

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tavení kovů v indukčních kelímkových pecích

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš MIČO**
Osobní číslo: **E18B0021K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Tavení kovů v indukčních kelímkových pecích**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování

1. Uvedte stručně teorii ohřevů elektromagnetickou indukcí.
2. Uvedte oblasti užití indukčních ohřevů v praxi.
3. Stanovte podmínky pro efektivní tavení kovů v indukčních kelímkových pecích.
4. Provedte hodnocení indukčního tavení kritériem 3E.
5. Stanovte závěry pro praxi.

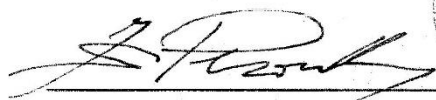
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

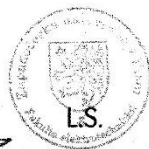
Seznam doporučené literatury:

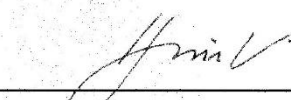
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

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

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

Abstrakt

Předložená bakalářská práce je zaměřena na proces tavení kovů v indukčních kelímkových pecích. Dále se práce zabývá různými druhy ohřevu a přenosu tepla, teorií indukčního ohřevu a jeho účinností. Součástí práce je uvedení hlavních typů indukčních zařízení, jejich užití v praxi a způsoby jejich napájení. Na závěr je provedeno hodnocení kritériem 3E.

Klíčová slova

Teorie indukčního ohřevu, indukční kelímkové pece, indukční kanálkové pece, 3E, indukční ohřev, druhy ohřevu, kalení, pájení, žíhání, svařování.

Abstract

The presented bachelor thesis is focused on the process of metal melting in induction crucible furnaces. Furthermore, the work deals with various types of heating and heat transfer, the theory of induction heating and its efficiency. Part of the work is the introduction of the main types of induction devices, their use in practice and methods of their power supply. Finally, the evaluation is performed by criterion 3E.

Key words

Theory of induction heating, induction crucible furnaces, induction channel furnaces, 3E, induction heating, types of heating, hardening, soldering, annealing, welding.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou 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 bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 19.6.2020

Lukáš Mičo

Poděkování

Velmi rád bych touto cestou poděkoval panu Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné a odborné rady, vstřícný přístup, prostudování této práce ale zejména za trpělivost.

Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům, kteří mě podporovali nejen při zpracování této práce, ale také po celou dobu mého studia.

Obsah

Seznam zkratk a symbolů.....	10
1 ÚVOD.....	12
2 Druhy ohřevu a přenosu tepla [14].....	13
2.1 Odporový ohřev	13
2.2 Dielektrický ohřev [2,3].....	14
2.3 Obloukový ohřev [2].....	14
2.4 Plazmový ohřev [11].....	15
2.5 Elektronový ohřev [2]	16
2.6 Laserový ohřev [2,12]	17
2.7 Indukční ohřev	17
2.8 Palivový ohřev [13].....	17
3 Teorie indukčního ohřevu	17
3.1.Přenos energie elektromagnetického pole [3,8].....	17
3.2.Teorie indukčního ohřevu [5,8].....	18
3.3.Způsoby šíření elektromagnetického vlnění v různých prostředích [8]	19
4 Účinnost indukčního ohřevu a hloubka vniku naindukovaných proudů [4,7].....	20
5 Hlavní typy indukčních zařízení.....	22
5.1. Indukční kelímkové pece pro tavení [1]	22
5.2. Indukční pece kanálkové [8]	23
5.2.1. S uzavřeným železným jádrem [1]	24
6 Efektivnost tavení kovů [5,10]	24
6.1 Tavení železného šrotu.....	25
6.2 Vtah mezi kmitočtem a vzdutí vsázky [9,10]	26
6.3 Elektrická účinnost indukční pece	27
7 Oblasti užití indukčních ohřevů v praxi [1].....	29
7.1 Povrchové kalení.....	29
7.2 Indukční pájení a žíhání	30
7.3 Indukční svařování	32
8 Zdroje pro napájení indukčních zařízení [1,9,10].....	32
8.1 Napájení ze sítě 3×380/220 V, 50 Hz [1,9,10]	32
8.1.1 Symetrizace indukčních zařízení	33
8.2 Rotační měniče pro proudy středních kmitočtů [1,5,10].....	35
8.3 Iontové měniče kmitočtu	38
8.4 Magnetické násobiče kmitočtu	39

8.5 Tyristorové měniče pro napájení indukčních zařízení	40
8.6 Pásové vedení [1,10]	41
8.7 Kondenzátorové baterie [1]	42
9. Hodnocení kritériem 3E [9,10].....	43
9.1 Ekonomika	43
9.2 Ekologie	43
9.3 Energetika	43
Závěr	44
Seznam použité literatury a internetových zdrojů	45

Seznam zkratek a symbolů

a hloubka vniku [mm]

B magnetická indukce [T]

D elektrická indukce [$C \cdot m^{-2}$]

d vzdálenost elektrod [mm]

E intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]

f frekvence [Hz]

F síla [N]

G hmotnost vsázky [kg]

H intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]

h_t teoretické vzduť vsázky [m]

I proud [A]

t čas [s]

T termodynamická teplota [K]

S plocha elektrod [cm^2]

J proudová hustota [$A \cdot m^{-2}$]

L_1 vlastní indukčnost cívky [H]

L_2 indukčnost vsázky [H]

L indukčnost [H]

U napětí [V]

ω úhlová rychlost [$rad \cdot s^{-1}$]

η účinnost [-]

P_g hodnota příkonu pece [W]

P_1 příkon na jednotku plochy vsázky [W]

P_2 naindukované teplo [W]

P_3 ztráty ve stínění [W]

Q energie [J]

Q_1 jakost obvodu [-]

R odpor [Ω]

R_1 odpor cívky [Ω]

R_I sériový odpor [Ω]

R_i odpor [Ω]

Z impedance [Ω]

γ konduktivita [$S.m^{-1}$]

ρ měrná hustota [$kg.m^{-3}$]

μ permeabilita [$H.m^{-1}$]

μ_0 permeabilita vakua [$H.m^{-1}$]

ϵ permitivita [$F.m^{-1}$]

ϵ_0 permitivita vakua [$F.m^{-1}$]

c měrná tepelná kapacita [$J.kg^{-1}K^{-1}$]

1 ÚVOD

Tématem této bakalářské práce je „Tavení kovů v indukčních kelímkových pecích“. Celé toto téma je rozděleno do 9 kapitol a následně do podkapitol.

V první kapitole se věnuji druhům ohřevu a přenosu tepla. Dále následuje kapitola, kterou jsem věnoval k seznámení s teorií indukčního tepla, s přenosem energie a způsoby šíření elektromagnetického vlnění.

Další kapitola je věnována výpočtu účinnosti indukčního ohřevu a hloubky vniku naindukovaných proudů. Zmínil jsem se zde o elektrické průzračnosti, která vzniká při špatně zvolené napájecí frekvenci.

V následující kapitole, se věnuji popisu jednotlivých druhů indukčních tavicích pecí. Jsou zde uvedeny jejich vlastnosti a způsob konstrukce. V dalších kapitolách se věnuji efektivnosti tavení kovů a oblastem využívání tohoto způsobu ohřevu. Poté se zde zabývám hodnocením napájecích zdrojů pro indukční zařízení a v poslední kapitole se věnuji vyhodnocením kritéria 3E.

2 Druhy ohřevu a přenosu tepla [14]

Na úvod je nutno říci, že indukční ohřev, kterým se zabývám v této bakalářské práci, je jen jedním z mnoha ohřevů používajících se v praxi. Pro všeobecný přehled v této kapitole uvádím způsoby ohřevu.

Stejně tak, jako existuje více možností ohřevu je i více způsobů přenosu tepla na ohříváný materiál.

Možnosti přenosu tepla na materiál:

1. **Tepelná výměna vedením**-nejčastější způsob přenosu tepla, dochází k němu prostřednictvím fyzického kontaktu zdroje tepla s ohříváním materiálem, realizuje se v pevných látkách
2. **Tepelná výměna sáláním**-k sálání tepla dochází vyzařováním elektromagnetických vln, elektromagnetické vlny přenášejí vyzařovanou energii od zdroje záření na povrch ohříváného předmětu
3. **Tepelná výměna prouděním**-ohřívá tekutina nebo plyn proudící od zdroje přenáší tepelnou energii dále do svého okolí, tento způsob přenosu tepla se realizuje v kapalinách a plynech

2.1 Odporový ohřev

Zařízení pracující na principu odporového ohřevu využívají Jouleových ztrát – průchodem elektrického proudu vodičem vzniká teplo.

Velikost Jouleova tepla lze určit vztahem:

$$Q = RI^2t \quad \text{pro stejnosměrný elektrický proud} \quad (1)$$

$$Q = RI_{ef}^2t \quad \text{pro střídavý elektrický proud} \quad (2)$$

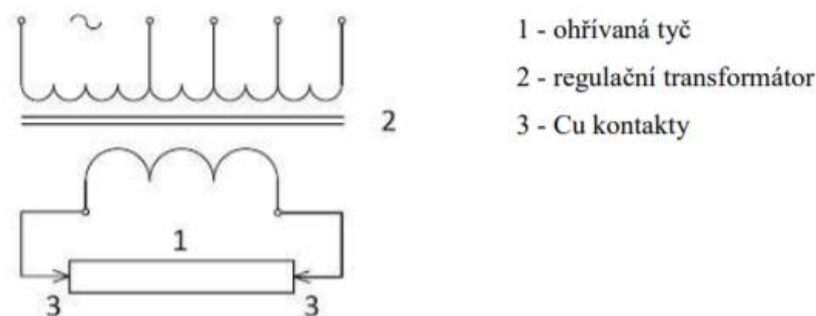
Kde:

$Q[J]$ je velikost tepla procházející vodičem, $I[A]$ je proud procházející vodičem, $R[\Omega]$ je odpor vodiče

$t[s]$ je doba po kterou prochází vodičem proud

Odporový ohřev můžeme dále rozdělit na dva způsoby. Na **přímý** odporový ohřev a **nepřímý**.

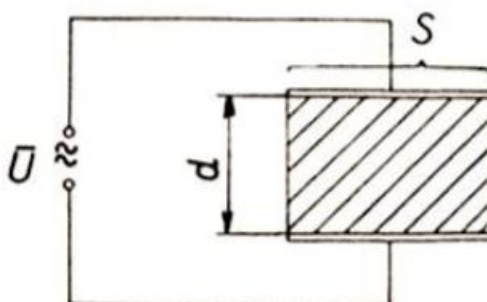
Výběr způsobu odporového ohřevu závisí na vsázce. Pokud je vsázka elektricky vodivá, použijeme přímý odporový ohřev, kde teplo vzniká průchodem elektrického proudu přímo ohříváním materiálem. Jestli je vsázka nevodivá, použije se způsob druhý, kde teplo vzniká v topných tělesech a na ohříváný materiál se přenáší sáláním a prouděním.



Obr.1 Přímý odporový ohřev tyče [13]

2.2 Dielektrický ohřev [2,3]

Dielektrický materiál je elektricky nevodivý materiál, a proto není vznik tepla vázaný na existenci vodivostních proudů jako je tomu u generování tepla v elektricky vodivém prostředí. Při vytváření tepla v dielektrických materiálech se uplatňují zejména vázané nosiče náboje, které podléhají v elektromagnetickém poli elektrické polarizaci. Pokud dielektrikum vystavíme harmonickému poli s vysokou frekvencí, projeví se polarizační dielektrické ztráty, které dielektrikum ohřívají.

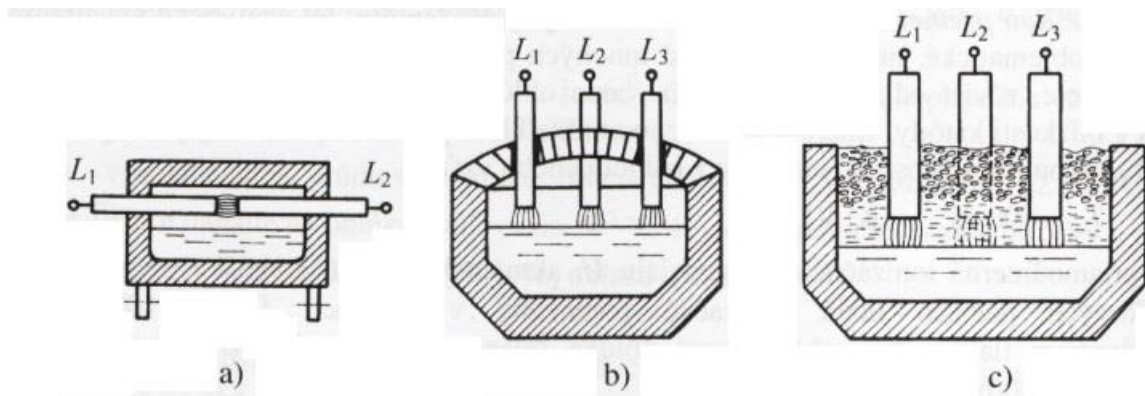


Obr.2 Schematické uspořádání kondenzátoru pro dielektrický ohřev [13]

Po připojení napětí na elektrody se vytvoří elektrické pole, které vyvolá polarizaci dielektrika. Molekuly vloženého materiálu se natáčejí podle elektrické polarity, tím dochází k jejich tření, a to má za následek vytvoření tepla.

2.3 Obloukový ohřev [2]

Jak je patrné z názvu, zdrojem tepla je elektrický oblouk. Je to elektrický výboj například mezi dvojicí elektrod charakteristický nízkým napětím, ale vysokým proudem. Vznik elektrického výboje je závislý na emisi elektronů z hraničních ploch a na jejich urychlení v elektrickém poli v okolí výboje. Při dostatečné energii elektronů dojde k řetězové ionizaci prostoru, který se zaplní kladnými a zápornými ionty a dostane se do stavu elektrické plazmy, což má za následek vygenerování velkého množství tepla. Vsázka se tak ohřívá pomocí sálání viz.obr.3a.



Obr.3 Druhy obloukových pecí [2]

Pro úplnost je třeba se zmínit, že existují obloukové pece s přímým a nepřímým ohřevem vsázky. Obloukové pece s nepřímým ohřevem vsázky pracují na výše uvedeném principu. Pece s přímým obloukovým ohřevem se dále dělí na ohřev odkrytým a zakrytým obloukem.

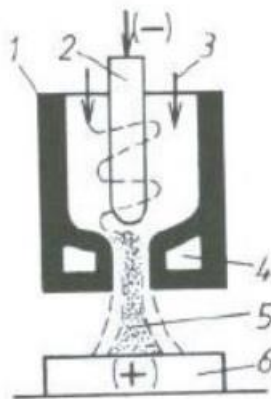
Při přímém ohřevu vsázky odkrytým obloukem hoří tento oblouk mezi elektrodou a povrchem vodivé vsázky viz.3b. Tento typ ohřevu se využívá při tavení kovového šrotu k výrobě elektroocelí.

Obloukové pece s přímým ohřevem a zakrytým obloukem (např. k výrobě křemíku, obr.3c) pracují tak, že jsou elektrody obklopeny neroztavenou vsázkou (křemenec+dřevěné uhlí), elektrický oblouk vznikne mezi elektrodou a již nataveným materiálem. Jak se materiál dále odtavuje, je potřeba ho po určitém časovém intervalu odčerpat z vany pece. U tohoto druhu pece je velmi důležité, aby byl zajištěn včasný přísun taveného materiálu. Pokud by se tak nestalo, přetlakem by z pece unikal oxid křemíku a usazoval by se na okolním prostředí.

2.4 Plazmový ohřev [11]

Plazmová zařízení pracují na obdobném principu jako zařízení oblouková. Na vzniku plazmy se zde podílí plazmotvorný plyn na rozdíl od obloukových zařízení, kde se na vytvoření plazmy podílejí výpary v okolí elektrod. Jako plazmotvorný plyn se nejčastěji používá argon.

Plazmový ohřev se používá zejména k řezání materiálu. Princip plazmového řezání spočívá ve vytvoření elektrického oblouku mezi dvěma blízkými elektrodami a jeho "odfouknutí" do řezaného materiálu. Plazmový oblouk řezaný materiál roztaví a tlakem plynu ho odfoukne z řezu.

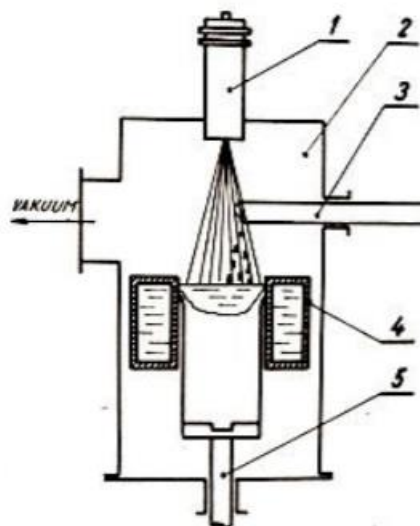


1 – těleso hořáku, 2 – katoda,
3 – přívod plynu (argon), 4 – chlazení hořáku,
5 – paprsek plazmy, 6 – obrobek

Obr.4 Plazmový ohřev [11]

2.5 Elektronový ohřev [2]

Při elektronovém ohřevu se teplo generuje z urychlených elektronů dopadajících na ohříváný materiál. Svazek elektronů vyzařující z rozžhavené katody je v elektrickém poli urychlen a odevzdá při dopadu na materiál spojený s katodou svou energii a tím vznikne teplo. Takto urychlené elektrony pronikají jen do malé hloubky materiálu v řádech mikrometrů, a proto je zřejmé, že se jedná o povrchový ohřev materiálu. Urychlené elektrony mohou být jednak zpomalovány srážkami s molekulami plynu ale také směřovány působením magnetického pole podle konstrukčního řešení tavicího zařízení, proto se elektronový ohřev aplikuje ve vakuu, čímž je tento problém eliminován.



1 elektronové dělo
2 vakuová komora
3 tyč určená k přetavení
4 krystalizátor
5 píst

Obr.4 Přetavovací elektronová pec [13]

2.6 Laserový ohřev [2,12]

Tento způsob ohřevu patří do skupiny moderních metod elektrického ohřevu. Je založen na principu pohlcování laserového paprsku ohřívaným materiálem.

Zdrojem laserového paprsku je kvantový generátor elektromagnetického záření. Laserový paprsek se skládá ze svazku fotonů, tyto svazky jsou prostorově orientované.

Atomy a molekuly se v generátoru přečerpávají na vyšší energetické hladiny a následně v řízené emisi svou nahromaděnou energii uvolní.

Ohřívání materiál tuto uvolněnou energii urychlených částic absorbuje a přemění ji v teplo. Schopnost pohlcovat záření klesá s rostoucí vodivostí materiálu. V praxi se tohoto ohřevu využívá při vrtání velmi malých otvorů, při opracování vysokoteplotních kovů a při povrchovém nanášení kovových vrstev.

2.7 Indukční ohřev

Indukční ohřev je založen na principu působení dopadajícího elektromagnetického vlnění na elektricky vodivý materiál. Teorie tohoto ohřevu je předmětem této bakalářské práce a je podrobněji vysvětlena v následující kapitole.

2.8 Palivový ohřev [13]

Jako zdroj pro palivový ohřev slouží fosilní paliva, jejich spalováním se generuje teplo. Jedná se o chemicko-tepelnou přeměnu jejíž účinnost je dána spalovacím zařízením a použitým druhem paliva.

Spalovací zařízení mohou být různého druhu, dělí se podle toho, jaké palivo dané zařízení spaluje. Může se jednat o zařízení na palivo tuhé, kapalné nebo plynné. S ohledem na životní prostředí se tuhá paliva používají zřídka, dochází zde k velkému znečištění okolního pracovního a životního prostředí.

Obdobně jsou na tom paliva kapalná, jelikož je jejich množství na Zemi omezeno a zásoby ropy postupně klesají, a proto se také tohoto paliva ve velkém měřítku nepoužívá.

Plynná paliva jsou z hlediska ekologie oproti dvěma předchozím palivům výhodnější. Největší výhodou je snadná doprava do místa potřeby a čistota okolního prostředí v okolí spalovacího zařízení. Spolu s kapalnými palivy mají však snadnou regulovatelnost požadované teploty.

3 Teorie indukčního ohřevu

3.1. Přenos energie elektromagnetického pole [3,8]

Přenos energie elektromagnetickým polem lze vysvětlit pomocí Maxwellových rovnic. Maxwellovy rovnice vysvětlují všechny kategorie elektromagnetických jevů a jsou teoretickým základem pro vysvětlení funkce elektromagnetických zařízení.

K popisu elektromagnetického pole se využívají základní veličiny definované v těchto polích, elektrická a magnetická intenzita a indukce (E, H, D, B). Vektory intenzity elektrického a magnetického pole E, H jsou na sebe vzájemně kolmé.

Pro nepohybující se prostředí, které je homogenní, izotropní a lineární se Maxwellovy rovnice vyjadřují v následujícím tvaru:

$$\begin{array}{ll}
 \text{I.} & \text{rot}H = J + \frac{\partial D}{\partial t} = \gamma E + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} & [\text{A/cm; V/cm}] \\
 \text{II.} & \text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t} = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} & [\text{V/cm; A/cm}] \\
 \text{III.} & \text{div}D = \rho_0 & [\text{V/cm; F/cm, C/cm}^3] \\
 \text{IV.} & \text{div}B = 0 & [\text{A/cm; H/cm}]
 \end{array}$$

Vytvořené rovnice platí pouze v takových bodech, v nichž jsou veličiny spojité a spojitě diferencovatelné funkce polohy. První rovnice vyjadřuje skutečnost, že vírové magnetické pole je vyvoláno nejen vodivostními proudy, ale také proudy posuvnými. Druhá rovnice vyjadřuje, že je vždy změna magnetického pole spojena s existencí elektrického pole vírového. Třetí rovnice potvrzuje existenci volného elektrického náboje s hustotou ρ_0 . Čtvrtá rovnice říká, že neexistuje volný elektrický náboj a že magnetické siločáry jsou vždy uzavřené.

3.2. Teorie indukčního ohřevu [5,8]

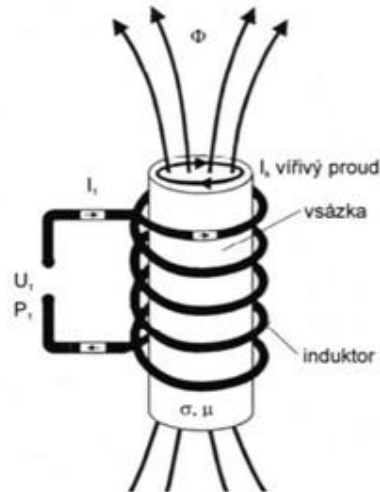
Indukční teplo vzniká vždy, jestliže elektromagnetické vlnění dopadá na elektricky vodivou stěnu. Část vlnění se od stěny odrazí, část do ní vstupuje a vyvolá naindukovaný proud, který stěnu při průchodu ohřívá.

Použití indukčního ohřevu má výhody, kterých nelze dosáhnout u jiných tepelných zdrojů. První výhodou je, že teplo vzniká přímo v ohřívané vsázce, nevstupuje do ní povrchem, a to má za následek její velmi rychlé a efektivní ohřátí.

Druhou výhodou je skutečnost, že vhodnou volbou kmitočtu proudu v induktoru můžeme ovlivnit v jaké hloubce vsázky teplo vzniká.

Každé indukční zařízení sestává z induktoru (1), kterým prochází střídavý elektrický proud, ze zdroje napájení (2) a ze vsázky (3).

Jedná se vlastně o vzduchový transformátor, jehož primárním vinutím je cívka připojená ke zdroji a sekundárním vinutím je vodivá vsázka spojená nakrátko, která přijímá elektromagnetické vlnění vyzařované cívkou. Průchodem proudu cívkou vzniká v jejím okolí proměnné elektromagnetické pole.



Obr.6 Princip indukčního zařízení [8]

Pokud do cívky vložíme elektricky vodivou vsázku, pak do ní povrchem vstoupí elektromagnetické vlnění a vyvolá tak indukované proudy, které mají za následek její zahřívání. Hloubka vniku elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky závisí na napájecí frekvenci a můžeme ji určit ze vztahu:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu \gamma}} \quad (3)$$

kde a je hloubka vniku [m], f je frekvence [Hz], μ je permeabilita [Hm^{-1}] a γ je konduktivita [Sm^{-1}]

Ze vztahu (3) je vidět, že hloubka vniku je nepřímo úměrná frekvenci.

3.3. Způsoby šíření elektromagnetického vlnění v různých prostředích [8]

První způsob je ohřev elektricky nevodivých materiálů za použití dielektrických tepelných zařízení. Využívá se vysokofrekvenčního elektromagnetického pole a zařízení jsou v principu kondenzátor s dielektrickými ztrátami obr.2. I zde platí výhoda, že teplo vzniká přímo ve vsázce.

Fyzikální princip generování tepla v dielektriku se oproti generování tepla ve vodivém prostředí liší.

Ve vodivé vsázce o určité konduktivitě γ je vznik tepla vázaný na existenci vodivostních proudů, které vytvoří Jouleovo teplo. Oproti tomu dielektrika mají konduktivitu téměř zanedbatelnou, a tak se tolik nemohou projevit vodivostní proudy (mají malý počet volných nosičů elektrického náboje). Proto se pro generování tepla v dielektrikách využívá vázaných nosičů náboje, na které v elektromagnetickém poli působí polarizace.

Druhým způsobem ohřevu je ohřev elektricky vodivého prostředí-ohřev indukční. O tomto ohřevu je tato bakalářská práce a předchozí způsob ohřevu byl zmíněn jen pro úplnost.

Jedná se o přenos tepla, který se uskutečňuje za pomoci elektromagnetické vazby mezi induktorem a vsázkou. Podmínkou tohoto přenosu tepla je střídavý zdroj energie, který generuje harmonické elektromagnetické vlnění. Princip tohoto ohřevu byl již vysvětlen v předchozí kapitole.

4 Účinnost indukčního ohřevu a hloubka vniku naindukovaných proudů [4,7]

Účinnost indukčního ohřevu je velmi závislá na tvaru induktoru obklopujícího vsázku. Jeho tvar by měl co nejvíce kopírovat tvar vsázky. Dále je účinnost ohřevu závislá na materiálu a počáteční teplotě zahřívajícího tělesa. Hloubku vniku naindukovaných proudů lze vypočítat ze vztahu (3), je to vlastně fyzikální veličina, která popisuje skin efekt, jehož přítomnost je zde žádoucí. Díky skin efektu, resp. vlivem vysoké frekvence je proudová hustota \vec{J} koncentrována spíše u povrchu ohřívající vsázky.

Například u indukčně ohřívající rovinné stěny je elektrická účinnost dále závislá na poměru tloušťky stěny d a hloubky vniku a . Tyto závislosti jsou znázorněny v následujících tabulkách. [7]

Tab.1 Vliv teploty na účinnost indukčního ohřevu

	Ocel		Hliník		Měď	
ϑ [°C]	20	800	20	660	20	1 100
$\eta_{el\ max.}$ [%]	93	88	56	77	50	77

Tab.2 Závislost účinnosti na poměru d/a

d/a	8	6	4	2	1	0,6	0,4
η [%]	95	85	65	30	10	4	1

Přibližně stejné hodnoty účinnosti pro hliník a měď jsou dány tím, že se mění také měrný odpor materiálu.

Pokud bychom chtěli sestavit diagram průběhu H ve vodivé stěně, tak je pro nás výhodnější tento diagram zavést pro jakýkoliv materiál a kmitočet. Výsledný diagram bude znázorňovat obecně platné grafické průběhy poměrných hodnot H , E , J . Na svislou osu vyneseme absolutní hodnoty H nebo E v námi zvoleném místě, vydělená hodnotou H_2 nebo E_2 na povrchu tohoto rozhraní. Na vodorovnou osu vyneseme hodnotu, kterou získáme z poměru z/d (z je vzdálenost od zadního rozhraní k námi zvolenému místu a d je tloušťka stěny). Každý diagram si lze sestavit pro různý počet parametrů (d/a).

Nyní podle [7] dosadíme za H do rovnice $\frac{H}{H_2} = \sqrt{\frac{\cosh(\frac{2z}{a}) - \cos(\frac{2z}{a})}{\cosh(\frac{2d}{a}) - \cos(\frac{2d}{a})}}$ (4)

Podobně dosadíme za E a E_2 do rovnice $\frac{E}{E_2} = \frac{J}{J_2} = \sqrt{\frac{\cosh(\frac{2z}{a}) + \cos(\frac{2z}{a})}{\cosh(\frac{2d}{a}) + \cos(\frac{2d}{a})}}$, $\frac{\sigma}{\sigma_2} = (\frac{J}{J_2})^2$ (5)

Dosazením příslušných hodnot do výrazů (4) a (5) jsme vypočítali poměry H/H_2 , E/E_2 , σ/σ_2 pro body:

$(x/d) = 0,00 - 0,50 - 1,00$, $(z/d) = 1,00 - 0,50 - 0,00$, $(d/a) = 0,50 - 1,00 - 2,00 - 5,00$

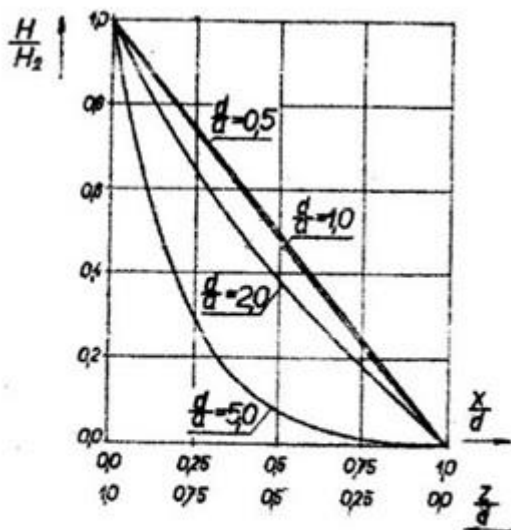
Výsledky jsou v následující tabulce (3).

d/a=0,5	z/d	1,0000	0,7500	0,5000	0,2500	0,0000
	z/a	0,5000	0,3750	0,2500	0,1250	0,0000
	H/H ₂	1,0000	0,7490	0,4990	0,2490	0,0000
	E/E ₂ = J/J ₂	1,0000	0,9860	0,9810	0,9790	0,9790
	σ/σ_2	1,0000	0,9720	0,9620	0,9600	0,9590
d/a=1,0	z/d	1,0000	0,7500	0,5000	0,2500	0,0000
	z/a	1,0000	0,7500	0,5000	0,2500	0,0000
	H/H ₂	1,0000	0,7380	0,4890	0,2440	0,0000
	E/E ₂ = J/J ₂	1,0000	0,8510	0,7890	0,7740	0,7730
	σ/σ_2	1,0000	0,7240	0,6220	0,5990	0,5980
d/a=2,0	z/d	1,0000	0,7500	0,5000	0,2500	0,0000
	z/a	2,0000	1,5000	1,0000	0,5000	0,0000
	H/H ₂	1,0000	0,6290	0,3960	0,1890	0,0000
	E/E ₂ = J/J ₂	1,0000	0,5830	0,3540	0,2790	0,2730
	σ/σ_2	1,0000	0,3410	0,1250	0,0780	0,0750
d/a=5,0	z/d	1,0000	0,7500	0,5000	0,2500	0,0000
	z/a	5,0000	3,7500	2,5000	1,2500	0,0000
	H/H ₂	1,0000	0,2860	0,0820	0,0250	0,0000
	E/E ₂ = J/J ₂	1,0000	0,2860	0,0820	0,0220	0,0130
	σ/σ_2	1,0000	0,0820	0,0070	0,0005	0,0002

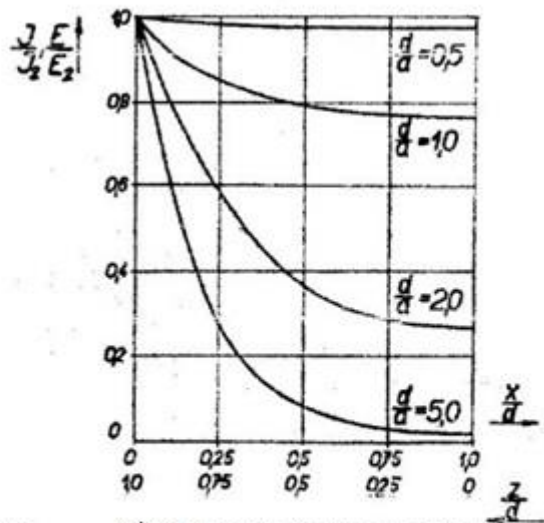
Tab.3

Z obecného diagramu (obr.7) je vidět, že pro malé hodnoty poměru d/a magnetická intenzita H ubývá směrem od prvního rozhraní skoro lineárně. Pro zvyšující se poměr d/a se křivka začíná prohýbat, odražená vlna je zanedbatelná, a tak je průběh H podobný exponenciále.

Diagram (obr.8) zobrazuje průběh intenzity elektrického pole E (resp. proudové hustoty J). Pro malý poměr d/a je proudová hustota rozložena ve stěně téměř rovnoměrně. Pro narůstající hodnotu poměru d/a se křivka utlumuje podle $e^{-\frac{x}{a}}$ a při $d/a > 6,28$ je průběh dán téměř exponenciálou.



Obr.7 Obecný průběh H/H_2 ve stěně malé tloušťky, pro různé d/a



Obr.8 Obecný diagram pro $E/E_2 = J/J_2$

Nežádoucím jevem při indukčním ohřevu je tzv. elektromagnetická průzařnost. Elektromagnetická průzařnost je jev, při kterém se stále spotřebovává elektrická energie, ale vsázka se neohřívá. Příčinou tohoto nežádoucího jevu je špatně zvolená napájecí frekvence napájecího proudu vůči tvaru vsázky. Jelikož se díky špatně zvolené frekvenci neutlumí elektromagnetická vlna procházející vsázkou, vsázka se tedy neohřeje, neboť vlnění dopadá z obou stran a vzájemně se pak ovlivňují. [6]

5 Hlavní typy indukčních zařízení

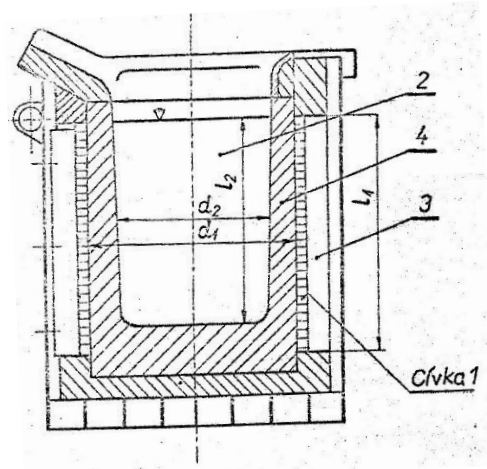
5.1. Indukční kelímkové pece pro tavení [1]

Indukční kelímkové pece pro tavení jsou nejdůležitější aplikací tohoto způsobu ohřevu. Používají se zejména ve slévárnách, kde jsou využívány pro tavení různých druhů ocelí a při výrobě speciálních slitin. Výhodou těchto pecí je, že k víření roztaveného materiálu dochází vždy automaticky, jakmile začne cívkou procházet proud, díky čemuž dostaneme dokonale homogenní slitinu, kterou nelze získat v jakémkoliv jiném druhu pece. K tomuto jevu fyzikálně dochází působením elektrodynamických sil, jelikož $\vec{F} = \vec{J}_2 \times \vec{B}_1$. (6)

Kde J_2 je hustota naindukovaného proudu ve vsázce, B_1 je magnetická indukce vyvolaná proudem I_1 .

Schéma tavicí pece je na obr.9. Na schématu je vidět nejdůležitější část pece, cívka (1), kterou prochází střídavý proud. Uvnitř cívky se nachází většinou nevodivý kelímk (4), ve kterém je umístěna vsázka (2). Pokud cívkou prochází střídavý proud, tak vznikne magnetické pole, které se uzavírá vně cívky. Jelikož jsou často kolem pece různé ocelové konstrukce, je zapotřebí zajistit vhodné stínění (3), aby se toto pole neuzavíralo těmito

konstrukcemi. Mělo by to za následek zahřívání konstrukcí a tím by se zvýšily ztráty, což je velmi nežádoucí, jelikož by klesla účinnost celého procesu.



Obr.9 Indukční kelímková pec [1]

Toto stínění lze realizovat dvěma způsoby. Prvním způsobem je, že pec opatříme válcovým pláštěm, souosým s cívkou, z dobře elektricky vodivého materiálu. Druhý způsob spočívá v tom, že pec opatříme vně cívky jádrem ze svazků transformátorových plechů. Pec se stíněním z transformátorových plechů má značně menší průměr než při použití válcového pláště a zvyšuje účinnost tavicího procesu.

Jelikož se indukční kelímkové pece používají zejména k tavení železného šrotu, který zcela nezaplní celý prostor kelímku, je zapotřebí dodržet určitý vztah mezi velikostí šrotu a zvoleným kmitočtem. Doposud jsme se zabývali teoreticky plnou válcovou vsázkou umístěnou souose s cívkou, ale tento stav nastane až při roztavení šrotu, ten pak zaplní prostor kelímku.

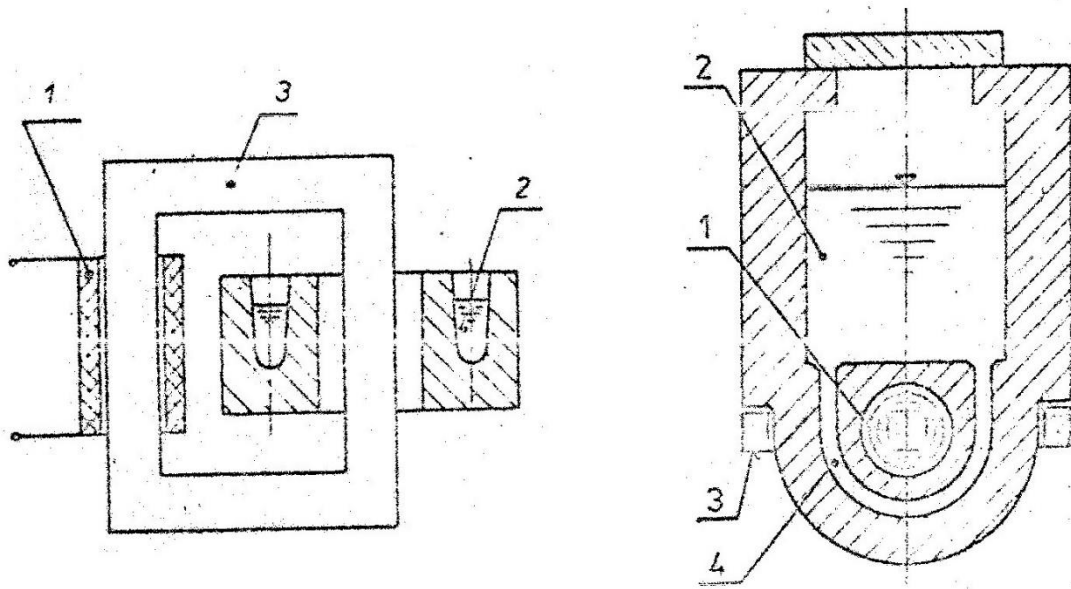
5.2. Indukční pece kanálkové [8]

Indukční kanálkové pece se používají především ve slévárenství, kde se využívají k udržování oceli, vyrobené v jiném tavicím agregátu, na požadované teplotě, eventuálně k jejímu přehřívání na požadovanou teplotu, resp. k udržení požadované teploty. Pece jsou navrženy pro tavení slitin železa, jako je např. litina, a dále pro neželezné kovy, mezi které patří měď, hliník, olovo, zinek a jejich slitiny.

Konstrukce těchto pecí připomíná transformátor (viz. obr.6 v následující podkapitole). Jedním z nejdůležitějších prvků pece je induktor, v dnešní době je již vyměnitelný. Induktory jsou v zásadě napájeny proudem o síťové frekvenci, vytvořený magnetický tok se celý uzavírá v magnetickém jádru. Pro správnou činnost kanálkové pece je zapotřebí, aby po roztavení kovu a jeho následném odlití k dalšímu zpracování zůstalo v kanálku alespoň takové množství taveniny, které je zapotřebí k vytvoření závitů dokrátka taveninou v kanálku a zbytkem po odlití ve vaně pece.

5.2.1. S uzavřeným železným jádrem [1]

Indukční kanálkové pece s uzavřeným železným jádrem jsou vlastně transformátor s uzavřeným jádrem z železných plechů. Jeho primární vinutí je zapojeno ke zdroji střídavého proudu a sekundární vinutí je tvořeno roztaveným kovem v keramickém kanálku. Tuto pec vidíme na obr.6



1 primární vinutí 2 sekundární strana 3 jádro transformátoru 4 kanálek

Obr.10 Indukční kanálková pec s uzavřeným železným jádrem [1]

Na levém obrázku je zobrazen starý typ pece, na pravém je zobrazena současná konstrukce.

Tento původní typ pece měl v provozu určité nevýhody, a proto byl ve dvacátém století nahrazen jiným typem pece s odlišnou konstrukcí.

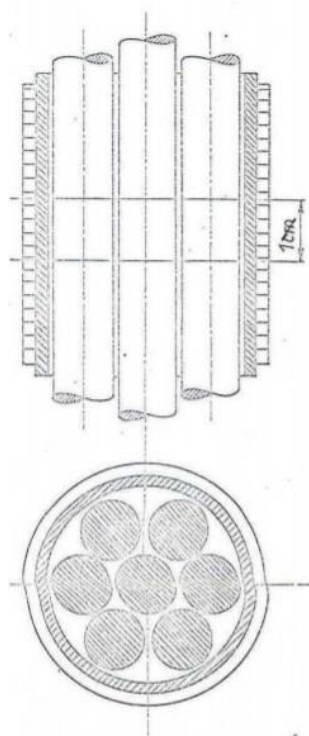
Při tavení hliníku dochází k usazování Al_2O_3 na stěně kanálku a následně ke zmenšení jeho průřezu. K odstranění tohoto problému je potřeba zvolit jiný tvar kanálku, který umožňuje čištění jeho vodorovné a svislých částí.

6 Efektivnost tavení kovů [5,10]

Při výpočtu indukční kelímkové pece nemůžeme počítat s plně zaplněným kelímkem. V dutině pecní cívky se uvažuje plná válcová vsázka v případě, kdy indukčně prohříváme vývalky. V případě indukčních kelímkových pecí nastává stav, kdy je kelímk zcela vyplněn až po roztavení železného šrotu. Tento šrot musí být pec schopna roztavit s dobrou účinností.

Stav, kdy je kelímk pece zaplněn železným šrotem nelze teoreticky vyšetřit. Tento problém lze vyřešit tím, že místo železného šrotu uvažujeme, že je kelímk vyplněn soustavou válcových železných tyčí ze stejného materiálu jako je šrot. Tyto tyče jsou

souosé s pecní cívkou viz obr12. Pro výpočet je nutné předpokládat, že izolace mezi tyčemi je nulová.



Obr.12 Zobrazení souososti tyčí s cívkou [9]

Pro běžnou konstrukční ocel do teploty 768 °C je pro běžnou síťovou frekvenci hloubka vniku několik milimetrů. Pokud se dostaneme nad tuto teplotu (nad Curierův bod-dochází ke ztrátě feromagnetismu), zvýší se rezistivita přibližně sedm krát a hloubka vniku se zvýší přibližně na 7 centimetrů.

Dále je při tavení oceli nutné uvažovat, že nastávají tři různé stavy vsázky, které se liší teplotou. První stav nastává při teplotě oceli v rozmezí 20-760 °C. Měrný odpor roste s teplotou, permeabilita závisí na intenzitě magnetického pole a druhu oceli. Ocel je stále tuhá a v kusech.

Druhý teplotní stav nastává od 760-1400 °C. Vsázka je stále tuhá (cca až do 1400 °C kdy nastává tavení), ale jelikož již není magnetická, permeabilita je rovna 1. Měrný odpor stále stoupá.

Poslední stav nastane při překročení teploty 1400 °C až do 1600 °C. V tomto okamžiku je již ocel roztavena a vyplňuje válcovou dutinu kelímku.

6.1 Tavení železného šrotu

Pro návrh pecní cívky se vychází z roztavené ocelové vsázky, která zaplňuje obsah kelímku. V následujícím obr.13 je znázorněn průběh absorbované energie P [kW/cm] v závislosti na průměru tyčí. Pokud průměr tyčí zmenšujeme, roste množství energie, kterou vsázka absorbuje. Množství absorbované energie lze určit ze vztahu:

$$P_{21} = \frac{\rho \pi r_2 \sqrt{2}}{a_2} P_{(x_2)} H_1^2 \quad [W/cm] \quad (7)$$

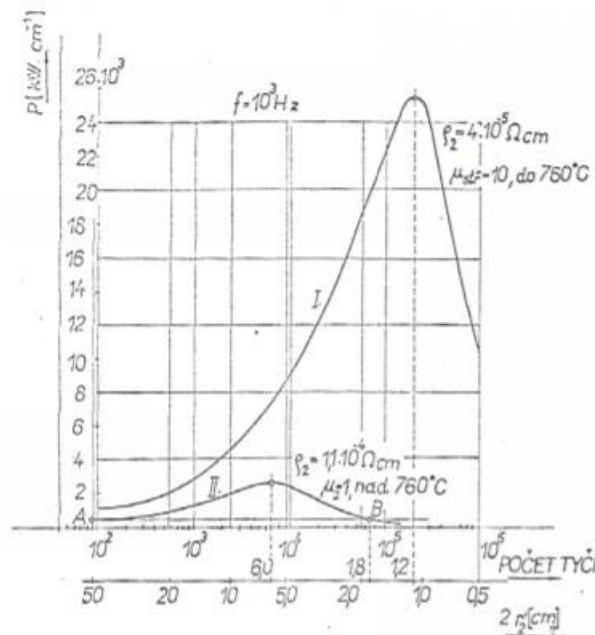
Pokud je hloubka vniku a_2 mnohonásobně menší oproti poloměru r_2 , je argument x_2 velký a z toho vyplývá, že je funkce $P_{(x_2)} \doteq \frac{1}{\sqrt{2}}$.

Pokud zmenšíme průměr tyčí na polovinu, zvýší se jejich počet v kelímku přibližně čtyřikrát. Jelikož je obvod každé tyče poloviční, je součet obvodů tyčí dvakrát větší. To má za následek zdvojnásobení množství absorbované energie.

Jestliže budeme nadále pokračovat ve zmenšování průměru tyčí, přestane platit, že $a_2 \ll r_2$.

Hodnota funkce P_{x_2} klesne až k nule a množství absorbované energie se zmenší. Z tohoto důvodu začne křivka I klesat. Z diagramu lze vypočítat, že největší množství absorbované energie při frekvenci 1kHz nastává při průměru tyče $r_2 \doteq 1,2 \text{ cm}$.

Druhá křivka v tomto obrázku také znázorňuje závislost absorbované energie na poloměru, ale při teplotě nad 760°C , tedy po ztrátě magnetizace.



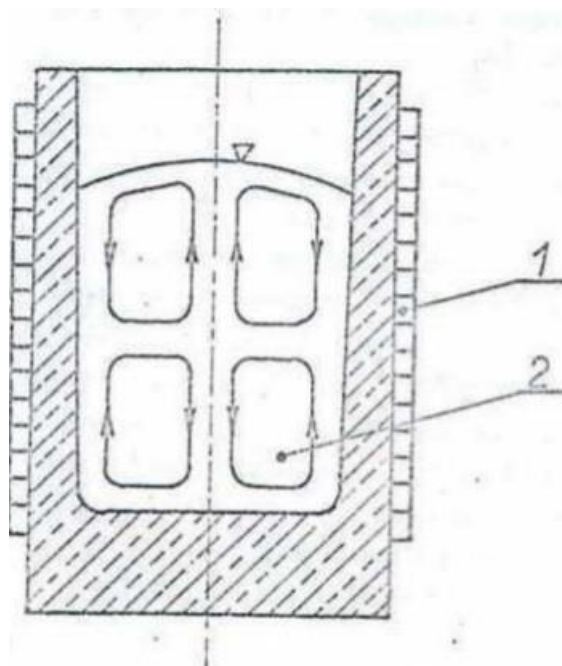
Obr.13 Průběh absorbované energie v závislosti na poloměru tyče [9]

6.2 Vtah mezi kmitočtem a vzduť vsázky [9,10]

Vlivem průchodu střídavého proudu pecní cívku, která se nachází kolem nevodivého kelímku, se vyzařuje elektromagnetické vlnění, které dopadá na roztavenou elektricky vodivou vsázku. Vzájemným působením proudů indukovaných ve vsázce, vznikají elektromagnetické síly, které vsázku zahřívají a způsobují její pohyb. Po roztavení vsázky vzniká víření taveniny, které má za následek dokonalé promísení slitiny. Jak již bylo

zmíněno, toto víření je jednou z předností indukčních kelímkových a kanálových pecí. Toto víření lze ovlivnit nespočet způsoby, jako je volbou vhodné napájecí frekvence, množstvím dodané energie, velikostí kelímku a umístěním pecní cívky vůči vsázce.

V praxi může nastat stav, kdy je toto víření tak velké, že dochází k příliš vysokému vzduť taveniny. To má za následek popraskání strusky a tavenina se dostane do styku se vzduchem, se kterým velmi rychle reaguje. Víření vsázky je zobrazeno na obr.14



Obr.14 Víření roztavené vsázky [9]

Rovnice pro výpočet vzduť vsázky:

$$h_t = k \frac{P_1}{\rho} \sqrt{\frac{\mu_r \sigma}{f}}, \quad (8)$$

Kde P_1 je výkon na jednotku plochy vsázky, k -konstanta, ρ -měrná hustota,

6.3 Elektrická účinnost indukční pece

Elektrická účinnost se obecně počítá tak, že hodnotu naindukovaného tepla (P_2) vydělíme příkonem pece P_1 . Abychom získali přesnější výsledek, musí se provést součet všech ztrát v obvodu:

$$P_g = P_1 + P_2 + P_c = R_1 I_1^2 + R_l I_1^2 + R_c I_1^2 \quad (9)$$

Kde P_1 značí vlastní ztráty v pecní cívce, P_2 je užitečný výkon zavedený do vsázky, P_c jsou ztráty v kondenzátoru a pásovém vedení.

Výsledná elektrická účinnost indukční pece je:

$$\eta_V = \frac{P_2}{P_g} = \frac{R_l}{R_1 R_l R_c} \quad (10)$$

V tomto výpočtu nejsou zahrnuty ztráty ve stínícím plášti, které se vypočítají:

$$P_3 = R_3 I_3^2 \quad (11)$$

Ztráty ve stínícím plášti bývají menší než 1 % z příkonu. Elektrická účinnost indukční kelímkové pece se pohybuje v rozsahu 70-75 %. Ztráty v pecní cívce se odvádějí vodním chlazením.

Účinnost samotné pecní cívky se určí ze vztahu:

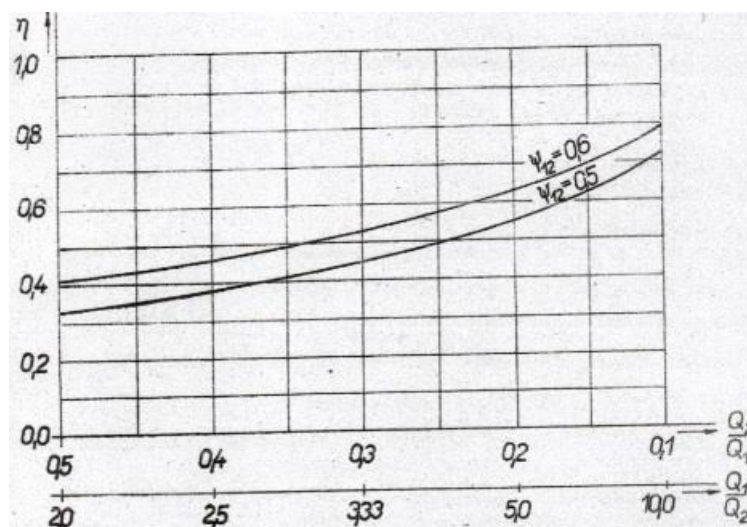
$$\eta_c = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_I}} = \frac{1}{1 + \frac{R_1 L_2}{\psi_{12}^2 L_1 R_2}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\psi_{12}^2} \frac{Q_2}{Q_1}} = \frac{\psi_{12}^2}{\psi_{12}^2 + \frac{Q_2}{Q_1}} \quad (12)$$

Veškeré zde použité vzorce jsou převzaty z literatury uvedené v seznamu zdrojů [5]. U běžně používaných ocelářských pecí bývá součinitel $\psi_{12} \doteq 0,55$, $Q_1 \doteq 80$, $Q_2 \doteq 10$. V následujícím obr.15 je pro představu o účinnosti uvedeno několik výpočtů.

ψ_{12}	$Q_1 / Q_2 =$	2,00	2,50	3,33	5,00	10,00
	$Q_2 / Q_1 =$	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10
0,50		0,334	0,385	0,455	0,556	0,725
0,55		0,377	0,430	0,500	0,600	0,750
0,60		0,419	0,474	0,546	0,643	0,784

Obr.15.

Z obr.16 je vidět, že materiály s velkým měrným odporem, jejichž jakost obvodu Q_2 je malá, se indukční kelímkové pece zahřívají s mnohem vyšší účinností. Bod tavení železa zde odpovídá poměru $Q_2/Q_1=0,1$ pro $\psi_{12}=0,6$. Tavení probíhá s téměř 80 % účinností. Indukční kelímkové pece nejsou vzhledem k nízké elektrické účinnosti vhodné k tavení dobře vodivých materiálů, jako je měď, její slitiny a hliník. Tyto materiály se taví v indukčních kelímkových pecích s vodivým kelímkem nebo v indukčních kanálových pecích.



Obr.16.

7 Oblasti užití indukčních ohřevů v praxi [1]

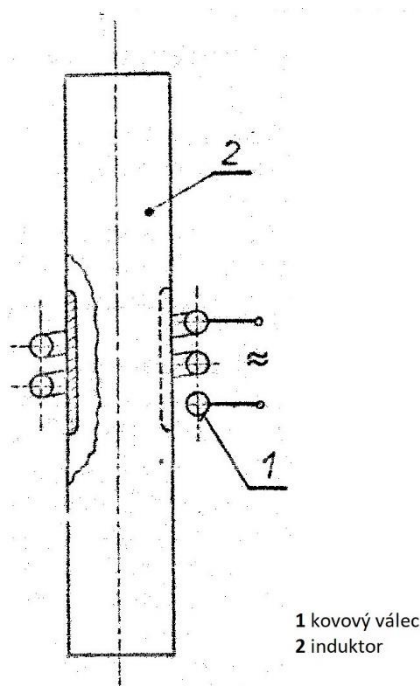
Dříve se v továrnách na zpracování železa používaly pece palivové, které byly vytápěné plynem, práškovým uhlím nebo naftou. Zpracovávaný materiál bylo zapotřebí ohřát na požadovanou například kovací teplotu (u oceli cca 1150 °C) a prohřát materiál rovnoměrně v celém jeho průřezu. Tento způsob ohřevu trval příliš dlouho a na povrchu ohřívaného materiálu docházelo k jeho oxidaci a tím k úbytku známými okujemi.

Oproti tomu při využití prohřívání indukčním zařízením, které je tak rychlé, že oxidace nenastane. Teplo vzniklé v indukčním prohřívacím zařízení je osově symetrické, tedy při správně zvolené frekvenci vzniká rovnoměrně v celém průřezu a přímo v daném materiálu.

V praxi se indukčních ohřívacích zařízení používá dále mimo tavení zejména k povrchovému kalení, pájení, žihání, svařování a prohřívání.

7.1 Povrchové kalení

Při povrchovém kalení obr.12 se tloušťka zakalení volí vhodnou volbou kmitočtu. Důležitým faktorem při povrchovém kalení je i volba vysokého měrného příkonu, neboť zakalení povrchové vrstvy musí proběhnout co nejrychleji, aby teplo vedením neproniklo do hlubších vrstev kaleného materiálu.



Obr.12 Povrchové kalení [1]

Z prvního diagramu **obr.13a** je vidět průběh teplot za použití vysokého kmitočtu v závislosti na hloubce vniku v časech 0,5-1,0-1,5s po připojení zdroje elektrické energie.

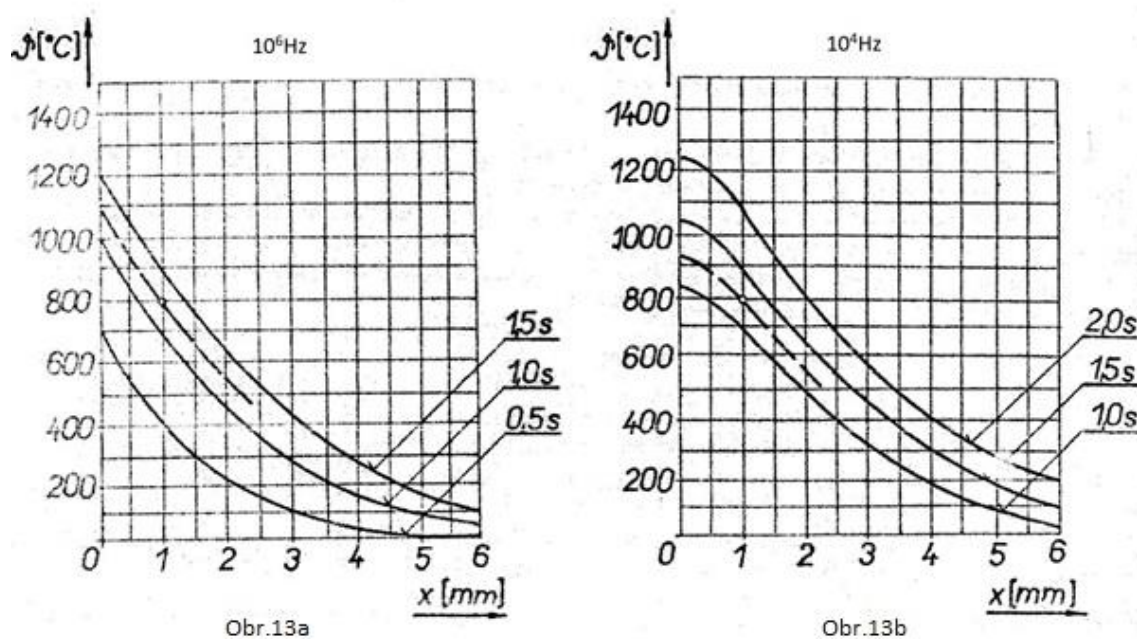
Za použití kmitočtu o hodnotě cca 10^6 Hz je měrný výkon naindukovaný z cívky do povrchu přibližně $1,5\text{kWcm}^{-2}$. Při použití této frekvence a při okolní teplotě 20 °C je

hloubka vniku, ve které se uvolní 86,4% tepla, asi 2×10^{-2} mm, při teplotě 700 °C je hloubka vniku asi 8×10^{-2} mm a při 800 °C je hloubka vniku 30×10^{-2} mm.

Z druhého diagramu **obr.13b** je patrné, že při zvolení kmitočtu 10^4 Hz se hloubka vniku značně liší. Při zachování stejného měrného výkonu se tento výkon v povrchové vrstvě přibližně desetkrát zvýší.

V diagramu jsou znázorněny hloubky vniku pro doby ohřevu (1,0-1,5 -2) s. Při teplotě 20 °C je hloubka vniku asi 0,2mm, při 700 °C je hloubka vniku asi 0,8mm a při 800 °C je hloubka vniku přibližně 3 mm.

Z obou diagramů je zřejmé, že při požadavku na zakalení 1mm vrstvy materiálu při kalící teplotě 800 °C je čas přibližně stejný. Rozdíl je v tom, že po zakalení v prvním případě je teplota povrchu cca 1100 °C a v druhém případě za použití frekvence o hodnotě 10^4 Hz je povrchová teplota jen 930°C. V obou případech dochází k přehřátí materiálu, které není přípustné. Proto se druhý případ jeví jako přípustnější.

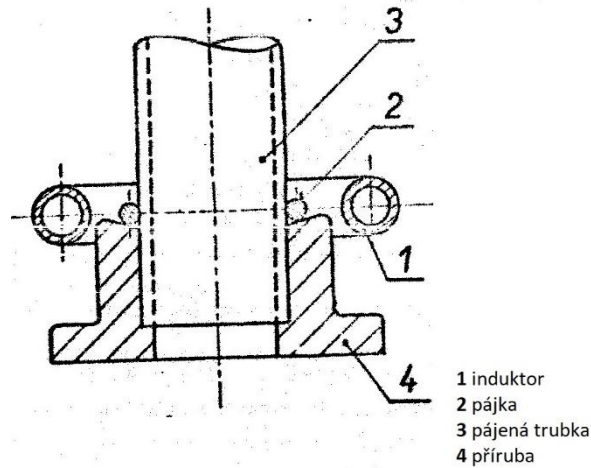


První způsob zakalení při frekvenci 10^6 bychom zvolili, pokud bychom potřebovali zakalit vrstvu o hloubce vniku několika desetín milimetrů.

7.2 Indukční pájení a žíhání

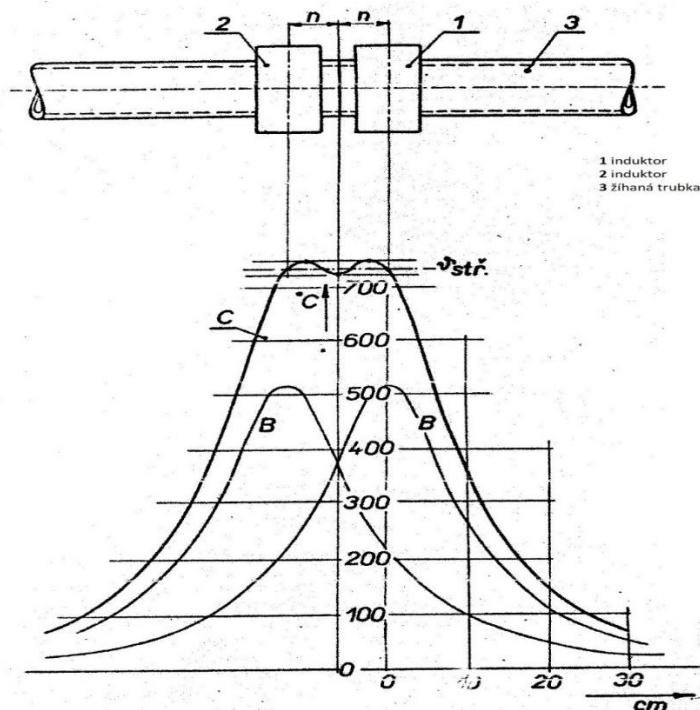
Indukční pájení bylo zavedeno v mnoha odvětvích průmyslu. Využívá se zejména pájení cínem a mosazí, které je znázorněno na obr.14. Pájka bývá vhodně připravena, aby bylo zajištěno co nejdůkladnější a nejsnazší zapájení. Na obrázku má tvar kroužku, který se umístí kolem pájené trubky. Po připojení induktoru ke zdroji vysokofrekvenčního proudu nastane vlivem indukce zahřátí pájky, příruby a trubky. Takto roztavená pájka vztlínáním zateče mezi trubku a přírubu.

V potravinářském průmyslu se takto pájí plechové krabice za použití roztaveného cínu. Zde se využívají vysokofrekvenční generátory (dříve elektronkové) které vygenerují kmitočty o velikosti několik set kHz.



Obr.14 Pájení trubky do příruby [1]

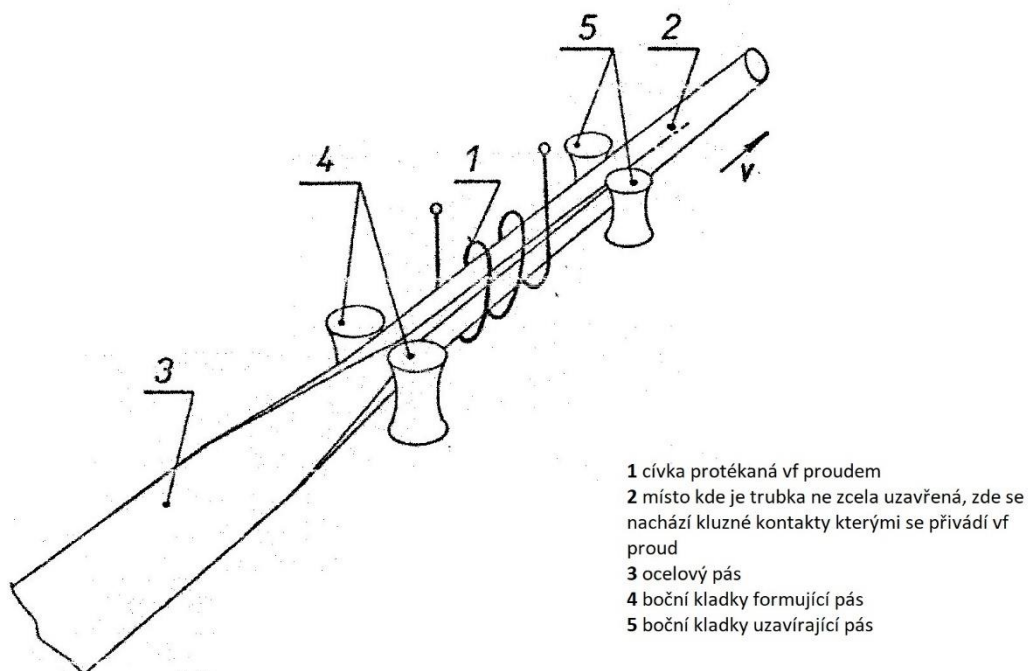
Na dalším obr.15 je znázorněno zařízení pro žíhání svarů ocelových trubek. Pokud bychom použili pouze jeden induktor, teplota by strmě klesala na obě dvě strany vlivem tepelné vodivosti žíhané trubky. Jelikož musí být teplota žíhání zajištěna v určité vzdálenosti od svaru na obě strany, je zapotřebí použít druhý induktor, aby tato vzdálenost byla dodržena. Na obrázku jsou znázorněny průběhy teplot od jednotlivých induktorů a výsledná křivka průběhu teploty, která vznikla složením těchto jednotlivých průběhů.



Obr.15 Žíhání svarů ocelové trubky [1]

7.3 Indukční svařování

Indukční svařování se využívá při svařování ocelových trubek. Celkový postup tohoto svařování je znázorněn na obr.16. Celý princip spočívá v tom, že dlouhý ocelový pás o tloušťce 1,5-5 mm projíždí rychlostí 10-80 m za minutu speciálním zařízením, které sestává z bočních kladek. Tyto kladky formují plech do tvaru trubky. Na konci takto vytvarované trubky se nachází induktor (napájen vysokofrekvenčním proudem), který ji obepíná. Do trubky se indukují proudy a v místě spojení trubek se vlivem vysoké hustoty naindukovaných proudů vytvoří teplota 1400 °C potřebná ke svařování.



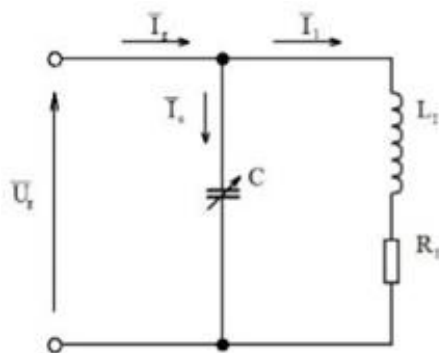
Obr.16 Indukční svařování trubek [1]

8 Zdroje pro napájení indukčních zařízení [1,9,10]

8.1 Napájení ze sítě 3×380/220 V, 50 Hz [1,9,10]

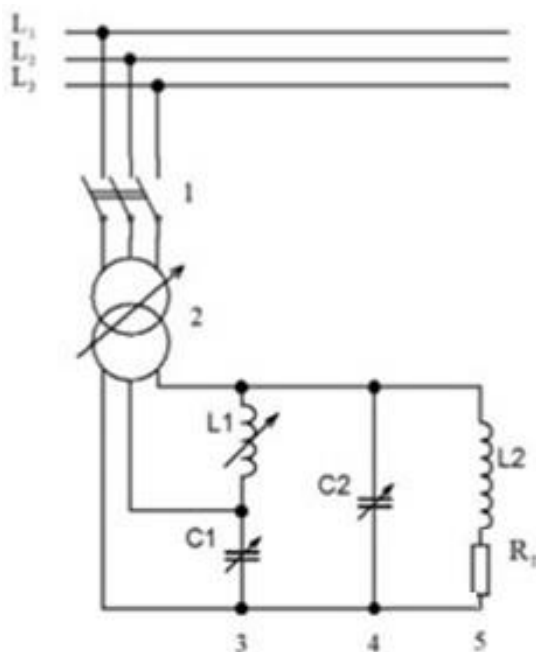
V některých případech je možné, aby se indukční kelímkové pece napájely proudem o kmitočtu 50 Hz. Stejně tak je tomu i u indukčních ohříváček, jedná-li se o prohřívání válcových těles s průměrem 16-55 cm pro oceli.

Z obr.17 je zřejmé, že se jedná o jednofázovou zátěž, která na trojfázovou síť působí jako nesymetrická což je zcela nevyhovující, neboť se většinou jedná o poměrně vysoké výkony v řádech několika set kW. V obvodu představuje L_1 výslednou indukčnost, R_1 výsledný odpor a C kompenzační kapacitu. $L_1=f(L_1\text{-induktor}, L_2\text{ vsázka}, L_3\text{-stínění})$ - přepočteno na stranu cívky. $R_1=f(R_1, R_2, R_3)$ – přepočteno na stranu cívky.



Obr.17 Jednofázový náhradní obvod indukční pece [10]

Proto se využívá takzvaných symetrizačních obvodů, které toto jednofázové nesymetrické zapojení převedou na zapojení symetrické trojfázové. Zapojení symetrizačního zařízení je vidět na následujícím obr.18.



Obr.18 Trojfázový náhradní obvod indukční pece [10]

8.1.1 Symetrizace indukčních zařízení

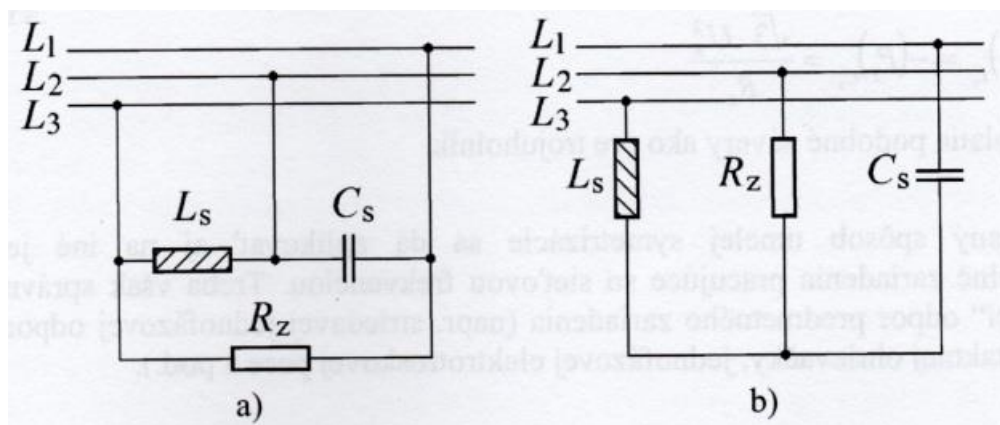
Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, většina indukčních pecí a ohřivačů jsou realizovány jako jednofázové zařízení, vůči trojfázové napájecí síti se tedy jeví jako nesymetrická zátěž. Jedná se o indukční zařízení napájených frekvencí sítě, respektive snižovacím transformátorem připojeným na distribuční síť. Do této skupiny zařízení patří indukční kanálové pece (do výkonu 500 kW), indukční kelímkové pece (do výkonu od 120 do 2000 kW, s obsahem vsázky 1-30 t) a indukční ohřivače o výkonu do 1000 kW.

Způsobů, jak napájecí síť indukčních zařízení symetrizovat existuje několik. Pokud je v provozu více jednofázových indukčních zařízení, přibližně stejných výkonů, je zapotřebí, aby se postupně připojily na jednotlivé fáze napájecí sítě. Symetrizace sítě není potřeba u moderních kanálových pecí, které jsou konstruovány se třemi indukčními jednotkami. To

znamená, že mají tři kanály, každý z kanálu má vlastní induktor, a z toho vyplývá, že trojfázovou síť zatěžují symetricky.

Pro pece se dvěma kanály lze symetrizace docílit úpravou pecního transformátoru, např. Scottovým zapojením. Každý kanál má svůj vlastní transformátor. Jeden z transformátorů je hlavní, jeho primární vinutí je rozděleno na polovinu, s počtem závitů $\frac{N_1}{2}$, každá polovina je zapojena na jednu fázi z napájecího trojfázového vedení. Druhý transformátor, tzv. pomocný je zapojen na zbylou fázi. Pokud má druhý transformátor počet závitů $\sqrt{3} \frac{N_1}{2}$ a oba kanály jsou shodné, odebírané proudy z napájecí sítě budou shodné.

Umělá symetrizace jednofázových pecí a ohřivačů síťové frekvence je realizována pomocí symetrizační cívky a symetrizačního kondenzátoru. Princip spočívá v tom, že k vyladěnému obvodu indukčního zařízení se zatěžovacím odporem R_Z se do zbylých dvou fází zapojí v určeném pořadí (dle sledu fází) a velikosti prvky s kapacitou C_S a indukčností L_S . Tyto prvky spolu s R_S mohou být zapojeny do hvězdy nebo do trojúhelníku, a vůči napájecí síti se jeví jako symetrická zátěž. Tato zapojení jsou znázorněna na obr.19.



Obr.19 Symetrizační prvky L_S a C_S vyladěné jednofázové pece, zapojení do trojúhelníku (a) a do hvězdy (b) [3]

Pro zapojení do hvězdy i do trojúhelníku se pro výpočet symetrizační indukčnosti L_S a symetrizační kapacity C_S vychází z dodržení dvou podmínek.

První podmínkou je, že proudy odebírané ze sítě jsou shodné ($I_{L1}=I_{L2}=I_{L3}$). Druhou podmínkou je konfáznost (souběžnost) těchto proudů při fázových napětích (U_{L1} , U_{L2} , U_{L3}).

Obě podmínky jsou splněny, pokud se imaginární složky proudů rovnají nule a zároveň je dodrženo správné sled fází. Po splnění těchto podmínek lze velikost L_S a C_S určit z následujících vztahů:

Pro zapojení do trojúhelníku:

$$L_S = \frac{\sqrt{3}}{\omega} R_Z \quad C_S = \frac{1}{\sqrt{3} \omega R_Z} \quad (13)$$

Pro zapojení do hvězdy:

$$L_S = \frac{R_Z}{\sqrt{3}\omega} \quad C_S = \frac{\sqrt{3}}{\omega R_Z} \quad (14)$$

Určeným velikostem indukčnosti a kapacity odpovídají výkonové poměry v obvodě zařízení:

Pro spojení do trojúhelníku:

- Činný výkon za zatěžovacím odporu R_Z

$$P_{W(R_S)} = U_R I_R = \frac{U_R^2}{R_Z} \quad (15)$$

- Jalový výkon na indukčnosti cívky L_S

$$P_{J(L_S)} = U_L I_L = \frac{U_L^2}{\omega L_S} = \frac{U_L^2}{\sqrt{3}R_Z} \quad (16)$$

- Jalový výkon na kapacitě kondenzátoru C_S

$$P_{J(C_S)} = U_C I_C = -\omega C U_C^2 = -\frac{U_C^2}{\sqrt{3}R_Z} \quad (17)$$

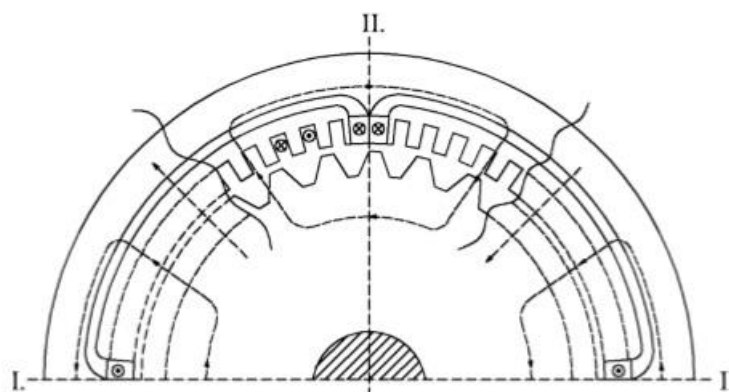
Jalové výkony na indukčnosti a kapacitě jsou shodné, jen opačně orientované, z důvodu shodných napětí na R_S , L_S , C_S . Proto symetrizovaná zátěž odebírá ze sítě zdánlivý výkon $S = (P_W)_{R_Z}$, odpovídající činnému výkonu na zatěžovacím odporu R_Z .

Pro spojení do hvězdy: jalové výkony jsou velikostí také shodné

$$P_{J(L_S)} = -P_{J(C_S)} = \frac{\sqrt{3}U_R^2}{R_Z} \quad (18)$$

8.2 Rotační měniče pro proudy středních kmitočtů [1,5,10]

Rotační generátory se používají zejména pro napájení indukčních tavicích pecí a prohřívacích zařízení. Vyráběné proudy dosahují kmitočtů v hodnotách 500 Hz až 10KHz. Schematicky je toto zařízení zobrazeno na následujícím obr.20.



Obr.20 Průřez rotačního měniče proudu [5]

Stator těchto generátorů obsahuje dva druhy drážek s pracovním a budícím vinutím. Pracovní vinutí, ve kterých vznikají proudy vyšších kmitočtů je uloženo v menších drážkách. V těchto drážkách se používají vodiče složené z většího počtu měděných vzájemně izolovaných drátů (kvůli skin efektu). Do větších drážek statoru je umístěno budící vinutí napájené stejnosměrným proudem. Toto vinutí může být provedeno různými způsoby, a to jako dvupólové, čtyřpólové a šestipólové. Na obrázku výše je zobrazeno vinutí čtyřpólové.

Na rotoru se nenachází žádné vodiče. Je vyroben z ocelolitiny a na povrchu je umístěn věnec skládající se z tenkých dynamových plechů, věnec je opatřen drážkami.

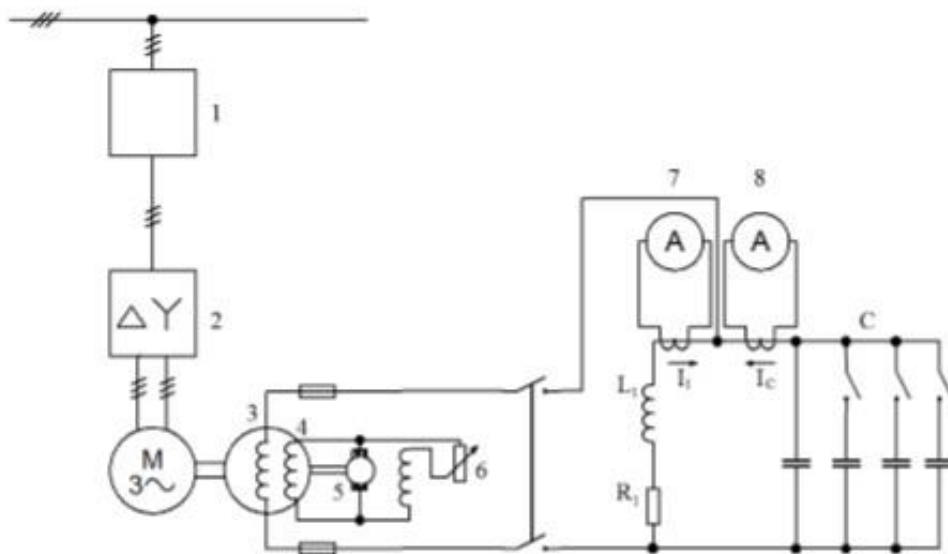
Tento druh generátoru se značí jako heteropolární. Při pohledu proti ose generátoru je na statoru vidět střídání severního a jižního pólu budícího vinutí.

Sledujme magnetický tok mezi póly 1 a 2. Tento tok směřuje od rotoru ke statoru. Smyčka pracovního vinutí skládajícího se z vodičů 1 a 2 je protékána stejnosměrným magnetickým tokem. Tento tok dosahuje maxima, pokud se proti zubu mezi vodiči nachází zub rotoru. Minimum nastává, pokud se proti zubu statoru nachází drážka rotoru. Stejnosměrný magnetický tok v zubu statoru mezi vodiči 1 a 2 kolísá od maxima k minimu. Naindukované napětí ve smyčce 1 a 2 obsahuje vyšší harmonické. Jelikož generátor energii dodává do obvodu zařízení vyladěného jen pro základní harmonickou, tyto vyšší harmonické se neuplatní. Kmitočet naindukovaných proudů do vinutí je přímo úměrný úhlové rychlosti rotoru a nepřímo úměrný rozteči drážek vinutí statoru.

Tento druh generátorů se využíval jako vysokofrekvenční zdroj pro radiotelegrafii. Zde se využívalo vyšších harmonických a jelikož ztráty v železe a ztráty v mědi rostou se čtvercem frekvence, byla elektrická účinnost velmi nízká. Rotační generátory byly posléze vytlačeny elektronkovými generátory.

Jak již bylo zmíněno, účinnost generátoru silně závisí na velikosti frekvence. Při frekvenci 500 Hz je účinnost generátoru okolo 90 %, při kmitočtu 10kHz je účinnost 70 %.

K pohonu rotačních generátorů se využívají asynchronní motory s kotvou nakrátko nebo s kotvou kroužkovou. Způsob zapojení je znázorněn na následujícím obr.21.



Obr.21 Elektrické schéma a celková dispozice indukční tavicí pece s rotačním generátorem [10]

Pomocí vypínače (1) se přivede proud do přepínače Y/D (2) sloužícího k rozběhu asynchronního motoru (M). Elektromotor je spojený s generátorem (G), ve kterém je umístěno pracovní (3) a budící (4) vinutí. Pomocí budiče (5) a vhodného regulátoru (6) se vytvoří budící proud.

Jelikož lze pomocí regulátoru řídit indukované napětí ve vinutí, lze jím tedy regulovat i výkon dodávaný do indukční pece. Ve schématu se nachází dva ampérmetry (7,8) sloužící ke sledování správného vyladění obvodu. Jeden měří proud procházející cívkou pece a druhý měří proud tekoucí kondenzátorovou baterií. Pokud se tyto proudy shodují, znamená to, že je obvod vyladěn správně a indukční pec odebírá pouze činný výkon.

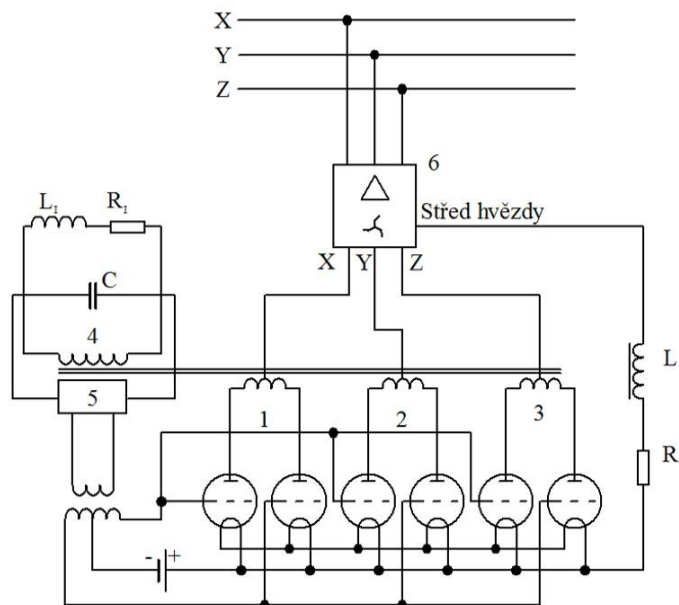
Jelikož dříve běžně používané zapojení generátoru s elektromotorem přes pružnou spojku zabíralo poměrně dost místa, přikročilo se k používání zvláštní konstrukce, takzvaného monobloku. V tomto uspořádání má generátor s elektromotorem společný válcový plášť. Soustrojí do velikosti výkonu 200kW se montují se svislou osou, popřípadě v uzavřeném provedení s vodním chlazením. Tato konstrukce má za následek snížení hlučnosti a úsporu místa.

Rotační generátor potřebuje pro svoji činnost stejnosměrný proud pro obvod buzení. U starších soustrojí se na společnou hřídel generátoru a elektromotoru montoval rotační budič. U novějších provedení se využívá usměrňovačů s výbojkami a usměrňovačů s polovodičovými součástkami.

Rotační zařízení vyžaduje vybudování těžkých betonových základů. Jelikož je zařízení značně hlučné, je třeba ho umístit do uzavřené místnosti.

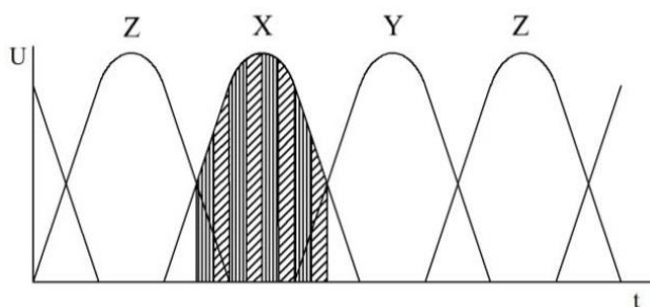
8.3 Iontové měniče kmitočtu

Tento druh měničů se začal vyvíjet v padesátých letech minulého století. Jeho schéma je na následujícím obr.22.



Obr.22 Schéma zapojení iontového měniče [10]

Měnič kmitočtu odebírá potřebnou energii přes transformátor, který je zapojen jako trojúhelník-lomená hvězda. Na sekundární straně jsou jednotlivé konce fází (X,Y,Z) spojeny se středem cívek (1,2,3). Konce těchto cívek jsou napojeny na anodu tyatronů. Všechny tyto cívky jsou společně s pracovním vinutím na uzavřeném železném jádru. Pokud by konec každé fáze byl připojen pouze na jednu anodu tyatronu, choval by se měnič jako trojfázový usměrňovač, jehož průběhy jsou znázorněny na následujícím obr.23.



Obr.23 Průběhy napětí [10]

V našem případě je fáze připojena vždy na dva tyatrony, proud vede vždy jen jeden z nich a to ten, který má kladné napětí na mřížce. Po krátké době zajistí ovládací elektronika, aby vedl druhý tyatron, to je zajištěno změnou polaritý na mřížkách. Tento děj se neustále opakuje.

Od středu cívky vedoucí k anodě aktivního tyatronu vznikají krátké proudové rázy, které mají za následek vytvoření střídavých rázů magnetického toku v uzavřeném železném jádru. Tyto magnetické toky vybudí střídavé naindukované napětí v pracovním vinutí, které napájí oscilační obvod.

Tento obvod je vyladěn a skládá se z pecní cívky (L_I , R_I) a paralelní kondenzátorové baterie (C).

Podle rytmu střídavého buzení tyatronů se upravuje kmitočet buzení pecního obvodu. Z pecního oscilačního obvodu je za pomoci zpětné vazby určována frekvence střídavého spínání tyatronů.

Kmitočet pecního obvodu se mění vlivem ohřívání vsázky. Je to dáno vlivem změn L_I a R_I . Díky zpětné vazbě se však mění i kmitočet impulsů, kterým se spínají tyatrony.

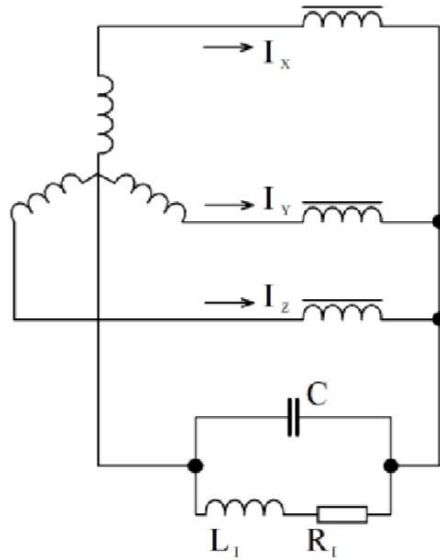
Výhodou iontových měničů je zmenšení hmotnosti, které se dosáhlo díky absenci rotující části a tím k nepotřebnosti těžkých masivních základů. Další výhodou je vysoká elektrická účinnost a to až 95 % a bezhlučnost.

Díky zpětným zápalům v tyatronech se však staly iontové měniče nespolehlivými a přestaly se používat. Po vypnutí tyatronu je zapotřebí, aby nastala takzvaná deionizace rtuťových par. Touto deionizací se zajišťuje, aby tyatron po přiložení záporného napětí na mřížku nevedl. Iontové měniče kmitočtu byly základem pro konstruování dnes převažujících statických měničů kmitočtu s tyristory a výkonovými tranzistory. Výhodou je, že mají vyšší účinnost, menší hmotnost, zabírají menší prostor a jsou méně hlučné.

8.4 Magnetické násobiče kmitočtu

Schéma tohoto zařízení je zobrazeno na následujícím obr.24. Primární strana vinutí je zapojena na síť a sekundární strana je zapojena do hvězdy. Na sekundární vinutí jsou na každou fázi připojeny tlumivky s přesyceným jádrem. Pecní oscilační obvod se nachází mezi nulovým vodičem a společným uzlem jednotlivých fází sekundárního vinutí. Na následující obrázku je zobrazeno přivádění napětí na přesycené tlumivky, toto přesycení má za následek vzniknutí proudových rázů. Toto zapojení se chová jako zdroj trojnásobného kmitočtu sítě, tedy 3×50 Hz. Z magnetického násobiče lze odebrat v případě nutnosti i vyšší harmonické, například při odebrání třetí harmonické dostaneme 9×50 Hz.

V praxi se používaly rotační generátory společně s magnetickým násobičem. Stejně jako iontové měniče se v praxi již nepoužívají.



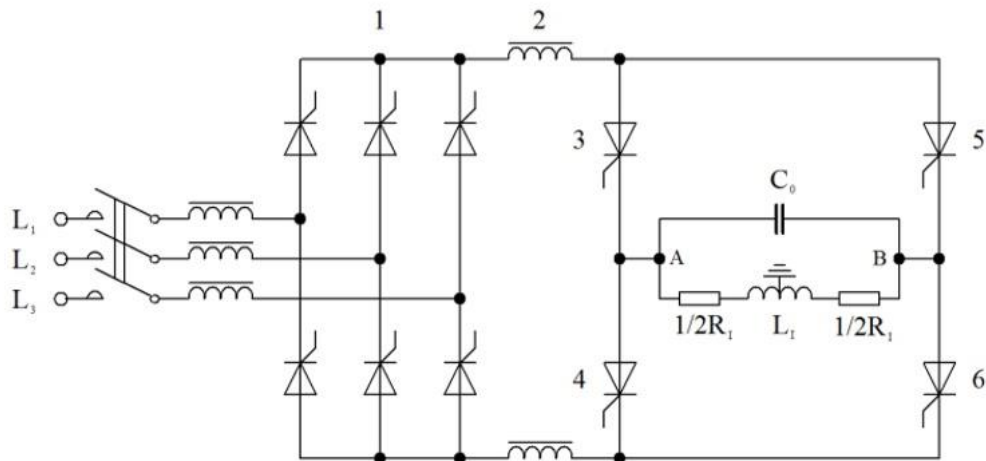
Obr.24 Magnetický násobič kmitočtu [10]

8.5 Tyristorové měniče pro napájení indukčních zařízení

Oproti rotačním měničům mají ty tyristorové mnoho výhod. Jednou z těchto výhod je jejich vyšší elektrická účinnost okolo 95 %, oproti rotačním s účinností maximálně 85 %. Dále není potřeba žádných betonových základů a odpadá i problém s vysokou hlučností i prostorem.

Dále je velkou výhodou to, že tyristorový měnič automaticky udržuje stále stejnou pracovní frekvenci odvozenou pomocí zpětné vazby z vlastního kmitočtu obvodu, to znamená, že během tavení není nutno tuto frekvenci doladovat, ale moderní statické měniče umožňují však regulaci nejen výkonů ale i frekvence.

Schéma zapojení tyristorového měniče je zobrazeno následujícím obr.25, měnič je zde zapojen paralelně s pecním obvodem.



Obr.25 Schéma tyristorového měniče [10]

Naznačené zemní spojení středu cívky L_I je uvedeno jen pro snazší výklad činnosti měniče.

Měnič sestává ze tří hlavních částí. Z trojfázového tyristorového můstkového usměrňovače, z tlumivky a střídače. Tlumivky v tomto zapojení mají důležitou funkci, první funkcí tlumivky je omezení vzniklého zkratového proudu při poruše, dále má funkci oddělovací (přenáší s prodlevou rozdíly napětí mezi usměrňovačem a střídačem) a vyhlazovací (vyhlazuje stejnosměrný proud z usměrňovače).

Střídač je složen z tyristorů 3 až 6 a je zatížen pecním obvodem složeným z indukčnosti L_I a odporu R_I , které jsou zapojeny sériově (představují činnou a jalovou zátěž pece) a dále pak kompenzační kapacitou C_0 která je zapojena paralelně.

Střídač pracuje na principu spínání dvou protilehlých tyristorů, např. je sepnuta dvojice 3 a 6, po jejich uzavření se sepne dvojice 4 a 5. Tento proces se neustále opakuje. Ovládání tyristorů je zajištěno vnějším zdrojem impulsů.

Vedle paralelního zapojení zátěže se v současnosti používá i zapojení sériové s R_I , L_I , a C_0 . Obě zapojení mají své výhody a nevýhody. Např. velikost proudu procházející kapacitou.

8.6 Pásové vedení [1,10]

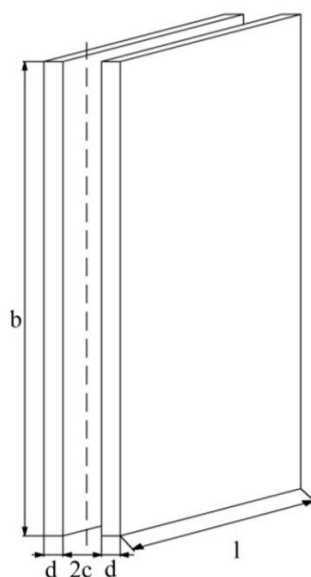
Pásové vedení slouží ke spojení tavící pece a kondenzátorové baterie. Délka pásového vedení mezi C_0 a induktorem by měla být co nejkratší, protože tímto vedením protékají vysoké proudy, které vedou k vysokým úbytkům napětí. Ve vyladěném oscilačním obvodu pece je proud tekoucí cívkou a kondenzátorovou baterií mnohokrát větší než proud, který dodává generátor.

Například u pecí o velikosti 1-2 t mají tyto proudy hodnoty až 6000 A. Díky správnému návrhu pásového vedení zamezíme vzniku příliš velkým ztrátám.

Toto vedení je zpravidla tvořeno tenkými měděnými pásy viz. obr.26. Jejich tloušťka se volí podle hloubky vniku, a to přibližně 1,57krát větší ($\frac{\pi}{2} a$). To má za následek již zmíněné omezení činných ztrát.

Výpočet impedance pásového vedení se provádí podle následujícího vztahu (19):

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



Obr.26 Pásovité vedení [10]

8.7 Kondenzátorové baterie [1]

Kondenzátorové baterie se využívají u středofrekvenčních zařízení, které ke své činnosti potřebují jalovou energii. Jelikož ze sítě chceme odebrat pouze činný výkon, tak si zařízení odebere potřebnou jalovou složku proudu právě z této baterie.

Kondenzátorová baterie sestává z několika kondenzátorových jednotek. Například pro indukční zařízení s příkonem 600 kW a kmitočtem 1 kHz je zapotřebí 20 kondenzátorových jednotek. Jednotlivé jednotky jsou v samostatných nádobách, v každé nádobě je několik zploštělých kondenzátorových svitků, které se pokládají na sebe. Svitky se vyrábějí současným navíjením hliníkové fólie a kondenzátorového papíru.

Kondenzátorového papíru je zapotřebí použít několik vrstev, jelikož má v sobě miniaturní dírky, a použitím několika vrstev se tyto dírky překryjí. Na obou koncích svitku se do krajů vtlačí pružné kontakty, na které se později přivádí proud. V nádobě se svitky nachází v chladicí kapalině, která přebírá dielektrické teplo.

Pokud bychom chtěli snížit velikost dielektrických ztrát, což je možné použitím kondenzátorového papíru přibližně s 5 % ztrátami výkonu, je možné použít jiné izolace, například polypropylenovou fólii, tím se docílí snížení ztrát a zmenšení rozměru kondenzátorové baterie.

Kondenzátorové baterie se nacházejí ve stojanu vyrobeného z válcovaných profilů. V horní části profilů se nacházejí jednofázové nožové spínače, které umožňují připojení potřebných částí kondenzátorových baterií. Před připojováním nebo odpojováním baterie je nutné snížit napětí snížením budícího proudu. Po skončení tohoto procesu se generátor opět nabudí na plnou hodnotu.

U zařízení obsahující tyristorový měnič se hodnota kondenzátorové baterie ponechává konstantní. Tyristorový měnič automaticky sleduje měnící se rezonanční frekvenci obvodu cívka-baterie.

9. Hodnocení kritériem 3E [9,10]

Mezi toto kritérium 3E patří v oblasti indukčního tavení kovů hodnocení z hlediska energetického, ekonomického a ekologického. Výhody, popř. nevýhody uvádím v následujících podkapitolách.

9.1 Ekonomika

V oblasti tavení z ekonomického hlediska je indukční tavení nejvýhodnější oproti ostatním způsobům tavení. Odpadají zde náklady na výměnu elektrod, které se při obloukovém tavení opalují. U obloukových pecí připadne na přetavení 1 t oceli přibližně 6 kg elektrod. Nejzásadnější nevýhodou indukčních pecí je pořizovací cena, jelikož tento druh pece potřebuje ke své činnosti frekvenční měniče, které tuto technologii prodraží.

Předností tavení je rychlost ohřevu materiálu, na jeho tavící teplotu. Lze docílit lokálního ohřevu např. pro povrchové kalení, tváření a žihání.

Za použití vhodného stínění, například vodivým pláštěm nebo použitím svazků transformátorových plechů, dojde k zamezení nežádoucích účinků, jako jsou například ztráty v konstrukci zařízení. Bohužel potřebou stínění opět vzroste pořizovací cena.

Poslední mnou zmíněnou výhodou je kvalita získané slitiny. Jelikož dochází v indukčních tavících zařízeních k víření taveniny, výsledkem je dokonalá homogenní slitina.

9.2 Ekologie

Z ekologického pohledu se nejedná o nijak zvlášť škodlivé zařízení. Při jejich provozu se do ovzduší neuvolňují škodlivé látky, jako jsou například nebezpečné oxidy a dusičnany z povrchu vsázky, jako je tomu u plynových tavících pecí. V provozu jsou často indukčními pecemi nahrazované pece obloukové. Jelikož v indukčních pecích dochází k tavení při nižších teplotách, než je tomu u pecí obloukových, uvolněné prachové částičky mají větší rozměr a snadněji se zachycují vhodnými filtry.

9.3 Energetika

Z energetického hlediska nás nejvíce zajímá příkon, který je zapotřebí k přetavení daného množství materiálu. Indukční tavící pece potřebují oproti odporovým pecím mnohem menší příkon k přetavení stejného množství materiálu. Tepelný výkon je dán vzorcem:

$$P = \frac{Q}{t} \quad [W] \quad (20)$$

Potřebná energie k ohřátí materiálu se určí ze vztahu:

$$Q = G * c * \Delta T \quad [J] \quad (21)$$

Například pro ocelový válec o průměru 10 cm je spotřeba energie ze sítě pro indukční ohřev přibližně $0,4 \text{ kWhkg}^{-1}$ při frekvenci 1kHz. U obloukové pece je potřebná energie při shodném kmitočtu asi 800 kWh na tunu materiálu.

Při použití indukčních tavicích pecí odpadají problémy s proudovými rázy jako je tomu u pecí obloukových. Z energetického hlediska je nutné uvést nevýhodu, že podstatná část indukčních pecí je jednofázová, čímž v síti vzniká nesymetrické zatížení. Proto se u těchto zařízení používá symetrizační člen, který tuto nesymetrii odstraní.

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá problémem indukčních ohřevů, zejména však tavením kovů v elektrických kelímkových pecích.

První dvě kapitoly jsem věnoval seznámení s různými druhy ohřevů a k popisu teorie indukčního tepla.

Hlavní část této práce jsem věnoval k seznámení s jednotlivými druhy pecí, se kterými se v praxi můžeme setkat. Zhodnotil jsem jejich výhody, popř. nevýhody, účinnost indukčního ohřevu, hloubku vniku a popsal jsem také efektivnost tavení kovů, kde jsem se zabýval tavením železného šrotu, vtahem mezi frekvencí a vzdutí vsázky a poté jsem zde uvedl, jak se určí elektrická účinnost tavicí pece.

Dalším tématem bylo použití indukčního ohřevu v praxi. V praxi se tento druh ohřevu používá zejména k tavení, kalení, svařování a indukčního pájení a žíhání. Poté jsem se zabýval problematikou napájecích zařízení. Zde jsem zmínil napájení ze sítě a jeho symetrizaci, rotační měniče (u kterých účinnost při vysokých frekvencích klesá) a dnes již nepoužívané iontové měniče a magnetické násobiče kmitočtu. Neopomenul jsem ani tyristorové měniče pro napájení indukčních zařízení, jedná se o moderní metodu napájení s účinností až 95 %. Obsahem této kapitoly je i seznámení se s pásovým vedením a kondenzátorovými bateriemi.

V poslední kapitole jsem se zabýval hodnocením kritériem 3E, do které spadá hodnocení z ekonomického, energetického a ekologického pohledu. V každé oblasti jsem se pokusil o objektivní hodnocení a o uvedení výhod, resp. nevýhod. Vyhodnocením všech kritérií jsem dospěl k závěru, že tento druh pecí nijak neškodí lidskému zdraví a nepředstavuje problém pro životní prostředí. Z pohledu energetika je z energetického hlediska nejzásadnější efektivita a rychlost, jakou se materiál ohřívá. Tato rychlost a efektivnost má za následek ekonomickou úsporu.

Seznam použité literatury a internetových zdrojů

- [1] Jiří Kožený a Emil Langer. Elektrotepelná zařízení indukční: Základy teorie, výpočty a konstrukce. VŠSE v Plzni, 1982
- [2] Pavel Novák a Dušan Medved'. Elektrické teplo v moderných technologiách. Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 04200 Košice, 2017, ISBN 978-80-553-3138-6
- [3] Pavel Novák. Elektrické teplo: Základy teórie elektrických ohrevov a aplikácie. Equilibria,s.r.o.,Poštová 13, 04001 Košice,2010, ISBN 978-80-89284-48-1
- [4] Emil Langer. Teorie indukčního a dielektrického tepla. Academia, nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1979
- [5] Emil Langer. Elektrotepelná technika část V: Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení. VŠSE v Plzni-editační středisko, 1975
- [6] Karel Pavlíček. Stínění indukční kelímkové pece. Plzen,2011. Bakalářská práce
- [7] Jiří Milka. Energetické problémy indukčních elektrotepelných zařízení. Brno,2011. Bakalářská práce
- [8] Zdeněk Hradílek, Josef Gavlas, Vladimír Král, Czeslaw Sajdak, Alicja Kurek, Roman Przulucki, Jacek Chraponski. Elektrotepelná technika: Simulace-počítačové programy. VŠB Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2001, 1.vydání
- [9] Jaroslav Formánek. Možnosti zvyšování účinnosti tavení v indukčních kelímkových pecích. Plzeň, 2012. Bakalářská práce
- [10] Josef Kršňák. Tavení kovů v indukčních kelímkových pecích. Plzeň, 2015. Bakalářská práce
- [11] ELUC. Plazmová technologie [online]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1419>
- [12] Elektrický ohřev odporový, dielektrický, obloukový, elektronový a laserový (6) - Časopis Elektro-Odborné časopisy. Odborné časopisy [online]. Copyright © 2014 [cit. 03.06.2020]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricky-ohrev-odporovy-dielektricky-obloukovy-elektronovy-a-laserovy-6--13695>
- [13] Tomáš Bezděk. Přednosti elektrotepelných technologií. Plzeň, 2016. Diplomová práce
- [14] Jaký je rozdíl mezi přenosem tepla vedením, prouděním a sáláním? - Portál pro strojní konstruktéry. Portál pro strojní konstruktéry [online]. Copyright © 2013 [cit. 03.06.2020]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezii-prenosem-tepla-vedenim-proudenim-a-salanim>