tvs*prv) | pomm=pomm+pom |
| *set,pom,0 | *if,pomm,GT,delkah,THEN |
| *set,pomm,0 | *exif |
| *do,i,0,10000 | *endif |
| pom=(hvs/100)*1.1**i | *enddo |
| pomm=pomm+pom | lesize,all,,10,-nint(pom/(hvs/100)),1,,1, |
| *if,pomm,GT,delkah,THEN | CSYS,1 |
| *exif | lsel,s,loc,z,vs*1.5+vd |
| *endif | lsel,u,loc,y,0 |
| *enddo | lsel,u,loc,x,0,tvs+2*rs |
| lesize,all,,30,-nint(pom/(hvs/100)),1,,1, | CSYS,0 |
| CSYS,1 | lesize,all,,9,,,,,1 |
| lsel,s,loc,z,vd+vs | !!!!MESHOVÁNI!!!! |
| lsel,u,loc,y,0 | vsel,s,,5 |
| lsel,u,loc,x,0,tvs+2*rs | vsweep,all |
| CSYS,0 | vsel,s,mat,,1 |
| lesize,all,,9,,,,,1 | vsweep,all |
| CSYS,1 | vsel,s,,8 |
| lsel,s,loc,y,-umss/2 | vsweep,all |
| lsel,a,loc,y,umss/2 | vsel,s,,6 |
| lsel,u,loc,z,0,vd+vs | vsweep,all |
| lsel,u,loc,z,vs*1.5,6 | !!!segment!!! |

```

vsel,s,mat,,3                lsel,r,loc,x,6
vsweep,all                   lsel,u,loc,y,0
vsel,s,,,2,4                 CSYS,0
vsweep,all                   lsize,all,,10,,,,1
!!!cast pod induktroem!!!!   CSYS,1
vsel,s,,,12,14              lsel,s,loc,y,0
MSHKEY,1                     lsel,u,loc,z,-6,vs*1.5+vd
MSHAPE,0,3dvmesh,all        lsel,r,loc,x,0
!!!induktor!!!!            CSYS,0
vsel,s,mat,,2               *set,delkah,(6)
MSHKEY,1                     *set,pom,0
MSHAPE,0,3d                 *set,pomm,0
vmesh,all                    *do,i,0,10000
vsel,s,,,15                  pom=(0.001)*1.2**i
vsel,a,,,17                  pomm=pomm+pom
vsel,a,,,20,25              *if,pomm,GT,delkah,THEN
MSHKEY,1                     *exif
MSHAPE,0,3d                 *endif
vmesh,all                    *enddo
vsel,s,,,27                  lsize,all,,i,nint(pom/(0.001)),1,,1
vsweep,all                   CSYS,1
vsel,s,,,28                  lsel,s,loc,y,0
MSHKEY,0                     lsel,u,loc,z,0,6
MSHAPE,1,3d                 lsel,r,loc,x,0
vmesh,all                    CSYS,0
vsel,a,,,26                  *set,delkah,(6)
MSHKEY,0                     *set,pom,0
MSHAPE,1,3d                 *set,pomm,0
vmesh,all                    *do,i,0,10000
vsel,s,,,29                  pom=(0.001)*1.2**i
MSHKEY,0                     pomm=pomm+pom
MSHAPE,1,3d                 *if,pomm,GT,delkah,THEN
vmesh,all                    *exif
CSYS,1                       *endif
lsel,s,loc,y,-umss/2,umss/2 *enddo
lsel,u,loc,x,0,vhi+0.001     lsize,all,,i,nint(pom/(0.001)),1,,1

```


| | |
|--|---|
| CSYS,1 | HARFRQ,fr,fr, |
| lsel,s,loc,z,-6 | !!!!!!anitsymetrie!!!!!! |
| lsel,u,loc,y,0 | ALLSEL,ALL |
| CSYS,0 | CSYS,1 ! přepnutí do cylindrických souřadnic |
| lesize,all,,,5,,,,,1 | ASEL,S,LOC,x,0,6! výběr plochy pro nastavení antisymetrie |
| CSYS,1 | ASEL,R,LOC,Y,-umss/2! výběr plochy pro nastavení antisymetrie |
| lsel,s,loc,z,6 | ASEL,R,LOC,Z,-6,6 ! výběr plochy pro nastavení antisymetrie |
| lsel,u,loc,y,0 | CSYS,0! přepnutí do kartézských souřadnic |
| CSYS,0 | DA,all,ASYMM |
| lesize,all,,,5,,,,,1 | |
| CSYS,1 | ALLSEL,ALL |
| lsel,s,loc,x,6 | CSYS,1 ! přepnutí do cylindrických souřadnic |
| lsel,r,loc,y,0 | ASEL,S,LOC,x,0,6 ! výběr plochy pro nastavení antisymetrie |
| CSYS,0 | ASEL,R,LOC,Y,umss/2! výběr plochy pro nastavení antisymetrie |
| lesize,all,,,3,,,,,1 | ASEL,R,LOC,Z,-6,6 ! výběr plochy pro nastavení antisymetrie |
| vsel,s,,,30 | CSYS,0! přepnutí do kartézských souřadnic |
| MSHKEY,0 | DA,all,ASYMM |
| MSHAPE,1,3d | !!!!!!0 potencial!!!!!! |
| vmesh,all | ALLSEL,ALL |
| !!!!!!výpocet!!!!!! | CSYS,1 ! přepnutí do cylindrických souřadnic |
| !!!!vložení proudu!!!!!! | ASEL,S,LOC,x,0,tvs ! výběr plochy vsazky pro nastavení nulového potenciálu |
| CSYS,1 ! přepnutí do cylindrických souřadnic | ASEL,R,LOC,Y,-umss/2! výběr plochy vsazky pro nastavení nulového potenciálu |
| ASEL,S,LOC,X,vni,vhi! výběr plochy pro vložení proudu | ASEL,R,LOC,Z,vd,vvs! výběr plochy vsazky pro nastavení nulového potenciálu |
| ASEL,R,LOC,Y,-umss/2! výběr plochy pro vložení proudu | |
| ASEL,R,LOC,Z,vd,vind | CSYS,0 |
| CSYS,0 | DA,all,VOLT,0,0 |
| NSLA,S,1 ! výběr všech uzlů ve zvolené ploše | ALLSEL,ALL |
| CP,1,VOLT,all | CSYS,! přepnutí do cylindrických souřadnic |
| *get,maxnode,node,,num,max! nalezení bodu s nejvyšším číslem | ASEL,S,LOC,x,0,tvs ! výběr plochy vsazky pro nastavení nulového potenciálu |
| F,maxnode,AMPS,pr*sqrt(2) | ASEL,R,LOC,Y,umss/2! výběr plochy vsazky pro nastavení nulového potenciálu |
| FINISH | ASEL,R,LOC,Z,vd,vvs! výběr plochy vsazky pro nastavení nulového potenciálu |
| /SOLU ! Otevření solveru | CSYS,0 |
| ANTYPE,3! Výběr harmonické analýzy | DA,all,VOLT,0,0 |
| HROPT,FULL ! metoda řešení | CSYS,1 ! přepnutí do cylindrických souřadnic |
| HROUT,ON! printout format | |

ASEL,S,LOC,X,vni,vhi ! výběr plochy induktoru pro nastavení nulového potenciálu

ASEL,R,LOC,Y,umss/2 ! výběr plochy induktoru pro nastavení nulového potenciálu

ASEL,R,LOC,Z,vd,vind

CSYS,0

DA,all,VOLT,0,0

allsel,all

LSEL,S,LOC,X,0,0 ! vyber linie v ose modelu

DL,all,,AX,0,0,

DL,all,,AY,0,0,

DL,all,,AZ,0,0,

!!!okrajove podminky!!!

ASEL,S,,,19,21! Nastaveniokrajovychpodminek

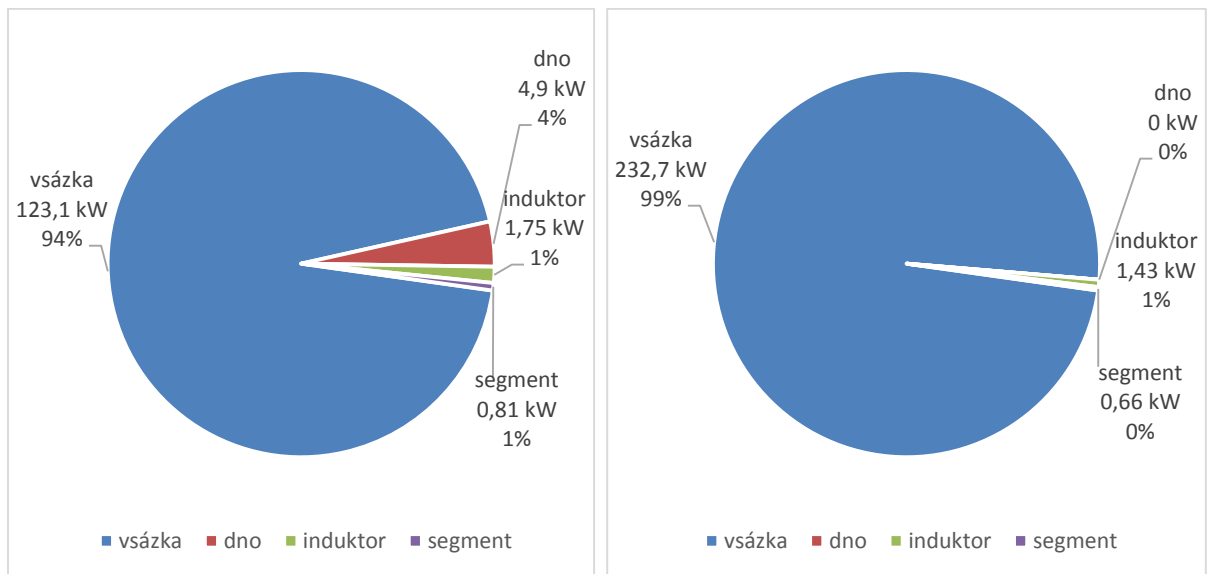
DA,all,AZ,0,0,

ALLSEL,ALL! Výběr všeho v modelu

SOLVE! Vyřešení úlohy

FINISH

2. celkové ztráty:



Obr. 8.1 – Porovnání ztrát a) el. vodivé dno b) el. nevodivé dno