

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektromagnetická průzařnost při indukčních ohřevech

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Miroslav UHLÍŘ**
Osobní číslo: **E12N0145P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Elektromagnetická průzařnost při indukčních ohřevech**
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 stručně teorii ohřevu elektromagnetickou indukcí.
2. Objasněte teoreticky jev elektromagnetické průzařnosti.
3. Naznačte jeho praktické následky.
4. Uveďte možnosti k omezení vzniku průzařnosti.
5. Uveďte praktické příklady při prohřívání válcové vsázky a při tavení vsázky v indukční kelímkové peci, uveďte závěry pro praxi.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

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


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




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

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

V této diplomové práci se zabývám problematikou elektromagnetické průzařnosti při indukčních ohřevech. Hlavním cílem práce je popsat elektromagnetickou průzařnost, její následky a omezení jejího vzniku. Na začátku práce jsem stručně popsal teorii ohřevu elektromagnetickou indukcí. Na závěr práce uvádím praktické příklady při prohřívání válcové vsázky a při tavení vsázky v indukční kelímkové peci.

Klíčová slova

Indukční ohřev, induktor, indukční pec, Maxwellovy rovnice, hloubka vniku naindukovaných proudů, elektromagnetická průzařnost, válcová vsázka, kelímková indukční pec, prohřívání válcové vsázky, povrchové kalení

Abstract

Title: Electromagnetic transparency effect during induction heating

This thesis deals with issue of electromagnetic transparency effect during induction heating. Main objective of the work is to describe electromagnetic transparency effect, its consequences and limiting formation of the phenomenon. In the introduction is briefly depicted the theory of electromagnetic induction heating. In the conclusion of work are mentioned practical examples of the effect during cylindrical charge heating and casting batch in crucible induction furnace.

Key words

Induction heating, inductor, induction furnace, Maxwell's equation, penetration depth of induced currents, electromagnetic transparency effect, cylindrical charge, crucible induction furnace, warming cylindrical charge, surface hardening

Prohlášení

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

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 2. 5. 2014

Bc. Miroslav Uhlíř

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jiřímu KOŽENÉMU, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Obsah	7
Použité symboly.....	9
Úvod.....	11
1 Základy ohřevu elektromagnetickou indukcí	12
1.1 Hloubka vniku naindukovaných proudů.....	13
1.2 Magnetické a nemagnetické látky.....	14
1.2.1 Střední hodnota relativní permeability	16
1.3 Matematický model indukčního ohřevu	18
1.3.1 Harmonické elektromagnetické vlnění	20
1.3.2 Poyntingův vektor.....	20
1.4 Válcové elektromagnetické vlnění.....	21
1.4.1 Množství naindukovaného tepla P_{21}	24
1.4.1.1 Přímé odvození P_{21}	24
1.4.1.2 Nepřímé odvození P_{21}	25
1.5 Napájení indukčního ohřevu	26
1.5.1 Zdroj o síťové frekvenci	26
1.5.2 Tyristorový měnič kmitočtu.....	27
2 Elektromagnetická průžařnost	28
2.1 Teorie a následky elektromagnetické průžařnosti	29
2.2 Omezení vzniku průžařnosti	31
2.2.1 Použití metody „tavení se zbytkem“	32
2.3 Příklady výpočtu optimálního kmitočtu	32
2.3.1 Ohřívání válcové vsázky o poloměru 50 mm	32
2.3.1.1 Pro síťový kmitočet 50 Hz.....	33
2.3.1.2 Pro kmitočet 100 Hz	34
2.3.1.3 Pro kmitočet 200 Hz	35
2.3.1.4 Pro kmitočet 400 Hz	36
2.3.1.5 Pro kmitočet 700 Hz	37
2.3.1.6 Pro kmitočet 1 kHz	38
2.3.2 Optimální kmitočet pro válcovou vsázku s poloměrem 50 mm	39
3 Indukční zařízení a jeho praktické příklady	40

3.1	Prohřívací indukční zařízení	40
3.1.1	Ohřev tyčového materiálu.....	41
3.1.1.1	Středofrekvenční ohříváč tyčí SOT 750/10	41
3.1.2	Ohřev přířezů	42
3.1.2.1	Kompaktní středofrekvenční ohříváče přířezů	42
3.1.3	Ohřev konců tyčového materiálu	44
3.1.3.1	Středofrekvenční indukční ohříváč SOT 400/2,1	44
3.1.3.2	Středofrekvenční indukční ohříváč SOR 120/20.....	45
3.1.4	Indukční povrchový ohřev válce (kalení)	46
3.2	Indukční kelímková pec	47
3.2.1	Indukční tavící pece ISTOL.....	51
3.3	Další používané indukční zařízení	52
3.3.1	Kanálková indukční pec.....	52
3.3.2	Indukční ohřevy pro svařování a pájení.....	53
	Závěr	54
	Seznam použité literatury a informačních zdrojů	55
	Seznam obrázků, tabulek a příloh.....	58
	Přílohy.....	60

Použité symboly

symbol	veličina	jednotka
H	intenzita magnetického pole	[A.m ⁻¹]
B	magnetická indukce	[T]
E	intenzita elektrického pole	[V.m ⁻¹]
J	proudová hustota	[A.m ⁻²]
L	indukčnost cívky	[H]
R	elektrický odpor	[Ω]
I	elektrický proud	[A]
P	činný elektrický výkon	[W]
γ	konduktivita	[S.m ⁻¹]
ρ	rezistivita	[Ω.m]
μ ₀	permeabilita vakua	[H.m ⁻¹]
μ _r	relativní permeabilita	[-]
μ _{stř}	střední relativní permeabilita	[-]
ε ₀	permitivita vakua	[F.m ⁻¹]
ε _r	relativní permitivita	[-]
k	konstanta šíření	[-]
α	fázová konstanta	[-]
β	měrný útlum	[-]
η	účinnost	[%]
h	vzdutí vsázky	[m]
ω	úhlový kmitočet	[rad.s ⁻¹]
f	kmitočet	[Hz]
a ₂	hloubka vniku	[m]
t	čas	[s]
N	počet závitů	[-]
l	délka	[m]
S	plocha, průřez	[m ²]
ρ	hustota	[kg.m ⁻³]
r, r ₂	poloměr	[m]
Δr	rozdíl poloměrů	[m]
S	zářivý vektor	[W/m ²]

v	rychlost šíření vlnění	[m/s]
α	teplotní součinitel rezistivity	[K ⁻¹]
ϑ, T	teplota	[°C]
d, D	průměr	[m]
m	hmotnost	[kg]
ΔT	rozdíl teplot	[°C]
x_2	argument válcové vsázky	[-]
V	objem	[m ³]
W_m	magnetická energie	[J/m]
$\cos \varphi$	účinník	[-]
C_1, C_2	integrační konstanty	[-]
$J(x), N(x)$	cylindrické funkce	[-]

Důležité konstanty

permitivita vakua: $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ [F.m-1]

permeabilita vakua: $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ [H.m-1]

Ludolfovo číslo: $\pi= 3,1415$

Rozlišení veličin

Skalární veličiny jsou psané *kurzívou*.

Vektorové veličiny jsou psané **tučně** *kurzívou*.

Fázory jsou označeny **tučně** *kurzívou* a s pruhem nad veličinou, např. \bar{U} .

Matematické operátory

∇ Hamiltonův operátor (nabla)

Δ Laplaceův operátor

div divergence

grad gradient

rot rotace

Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou indukčního ohřevu a hlavně se zaměřuje na elektromagnetickou průžařnost ohřívané vsázky. Indukčně ohřívát se dají pouze elektricky vodivá tělesa. Indukční ohřev je jeden z nejmodernějších způsobů ohřevu a používá se hlavně ve strojírenství, a to od 20. let minulého století.

U indukčního ohřevu vzniká teplo přímo ve vsázce (ohříváný materiál) a nemusí se dopravovat tepelným spádem, vsázka je nejteplejší místo soustavy. Tento způsob se nazývá přímý ohřev, jako je tomu u přímého odporového ohřevu při přímém průchodu proudu. Indukční ohřev je velice rychlý a přesný, tím šetříme čas a energii. Přesnost je dána hloubkou vniku naindukovaných proudů a je regulována hlavně kmitočtem. Indukční ohřev se používá hlavně pro tavení, povrchové kalení a prohřívání.

Elektromagnetická průžařnost je nežádoucí jev indukčního ohřevu, v této práci teoreticky vysvětlím tento jev, objasním jeho následky a stanovím možnosti jeho omezení.

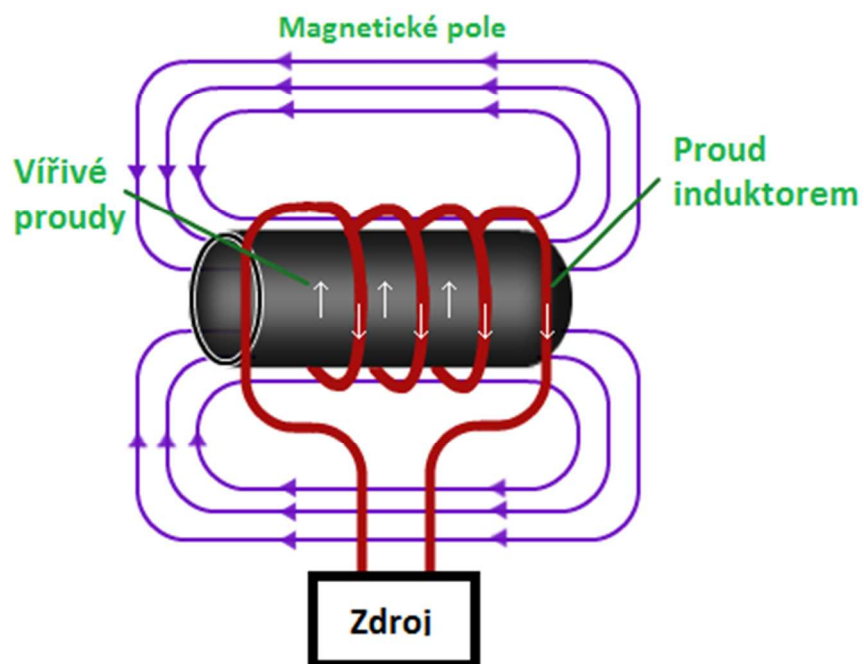
Diplomová práce obsahuje 3 kapitoly o celkovém počtu 65 stran. Za každým odstavcem, tabulkou a popisem obrázku je odkaz na použitou literaturu, jejíž seznam se nachází na konci práce.



Obr. 0.1 Indukční ohřev vsázky [15]

1 Základy ohřevu elektromagnetickou indukcí

Každé indukční zařízení sestává z induktoru, vsázky a zdroje střídavého proudu. Vsázku vložíme do induktoru vhodného tvaru, pro nejlepší účinnost by měly závitky induktoru kopírovat tvar vsázky. Induktor, a jakýkoliv jiný vodič při průchodu střídavého proudu vyzařuje elektromagnetické vlnění, část vlnění je přijímána vsázkou a část se odrazí. Vlnění ve vsázce poté indukuje vířivé proudy. Vlnění naindukované do vsázky se utlumí a jeho energie se přemění na teplo. [5]



Obr. 1.1 Princip indukčního ohřevu [16]

Tento typ ohřevu se dá přirovnat k transformátoru, přičemž jeho sekundární strana má jeden závit zapojený nakrátko. [1]

1.1 Hloubka vniku naindukovaných proudů

Ve vsázce díky vysokému kmitočtu proudu vzniká tzv. povrchový jev - skin efekt. Čím vyšší je frekvence proudu, tím je užší pásmo na okraji vsázky, kde vířivé proudy protékají. Tato vrstva se nazývá hloubka vniku naindukovaných proudů a_2 a spotřebuje se v ní 86,47 % činného výkonu P_{2l} (na 99,57 % výkonu připadá trojnásobek a_2). Hloubka vniku naindukovaných proudů je závislá na frekvenci f , relativní permeabilitě μ_r a na měrném elektrickém odporu ρ vsázky. Měrný elektrický odpor je závislý na teplotě dle vztahu:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha * \Delta T) [\Omega * m] \quad (1.1)$$

Kde ρ_0 je počáteční rezistivita, α je teplotní součinitel elektrického odporu a ΔT je rozdíl mezi uvažovanou teplotou a 20 °C. Vztah pro výpočet relativní hloubky vniku pronikání elektromagnetického vlnění do vsázky je:

$$a_2 = 503,3 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} \text{ [m]} \quad (1.2)$$

Pro představu jak se mění hloubka vniku a_2 u konstrukční oceli při 20 °C.

- 50 Hz = 8 mm
- 1 kHz = 1,8 mm
- 10 kHz = 0,56 mm
- 1 MHz = 56 μ m

A při 800 °C.

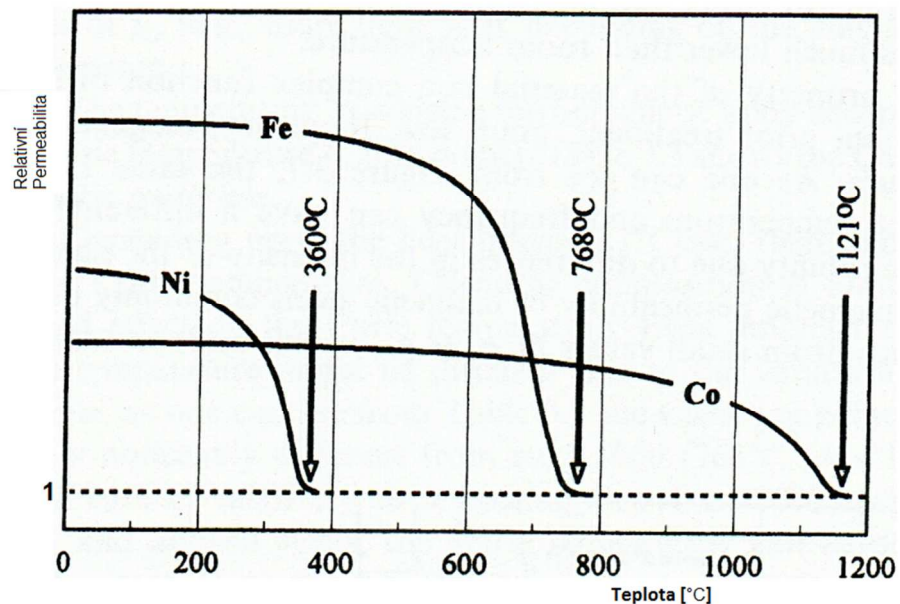
- 50 Hz = 71,2 mm
- 1 kHz = 15,9 mm
- 10 kHz = 5 mm
- 1 MHz = 0,5 mm

[4], [8]

1.2 Magnetické a nemagnetické látky

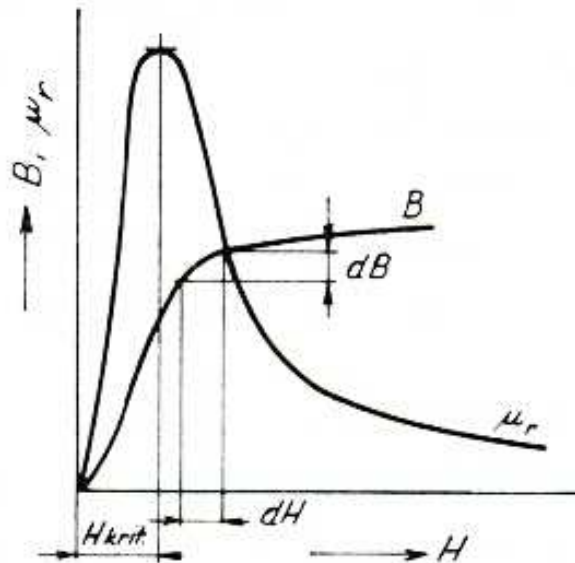
Materiály se rozdělují na nemagnetické (diamagnetické, paramagnetické) a magnetické (feromagnetické). [11]

- Diamagnetické látky jsou složeny z diamagnetických atomů a mají relativní permeabilitu o trochu menší než 1. Diamagnetické látky zeslabují magnetické pole. Do této skupiny patří například měď. [11]
- Paramagnetické materiály obsahují paramagnetické atomy a jejich relativní permeabilita je o trochu větší než 1. Magnetické pole nepatrně zesilují a patří sem například hliník. [11]
- Feromagnetické materiály obsahují také paramagnetické atomy, ale v uspořádání, které zesiluje magnetické pole vícenásobně. Permeabilitu mají o hodně vyšší než 1. Mezi feromagnetické látky patří například železo, nikl a kobalt. Každá feromagnetická látka má svoji Curieovu teplotu. Je to teplota, kdy ztratí své feromagnetické vlastnosti (stane se paramagnetickou látkou s relativní permeabilitou blížíící se 1). [11] V grafu na obr. 1.2 je graficky znázorněna závislost teploty a relativní permeability u železa, niklu a kobaltu. Šipky značí Curieův bod.



Obr. 1.2 Závislost teploty a relativní permeability pro železo, nikl, kobalt [6]

Všechny nemagnetické látky a látky magnetické zahřáté nad Curieův bod mají konstantní relativní permeabilitu, to znamená, že magnetická indukce B je závislá na intenzitě magnetického pole H lineárně. U magnetických látek do Curieova bodu (například u oceli je přibližně 760 °C) B nezávisí na H lineárně ($B \neq \mu H$), ale magnetická indukce je dána magnetizační charakteristikou $B=f(H)$. Klasický průběh $B=f(H)$ je zobrazen na obrázku 1.3. [1]



Obr. 1.3 Závislost μ_r na H a magnetizační křivka [1]

Podle obrázku magnetizační charakteristiky můžeme napsat.

$$d\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r d\mathbf{H} \rightarrow \mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{d\mathbf{B}}{d\mathbf{H}} \quad (1.3)$$

\mathbf{H} je závislé na čase t díky střídavému napájecímu proudu a na vzdálenosti od povrchu ohřívaného materiálu x (díky vířivým demagnetizačním proudům).

$$H = F_1(t; x) \quad (1.4)$$

$$B = f(H) = f(F_1(t; x)) \quad (1.5)$$

Dosadíme do (1.3).

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{d(f(F_1(t; x)))}{d(F_1(t; x))} \quad (1.6)$$

Ze vztahu je vidět, že μ_r stejně jako H je závislé na čase t a na vzdálenosti x . Řešení Maxwellových rovnic za těchto podmínek by bylo velice náročné. Zjednodušujícími předpoklady jsou:

- 1) Sinusový průběh H závislý na čase.
- 2) μ_r se bude rovnat střední hodnotě.

[1]

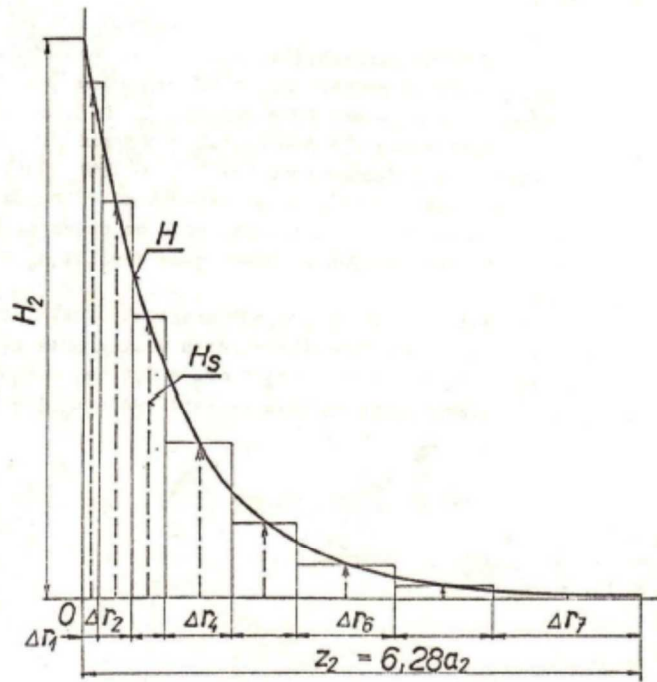
1.2.1 Střední hodnota relativní permeability

Střední hodnotu relativní permeability určujeme pouze při ohřevu materiálu do jeho magnetické přeměny (Curieova bodu). Pro ocel je tento bod přibližně 760 °C. Uvažování střední permeability není tedy vhodné pro tavení oceli, při tavení počítáme s permeabilitou 1, kdy je vsázka už roztavená. Naopak je tomu při žhání oceli po svařování, kdy je žhací teplota 600 – 630 °C. Pro vyšší účinnost ohřevu, například při prohřívání a kalení válcové ocelové vsázky, je vhodné použít dvojí kmitočty. Kmitočty pro ohřev před Curieovým bodem a po něm. [2], [12], [1]

Máme-li hloubku vniku naindukovaných proudů u válcové vsázky mnohem menší než je poloměr, můžeme uvažovat místo válcového vlnění rovinné vlnění. Čím větší je vzdálenost od povrchu vsázky, tím je menší magnetická intenzita H a to dle vztahu (1.7), kde H_2 je magnetická intenzita na povrchu, x je vzdálenost od povrchu a a_2 je hloubka vniku naindukovaných proudů. Pro průběh intenzity magnetického pole platí: [2]

$$H = H_2 \cdot e^{\frac{-x}{a_2}} \quad (1.7)$$

Pro odvození střední permeability $\mu_{stř}$ nejdříve zvolíme permeabilitu μ_v , která by měla být v závěru odvození přibližně stejná jako $\mu_{stř}$. Nebude-li podobná, provedeme celý výpočet znova. Pro zvolenou hodnotu μ_v , spočítáme hloubku vniku naindukovaných proudů a poté určíme magnetickou intenzitu H dle vztahu (1.7), pro zvyšující se vzdálenost x od povrchu. Vsázku si rozdělíme dle grafu na obr. 1.4 na souosé vrstvy Δr_1 , Δr_2 , Δr_3 , atd. Na vodorovné ose je vzdálenost od povrchu x a na svislé je magnetická intenzita H_2 . Uvažujeme pouze vrstvu od poloměru r_2 do poloměru r_4 . Ve vrstvě z_2 se utlumí elektromagnetické vlnění. [2]



Obr. 1.4 Graf názorného rozdělení vsázky [2]

Odvození je prováděno na osovou délku jeden metr. Dále vypočítáme magnetickou energii W_m v objemu V , dle vztahu:

$$W_m = \frac{1}{2} \mu_0 \int_0^V \mu_r \cdot H^2 \cdot dV = \frac{1}{2} \mu_0 \int_{r_2}^{r_4} \mu_r \cdot H^2 \cdot 2\pi r \cdot dr \cdot l \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (1.8)$$

Místo integrálu použijeme sumátor, tím vypočítáme magnetickou energii v každé vrstvě s šířkou Δr . Pro každou vrstvu máme střední hodnotu magnetické intenzity H_s (jak je znázorněno v grafu na obr. 1.4), střední hodnotu permeability μ_s a střední hodnotu r_s . Magnetickou energii ve vrstvě od r_2 po r_4 vypočítáme dle vztahu (1.9). H_s vypočítáme ze vztahu (1.3) a μ_s dostaneme po dosazení H_s do grafu na obr. 1.5. [2]

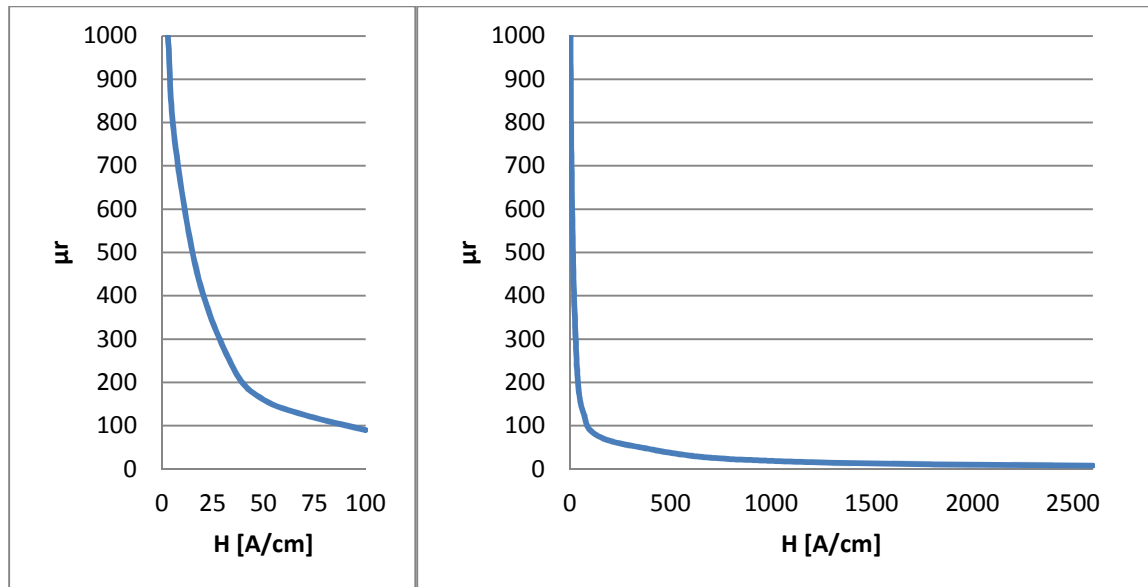
$$W_{m1} = \frac{1}{2} \mu_0 \sum_{r=r_2}^{r_4} \mu_s \cdot H_s^2 \cdot 2\pi r_s \cdot \Delta r \cdot l \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (1.9)$$

V dalším kroku spočítáme stejný vztah, ale s tím rozdílem, že místo všech μ_s dosadíme $\mu_{stř}$. [2]

$$W_{m2} = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_{stř} \sum_{r=r_2}^{r_4} H_s^2 \cdot 2\pi r_s \cdot \Delta r \cdot l \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (1.10)$$

Z rovnosti magnetických energií $W_{m1} = W_{m2}$ se vytkne $\mu_{stř}$ a po úpravě vznikne závěrečný vztah: [2]

$$\mu_{stř} = \frac{\sum_{r=r_2}^{r_4} \mu_s \cdot H_s^2 \cdot r_s \cdot \Delta r}{\sum_{r=r_2}^{r_4} H_s^2 \cdot r_s \cdot \Delta r} \quad (1.11)$$



Obr. 1.5 Graf závislosti magnetické intenzity a permeability [2]

1.3 Matematický model indukčního ohřevu

Základem teorie indukčního ohřevu je elektrodynamika. Vlnové rovnice pro šíření elektromagnetického vlnění se odvozují ze čtyř Maxwellových rovnic, které jsou níže napsány. Maxwellovy rovnice jsou v diferenciálním tvaru a v prostředí bez vnitřních zdrojů elektřiny (ρ v třetí rovnici je rovno nule). [1]

$$1. \text{rot } \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1.12)$$

$$2. \text{rot } \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (1.13)$$

$$3. \text{div } \varepsilon \mathbf{E} = 0 \quad (1.14)$$

$$4. \text{div } \mu \mathbf{H} = 0 \quad (1.15)$$

Na první a druhé rovnici provedeme rotaci.

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{E}) = -\mu \frac{\partial}{\partial t}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) \quad (1.16)$$

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \gamma(\operatorname{rot} \mathbf{E}) + \varepsilon \frac{\partial}{\partial t}(\operatorname{rot} \mathbf{E}) \quad (1.17)$$

Na pravých stranách za $\operatorname{rot} \mathbf{H}$ a $\operatorname{rot} \mathbf{E}$ dosadíme první dvě Maxwellovy rovnice.

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{E}) = -\gamma\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.18)$$

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.19)$$

Tvar $\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{E})$ přepíšeme jako $\operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$ a upravíme. Stejně tak u \mathbf{H} .

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} = -\gamma\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.20)$$

$$\operatorname{grad}(\operatorname{div} \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H} = -\gamma\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.21)$$

Za divergenci dosadíme ze třetí a čtvrté Maxwellovy rovnice a upravíme.

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma\mu \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (1.22)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (1.23)$$

Dostali jsme obecné rovnice pro šíření elektromagnetické vlnění. Za operátor nabla ∇^2 , neboli Laplaceův Δ můžeme dosadit pravoúhlé souřadnice:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1.24)$$

Nebo válcové souřadnice:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (1.25)$$

Při řešení rovnic pro elektricky nevodivé prostředí zanedbáme γ a pro vodivé prostředí zanedbáme ε , tím se nám rovnice značně zjednoduší. [1]

Rychlost šíření elektromagnetického vlnění v elektricky nevodivém prostředí se vypočítá podle vztahu:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon \cdot \mu}} \quad (1.26)$$

[1]

1.3.1 Harmonické elektromagnetické vlnění

Vlnové rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění dostaneme dosazením fázorů.

Fázory $\bar{\mathbf{H}}$ a $\bar{\mathbf{E}}$:

$$\bar{\mathbf{E}} = \mathbf{E}e^{j\omega t} \quad (1.27)$$

$$\bar{\mathbf{H}} = \mathbf{H}e^{j\omega t} \quad (1.28)$$

Ve vlnových rovnicích (1.22) a (1.23) jsou první a druhé časové derivace. Provedeme derivaci fázorů $\bar{\mathbf{H}}$ a $\bar{\mathbf{E}}$.

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{E}}}{\partial t} = j\omega \mathbf{E}e^{j\omega t} = j\omega \bar{\mathbf{E}} \quad (1.29)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{E}}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mathbf{E}e^{j\omega t} = -\omega^2 \bar{\mathbf{E}} \quad (1.30)$$

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{H}}}{\partial t} = j\omega \mathbf{H}e^{j\omega t} = j\omega \bar{\mathbf{H}} \quad (1.31)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{\mathbf{H}}}{\partial t^2} = -\omega^2 \mathbf{H}e^{j\omega t} = -\omega^2 \bar{\mathbf{H}} \quad (1.32)$$

Po dosazení derivací do původních vlnových rovnic po úpravě vzniknou obecně platné rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění:

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (1.33)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + k^2 \bar{\mathbf{E}} = 0 \quad (1.34)$$

Přičemž $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon - j\omega \mu \gamma$, k je konstanta šíření elektromagnetického vlnění ve vodivém nebo nevodivém prostředí.

$$k = \alpha - j\beta \quad (1.35)$$

$$k^2 = \alpha^2 - j2\alpha\beta - \beta^2 \quad (1.36)$$

α je fázová konstanta

β měrný útlum

[3] [1]

1.3.2 Poyntingův vektor

Poyntingův vektor, neboli zářivý vektor, se často používá pro výpočty indukčních ohřevů a přídatných ztrát vinutí strojů. Určuje výkon daného objemu V , připadající na jednotku plochy S . Směr vektoru je stejný jako směr šíření energie a je kolmý na plochu, kde leží

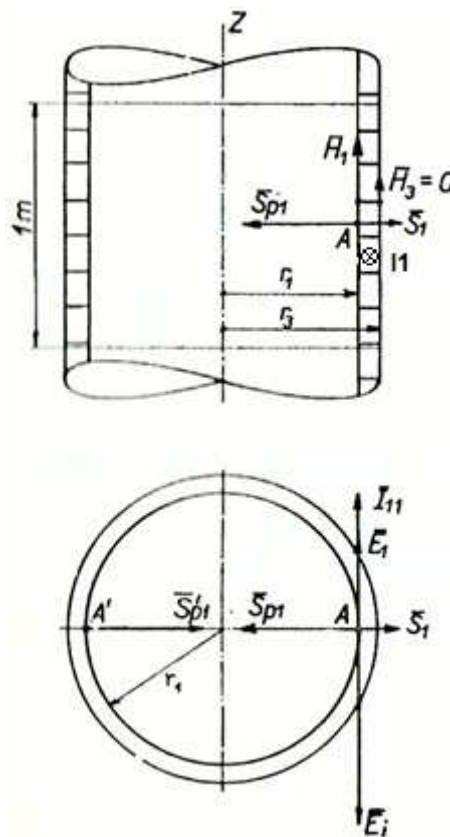
vektor intenzity elektrického pole \mathbf{E} a vektor intenzity magnetického pole \mathbf{H} . Spočítáme jej dle vztahu: [1]

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1.37)$$

Při výpočtu dostaneme reálnou (činný výkon) a imaginární část (magnetizační výkon). Zjištění směru Poyntingerova vektoru stanovíme pravidlem levé ruky. Prsty ukazují směr \mathbf{E} , do dlaně vstupuje \mathbf{H} a palec ukazuje směr vektoru \mathbf{S} . [1]

1.4 Válcové elektromagnetické vlnění

„Zdrojem válcového elektromagnetického vlnění je válcová plocha o poloměru r_1 , nekonečné délky, protékaná střídavým proudem tak, že proudová vlákna leží v rovinách kolmých k ose válce“ (Langer, 1979, s. 113). Válcová cívka je navinuta z vodiče obdélníkového tvaru, se zanedbaným stoupáním a nulovou mezizávitovou mezerou. Další předpoklad je nekonečná rychlost šíření proudové vlny. Na obr. 1.6 je znázorněno schéma válcové cívky, její osa splývá s osou z cylindrického souřadného systému. [5]



Obr. 1.6 Uvažovaná válcová cívka a její řez [5]

Vektor intenzity magnetického pole \mathbf{H} , intenzity elektrického pole \mathbf{E} a Poyntingův \mathbf{S} nezávisí na úhlu natočení φ ale pouze na poloměru r v kterémkoliv bodě A . Proud \mathbf{I}_{II} je poměr z celkového proudu \mathbf{I}_I . Vztahuje na délku vsázky jeden metr o N_{II} závitěch. [5]

$$\mathbf{I}_{II} = \mathbf{I}_I * N_{II}[\text{A/m}] \quad (1.38)$$

Intenzita elektrického pole \mathbf{E}_I je ve stejném směru jako proud \mathbf{I}_{II} a je kolmá na intenzitu magnetického pole \mathbf{H}_I . Na rovině těchto dvou vektorů je kolmý zářivý vektor \mathbf{S}_I , který proniká do vinutí a určuje ztráty v cívce. Po vybuzení magnetického toku proudem \mathbf{I}_{II} se v závitěch cívky indukují napětí \mathbf{E}_i , které je opačné proti intenzitě \mathbf{E}_I . Poyntingův zářivý vektor \mathbf{S}_{pI} míří směrem do středu dutiny cívky a je tvořen intenzitou magnetického pole \mathbf{H}_I a indukovaným napětím \mathbf{E}_i . [5]

Při odvozování rovnic válcového elektromagnetického vlnění vyjdeme z obecných rovnic (1.33) a (1.34). [5]

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{H}} + k^2 \bar{\mathbf{H}} = 0 \quad (1.39)$$

$$\nabla^2 \bar{\mathbf{E}} + k^2 \bar{\mathbf{E}} = 0 \quad (1.40)$$

Laplaceův operátor $\nabla^2 \bar{\mathbf{H}}$ se převede do válcových souřadnic. Vektor Laplaceova operátoru musí být ve směru osy z válcového souřadného systému. Ve směru osy je pouze vektor intenzity magnetického pole \mathbf{H} . Napíšeme obecný vztah pro $\nabla^2 \mathbf{H}$. [5]

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2}. \quad (1.41)$$

Jelikož intenzita magnetického pole závisí pouze na poloměru r , derivace podle z a φ budou nulové. Zkrácený vztah je:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial r}{\partial r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} + \frac{1}{r} r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \quad (1.42)$$

Tento výraz dosadíme do obecné rovnice (1.39).

$$\frac{d^2 \mathbf{H}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\mathbf{H}}{dr} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (1.43)$$

Po vydělení konstantou šíření elektromagnetického vlnění k^2 a malé úpravě dostaneme Besselovu diferenciální rovnici nultého řádu pro argument (kr) .

$$\frac{d^2 \mathbf{H}}{d(kr)^2} + \frac{1}{(kr)} \frac{d\mathbf{H}}{d(kr)} + \mathbf{H} = 0 \quad (1.44)$$

Řešením Besselovy diferenciální rovnice je lineární kombinace cylindrických funkcí. [5]

$$\mathbf{H} = C_1 J_0(kr) + C_2 N_0(kr) \quad [\text{A/m}] \quad (1.45)$$

kde C_1 a C_2 jsou integrační konstanty

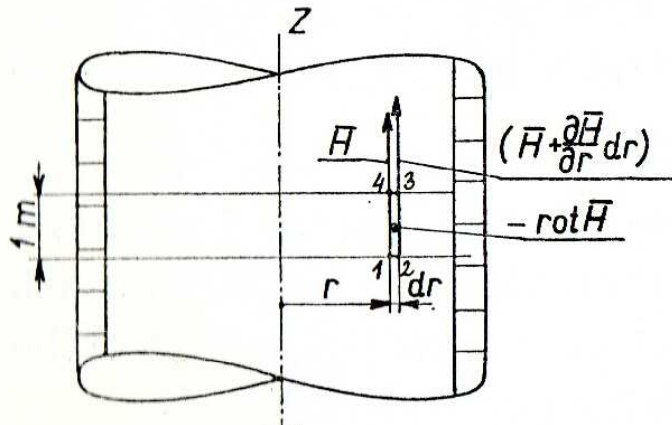
$J_0(kr)$ je Besselova funkce 1. druhu, nultého řádu, argumentu (kr)

$N_0(kr)$ Neumannova funkce 2. druhu, nultého řádu, argumentu (kr)

Tímto jsme dostali vztah pro intenzitu magnetického pole \mathbf{H} v místě A o poloměru r . Vztah pro intenzitu elektrického pole \mathbf{E} získáme z 1. Maxwellovi rovnice. [5]

$$\text{rot } \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + j\omega \varepsilon \mathbf{E} = (\gamma + j\omega \varepsilon) \mathbf{E} \quad (1.46)$$

Rot \mathbf{H} odvodíme z obr. 1.7.



Obr. 1.7 Odvození rot \mathbf{H} [5]

V obrázku je vyznačený elementární obdélník o straně dr a výšce l metr. Na poloměru r je vyznačena intenzita H . Zvětšíme-li poloměr o dr , zvětší se intenzita H o diferenciál na $H + \frac{\partial H}{\partial r} dr$. Rot \mathbf{H} určíme rozdílem intenzit při dr a r , a podílem plochy obdélníku. Rot \mathbf{H} je záporná, jelikož její vektor vystupuje směrem k nám a proti ose má záporný smysl. [5]

$$\text{rot } H = - \frac{\left(H + \frac{\partial H}{\partial r} dr\right) l - H l}{l \cdot dr} = - \frac{\partial H}{\partial r} \quad (1.47)$$

Výslednou rotaci \mathbf{H} dosadíme do (1.46) a vytkneme intenzitu elektrického pole \mathbf{E} .

$$\mathbf{E} = \frac{-1}{\gamma + j\omega \varepsilon} * \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \quad (1.48)$$

Vztah (1.45) pro intenzitu magnetického pole dosadíme do posledního vzorce a derivujeme obě cylindrické funkce podle poloměru r . Výsledný vztah pro intenzitu elektrického pole je: [5]

$$\mathbf{E} = \frac{k}{\gamma + j\omega\varepsilon} * [\mathbf{C}_1 J_1(kr) + \mathbf{C}_2 N_1(kr)] \quad [V/m] \quad (1.49)$$

Provedené derivace cylindrických funkcí podle r :

$$\frac{d[J_0(kr)]}{dr} = -kJ_1(kr) \quad a \quad \frac{d[N_0(kr)]}{dr} = -kN_1(kr) \quad (1.50)$$

Průběhy Besselových a Neumannových funkcí jsou zobrazeny v příloze 4. [5], [1] A jsou vyjádřeny řadami:

$$J_0(kr) = 1 - \frac{kr^2}{2^2} + \frac{kr^4}{(2*4)^2} - \frac{kr^6}{(2*4*6)^2} + \frac{kr^8}{(2*4*6*8)^2} - \dots \quad (1.51)$$

$$N_0(kr) = \frac{2}{\pi} \left(\gamma + \ln \frac{kr}{2} \right) J_0(kr) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(m!)^2} \left(\frac{kr}{2} \right)^m \sum_{k=1}^m \frac{1}{k} \quad (1.52)$$

[5]

1.4.1 Množství naindukovaného tepla P_{21}

Teplu ve vsázce vzniká při průchodu vířivých proudů, které jsou v ní indukovány. Odvození naindukovaného tepla je odvozeno přímo nebo nepřímo. [5]

1.4.1.1 Přímé odvození P_{21}

Tento způsob vychází z obr. 1.8, je zde vyznačen proudový element, jehož délka je obvod $(2\pi r)$ a průřez je $1 * dr$. Protéká jím proud spočítaný z průřezu a proudové hustoty \mathbf{J} . [5]

$$dI_{21} = (1 * dr) * J \quad (1.53)$$

Odpor vyznačeného elementu je:

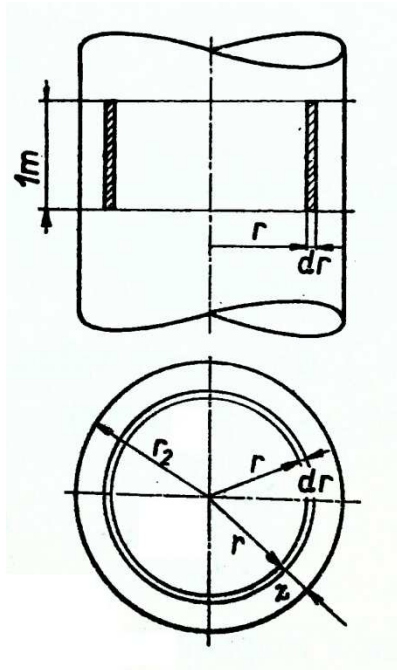
$$dR_{21} = \rho \frac{2\pi r}{1 * dr} \quad (1.54)$$

Množství tepla dP_{21} , neboli Joulových ztrát ve vyznačeném elementu:

$$dP_{21} = dR_{21} \frac{1}{2} dI_{21}^2 = \rho \frac{2\pi r}{dr} * \frac{1}{2} J^2 dr^2 = \pi \rho J^2 r * dr \quad (1.55)$$

Po integraci posledního vztahu získáme množství tepla ve vsázce o délce 1 m a poloměru r_2 . [5]

$$P_{21} = \pi \rho \int_0^{r_2} J^2 r dr \tag{1.56}$$



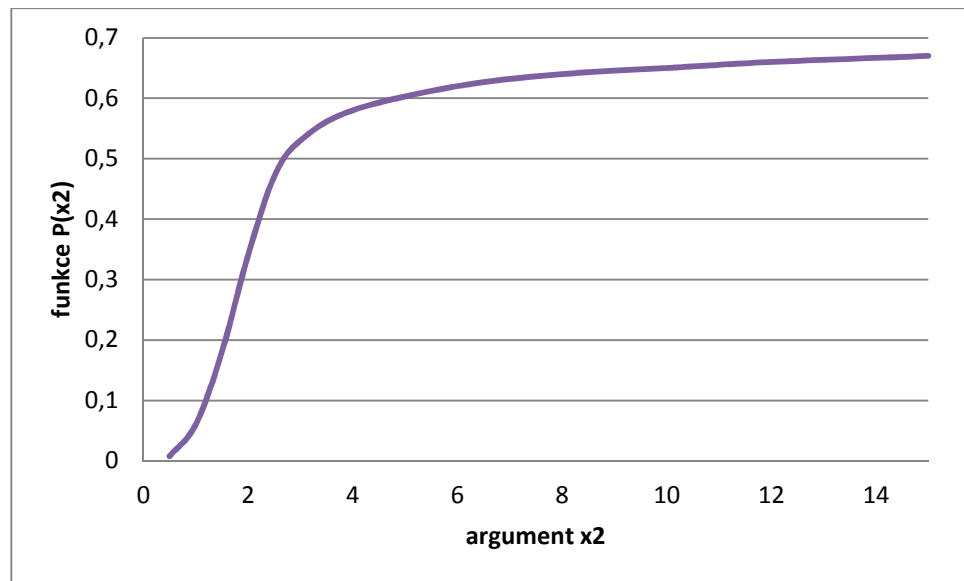
Obr. 1.8 Přímé odvození P_{21} [5]

Tato metoda je málo používaná, díky složitosti integrování funkce proudové hustoty J . Nepřímé odvození je jednodušší se stejnými výsledky. [5]

1.4.1.2 Nepřímé odvození P_{21}

Tento způsob se používá u transformátorů. Na primární stranu se převede impedance sekundární strany, tedy činný odpor vsázky převedený do cívky. Závislost funkce $P(x_2)$ a argumentu x_2 je zobrazena v obr. 1.9. [5]

$$R_{21} = \frac{2\pi x_2}{\gamma} N_{11}^2 P(x_2) \tag{1.57}$$



Obr. 1.9 Závislost funkce $P(x_2)$ na argumentu x_2 [5]

Dále vypočítáme Joulovy ztráty s proudem který teče pracovní cívkou. [5]

$$P'_{21} = \frac{1}{2} R_{21} * I_1^2 = \frac{\pi x_2}{\gamma} N_{11}^2 P(x_2) * I_1^2 \quad (1.58)$$

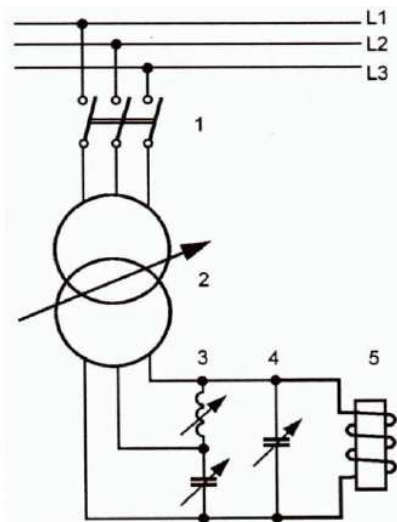
1.5 Napájení indukčního ohřevu

V dnešní době je hlavním napájecím prvkem indukčního ohřevu tyristorový měnič kmitočtu. Dále je ho možno napájet přímo ze síťové frekvence, takto je napájena například kanálková indukční pec. [1]

Mezi nejstarší zdroje indukčního ohřevu patří zubové rotační měniče. Rotační měnič je složen z asynchronního motoru a generátoru. Budící vinutí statoru je napájeno stejnosměrným proudem a v pracovním vinutí statoru se indukuje střídavý proud. Dle otáček se mění kmitočet, ten bývá 0,5 až 10 kHz. [1], [2]

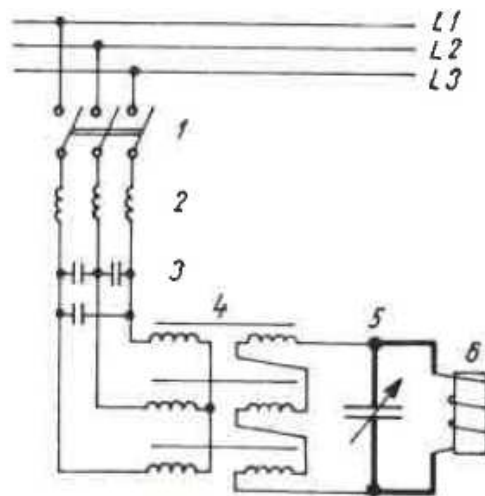
1.5.1 Zdroj o síťové frekvenci

Na obr. 1.10 je znázorněno schéma zdroje proudu o kmitočtu 50 Hz. Schéma obsahuje výkonový spínač 1, regulační třífázový transformátor 2, symetrikační obvod pro symetrické namáhání všech fází 3, kondenzátorová baterie 4 a ohřívací induktor se vsázkou 5. [1]



Obr. 1.10 Schéma zdroje 50 Hz pro indukční ohřev [1]

Modifikací tohoto zdroje byl dříve používán trojnásobič síťového kmitočtu, který je zobrazen na obr. 1.11. Schéma je obdobné, hlavní rozdíl je v zapojení transformátoru 4. Jádru transformátoru je přesycené a zapojení vinutí je hvězda – otevřený trojúhelník. Dále obsahuje cívky 2 pro odstranění vyšších harmonických proudů a kondenzátory 3 pro kompenzaci jalového proudu. Výstupní kmitočet zdroje je 150 Hz. [1]

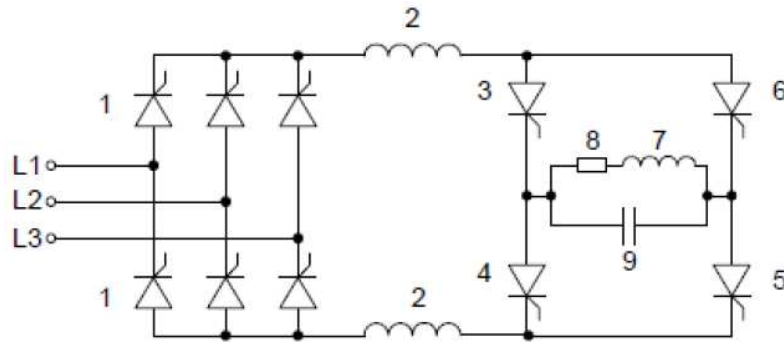


Obr. 1.11 Trojnásobič kmitočtu [1]

1.5.2 Tyristorový měnič kmitočtu

Tyristorový měnič vyniká svojí účinností, která je přibližně 95 %, na rozdíl od rotačních měničů, které mají přibližně 82 %. Schéma zapojení obvodu tyristorového měniče je znázorněno na obr. 1.12. [2]

Na vstupu je šest tyristorů 1, které pracují jako trojfázový usměrňovač napětí. Meziobvod obsahuje tlumivky 2, které vyhlazují usměrněný proud z usměrňovače, absorbují napěťové rozdíly mezi usměrňovačem a střídačem, oddělují střídavou a stejnosměrnou stranu a omezují nárůst proudu. Tyristory 3 až 6 pracují jako střídačový můstek, na výstupu vytvářejí střídavý proud, tím že se skupiny tyristorů střídají ve vedení proudu. V jednom taktu je sepnuta skupina 3 a 5 v druhém 6 a 4. Podle rychlosti spínání těchto skupin se mění kmitočet. Výstup obsahuje pracovní induktor 7, činnou zátěž pece 8 a kompenzační kondenzátor 9. [2], [1]



Obr. 1.12 Schéma tyristorového měniče [1]

V příloze 1. je znázorněna tabulka s řadou tyristorových měničů, které vyrábí firma Roboterm. U jednotlivých typů jsou zobrazeny minimální a maximální kmitočty, výkony a provozní napětí. [17]

V příloze 2. je fotografie skříně tyristorového měniče kmitočtu TMK - F2. Skříň se skládá ze dvou částí. V levé je usměrňovač, střídač, startovací obvod, vyhlazovací tlumivka, svorkovnice, přepěťové ochrany, čidla napětí, proudu a teploty vody. V pravé části je čerpadlo s vodním chladičem a ovládací obvody. [17]

V současné době se používají také měniče kmitočtu například s výkonnými tranzistory IGBT. [3],

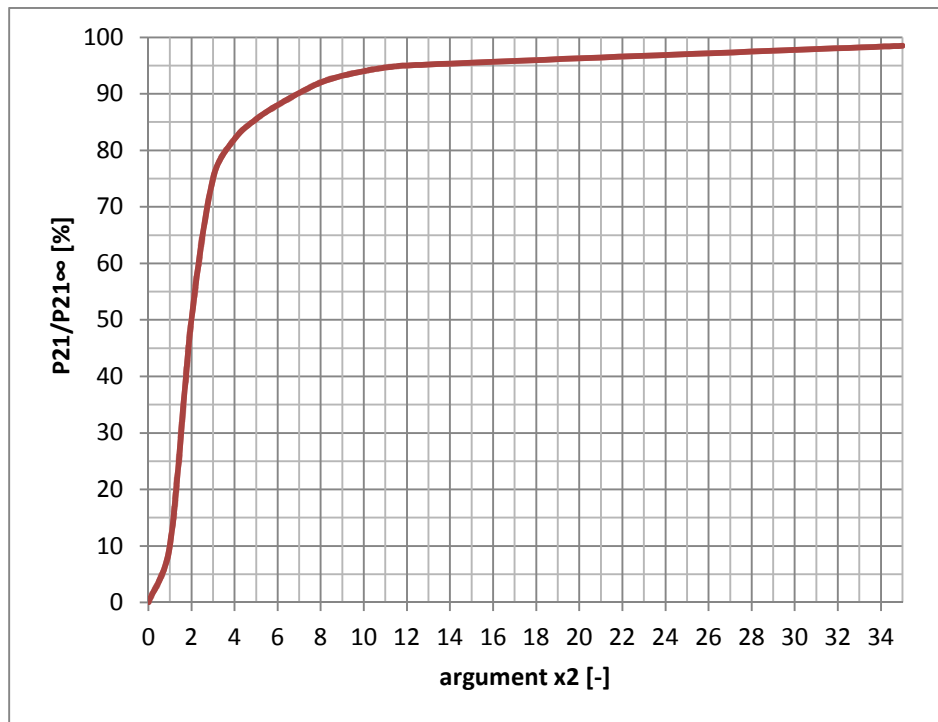
2 Elektromagnetická průžařnost

Elektromagnetická průžařnost je nežádoucí jev při indukčních ohřevech. Může nastat při špatně zvolené hloubce vniku naindukovaných proudů a_2 vůči poloměru ohříváné válcové vsázky r_2 . Při výpočtech používáme argument x_2 válcové vsázky, který vypočítáme: [2]

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} \quad [-] \quad (2.1)$$

Argument x_2 závisí na poměru elektromagnetické energie, která se přemění na teplo P_{21} ve vsázce. Závislost je znázorněna v grafu na obr. 2.1. Z grafu je vidět, že při malém argumentu

x_2 , je malý poměr přeměněného tepla a vsázka je průzařná. Elektromagnetické vlnění přes vsázku projde, ale na teplo se přemění pouze malá část z něj. [2]



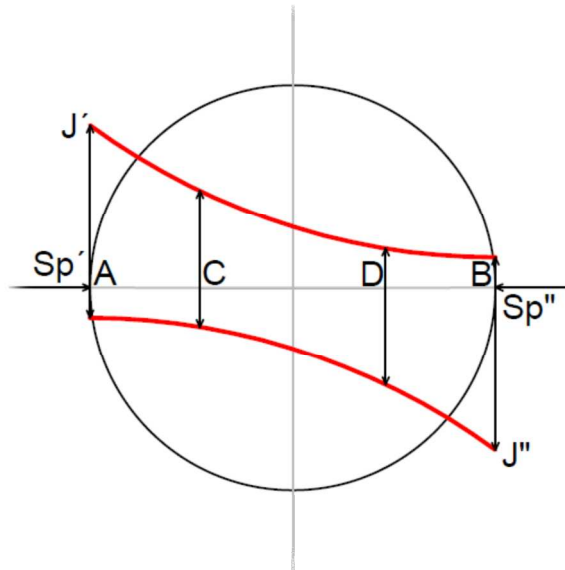
Obr. 2.1 Závislost argumentu x_2 a poměr tepla přeměněného ve vsázce [2]

Přeměněné teplo P_{21} ve válcové vsázce se vypočítá dle vztahu (2.1). Závisí na argumentu válcové vsázky x_2 , intenzitě magnetického pole H_2 na povrchu vsázky a na funkci $P(x_2)$. [2]

$$P_{21} = \rho \pi x_2 \cdot P(x_2) \cdot H_2^2 \quad [\text{W/m}] \quad (2.2)$$

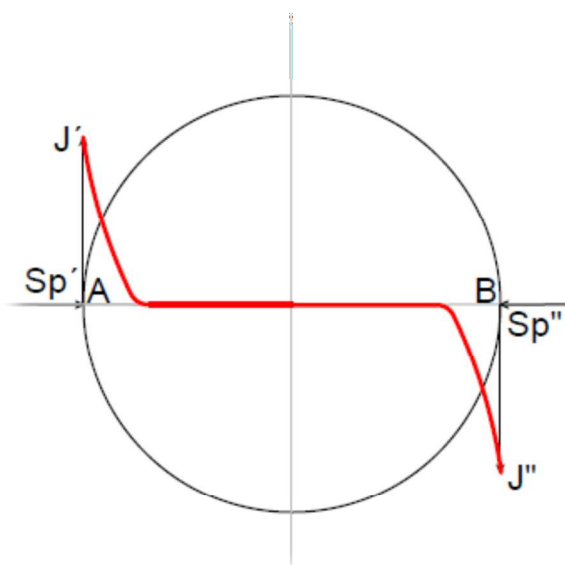
2.1 Teorie a následky elektromagnetické průzařnosti

Při zvolení malého kmitočtu, tedy velké hloubky vniku naindukovaných proudů, válcová vsázka bude průzařná. Tento případ je zobrazen na obr. 2.2. V protilehlých bodech A a B na válcovou vsázku dopadají Poyntingovy zářivé vektory \mathbf{S}_p' z levé strany a \mathbf{S}_p'' z pravé strany. Po dopadu elektromagnetického vlnění na povrch vsázky se ve vsázce indukují vířivé proudy, jejich hustoty jsou v obrázku označeny \mathbf{J}' a \mathbf{J}'' . Jelikož je vsázka průzařná, je argument x_2 malý. Hustoty vířivých proudů v bodech C a E jsou opačného směru a jejich výslednice je dána jejich rozdílem. Po odečtení je výsledný proud malý a tím je menší i množství naindukovaného tepla P_{21} (dle grafu na obr. 2.1). [2]



Obr. 2.2 Schéma průzařné válcové vsázky [2]

Při zvolení vysokého kmitočtu, tedy malé hloubky vniku naindukovaných proudů, se nám budou vířivé proudy indukovat pouze v slabé vrstvě na povrchu vsázky. Zde se nám bude vsázka přehřívat a do osy vsázky bude teplo prostupovat pouze vedením. Prodlouží se tím doba ohřevu a sníží se efektivita. Vhodné je to pouze pro povrchové kalení, ale ne pro prohřívání celé vsázky. Na obr. 2.3 je znázorněn případ s malou hloubkou vniku a_2 a velikým argumentem x_2 . Z obrázku vidíme, že vlnění se utlumí přibližně v jedné třetině poloměru. Hustoty vířivých proudů se neovlivňují a nemusí se odečítat. Vyvinuté množství tepla, bude skoro stoprocentní, jak je vidět z grafu na obr. 2.1. [1],[2]



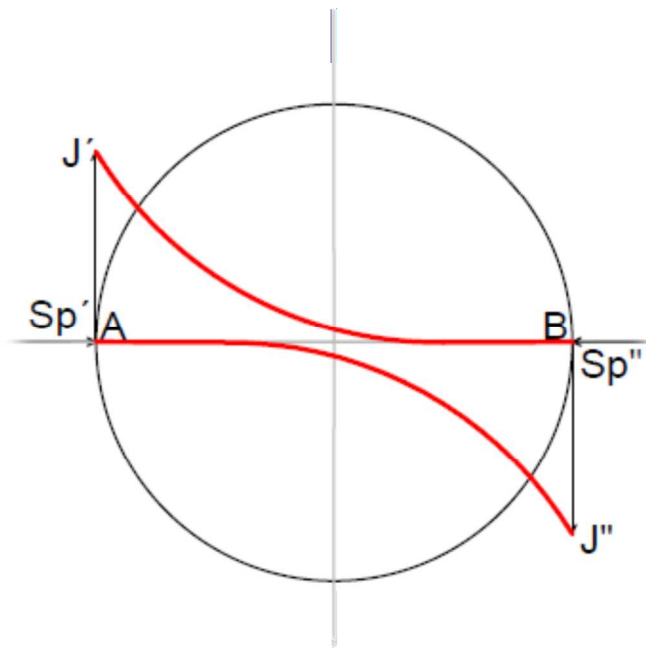
Obr. 2.3 Schéma povrchově ohříváné válcové vsázky [2]

2.2 Omezení vzniku průzařnosti

Pro nejrychlejší a nejefektivnější prohřátí vsázky hledáme případ mezi průzařností a povrchovým ohřevem. Takový případ nastává při zvolení hloubky vniku naindukovaných proudů 2,5 až 3 krát menší, než je poloměr vsázky r_2 . [2] Platí tedy vztah:

$$r_2 = (2,5 \div 3) a_2 \quad (2.3)$$

Pro vztah (2.3), pak platí průběhy znázorněné na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Schéma optimálního prohřátí válcové vsázky [2]

Je vidět, že hustoty proudů jsou v ose vsázky velmi malé a téměř se neovlivňují, na rozdíl od případu na obr. 2.2. Argument x_2 pro tento případ určíme z rovnic (2.1) a (2.3). Za poměr r_2/a_2 dosadíme střední hodnotu 2,75. [2]

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \cdot \sqrt{2} = 2,75 \cdot \sqrt{2} = 3,89 [-] \quad (2.4)$$

Pro argument $x_2=3,89$ odvodíme z grafu na obr. 2.1 množství naindukovaného tepla. Na teplo je přeměněno 83 % dopadajícího elektromagnetického vlnění.

Když dosadíme hloubku vniku naindukovaných proudů do vztahu (2.3), určíme vzájemný vztah mezi poloměrem r_2 a kmitočtem f . Do vztahu pro hloubku vniku dosadíme hodnoty rezistivity $\rho=1,2 \cdot 10^{-6}$ a relativní permeability $\mu_r=1$ pro ocel při 1000 °C. [2]

$$r_2 = 2,75 \cdot 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}} = 2,75 \cdot 503,3 \cdot \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{-6}}{f \cdot 1}} \text{ [m]}$$

$$r_2 = 1,516 \cdot \frac{1}{\sqrt{f}} \text{ [m]} \quad (2.5)$$

Elektromagnetické vlnění se po vstupu do vsázky utlumí přibližně v šestinásobku hloubky vniku naindukovaných proudů a_2 . [3]

$$d_2 = 6 * a_2 \quad (2.6)$$

2.2.1 Použití metody „tavení se zbytkem“

Při tavení oceli v kelímkových pecích určujeme správný kmitočet tavení stejně jako u prohřívacích zařízení. Potřebujeme-li tavit velmi malé průzařné kusy, různé velikosti, použijeme metodu zvanou „tavení se zbytkem“. Tato metoda spočívá v přisypání průzařné vsázky do již roztavené taveniny. V peci je zapotřebí nejprve roztavit neprůzařné kusy oceli. Drobné kusy se ohřejí vedením a prouděním tepla z taveniny do drobné vsázky. Po roztavení se drobné kusy ohřívají už indukčně. Při nasypání drobných kusů se tavenina v peci ochladí, po dosažení původní teploty můžeme přisypávat další kusy průzařné vsázky až do naplnění pece. [10]

2.3 Příklady výpočtu optimálního kmitočtu

2.3.1 Ohřívání válcové vsázky o poloměru 50 mm

Výpočet bude proveden pro ohřívání ocelové válcové vsázky o průměru 100 mm. Induktor bude napájen proudy o kmitočtech: 50, 100, 200, 400, 700, 1000 Hz. Vlastnosti oceli jsou uvedené v tab. 1.

Tab. 1. Vlastnosti konstrukční oceli [3], [18]

Teplota [°C]	20	800
Měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot \text{m}$]	$0,15 \cdot 10^{-6}$	$0,61 \cdot 10^{-6}$
Relativní permeabilita [-]	100	1

V tabulce jsou hodnoty pro dvě teploty, první je při pokojové teplotě a pod Curieovým bodem. Druhá je nad Curieovým bodem.

Hodnoty dosadíme do vztahů (1.2), (2.1), (2.6) a počítáme pro různé kmitočty.

2.3.1.1 Pro síťový kmitočet 50 Hz

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,15 * 10^{-6}}{100 * 50}} = 0,0027 \text{ m} = 2,7 \text{ mm}$$

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,61 * 10^{-6}}{1 * 50}} = 0,055 \text{ m} = 55,59 \text{ mm}$$

Argument x_2 pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{2,7} \sqrt{2} = 25,65$$

Argument x_2 pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{55,6} \sqrt{2} = 1,27$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 2,7 = 16,2 \text{ mm}$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 55,59 = 333,5 \text{ mm}$$

Pro frekvenci 50 Hz, při teplotě 20°C vyšla hloubka vniku naindukovaných proudů 2,7 mm. Poté je možno odečíst z grafu na obr. 2.1 hodnoty poměrného tepla P_{2l} . Ve vsázce se na teplo přemění 97 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 16,2 mm. Vsázka se bude ohřívat na povrchu a dále bude teplo postupovat vedením a prouděním.

Pro teplotu 800°C je hloubka vniku naindukovaných proudů 55,5 mm. Ve vsázce se na teplo přemění 19 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 333,5 mm. Vsázka bude elektromagneticky průžařná.

2.3.1.2 Pro kmitočet 100 Hz

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,15 * 10^{-6}}{100 * 100}} = 0,0019 \text{ m} = 1,9 \text{ mm}$$

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,61 * 10^{-6}}{1 * 100}} = 0,039 \text{ m} = 39,3 \text{ mm}$$

Argument x_2 pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{1,9} \sqrt{2} = 36,28$$

Argument x_2 pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{39,3} \sqrt{2} = 1,8$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 1,9 = 11,6 \text{ mm}$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 39,3 = 235,8 \text{ mm}$$

Pro frekvenci 100 Hz, při teplotě 20°C vyšla hloubka vniku naindukovaných proudů 1,9 mm. Poté je možno odečíst z grafu na obr. 2.1 hodnoty poměrného tepla P_{2l} . Ve vsázce se na teplo přemění 99 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 11,6 mm. Vsázka se bude ohřívat na povrchu a dále bude teplo postupovat vedením a prouděním.

Pro teplotu 800°C je hloubka vniku naindukovaných proudů 39,3 mm. Ve vsázce se na teplo přemění 44 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 235,8 mm. Vsázka bude elektromagneticky průžařná.

2.3.1.3 Pro kmitočet 200 Hz

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,15 * 10^{-6}}{100 * 200}} = 0,0013 \text{ m} = 1,3 \text{ mm}$$

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,61 * 10^{-6}}{1 * 200}} = 0,027 \text{ m} = 27,7 \text{ mm}$$

Argument x_2 pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{1,3} \sqrt{2} = 51,3$$

Argument x_2 pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{27,7} \sqrt{2} = 2,54$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 1,3 = 8,27 \text{ mm}$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 27,7 = 166,7 \text{ mm}$$

Pro frekvenci 200 Hz, při teplotě 20°C vyšla hloubka vniku naindukovaných proudů 1,3 mm. Poté je možno odečíst z grafu na obr. 2.1 hodnoty poměrného tepla P_{2l} . Ve vsázce se na teplo přemění 99,9 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 8,27 mm. Vsázka se bude ohřívat na povrchu a dále bude teplo postupovat vedením a prouděním.

Pro teplotu 800°C je hloubka vniku naindukovaných proudů 27,7 mm. Ve vsázce se na teplo přemění 64 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 166,7 mm. Vsázka bude elektromagneticky průžařná.

2.3.1.4 Pro kmitočet 400 Hz

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,15 * 10^{-6}}{100 * 400}} = 0,0009 \text{ m} = 0,9 \text{ mm}$$

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,61 * 10^{-6}}{1 * 400}} = 0,019 \text{ m} = 19,6 \text{ mm}$$

Argument x_2 pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{0,9} \sqrt{2} = 72,55$$

Argument x_2 pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{19,6} \sqrt{2} = 3,6$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 0,9 = 5,84 \text{ mm}$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 19,6 = 117,9 \text{ mm}$$

Pro frekvenci 200 Hz, při teplotě 20°C vyšla hloubka vniku naindukovaných proudů 0,9 mm. Poté je možno odečíst z grafu na obr. 2.1 hodnoty poměrného tepla P_{2l} . Ve vsázce se na teplo přemění 99,9 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 5,84 mm. Vsázka se bude ohřívat na povrchu a dále bude teplo postupovat vedením a prouděním.

Pro teplotu 800°C je hloubka vniku naindukovaných proudů 19,6 mm. Ve vsázce se na teplo přemění 80 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 117,9 mm. Vsázka bude ohřívána s vysokou účinností.

2.3.1.5 Pro kmitočet 700 Hz

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,15 * 10^{-6}}{100 * 700}} = 0,0007 \text{ m} = 0,7 \text{ mm}$$

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,61 * 10^{-6}}{1 * 700}} = 0,014 \text{ m} = 14,8 \text{ mm}$$

Argument x_2 pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{0,7} \sqrt{2} = 95,9$$

Argument x_2 pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{14,8} \sqrt{2} = 4,76$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 0,7 = 4,42 \text{ mm}$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 14,8 = 89,1 \text{ mm}$$

Pro frekvenci 700 Hz, při teplotě 20°C vyšla hloubka vniku naindukovaných proudů 0,7 mm. Poté je možno odečíst z grafu na obr. 2.1 hodnoty poměrného tepla P_{2l} . Ve vsázce se na teplo přemění 99,9 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 4,42 mm. Vsázka se bude ohřívat na povrchu a dále bude teplo postupovat vedením a prouděním.

Pro teplotu 800°C je hloubka vniku naindukovaných proudů 14,8 mm. Ve vsázce se na teplo přemění 85 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 89,1 mm. Vsázka bude ohřívána s vysokou účinností.

2.3.1.6 Pro kmitočet 1 kHz

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,15 * 10^{-6}}{100 * 1000}} = 0,0006 \text{ m} = 0,6 \text{ mm}$$

Hloubka vniku naindukovaných proudů pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$a_2 = 503,3 * \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r * f}} = 503,3 * \sqrt{\frac{0,61 * 10^{-6}}{1 * 1000}} = 0,012 \text{ m} = 12,4 \text{ mm}$$

Argument x_2 pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{0,6} \sqrt{2} = 114,7$$

Argument x_2 pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} = \frac{50}{12,4} \sqrt{2} = 5,69$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 20^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 0,6 = 3,69 \text{ mm}$$

Vrstva utlumení elektromagnetického vlnění v pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$d_2 = 6 * a_2 = 6 * 12,4 = 74,58 \text{ mm}$$

Pro frekvenci 1 kHz, při teplotě 20°C vyšla hloubka vniku naindukovaných proudů 0,6 mm. Poté je možno odečíst z grafu na obr. 2.1 hodnoty poměrného tepla P_{2l} . Ve vsázce se na teplo přemění 99,9 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 3,69 mm. Vsázka se bude ohřívat na povrchu a dále bude teplo postupovat vedením a prouděním.

Pro teplotu 800°C je hloubka vniku naindukovaných proudů 12,4 mm. Ve vsázce se na teplo přemění 87 % elektromagnetické energie. Elektromagnetické vlnění se utlumí v hloubce přibližně 74,58 mm. Vsázka bude ohřívána s vysokou účinností.

2.3.2 Optimální kmitočet pro válcovou vsázku s poloměrem 50 mm

K výpočtu optimálního kmitočtu pro ohřev válcové ocelové vsázky použijí vztah (2.5):

$$r_2 = 2,75 \cdot 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f \cdot \mu_r}}$$

Vztah umocním a poté vytknu kmitočet f . Dostanu vztah pro výpočet neoptimálnějšího kmitočtu f_{opt} :

$$f_{opt} = \frac{(2,75 \cdot 503,3)^2 \cdot \rho}{r_2^2 \cdot \mu_r} \quad (2.7)$$

Dosadíme hodnoty pro $T = 20^\circ\text{C}$:

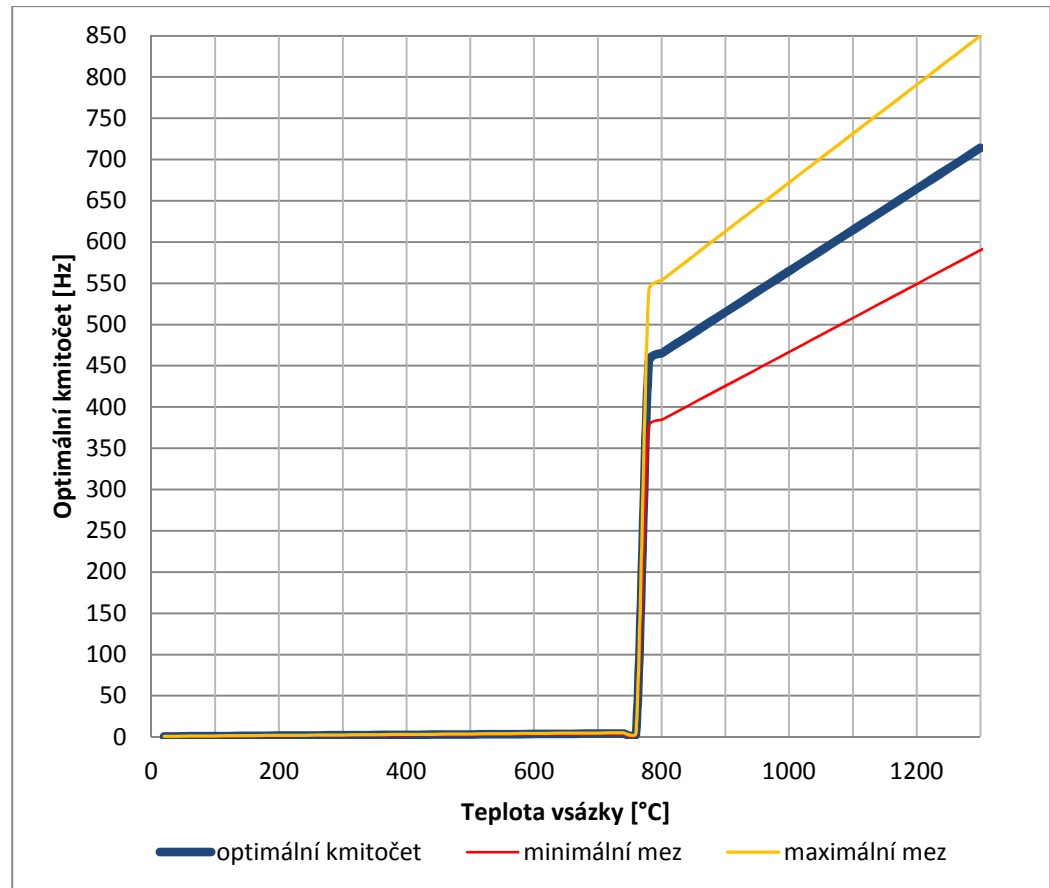
$$f_{opt} = \frac{1915663,6 \cdot 0,61 \cdot 10^{-6}}{0,05^2 \cdot 100} = 1,14 \text{ Hz}$$

A hodnoty pro $T = 800^\circ\text{C}$:

$$f_{opt} = \frac{1915663,6 \cdot 0,61 \cdot 10^{-6}}{0,05^2 \cdot 1} = 467,4 \text{ Hz}$$

Optimální kmitočet při začátku prohřívání pro teplotu 20°C je 1,14 Hz. Po přechodu přes Curieův bod při teplotě 800°C je optimální kmitočet 467,4 Hz. Z našich kmitočtů je nevhodnější začít prohřívát kmitočtem 50 Hz, ze začátku bude mít ohřev špatnou účinnost, ale ta se bude s teplotou zvyšovat. Při teplotách nad Curieův bod je vhodné použít kmitočet mezi 400 a 700 Hz.

Na grafu (obr. 2.5) je znázorněna závislost teploty vsázky na optimálním kmitočtu pro válcovou ocelovou vsázku o poloměru 50 mm. Optimální kmitočet je vypočítán dle vztahu (2.7). Jak již bylo řečeno v kapitole 2.1, nejefektivněji vsázku ohřejeme, je-li mezi poloměrem a hloubkou vniku naindukovaných proudů vztah dle vzorce (2.3). Minimální a maximální mez optimálního kmitočtu vznikla dosazením čísel 2,5 a 3 do vztahu (2.7) místo čísla 2,75.



Obr. 2.5 Závislost teploty vsázky na optimálním kmitočtu pro válcovou ocelovou vsázku o poloměru 50 mm

3 Indukční zařízení a jeho praktické příklady

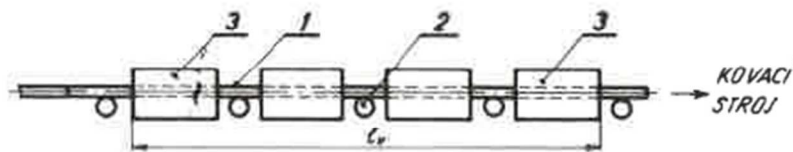
Indukční ohřev se používá hlavně na tavení, prohřívání, kalení, žhání, svařování a pájení. Může se používat jak v malých laboratořích, tak ve velkých průmyslových závodech. U indukčních ohřevů je induktor chlazen protékající vodou, která je přiváděna přes izolační hadice. Prohřívání by mělo být rovnoměrné a rychlé, aby nedošlo k oxidaci povrchu materiálu. [1]

3.1 Prohřívací indukční zařízení

Indukčně se materiály ohřívají na tvářecí teplotu, např. pro kování, válcování a pro další zpracování tvaru. Obvykle jsou indukční ohříváčka, kovací stroj a zásobník studených kusů v jedné automatizované lince výrobního procesu. Teplota je měřena optickými pyrometry a výkon ohříváček je regulován [1]

3.1.1 Ohřev tyčového materiálu

Na ohřev tyčového materiálu se používají průběžné ohříváčky. Sestávají se z ohřívacích induktorů 3 a kladek 2, které motoricky posouvají ohřívanou tyč 1. Výkon průběžných indukčních ohříváček bývá 500 kg až několik desítek tun za hodinu s elektrickým příkonem až desítky MW. V kovací stroji umístěným bezprostředně za ohříváčkou se často kovají matice, ložiskové kroužky a polotovary ručního náradí. [1], [3]



Obr. 3.1 Průběžná indukční ohříváčka [1]

3.1.1.1 Středofrekvenční ohříváč tyčí SOT 750/10

Tento indukční ohříváč slouží k ohřevu tyčí, které mají kruhový průřez. Je určen pro feritickou ocel na výrobu pružin. Ohříváč vyniká hlavně pracovním výkonem, který je 2,3 tuny ohřátého materiálu za hodinu. Ohříváč je řízen programovým automatem PLC s komunikačním panelem. Přes komunikační panel se zadávají parametry ohřevu a zobrazují chyby přístroje. Ohříváč SOT 750/10 je zobrazen na obr. 3.2, v tabulce 2. jsou zobrazeny jeho parametry. Tyto ohříváče se vyrábějí ještě ve výkonových řadách 150, 250 a 500 kW. [19]



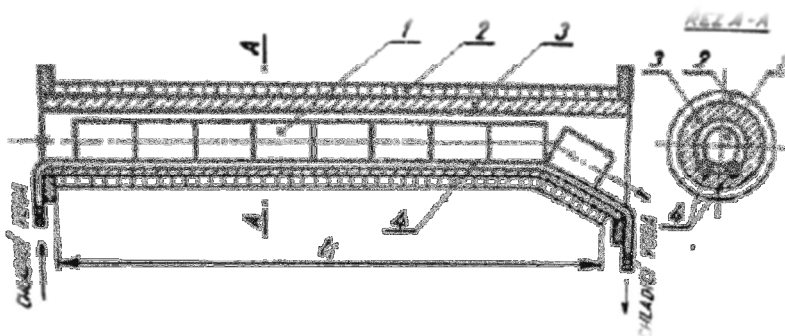
Obr. 3.2 Středofrekvenční ohříváč tyčí SOT 750/10 [19]

Tab. 2. Parametry ohřívачky SOT 750/10 [19]

Typ ohřívачné oceli	feritická ocel
Průměr tyče D [mm]	8 - 14,5
Délka tyče l [m]	1 až 3
Elektrický výkon [kW]	750
Rychlost posuvu [m/s]	0,5
Pracovní výkon [kg/h]	2300
Teplota výstupní T [°C]	940 - 1200

3.1.2 Ohřev přířezů

Ohřívачka sestává z induktoru 2 čtvercového tvaru, který je chlazen vodou. Mezi ohřívачí komorou s přířezy 1 a induktorem se nachází keramická tepelná izolace 3. Válcové přířezy jsou pneumaticky posouvány po vodou chlazených vodících lištách 4, z nemagnetické oceli. Ohřívачka je ukončena nakloněnou rovinou pro rychlé odpadnutí ohřátého přířezu, který je rovnoměrně prohřátý po celé délce. [1]



Obr. 3.3 Indukční ohřívачka přířezů [1]

3.1.2.1 Kompaktní středofrekvenční ohřívачe přířezů

Kompaktní středofrekvenční ohřívачky (KSO) od firmy Roboterm jsou vyráběny ve výkonových řadách 160, 250, 400, 500, 630, 800, 1000 a 1200 kW. Ohřívачka je složena ze tří částí: Vstupní, ohřívачí, výstupní.

Nejčastěji vstupní část obsahuje vodorovný krokový dopravník, kam obsluha usazuje studené přířezy. Poté svislý gravitační skluz nebo svislý krokový dopravník usazuje přířez do lůžka zvedačky. Zvedačka zvedne přířez před induktor a hydraulická tlačka ho zasune do

induktoru. Tlačka tlačí na všechny přířezy v induktoru, při zasunutí přířezu vypadne z druhé strany přířez ohřátý na danou kovací teplotu.

Výstupní strana obsahuje pro krátké přířezy (do 180 mm) gravitační žlábek, po kterém přířez sklouzne. A pro dlouhé přířezy kladkový nebo klešťový vytahovač. Ohříváčka může obsahovat oba výstupní mechanismy, jak pro krátké, tak pro dlouhé přířezy. Dále může obsahovat odlepovač splených přířezů a třídičku ohřátých kusů, která přířezy třídí dle teploty. Výstupní teplota je měřena pyrometrem a poté třídička oddělí nedohřáté a přehřáté kusy.

Ohřívací modul je uzavřený a je složen z kondenzátorů, rozvodu chladicí vody, vodou chlazených vodičích lišt, měniče kmitočtu, programového automatu PLC s ovládním, hlavního jističe a induktoru. Induktor je kruhový nebo čtvercový tubus s průměrem 20 – 130 mm.

[20], [21], [22], [23], [24]



Obr. 3.4 Ohříváček KSO 1200/1,2-A30 o výkonu 1200 kW [25]

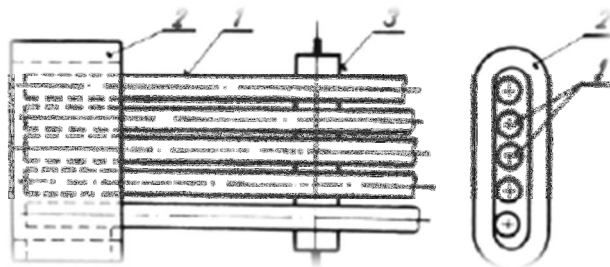
Na obrázku 3.4 je zobrazena ohříváčka o výkonu 1,2 MW. Tato verze obsahuje svislý krokový dopravník a nakloněnou rovinu jako zásobník pro studené kusy. [25] V tabulce 3. jsou zobrazeny výkonové parametry jednotlivých ohříváček.

Tab. 3. Parametry KSO [20], [21], [24], [25]

výkon [kW]	160	250	400	500	630	800	1000	1200
materiál	magnetická ocel							
průměr přířezu [mm]	15 - 60	20 - 80	30 - 100	30 - 120	50 - 130	60 - 120	60 - 120	50 - 120
délka přířezu [mm]	až 300	až 500				až 400		
výstupní teplota [°C]	1250						1300	1350
ohřívací výkon [kg/h]	360	625	1020	1300	1600	2000	2500	3000
kmitočet [kHz]	4 - 10	2 - 6	1,5 - 4	1 - 3	0,5 - 1,5	1	1	0,4 - 1,2
napětí [V]	3 x 300	3 x 340	3 x 400			-		
spotřeba vody [m3/h]	4	6,5	7,5	9,5	12	-		

3.1.3 Ohřev konců tyčového materiálu

Používá se pro nakovávání přírub na tyčový materiál. Může se používat jak pro jednu tyč, tak pro více tyčí zároveň. Zařízení obsahuje induktor 2 (kulatý nebo oválný), tyče 1 s konci umístěnými v induktoru a držák 3. [1]



Obr. 3.5 Indukční ohříváčka konců tyčí [1]

3.1.3.1 Středofrekvenční indukční ohříváč SOT 400/2,1

Např. indukční ohříváčka SOT 400/2,1 od firmy Roboterm slouží pro ohřev až třech tyčí najednou, které se zakládají buď ručně, nebo manipulátorem. Ohříváčka je řízena programovatelným automatem PLC a vstupní parametry se zadávají na zobrazovacím panelu. Tyče nezávisle na sobě zajiždějí do induktoru a po dosažení teploty 1200 °C se rozsvítí kontrolka, tyč je vytažena a s ohřátým koncem je připravena k zpracování. Ohříváčka obsahuje měnič kmitočtu a třífázový transformátor. Teplota je měřena pyrometrem UPF IV-G. Na obr. 3.6 je znázorněna ohříváčka SOT 400/2,1 a v tabulce 4. jsou základní technické údaje. [26]



Obr. 3.6 Indukční ohříváč SOT 400/2,1 [26]

Tab. 4. Základní parametry indukčního ohříváče SOT 400/2,1 [26]

Typ ohříváné oceli	DIN 1.4922 a 1.4006
Průměr tyče D [mm]	40 - 100
Délka tyče l [mm]	500 - 1500
Délka ohříváné části l [mm]	100 - 600
Elektrický výkon [kW]	400
Pracovní výkon (pro Ø 80) [ks/h]	30
Teploty výstupní T [°C]	1200

3.1.3.2 Středofrekvenční indukční ohříváč SOR 120/20

Ohříváčka SOR 120/20 od firmy Roboterm je určena k ohřevu konců roxorových tyčí. Ohříváčka obsahuje posuvný dopravník tyčí, induktor, měnič frekvence a transformátor. Tyče jsou dopravovány skrz induktor a na konci tyče spadávají do žlábků. Délka části, která se prohřívá, se mění posuvem dopravníku od nebo k induktoru. Ohříváčka je zobrazena na obr. 3.7 a její parametry jsou v tabulce 5. Ohříváčka má vysoký pracovní výkon a to až 450 roxorových tyčí za hodinu. Teplota je měřena pyrometrem UPF IV-G a ohříváčka je řízena programovatelným automatem PLC. [27]



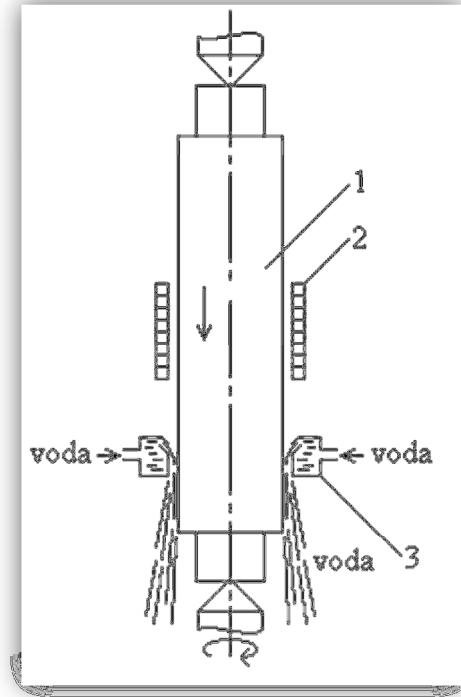
Obr. 3.7 Indukční ohříváč SOR 120/20 [27]

Tab. 5. Základní parametry indukčního ohříváče SOR 120/20 [27]

Typ ohřívávané oceli	magnetická ocel
Průměr tyče D [mm]	10 - 20
Délka tyče l [mm]	150 - 750
Délka ohřívávané části l [mm]	40 - 80
Elektrický výkon [kW]	120
Pracovní výkon [ks/h]	450
Teploty výstupní T [°C]	1100

3.1.4 Indukční povrchový ohřev válce (kalení)

Při povrchovém kalení zprudka zahříváme pouze povrch materiálu na kalící teplotu a poté se ochlazuje ve vodní lázni. Díky povrchovému kalení je materiál velice pevný na povrchu, houževnatý uvnitř a nedeformuje se vysokou teplotou. Materiál se nejdříve předeřeje na přibližně 700 °C, aby se tvrdá slupka neodlupovala. [1], [2]



Obr. 3.8 Indukční kalení válce [1]

Na obr 3.8 je znázorněno kalení ocelového válce 1, který se otáčí kolem své osy. Induktor 2 je kruhového tvaru o průměru lehce vyšším než kalený válec. Chladicí sprcha 3 se nachází bezprostředně za induktorem. Průměr válců bývá 300 mm až 1000 mm a délka až 6 metrů. Pracovní kmitočet je pro předeřev 50 Hz a pro kalení 250 Hz. Příkony takovýchto zařízení bývají 300 kW až 1 MW. [1]

V příloze 3. je zobrazen indukční kalící stroj SIKZ 160/10. Stroj je primárně určen ke kalení ozubených kol až do průměru 2 metrů. Stroj pracuje s výkonem 160 kW a kmitočtem 10 kHz. Metody kalení jsou zub po zubu nebo postupně po obvodě. [28]

3.2 Indukční kelímková pec

Kelímkové pece patří mezi nejrozšířenější indukční zařízení. Používají se pro tavení obsahu od desítek kilogramů až do stovek tun. V tavící peci většinou tavíme ocelový šrot různé velikosti, to je rozdíl oproti prohřívacím zařízením, kde ohříváme jeden kus. Kelímková tavící pec musí být schopná roztavit ocelový šrot s vysokou účinností. [7][1]

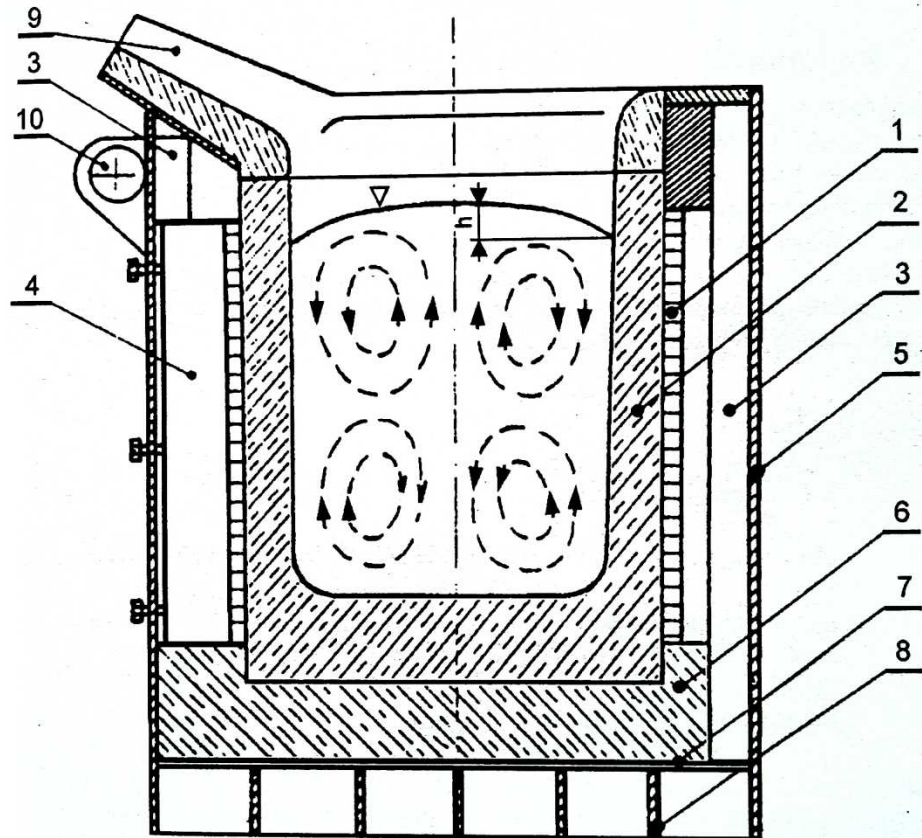
Při tavení ocelového šrotu v peci uvažujeme 3 fáze:

- Vsázka má teplotu 20-760 °C (Curieův bod). Hodnota měrného odporu roste z $1 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ na $7 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$. Střední permeabilita je přibližně 30 – 100. Vsázka je kusovém pevném stavu.
 - Vsázka má teplotu 760-1400 °C. Měrný odpor vzroste na hodnotu $14 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$. Ocel ztratí magnetické vlastnosti a permeabilita je 1. Vsázka je stále v kusovém pevném stavu.
 - Vsázka má teplotu 1400-1600 °C. Měrný odpor vzroste až na $16 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ a permeabilita bude stále 1. Vsázka bude roztavená a rovnoměrně vyplní kelímek.
- [7]

Působení elektrodynamických sil zajišťuje víření tekutého kovu. Výhoda je, že kov se dokonale promísí a nevznikají zde místa s různou teplotou. Jak je vidět na obr. 3.9, víření nahoře koluje od středu do stran a tím vzniká vzduť. Vzduť h je dáno kmitočtem f , příkonem P_2 , hustotou vsázky ρ , relativní permeabilitou vsázky μ_r a konduktivitou vsázky γ . [1] Vypočítáme jej ze vztahu:

$$h = K \frac{P_2}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \cdot \gamma}{f}} \quad (2.8)$$

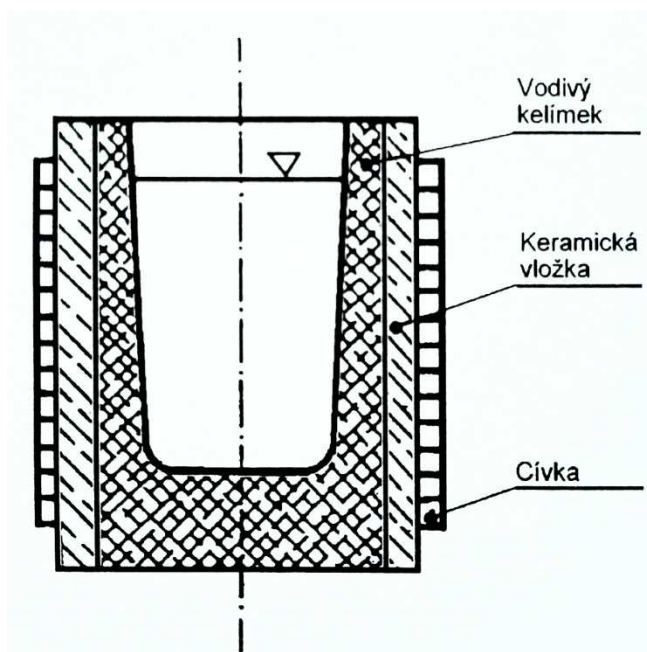
Na obr. 3.9 je znázorněno schéma kelímkové indukční pece. Pec je složena z kruhové jednovrstvé ohřívací cívky 1, keramického zadusaného kelímku 2 z křemičitého písku, svazků transformátorových plechů 3, azbestocementových trámů 4 pro cívku, ocelového pláště 5, cihlové keramické vyzdívky 6 na dně pece, stínícího měděného plechu 7, mřížového dna 8, hubice pro odlévání 9 a držáku 10, kolem kterého se pec otáčí při odlévání. K vyklápění pece se používá hydraulický systém. [8]



Obr. 3.9 Kelímková indukční pec [8]

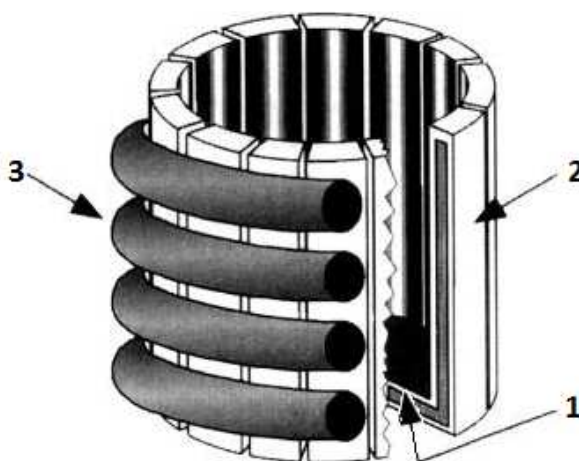
Pec obsahuje vnější stínění z dobře elektricky vodivého pláště nebo ze svazků transformátorových plechů. Magnetický tok se uzavírá přes stínění a zbytečně se nezahřívají okolní části pece, jako například ocelový plášť 5. Nevodivý kelímek je vyroben z křemičitého písku (SiO_2). Cívka je vyrobená z měděného čtyřhranného dutého vodiče, kterým protéká chladicí voda. Kelímková pec s nevodivým kelímkem má vyšší účinnost pro kovy s nižší elektrickou vodivostí. [1], [8]

Pro tavení dobře vodivých materiálů, jako je hliník a měď používáme kelímkovou pec s vodivým kelímkem. Kelímek se vyrábí z ocelolitiny nebo směsi šamotu a grafitu. Mezi kelímek a induktor je umístěna izolační vrstva z keramiky. Magnetický tok se částečně uzavírá do vsázky a do vodivého kelímku. Kelímek předává teplo vsázce vedením. Pec je zobrazena na obr. 3.10. [8]



Obr. 3.10 Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem [8]

Další modifikace kelímkové pece je technologie „Skull Melting“, neboli studený kelímek. Používá se k tavení nekovových materiálů s vysokým bodem tání (až více jak 3000 °C). Kelímek je tvořen z měděných, vodou chlazených lamel 2, které jsou odděleny mezerou. Mezi studeným kelímkem a horkou vsázkou vzniká vrstva skull 1. Skull chrání kelímek před roztavenou vsázkou. Ohřívací induktor 3 je též chlazený vodou. Pec je zobrazena na obr. 3.11. [9]



Obr. 3.11 Schéma indukční pece se studeným kelímkem [13]

3.2.1 Indukční tavicí pece ISTOL

Pece jsou vyráběny od obsahu 40 kg taveného materiálu až do 2 tun. Používají se pro tavení oceli. K jednomu tyristorovému měniči obvykle jsou připojeny dvě pece pro zajištění nepřetržitého provozu při opravách a údržbě. [14]

Pec obsahuje měnič kmitočtu, kondenzátorové baterie, PLC programový automat a chladicí okruh s indikací teploty a průtoku. Vyzdívka obsahuje indikátor protavení. [14]

Na obr. 3.12 je zobrazena indukční tavicí pec ISTOL500 a v tabulce 6 jsou parametry tavicích pecí ISTOL. [14]



Obr. 3.12 Indukční tavicí pec ISTOL500 [14]

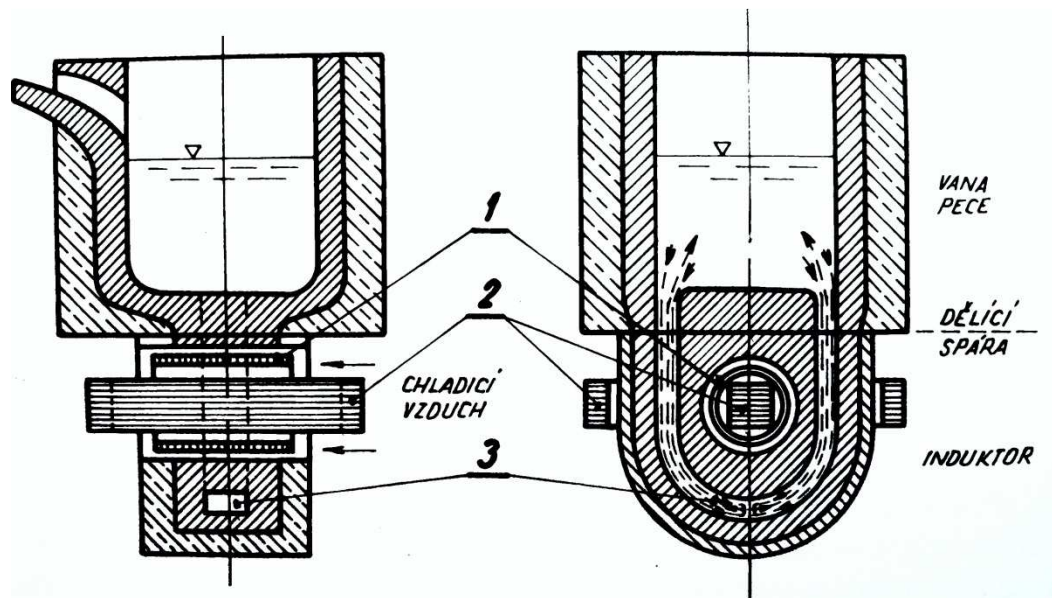
Tab. 6. Parametry tavicích pecí ISTOL [14]

typ	hmotnost vsázky	jmenovitý příkon	frekvence	doba tavby	tavicí výkon	měrná spotřeba
-	[kg]	[kW]	[Hz]	[min]	[t/hod]	[kWh/t]
ISTOL 40	40	100	2000	35	0,07	750
ISTOL 100	100	200	2000	40	0,15	700
ISTOL 250	250	315	1000	40	0,38	700
ISTOL 500	500	315	1000	80	0,375	700
ISTOL 700	700	400	1000	50	0,42	630
ISTOL 1000	1000	1200	600	34	1,8	570
ISTOL 2000	2000	1200	600	67	1,8	580

3.3 Další používané indukční zařízení

3.3.1 Kanálková indukční pec

Kanálková pec obsahuje nádobu - nístěj s kanálkem a induktor se železným jádrem. Železné jádro se skládá z elektrotechnických plechů, uzavírá se tudy magnetický tok a tím mají tyto pece vyšší účinník $\cos \varphi$ a vyšší účinnost než kelímkové pece. Pec je obdoba transformátoru s železným jádrem, sekundární strana je kanálek s roztaveným kovem. Pece se používají jako udržovací, lije se do nich už roztavený kov. Pece se nehodí pro přerušovaný provoz, většinou se pece musí udržovat v chodu, i když se krátkodobě nepoužívají. Dále se používají k tavení mědi, hliníku a jejich slitin. Schéma kanálkové pece je znázorněno na obr. 3.13; 1 je induktor chlazený vzduchem, 2 železné jádro a 3 kanálek. [1],[4],[8]



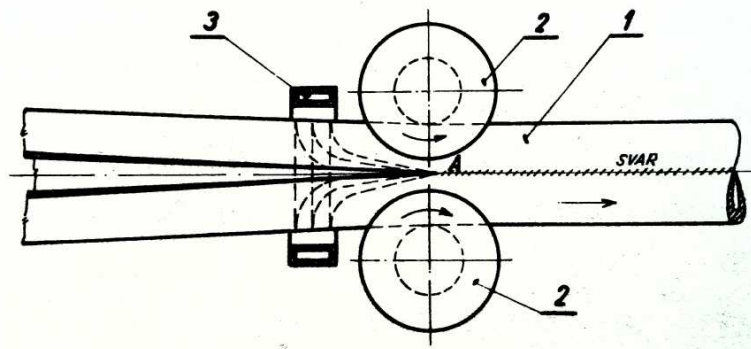
Obr. 3.13 Indukční kanálková pec [1]

Šipky v obr. 3.13 znázorňují směr toku roztaveného kovu v kanálku, tok zajišťuje homogenitu taveného materiálu. Proud v kanálku vytváří elektromagnetické pole kolem kanálku a to způsobuje tok taveniny. V peci mohou vznikat silové pulzy při příliš vysokém výkonu pro daný hydrostatický tlak, díky kterému natéká nový kov do kanálku. [1]

Na obr. 3.13 je znázorněn kanálek kruhový, ale používá se také pravoúhlý se zátkami pro snadné čištění usazenin (oxidů) při tavení hliníku. K větším pecím jsou připojeny až tři kanálkové induktory pro lepší zatížení sítě. Pece jsou napájeny proudem o síťovém kmitočtu 50 Hz. [1], [4]

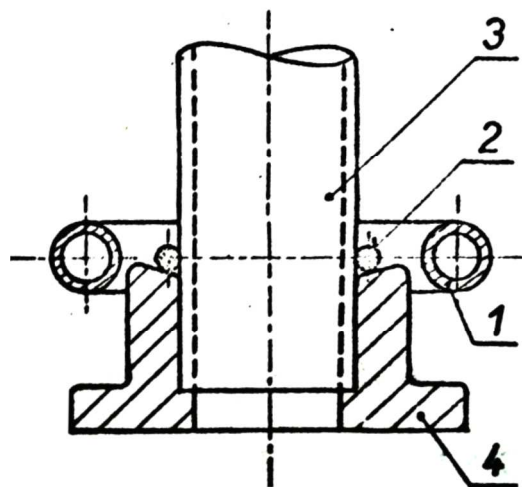
3.3.2 Indukční ohřevy pro svařování a pájení

Indukční svařování se používá hlavně při výrobě trubek, které se z dlouhého plátu plechu stočí do kruhu a podélně se svaří. Plech prochází přes systém kladek, který ho tvaruje do tvaru trubky 1. Na obr. 3.14 je vidět poslední kladka 2, hned před ní je umístěn induktor 3. Jelikož v místě induktoru není trubka podélně spojena, neprocházejí tudy naindukované proudy. Všechny naindukované proudy protékají místem A, kde se nachází poslední kladka stroje. Jak je vidět z obrázku, je v tomto místě vysoká hustota proudu a tím se zde kov rozžhává na 1400 °C, a trubka se svaří. Induktor, který je chlazen vodou, je napájen proudy o kmitočtu 250 kHz až 400 kHz s příkonem až 600 kW. Průměry takto vyráběných trubek jsou 20 – 500 mm. [2]



Obr. 3.14 Indukční svařování trubek [1]

Indukční ohřev se také používá pro pájení, pájka je většinou tvarována dle pájeného místa. Například pro pájení trubky 3 a příruby 4 použijeme kruhovou pájku 2. Po naindukování proudů, z induktoru 1 do pájky se pájka rozteče a vztláním vyplní mezeru mezi zahřátou trubkou a přírubou k ní. Indukční pájení má v průmyslu široké uplatnění, nejčastěji se pájí cínem a mosazí.[2]



Obr. 3.15 Indukční pájení přírub [2]

Závěr

Indukční ohřev je v dnešní době jeden z nejpoužívanějších a nejefektivnějších ohřevů, a to je důvod, proč jsem si ho vybral jako diplomovou práci. Díky tomu, že teplo vzniká přímo v ohřívaném kusu elektricky vodivého materiálu, nemusí se teplo do vsázky dopravovat vedením nebo prouděním, jako je tomu třeba u nepřímého odporového nebo plynového ohřevu. Tím, že teplo vzniká přímo ve vsázce, je ohřev velmi rychlý a přesný. Materiál zbytečně neoxiduje a částečně odpadá ztráta vyzařováním tepla do okolí. Z ekologického hlediska je ohřev velmi příznivý, při ohřevu nebo tavení nevznikají žádné škodlivé látky, jako jsou například nebezpečné oxidy dusíku.

Výše uvedené vlastnosti, jako je přesnost, rychlost a účinnost, nebudou platit při špatně nastavených parametrech ohřevu. Hlavním parametrem ohřevu je kmitočet. V druhé kapitole práce se zabývám jevem nazývaným se elektromagnetická průžařnost. Při nízkém kmitočtu bude materiál elektromagneticky průžařný a jen malá část z celkové elektromagnetické energie se změní na teplo. Při vysokém kmitočtu bude hloubka vniku naindukovaných proudů velmi malá a materiál se bude na povrchu přehřívat a do jeho středu se teplo dopraví pouze vedením. Pro nejefektivnější ohřev je třeba kmitočtem nastavit hloubku vniku naindukovaných proudů tak, aby byla 2,5 až 3 krát menší než poloměr válcové vsázky. V kapitole 2.2.1 jsem pro válcovou ocelovou vsázku o poloměru 50 mm spočítal hloubku vniku naindukovaných proudů a množství elektromagnetické energie, která ohřívá vsázku. Výpočet byl proveden pro různé kmitočty. Dále jsem vypočítal optimální kmitočet pro prohřátí zmíněné válcové vsázky o poloměru 50 mm. Při teplotě 800 °C byl optimální kmitočet 467,4 Hz, na teplo se přeměnilo 83 % z celkové dopadající elektromagnetické energie. Dále je třeba myslet na to, že při zahřívání vsázky se mění její vlastnosti, jako je relativní permeabilita a rezistivita. Hlavní změna nastává u magnetických materiálů při přechodu přes Curieův bod, kdy ztrácejí své magnetické vlastnosti.

Indukční ohřev se používá hlavně pro tavení a prohřívání. Dále se používá pro povrchové kalení, svařování, pájení a žhání. V poslední kapitole jsou uvedeny praktické příklady indukčního ohřevu z praxe. Popisují zde reálná zařízení, jako je indukční ohříváčka nebo indukční kelímková pec - s vlastními parametry.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] RADA, Josef et al. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 344 s.
- [2] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční*. 1. vyd. Plzeň, 1982, 185 s.
- [3] KOŽENÝ, Jiří. *Základy elektrotepelné techniky: Poznámky z přednášek*. Západočeská univerzita Plzeň, 2011.
- [4] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [5] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*, Academia Praha 1979
- [6] RUDNEV, Valery. *Handbook of induction heating*. New York: Marcel Dekker, c2003, xi, 777 p. ISBN 08-247-0848-2.
- [7] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika část V., VŠSE v Plzni 1975*
- [8] HRADÍLEK, Zdeněk et al. *Elektrotepelná zařízení*. 1. vyd. Praha: IN-EL, 1997, 174 s. ISBN 80-902-3332-5.
- [9] ČERNÝ, Václav. Indukční ohřev (3). *Časopis Elektro*. Praha: FCC PUBLIC, roč. 2002, č. 12. ISSN 1210-0889. [cit. 2014-23-04]. Dostupné z:
http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25267
- [10] MACUROSKI, Živko. *Tavení elektromagneticky průžařné vsázky v indukční kelímkové peci*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZČU.
- [11] Encyklopedie fyziky: Magnetické vlastnosti látek. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/295-magneticke-vlastnosti-latek>
- [12] Žihání (metalurgie). WIKIPEDIE. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z:
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Žihání_\(metalurgie\)](http://cs.wikipedia.org/wiki/Žihání_(metalurgie))
- [13] Induction Skull Melting (ISM) of Titanium Alloys. . [online]. 2007 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z:
<http://www.castingstechnology.com/ismtialloys.asp>
- [14] Elektroteplo Kolín: Indukční tavicí pece. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z:
<http://www.elektroteplo.cz/CMSPage.jsp?id=308ad275-b958-4965-b73b-f80f2d636b08&context=977dce0c-84ce-43a1-89cb-36402e71af32.308ad275-b958-4965-b73b-f80f2d636b08&locale=en&dblockid=44b6e5c2-31b4-477b-9f43-8da7cbbf1436&ditemid=e3208e8a-0c23-4f95-a52d-20d619f08c1d>

- [15] Indukční ohřev. RAJMONT S.R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.rajmont.cz/produkty-indukcni-ohrev/>
- [16] Electricity and Magnetism. TUTORVISTA. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://physics.tutorvista.com/electricity-and-magnetism.html>
- [17] Tyristorové měniče kmitočtu pro indukční ohřev s výstupním kmitočtem 0,2 - 10 kHz. ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/produkty/menice-kmitoctu/0-2-10-khz-nad-100kw>
- [18] Rezistivita. WIKIPEDIE. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Rezistivita>
- [19] Středofrekvenční ohříváč tyčí SOT 750/10 výkonové řady 750 kW. ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/reference/indukcni-ohrivace/ohrivace-tyci/sot-750-10>
- [20] Ohříváče přřezů. ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/produkty/indukcni-ohrivace/ohrivace-prirezu/>
- [21] Kompaktní středofrekvenční ohříváč KSO 630/0,5-AH50 výkonové řady 630 kW. ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/reference/indukcni-ohrivace/kso-do-630-kw/kompaktni-stredofrekvencni-ohrivac-kso-630-0,5-ah50-630-kw>
- [22] Výstupní mechanismy (moduly). ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/produkty/vystupni-mechanizmy>
- [23] Třídíčky ohřátých přřezů. ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/produkty/tridicky-ohratych-prirezu>
- [24] Kompaktní středofrekvenční ohříváče přřezů typové řady KSO do 630 kW. ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/produkty/indukcni-ohrivace/ohrivace-prirezu/kompaktni-ohrivace-prirezu-kso-do-630-kw>
- [25] Kompaktní středofrekvenční ohříváč KSO 1200/1,2-A30 výkonové řady 1200 kW. ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/reference/indukcni-ohrivace/kso-nad-630-kw/kso-1200/1,2-a30>
- [26] Středofrekvenční indukční ohříváč SOT 400/2,1 výkonové řady 400 kW. ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/reference/indukcni-ohrivace/specialni-ohrivace/sot-400/2,1>

- [27] Středofrekvenční indukční ohříváč SOR 120/20 výkonové řady 120kW. ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z:
<http://www.roboterm.cz/reference/indukcni-ohrivace/specialni-ohrivace/sor-120-20>
- [28] Středofrekvenční indukční kalící zařízení SIKZ 160/10. ROBOTERM SPOL. S R.O. [online]. [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/reference/indukcni-ohrivace/kalici-zarizeni/sikz-160/10>

Seznam obrázků, tabulek a příloh

Obr. 0.1 Indukční ohřev vsázky [15]	11
Obr. 1.1 Princip indukčního ohřevu [16]	12
Obr. 1.2 Závislost teploty a relativní permeability pro železo, nikl, kobalt [6].....	14
Obr. 1.3 Závislost μr na H a magnetizační křivka [1].....	15
Obr. 1.4 Graf názorného rozdělení vsázky [2].....	17
Obr. 1.5 Graf závislosti magnetické intenzity a permeability [2].....	18
Obr. 1.6 Uvažovaná válcová cívka a její řez [5].....	21
Obr. 1.7 Odvození rot H [5].....	23
Obr. 1.8 Přímé odvození P_{21} [5].....	25
Obr. 1.9 Závislost funkce $P(x_2)$ na argumentu x_2 [5]	26
Obr. 1.10 Schéma zdroje 50 Hz pro indukční ohřev [1].....	27
Obr. 1.11 Trojnásobič kmitočtu [1]	27
Obr. 1.12 Schéma tyristorového měniče [1]	28
Obr. 2.1 Závislost argumentu x_2 a poměru tepla přeměněného ve vsázce [2].....	29
Obr. 2.2 Schéma průžařné válcové vsázky [2]	30
Obr. 2.3 Schéma povrchově ohřívání válcové vsázky [2]	30
Obr. 2.4 Schéma optimálního prohřátí válcové vsázky [2]	31
Obr. 2.5 Závislost teploty vsázky na optimálním kmitočtu pro válcovou ocelovou vsázku o poloměru 50 mm.....	40
Obr. 3.1 Průběžná indukční ohříváčka [1]	41
Obr. 3.2 Středofrekvenční ohříváč tyčí SOT 750/10 [19]	41
Obr. 3.3 Indukční ohříváčka přířezů [1]	42
Obr. 3.4 Ohříváč KSO 1200/1,2-A30 o výkonu 1200 kW [25].....	43
Obr. 3.5 Indukční ohříváčka konců tyčí [1].....	44
Obr. 3.6 Indukční ohříváč SOT 400/2,1 [26].....	45
Obr. 3.7 Indukční ohříváč SOR 120/20 [27]	46
Obr. 3.8 Indukční kalení válce [1]	47
Obr. 3.9 Kelímková indukční pec [8]	49
Obr. 3.10 Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem [8]	50
Obr. 3.11 Schéma indukční pece se studeným kelímkem [13].....	50
Obr. 3.12 Indukční tavící pec ISTOL500 [14].....	51
Obr. 3.13 Indukční kanálková pec [1]	52

Obr. 3.14 Indukční svařování trubek [1].....	53
Obr. 3.15 Indukční pájení přírub [2].....	53
Tab. 1. Vlastnosti konstrukční oceli [3], [18].....	32
Tab. 2. Parametry ohřívачky SOT 750/10 [19]	42
Tab. 3. Parametry KSO [20], [21], [24], [25]	44
Tab. 4. Základní parametry indukčního ohřívачe SOT 400/2,1 [26].....	45
Tab. 5. Základní parametry indukčního ohřívачe SOR 120/20 [27]	46
Tab. 6. Parametry tavících pecí ISTOL [14]	51
Příloha 1. Parametry měničů kmitočtu od firmy Roboterm [17].....	60
Příloha 2. Skříň tyristorového měniče kmitočtu TMK - F2 [17]	61
Příloha 3. Indukční kalící stroj SIKZ 160/10.....	62
Příloha 4. Průběhy Besselových funkcí $J_0(x)$ a $J_1(x)$ a Neumannových $N_0(x)$ a $N_1(x)$ [1].....	63
Příloha 5. Výstupní část ohřívачe přířezů s kombinací kladkového vytahovače a gravitačního žlábků [22]	64

Přílohy

Příloha 1. Parametry měničů kmitočtu od firmy Roboterm [17]

Měníče kmitočtu pro zařízení s paralelním rezonančním obvodem:

Typ	U_2 [V]	f_{MAX} [kHz]	f_{MIN} [kHz]	P_2 [kW]						A [mm]
TMK - F1	600	0,6	0,2	100	120	160	200	250	315	1430
		1,5	0,5	100	120	160	200	250	315	
		3	1	100	120	160	200	250	-	
		4	1,5	100	120	160	200	250	-	
		6	2	100	120	160	-	-	-	
	650	8	3	200	250	-	-	-	-	
	680	1,5	0,5	630	-	-	-	-	-	
TMK - F2	600	0,6	0,2	400	500	630	-	-	-	1430
		1,5	0,5	400	500	630	-	-	-	
		3	1	315	400	500	-	-	-	
		4	1,5	315	400	-	-	-	-	
		6	2	200	250	315	-	-	-	
	800	1	0,4	800	1000	-	-	-	-	1830
		1,5	0,5	800	-	-	-	-	-	
		3	1	630	-	-	-	-	-	
TMK - G1	400	10	4	80	100	120	-	-	-	1430
	500			100	120	160	-	-	-	
TMK - G2	400	10	4	150	200	-	-	-	-	1430
	500			200	250	-	-	-	-	

Měníče kmitočtu pro zařízení s paralelně - sériovým rezonančním obvodem:

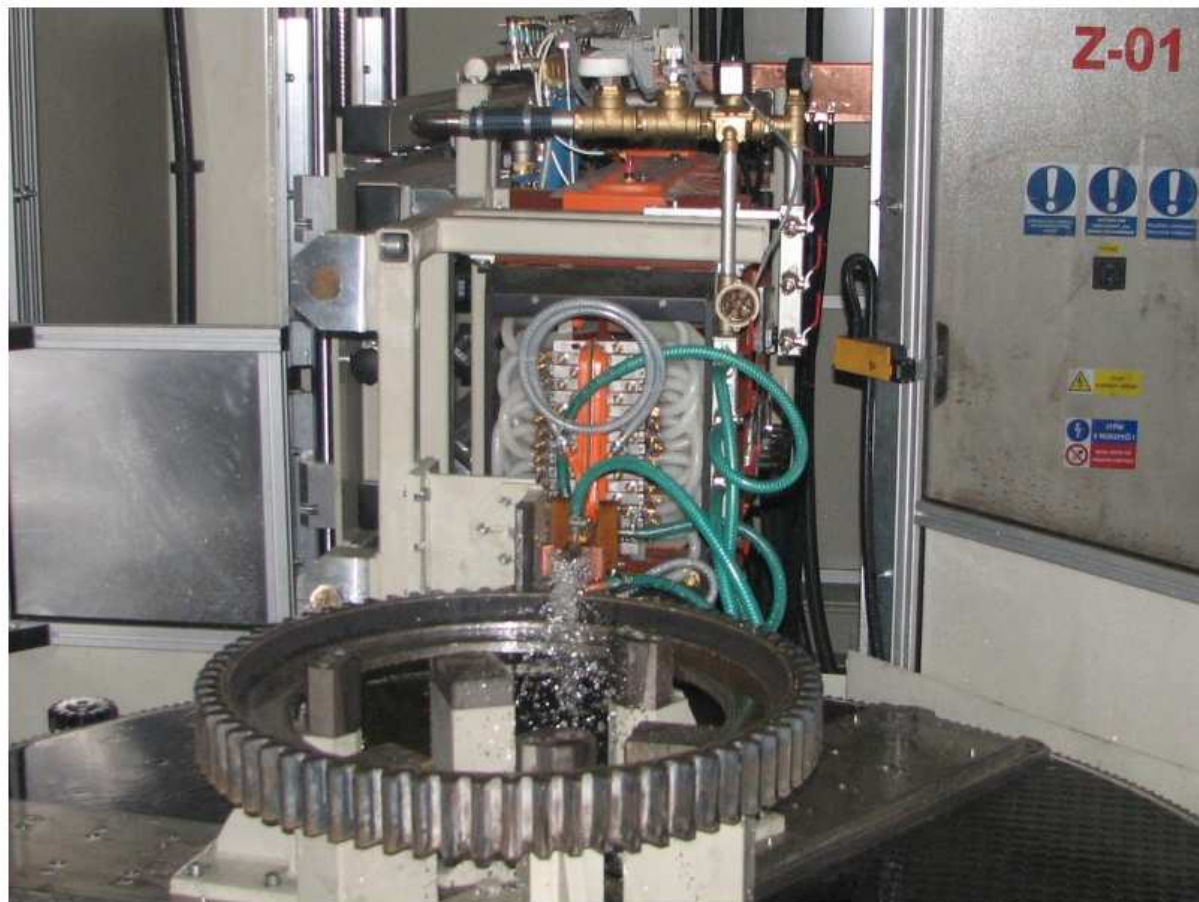
TMK - F1	750	1,5	0,5	do 400	-	-	-	-	-	1430
TMK - F2	750	1,5	0,5	do 400	-	-	-	-	-	1430

A ... šířka skříně

Příloha 2. Skříň tyristorového měniče kmitočtu TMK - F2 [17]

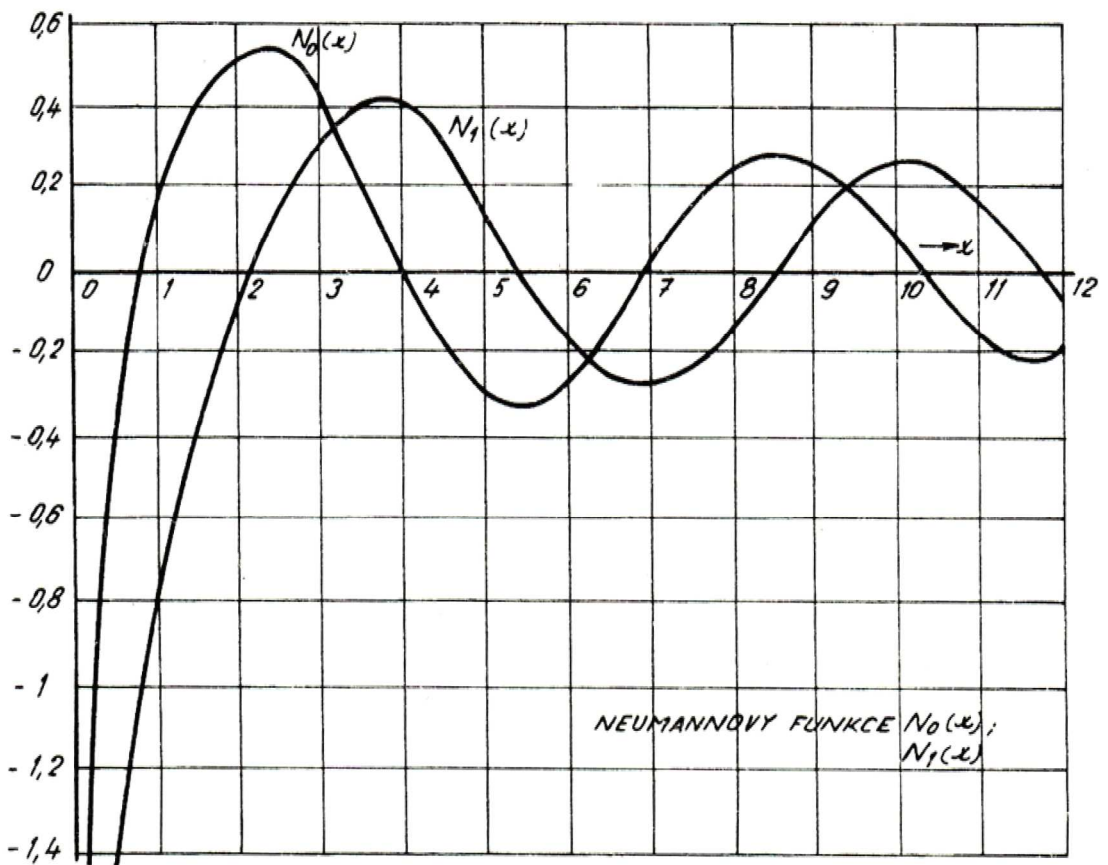
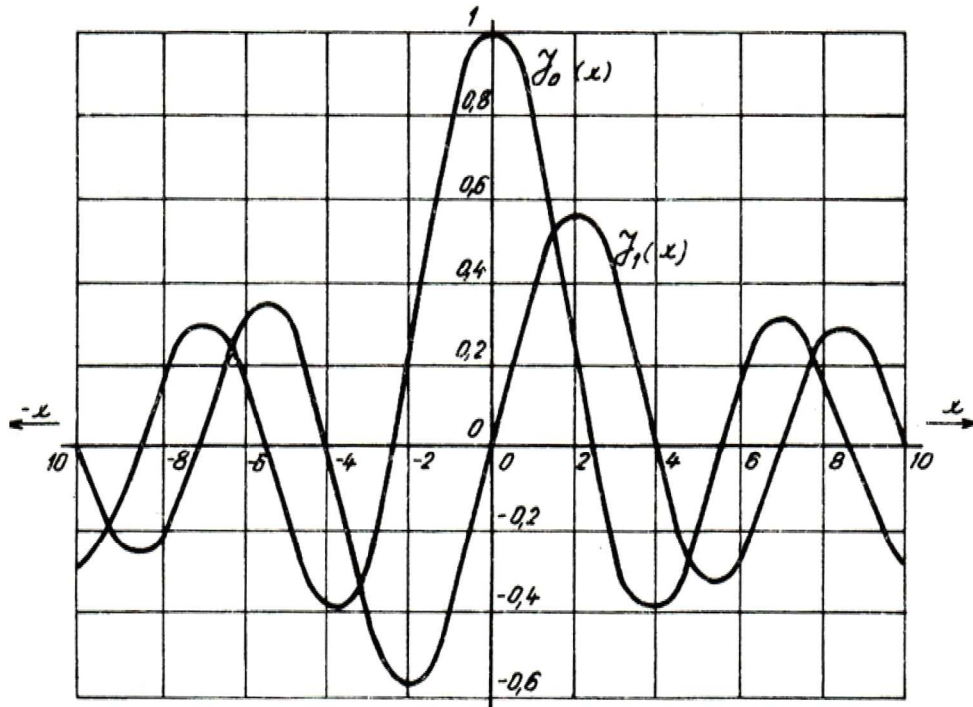


Příloha 3. Indukční kalící stroj SIKZ 160/10



Příloha 4. Průběhy Besselových funkcí $J_0(x)$ a $J_1(x)$ a Neumannových $N_0(x)$ a $N_1(x)$

[1]



Příloha 5. Výstupní část ohříváče přířezů s kombinací kladkového vytahovače a gravitačního žlábků [22]

