

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Příčiny a následky elektromagnetické průzařnosti při
ohřevech elektromagnetickou indukcí**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav ŠTEFL**
Osobní číslo: **E12B0109K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Příčiny a následky elektromagnetické pružnosti při ohřevech elektromagnetickou indukcí**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Uveďte základní teorii a druhy ohřevů elektromagnetickou indukcí.
2. Vysvětlete problém elektromagnetické pružnosti se zaměřením na příčiny a následky daného jevu.
3. Navrhněte vhodný numerický model a pomocí počítačové simulace ověřte předpokládané jevy.
4. Zhodnoťte získané výsledky a uveďte závěry pro praxi.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. **LANGER E., KOŽENÝ J.: Elektrotepelná zařízení indukční. Plzeň, VŠSE 1982.**
2. **RADA J., a kolektiv: Elektrotepelná technika. Praha, SNTL, ALFA 1985.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Oldřich Kroupa**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá teorií ohřevu elektromagnetickou indukcí a vlivem elektromagnetické průzařnosti na tento tepelný proces. Navržený model je doplněn výpočty při respektování potřebných parametrů. Za pomoci počítačové simulace jsou získány výstupy zkoumaných jevů. Závěrem této práce je zhodnocení dosažených výsledků a jejich použití z hlediska praxe.

Klíčová slova

Maxwellovy rovnice, indukční ohřev, elektromagnetické vlnění, průzařnost, hloubka vniku, relativní permeabilita

Abstract

This bachelor thesis deals with the theory of electromagnetic induction heating and the effect of the thermal proces electromagnetic transparency. The proposed model is supplemented with calculations for the required parameters and outputs of examined phenomenona are obtained by computer simulation. Ratings of examined results and their use in practical terms are last part of this work.

Key words

Maxwell's equations, induction heating, electromagnetic waves, transparency, penetration depth, relative permeability

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 8.6.2015

Václav Štefl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Oldřichu Kroupovi a panu Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Obsah	7
Seznam symbolů a zkratk:	8
1 Teorie ohřevu elektromagnetickou indukcí	11
1.1 <i>Maxwellovy rovnice a odvození vlnových rovnic pro šíření elektromagnetického vlnění</i>	12
1.2 <i>Rovinné elektromagnetické vlnění a odvození vlnových rovnic</i>	12
1.3 <i>Relativní permeabilita ohřívaného materiálu</i>	17
2 Druhy ohřevů:	18
2.1 <i>Elektrické pece:</i>	18
2.2 <i>Indukční kelímkové pece</i>	18
2.2.1 <i>Typy kelímkových pecí:</i>	18
2.3 <i>Kanálkové pece:</i>	21
2.3.1 <i>Typy kanálkových pecí:</i>	21
2.4 <i>Indukční prohřívací zařízení</i>	23
2.5 <i>Povrchové kalení</i>	24
2.5.1 <i>Povrchové kalení ozubených kol a vaček</i>	24
2.5.2 <i>Kalení válců pro válcovací stolice</i>	25
2.6 <i>Indukční pájení</i>	26
2.7 <i>Indukční svařování</i>	26
3 Elektromagnetická průžařnost ve stěně	27
3.1 <i>Teorie elektromagnetické průžařnosti</i>	27
3.2 <i>Elektromagnetická průžařnost ve válcové vsázce</i>	28
4 Návrh numerického modelu	30
4.1 <i>Fyzikální model</i>	30
4.2 <i>Simulace pomocí softwaru Rillfem</i>	31
4.2.1 <i>Vliv průžařnosti na ohřev ocelové vsázky při změně kmitočtu</i>	35
4.2.2 <i>Vliv průžařnosti na ohřev nemagnetické vsázky při změně kmitočtu</i>	36
5 Hodnocení a závěr	37
Seznam literatury a informačních zdrojů	38
Přílohy	39

Seznam symbolů a zkratk:

- A – vektorový potenciál [Wb/m]
 \bar{A}_1, \bar{A}_2 – integrační konstanty [-]
 B – magnetická indukce [T]
 a – hloubka vniku naindukovaných proudů [m]
 a_1 – hloubka vniku naindukovaných proudů do cívky [m]
 a_2 – hloubka vniku naindukovaných proudů do vsázky [m]
 c – rychlost světla ve vakuu [m.s⁻¹]
 d_1 – vnitřní průměr cívky [m]
 d_2 – průměr vsázky [m]
 E – vektor intenzity elektrického pole [V.m⁻¹]
 f – kmitočet proudu v cívce [Hz]
 H – vektor intenzity magnetického pole [A.m⁻¹]
 H_2 – vektor intenzity magnetického pole vsázky [A.m⁻¹]
 I_1 – proud procházející cívkou [A]
 I_r – celkový proud procházející cívkou [A]
 J – vektor proudové hustoty [A.m⁻²]
 l_1 – délka cívky [m]
 l_{11} – výška vodiče cívky [m]
 l_2 – délka vsázky [m]
 l_m – výška vzduť vsázky [m]
 N_1 – počet závitů cívky [-]
 P_{21} – teplo naindukované do válcové vsázky [W.m⁻¹]
 G – tepelná energie [J]
 r_2 – poloměr vsázky [m]
 S'_p, S''_p – Poyntingovy vektory dopadající na povrch vsázky [W.m⁻²]
 t – čas [s]
 v – rychlost šíření elmag. vlnění v daném prostředí [m.s⁻¹]
 x_2 – reálná složka argumentu cylindrických funkcí pro el. vodivé prostředí [-]
 \bar{Z} – impedance prostředí [Ω]

α_2	– koeficient sálání ve vsázce [$A.m^{-2}.K^{-1}$]
ε_2	– koeficient sálání ve vsázce [-]
$\varepsilon_0 = 8,854.10^{-12}$	– permitivita vakua [$F.m^{-1}$]
ε_r	– relativní permitivita prostředí [-]
$\mu_0 = 4\pi . 10^{-7}$	– permeabilita vakua [$H.m^{-1}$]
μ_r	– relativní permeabilita prostředí [-]
γ	– konduktivita [$S.m^{-1}$]
ρ	– hustota náboje [$C.m^{-3}$]
ω	– úhlový kmitočet [s^{-1}]

Rozlišení typu veličin v textu:

K ...veličina obecně, bez rozlišení (obyčejně)

K...skalární veličina (kurzívně)

K...vektor (tučně kurzívně)

\bar{K} ...fázor vektoru (tučně, kurzívně s čárou)

Úvod

Lidé se při svém vývoji vždy snažili usnadňovat pracovní postupy pro uspokojení svých potřeb. Ať už se jednalo o vytápění prostředí pro získání tepelné pohody, tepelné zpracování potravin nebo ohřev materiálů pro výrobní procesy, vždy bylo základem teplo. Spalováním se však vytváří značné znečištění prostředí a komplikuje se přenos tepla spolu s nutností doplňování spalovaného materiálu. Účinky elektrického proudu při přeměně na teplo byly známy již ve druhé polovině 18. století. Teplo získané ze zdroje napájeného elektrickým proudem lze považovat za výhodnější, jelikož zlepšuje produktivitu práce, umožňuje zdokonalení výrobních procesů, snižuje výrobní náklady, zvyšuje kvalitu jejich výrobků a rovněž se s jeho pomocí zlepšuje životní prostředí. Časový průběh těchto ohřevů lze snadno regulovat, předvídat a spínat v požadovaných intervalech. Elektrotepelná zařízení implementovaná do výrobních procesů lze snadno mechanizovat, automatizovat a může se u nich dosáhnout také vyšších teplot. Díky tomu by bez použití těchto moderních technologií nemohla být v současné době velká část výrobků vůbec vytvořena (např. výroba ložisek, tavení speciálních kovů, zakalení hřídele turbokompresoru, automobilový průmysl, tepelné upínání nástrojů). Tepelná energie se tedy začala uplatňovat i tam, kde dříve z technologického hlediska nemohla být použita.

Tato bakalářská práce se zaměřuje na ohřev elektromagnetickou indukcí. První kapitola se věnuje teorii indukčních ohřevů a vlivu relativní permeability ohřívaného materiálu na tento proces. Další kapitola uvádí druhy ohřevů elektromagnetickou indukcí a jejich jednotlivé popisy doplněné obrázky. Obsahem třetí kapitoly je vysvětlení elektromagnetické průžařnosti včetně příčin a následků tohoto jevu. Ve čtvrté kapitole je navržen numerického modelu ohřívacího zařízení a provedení simulace pomocí počítačového programu RillFEM. Zhodnocení těchto výsledků a vyvozené závěry jsou posledním bodem této práce.

1 Teorie ohřevu elektromagnetickou indukcí

Indukční ohřev lze přirovnat svým principem k transformátoru. Primární stranou je také cívka, která je napájena střídavým proudem o určité frekvenci. V této cívce dojde k vytvoření střídavého magnetického pole. Elektromagnetické vlnění dopadá na povrch materiálu, který je vložen v ose cívky, a prochází jím. Dojde k vzniku vířivých proudů uvnitř materiálu, který je v tomto případě sekundární stranou. Zpracovávaný vodivý materiál v tomto zařízení je nazýván vsázkou a při přirovnání k transformátoru je výstupním vinutím spojeným nakrátko. Podle Faradayova indukčního zákona a Lenzova zákona dojde k vzniku vířivých proudů, které způsobí ohřátí materiálu, jehož tepelná energie se dále šíří vedením.

Vznik tepla přímo ve vsázce, přičemž vsázka není mechanicky s ničím vázána, patří k největším výhodám indukčního ohřevu. [1] Další výhodou je vysoká hustota příkonu do vsázky, rychlost ohřevu, řízení teploty vsázky, přesné určení míst ohřevu, jednoduchost činnosti, velká pružnost regulace, dobrá účinnost a příjemné pracovní podmínky bez negativního vlivu na životní prostředí. Volbou frekvence je možné měnit hloubku pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky a určit tím, kde se bude materiál ohřívat.

1.1 Maxwellovy rovnice a odvození vlnových rovnic pro šíření elektromagnetického vlnění

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru.

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.1.1)$$

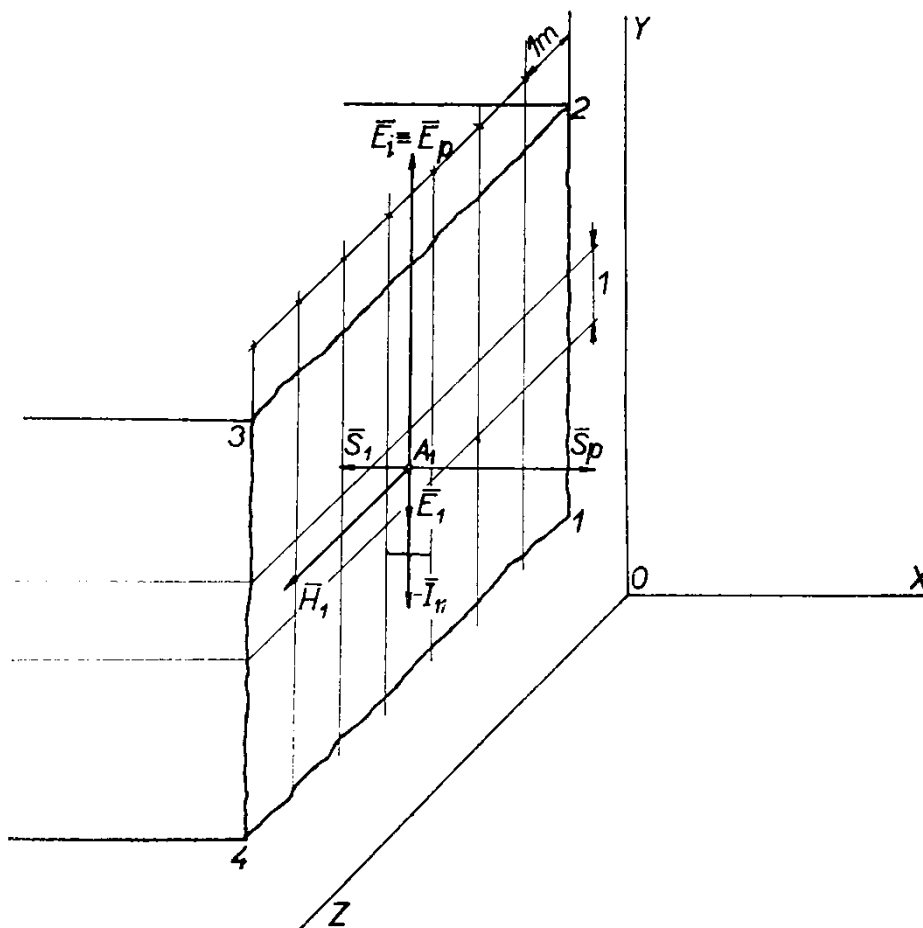
$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.1.2)$$

$$\operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad (1.1.3)$$

$$\operatorname{div} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad (1.1.4) \quad [1]$$

1.2 Rovinné elektromagnetické vlnění a odvození vlnových rovnic

Zdrojem tohoto vlnění může být pouze rovná vodivá stěna. Předpokladem pro následné vztahy je velikost stěny jdoucí do nekonečna ve směrech X a Y . Stěnou prochází harmonicky proměnný proud o hodnotě I_{11} .



Obr. 1.1 Schematické znázornění rovné stěny, vyzařující rovinné elmag. vlnění [1]

Rotace Maxwellovy rovnice (1.1.1)

$$\text{rot}(\text{rot } \mathbf{H}) = \text{rot } \gamma \mathbf{E} + \text{rot } \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \gamma \text{rot } \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial(\text{rot } \mathbf{E})}{\partial t}$$

Dosazení za rot \mathbf{E} z Maxwellovy rovnice (1.1.2)

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

Z vektorového počtu je známo že

$$\text{rot}(\text{rot } \mathbf{H}) = \text{grad}(\text{div } \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H}$$

Použitím toho pravidla se dostane $\text{div } \mathbf{H} = 0$ z Maxwellovy rovnice (1.1.4)

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

Proto platí

$$\nabla^2 \mathbf{H} + \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.2.1)$$

Vytvoření rotace Maxwellovy rovnice (1.1.2) pro odvození elektrické složky

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

Dosazení z Maxwellovy rovnice (1.1.1) za rot \mathbf{H}

$$\begin{aligned} \text{rot}(\text{rot } \mathbf{E}) &= -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \\ \text{grad}(\text{div } \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} &= -\gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \\ \text{div } \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (\text{z 3. rovnice}) \quad \varepsilon_r = \text{konst.} \end{aligned}$$

Úpravou dosaženo

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \text{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (1.2.2)$$

Rovnice (1.1) a (1.2) jsou obecnými rovnicemi šíření elektromagnetického vlnění v prostředí, kde ε_r , μ_r a γ jsou konstanty. Prakticky existuje hlavně prostředí, kde se buď zanedbává γ (nevodivé) nebo ε_r (vodivé prostředí). Volné náboje ρ se rovněž nebudou uvažovat ($\rho = 0$).

Pro nevodivé prostředí přejdou tím rovnice (1.2.1) a (1.2.2) na tvar

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.2.3)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.2.4)$$

Pro vodivé prostředí bude obdobně

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.2.5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.2.6)$$

Úprava rovnice (1.2.3) a (1.2.4) na tvar

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

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

Součinitel u $\nabla^2 \mathbf{H}$ nebo u $\nabla^2 \mathbf{E}$ se rovná v^2 (v je rychlost šíření v daném prostředí). Proto platí

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r}} \quad (1.2.7)$$

Pro vakuum (přibližně pro vzduch) je $\mu_r = 1$, $\varepsilon_r = 1$. Proto platí

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{1}{\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = \sqrt{\frac{36}{4} 10^{16}} = 3 \cdot 10^8 = c$$

U harmonického průběhu \mathbf{E} a \mathbf{H} se může časová změna s výhodou vyjádřit jako rotující fázor v komplexní rovině. Jde jen o vyjádření časové změny, která nemá nic společného se směrem \mathbf{E} a \mathbf{H} v prostoru. Jejich směr v prostoru zůstává nezávislý na tomto čistě matematickém obratu. Obvykle bude v našich úvahách směr \mathbf{E} a \mathbf{H} naprosto jasný. Stejně je jasné, že to jsou vektory. Z prostorových časově proměnných vektorů takto zůstaly jen fázory v komplexní rovině, vyjadřující jen časovou proměnnost (sinusovou, harmonickou) těchto prostorových vektorů. Lze tedy napsat

$$\bar{\mathbf{E}} = \bar{\mathbf{E}}_m e^{j\omega t} \quad (1.2.8)$$

$$\bar{\mathbf{H}} = \bar{\mathbf{H}}_m e^{j\omega t} \quad (1.2.9)$$

V rovnicích (1.2.3) až (1.2.6) jsou první a druhé derivace \mathbf{E} a \mathbf{H} podle času. Derivuje se proto rovnice (1.2.8) a (1.2.9) podle času

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial t} = j\omega \bar{\mathbf{E}}_m e^{j\omega t} = j\omega \bar{\mathbf{E}} \quad (1.2.10)$$

Stejně

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial t} = j\omega \bar{\mathbf{H}} \quad (1.2.11)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{E}}}{\partial t^2} = -\omega^2 \bar{\mathbf{E}}_m e^{j\omega t} = -\omega^2 \bar{\mathbf{E}} \quad (1.2.12)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{H}}}{\partial t^2} = -\omega^2 \bar{\mathbf{H}} \quad (1.2.13)$$

Je zřejmé, že derivace podle času jsou podle rovnic (1.2.10) až (1.2.13) na čase nezávislé. Tím lze rovnice (1.2.3) až (1.2.6) daleko snadněji řešit. To je jedna z hlavních výhod vyjádření časové závislosti v komplexní rovině. Pro technickou praxi mají základní význam jen harmonické průběhy \mathbf{E} a \mathbf{H} . Dosazení do rovnic (1.2.3) až (1.2.6) za derivace podle času vztahy (1.2.10) až (1.2.13).

Pro nevodivé prostředí:

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} = -\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \bar{\mathbf{H}} \quad (1.2.14)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} = -\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \bar{\mathbf{E}} \quad (1.2.15)$$

Pro vodivé prostředí:

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} = j\omega \gamma \mu_0 \mu_r \bar{\mathbf{H}} \quad (1.2.16)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} = j\omega \gamma \mu_0 \mu_r \bar{\mathbf{E}} \quad (1.2.17)$$

Zavedení konstanty šíření pro pozdější výpočty

$$k^2 = (\omega^2 \mu \varepsilon - j\omega \mu \gamma) = -j\omega \mu (\gamma + j\omega \varepsilon)$$

Tvar rovnice při použití konstanty k^2 :

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + k^2 \bar{\mathbf{E}} = 0$$

Pro pravoúhlé souřadnice je

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2}$$

Pro snazší matematické řešení budou jevy uvažovány jednorozměrné, tj. \mathbf{E} a \mathbf{H} bude záviset jen na souřadnici x a nikoliv na y a z . \mathbf{E} a \mathbf{H} bude konstantní v každém bodě roviny kolmé na osu x , určené souřadnicí x . Tím se bude uvažovat tzv. *rovinná vlna*. Rovnice (1.2.14) až (1.2.17) budou potom ve tvaru:

Pro nevodivé prostředí:

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{H}}}{\partial x^2} = -\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \bar{\mathbf{H}} \quad (1.2.18)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{E}}}{\partial x^2} = -\omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \bar{\mathbf{E}} \quad (1.2.19)$$

Pro vodivé prostředí:

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{H}}}{\partial x^2} = j\omega\gamma\mu_0\mu_r\bar{\mathbf{H}} \quad (1.2.20)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{E}}}{\partial x^2} = j\omega\gamma\mu_0\mu_r\bar{\mathbf{E}} \quad (1.2.21)$$

Řešením těchto homogenních diferenciálních rovnic 2. řádu, 1. stupně je velmi snadné. Výsledkem řešení je lineární kombinace dvou exponenciálních funkcí typu: $\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{A} e^{\lambda x}$.

Exponent λ se dostane z charakteristické rovnice. [1]

$$\lambda^2 \bar{\mathbf{A}} e^{\lambda x} + k^2 e^{\lambda x} = 0$$

Podle: $\lambda_{1,2} = \pm jk = \pm j(\alpha - j\beta) = \pm(\beta + j\alpha)$

Řešením fázorové rovnice bude:

$$\bar{\mathbf{H}} = \bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx} + \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx} = \bar{\mathbf{H}}_p + \bar{\mathbf{H}}_r \quad (1.2.22)$$

Pomocí Maxwellovy rovnice (1.1.1) lze upravit na:

$$\text{rot } \bar{\mathbf{H}} = \gamma \bar{\mathbf{E}} + j\omega\varepsilon \bar{\mathbf{E}} = (\gamma + j\omega\varepsilon) \bar{\mathbf{E}} \quad (1.2.23)$$

Uvažuje se tloušťka stěny d_x ve směru šíření a fázor $[\bar{\mathbf{H}} + (\partial \bar{\mathbf{H}} / \partial x) dx]$. Do jmenovatele je vložena plocha kolmá k tomuto vektoru, vyjádřená pomocí $(\Delta z dx)$. Tvar bude vypadat takto:

$$\text{rot } \bar{\mathbf{H}} = \frac{\bar{\mathbf{H}} \Delta z - \left(\bar{\mathbf{H}} + \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial x} dx \right) \Delta z}{\Delta z dx} = -\frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial x}$$

Podle tohoto tvaru se dostane $\text{rot } \bar{\mathbf{H}}$ derivováním výrazu (1.2.22):

$$\text{rot } \bar{\mathbf{H}} = -\frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial x} = jk \bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx} - jk \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx} = jk [\bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx} - \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx}]$$

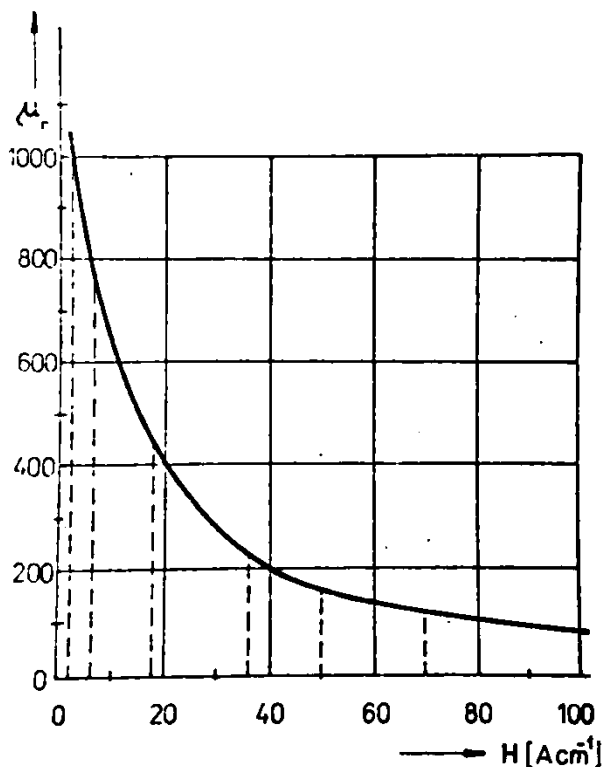
Dosazením tvaru (1.2.23) do Maxwellovy rovnice (1.1.1) se dostane:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{E}} &= \frac{j\sqrt{(-j)}\sqrt{[\omega\mu(\gamma + j\omega\varepsilon)]}}{(\gamma + j\omega\varepsilon)} [\bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx} - \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx}] = \\ &= \sqrt{\left(\frac{j\omega\mu}{\gamma + j\omega\varepsilon}\right)} [\bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx} - \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx}] = \\ &= \bar{\mathbf{Z}} [\bar{\mathbf{A}}_1 e^{-jkx} - \bar{\mathbf{A}}_2 e^{jkx}] = \bar{\mathbf{E}}_p + \bar{\mathbf{E}}_r. \quad (1.2.24)\end{aligned}$$

Výrazy (1.2.22) a (1.2.24) jsou obecnými výrazy fázorů $\bar{\mathbf{E}}$ a $\bar{\mathbf{H}}$ harmonického rovinného elmag. vlnění. [3]

1.3 Relativní permeabilita ohřivaného materiálu

Vliv na ohřev materiálů může mít také jejich relativní permeabilita μ_r . Je závislá na teplotě a také na intenzitě magnetického pole \mathbf{H} , její průběh lze vidět na *obr. 1.2*. Pro ohřevy překračující Curieovu teplotu, která je pro ocel 760°C, se skokově změní po překročení tohoto bodu na $\mu_r = 1$. Pro teoretické výpočty a příklady tavicích pecí se uvažuje konstantní hodnota permeability v celém objemu vsázky. Střední hodnotou pro ohřevy nad Curieovu teplotu je pro mnou simulaci tedy $\mu_r = 1$.



Obr. 1.2 Průběh permeability vsázky při změně intenzity \mathbf{H} [2]

2 Druhy ohřevů:

Indukční ohřevy se používají na pájení, žihání, kalení, prohřívání a tavení kovových materiálů, od velkých tavících pecí s obsahem desítek tun až po malá laboratorní zařízení.

2.1 Elektrické pece:

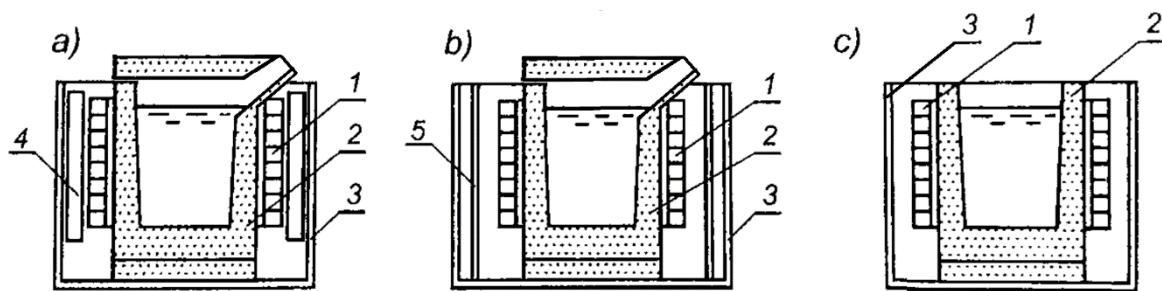
Při klasických ohřevech pomocí paliv či jiných zdrojů, kde je teplo přenášeno od zdroje přes stěny pece, dochází ke znečištění taveného materiálu a špatnému promísení. Velkou výhodou při indukčním ohřevu pomocí indukčních pecí je přímé ohřívání vsázky, kdy nedochází k jejímu znečištění. Vzniklé vířivé proudy navíc vyvolávají intenzivní víření, díky kterým dojde k promísení vsázky i jejích přísad a tedy homogenizaci teplotní i materiálové.

2.2 Indukční kelímkové pece

Indukční kelímkové pece jsou v současném průmyslu metalurgickém, slévárenském i elektrotechnickém základními a nejčastěji využívanými zřízeními. Používané jsou pro tavení tuhé vsázky z oceli, litiny nebo neželezných kovů. Mezi výhody tavení u indukčních tavících pecí patří především velký tavící výkon, nízké okysličení stopových prvků, promíchání vsázky v procesu zlepšující její homogenitu teploty, jednoduchost automatizace a mechanizace. Typickou indukční kelímkovou pecí je jednovinuťový, jednofázový induktor, keramický kelímek a otevřená konstrukce. Induktor je z dutých vodičů a prochází jimi chladicí voda. [4]

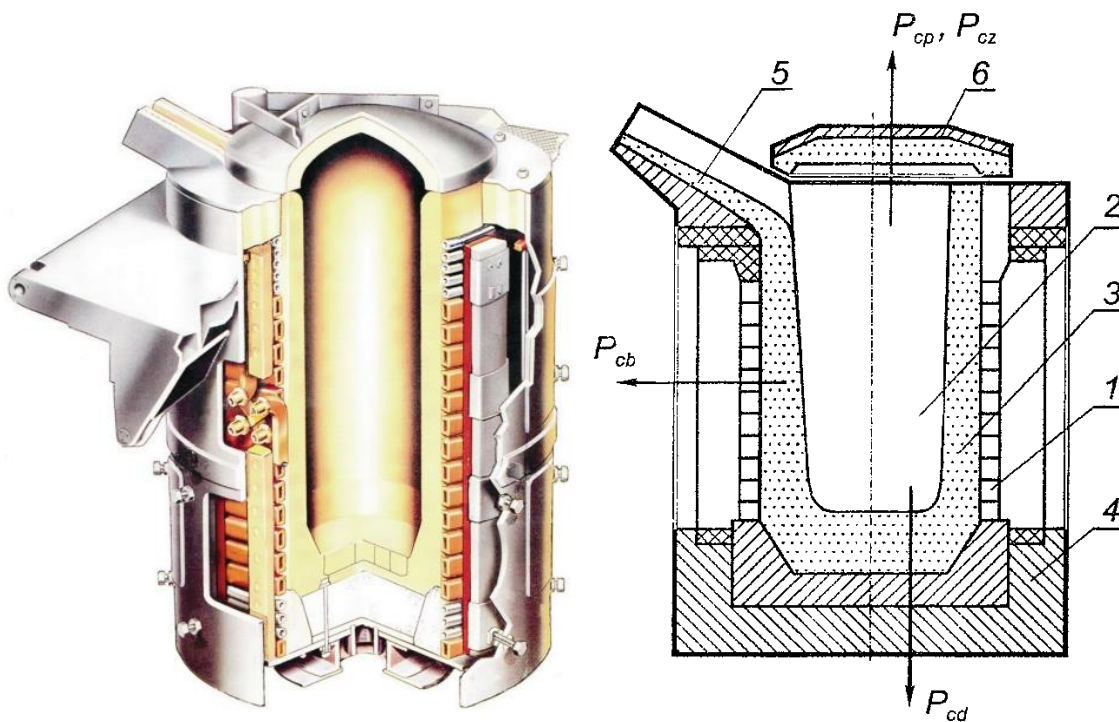
2.2.1 Typy kelímkových pecí:

- dle konstrukce:
 - vysokofrekvenční, středofrekvenční, nízkofrekvenční, vakuové
- dle provedení a napájení cívky:
 - jedno- dvoj- a trojfázové, s induktory jedno- nebo vícevínouťovými, s napájením jedno- nebo dvojfrekvenčním
- dle druhu kelímku
 - s nevodivým kelímkem, s vodivým kelímkem
- dle druhu konstrukce
 - s konstrukcí otevřenou, uzavřenou nebo stíněnou Obr. 2.2 [4]



Obr. 2.2 Druhy konstrukcí indukčních kelímkových pecí [4]

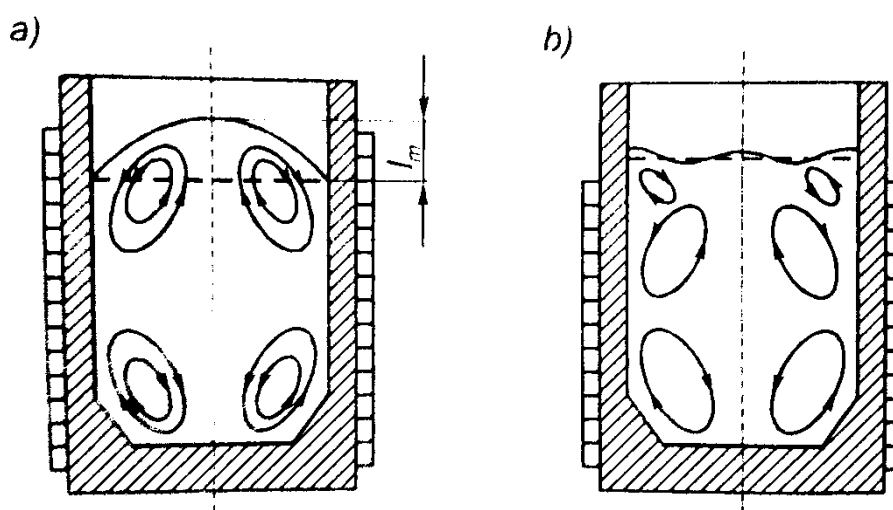
a - uzavřená, b - stíněná, c - otevřená, 1 - induktor, 2 - kelímek, 3 - plášť, 4 - svazky transformátorových plechů – bočník, 5 - stínění vodivým pláštěm



Obr. 2.1 Indukční kelímková pec [5], [4]

1 - vinutí cívky, 2 - vsázka, 3 - kelímek, 4 - žárovečná vyzdívka dna pece, 5 - hubice pece pro odlévání, 6 - víko

Kelímkové pece s vyšší frekvencí jsou napájené pomocí tyristorových měničů. Při vysokých frekvencích (do 1MHz) se používají tranzistorové měniče či elektronkové generátory. Proud, který se indukují ve vsázce, vytváří elektromagnetické síly, které pohybují s tekutým roztaveným kovem v kelímku. Charakter pohybu i jeho intenzita záleží mimo jiné na rozměrech kelímku, množství dodané energie, frekvenci, počtu fází induktoru a také umístění induktoru vzhledem k vsázce. Pro symetrický obvod induktor-vsázka probíhá cirkulace kovu v jednofázové peci jako na obr. 2.3a. Na povrchu se tvoří vzduť vsázky, jehož výška se zmenšuje společně s rostoucím kmitočtem napájecího proudu. Nejjednodušším způsobem omezení výšky vzduť vsázky je nesymetrické uložení induktoru vzhledem k tavenému kovu obr. 2.3b.



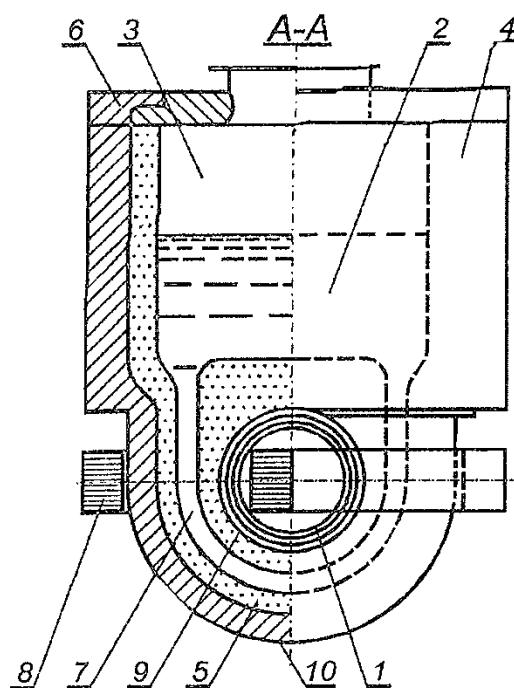
Obr. 2.3 Pohyb tekutého kovu v jednofázové indukční peci se symetrickým (a) a nesymetrickým (b) umístěním induktoru (l_m – výška vzduť vsázky) [4]

2.3 Kanálkové pece:

Indukční pece kanálkové s uzavřeným železným jádrem byly postaveny v posledním desetiletí devatenáctého století. Tyto pece jsou v podstatě transformátor s uzavřeným jádrem z železných plechů, primární vinutí je připojeno ke zdroji střídavého proudu. Sekundární stranou je roztavený kov v keramickém žlábků. Původní pece s odkrytým kanálkem kolem železného jádra měly v provozu určité nevýhody. Byly proto ve dvacátých letech nahrazeny pecemi poněkud odlišné konstrukce. Pec má válcovou nístěj s roztavenou vsázkou a kanálek je zapaščen pod její dno. Na železném jádře je umístěna primární cívka připojená k síti. Pece tohoto a obdobného provedení se používají převážně pro tavení barevných kovů (měď, hliník, zinek, olovo) a jejich slitin. [2]

2.3.1 Typy kanálkových pecí:

Jednokanálková s otevřeným kanálkem, dvoukomorová se zavřeným kanálkem, dvoukomorová se zakrytými kanálky, se dvěma paralelními kanálky, se třemi paralelními kanálky, s uzavřeným kanálkem u dna pece, se skoseným kanálkem, s kanálkem kruhového nebo obdélníkového průřezu, s kanálkem ve tvaru V, s dvojitým kanálkem.

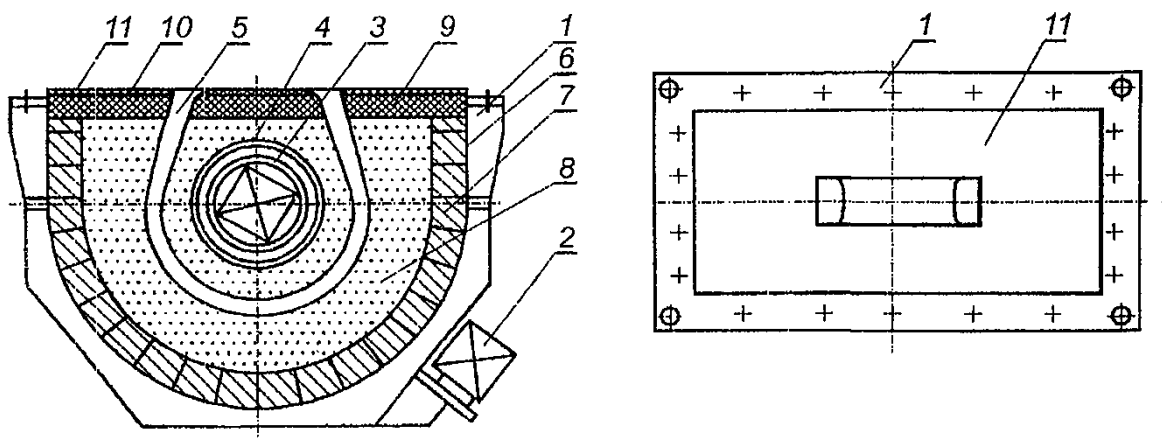


Obr. 2.4 Konstrukce indukční kanálkové pece [4]:

1 - vinutí (induktor), 2 - roztavený kov, 3 - vana pece, 4 - žárovevné obložení vany,
5 - žárovevné obložení induktoru, 6 - víko, 7 - kanálek, 8 - magnetické jádro, 9 - ochranné
stínění vinutí, 10 - vyzdívka induktoru

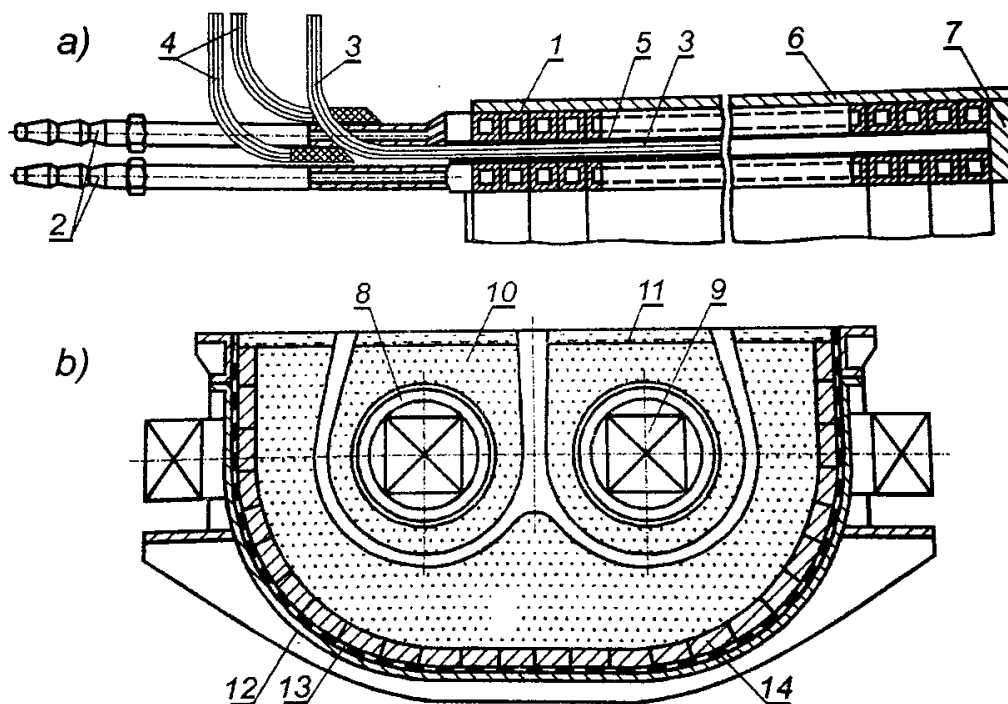
Napájení induktorů kanálkových pecí je prováděno jedině proudem o síťové frekvenci (50 Hz). Vinutí vytváří magnetický tok, který je uzavřen v magnetickém jádru, a jeho pomocí vznikají v uzavřeném obvodu tvořeném roztaveným kovem v kanálku a částečně ve vaně elektromotorické síly a vířivé proud. Největší výměna tepelné energie tedy probíhá v kovu nacházejícím se v kanálku. Pohyb tekutého kovu a jeho cirkulace pomáhá k této tepelné výměně s chladnější vsázkou ve vaně. Pro započítí práce a další činnost kanálkové pece je tedy nutný uzavřený sekundární obvod, který se utvoří ze zbytkové taveniny ponechané v kanálku pece z předchozí tavby nebo je rovněž možné zaplnit kanálek a část vany tekutým roztaveným kovem z jiné pece.

Používají se dva základní typy vinutí induktoru pro indukční kanálkové pece, jsou naznačeny na *Obr.2.5b* a *Obr. 2.6*. [4]



Obr. 2.5 Konstrukce jednkanálkového induktoru (se šablonou pro pēchování kanáلكu) [4]

1 - konstrukce, 2 - magnetické jádro, 3 - vinutí, 4 - stínění vinutí, 5 - dráha kanáلكu, 6 - termoizolační materiál, 7 - žárovevné tvárnice (cihly), 8 - žárovevné pēchované obložení, 9 - žárovevný ochranný prstenec, 10 - vrstva tmelu, 11 - termoizolační materiál



Obr. 2.6 Příklad provedení vinutí induktoru (a) a vinutí dvoukanálového induktoru (b) kanálové pece typu NIR-8.0W [4]

1 - měděná trubka, 2 - přívod vody, 3, 4 - přívod proudu ohebnými vodiči, 5 - mezivrstevná izolace, 6 - izolace, 7 - ochranný prstenec, 8 - vinutí, 9 - magnetické jádro, 10, 11 - žárovevné přechované obložení, 12 - vyzdívka induktoru, 13 - termoizolační materiál, 14 - žárovevné tvárnice (cihly)

2.4 Indukční prohřívací zařízení

Tato zařízení jsou vhodná pro rovnoměrné prohřátí celých průřezů u materiálů, které je potřeba dále zpracovávat za horka kovááním či lisováním. Teploty potřebné pro tyto procesy jsou u ocelí 1150 °C až 1250 °C, tvarem jsou to převážně vývalky válcového nebo čtyřhranného profilu. Časová náročnost pro prohřátí těchto profilů je velice krátká, čímž se tento proces vyplatí z ekonomického hlediska. To jsou výhody oproti prohřívání materiálů za pomoci palivových pecí, při kterých vznikají zplodiny, které nám způsobují znečištění a prohřívání nepůsobí souose od zdroje tepla, nýbrž nepravidelně. Nerovnoměrné a zdlouhavé je také prohřátí předmětu z vrchní části, který je třeba postupně posouvat k dalšímu zpracování. Tyto okolnosti při prohřívání ocelových vývalků způsobují, že proces trvá 70 až 90 min u 10 cm průměru na požadovaných 1200°C. Při prodlužování doby prohřívání nastává oxidace povrchu oceli, která snižuje kvalitu oceli a tvoří se okuje. Indukční prohřívání je výhodné zejména při výrobě velkých sérií. [2]

2.5 Povrchové kalení

Povrchové indukční kalení má velkou výhodu v tom, že se součást nedeformuje teplem a kalením a že vnitřek zůstává houževnatý. Pro běžné kalení se používá frekvence

50 Hz až 10 000 Hz, pro kalení součástí drobných nebo pro malé hloubky prokalení i u součástí větších se používají vysoké frekvence, např. 360 kHz. Volbou kmitočtu, lze určovat tloušťku povrchové vrstvy, která má být prokalena. Při tomto procesu je důležitý vysoký měrný příkon, jelikož je třeba, aby prohřátí bylo rychlé, v materiálu proběhlo jen v daném místě a neproniklo do hloubky, či jinam od místa kalení.

Válce malého průměru se povrchově kalí vložением do souosé vysokofrekvenční cívky. Při správné volbě kmitočtu a vyšším měrném výkonu, dojde k vzniku vířivých proudů do povrchu válce a prohřátí, řádově 1 s. Po dosažení požadované teploty je vysokofrekvenční cívka odpojena a je do ní přivedena chladicí voda, která ostříkuje přes otvory vnitřní cívky povrch válce. Výhodou tohoto procesu je úspora energie, zachování původních vlastností materiálu pod zakalenou vrstvou a minimální změny rozměrů. [2]

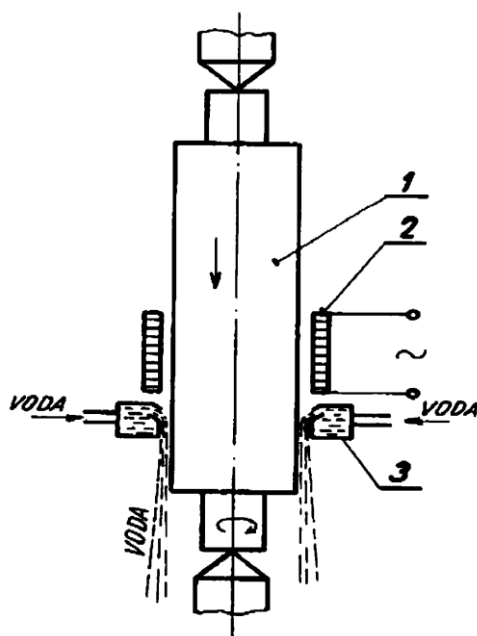
2.5.1 Povrchové kalení ozubených kol a vaček

Předměty kruhových tvarů se umísťují do cívky, jejíž vnitřní průměr je o málo větší než průměr kola. Volba kmitočtu není v tomto případě určena absolutními rozměry kola, ale modulem jeho ozubení, což je poměr průměru roztečné kružnice a počtu zubů. Tím je dosaženo téměř stejného stupně prokalení ve špičce, boku a patě zubů. V některých případech u větších modulů je možno více zakalit boky zubů, které jsou nejvíce namáhány, pomocí postupného otáčení ve zvláštních automatech s posuvem dle zubové rozteče. [2]

2.5.2 Kalení válců pro válcovací stolice

Jedná se o válce s velkými rozměry a hmotností dosahující desítky tun. Dřívější metoda kalení spočívala v ohřívání válců ve svislých pecích pomocí hořáků a tento způsob si vyžádal i několik dnů s nejistým výsledkem, jelikož často docházelo k roztržení válce při náhlých změnách teplot. S příchodem indukčních ohřevů se tento problém vyřešil. Válec byl prohříván ve svislé poloze, zatímco přímo pod cívkou byl prohřátý materiál ihned ochlazen. Při použití síťové frekvence 50 Hz, se pro cívku na vnější straně používá jádro z železných plechů ke koncentraci magnetického pole. Díky indukčnímu kalení povrchové vrstvy je možné, při pozdějším obroušení prokalené vrstvy, proces znovu opakovat a ušetřit tím náklady na prokalení a materiál.

[1]



Obr. 2.7 Postupné kalení válců pro válcovací stolice [1]

1 – ocelový válec, 2 – induktor, 3 - vodní sprcha

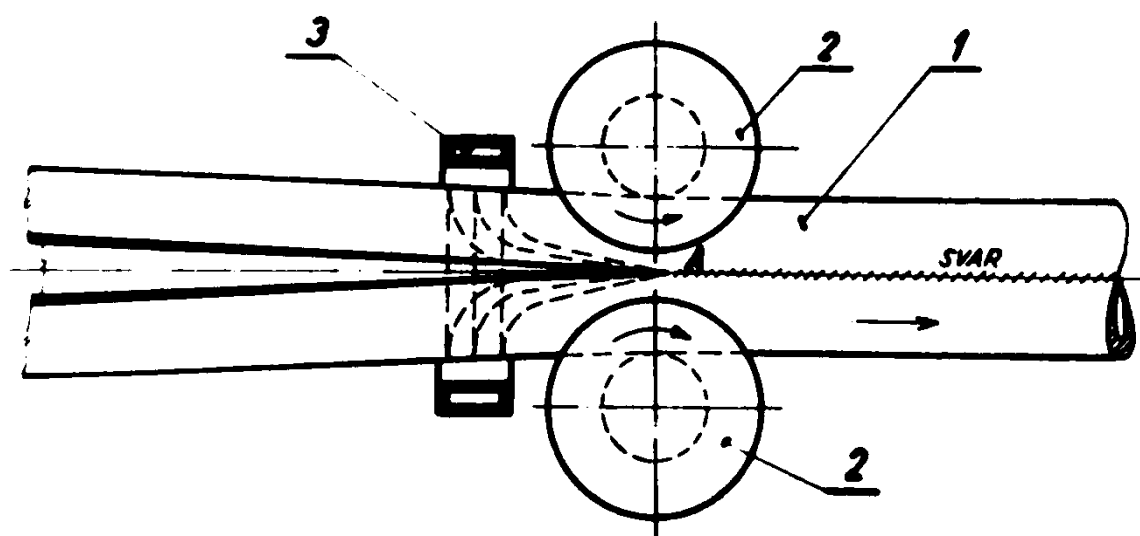
2.6 Indukční pájení

Pro pájení je potřeba připravit pájku v požadovaném tvaru, většinou se jedná o kroužek. Často se využívá cín, měď nebo mosaz. Po zavedení vf proudu do induktoru nastane indukční zahřátí pájky, trubky i příruby. Roztavená pájka vteče vztlínáním do úzké štěrbiny mezi trubkou a přírubou. Další možností je pájení natvrdo mosazí, například plátku z tvrdého kovu na soustružnický nůž, nebo břitů z tvrdých kovů na těleso frézy, atd. [2]

2.7 Indukční svařování

Při svařování trubek se přivádí do cívky vysokofrekvenční proud, který se naindukuje do neuzavřené stěny. Trubka je posouvána rychlostí v a působením kladek dojde k dotyku okrajů. Vlivem vysoké hustoty vířivých proudů vznikne teplota vyšší než $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ a okraje se svaří.

[2]



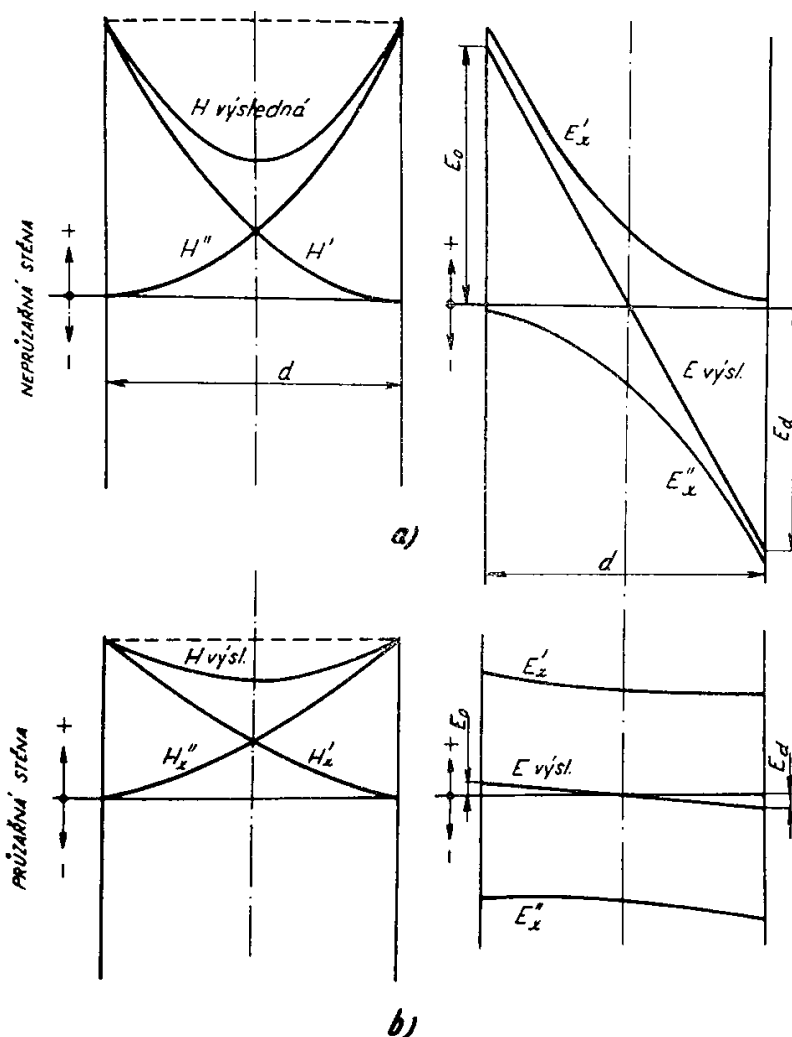
Obr. 2.8 Indukční svařování trubek [1]

1 – trubka, 2 – kladka, 3 - Induktor

3 Elektromagnetická průzařnost ve stěně

3.1 Teorie elektromagnetické průzařnosti

Ke znázornění průzařnosti je použit obrázek 3.1 s vyneseny grafy. Průběh intenzity magnetického pole H a intenzity elektrického pole E v neprůzařné stěně je znázorněn v grafu na obrázku 3.1a. V tomto případě došlo k vzniku vířivých proudů a rovnoměrnému prohřátí stěny, toho je dosaženo zvýšením frekvence a snížením celkové průzařnosti. Vysoká průzařnost je viditelná z grafu na obrázku 3.1b, je způsobená značnou hloubkou vniku a . Vlivu průzařnosti se využívá například u transformátorových plechů, kde je třeba, aby nedocházelo k jejich ohřívání vlivem indukce. Toho je dosaženo tenkou tloušťkou plechů.



Obr. 3.1 Fyzikální znázornění průzařnosti [1]

Pro ohřev vsázky je potřeba snížit průzařnost a zvýšit frekvenci, aby se argumenty (d_2/a_2) a $(x_2 = r_2/a_2 \sqrt{2})$ zvětšily snížením hloubky vniku a při stávajících rozměrech vsázky. Z těchto důvodů tedy vznikla indukční zařízení středofrekvenční a vysokofrekvenční. [1]

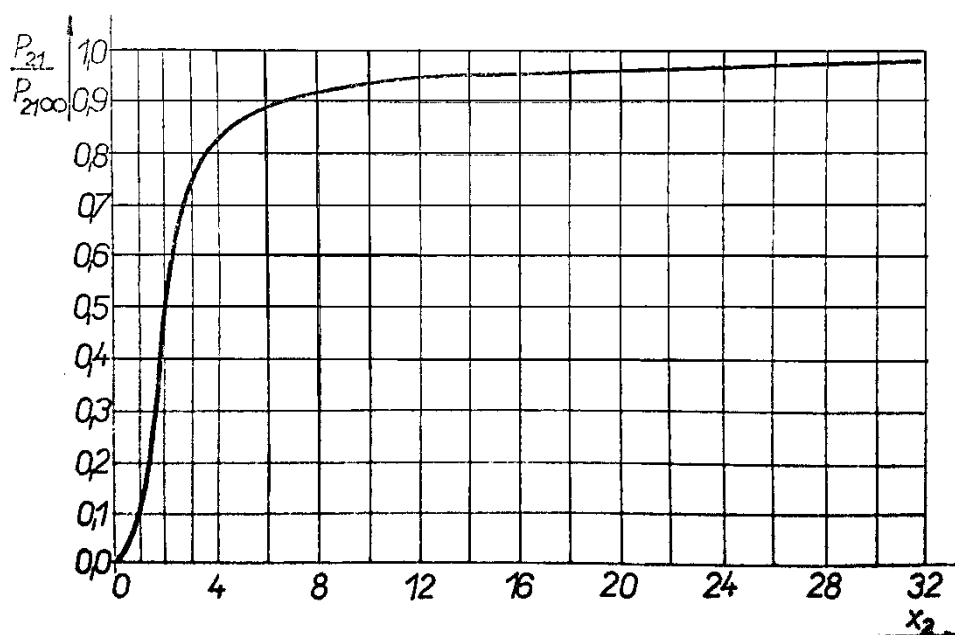
3.2 Elektromagnetická průzařnost ve válcové vsázce

Zavádí se vztah pro vyjádření množství tepla, které se vyvine ve válcové vsázce o poloměr r_2 s intenzitou magnetického pole H_2 na povrchu:

$$P_{21} = \varrho \pi x_2 \cdot P(x_2) \cdot H_2^2 [\text{W} \cdot \text{m}^{-1}]$$

Z grafu na obrázku 3.2 je tedy zřejmé, že pro zmenšující se hodnoty x_2 dochází k průchodu vlnění a neprohřátí materiálu. Průzařnost se tím zvyšuje. Hodnota složky x_2 je dána poloměrem r_2 , hloubkou vniku naindukovaného tepla ve válcové vsázce a_2 a vychází ze vztahu: [2]

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} \quad [-]$$

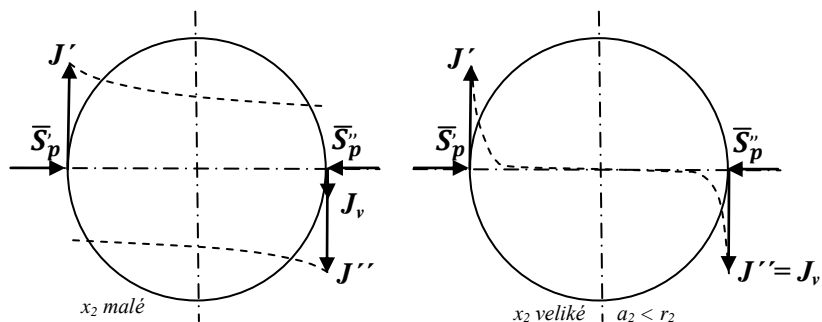


Obr. 3.2 Vztah poměru naindukovaného tepla a argumentu x_2 [2]

Pro hodnotu složky $x_2 < 6$ je patrná zvyšující se průzařnost válcové vsázky s poklesem složky x_2 . Poyntingovy vektory se při průzařnosti setkávají z protilehlých stran neutlumené a s opačnou fází, takže se do značné míry ruší. [1]

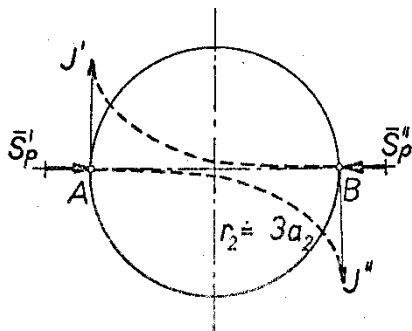
Na obrázcích 3.3 je sledována průžařnost pro určité elektromagnetické vlnění. Toto vlnění vyzářené z povrchu cívky dopadá radiálně na povrch válcové vsázky, je označeno vektory \bar{S}_p' a \bar{S}_p'' . Na levém obrázku jsou průběhy obou hustot proudů J' a J'' vyvolané dopadajícím vlněním. Protože mají uvedené hustoty vzájemně opačný smysl, je výsledná hodnota J_v daná jejich rozdílem, která odpovídá malým hodnotám složky x_2 . Podle obrázku 3.2 odpovídá výsledná hodnota hustoty nízkému prohřátí vsázky, způsobenému velkou hloubkou vniku. Podle obrázku 3.3 na pravé straně jsou naopak znázorněny průběhy hustot pro vysokou hodnotu složky x_2 . Rovná se tak malé hloubce vniku, povrch vsázky je přehříván a do okolí odcházejí ztráty. Pro rovnoměrné prohřátí materiálu je třeba, aby od povrchu teplo procházelo vedením ke středu. Je třeba zvolit takovou frekvenci, aby hloubka vniku byla optimální a došlo k rovnoměrnému prohřátí vsázky. Tomu odpovídá vztah mezi poloměrem r_2 a hloubkou vniku a_2 :

$$r_2 = (2,5 \div 3,0)a_2 \quad [2]$$



Obr. 3.3 Znázornění vlivu průžařnosti na proudovou hustotu J [2]

Přibližný průběh hustoty proudů při použití poloměru r_2 rovné trojnásobku hloubky vniku a_2 je viditelný na obrázku 3.4. Elektromagnetické vlnění se v povrchové vrstvě vsázky téměř utlumí a hustota proudu z obou stran je ve středu vývalku již malé hodnoty. [2]



Obr. 3.4 Dopadající vlnění z obou stran při r_2 [2]

4 Návrh numerického modelu

4.1 Fyzikální model

Před zahájením simulace, je potřeba specifikovat fyzikální model zařízení, jeho rozměry a vlastnosti. Tomu odpovídá následující tabulka:

	Vsázka	Induktor
Materiál	Ocel	Měď
Vnější průměr	$d_2 = 0,1 \text{ m}$	$d'_1 = d_1 + 2 \cdot d_{opt} = 0,167 \text{ m}$
Vnitřní průměr	-	$d_1 = 0,16 \text{ m}$
Výška	$l_2 = 1 \text{ m}$	$l_1 = 1,1 \text{ m}$
Konduktivita	$\gamma_2 = 137 \cdot 10^4 \text{ S.m}^{-1}$	$\gamma_1 = 3 \cdot 10^7 \text{ S.m}^{-1}$
Relativní permeabilita	$\mu_{r2} = 8000 (1)$	$\mu_{r1} = 1$
Počet závitů	-	$N_1 = 45$
Proudová hustota	-	$J_1 = 8 \text{ A/mm}^2$
Počáteční teplota	$T_2 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_1 = 21 \text{ }^\circ\text{C}$

Parametry zdroje:

Napětí	500 V
Výkon	20 kW
Frekvence	1000 Hz (50, 10 000 Hz)
Proud	400 A

- hodnoty uvedené v závorkách slouží pro simulaci vlivu průžařnosti a vlivu permeability na ohřev

Výpočet hloubky vniku:

$$a_1 = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma_1 \cdot \mu_0 \mu_{r1}}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 3 \cdot 10^7 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} \cong 2,2 \text{ mm}$$

$$a_2 = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma_2 \cdot \mu_0 \mu_{r2}}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 137 \cdot 10^4 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} \cong 16 \text{ mm}$$

Výpočet optimální tloušťky induktoru

$$d_{opt} = \frac{\pi}{2} \cdot a_1 = 1,57 \cdot 2,2 \cong 3,5 \text{ mm}$$

Výpočet výšky vodiče cívky pro zadanou proudovou hustotu v induktoru

$$l_{11} = \frac{I_1}{J_1 \cdot d_{opt}} = \frac{400}{8 \cdot 3,5} \cong 14 \text{ mm}$$

Určení počtu závitů podle výšky vodiče a mezer mezi závitů

$$N_1 = \frac{l_1}{2 \cdot l_{11}} = \frac{1100}{2 \cdot 14} \cong 45 \text{ závitů}$$

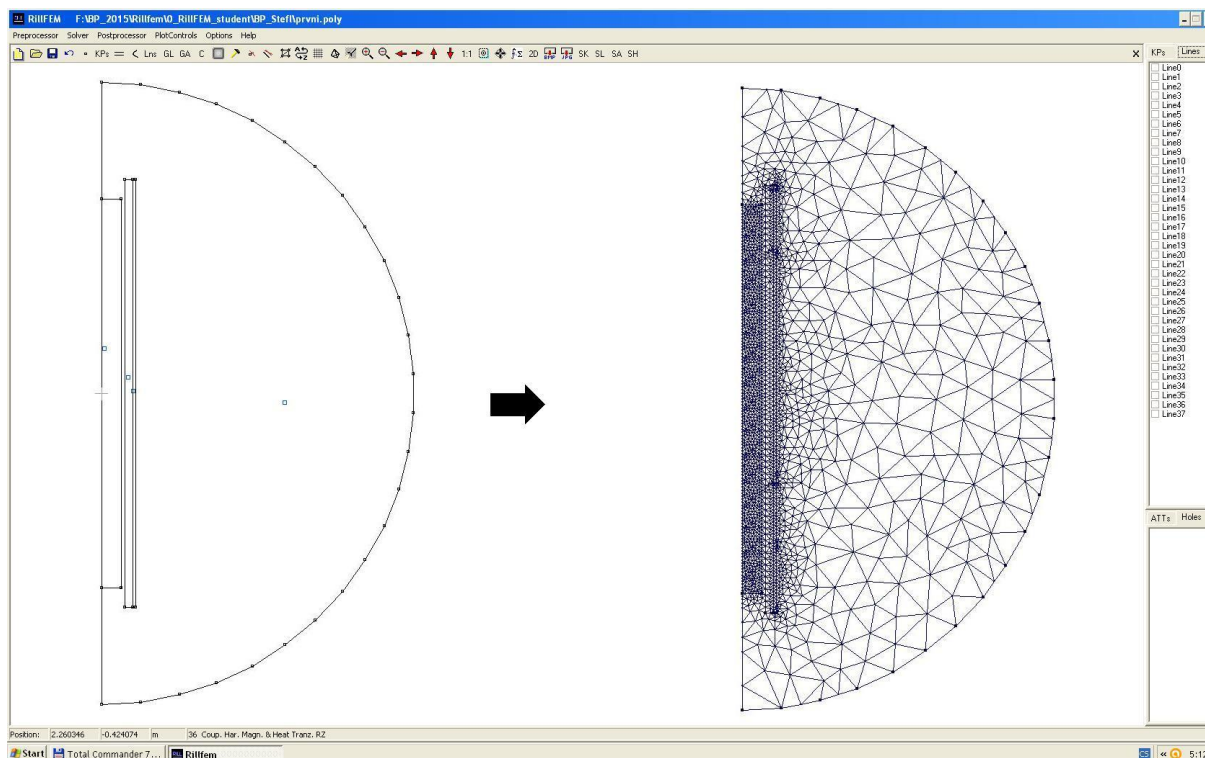
Zařízením pro indukční ohřev a mou simulaci byla zvolena indukční ohříváčka na prohřívání ocelových vývalků. Ohřívána ocel je simulovaná jako plný materiál a byla umístěna do středu induktoru. Byla použita keramická izolace pro oddělení ohřívané vsázky a induktoru, která se v praxi používá, aby žhavý materiál nesálal na stěnu cívky a nesnižoval tím účinnost. Vnější stínění cívky v tomto příkladu není použito, jelikož se zaměřuji na působení induktoru na vsázku.

4.2 Simulace pomocí softwaru Rillfem

K simulaci byl použit program RillFEM, který metodou konečných prvků počítá elektromagnetické, elektrostatické, teplotní a deformační pole. Vygenerují se diskretizační síť, vytvoří uzly a dle zadaných parametrů je software dále zpracovává.

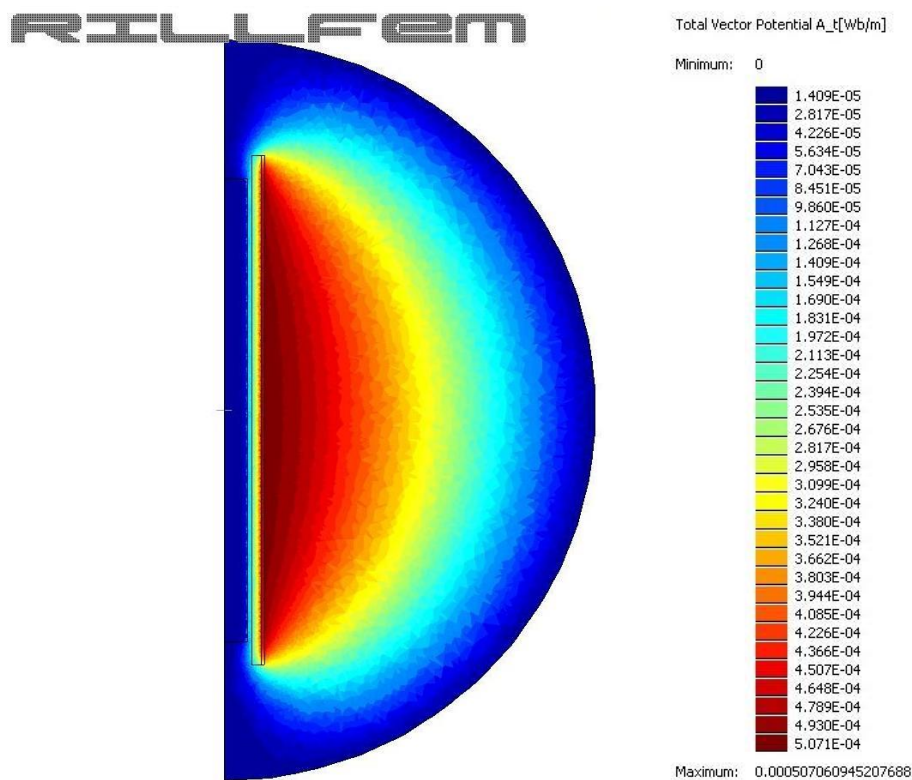
Prvním krokem zadání modelu je určení fyzikálního řešení, v mém případě se jedná o kvazistacionární magnetické a teplotní pole v souřadnicovém systému RZ. Následuje určení kmitočtu a celkové doby procesu s délkou kroku, která udává výsledné hodnoty časově proměnných veličin.

Model indukční ohříváčky je osově souměrný, zadání radiální souměrnosti v programu tedy postačuje k určení geometrických rozměrů jedné poloviny. Body se zadávají pomocí souřadnic $[x,y]$, střed je bodem $[0,0]$. Vzniklé body je následně nutno spojit a definovat jim okrajové podmínky. Pro hranici elektromagnetického modelu vnější vyšetřované oblasti jsem použil Dirichletovu okrajovou podmínku prvního druhu definující vektorový potenciál A roven nule. Pro hranici vsázky teplotního modelu na hraně totožné s osou systému jsem použil Neumannovu okrajovou podmínku druhého druhu, která zadává derivaci teploty T podle vnější normály n hranice rovnu nule. Na ostatní hrany vsázky jsem použil koeficienty sálání ε_2 a α_2 na rozhraní, určující přenos ztrát vedením a prouděním kolmém k hranicím vsázky.

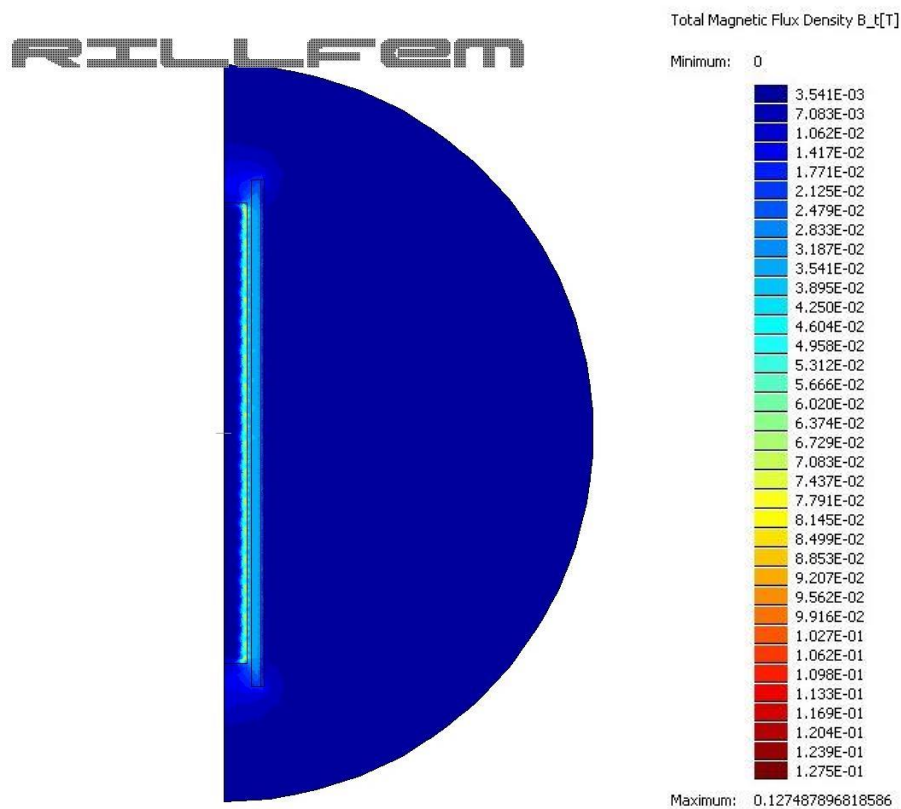


Obr. 4.1 Geometrický model po propojení bodů (vlevo) a vytvořená síť uzlů pomocí funkce MESH (vpravo)

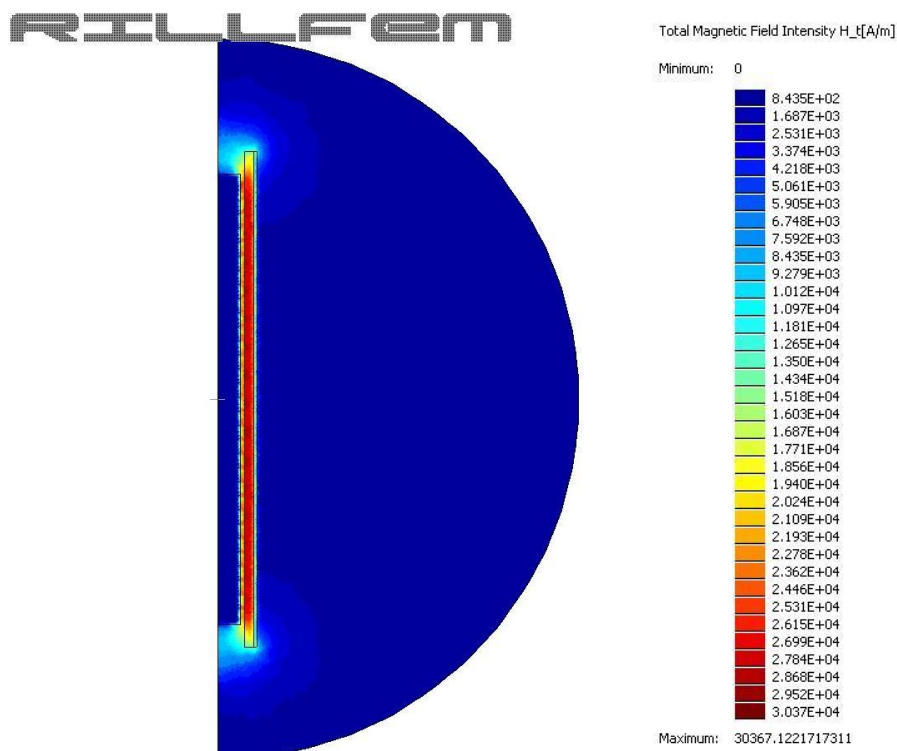
Pro určení materiálu má software vlastní databázi obsahující potřebné konstanty pro výpočty, které je možné měnit a sledovat tak vliv jejich změn na výsledných grafech. Zadal jsem tedy hodnoty pro induktor (měď), vsázku (ocel), okolí (vzduch) a vnitřní izolaci (keramika). Každý atribut je při výběru doprovázen specifikací počáteční teploty a proudu, který jsem zadal při výběru induktoru.



Obr. 4.2 Velikost vektorového potenciálu A , $A_{\max} = 0,0005 \text{ Wb}\cdot\text{m}^{-1}$



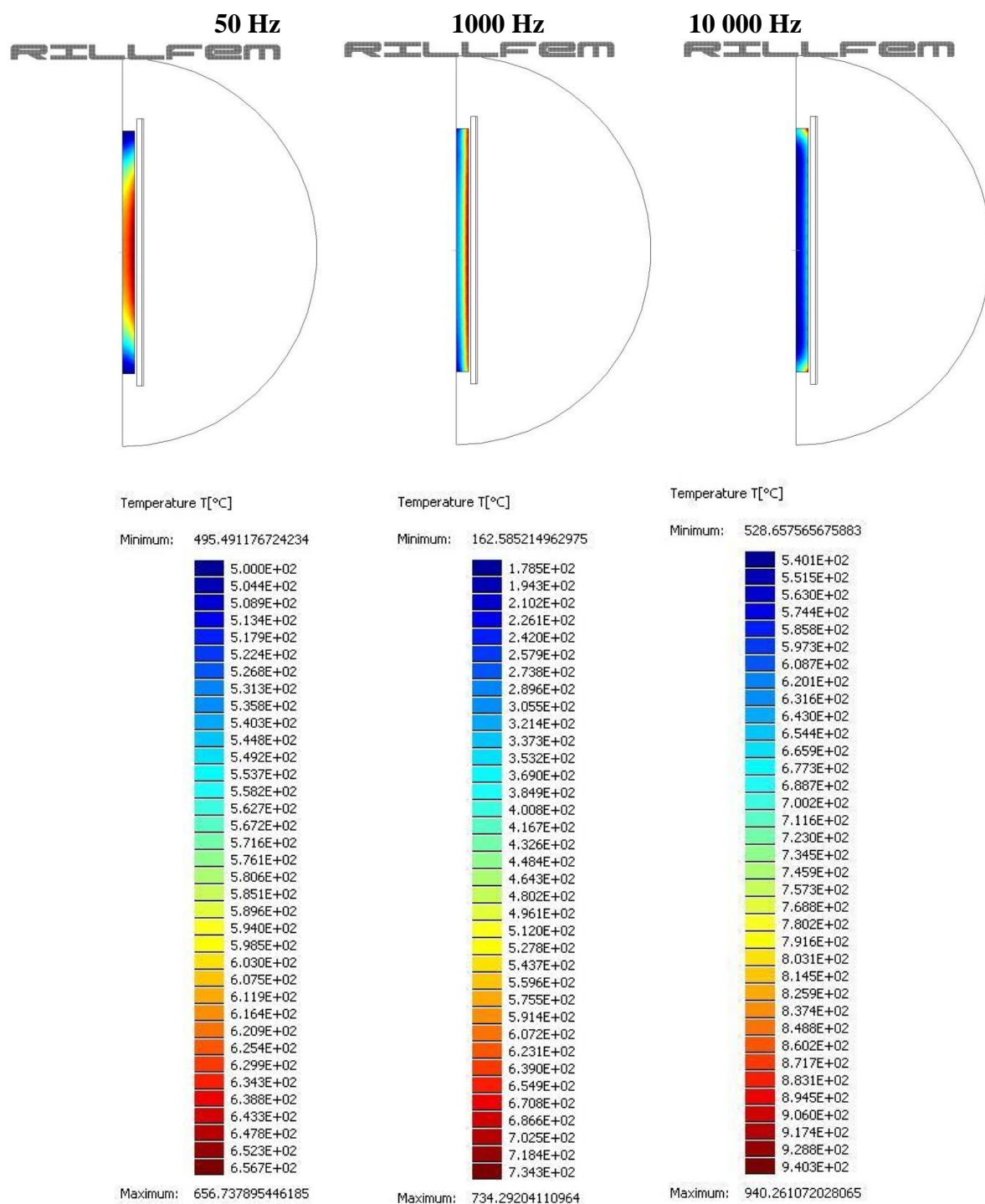
Obr. 4.3 Velikost magnetické indukce B , $B_{\max} = 0,13 \text{ T}$



Obr. 4.4 Velikost intenzity magnetického pole \mathbf{H} , $H_{max} = 30367 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$

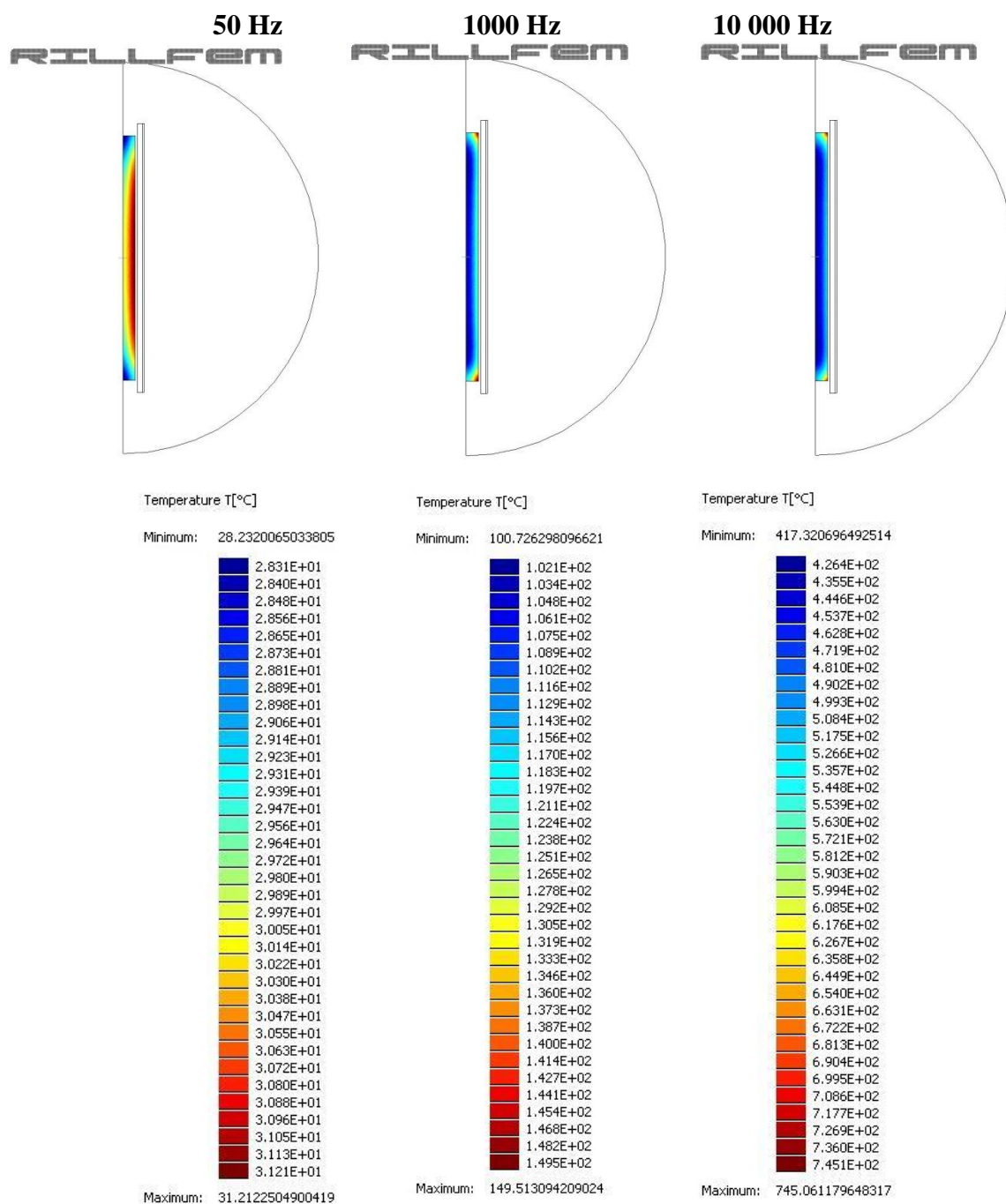
Následující obrázky 4.5 a 4.5 zachycují rozložení teplot při rozdílných kmitočtech napájeného induktoru. Nejdříve jsem tak učinil s magnetickou vsázkou o hodnotě $\mu_{r2} = 8000$ a pak pro porovnání vlivu permeability na ohřev také s nemagnetickou vsázkou s $\mu_{r2} = 1$. Průžažnost je viditelná v obou případech.

4.2.1 Vliv průžařnosti na ohřev ocelové vsázky při změně kmitočtu



Obr. 4.5 Rozložení teploty při ohřevu oceli o $\mu_{r2} = 8000$ v čase $t = 10$ min pro kmitočty 50, 1000 a 10 000 Hz

4.2.2 Vliv průzařnosti na ohřev nemagnetické vsázky při změně kmitočtu



Obr. 4.6 Rozložení teploty při ohřevu oceli (nerezová) o $\mu_{r2} = 1$ v čase $t = 10$ min pro kmitočty 50, 1000 a 10 000 Hz

5 Hodnocení a závěr

Vliv elektromagnetické průzařnosti při indukčním ohřevu byl prokázán. Ověřil jsem si pomocí simulace, že snížení kmitočtu proudu v induktoru napájeného generátorem zapříčiní průzařnost materiálu a slabé ohřátí vsázky, které je dáno malou hodnotou vířivých proudů vzniklých ve vsázce. Oproti tomu vyšší kmitočty způsobí vznik velkých vířivých proudů a tím i dosažení vyšších teplot. Z výstupů, které jsem získal pomocí počítačové simulace, je také viditelné rozložení teplot ve vodivé vsázce a místo jejich šíření. Zvýšený ohřev povrchu vsázky je viditelný u vyšších frekvencí.

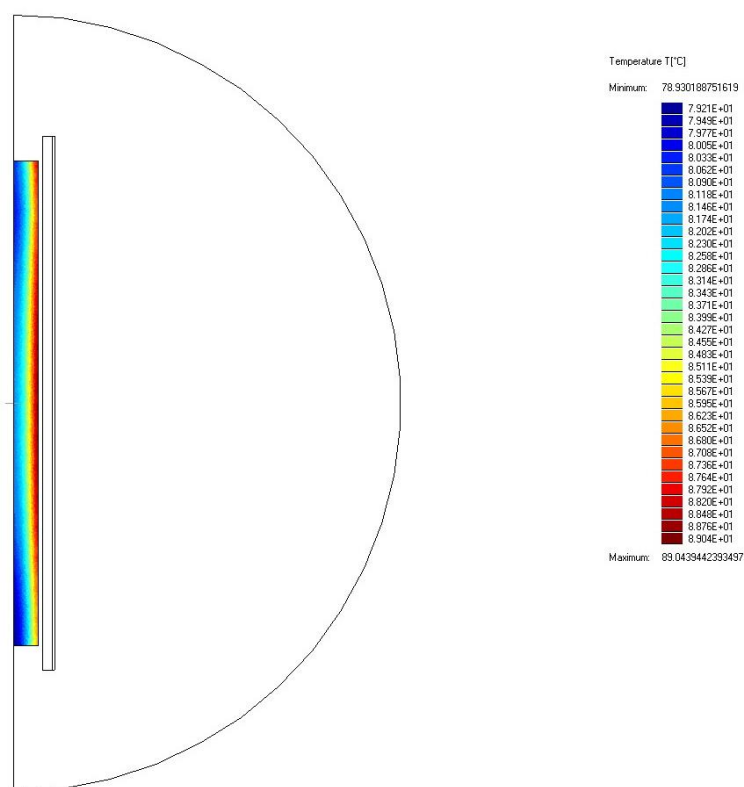
Simulaci jsem provedl i pro případ nemagnetické vsázky. Elektromagnetická průzařnost je v tomto případě znatelně vyšší a nebylo dosaženo takových teplot, jako jsem získal s magnetickou vsázkou. Hloubka vniku a_2 se zvýšila, jelikož je při výpočtu počítáno ve jmenovateli s $\mu_{r2} = 1$ a stěna neabsorbuje tolik výkonu. Pro nízké frekvence dochází ke stavu, kdy hloubka vniku a_2 je mnohonásobně větší než poloměr r_2 .

Jev elektromagnetické průzařnosti je při indukčních ohřevech nežádoucí, neboť má za následek v důsledku nesprávné volby kmitočtu ke geometrii vsázky její neefektivní ohřev. Řešením pro snížení průzařnosti může být zvětšení průměru vsázky při navrhování zařízení, aby došlo k vzniku vířivých proudů pro dostatečné ohřátí materiálu vsázky. Současně s tím by se zvýšila i reálná složka argumentu cylindrických funkcí x_2 vyjadřující poměr mezi poloměrem vsázky a hloubkou vniku. Omezení tohoto jevu při ohřevu válcové plné vsázky lze docílit také volbou kmitočtu ze vztahu $r_2 = (2,5-3) a_2$, který způsobí ohřev v celém průřezu (i když nerovnoměrně rozložený).

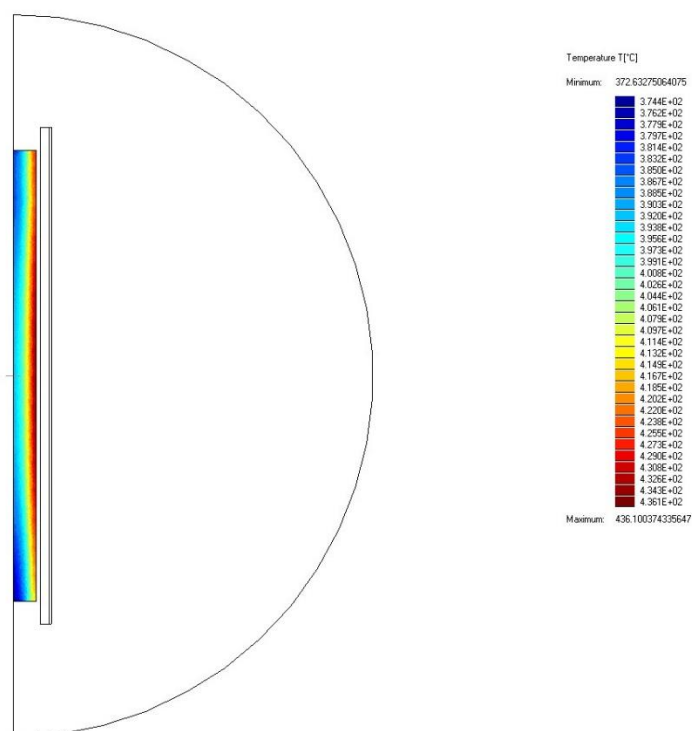
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RADA J., a kolektiv: Elektrotepelná technika. Praha: SNTL ALFA, 1985.
ISBN 04-525-35
- [2] LANGER, E a KOŽENÝ J.: Elektrotepelná zařízení indukční. Plzeň: VSŠE v Plzni, 1982. ISBN 55-095-82.
- [3] LANGER E.: Teorie indukčního a dielektrického tepla, Academia Praha 1979
- [4] HRADÍLEK Z. a kol. Elektrotepelná technika. Simulace – počítačové programy Ostrava VŠB-TU, 2001. ISBN 80-7078-874-7
- [5] HRADÍLEK Z., LÁZNIČKOVÁ I., KRÁL V.: Elektrotepelná technika. ČVUT 2011
ISBN 978-80-01-04938-9
- [6] KROUPA, Oldřich. Návrh a konstrukce zařízení pro měření parametrů elektromagnetického pole. Plzeň, 2007. Diplomová práce. ZČU.
- [7] HODEK J., PROCHÁZKA A.: www.rillfem.com – popis a funkce programu

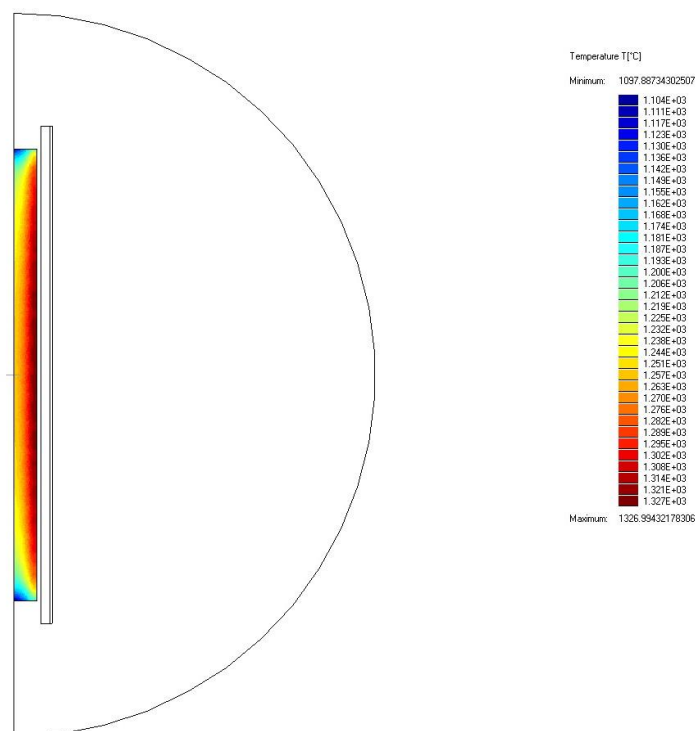
Přílohy



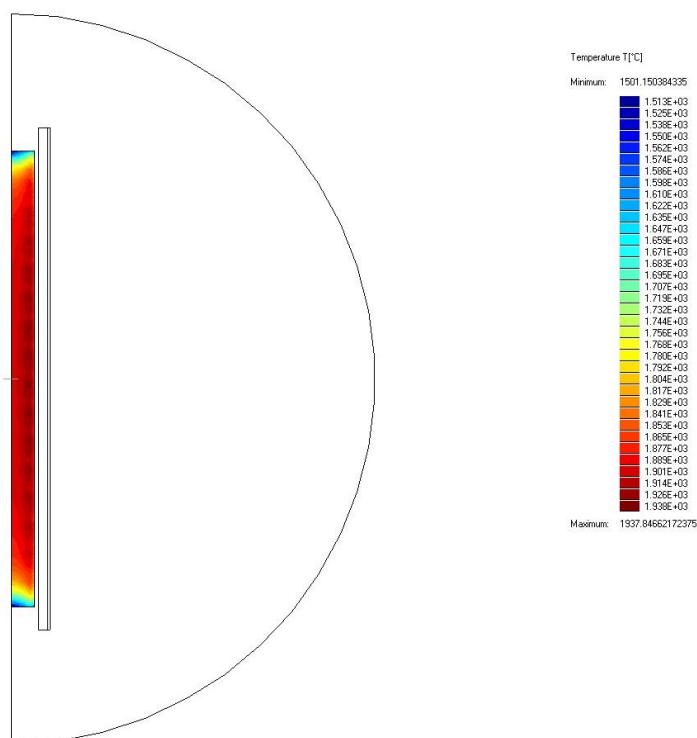
Obr. 7.1 Rozložení teploty při ohřevu oceli o $\mu_{r2} = 8000$ v čase $t = 10$ min pro proud cívkou $I_r = 10$ kA, $T_{max} = 89$ °C



Obr. 7.2 Rozložení teploty při ohřevu oceli o $\mu_{r2} = 8000$ v čase $t = 10$ min pro proud cívkou $I_r = 25$ kA, $T_{max} = 436$ °C



Obr. 7.3 Rozložení teploty při ohřevu oceli o $\mu_{r2} = 8000$ v čase $t = 10$ min pro proud cívkou $I_r = 50$ kA, $T_{max} = 1327$ °C



Obr. 7.4 Rozložení teploty při ohřevu oceli o $\mu_{r2} = 8000$ v čase $t = 10$ min pro proud cívkou $I_r = 75$ kA, $T_{max} = 1938$ °C