

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Možnosti zvyšování účinnosti tavení v indukčních
kelímkových pecích**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jaroslav FORMÁNEK**
Osobní číslo: **E11B0120K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Možnosti zvyšování účinnosti tavení v indukčních kelímkových pecích**
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 stručně teorii indukčního ohřevu.
2. Určete oblasti užití indukčních ohřevů v praxi.
3. Stanovte podmínky pro efektivní tavení kovů v indukčních pecích.
4. Provedte hodnocení indukčního tavení kriteriem 3E.
5. Stanovte závěry pro praxi.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

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

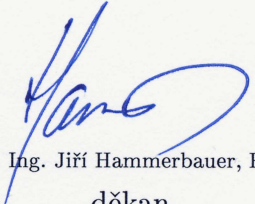
Vedoucí bakalářské práce:

Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

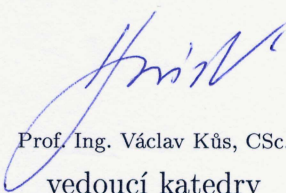
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na zvyšování účinnosti tavení v indukčních kelímkových pecích. Dále se zabývá stručně teorií indukčního ohřevu. V práci je zahrnuto využití indukčních ohřevů v praxi a konečným bodem je zhodnocení kritériem 3E.

Klíčová slova

Indukční ohřev, indukční kelímková pec, teorie indukčního ohřevu, indukční svařování, indukční pájení, indukční kalení, účinnost indukční kelímkové pece.

Abstract

The present work is aimed at increasing efficiency in induction crucible melting furnaces. It also deals briefly the theory of induction heating. The work includes the use of induction heating in practice and final point is the evaluation criterion 3E.

Key words

Induction heating, induction crucible furnace, theory of induction heating, induction welding, induction brazing, induction hardening, efficiency of induction crucible furnaces.

Prohlášení

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

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.

V Plzni dne 5.6.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jiřímu Koženému, za cenné profesionální rady, za prostudování bakalářské práce a za následné připomínky. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Oldřichu Kroupovi za metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK:	9
1 STRUČNĚ O TEORII INDUKČNÍHO OHŘEVU [1,2]	12
1.1 MAXWELLOVY ROVNICE [4,1]	12
1.2 VLNOVÉ ROVNICE [4,1]	12
1.3 VÁLCOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ [4,1]	14
2 OBLASTI UŽITÍ INDUKČNÍCH OHŘEVŮ V PRAXI	17
2.1 INDUKČNÍ PROHŘÍVÁNÍ [2]	17
2.2 INDUKČNÍ SVAŘOVÁNÍ [11,2]	18
2.3 INDUKČNÍ KALENÍ [2]	19
2.4 INDUKČNÍ PÁJENÍ [2,8]	20
3 PODMÍNKY PRO EFEKTIVNÍ TAVENÍ KOVŮ V INDUKČNÍCH PECÍCH	21
3.1 ZDROJE NAPÁJENÍ [2,9]	21
3.1.1 Zdroje se síťovou frekvencí [2,12]	21
3.1.2 Rotační generátory pro proudy středních kmitočtů [2]	23
3.1.3 Iontové měniče kmitočtu [2]	24
3.1.4 Magnetické násobiče kmitočtu [2]	26
3.1.5 Tyristorové měniče kmitočtu [2,3]	27
3.1.6 Napájení vysokofrekvenčními zdroji [9]	28
3.2 ZÁVISLOST INDUKČNÍHO OHŘEVU NA KMITOČTU [10]	28
3.3 VZTAH MEZI KMITOČTEM A KUSOVOSTÍ VSÁZKY [2,12]	29
3.4 VZTAH KMITOČTU A VZDUTÍ VSÁZKY [12]	32
3.5 POTŘEBNÝ POČET ZÁVITŮ INDUKTORU [2,13]	34
3.6 PÁSOVÉ VEDENÍ [2]	36
3.7 STÍNĚNÍ INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECE [2,10]	37
3.7.1 Stínění vodivým pláštěm [2,10]	38
3.7.2 Stínění svazky transformátorových plechů [2,10]	40
3.8 VYZDÍVKA KELÍMKU [3]	41
4 HODNOCENÍ INDUKČNÍHO TAVENÍ KRITERIEM 3E	41
4.1 EKONOMIKA [14]	41
4.2 ENERGETIKA [14]	42
4.3 EKOLOGIE [14]	42
ZÁVĚR	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	43

Úvod

Tato bakalářská práce je zaměřena na teorii indukčního ohřevu, převážně indukčních kelímkových pecí. První kapitola této práce nás seznámí s teorií indukčního ohřevu. Dále určíme oblasti užití indukčního ohřevu v praxi a následně zjistíme, jak dosáhneme nejvyšší efektivity pro tavení kovů při různých podmínkách, jako je volba zdroje, volba frekvence, nebo optimální tloušťka pásového vedení. Posledním bodem této bakalářské práce je zhodnocení indukčních ohřevů pomocí kritéria 3E.

Seznam symbolů a zkratek:

- a – hloubka vniku naindukovaných proudů [m]
 a_1 – hloubka vniku naindukovaných proudů do cívky [m]
 a_2 – hloubka vniku naindukovaných proudů do vsázky [m]
 a_3 – hloubka vniku naindukovaných proudů do stínícího pláště [m]
 b – délka strany šestiúhelníku [m]
 d_1 – vnitřní průměr cívky [m]
 d_2 – průměr vsázky [m]
 d_3 – průměr stínícího pláště [m]
 d_c – náhradní průměr cívky [m]
 d_s – náhradní průměr stínícího pláště [m]
 d_v – náhradní průměr vsázky [m]
 \mathbf{E} – vektor intenzity elektrického pole [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
 f – kmitočet proudu v cívce [Hz]
 F_{12} – součinitel pro výpočet vzájemné indukčnosti cívky a vsázky [-]
 \mathbf{H} – vektor intenzity magnetického pole [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$]
 H_1 – intenzita mag. pole uvnitř cívky [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$],
 H_{2p} – intenzita mag. pole na povrchu vsázky [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$]
 h_v – výška vzduší hladiny taveniny [m]
 I_1 – elektrický proud cívkou [A]
 I_2 – elektrický proud vsázkou [A]
 I_3 – elektrický proud stíněním [A]
 \mathbf{J} – vektor proudové hustoty [$\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$]
 l_1 – délka cívky [m]
 l_2 – délka vsázky [m]
 l_3 – délka pláště [m]
 L_1 – vlastní indukčnost cívky [H]
 L_2 – vlastní indukčnost vsázky [H]
 L_3 – vlastní indukčnost stínění [H]
 M_{12} – vzájemná indukčnost cívkou a vsázkou [H]
 M_{13} – vzájemná indukčnost cívkou a stíněním [H]
 M_{23} – vzájemná indukčnost vsázkou a stíněním [H]

- N_1 – počet závitů cívky [-]
 n_t – počet tyčí [-]
 N_i – počet závitů cívky [-]
 P_{21} – indukované teplo v jedné tyči [$W \cdot m^{-1}$]
 P_{2n} – indukované teplo v celé vsázce [$W \cdot m^{-1}$]
 P_g – výkon napájecího zdroje [W]
 P_r – příkon na odporech [W]
 $P(x_2)$ – funkce závislá na argumentu x_2 [-]
 r_2 – poloměr vsázky [m]
 R_1 – odpor cívky [Ω]
 R_2 – činný odpor vsázky [Ω]
 R_3 – činný odpor stínění [Ω]
 R'_1 – převedený odpor vsázky do cívky [Ω]
 R_c – činný odpor kondenzátorové baterie a přívodního pásového vedení [Ω]
 R_k – činný odpor kondenzátorové baterie [Ω]
 R_v – činný odpor přívodního pásového vedení [Ω]
 S_2 – plocha kruhového průřezu tyče i s mezerami [m^2]
 $S_{2stř}$ – střední plocha dutiny kelímku [m^2]
 U_g – napájecí napětí cívky [V]
 x_2 – argument hloubky vniku [-]
 \bar{Z} – impedance pásového vedení [Ω]
 Z_1 – impedance cívky [Ω]
 Z_2 – impedance vsázky [Ω]
 Z_3 – impedance stínění [Ω]
 α_1 – Nagaokův součinitel pro výpočet vlastní indukčnosti vsázky [-]
 ϵ – součinitel [-]
 ϵ_0 – permitivita vakua [$F \cdot m^{-1}$]
 ϵ_r – relativní permitivita prostředí [-]
 μ_0 – permeabilita vakua [$H \cdot m^{-1}$]
 μ_r – relativní permeabilita prostředí [-]
 ρ_1 – měrný odpor vodiče cívky [$\Omega \cdot m$]
 ρ_2 – měrný odpor vsázky [$\Omega \cdot m$]
 ρ_3 – měrný odpor stínění [$\Omega \cdot m$]

γ – konduktivita (měrná vodivost) [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]

ω – úhlová frekvence [$1/\text{s}$]

Ψ – spřažený magnetický tok [Wb]

x, y, z – souřadnice kartézského souřadného systému [m]

r, φ, z – souřadnice válcového souřadného systému,
průvodič r [m] , úhel φ [rad], souřadnice z [m]

Matematické operátory

div - divergence

grad – gradient

rot - rotace

∇ – Hamiltonův operátor

Rozlišení veličin

Vektorové veličiny jsou psány *tučně kurzívou*

Fázory jsou označeny pruhem nad veličinou například \bar{Z}

1 Stručně o teorii indukčního ohřevu [1,2]

Indukční ohřev lze realizovat jen u materiálů elektricky vodivých, Zdroj vytvoří střídavé magnetické pole, do kterého se vloží předmět z elektricky vodivého materiálu, a tím se začnou indukovat vířivé proudy, které tento předmět zahřívají. Největší výhodou tohoto ohřevu je, že teplo vzniká přímo ve vsázce a vsázka je tím nejteplejším objektem a vše ostatní může zůstat studené a to je příčinou velmi rychlého ohřívání vsázky. Druhou výhodou je, že podle volby kmitočtu můžeme určit tloušťku vrstvy u povrchu vsázky, ve které teplo vzniká. Další výhodou je, že všechny části této soustavy jsou galvanicky oddělené od ohřívané vsázky.

1.1 Maxwellovy rovnice [4,1]

$$1. \operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (1)$$

$$2. \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2)$$

$$3. \operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad (3)$$

$$4. \operatorname{div} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

$$\text{Kde } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$$

Tyto čtyři rovnice jsou Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru, díky těmto rovnicím se odvozují obecné vlnové rovnice pro šíření elektromagnetického vlnění. Vlnové rovnice se získají aplikací další operace rotace a vektorového počtu na 1. a 2. Maxwellovu rovnici.

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

1.2 Vlnové rovnice [4,1]

První člen v rozdílu je roven nule. Tímto získáme vlnové rovnice

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (5)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \operatorname{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (6)$$

Kde rovnice (5) je magnetická složka vlnových rovnic a rovnice (6) je elektrická složka vlnových rovnic. Tyto rovnice platí v prostředí, kde γ , μ_0 a μ_r jsou konstanty.

Budeme uvažovat prostředí, kde nejsou volné náboje, to znamená $\rho = 0$. Potom rovnice (6) bude mít tvar:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (7)$$

Dále budeme uvažovat dvě prostředí. První prostředí, kde zanedbáme ε_r , je prostředí elektricky vodivé a jeho rovnice jsou:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (8)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (9)$$

Pro elektricky nevodivé prostředí se zanedbá γ a následkem toho platí rovnice:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (10)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (11)$$

Úpravami rovnic (5) a (7) pomocí vyjádření časových derivací a následnou úpravou se dostaneme k rovnicím pro harmonické elektromagnetické vlnění:

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (12)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (13)$$

Pro pravoúhlé souřadnice platí.

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

Budeme uvažovat jevy jako jednosměrné, pro snazší matematické řešení a také pro názornost. To znamená, že \mathbf{H} a \mathbf{E} již nebudou záviset na všech souřadnicích x , y , z , ale jen na souřadnici x . Následně platí:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial z^2} = 0 \quad (15)$$

Budeme uvažovat \mathbf{H} a \mathbf{E} konstantní v každém bodě roviny kolmé na osy x , určené souřadnicí x . Díky tomu zavedeme takzvanou rovinnou vlnu, pro kterou platí:

$$k^2 = (\omega^2 \mu \epsilon - j \omega \mu \gamma) = -j \omega \mu (\gamma + j \omega \epsilon) \quad (16)$$

$$k = \alpha - j\beta, \quad k^2 = \alpha^2 - 2j\alpha\beta - \beta^2 \quad (17)$$

kde

k – konstanta šíření elektromagnetického vlnění

α - fázová konstanta

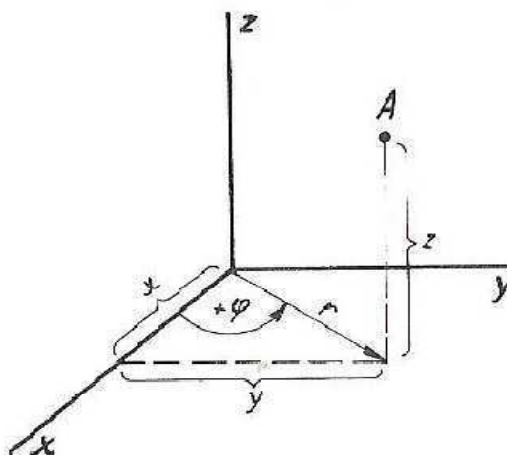
β - měrný útlum

k je konstanta, která charakterizuje šíření elektromagnetického vlnění v uvažovaném prostředí, kde mají fáze E a H harmonický průběh a úhlový kmitočet ω .

1.3 Válcové elektromagnetické vlnění [4,1]

V technické praxi máme mnoho předmětů, které jsou válcového tvaru a je nutné je indukčně ohřívat. Válcový tvar má i mnoho cívek a různých vinutí. Díky tomu je potřeba uvažovat vlastnosti a zákonitosti pro elektromagnetické vlnění v těchto válcových útvarech. Pro jednodušší úvahy budeme studovat jevy v teoreticky nekonečně dlouhých válcových útvarech. Tyto jevy potom závisí pouze na jednom rozměru, obvykle na poloměru r .

Válcové elektromagnetické vlnění se vyskytuje například v dutině dlouhé válcové cívky, kterou prochází střídavý proud. Zavedeme si k zjišťování poměrů a jevů na válcových útvarech válcové (cylindrické) souřadnice, které jsou znázorněny na obrázku (1)



Obr. 1 Válcové souřadnice [1, s. 180]

Na obrázku (1) je A libovolný bod určený, průvodičem r , úhlem φ a souřadnicí z . Z tohoto obrázku je patrné, že mezi válcovými a rovinnými souřadnicemi, jsou určité vztahy:

$$x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi, \quad z = z$$

Potom pro pravouhlé souřadnice platí rovnice:

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} \quad (18)$$

Následně pro válcové souřadnice platí rovnice:

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} \quad (19)$$

Pokud jev bude konstantní pro všechny φ a z a bude záviset na souřadnicí r , bude potom platit:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial \varphi^2} = \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \quad (20)$$

Potom výsledný vztah pro náš případ již s fázory bude:

$$\nabla^2 H = \frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H}{\partial r} = \frac{d^2 H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} \quad (21)$$

Následným dosazením válcových souřadnic do rovnice pro harmonický průběh H (12) a jejím řešením získáme pro H následující vztah:

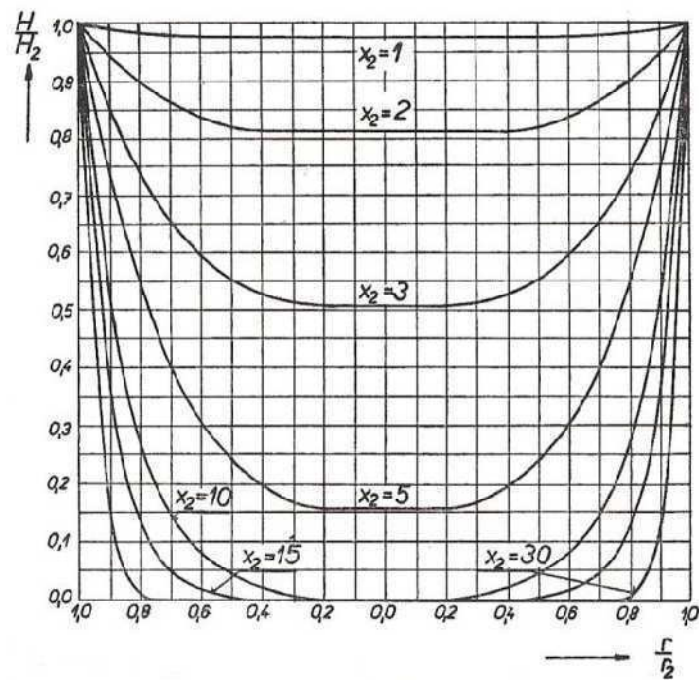
$$H = C_1 J_0(kr) + C_2 N_0(kr) \quad (22)$$

Postup bude obdobný i pro E s respektováním vazby na H (vypočteme z 1. Maxwellovy rovnice).

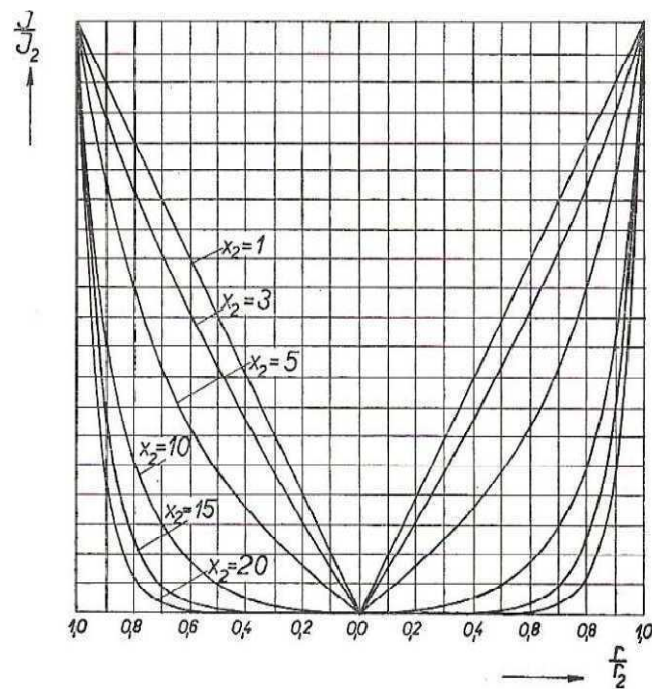
$$E = + \frac{k}{\gamma} [C_1 J_0(kr) + C_2 N_0(kr)] \quad (23)$$

Z toho potom C_1 a C_2 jsou integrační konstanty. N_0 a J_0 jsou cylindrické funkce nultého řádu, J je prvního druhu a N druhého druhu argumentu kr .

Pro H a $J(E)$ pak získáme následující průběhy:



Obr. 2 Rozložení intenzity magnetického pole H v indukčně ohřivaném válci v závislosti na argumentu x_2 [1, s. 192]



Obr. 3 Rozložení proudové hustoty $J(E)$ v indukčně ohřivaném válci v závislosti na argumentu x_2 [1, s. 192]

2 Oblasti užití indukčních ohřevů v praxi

Indukční ohřevy jsou nedílnou součástí mnoha odvětví technologických procesů, setkáme se s nimi v oblastech od kalení přes svařování a slinování až po speciální případy jako je ohřev materiálu ve vakuu nebo v plynu. Za účelem tavení, prohřívání a proudového ohřevu pro kalení.

2.1 Indukční prohřívání [2]

Prohřívání je potřeba při zhotovování součástek za horka, jako je například kování nebo lisování. Při prohřívání je nejdůležitější rovnoměrné prohřátí materiálu v celém průřezu. Jako materiál jsou nejčastěji používány ocelové, válcové nebo čtyřhranné profily, které je třeba ohřát na kovací teplotu, což je přibližně 1150°C až 1250°C. Dříve se tak dělo ve starších kovárnách v pecích palivových vytápěných plynem, práškovým uhlím, nebo naftou, ale prohřívání v těchto pecích mělo nevýhody v tom, že dostatečně rovnoměrné prohřátí v celém průřezu trvalo příliš dlouho a tak docházelo na povrchu materiálu k oxidaci. Naopak při indukčním prohřívání, vzniká teplo přímo v materiálu, a proto je prohřívání velmi rychlé, takže materiál na povrchu prakticky neoxiduje. Nejvýhodnější je indukční prohřívání použít v sériové výrobě, jako například v automobilovém průmyslu, nebo v závodech na kuličková ložiska a podobně. Díky těmto výhodám se indukční prohřívání nasazuje do nově budovaných kováren.



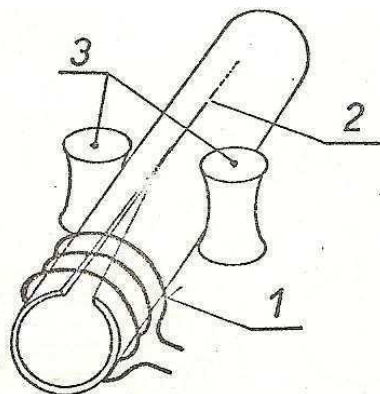
Obr. 4 Například v automobilkách se realizovalo indukčním ohřevem nasazování ozubených kol za tepla. [5]

2.2 Indukční svařování [11,2]

Indukční svařování je vhodné u součástek, které se kontinuálně podélně svařují. Nejčastěji se používá pro podélné svařování trubek. Touto metodou se dobře svařuje čistý hliník i hliník legovaný manganem i magnéziem.

Na obrázku (5) je induktor 1, což je cívka s více závitů do které přivádíme vysokofrekvenční proud. Tato cívka obepíná svařovanou trubku, která byla dříve jako ocelový pás o tloušťce 1,5 až 5mm za studena formována do tvaru trubky rychlostí 10 – 80 m za minutu pomocí bočních kladek 3. Potom se do trubky, která prochází indukční cívkou, indukují proudy, které se uzavírají v místě, kde se oba okraje dotknou. V místě dotyku vzniká teplota potřebná ke svaření, což je přibližně 1400 °C. Tato teplota vzniká vlivem vysoké hustoty naindukovaného proudu v tomto místě.

U tohoto způsobu svařování jsou používány kmitočty 250 – 400kHz a příkony do 600 kW. Tímto způsobem se svařují trubky o průměru 2 – 50 cm.



Obr. 5 Indukční svařování trub [2, s. 123]



Obr. 6 Svařování kovové části z částí z umělé hmoty, například zatavení kovové části šroubováku s umělou uchopovací částí [6]

2.3 Indukční kalení [2]

Jeden ze základních faktorů pro povrchové kalení je zvolení vhodného kmitočtu kvůli tloušťce povrchové vrstvy, která má být prokalena. Neméně důležitým faktorem je poměrně vysoký měrný příkon. Při povrchovém kalení musí proběhnout zahřátí velmi rychle, aby teplo neunikalo vedením do spodních vrstev materiálu.

Například při kalení válců pro válcovací stolice, mají tyto válce poměrně velké rozměry od průměru několika decimetrů až přes 1 metr a velkou hmotnost, například válec o průměru 0,6 metru a délce 3m, má hmotnost přibližně 6,5 tuny. Válce určené pro válcování plechů za studena, se po čase do určité míry opotřebují a je potřeba je na soustruhu tenkou vrstvou ubrat a zabrousit. Po několika opakování se spotřebuje celá vrstva prokaleného materiálu.

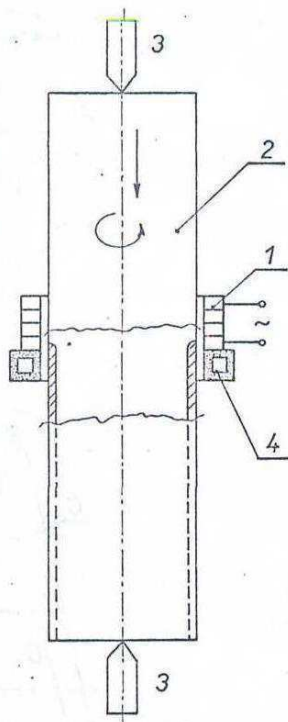
Dříve se kalení provádělo ve svislých palivových pecích pomocí hořáků a následným ponořením do kalící lázně. Toto kalení trvalo několik dní a docházelo při něm při náhlé změně teploty k poškození až 30 % válců, což znamenalo velké škody.

Kalení indukčním způsobem je zobrazeno na obr (7) Ve speciálním zařízení 3 je uchycen ve svislé poloze válec 2, který se pomalu otáčí a posouvá směrem dolů. Při tomto pohybu se postupně zahřeje na kalící teplotu. Po té co se dostane válec do prstence 4, který je uchycen na dolním okraji induktoru, stříká na žhavý válec voda z otvorů na vnitřní straně prstence, která způsobí prudké ochlazení a tím prokalení povrchové vrstvy.

Například pro výše uvedený válec o průměru 0,6 metru se používá středofrekvenční příkon 600 kW a 1000 Hz. Při této frekvenci a příkonu trvá kalení do hloubky 1,5 až 2 cm přibližně 3 hodiny.

Při výše popsaném problému o opotřebovávání válců na válcování plechů za studena, se při kalení plamenem struktura materiálu změnila do té míry, že při opotřebení prokalené vrstvy byl válec dále nepoužitelný a rozřezal se na kusy jako šrot. To je další nesporná výhoda indukčního kalení, kdy vnitřek materiálu zůstává strukturálně nepozměněný a proto je možné při opotřebení zakalené vrstvy válců, tento válec obrousit a opět zakalit. To lze opakovat několikrát, takže materiál válce se oproti kalení plamenem daleko lépe využije.

U válce, který má průměr přes 1 metr dosahuje hmotnost až k desítkám tun. V tomto případě je výhodnější, když se pohybuje svisle induktor a válec se jen pomalu otáčí.



Obr. 7 Kalení indukčním způsobem [2, s. 121]



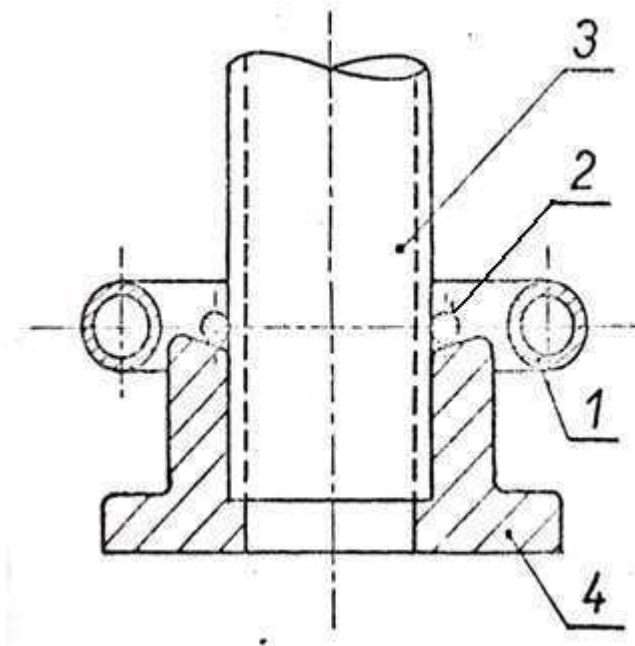
Obr. 8 Indukční kalení hřídele [7]

2.4 Indukční pájení [2,8]

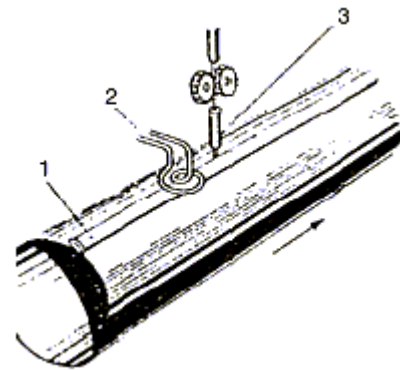
Pájení, je tepelný proces, ve kterém jsou dva či více stejných nebo různých materiálů spojeny pomocí jiné kovové slitiny s nižším bodem tání. Výhoda oproti svařování je, že není nebezpečí tepelné deformace pájeného místa.

Indukční pájení se používá v mnoha odvětvích průmyslu. Používá se většinou pájení cínem nebo mosazí. Výhodou indukčního pájení je malá energetická náročnost a také rychlost prohřátí spojovaného místa. Rychlost pájení je důležitá především u spojování materiálů s dobrou tepelnou vodivostí.

Další aplikací, která se používá v mnoha odvětvích průmyslu, je pájení vík plechových krabic cínem, je využíváno například v potravinářském průmyslu. V tomto případě se používají kmitočty několika set kHz z elektronických generátorů.



Obr 9. Pájení trubky do příruby [2, s. 121]



Obr 10. Pájení plášťové trubky [8]

Na obrázku (9) je naznačeno pájení trubky 3 do příruby 4 pomocí pájky 2, která má tvar kroužku. Do induktoru 1 se přivede vysokofrekvenční proud a nastane indukční zahřátí pájky, trubky i příruby. Do mezery mezi trubkou a přírubou vteče roztavená pájka vztlínáním.

Na obrázku (10) je zobrazeno indukční pájení plášťové trubky, která se pohybuje po směru šipky a pomocí kontinuálního přivádění pájky 3 a induktoru 2 se připájí přes přeloženou drážku 1.

3 Podmínky pro efektivní tavení kovů v indukčních pecích

3.1 Zdroje napájení [2,9]

Jelikož indukční tepelná zařízení pracují ve velkém frekvenčním rozsahu, proto dělíme zdroje pro napájení do tří skupin. První skupinou jsou zdroje se sítovou frekvencí, další skupinou jsou středofrekvenční zdroje a poslední skupinou jsou vysokofrekvenční zdroje.

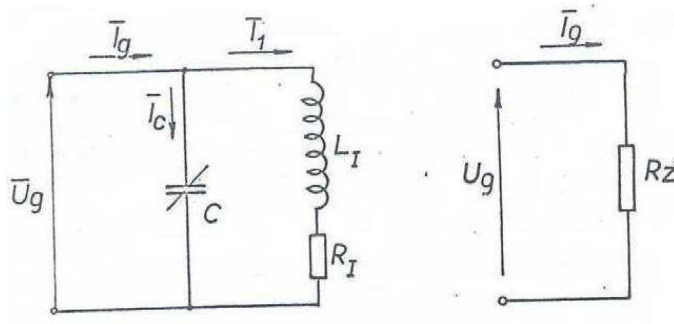
Zdroje pro indukční kelímkové pece se konstruují nejčastěji pro frekvence 500-1000 Hz.

3.1.1 Zdroje se sítovou frekvencí [2,12]

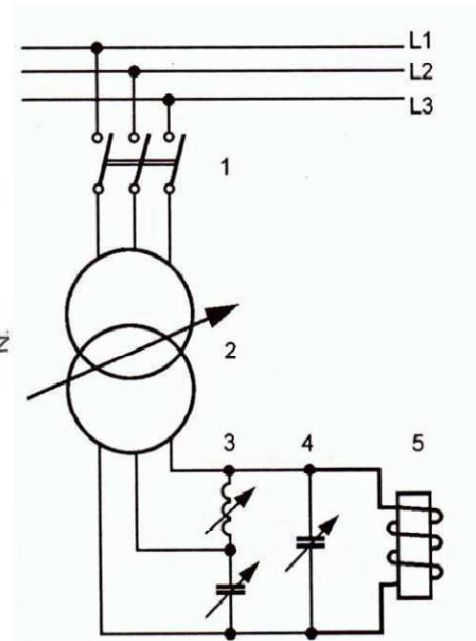
Některé indukční kelímkové pece jsou napájeny proudem o sítovém kmitočtu 50Hz. Na sítový kmitočet se připojují i indukční ohřívачky pro ohřívání větších průměrů válcových

těles, tyto průměry jsou v rozsahu 16 - 50 cm.

Indukční zařízení, jehož schéma je na obrázku (11) je jednofázová zátěž, která třífázovou síť zatěžuje nesymetricky. Obvykle odebírají velké výkony, až několika set kW, je nutné je připojit přes symetrizační zařízení, které zajistí, aby se pec chovala jako symetrické zatížení trojfázové napájecí sítě. Zapojení symetrizačního zařízení je na obrázku (12)



Obr. 11 Indukční zařízení [2, s. 125]

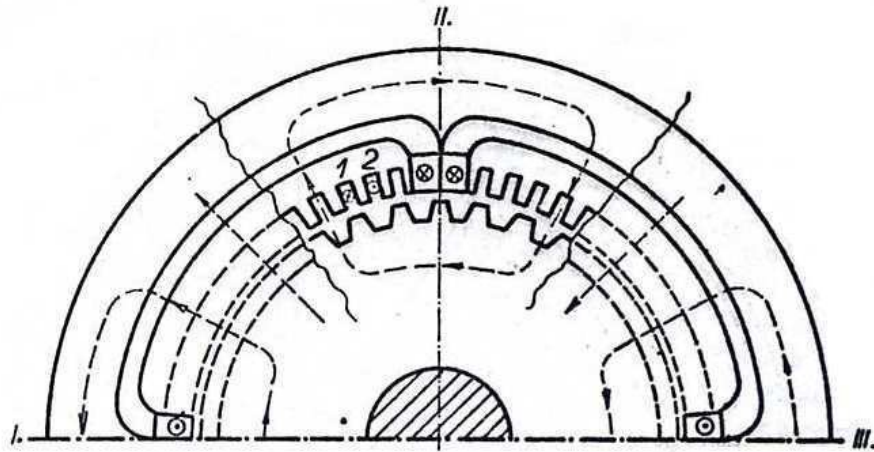


Obr. 12 Připojení indukční kelímkové pece na síť, se symetrizačním zařízením. [9]

- 1 je výkonový spínač, který připojí regulační transformátor
- 2 regulační transformátor
- 3 Symetrizační obvod převádí jednofázovou zátěž na třífázovou
- 4 je paralelně připojená kondenzátorová kompenzační baterie
- 5 induktor

3.1.2 Rotační generátory pro proudy středních kmitočtů [2]

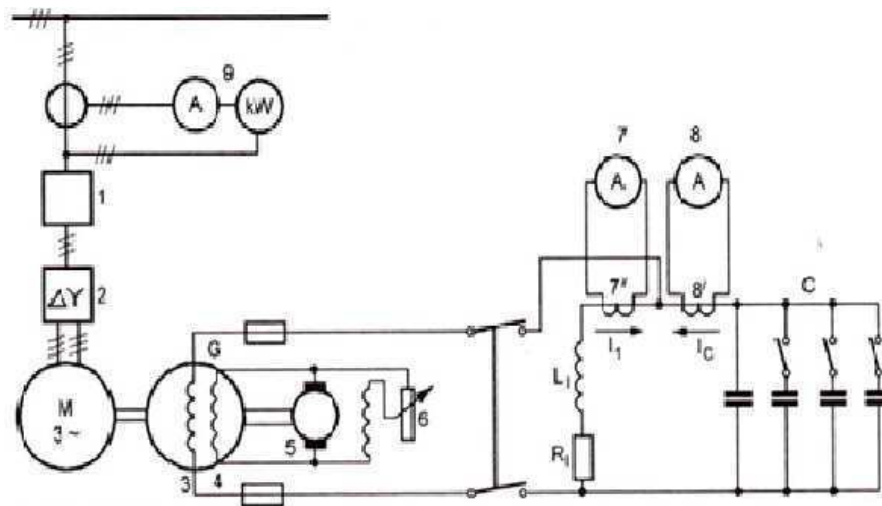
Rotační generátor se používá pro napájení indukčních tavicích pecí a prohřívacích zařízení o frekvenci 500 - 10000 Hz. Schematické vyznačení rotačního generátoru na obrázku (13)



Obr. 13 Schematické zobrazení rotačního generátoru [2, s. 130]

Ve statoru generátoru jsou dva druhy drážek. V pracovním vinutí vznikají proudy vyšších kmitočtů, které jsou uloženy v menších drážkách. Jako vodiče se používá větší množství měděných drátů se smaltovou izolací, které jsou spleteny do lanek. Ve větších drážkách je uloženo budící vinutí napájené stejnosměrným proudem. Toto budící vinutí se vyrábí jako dvou pólové, čtyřpólové nebo šestipólové. Na obrázku je generátor zobrazen se čtyřpólovým budícím vinutím. Rotor je vyroben z ocelolitininy a má na povrchu věnec vyrobený z tenkých dynamových plechů. Tento rotor je bez vinutí a s drážkami. Tento typ generátoru se označuje jako heteropolární, to znamená, že při pohledu na stator proti ose generátoru je viditelné střídání pólu budícího vinutí. Budit se musí stejnosměrným proudem.

Elektrická účinnost rotačních generátorů klesá se zvyšující se frekvencí, protože se zvyšující frekvencí rostou ztráty v železe. Účinnost při frekvenci 500 Hz je přibližně 90 %, následně při frekvenci 10 kHz je účinnost již jen 70 %.



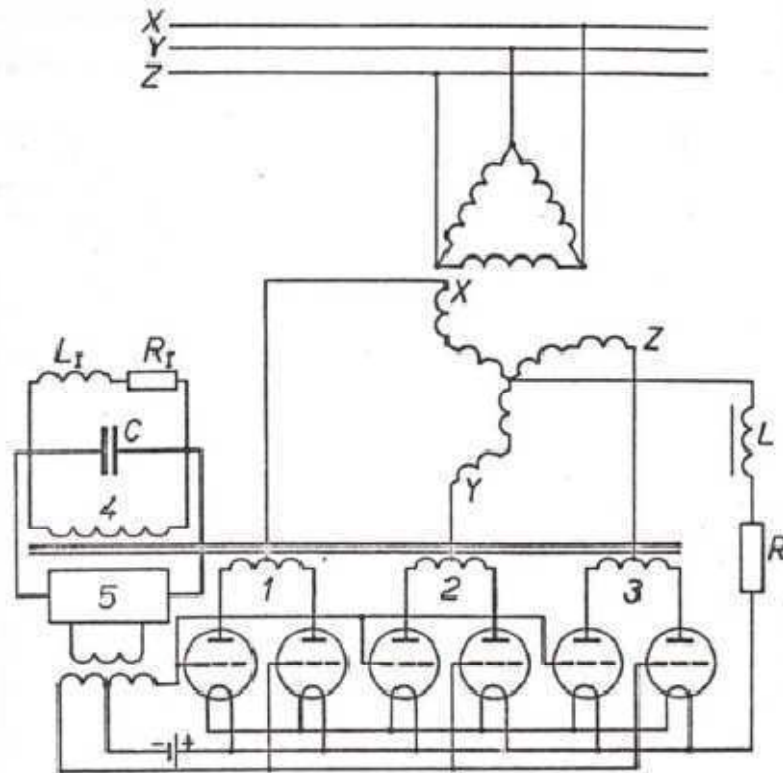
Obr. 14 napájení indukční kelímkové pece rotačním generátorem [9]

Na obrázku (14) je zobrazeno elektrické schéma indukční kelímkové pece napájené rotačním generátorem. M je asynchronní motor s kotvou nakrátko, větší motory bývají s kotvou kroužkovou, proud jde do motoru přes olejový vypínač 1 a přes přepínač hvězda-trojúhelník 2. Motor je spojen s rotačním heteropolárním generátorem G. Součástí generátoru jsou dvě vinutí, budící vinutí 4 a pracovní vinutí 3. Usměrňovač 5 s rotačním budičem 6 dodávají proud budícímu vinutí. Výkon, který dodává generátor do pecního vyladěného obvodu, se změní při změně budícího napětí. Pecní cívka s hodnotami L , R , paralelně připojená kondenzátorová baterie C tvoří vyladěný obvod, ve kterém se měří, pomocí ampérmetrů 7 a 8 přes měniče, proud. Ve vyladěném obvodu jsou oba proudy prakticky stejné.

3.1.3 Iontové měniče kmitočtu [2]

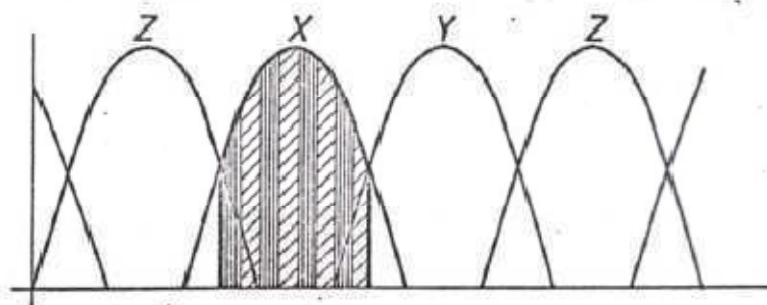
Tyto měniče se začaly vyvíjet již v padesátých letech, měly se stát náhradou za rotační měniče, které již začaly být zastaralé. Výhodou iontových měničů oproti rotačním bylo, že při stoupání teploty vsázky se nemusela doladovat kapacita. Další výhodou bylo, že mají mnohem menší hmotnost, protože neobsahují rotující část a tudíž nepotřebují masivní betonové základy. Elektrická účinnost měniče byla až kolem 92 – 95 %. Nespornou výhodou byla také bezhlučnost.

Později se však v praxi ukázalo, že iontové měniče byly v provozu nespolehlivé, kvůli zpětným zápalům v tyratronech. Doba potřebná k tomu, aby se stal tyratron po přiložení záporného napětí zcela nevodivým je 10^{-4} s. Ale spolehlivost v provozu nelze zaručit ani při kmitočtu odebíraného z měniče do 10^3 Hz.



Obr. 15 Iontový měnič kmitočtu [2 str. 133]

Na obrázku (15) je schéma iontového měniče se šesti tyratrony, který je zapojen do sítě přes transformátor v zapojení trojúhelník-lomená hvězda. Svrčky X, Y, Z jsou připojeny do středů cívek 1, 2, 3. Konce cívek 1, 2, 3 jsou zapojeny do anod tyratronu. Pracovní vinutí 4 je na uzavřeném železném jádru společně s cívkami. V případě, že by konec každé fáze byl připojen k anodě jednoho tyratronu, by měnič fungoval jako trojfázový usměrňovač, jehož průběhy jsou na obrázku (16).

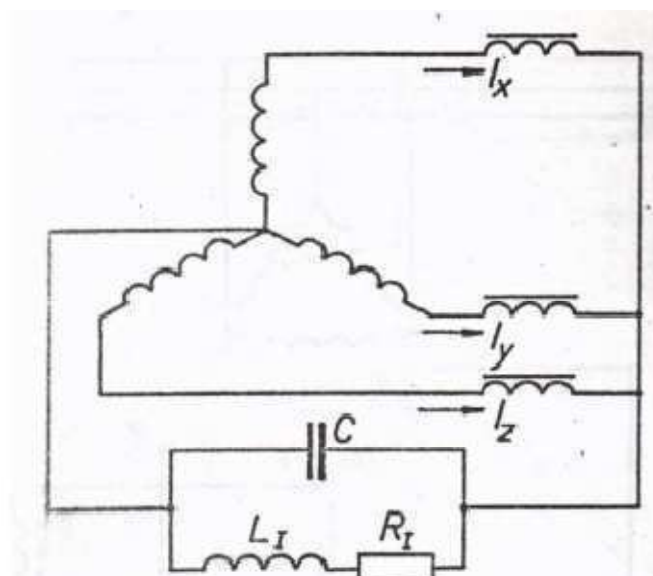


Obr 16 Průběh usměrněného napětí [2 str. 133]

V našem případě je vždy jedna s fází připojena na dva tyratrony, z nichž jeden, který má na mřížce ovládací napětí, propouští a druhý nepropouští, je uzavřen. Za krátkou dobu, ovládací elektronika změní polaritu na mřížkách, a první tyratron, který propouštěl, se uzavře a druhý začne propouštět. Takto se tento cyklus stále opakuje. Pecní cívka L_I , R_I je připojena na pracovní vinutí 4 a paralelně k ní je připojena kondenzátorová baterie C. Od středu cívek k tyratronu, který zrovna propouští procházejí proudové rázy a dochází k přivození magnetického toku v železném jádru. V pracovním vinutí naindukují střídavé magnetické toky napětí, kterým je napájen pecní obvod. Následně je trvalé napájení obvodu zvýšenou frekvencí, která je řízena střídavým spouštěním tyratronů v každé z fází. Z pecního oscilačního obvodu se pomocí zpětné vazby 5 určuje kmitočet pro střídavé buzení tyratronů. Pro nespolehlivost nenašli tyto měniče širšího uplatnění.

3.1.4 Magnetické násobiče kmitočtu [2]

Z obrázku (17) je zřejmé, že primární strana transformátoru je připojena k síti a sekundární strana je zapojena do hvězdy. Tlumivky s přesyceným jádrem z transformátorových plechů jsou vloženy do všech tří fází sekundární strany. Mezi nulový vodič a společný uzel fází je vložen oscilační obvod. Následně se toto zapojení chová jako zdroj o trojnásobném kmitočtu sítě, tedy 150 Hz. Pomocí třetí harmonické je možno dosáhnout výstupní frekvence 9×50 Hz to je 450 Hz. Násobiče pro vyšší kmitočty jsou drahé, proto se používají spíše jako doplněk rotačních generátorů.



Obr. 17 Trojfázový násobič kmitočtu [2 str 133]

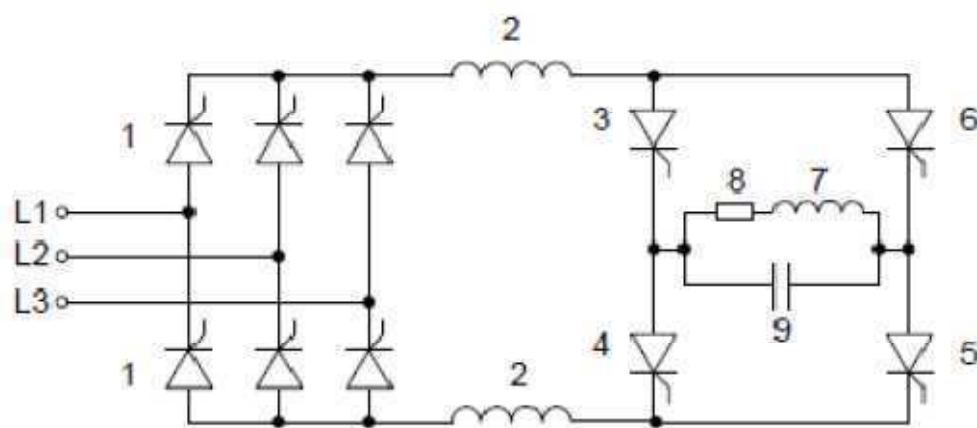
3.1.5 Tyristorové měniče kmitočtu [2,3]

Tyristorové měniče mají stejně tak jako iontové měniče spoustu výhod oproti rotačním generátorům, jako jsou, velká elektrická účinnost, přibližně 95 % oproti 80 – 85 %. Následkem odpadnutí rotujících částí a betonových základů mají podstatně menší hmotnost a nejsou tak hlučné. Odpadá i nutnost doladovat pecní obvod během tavení vsázky. Tyristorový měnič díky zpětné vazbě z vlastního kmitočtu obvodu, který je ovlivněn zahříváním vsázky, dodržuje automaticky pracovní kmitočet.

Toto zapojení na obrázku (18) sestává ze tří částí. První částí je řízený trojfázový usměrňovač, který se skládá z tyristorů 1 a umí pracovat i v invertorovém režimu. Druhou částí je meziobvodová tlumivka 2, která má tři důležité funkce. Funkce omezovací, omezuje nárůst zkratového proudu při zkratu v usměrňovači, než zareagují nadproudové ochrany. Funkce oddělovací přenáší se zpožděním napěťové rozdíly mezi usměrňovačem a střídačem. Funkce vyhlazovací vyhlazuje stejnosměrný proud z usměrňovače a je mírně zvlňný. A třetí částí je střídač, který se skládá z tyristorů 3 až 6, mezi které je připojen pecní obvod s indukčností 7 do série s odporem 8, který představuje činnou zátěž pece a k nim paralelně připojená kompenzační baterie 9.

Střídač pracuje na principu střídání spínání dvojic tyristorů, při sepnutí dvojice tyristorů 3 a 5 prochází pecním obvodem stejnosměrný proud v jednom směru a po určité době tyristory 3 a 5 vypnou a sepnou tyristory 4 a 6 a pecním obvodem teče stejnosměrný proud opačným směrem. Tyto cykly se stále opakují. Četnost spínání je řízena oscilačním pecním obvodem.

Velkou nevýhodou těchto měničů, je jejich působení na napájecí síť, vznik vyšších harmonických. Pro odstranění se používají filtry na vyšší harmonické.

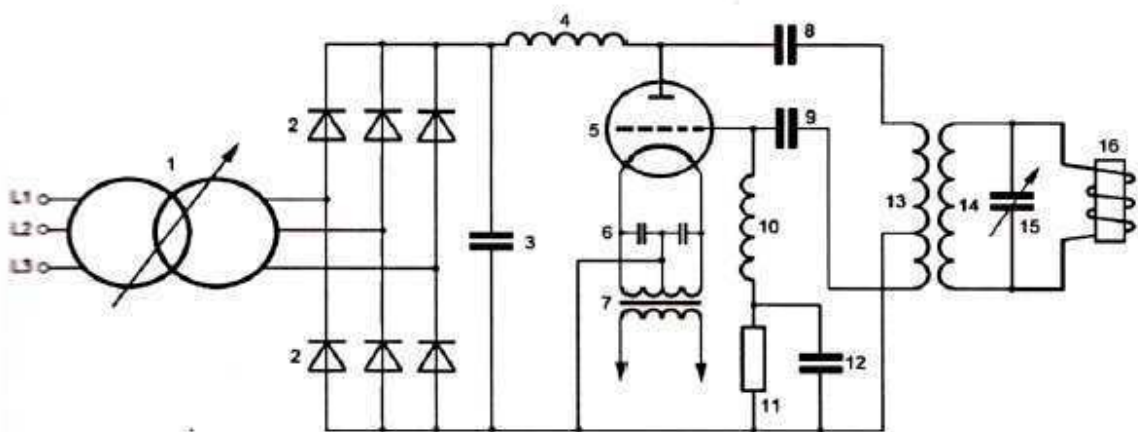


Obr. 18 Tyristorový měnič pro paralelní zapojení pecního obvodu [2 str. 134]

3.1.6 Napájení vysokofrekvenčními zdroji [9]

Na obrázku (19) je zobrazeno schéma vysokofrekvenčního elektronkového generátoru. Usměrňovací diody, které jsou součástí usměrňovače 2, napájí regulační vstupní transformátor 1, který je připojen k síti. Kondenzátor 3 slouží k vyhlazení napětí. Oddělovací tlumivka 4 je připojena na výkonovou triodu 5. Žhavicí transformátor 7 je připojen ke kondenzátorům 6, které se používají ke zkratování vysokofrekvenčních složek. 13 je vysokofrekvenční transformátor, jehož primární vinutí je propojeno přes oddělovací kondenzátor 8 k tlumivce 4. Pomocí oddělovacího kondenzátoru 9 je umožněn průtok střídavých proudů zpětné vazby. Tlumivka 10 slouží k zabránění zkratování mřížkového napětí transformátorem. Záporné napětí mřížky vzniká na odporu 11. Kompenzační kondenzátor 15 je spojen paralelně k sekundárnímu vinutí transformátoru 14. 16 je ohřívací cívka indukčního ohřevu.

Oscilační obvod je tvořen vysokofrekvenčním transformátorem, kondenzátorem a induktorem. Tento obvod pracuje na dané frekvenci. Pomocí odbočky na primárním vinutí transformátoru a mřížky diody je vytvořena zpětná vazba.



Obr. 19 Vysokofrekvenční zdroj [9]

3.2 Závislost indukčního ohřevu na kmitočtu [10]

Napětí, které se indukuje do vsázky, je velmi závislé na frekvenci indukčního toku a tím pádem i napájecího napětí. U indukčního ohřevu nám nastává jev, kdy proudová hustota je vytlačována vlivem vyšší frekvence na povrch ohřívaného tělesa. Tento jev se nazývá skin efekt.

Fyzikální veličina, která popisuje skin efekt, je hloubka vniku indukčního elektromagnetického vlnění do ohřívané vsázky, která se vypočte ze vztahu:

$$a_2 = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \gamma}} \text{ [m]} \quad (24)$$

Kde a_2 je hloubka vniku naindukovaných proudů do vsázky [m]

ω je úhlová frekvence [$\text{rad}\cdot\text{S}^{-1}$]

μ_0 je permeabilita vakua [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]

μ_r je relativní permeabilita [-]

γ je měrná elektrická vodivost [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]

Pomocí tohoto vzorce se dá odvodit nepřímá závislost frekvence na hloubce vniku. Se zvyšující se frekvencí se hloubka vniku zmenšuje. Z toho vyplývá, že díky skin efektu můžeme pomocí frekvence ovlivnit hloubku prohřátí vsázky.

Pro hloubku vniku existují ještě další dvě definice, jedna z nich popisuje hloubku vniku jako vzdálenost, na které se vlna utlumí na 36,78 % a dopadající vlnění se utlumí v hloubce $6a$. A druhá definice nám říká, že v hloubce a vzniká 86,47 % naindukovaného tepla.

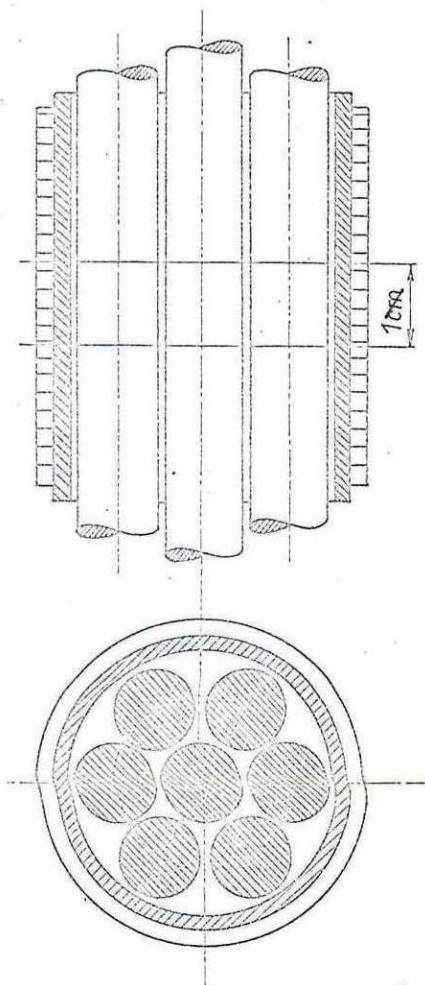
Také může nastat jev, při kterém se vsázka neohřívá, ale je spotřebována elektrická energie, tento nežádoucí jev se nazývá elektromagnetická průzařnost. Tento jev může nastat při nevhodně zvolené frekvenci vzhledem ke geometrickému tvaru vsázky. Elektromagnetická vlna se ve vsázce nedostatečně utlumí, projde vsázkou a nepřemění se efektivně na teplo.

3.3 Vztah mezi kmitočtem a kusovostí vsázky [2,12]

Při tavení nemůžeme uvažovat, že v dutině kelímku je souose umístěna plná válcová vsázka, jako například u indukčního prohřívání vývalků. Musíme počítat s tím, že elektricky nevodivý kelímek se plní zpravidla tříděným šrotem, což jsou kusy z jednoho materiálu. Navrhovaná pec by měla být schopná tento materiál s dobrou účinností roztavit. Proto musíme klást důraz i na faktor závislosti velikosti těchto kusů materiálu na kmitočtu.

Při tavení oceli musíme uvažovat tři rozdílné teplotní stavy materiálu, první je při teplotě vsázky od 20°C do 760°C kdy je vsázka tuhá, v kusech a magnetická permeabilita μ_r závisí na intenzitě magnetického pole a na druhu tavené oceli. Druhý teplotní stav je od 760°C do 1400°C . V tomto teplotním rozmezí je vsázka stále ještě tuhá, v kusech, ale již nemagnetická, magnetická permeabilita μ_r je rovna 1. Ocel se začíná tavit přibližně při teplotě 1400°C , takže poslední uvažovaný teplotní stav je od 1400°C do 1600°C kdy je již ocel tekutá, nemagnetická a vyplňuje celou dutinu kelímku.

Nelze teoreticky vyšetřit obecný případ různých tvarů a velikostí šrotu, proto předpokládáme, že dutina kelímku je vyplněna soustavou válcových tyčí stejného materiálu souose umístěných v cívce, jak je znázorněno na obrázku (20).



Obr. 20 [2. Str 49]

Mezi tyčemi budeme uvažovat izolaci nulové tloušťky, z toho lze zjistit chování šrotu při tavení. Ve skutečnosti se kusy šrotu vzájemně dotýkají a tak se vytvoří ještě lepší podmínky pro tavení, než jsme uvažovali u soustavy tyčí.

V mezerách mezi tyčemi je homogenní magnetické pole

$$H_1 = \frac{N_1}{l_1} \cdot I_1 \text{ [A.m}^{-1}\text{]}, \quad (25)$$

kde H_1 je intenzita magnetického pole uvnitř cívky [A.m⁻¹],

N_1 je počet závitů cívky [-],

l_1 je délka cívky [m],

I_1 je proud protékající cívkou [A].

Indukované teplo v každé tyči

$$P_{21} = \pi \cdot \rho_2 \cdot x_2 \cdot P(x_2) \cdot H_1^2 \text{ [W.m}^{-1}\text{]}, \quad (26)$$

kde P_{21} je indukované teplo v jedné tyči [W.cm⁻¹],

ρ_2 je měrný odpor vsázky [$\Omega \cdot m$],

x_2 je argument [-],

$P(x_2)$ je funkce závislá na argumentu x_2 [-].

Argument x_2 se vypočte:

$$x_2 = \frac{r_2 \cdot \sqrt{2}}{a_2} \text{ [-]}, \quad (27)$$

kde r_2 je poloměr tyče [m],

a_2 je hloubka vniku naindukovaných proudů do vsázky [m].

Hloubka vniku je popsána ve vzorci (24)

Množství energie, které absorbuje celá vsázka je:

$$P_{2n} = n_t \cdot P_{21} \text{ [W.m}^{-1}\text{]}, \quad (28)$$

kde P_{2n} je indukované teplo v celé vsázce [W.m^{-1}],

n_t je počet tyčí [-],

P_{21} je indukované teplo v jedné tyči [W.m^{-1}].

Počet tyčí se vypočte jako:

$$n_t = \frac{S_{2stř}}{S_2} \text{ [-]}, \quad (29)$$

kde $S_{2stř}$ je střední plocha dutiny kelímku [m^2],

S_2 je plocha, kterou zabírá kruhový průřez tyče i s mezerami [m^2].

Každá z tyčí zabírá plochu, která je dána pravidelným šestiúhelníkem (obr. 21), opsaným uvažovaným tyčím, tato plocha je:

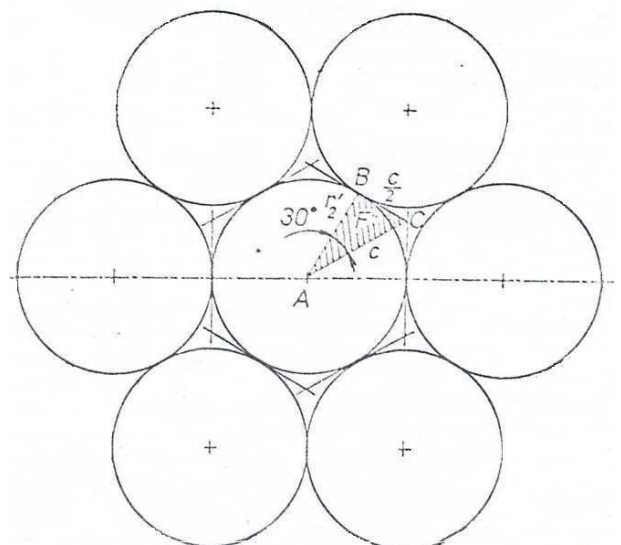
$$S_2 = 12 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{b}{2} \cdot r_2 \text{ [m}^2\text{]}, \quad (30)$$

kde S_2 je plocha opsaného šestiúhelníku [m^2],

b je délka strany šestiúhelníka [m],

r_2 je poloměr tyče [m].

Při polovičním průměru tyčí, bude tyčí v kelímku čtyřnásobek. V tom případě bude obvod každé tyče poloviční a tedy součet všech obvodů dvakrát větší. Tak bude i energie, která se do tyčí absorbuje dvakrát větší. Jestliže budeme nadále zmenšovat průměr tyčí, bude se zmenšovat množství absorbovaného tepla, tyče se začnou stávat pro elektromagnetické vlnění uvažovaného kmitočtu průzařnými.

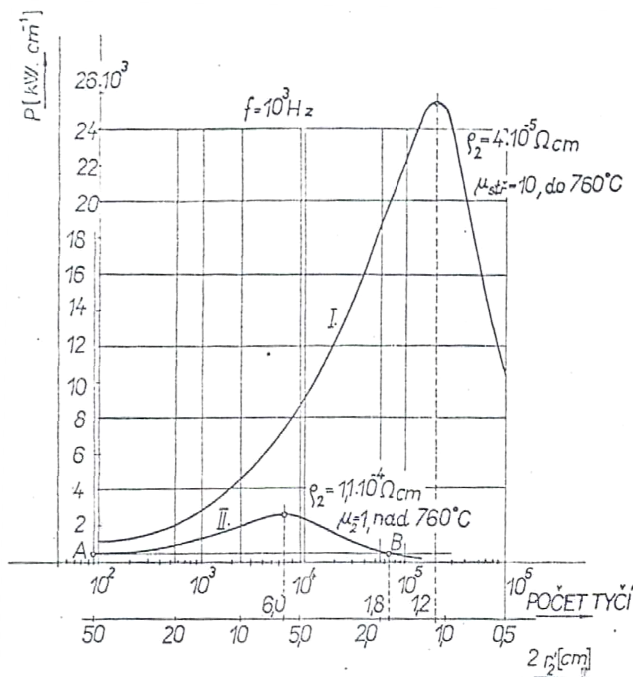


Obr. 21 [2, str. 50]

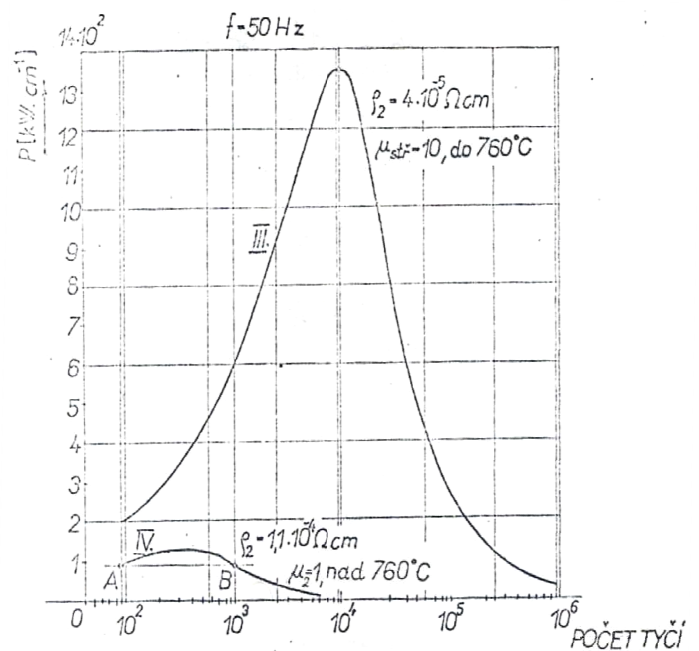
U obrázku 22 křivka I dosáhne vrcholu a začne klesat. Z tohoto grafu můžeme odečíst optimální průměr magnetické ocelové tyče, která absorbuje maximální množství energie při kmitočtu 1000 Hz a to je $2 r_2 = 1,2$ cm. Na stejném grafu je křivka II, která udává závislost elektromagnetické energie na počtu tyčí v kelímku při teplotách vyšších než 760°C tj. při ztrátě magnetizace. Dle charakteristik vidíme, že množství absorbované energie je

v nemagnetickém stavu vsázky značně nižší než ve stavu magnetickém. Proto je potřeba volit kusovost v charakteristice až po magnetické přeměně. Nejvhodnější průměr tyčí se určuje tak, že se najde takový průměr, u kterého se absorbuje stejné množství energie jako u průměru tyčí $2 r_2 = 50 \text{ cm}$ (bod A na grafu), což je přibližně množství tepla, které se vyvine v roztavené vsázce, kterou je zaplněn kelímek o průměru 50 cm. Tento průměr je znázorněn na grafu bodem B. Z toho vyplývá, že nejmenší průměr ocelových tyčí, který se dá tavit v indukční kelímkové peci o frekvenci 1000 Hz, aby absorboval stejnou energii jako tekutá vsázka o rozměru 50 cm je $2 r_2 = 1,8 \text{ cm}$.

Podobné to je i u grafu na obrázku (23), kde se uvažuje kmitočet 50 Hz a vychází minimální průměr tyče, což je i minimální zrnění šrotu, $2 r_2 = 16 \text{ cm}$. Podíváme-li se na oba diagramy je zřejmé, že při frekvenci 1000 Hz je značně větší absorpce energie než při frekvenci 50 Hz při stejném H_1 .



Obr. 22 [2, str. 51]



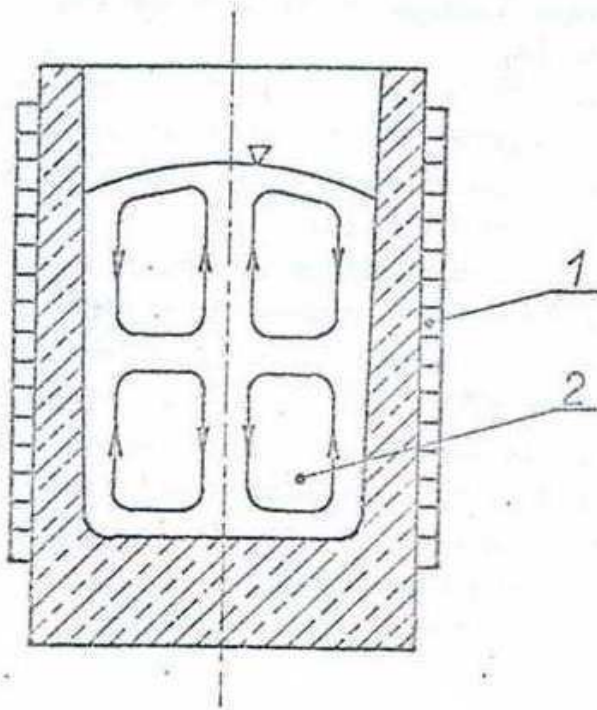
Obr. 23 [2, str. 51]

3.4 Vztah kmitočtu a vzdutí vsázky [12]

V nevodivém kelímku válcového tvaru, který obsahuje roztavenou vsázku, je na vnější straně cívka vinutá z měděné trubky, do níž se přivádí střídavý proud, cívka vyzařuje elektromagnetické vlnění, které dopadne na vsázku. V důsledku elektromagnetických sil,

které vznikají vzájemným působením proudů indukovaných ve vsázce a magnetického pole, se vsázka zahřívá a pohybuje. Po roztavení kovů vzniká pohyb taveniny (víření), které dopomáhá k dokonalému promíchání taveniny. Toto víření je velmi výhodnou vlastností indukčních kelímkových i kanálkových pecí. Následkem víření mají slitiny kovů a legované oceli dokonalé homogenní složení v celém objemu kelímku, které nelze dosáhnout v žádném jiném druhu pecí. Víření a jeho charakter, tak i intenzitu lze ovlivnit mnoha způsoby, jako je volbou frekvence, nebo velikostí kelímku, množstvím dodané energie, počtem fází induktoru a také umístěním induktoru vzhledem k vsázce.

Na obrázku (24) je znázorněn řez roztavenou vsázkou a víření kovu v indukční kelímkové tavící peci.



Obr. 24 [2, str. 53]

Rovnice pro výpočet vzdutí hladiny:

$$h_v = 6,4 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\mu_r}{\sqrt{\rho}} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot H_{2p} \right)^2 \text{ [m]}, \quad (31)$$

kde h_v je výška vzdutí hladiny taveniny [m],

μ_r je relativní permeabilita vsázky [-],

ρ je měrná hmotnost taveniny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],

H_{2p} je intenzita magnetického pole na povrchu vsázky [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$].

Může nastat situace, kdy je víření tak velké, že dochází k nadměrnému vzdutí taveniny, které vede k popraskání strusky a tavenina se dostává do styku se vzduchem a rychle reaguje s kyslíkem. Proto musíme při návrhu pece počítat s tímto problémem.

$$H_{2p} = H_1 \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{F_{12}}{\alpha_2} \text{ [A.m}^{-1}\text{]}, \quad (32)$$

kde H_1 je intenzita magnetického pole na povrchu vsázky [A.m^{-1}] viz vztah (25),

l_1 je délka cívky [m],

l_2 je délka vsázky [m],

F_{12} je součinitel pro výpočet vzájemné indukčnosti cívky a vsázky [-],

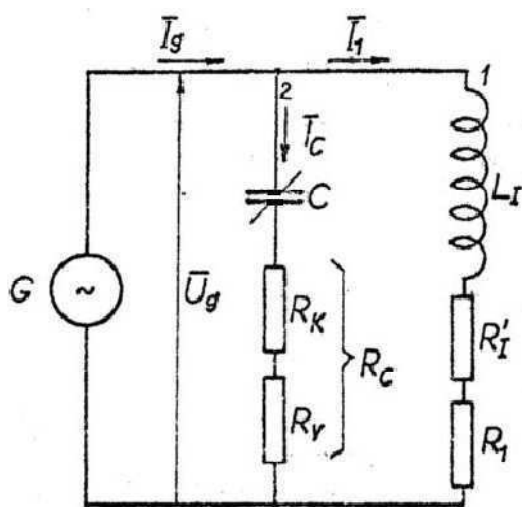
α_2 je Nagaokův součinitel pro výpočet vlastní indukčnosti vsázky [-].

Po vyřešení rovnic (31) a (32) vyšlo pro frekvenci 50Hz vzdutí $h_v = 14\text{cm}$ pro stínění svazky transformátorových plechů, a pro stínění vodivým pláštěm $h_v = 16\text{ cm}$. Následně pro frekvenci 1000Hz vyšlo vzdutí $h_v = 2\text{cm}$ pro stínění svazky transformátorových plechů, a pro stínění vodivým pláštěm $h_v = 2,6\text{ cm}$.

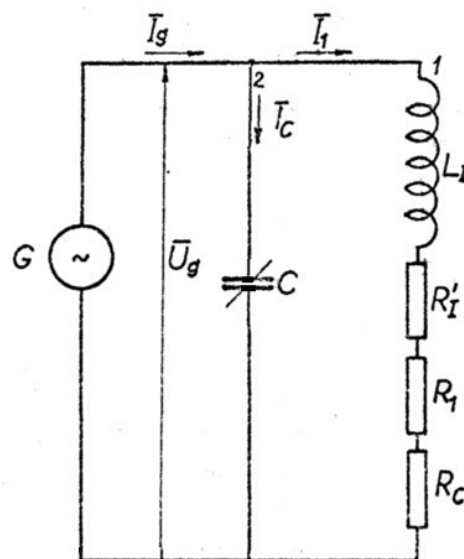
Jak je vidět z výsledků, tak se zvyšující se frekvencí klesá vzdutí vsázky. Pro frekvenci 50 Hz je velikost vzdutí příliš velké, proto se musí učinit opatření, aby se snížilo. To je možné buď nesymetrickým uložením induktoru vzhledem k vsázce, nebo také zmenšením příkonu.

3.5 Potřebný počet závitů induktoru [2,13]

Pro výpočet počtu závitů použijeme náhradní schéma upraveného pecního obvodu. V zájmu jednodušších výpočtů se dopustíme přípustné chyby menší než 1 %, tím, že přemístíme odpor R_c ve schématu na obrázku (25) z větve 2 do větve 1, kde dostaneme konečné schéma, které je na obrázku (26), kde jsou ve větvi zapojeny do série všechny činné odpory obvodu. $R_I = R'_I + R_I + R_C$



Obr.25 [2, str 38]



obr. 26 [2, str 40]

Budeme uvažovat oscilační obvod, který je vyladěný pro kmitočet přiváděného proudu. Tento vyladěný obvod respektuje zatěžovací odpor R_z , který musí být tak velký, aby mohl ze zdroje odebrat plný výkon P_g . Obrázek (26) lze popsat dvěma výchozími rovnicemi.

První rovnice je:

$$\bar{U}_g = \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2} \cdot I_1 = \omega L_1 \cdot (1 - \varepsilon) \cdot I_1, \quad (33)$$

kde U_g a I_g jsou efektivní hodnoty.

U tavicích pecí lze zanedbat R_1^2 proti $(\omega L_1)^2$, neboť $R_1^2 < 0,01 \cdot (\omega L_1)^2$, proto jsme mohli výraz (33) zjednodušit, nyní dosadíme do výrazu (33) za L_1 , kde L_1 je:

$$L_1 = \mu_0 \pi \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_1^2 \cdot \alpha_1}{l_1}, \quad (34)$$

$$U_g = \omega \mu_0 \pi \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_1^2 \cdot \alpha_1}{l_1} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot I_1 = k_1 \cdot N_1^2 \cdot I_1, \quad (35)$$

kde k_1 je pomocná konstanta, která se může vypočítat bez znalosti počtu závitů N_1 .

$$k_1 = \omega \mu_0 \pi \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot \frac{\alpha_1}{l_1} \quad (36)$$

Pro druhou rovnici uvažujeme správně navrženou pec, která odebrá ze zdroje plný výkon P_g . Tento výkon se spotřebuje v činných odporech $R_1 = R_1' + R_1 + R_C$, kterými prochází proud I_1 . Dále vycházíme z předpokladu, že na pokrytí dielektrických ztrát v kondenzátoru C a na ztráty v pásovém vedení, což jsou ztráty na odporu R_C , je z celkového příkonu P_g potřeba asi 5 %. Z toho vyplývá, že na odporech $R_1' + R_1$ se spotřebuje zbylých 95 % příkonu. Potom příkon na odporech je:

$$P_R = 0,95 \cdot P_g = (R_1' + R_1) \cdot I_1^2 \quad [\text{W}], \quad (37)$$

kde odpor R_1 je:

$$R_1 = \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_c \cdot N_1^2}{\alpha_1 \left(l_1 - \frac{U_g}{15000} \right)}, \quad (38)$$

kde odpor R_1' je:

$$R_1' = \left(\frac{L_1}{L_2} \right) \cdot \Psi_{12}^2 \cdot R_2, \quad (40)$$

kde odpor R_2 je:

$$R_2 = \rho_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_v}{\alpha_2 \cdot l_2} \quad (41)$$

Dosazením do P_R

$$P_R = \left[\rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_c \cdot N_1^2}{\alpha_1 \left(l_1 - \frac{U_g}{15000} \right)} + \Psi_{12}^2 \cdot \left(\frac{d_c}{d_v} \right)^2 \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot \rho_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_v}{\alpha_2 \cdot l_2} \cdot N_1^2 \right] \cdot I_1^2 = k_2 \cdot N_1^2 \cdot I_1^2 \quad (42)$$

kde pomocná konstanta k_2 je dána výrazem:

$$k_2 = \pi \cdot d_c \cdot \left[\frac{\rho_1}{\alpha_1 \left(l_1 - \frac{U_g}{15000} \right)} + \rho_2 \cdot \Psi_{12}^2 \cdot \frac{d_c}{d_v} \cdot \frac{1}{l_1 \cdot \alpha_2} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right] \quad (43)$$

Potom řešením rovnic dostaneme hledaný počet závitů induktoru a hledaný proud v cívce:

$$I_1 = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{P_R}{U_g} \quad (44)$$

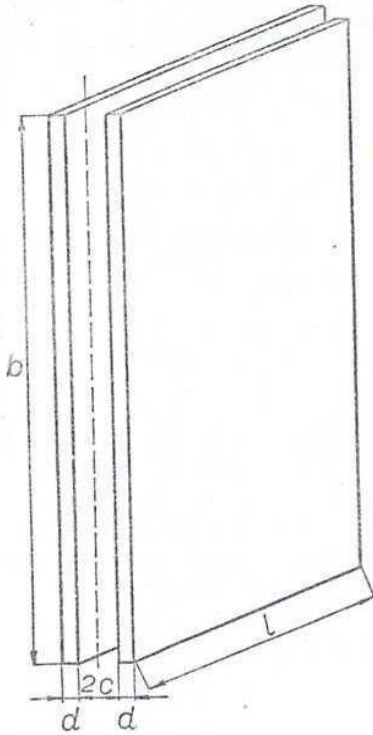
$$N_1^2 = \frac{k_2}{k_1^2} \cdot \frac{U_g^2}{P_R} = \frac{U_g}{k_1 \cdot I_1} \quad (45)$$

3.6 Pásové vedení [2]

Pro spojení tavící pece s kondenzátorovou baterií se používá pásové vedení. Délka tohoto vedení, se značí l . Při chodu pece vždy musíme dbát na to, aby pecní obvod byl pro přiváděný kmitočet správně vyladěn. Ve správně vyladěném oscilačním obvodu je proud mezi cívkou a kondenzátorovou baterií značně větší, než proud, který dodává generátor. U tavící pece na ocel při jakosti oscilačního obvodu přibližně 10 až 12 je proud v oscilačním obvodu 10 – 12 krát větší než je proud dodávaný generátorem. U vhodně dimenzovaného pásového vedení, je možno vést tyto proudy bez velkých ztrát. Tyto proudy dosahují hodnot 4000 až 6000 A, například u pecí, které mají velikost 1 až 2 tuny oceli.

Na obrázku (27) je znázorněno pásové vedení z tenkých měděných pásů. Pro minimální ztráty v pásovém vedení se volí tloušťka vedení přibližně 1,57 krát hloubka vniku. Impedance pásového vedení je:

$$\bar{Z} = R + j\omega L = R + j\omega L' + j\omega L'' = \rho \frac{2l}{ab} \cdot \varphi \frac{2d}{a} + j \left[\rho \frac{2l}{ab} \cdot \psi \frac{2d}{a} + \omega \mu_0 \mu_r \frac{2cl}{b} \right] \quad (46)$$



Chceme, aby na pásovém vedení byl malý úbytek napětí, proto musíme vedení navrhnout tak, aby mělo malou impedanci. Z výrazu (46) je zřejmé, že reaktance L'' , která je rozhodující složkou v impedanci, je menší, čím jsou pásy vyšší a čím jsou blíže u sebe a čím je pásově vedení kratší. Nejčastěji volíme pro napětí generátoru 2 až 3 kV vzdálenost pásů $2c = 2$ až 3 cm a výšku pásů $b = 20$ až 50 cm.

Obr 27 Pásově vedení [2, str. 162]

3.7 Stínění Indukční kelímkové pece [2,10]

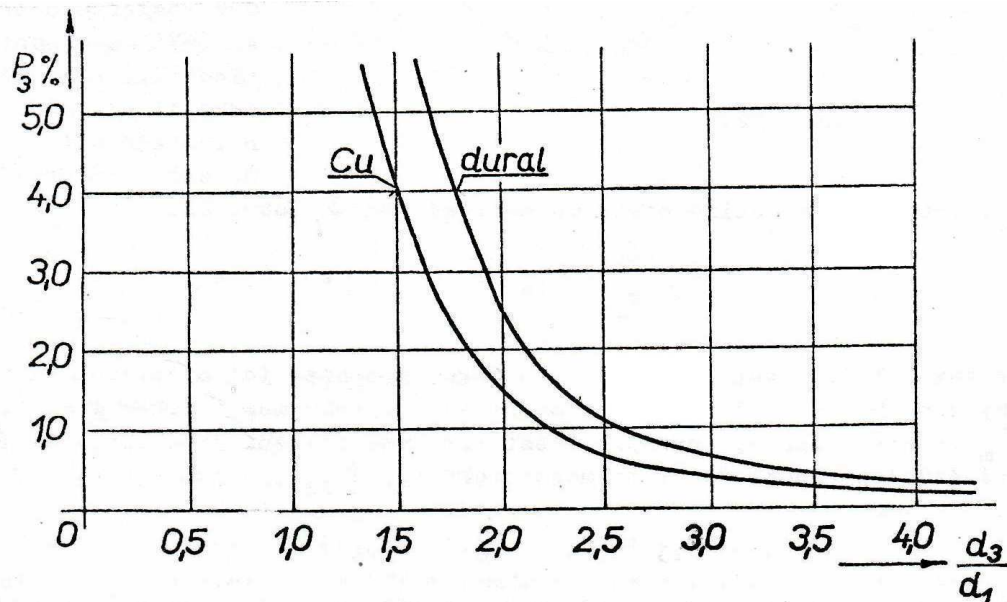
Pro indukční kelímkové pece se používají dva druhy elektromagnetického stínění, jedno je stínění vodivým pláštěm a druhé je stínění svazky transformátorových plechů. U každé indukční kelímkové pece je potřeba určit vhodný druh stínění. Oba dva druhy pracují na rozdílných principech, proto mají druhy stínění různé výhody a nevýhody. Pro určení druhu stínění se zohledňuje velké množství technických hledisek. Jedno z nejdůležitějších hledisek jsou Jouleovy ztráty ve stínění. Dalšími faktory jsou geometrické rozměry, hmotnost stínění a také cena. Díky tomuto stínění dochází k omezení veličin elektromagnetického pole. Tyto veličiny by způsobovaly ohřátí konstrukce následkem naindukovaných vířivých proudů. Stínění je také zapotřebí k omezení rozptylového indukčního toku vně induktoru. U indukčního tavení by to způsobilo zahřátí nosných konstrukcí pece i díky tomu by se snížila elektrická účinnost pece. Zanedbat můžeme stínění pouze v teorii, při uvažování menších indukčních pecí. V případě použití v praxi je stínění nutné.

3.7.1 Stínění vodivým pláštěm [2,10]

Prvním druhem stínění je stínění vodivým pláštěm, které využívá Lorenzův zákon a elektromagnetickou indukci. Díky tomu pole, které se naindukuje do stínícího pláště, působí proti poli, které je vyvoláno induktorem. Dochází tak k superpozici těchto dvou polí a následkem toho se sníží intenzita magnetického pole uvnitř induktoru a díky tomu dojde ke snížení elektrické účinnosti ohřevu. Dalším následkem superpozice je ale také snížení intenzity magnetického pole vně stínícího pláště, což má za následek odstínění pece. Výhodou tohoto stínění je jeho nízká hmotnost a i menší pořizovací cena než je u stínění ze svazků transformátorových plechů.

Pro účinné použití stínění s vodivým pláštěm by se mělo dodržovat několik pravidel. Jedním z nich je, že plášť stínění by měl být vyroben z materiálu, který má dobrou elektrickou vodivost například z mědi nebo duralu. Tento plášť se umísťuje vně induktoru tak, aby vnitřní průměr stínícího pláště d_3 [m] byl dvojnásobkem vnitřního průměru induktoru d_1 [m]. Pro minimální ztráty ve stínícím plášti se volí optimální tloušťka pláště $d_{opt} = \frac{\pi}{2} a$ [m]. Tato optimální tloušťka se volí někdy větší a to kvůli mechanické pevnosti, aby se plášť nepoškodil v poměrně hrubém provozu. Při této optimální tloušťce je elektrický odpor minimální a ztráty ve vodivém plášti jsou:

$$P_3 = R_3 I_{3ef}^2 \text{ [W]} \quad (47)$$



Obr. 28 Ztráty ve stínícím plášti z mědi a z duralu [2, str.65]

Pro odvození optimální tloušťky se vychází ze vztahů pro útlum elektromagnetického vlnění ve stěně konečné délky. Výška stínění se potom volí jako 1,2 krát výška induktoru. Jestliže máme optimální tloušťku a průměr stínícího pláště proti vnitřnímu průměru induktoru dvojnásobný, jsou v tom případě ztráty pro měď ve stínícím plášti přibližně 1,51 % z příkonu pece a pro dural jsou ztráty 2,5 % z příkonu pece, jak je vidět na obrázku (28).

Na svislé ose jsou zobrazeny ztráty ve stínění P3, které jsou z příkonu pece a jsou udávány v procentech. Z grafu je evidentní, že ztráty ve stínění se zmenšují, když se zvětšuje poměr poloměrů pláště a cívky. Není žádoucí, aby se zvyšoval průměr pláště a tím i průměr pece kvůli nedostatku místa.

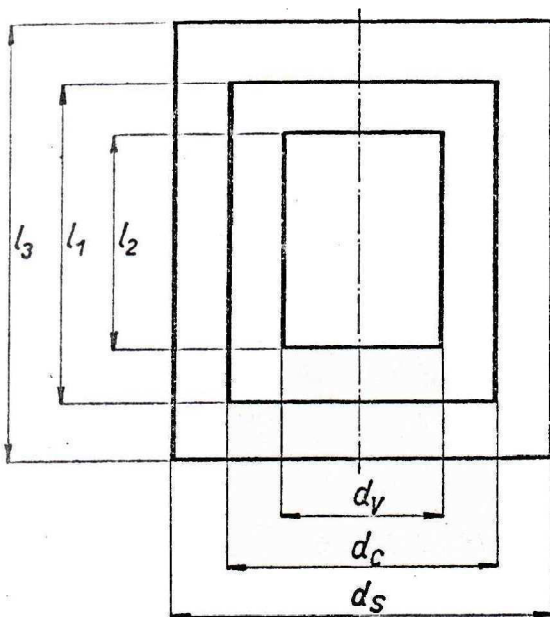
Na indukční pec se stíněním vodivým pláštěm můžeme nahlížet jako na tři sousedé vodivé válce nulové tloušťky, obrázek (29), které mají náhradní průběhy dc, dv, ds. Délky těchto válců jsou potom l1, l2, l3. Pro zjednodušení výrazů uvažujeme, že hloubka vniku naindukovaných proudů je velmi malá oproti poloměru. Potom platí vztahy pro náhradní průběhy.

$$d_c = d_1 + a_1 \quad \text{pro cívku} \quad (48)$$

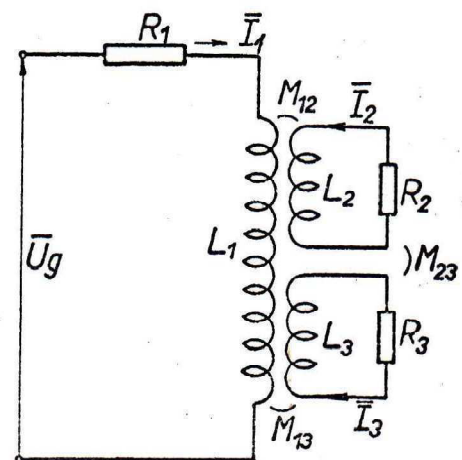
$$d_v = d_2 - a_2 \quad \text{pro vsázku} \quad (49)$$

$$d_s = d_3 + a_3 \quad \text{pro stínící plášť} \quad (50)$$

Tuto soustavu třech sousedých válců můžeme popsat ekvivalentním elektrickým obvodem, který je na obrázku (30). Kde máme L1, L2, L3, což jsou vlastní indukčnosti a také odpory cívky R1, vsázky R2 a stínění R3. M12, M13, M23 jsou vzájemné indukčnosti.



Obr. 29 Tři sousedé vodivé válce [2, str. 32]



Obr. 30 Elektrické schéma [2, str.32]

Pomocí Kirchhoffova zákona dostaneme tři rovnice.

$$\bar{U}_G = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 + j\omega M_{12} \bar{I}_2 + j\omega M_{13} \bar{I}_3 \quad (51)$$

$$0 = \bar{Z}_2 \bar{I}_2 + j\omega M_{23} \bar{I}_3 + j\omega M_{12} \bar{I}_1 \quad (52)$$

$$0 = \bar{Z}_3 \bar{I}_3 + j\omega M_{13} \bar{I}_1 + j\omega M_{23} \bar{I}_2 \quad (53)$$

Kde je

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (54)$$

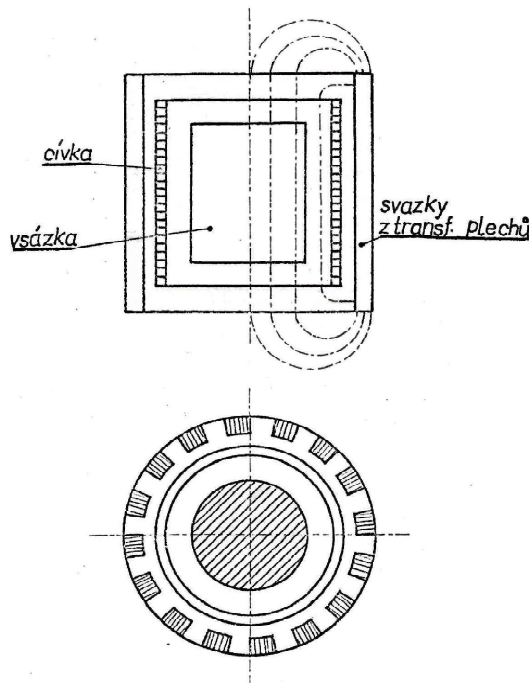
$$\bar{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2 \quad (55)$$

$$\bar{Z}_3 = R_3 + j\omega L_3 \quad (56)$$

3.7.2 Stínění svazky transformátorových plechů [2,10]

Na obrázku (31) vidíme uspořádání indukční kelímkové pece, kde je vně cívky místo předchozího vodivého stínícího pláště železné jádro složené z většího počtu svazků z transformátorových plechů, které jsou vzájemně izolované. Tyto plechy jsou z materiálu, který má vysokou permeabilitu a nízkou měrnou elektrickou vodivost. Díky nízké vodivosti se omezují ztráty vířivými proudy.

Tento druh stínění využívá nízkého magnetického odporu transformátorových plechů, respektive jejich velké magnetické vodivosti.



Po vložení svazků transformátorových plechů vně induktoru se zmenší odpor pro magnetický tok buzený cívkou a tento tok se mírně zvýší. Tím se také zvýší intenzita magnetického pole, tato intenzita je úměrná výkonu naindukovanému do vsázky. Oblast za transformátorovými plechy je odstíněná.

Obr. 31 Stínění svazky transformátorových plechů [10]

Tento způsob stínění je z hlediska elektrické účinnosti výhodnější než stínění vodivým pláštěm, právě díky zvýšení intenzity magnetického pole uvnitř induktoru. Další výhodou je, že transformátorové plechy mají velký odpor a díky tomu jsou malé Joulovy ztráty. Oproti tomu mají tyto plechy velkou hmotnost a tím i vysokou pořizovací cenu. Používá se většinou u pecí pro velkou hmotnost taveného materiálu.

3.8 Vyzdívka kelímku [3]

Na vyzdívku kelímku, která je nevodivá, se používá nejčastěji Silikamix. Je to suchá dusací hmota, obsahující 0,8 – 1,4 % kyseliny borité H_3BO_3 . Tato výduska vydrží přibližně 30 taveb. Jsou i výdusky, které vydrží i 100 taveb, ty se vyrábějí na bázi korundu. Důležité je, aby hmota, z které se vyzdívá pec, nebyla vlhká, jinak může dojít ke zničení pece.

Na induktor se pokládají neferitové desky a zalévá se žárobetonem. Nejdříve se vysype výduska na dno kelímku až k prvnímu závit, následně se vloží do kelímku šablona. Tím vznikne volný prostor mezi šablonou a pecí a ten se vysype dusací hmotou, která se 10 hodin sintruje. Kelímek musí být dostatečně vysušen. První tavbou, která následuje po vysušení kelímku je tavba oceli s obsahem uhlíku. Jakmile dojde k ukončení první tavby, nechává tavič taveninu v kelímku ještě přibližně hodinu, pro řádné spečení výdusky, pak dojde k odpichu. Dále může následovat již běžné tavení například šedé tvárné litiny. Vysokolegované oceli se mohou tavit až po prvních třech tavnách.

Stav vyzdívky se sleduje po ukončení tavby a podle toho se odvíjejí opravy vyzdívky. Také je potřeba sledovat tloušťku vydusané vrstvy, nesmí klesnout více jak na polovinu. Jakmile dojde k většímu opotřebení, dojde k prudkému růstu teploty chladicí vody. Jakmile dojde ke skončení kampaně výdusky, je třeba kelímek vyměnit.

4 Hodnocení indukčního tavení kriteriem 3E

4.1 Ekonomika [14]

Indukční tavení je z ekonomického hlediska výhodnější, než je tomu například u obloukových pecí, jelikož nemají žádné elektrody, které se za určitý čas opálí a je třeba je vyměnit. Zato u indukčních zařízení je vyšší pořizovací cena ve srovnání s palivovými nebo odporovými. To je následkem toho, že u indukčních zařízení je obvykle potřeba frekvenčních měničů, které zvyšují cenu. Další ekonomickou výhodou je, že u indukčních zařízení se dosahuje rychleji potřebné teploty materiálu a zároveň při něm dochází k rovnoměrnému ohřevu materiálu. U indukčních pecí by se mělo počítat se stíněním, což je buď ze svazků

transformátorových plechů nebo stínění vodivým pláštěm. Toto stínění omezuje nežádoucí účinky, což jsou přídatné ztráty v konstrukci zařízení, které způsobuje rozptylové elektromagnetické pole.

4.2 Energetika [14]

Z energetického hlediska je nejdůležitějším parametrem k porovnávání příkon, který je potřeba pro tavení. U indukčního tavení je potřebný příkon menší než například u odporových pecí. Další výhodou je, že u indukčního tavení nedochází k proudovým rázům, jako je tomu například u obloukové pece. Nevýhodou indukčního tavení je, že většina pecí je jednofázových a to má za následek způsobení nesymetrie v síti. Následkem toho je nutnost připojit pec k síti přes symetrizační člen.

4.3 Ekologie [14]

Při indukčním tavení, nedochází k uvolňování oxidů a dusičnanů v povrchových vrstvách vsázky, které jsou nebezpečné a zdraví škodlivé, jako je tomu například u plynových pecí. Do provozu se většinou umísťují indukční pece spolu s obloukovými. V indukčních pecích probíhá tavení při nižších teplotách než je tomu u pecí obloukových. Sice u obou pecí se ze vsázky uvolňuje kovový prach, ale následkem větší teploty jsou u obloukových pecí tyto částičky mnohem menší a tím i nebezpečnější, protože je lze snadněji vdechovat. Tento kovový prach neumí tělo vyloučit a následkem toho se usazuje ve tkáni.

Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval faktory, které ovlivňují účinnost tavení v indukční kelímkové peci. Například volba kmitočtu a následná volba kusovosti vsázky s ohledem na tento zvolený kmitočet. Při volbě kmitočtu vyšlo pro 50 Hz větší minimální zrnění než u kmitočtů 1000 Hz. Také při kmitočtu 1000 Hz se dosáhlo značně větší energie absorbované ve vsázce, než při kmitočtu 50 Hz. Zato při síťovém kmitočtu vyšlo mnohem větší vzduť než u kmitočtu 1000 H.

Na účinnost mají vliv i stínění, která omezují ztráty v konstrukci pece. Stínění ze svazků transformátorových plechů je z hlediska účinnosti výhodnější, než je tomu u stínění s vodivým pláštěm, který má ale nižší hmotnost a menší pořizovací cenu.

Účinnost je také vázána na druh taveného materiálu. Pro tavení v indukčních pecích je lepší účinnost při tavení materiálů s malou vodivostí, při tavení materiálů s velkou vodivostí je účinnost podstatně nižší. Výjimku ovšem tvoří tavení hliníku. I přes jeho velkou vodivost, je tavení v kelímkových pecích výhodnější než v kanálkových pecích, kde dochází k zarůstání kanálku Al_2O_3 , který nelze vytavit ani změnou materiálu s vyšší teplotou tavení, proto je potřeba jeho pravidelné čištění.

Ale v neposlední řadě nesmíme zapomenout, že na dobré výsledky a tím i na účinnost tavení v indukční kelímkové peci, se podílí lidé (kvalifikovaný personál), kteří pec obsluhují.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] RADA, Josef. A KOLEKTIV. Elektrotepelná technika. Praha: SNTL ALFA, 1985. ISBN 04-525-35
- [2] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. Elektrotepelná zařízení indukční. Plzeň: VSŠE v Plzni, 1982. ISBN 55-095-82.
- [3] INDUK OHŘEV BP
- [4] KROUPA, Oldřich. Návrh a konstrukce zařízení pro měření parametrů elektromagnetického pole. Plzeň, 2007. Diplomová práce. ZČU.
- [5] Indukční prohřívání. Iew Induktive Erwärmungsanlagen GmbH [online]. 2009 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.iew.eu/index.php?site=25&lang=cz>
- [6] Indukční svařování. Iew Induktive Erwärmungsanlagen GmbH [online]. 2009 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.iew.eu/index.php?site=27&lang=cz>
- [7] Indukční kalení. Iew Induktive Erwärmungsanlagen GmbH [online]. 2009 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: <http://www.iew.eu/index.php?site=19&lang=cz>
- [8] Indukční ohřev. PUMA - power user mathematic array [online]. 2007 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: http://panther.feld.cvut.cz/cs/wiki/indukcni_ohrev
- [9] MILKA, Jiří. Energetické problémy indukčních elektrotepelných zařízení. Brno, 2011. Bakalářská práce. UEEN.
- [10] PAVLÍČEK, Karel. Stínění indukční kelímkové pece. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. ZČU.
- [11] Indukční ohřev. Elektro :: Elektro [online]. 2003 [cit. 2012-05-28]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25329
- [12] PŘIBYL, Václav. Optimální podmínky pro tavení litiny v indukční kelímkové peci. Plzeň, 2002. Diplomová práce. ZČU.
- [13] HÁJKOVÁ, Klára. LinkIndukční tavicí kelímková pec s grafitovým kelímkem. Plzeň, 2005. Diplomová práce. ZČU.
- [14] POTŮČEK, Milan. Průmyslové využití indukčních ohřevů. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. ZČU. Přílohy