

**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: 2014/2015

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef KRŠŇÁK**  
Osobní číslo: **E12B0226P**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Tavení kovů v indukčních kelímkových pecích**  
Zadávající 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. Proveďte hodnocení indukčního tavení kriteriem 3E.
5. Stanovte závěry pro praxi.

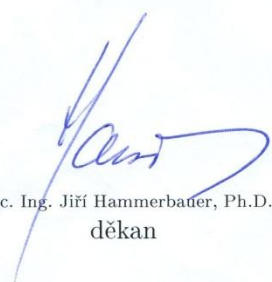


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

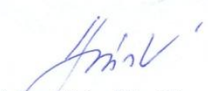
**1. Literaturu určí vedoucí práce při předběžném kontaktu**

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

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

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

**Abstrakt**

Předložená práce je zaměřena na proces tavení kovů v indukčních kelímkových pecích. Zabývá se zvyšováním účinnosti tavení v indukčních pecích a také je zde popsána teorie indukčního ohřevu. Součástí práce je uvedení příkladů, kde a jakým způsobem jsou indukční tavicí pece využívány a na závěr práce jsou hodnoceny kritériem 3E.

**Klíčová slova**

Indukční kelímkové pece, indukční ohřev, teorie indukčního ohřevu, žíhání, kalení, tavení, indukční kanálkové pece, vodivý kelímek, nevodivý kelímek, 3E.

**Abstract**

The paper is focused on the process of metal melting in induction crucible furnaces. It deals with improving the efficiency of melting in induction furnaces, and also is described herein theory of induction heating. The paper work includes giving examples of where and how the induction melting furnace used and on the work are evaluated 3E criterion.

**Key words**

Induction crucible furnace, induction heating, the theory of induction heating, annealing, hardening, melting, induction channel furnaces, crucible conductive, non-conductive crucible, 3E.

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 4.6.2015

Josef Kršňák

## **Poděkování**

Velmi rád bych touto cestou poděkoval panu Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné a odborné rady, trpělivost a vstřícný přístup při zpracování mé práce.

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

## Obsah

Seznam zkratk a symbolů .....	10
1 Úvod .....	12
2 Jak vzniká teplo elektromagnetickou indukcí .....	13
2.1 Teorie indukčního ohřevu [5] .....	13
2.2 Obecné elektromagnetické vlnění [2] .....	14
2.3 Hloubka vniku naindukovaných proudů [8] .....	15
3 Aplikační oblasti indukčního ohřevu podle teploty [9] .....	17
3.1 Žihání .....	17
3.2 Kalení .....	17
3.3 Tavení .....	18
4 Indukční kelímkové pece tavicí [1] .....	19
4.1 Indukční kanálkové pece [1] .....	20
4.1.1 S uzavřeným železným jádrem .....	20
4.1.2 Se zakrytým kanálkem .....	21
4.2 Indukční tavicí pec s vodivým kelímkem [1] .....	22
4.3 Stínění indukční kelímkové pece [1, 7] .....	23
4.3.1 Stínění dobře vodivým pláštěm .....	23
4.3.2 Stínění svazky transformátorových plechů [6, 7] .....	24
4.4 Požadavky na efektivní tavení kovů [6, 4] .....	25
4.4.1 Kritérium pro tavení šrotu .....	26
4.4.2 Vzduť vsázky [8] .....	27
4.4.3 Obecný výpočet elektrické účinnosti [1] .....	28
4.4.4 Elektromagnetická průřažnost vsázky [1] .....	30
4.5 Zdroje pro napájení indukčních zařízení .....	30
4.5.1 Napájení síťovým kmitočtem [1] .....	30
4.5.2 Rotační měnič kmitočtu proudu [1] .....	32



4.5.3	Tyristorový měnič [1].....	34
4.5.4	Elektronkové generátory [4].....	35
4.6	Dříve používané měniče kmitočtu.....	36
4.6.1	Iontové měniče kmitočtu [1] .....	36
4.6.2	Magnetické násobiče kmitočtu [1] .....	37
4.7	Pásové vedení [1] .....	38
4.8	Kondenzátorová baterie.....	39
5	Kritérium 3E [7, 10] .....	40
5.1	Ekonomika.....	40
5.2	Energetika [11, 15] .....	41
5.3	Ekologie.....	41
6	Závěr.....	42
	Seznam použité literatury a internetových zdrojů .....	44

## Seznam zkratk a symbolů

### Seznam zkratk

$c$	měrná tepelná kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
$C_O$	paralelní kapacita [F]
$d_1$	průměr induktoru [m]
$d_3$	průměr pláště [m]
$E$	intenzita elektrického pole [ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
$f$	kmitočet [Hz]
$G$	hmotnost vsázky [kg]
$H$	intenzita magnetického pole [ $\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$ ]
$h_t$	vzdutí vsázky teoretické [m]
$J$	proudová hustota [ $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$k$	konstanta [-]
$L_1$	vlastní indukčnost cívky [H]
$L_1$	indukčnost [H]
$L_2$	indukčnost vsázky [H]
$P$	tepelný výkon [W]
$P_1$	příkon na jednotku plochy vsázky [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]
$P_2$	naindukované teplo [W]
$P_3$	ztráty ve stínění [W]
$P'_C$	ztráty v kondenzátoru a v přívodech [W]
$P_g$	hodnota příkonu pece [W]
$Q$	energie [J]
$Q_1$	jakost obvodu [-]

$Q_2$	jakost obvodu [-]
$R_1$	odpor cívky [ $\Omega$ ]
$R_1$	sériový odpor [ $\Omega$ ]
$R_2$	rezistor [ $\Omega$ ]
$R'_1$	odpor [ $\Omega$ ]
$r_2$	průměr vsázky [m]
$t$	čas [s]
$T$	termodynamická teplota [K]
$Z$	impedance [ $\Omega$ ]

### Seznam symbolů

$\Sigma$	součet [-]
$\gamma$	konduktivita [ $S.m^{-1}$ ]
$\varepsilon$	součinitel [-]
$\varepsilon_0$	permitivita vakua [ $F.m^{-1}$ ]
$\mu$	permeabilita [ $H.m^{-1}$ ]
$\mu_0$	permeabilita vakua [ $H.m^{-1}$ ]
$\mu_r$	relativní permeabilita vsázky [ $H.m^{-1}$ ]
$\rho$	měrná hustota [ $Kg.m^{-3}$ ]
$\partial$	parciální derivace [-]
$\eta_c$	účinnost [-]
$\psi$	součinitel [-]

### Použité matematické operátory

div	divergence
rot	rotace

# 1 Úvod

Tématem této bakalářské práce je „*Tavení kovů v indukčních kelímkových pecích*“. Toto téma je rozděleno do několika hlavních kapitol.

První kapitola seznamuje s teorií elektromagnetické indukce a indukčního ohřevu. Další kapitoly postupně seznamují čtenáře s aplikační oblastí indukčního ohřevu. Představíme si jednotlivé kelímkové pece, jejich vlastnosti a efektivnost v oblasti tavení kovů z hlediska volby zdroje, kmitočtu, pásového vedení a kondenzátorové baterie.

Posledním tématem bakalářské práce jsou kritéria 3E, jejichž pomocí jsou hodnoceny jednotlivé druhy indukčních ohřevů z hlediska ekonomického, energetického a zátěže zdravotní a ekologické.

## 2 Jak vzniká teplo elektromagnetickou indukcí

Indukované teplo vznikne vždy, když elektromagnetické vlnění dopadá na elektricky vodivý materiál. Část, která projde do materiálu má za následek vytvoření naindukovaného proudu a vznik tepla.

Jednou z výhod indukčního ohřevu je to, že ohřívání vsázky se neprovádí kontaktním přenosem, ale teplo vzniká uvnitř materiálu, ve vsázce, a je dosaženo rychlého zahřátí.

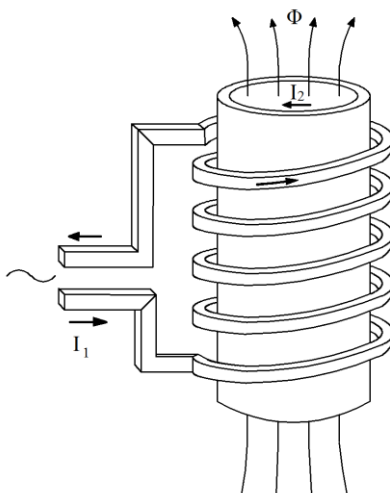
### 2.1 Teorie indukčního ohřevu [5]

Protéká-li vodičem střídavý proud, vzniká kolem vodiče elektromagnetické pole. V blízkosti tohoto magnetického pole dochází k zahřívání kovů. To je způsobeno tím, že se v předmětu indukuje časovou změnou magnetického pole napětí, které vyvolává vířivé proudy. Tyto proudy se ve vsázce uzavírají a jsou příčinou vzniku tepla podle Jouleova zákona:

$$P = R * I_{ef}^2 [W] \quad (1)$$

V podstatě se jedná o transformátor s jedním sekundárním závitem spojeným nakrátko jehož primární vinutí je tvořeno induktorem a sekundární vinutí je vsázka.

Na Obrázku 1 je zobrazen princip indukčního ohřevu.



Obrázek 1: Princip indukčního ohřevu [5]

Největším problémem indukčního ohřevu je vytvoření dostatečně silného proměnného magnetického pole a umístění vsázky tak, aby došlo k nejlepšímu zahřátí vsázky. Proto je nutné vsázku umístit co nejbližší k induktoru. Aby bylo dosaženo dostatečně silného pole, musí induktorem protékat vysoký proud (1000-10000A), který způsobí roztavení vsázky.

Z tohoto důvodu se používají různé druhy induktorů. Induktor je zpravidla vyroben z dutého měděného vodiče, kterým protéká chladicí kapalina.

Volbou kmitočtu napájecího proudu ovlivňujeme rozložení naindukovaného tepla ve vsázce. Obvykle se používá kmitočet o rozsahu 50Hz až 1MHz.

## 2.2 Obecné elektromagnetické vlnění [2]

Za pomoci Maxwellových rovnic lze odvodit rovnice pro obecné elektromagnetické vlnění v elektricky nevodivém a vodivém prostředí.

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru jsou definovány:

$$\text{I.} \quad \text{rot } H = \gamma E + \varepsilon_0 \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad [\text{A/cm, V/cm}], \quad (2)$$

$$\text{II.} \quad \text{rot } E = -\mu_0 \mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad [\text{V/cm, A/cm}], \quad (3)$$

$$\text{III.} \quad \text{div } \varepsilon_0 \varepsilon E = \sigma \quad [\text{V/cm, F/cm, C/cm}^3], \quad (4)$$

$$\text{IV.} \quad \text{div } \mu_0 \mu H = 0 \quad [\text{A/cm, H/cm}]. \quad (5)$$

Základní případy šíření elektromagnetického vlnění:

- Prvním případem šíření je šíření v prostředí elektricky nevodivém (izolant). Díky nulovým vnitřním zdrojům je potom  $\gamma = 0$  a  $\sigma = 0$ . To se projeví v rovnicích I a III.
- Další možnost může nastat v prostředí elektricky vodivém, kdy člen na pravé straně v rovnici I, označující hustotu posuvného proudu, je zanedbatelně malý oproti prvnímu členu, který označuje hustotu vodivého proudu, a tudíž jej můžeme zanedbat.

### 2.3 Hloubka vniku naindukovaných proudů [8]

Hloubka vniku naindukovaných proudů je relativní hloubka pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivého prostředí. Pronikající elektromagnetické vlnění se utlumuje a jeho energie se mění na energii tepelnou. Za pomoci změny kmitočtu lze pak změnit i rozložení tepla v materiálu.

Pro hloubku vniku elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky používáme následující vztah:

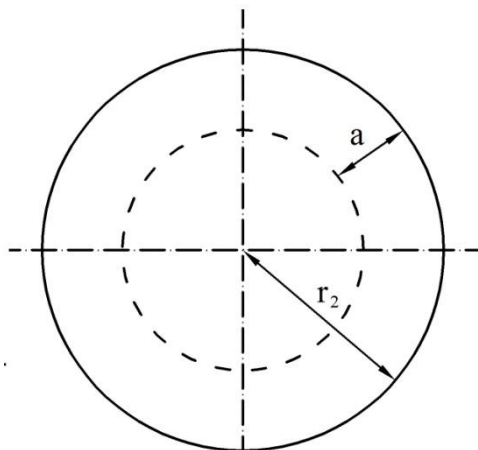
$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega * \mu * \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi f * \mu * \gamma}} \quad (6)$$

Ve vzorci uvedeném výše označuje „f“ kmitočet, „μ“ je permeabilita a „γ“ je konduktivita.

Například intenzita  $E_2$  na povrchu se ve vzdálenosti „a“ utlumuje, a je vyjádřena vztahem:

$$E_a = E_2 * 0,368. \quad (7)$$

Intenzity elektromagnetického pole se tedy ve vzdálenosti „a“ utlumují na 36,8 % hodnoty, která je na povrchu ohřívaného tělesa. Na Obrázku 2 můžeme vidět příklad vyobrazení hloubky vniku.



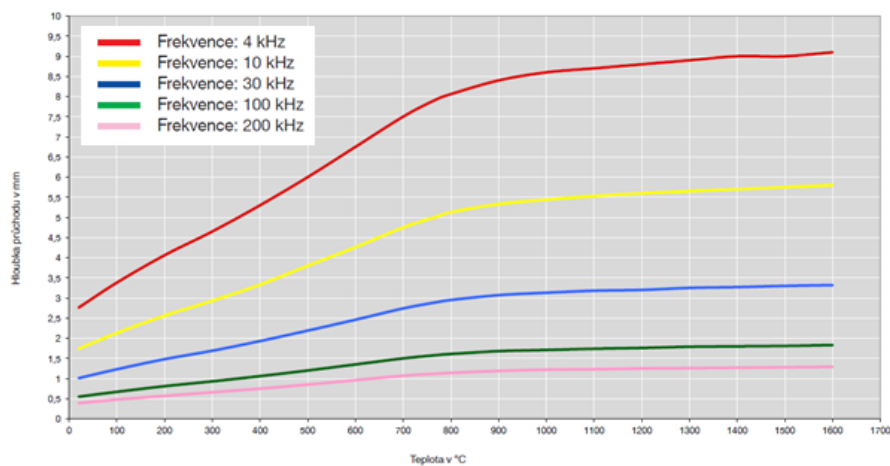
Obrázek 2: Vyobrazení hloubky vniku ( $r_2=2,5a$ ) [5]

Pro lepší přehlednost nám následující Tabulka č. 1 zobrazuje hodnoty hloubky vniku a to v závislosti na kmitočtu a druhu použitého materiálu.

Hodnoty hloubky vniku, uvedené ve zmiňované tabulce, jsou názorně zobrazeny na Obrázku 3.

**Tabulka 1: Závislost hloubky vniku na kmitočtu a materiálu [5]**

	<b>Měď</b>	<b>Měď</b>	<b>Ocel</b>	<b>Ocel</b>	<b>Ocel</b>	<b>Ocel</b>	<b>Grafit</b>	<b>Hliník</b>
<b>Teplota:</b>	<b>20°C</b>	<b>1100°C</b>	<b>20°C</b>	<b>600°C</b>	<b>800°C</b>	<b>1500°C</b>		<b>20°C</b>
50Hz	10	32						
500Hz	2,97		1,38		22,5			3,89
600Hz	2,91	9,4	3,78	7,75	22,5	26	65	
1000Hz	2,2	7	2,9	5,8	17,5	20	50	
1800Hz	1,68	5,44	2,18	4,31	13	15	37,6	-
2000Hz	1,59	5,14	2,06	4,12	12,3	14,4	35,6	-
3600Hz	1,19	3,86	1,55	3,1	9,22	10,65	26,7	-
4000Hz	1,13	3,65	1,46	2,93	8,73	10	25,3	1,38
10kHz	0,7	2,22	0,82	1,83	5,53	6,32	15,8	0,87
12kHz	0,65	2,1	0,84	1,68	5,03	5,88	14,5	-
500kHz	0,1	0,32	0,13	0,26	0,78	0,9	2,25	-
700kHz	0,08		0,037		0,6			0,104
2500kHz	0,043		0,02		0,32			0,055



**Obrázek 3: Graf znázornění závislosti hloubky vniku na kmitočtu a teplotě [5]**



### 3 Aplikační oblasti indukčního ohřevu podle teploty [9]

Aplikační oblasti indukčního ohřevu podle teploty rozdělujeme do kategorií žihání, kalení, tváření za tepla a tavení. Tyto jednotlivé oblasti jsou popsány níže.

#### 3.1 Žihání

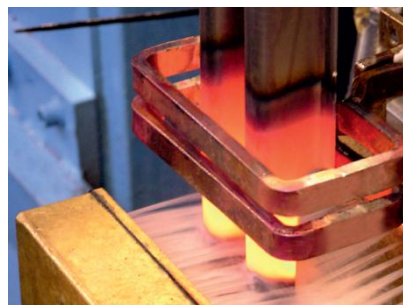
Žihání je tepelný proces, při kterém dochází ke změně vlastností kovů. Například ke snadnějšímu obrábění, rozměrové stabilitě, k lepším mechanickým a elektrickým vlastnostem. Tyto vlastnosti se odvíjejí podle materiálu a teploty, které je třeba dosáhnout. Teploty se pohybují u žihání na měkko u oceli mezi 600 °C až 700°C a u slitin mědi v rozmezí 300°C až 650°C. U normalizovaného žihání oceli je teplota srovnatelná s kalením a pohybuje se kolem 800°C až 920°C.

#### 3.2 Kalení

Kalení je nejčastějším procesem pro ocel a její přímé kalení. Teplota závisí na druhu oceli a pohybuje se mezi 800°C až 1220°C. Přeměna mikrostruktury na austenit probíhá okolo 730°C až 900°C, opět podle druhu oceli. Kalení probíhá tak, že se ocel na povrchu rovnoměrně prohřeje na danou teplotu, aby došlo k přeměně mikrostruktury na austenit. Dalším krokem je ochlazení. To musí být dostatečně rychlé, aby nedošlo ke zpětné přeměně do měkkého stavu.



Obrázek 4: Kalení ozubeného kola [12]



Obrázek 5: Indukční kalení [5]

Tváření za tepla

Tváření za tepla vyžaduje u oceli ohřátí na teplotu 1200°C.



Obrázek 6: Tváření za tepla [12]

### 3.3 Tavení

U oceli k tavení dochází zpravidla při teplotě 1400°C až 1500°C. [5, 7]



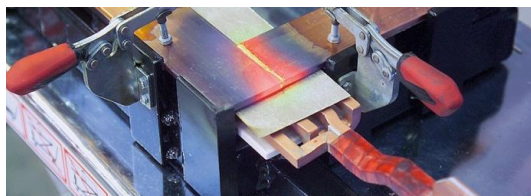
Obrázek 7: Tavení v indukční kelímkové peci [12]

**Mezi další oblasti aplikace indukčního ohřevu patří:**

- Pájení – teplota až 1100°C (u oceli),
- Prohřívání – teplota mezi 1150°C až 1250°C,
- Svařování – teplota okolo 1400°C. [5, 7]



Obrázek 8: Indukční svařování [12]

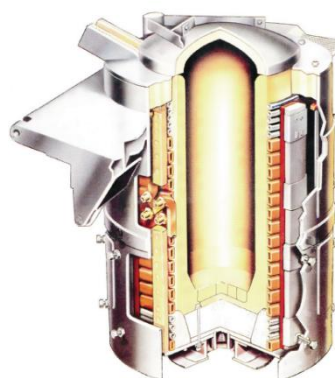
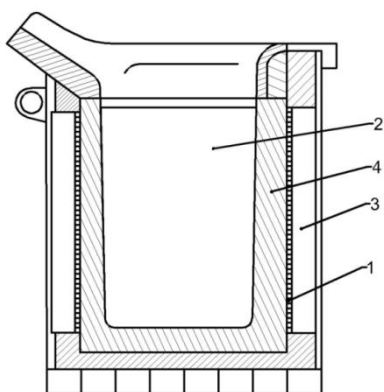


Obrázek 9: Indukční pájení [14]

## 4 Indukční kelímkové pece tavicí [1]

Indukční pece tohoto typu jsou považovány v aplikaci indukčního ohřevu za nejdůležitější, a to zejména v odvětví slévárenském, kde se využívají k tavení různých druhů kovů. Hlavní zastoupení mají v oblasti hutnictví. Zde jsou využívány k výrobě nejjakostnějších druhů ocelí a speciálních slitin. Důležitou předností tohoto druhu tavení je aktivní víření vsázky v kelímku, které nastává vždy, pokud prochází proud induktorem. Díky tomu je slitina vždy homogenní. Tohoto výsledku nedocílíme v žádném jiném druhu tavicích pecí.

Schéma indukční kelímkové pece je zobrazeno na Obrázku 10.



Obrázek 10: Průřez kelímkové pece s trafoplechy [1]

Obrázek 11: Průřez indukční pece [11]

Obrázek 10 znázorňuje již zmiňovanou kelímkovou pec. Číslo 1 označuje cívku, která je většinou navinuta na elektricky nevodivý kelímek. Ten je označen číslicí 4. Do tohoto nevodivého kelímku je vkládána vsázka. Ta je zobrazena číslem 2. Pokud bude cívkou protékat střídavý proud, vznikne tak magnetické pole, které se uzavírá vně cívky. Proto je velmi důležité odstínit toto pole od konstrukce pece a to z důvodu, aby nedošlo k zahřívání konstrukce pece z kovového materiálu.

Tento jev vyvolává nežádoucí ztráty. Ty pak mají za následek snížení celkové účinnosti. U tohoto procesu existují různé druhy odstínění pece. Jako první varianta se nabízí stínění pomocí válcového, dobře elektricky vodivého pláště sousedícího s cívkou.

Druhou variantou je použití svazků z transformátorových plechů, na Obrázku 10 uvedeno pod číslem 3. Důvodem použití různých druhů stínění je například pořizovací cena, rozměry stínění a jeho hmotnost.

Hlavním problémem při tavení v kelímkových pecích je to, že jsme doposud uvažovali pec s plně zaplněným kelímkem. Toho lze dosáhnout pouze při prohřívání vsázky. U běžných tavicích pecí uvažujeme, že kelímek je plněn stejnorodým šrotem. Tímto šrotem jsou kusy oceli o různých rozměrech, a tudíž nedojde k vyplnění celého objemu kelímku.

Z tohoto důvodu musí být pec schopna roztavit i tento šrot s dobrou účinností. Proto musí být dodržen určitý postup a vztah mezi velikostí rozměrů šrotu a používaným kmitočtem.

### **Technické parametry jednotlivých částí indukční pece:**

#### **Cívka (1)**

Cívka je vyrobena z měděné trubky obdélníkového průřezu. Pro malé pece o hmotnosti vsázky do cca 10kg se používá tloušťka stěny vodiče cívky 1,5 až 2mm a napájeny jsou proudem o kmitočtu 4000 až 10000Hz. U větších pecí s hmotností vsázky 2 až 3 tuny je tloušťka stěny vodiče cca 4mm a kmitočet zdroje obvykle okolo 600 až 1000Hz. Uvedené hodnoty kmitočtů jsou pro optimální řešení s minimálními ztrátami a tloušťka stěny vychází ze vztahu  $(\frac{\pi}{2} a)$ .

#### **Kelímek (4)**

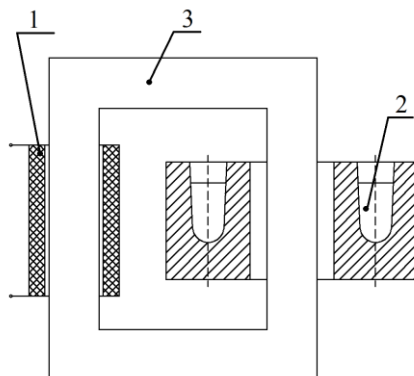
Uvnitř cívky se nachází keramický kelímek, který je vyroben pēchováním, většinou přímo v peci. Vytvoří se za pomoci speciální formy z tenkého plechu. Samotný kelímek se zhotovuje nejčastěji ze suracitu (96% kysličník křemičitý  $\text{SiO}_2$  o různé hrubosti a kyselá vyzdívka je tvořena kysličníkem hlinitým  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Toto pēchování je důležitá práce, na které závisí životnost kelímku. U běžných ocelí je to zhruba 60 taveb. U vysoce legovaných ocelí, kde je vyšší teplota, je životnost kelímku nižší.

## **4.1 Indukční kanálkové pece [1]**

### **4.1.1 S uzavřeným železným jádrem**

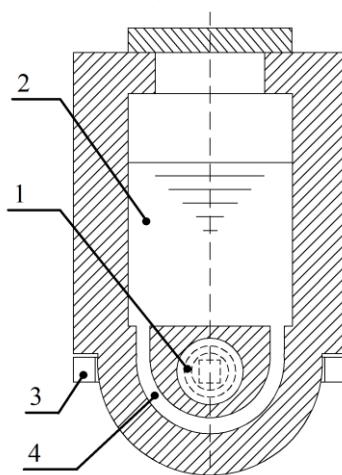
Tento druh pece je schematicky uveden na Obrázku 12. Pec si lze představit jako transformátor s uzavřeným jádrem (3) ze železných transformátorových plechů. Obvod je napájen střídavým proudem, který je připojen na primární vinutí (1). Na straně sekundární (2) je keramický žlábek s roztaveným kovem.

Tato konstrukce tavicí pece s odkrytým kanálkem se v provozu neosvědčila a byla nahrazena tavicími pecemi jiné konstrukce.



Obrázek 12: Indukční kanálková pec s uzavřeným železným jádrem[1]

#### 4.1.2 Se zakrytým kanálkem

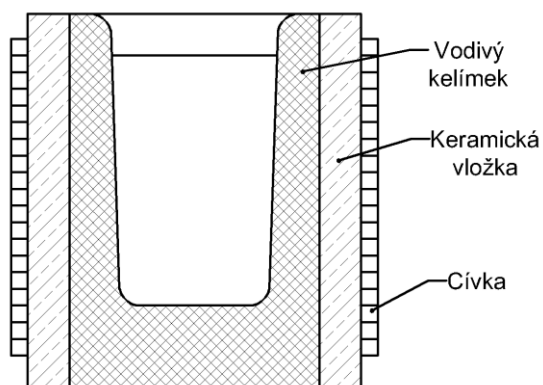


Obrázek 13: Indukční kelímková pec se zakrytým kanálkem [1]

Na Obrázku 13 je kanálková pec se zakrytým kanálkem. Tato konstrukce pece má válcovou nístěj (2) ve které je roztavená vsázka. Na dně se nachází kanálek (4) a primární cívka (1), která je připojena ke zdroji a je umístěna na železném jádře (3). Tento druh tavicí pece se používá zpravidla pro tavení barevných kovů a výrobu slitin z barevných kovů.

## 4.2 Indukční tavicí pec s vodivým kelímkem [1]

Indukční tavicí pec s vodivým kelímkem vykazuje lepší účinnost pro tavení dobře elektricky vodivých materiálů. Mezi tyto materiály zahrnujeme například měď, hliník a jejich slitiny. Schéma pece je zobrazeno na Obrázku 14.



Obrázek 14: Průřez indukční pece s vodivým kelímkem [1]

Na tomto schématu můžeme vidět, že mezi kelímkem a cívkou je umístěna keramická vrstva. Tato vrstva má za účel omezit ztrátový tepelný tok z ohřátého kelímku do cívky.

U tohoto druhu pece se po zavedení proudu do cívky vytvoří elektromagnetické vlnění, které dopadá na vodivý kelímkem, kde se přemění na teplo a to potom předá vsázce, která je uvnitř kelímku.

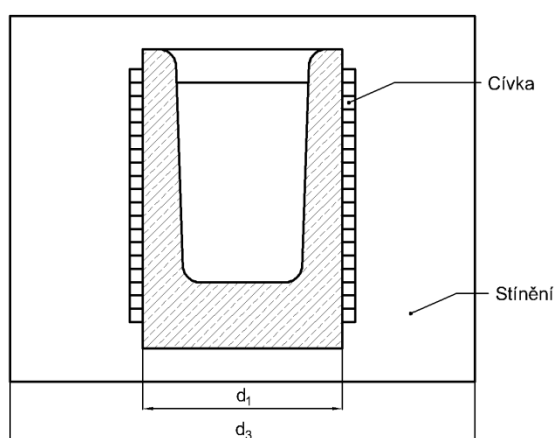
Jako vodivý materiál pro kelímkem se používá například také ocelolitina pro nižší teploty (pro hliník a jeho slitiny). Pro vyšší teploty se používají grafitošamotové kelímky. Při použití více grafitu je vodivost větší. Vodivost volíme tak, aby se elektromagnetické vlnění pohltilo ve stěně kelímku. O tom rozhoduje poměr tloušťky stěny kelímku a hloubky vniku.

Indukční pec s vodivým kelímkem se používá zpravidla v mincovnictví, kde se používají slitiny hliníku, mědi, niklu, zinku, stříbra a zlata pro výrobu mincí.

## 4.3 Stínění indukční kelímkové pece [1, 7]

### 4.3.1 Stínění dobře vodivým pláštěm

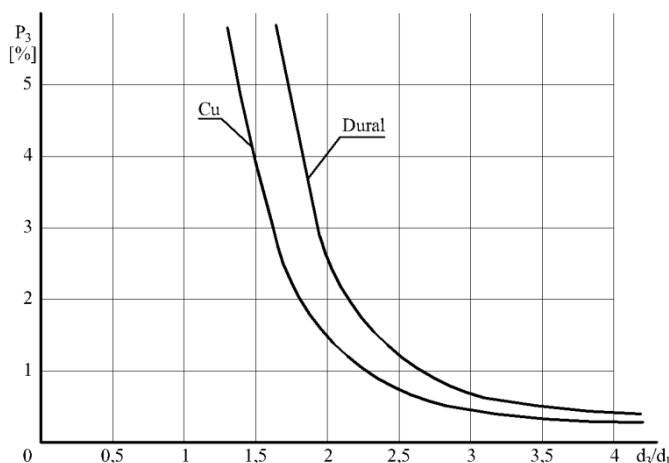
Prvním případem stínění pece je stínění pomocí elektricky dobře vodivého pláště, Obrázek 15. Elektromagnetická indukce vyvolá stínící pole, které má opačný směr než pole indukční cívky což má za následek odečtení těchto polí. Tento jev má ale také za následek určité snížení intenzity magnetického pole uvnitř kelímku a tudíž dojde ke snížení celkové účinnosti ohřevu. Tento druh stínění se používá z důvodu nižší ceny a hmotnosti než například stínění pomocí transformátorových plechů. Abychom zlepšili účinnost tohoto stínění je zde několik metod jak toho dosáhnout.



Obrázek 15: Průřez indukční pece se stínícím vodivým pláštěm [1]

První je materiál, který je použit na stínící plášť. Ten musí být zhotoven z materiálu s vysokou elektrickou vodivostí. Takovýmto materiálem je například měď či dural.

Dalším způsobem jak ovlivnit účinnost vodivého pláště je zvolit optimální rozměry a to poměr průměrů cívky a stínícího pláště. Průběh ztrát ve stínění v závislosti na poměru průměrů stínícího pláště a cívky pece je zobrazen graficky na Obrázku 16.



Obrázek 16: Graf závislosti ztrát a hodnot poměrů průměrů stínícího pláště a cívky [1]

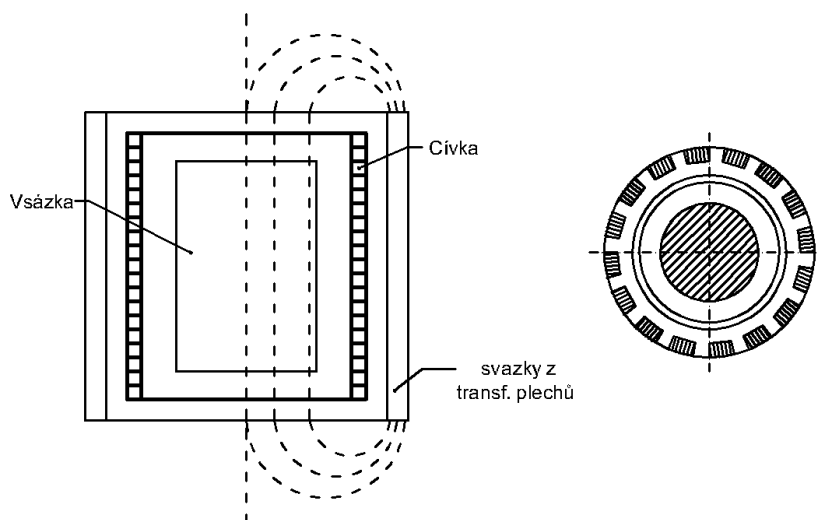
Svislá osa zobrazuje ztráty v procentech z příkonu pece a na vodorovné ose jsou uvedeny hodnoty poměrů průměrů stínícího pláště a cívky ( $d_3/d_1$ ). Z grafu je patrné, že při větším poměru průměrů se ztráty způsobené tímto druhem stínění snižují. Tohoto efektu však nelze využít maximálně z důvodu nežádoucího zvětšení celkových rozměrů pece. Proto se volí optimální řešení a to, že průměr pláště ( $d_3$ ) volíme dvakrát větší než vnitřní průměr induktoru ( $d_1$ ). Díky tomu dosáhneme u měděného stínění ztráty cca 1,51% z příkonu indukční pece a u stínění z duralu cca 2,5%.

#### 4.3.2 Stínění svazky transformátorových plechů [6, 7]

Další možností jak odstínit indukční pec je použitím svazků transformátorových plechů vně cívky. Umístění je naznačeno na Obrázku 17. Svazky jsou tvořeny z několika transformátorových plechů navzájem izolovaných. Materiál, který se používá na transformátorové plechy je slitina železa a křemíku. Díky tomu mají tyto plechy vysokou permeabilitu a vykazují velmi malou elektrickou vodivost.

Pokud tento způsob stínění aplikujeme na indukční pec, pak dosáhneme toho, že rozptylový magnetický tok se bude uzavírat přes svazky transformátorových plechů, což je cesta s nejvyšší magnetickou vodivostí ( $\mu_r$ ), Obrázek 17. Tímto dosáhneme zvýšení indukčního toku, což má za následek zvýšení intenzity magnetického pole a rovněž zvýšení výkonu, který se naindukuje do vsázky a tím i zvýšení účinnosti tavení.



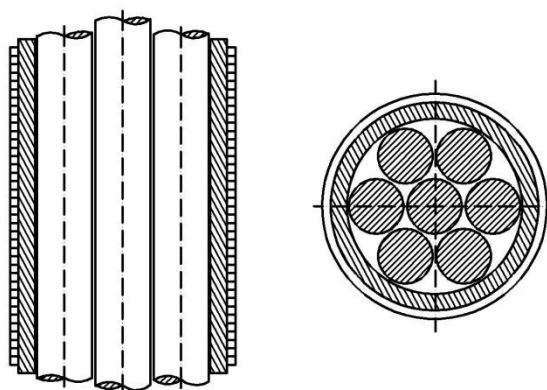


Obrázek 17: Indukční tavicí pec se stínícími trafo plechy [1]

Tato aplikace stínících transformátorových plechů je vhodnější, co se týká elektrické účinnosti a snížení Joulových ztrát. Ovšem toto provedení stínění má nevýhodu oproti stínění vodivým pláštěm a to ve hmotnosti a zvýšené pořizovací ceně. Z tohoto důvodu se stínění za pomoci transformátorových plechů používá především u tavicích pecí s větším objemem vsázky.

#### 4.4 Požadavky na efektivní tavení kovů [6, 4]

Při výpočtu indukční kelímkové pece nemůžeme uvažovat zcela zaplněný kelímek. Tento problém nelze teoreticky vyřešit, a proto se předpokládá, že kelímek je vyplněn soustavou tyčí ze stejného materiálu souose umístěnými s induktorem pece, Obrázek 18.



Obrázek 18: Průřez pece se zaplněným kelímkem [1]

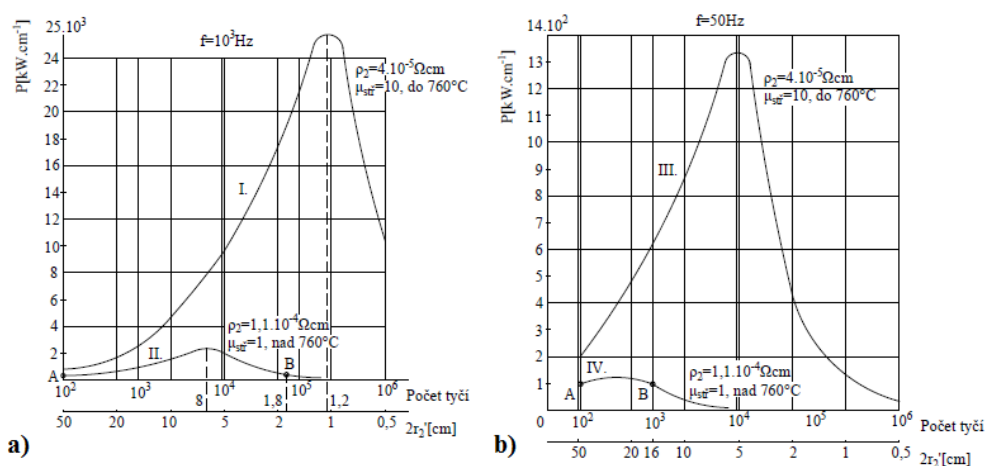
U běžné konstrukční oceli do teploty 768°C (Curierův bod – ztráta feromagnetismu) je hloubka vniku při kmitočtu 50 Hz řádově v jednotkách mm. Nad Curierův bod je rezistivita přibližně 7krát větší a hloubka vniku je zhruba 70mm.

Dále musíme počítat s vlastnostmi roztaveného kovu. U oceli nastávají tři různé stavy. První nastává u vsázky při teplotě okolo 20°C až do 760°C, kdy vsázka je tuhá, v kusech a magnetická. Permeabilita závisí na taveném materiálu a intenzitě magnetického pole. Druhý teplotní stav nastává okolo 760°C až do 1400°C. Vsázka je stále tuhá, v kusech, ale už není magnetická a relativní permeabilita se rovná 1. Třetí stav nastává od teploty 1400°C, kdy se začíná ocel tavit až do 1650°C, kdy je zcela tekutá, nemagnetická a zaplňuje celou dutinu kelímku.

#### 4.4.1 Kritérium pro tavení šrotu

Při návrhu induktoru se vychází z již roztavené vsázky, která vyplňuje dutinu kelímku. Na Obrázku 19 a) je patrné, že i když je vsázka tuhá, magnetická a s různou zrnitostí, je schopna efektivně odebírat elektromagnetickou energii z cívky. Tím se rychleji ohřívá, i když induktor nebyl určen pro tento stav. Když dosáhneme bodu magnetické přeměny u oceli je to teplota kolem 760°C, sníží se absorbovaná energie maximálně asi 10 krát.

Pro efektivní zahřátí jednotlivých kusů šrotu v kelímku musí být rozměry jednotlivých kusů větší než 1,8 – 2 cm (při kmitočtu 1000 Hz). Díky tomu, že vsázka rychle absorbuje energii i nad bodem magnetické přeměny (v nemagnetickém stavu), dochází ke stoupání teploty a roztavení oceli.



Obrázek 19: Diagramy závislosti absorbované elektromagnetické energie ve vsázce [1]

Na Obrázku 19 b) je diagram udávající závislost absorbované energie na průměru tyčí, při napájení proudem s kmitočtem 50 Hz. Výsledky jsou obdobné jako u předcházejícího diagramu, kdy při magnetické přeměně absorbovaná energie je 10 krát menší. Z křivky III. je patrné, že optimální průměr vsázky je v tomto případě  $2r_2 \doteq 5 \text{ cm}$ .

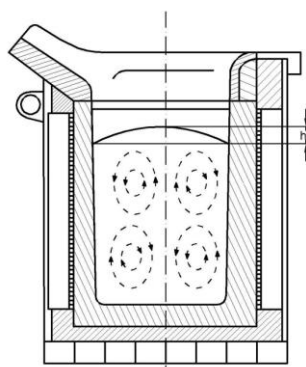
Srovnáním obou diagramů dojdeme k závěru, že vsázka absorbuje při kmitočtu 1000 Hz více energie než při kmitočtu 50 Hz (při stejné indukci H) a to jak ve stavu magnetickém i nemagnetickém.

#### 4.4.2 Vzduť vsázky [8]

V důsledku indukovaní vířivých proudů a rozložení elektromagnetického pole ve vsázce vznikají elektrodynamické síly. Díky tomu vzniká teplo a pohyb (cirkulace) vsázky. Tento pohyb je výhodnou vlastností kelímkových i kanálkových pecí. Tímto pohybem získáváme dokonale homogenní slitiny kovů a ocelí. Toho nelze docílit v žádné jiné tavicí peci. Vzduť a rychlost cirkulace vsázky lze ovlivnit několika parametry a to například kmitočtem, rozměrem dané pece, velikostí dodané energie do vsázky a umístěním induktoru vzhledem k vsázce. Optimální rychlost má vliv na homogenitu taveniny a na velikosti vzduť vsázky. Výpočet vzduť vsázky  $h_t$ :

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

kde  $P_1$  je příkon na jednotku plochy vsázky,  $k$  - konstanta,  $\rho$  - měrná hustota,  $\gamma$  - konduktivita a  $\mu_r$  je relativní permeabilita vsázky.



Obrázek 20: Vzduť vsázky [1]

Pozor na situace, kdy je víření vsázky tak intenzivní, že bude docházet k příliš velkému vzduť taveniny. To vede k narušení strusky a následnému kontaktu taveniny se vzduchem a tím k jejímu nežádoucímu okysličování.

#### 4.4.3 Obecný výpočet elektrické účinnosti [1]

Při obecném výpočtu elektrické účinnosti počítáme s hodnotou naindukovaného tepla ( $P_2$ ), kterou podělíme příkonem pece ( $P_g$ ). Pro přesnější výpočet se provede součet všech ztrát v obvodu:

$$P = P_1 + P_2 + P'_C [W; W; W; W] \quad (9)$$

$P_1$  – ztráty v cívce

$P_2$  – výkon ve vsázce

$P'_C$  – ztráty v kondenzátoru a v přívodech.

Další jsou ztráty ve stínění ( $P_3$ ). Tyto ztráty se mohou v některých případech zanedbat z důvodu malé hodnoty, okolo 1% z příkonu.

Součet všech ztrát:

$$\Sigma P = P + P_3 [W; W; W] \quad (10)$$

Tento součet všech ztrát by se měl shodovat s hodnotou příkonu pece ( $P_g$ ).

Výslednou elektrickou účinnost indukční pece, do které zahrneme i ztráty v kondenzátorové baterii, určíme ze vztahu:

$$\eta_V = \frac{P_2}{\Sigma P} [-; W; W] \quad (11)$$

Účinnost induktoru:

$$\eta_C = \frac{P_2}{P_1 + P_2} [-; W; W; W]. \quad (12)$$

Číselný výpočet, například pro indukční kelímkovou pec s hmotností vsázky  $G=900\text{kg}$ , napájecím generátorem o výkonu  $P_g=550\text{kW}$ . Celková účinnost pro tento typ pece s vodivým pláštěm vychází  $\eta_v=67\%$ , pro pec bez stínění  $\eta_v=71\%$  a pro stínění s transformátorových plechů vychází účinnost  $\eta_v=71,6\%$ . (Ale bez stínění nelze pec provozovat!)

Závislost účinnosti na poměru  $Q_1$  a  $Q_2$  vyjádříme pomocí následujícího odvození:

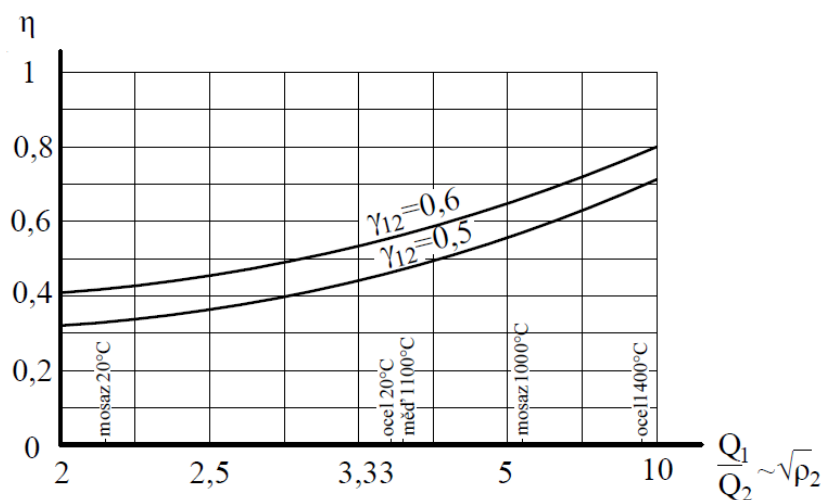
$$\begin{aligned} \eta_c &= \frac{R'_I}{R_1 + R'_I} = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R'_I}} = \frac{1}{1 + \frac{R_1 * L_2}{\Psi_{12}^2 * L_1 * R_2}} = \\ &= \frac{1}{1 + \frac{1}{\Psi_{12}^2} * \frac{Q_2}{Q_1}} = \frac{\Psi_{12}^2}{\Psi_{12}^2 + \frac{Q_2}{Q_1}} = \frac{\Psi_{12}^2 * \frac{Q_1}{Q_2}}{\Psi_{12}^2 * \frac{Q_1}{Q_2} + 1}, \end{aligned} \quad (13)$$

u pecí na tavení oceli bývá  $\Psi_{12}$  v rozsahu 0,5 až 0,6;  $Q_1$  v rozsahu 60 až 100 a  $Q_2$  v rozsahu 10 až 30.

Výpočet poměru  $Q_1/Q_2$  vychází z následujícího odvození:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\omega L_1 * R_2}{R_1 * \omega L_2} = k_1 R_2 \quad (14)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = k_1 * \frac{\rho_2 \pi d_v}{a_2 l_2} = k_2 \rho_2 * \sqrt{[\omega \gamma_2 \mu_0 \mu_r]} = k_3 * \sqrt{\rho_2} \quad (15)$$



Obrázek 21: Závislost účinnosti na  $Q_1/Q_2$ [1]

Pro určitou indukční pec hodnoty  $R_1$ ,  $\omega L_1$  a  $\omega L_2$  jsou konstanty. Poměr  $Q_1/Q_2$  je úměrný odporu  $R_2$  vsázky.

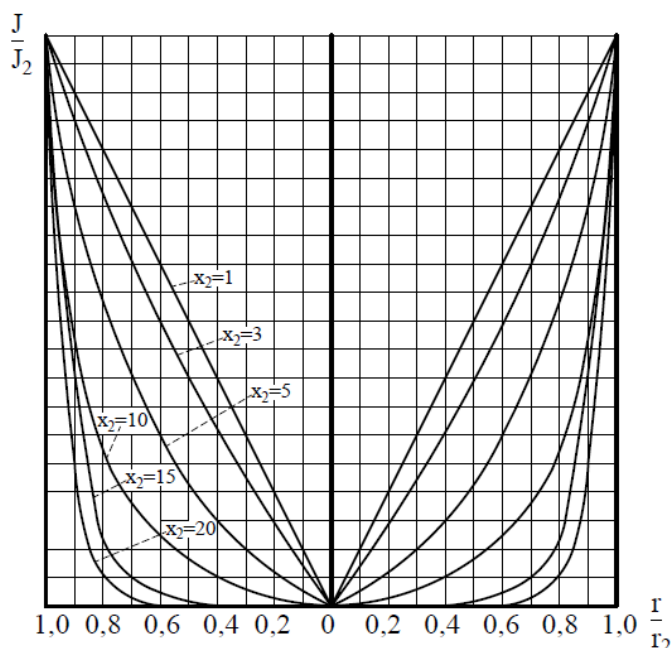
Výsledný poměr  $Q_1/Q_2$  je úměrný odmocnině měrného odporu  $\rho_2$  vsázky. Na následném Obrázku 21, je zobrazen diagram, na kterém vidíme, že materiál s velkým měrným odporem  $\rho_2$ , jehož jakost  $Q_2$  je malá, se indukčně zahřívá s vyšší účinností.

#### 4.4.4 Elektromagnetická průzařnost vsázky[1]

U tavicích pecí je zpravidla hloubka vniku  $a_2 \ll r_2$ . Parametr  $x_2$  vypočítáme ze vztahu:

$$x_2 = \left( \frac{r}{a_2} * \sqrt{2} \right). \quad (16)$$

Na Obrázku 22 je zakreslen průběh hustoty proudu  $J/J_2$  v závislosti na poloměru  $r/r_2$ . Maximální hodnota hustoty proudu na povrchu vsázky se snižuje se zmenšujícím se poloměrem  $r$ . Pokud parametr  $x_2$  bude mít malou hodnotu, elektromagnetická vlnění působí proti sobě a zeslabují výsledný naindukovaný proud.



Obrázek 22: Průběh absolutní hodnoty proudu [1]

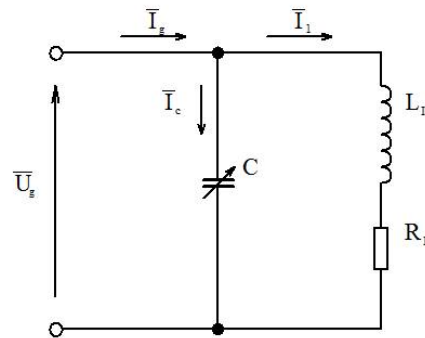
### 4.5 Zdroje pro napájení indukčních zařízení

#### 4.5.1 Napájení síťovým kmitočtem [1]

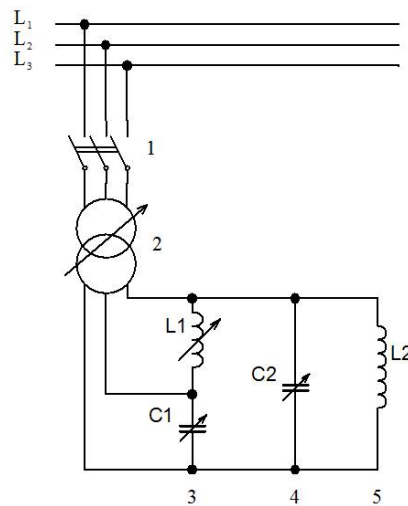
V některých případech se indukční tavicí pec napájí proudem o kmitočtu 50Hz. Většinou se tento způsob napájení používá pro indukční ohřívačky, u kterých se prohřívají válcové kusy oceli v průměrech od 16 až 50cm a pro pece udržovací.

Na Obrázku 23 je naznačeno jednofázové zapojení indukční pece. Pokud zapojíme tento obvod do trojfázové sítě, dojde k jejímu nesymetrickému zatížení. Proto se takové zařízení

připojuje za pomoci symetrizačního obvodu, který převede jednofázovou zátěž na trojfázovou soustavu napájení, které je zobrazeno na Obrázku 24.



Obrázek 23: Schéma jednofázového obvodu indukční pece [7]

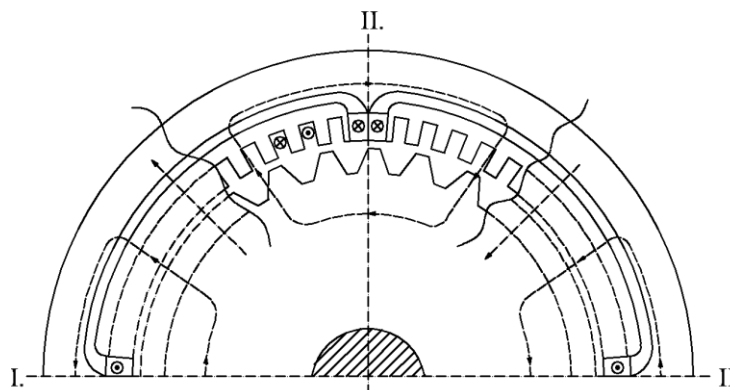


Obrázek 24: Schéma trojfázového obvodu indukční pece [7]

- 1 – Stykač
- 2 – Autotransformátor
- 3 – Symetrizační obvod
- 4 – Kondenzátorová baterie
- 5 – Zátěž (induktor)

#### 4.5.2 Rotační měnič kmitočtu proudu [1]

Rotační měniče proudu pro zvýšení kmitočtu se pohybují v rozmezí od 500Hz až do 10 000Hz, zpravidla se používají pro indukční pece tavicí a u zařízení pro prohřívání. Průřez stroje je schematicky vyobrazen na Obrázku 25.



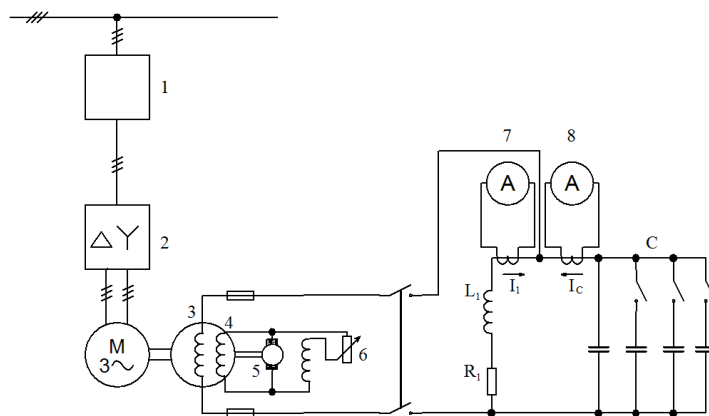
Obrázek 25: Průřez rotačního měniče proudu [1]

U těchto strojů se na statoru používají rozdílné druhy drážek. Menší drážky slouží pro vinutí pracovní, v němž vzniká proud o zvýšeném kmitočtu. Pro vinutí se používají lankové vodiče z navzájem izolovaných drátků pro snížení vlivu skin efektu. Ve větších drážkách statoru je uloženo budící vinutí, které se napájí stejnosměrným proudem.

Na Obrázku 25 je budící vinutí čtyřpólové, ale lze vyrobit stroj s dvojpólovým nebo šestipólovým budícím vinutím. Rotor generátoru neobsahuje vinutí, je vyrobený z ocelolitiny a povrch opatřen věncem z tenkých dynamových plechů s drážkami. Generátor vyobrazený na Obrázku 25 se nazývá heteropolární. Pokud pohlédneme proti ose stroje je vidět na statoru střídání severního a jižního pólu, které tvoří budící vinutí.

Účinnost tohoto měniče klesá s vyšším kmitočtem. Například u kmitočtu 500Hz dosahujeme účinnosti rotačního generátoru zhruba 90%. Pokud požadujeme vyšší kmitočet než 10 000Hz účinnost stroje klesá na 70% (ztráty v železe). Účinnost snižují ztráty v železe, které narůstají se čtvercem kmitočtu.





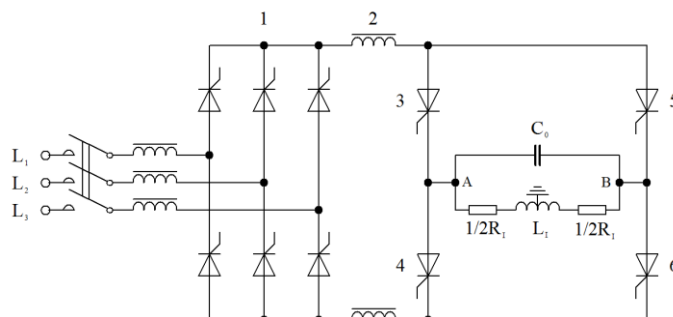
**Obrázek 26: Schéma zapojení napájení indukční pece s rotačním měničem [7]**

Schéma zapojení napájení indukční pece s rotačním měničem je zobrazeno na Obrázku 26. Za pomoci vypínače (1), například olejového, ale můžeme použít i jiný druh, se přivádí proud do přepínače hvězda/trojúhelník (2) z toho důvodu, aby se docílilo rozběhu motoru (M) a to zpravidla asynchronního s kotvou nakrátko. Motor je spojen s rotačním generátorem (G), ve kterém se nachází pracovní vinutí (3) a budící vinutí (4). Za pomoci budiče (5) a regulátoru (6) docílíme vytvoření a regulaci stejnosměrného proudu pro budící vinutí.

Pomocí regulátoru jsme schopni řídit napětí, které se indukuje v pracovním vinutí a tudíž i výkon, který dodáváme do pece vyobrazené ve schématu RL obvodem, ke kterému je paralelně zařazena kondenzátorová baterie. Kontrolu, zda je obvod vyladěn správně, zajistíme pomocí ampérmetrů (7,8), kterými měříme proud induktorem pece a proud kondenzátorovou baterií. Pokud tyto proudy jsou totožné, je obvod správně vyladěn a zdroj dodává pouze činný výkon. [8]

### 4.5.3 Tyristorový měnič [1]

Zapojení tyristorového měniče je na Obrázku 27. Obvod je sestaven z trojfázového můstkového usměrňovače a střídače. Měnič je zatížen pecním obvodem sestaveným z indukčnosti  $L_I$ , sériového odporu  $R_I$  a paralelní kapacity  $C_O$ . Tlumivky (2) mají funkci omezovací, oddělovací a vyhlazovací.

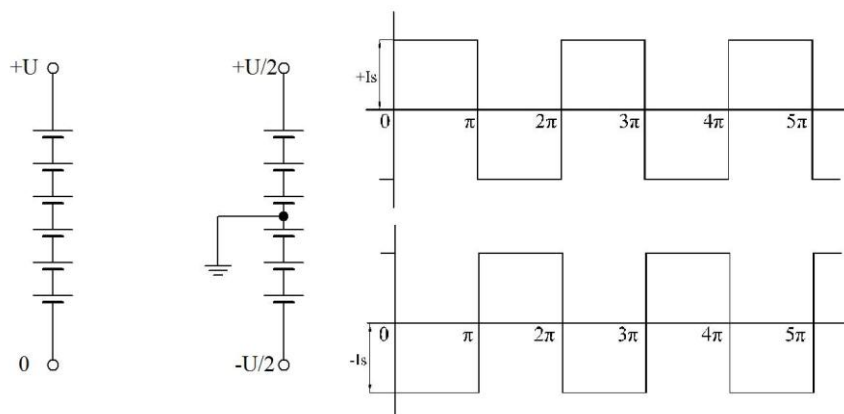


Obrázek 27: Schéma zapojení tyristorového měniče [1]

Funkce střídače spočívá v tom, že střídavě otevírá dvojice tyristorů (3) a (6). Po určitém čase se tyto tyristory uzavřou a proud prochází druhou dvojicí tyristorů (4) a (5). Tyto cykly se opakují. Ovládání zajišťuje vnější zdroj impulzů. Pro lepší představu činnosti pecního obvodu je vhodné střed tohoto systému uzemnit.

K tomu slouží zapojení na Obrázku 28, kde do pecního obvodu přivádíme obdélníkové pulzy. V první půlperiodě teče proud z bodu A do B a v druhé půlperiodě teče proud z bodu B do A. Komutaci zajišťují dvojice tyristorů (3), (6) a (4), (5), které jsou řízené vnější elektronikou.

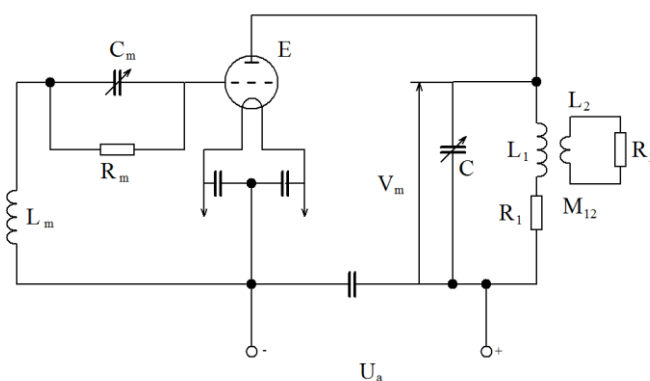
Tyristorové měniče mají hlavní výhody především v účinnosti dosahující hodnoty až 95% oproti například rotačním měničům, jejichž účinnost je 80% - 85%. Další výhodou je, že nepotřebují pevné základy a je u nich rapidně snížena hlučnost.



Obrázek 28: Průběh proudu tyristorového měniče kmitočtu [1]

#### 4.5.4 Elektronkové generátory [4]

Na Obrázku 29 je schéma zapojení elektronkového generátoru. Používá se jako zdroj proudu pro aplikace používající vysoké kmitočty, jako je například indukční povrchové kalení.



Obrázek 29: Schéma zapojení elektronkového generátoru [7]

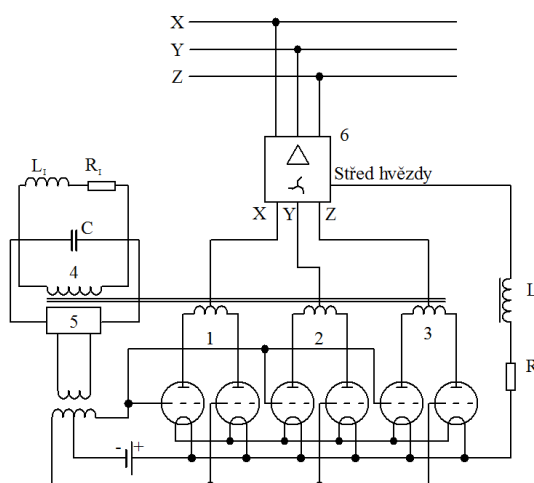
V obvodu představuje impedanci vsázky indukčnost  $L_2$  a rezistor  $R_2$ . Díky převodu do anodového obvodu cívky získáme výsledné hodnoty  $L_1$  a  $R_1$ . Kondenzátor  $C$  a anodová cívka tvoří oscilační obvod. Pokud správně nastavíme vhodnou zpětnou vazbu mezi anodovým a mřížkovým obvodem, celý obvod se poté chová jako generátor vysokofrekvenčních proudů s vlastním buzením. Tento generátor se pro indukční zařízení používá v rozsahu 300 kHz až do 1 MHz.

## 4.6 Dříve používané měniče kmitočtu

### 4.6.1 Iontové měniče kmitočtu [1]

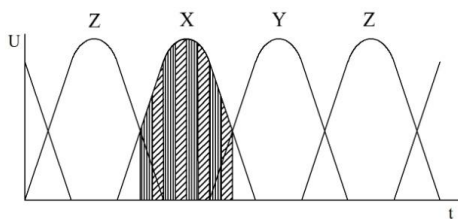
Tento druh měniče se začal prosazovat na začátku 50. let a zdálo se, že převezme roli rotačních měničů. Výhodami těchto měničů oproti rotačním bylo například, že nepotřebovaly dodatečné doladování kondenzátorové baterie. Dále je to třeba nižší hmotnost měniče, od toho se odvíjí také to, že nepotřebují pevné základy. Neobsahují rotační část, což přináší nižší hlučnost stroje. Účinnost těchto měničů dosahuje 92% až 95%.

Bohužel v provozu se tyto měniče ukázaly jako velice nespolehlivé. Hlavním problémem bylo zpětné zapalování v tyratronech. Tyatron po uhasnutí potřebuje, aby se stal opět nevodivý, přiložit záporné napětí na dobu  $10^{-4}$ s pro deionizaci rtuťových par. Spolehlivost nelze zaručit ani při kmitočtu do 10 000Hz.



Obrázek 30: Schéma zapojení iontového měniče [1]

Schematické zapojení iontového měniče je na Obrázku 30. Obvod je připojen na síť za pomoci trojfázového transformátoru (6), který je zapojen s převodem trojúhelník – lomená hvězda. Konce lomené hvězdy (X, Y, Z) jsou přivedeny do středů indukčností (1, 2, 3). Vývody indukčností (1, 2, 3) jsou připojeny na anody tyratronů. Indukčnosti (1, 2, 3) mají společné jádro, které je společné s pracovním vinutím (4). Pokud by byly svorky (X, Y, Z) připojeny přímo na anody tyratronů, pak by tento obvod pracoval jako trojfázový usměrňovač. Graf průběhů je na Obrázku 31.



**Obrázek 31: Grafické znázornění usměrněného napětí [1]**

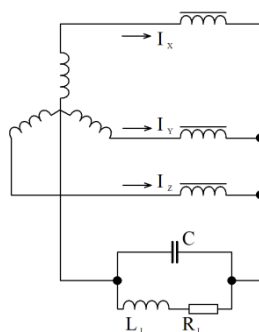
Ve schématu na Obrázku 30 je každá fáze přivedena na dva tyratrony, z nichž vede jen jeden, na němž je kladné napětí na mřížce. Druhý tyratron je v tento čas uzavřen a proud neteče. Za pomoci ovládání změním polaritu na mřížkách tyratronů a dojde k tomu, že první nevede a druhý propouští proud.

Tyto cykly se stále opakují. Induktory (1, 2, 3) vyvolávají střídavé rázy magnetického toku ve společném jádře a díky tomu se naindukuje napětí v pracovním vinutí (4), které je spojeno s pecním obvodem. Ve schématu, na Obrázku 30, ho zastupuje vyladěný RL obvod ( $L_1$ ,  $R_1$ ) a paralelní kondenzátorová baterie (C). Kmitočet řídí oscilační pecní obvod, který řídí buzení tyratronů za pomoci zpětné vazby (5).

Tyto měniče kmitočtu byly předchůdci dnešních tyristorových měničů kmitočtu.

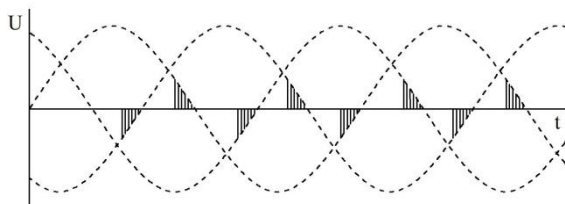
#### 4.6.2 Magnetické násobiče kmitočtu [1]

Schéma zapojení trojfázové násobičky je na Obrázku 32. Do sítě je připojena za pomoci transformátoru s vinutím do hvězdy. Sekundární vinutí je vyobrazeno na Obrázku 23, ke kterému jsou ve všech fázích připojeny tlumivky s přesyceným jádrem z transformátorových plechů. Mezi středovým vývodem (nulovým) a společným uzlem tlumivek je připojen oscilační obvod indukční pece.



**Obrázek 32: Schéma zapojení trojfázové násobičky [1]**

Na Obrázku 33 je časový průběh napětí na tlumivkách s přesyceným jádrem, které mají za následek, že cívkou prochází proudové rázy.



Obrázek 33: Časový průběh napětí na tlumivkách s přesyceným jádrem [1]

Magnetické násobičky kmitočtu pracují s trojnásobkem kmitočtu, tudíž lze získat  $3 \times 50\text{Hz}$  to je  $150\text{Hz}$ . Lze pracovat i s některými vyššími harmonickými a to například při použití třetí harmonické a tím se dostaneme na  $450\text{Hz}$ .

Tyto násobičky se dříve používaly jako doplněk k rotačním generátorům z důvodu vysoké ceny těchto generátorů, například pro kmitočty  $10\text{kHz}$  a nízké účinnosti. Proto lze použít generátor s kmitočtem  $3\text{kHz}$  a násobičku a dostaneme kmitočty o velikosti  $9\text{kHz}$ . Tento stroj bude mít vyšší účinnost a bude levnější.

#### 4.7 Pásové vedení [1]

Tavicí pec je pomocí pásového vedení spojena s kondenzátorovou baterií. Vzdálenost mezi induktorem a kondenzátorovou baterií zpravidla bývá do  $10\text{ m}$ . Ve vyladěném pecním obvodu je vždy proud mezi pecí a kondenzátorovou baterií několikrát větší než proud dodaný generátorem. Tento proud může například u pece na tavení oceli při hmotnosti taveniny  $1\text{ t}$  až  $2\text{ t}$  dosahovat hodnot  $4000\text{ A}$  až  $6000\text{ A}$ .

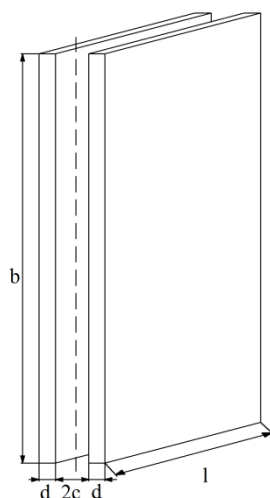
Na Obrázku 34 je znázorněno pásové vedení. Tloušťka vedení „d“ se volí zpravidla  $1,57$ krát větší než hloubka vniku. Díky tomu má pásové vedení minimální činný odpor a tím dosáhneme nejnižších ztrát. Výpočet impedance pásového vedení provedeme podle následujícího vztahu:

$$\bar{Z} = R + j\omega L = R + j\omega L' + j\omega L'' = \rho \frac{2l}{ab} * \varphi \left( \frac{2d}{a} \right) + j \left[ \rho \frac{2l}{ab} * \varphi \left( \frac{2d}{a} \right) + \omega \mu_0 \mu_r \frac{2cl}{b} \right] \quad (17)$$

Pásové vedení by mělo mít co nejmenší úbytek napětí, proto je třeba dosáhnout minimální impedance. V tomto případě hraje největší roli reaktanční složka. Z předchozího vzorce je reaktance  $L''$  minimální, když pásy přiblížíme a jsou co nejvyšší.

Příklad:

pro napětí  $U_g=2$  až 3kV se volí vzdálenosti  $2c=2$  až 3cm a výška pásů  $b=20$  až 50cm.



Obrázek 34: Znázornění pásového vedení [1]

#### 4.8 Kondenzátorová baterie

Pro správný chod zařízení, pro který se jako napájení používá střední kmitočet, je zapotřebí zapojení kondenzátorové baterie paralelně k cívice pece. Tato kondenzátorová baterie dodává do obvodu jalovou složku proudu. Díky tomu se ze zdroje odebírá pouze činný výkon.

Kondenzátorová baterie je sestavena z několika kondenzátorových jednotek, které jsou v kovových nádobách. V nádobě je uloženo několik zploštělých dílčích svitků kondenzátoru, které jsou ukládány na sebe. Svitky jsou tvořeny hliníkovou páskou prokládanou speciálním kondenzátorovým papírem o tloušťce cca  $5\mu\text{m}$ , který se prokládá v několika vrstvách, aby nedošlo k průrazu. Hotové svitky jsou v nádobách ponořeny do chladicí kapaliny. V dřívějších dobách to byl transformátorový olej. Dnes se používají nehořlavé kapaliny.

## 5 Kritérium 3E [7, 10]

Mezi kritéria 3E patří v oblasti indukčního tavení ekonomika, ekologie a energetika. Pro jednotlivá kritéria jsou uvedeny výhody a nevýhody.

### 5.1 Ekonomika

Indukční tavení můžeme v ekonomické oblasti považovat jako výhodnější oproti například pecím obloukovým, odporovým a palivovým. Toto tvrzení si můžeme dovolit z několika praktických hledisek. U tohoto typu pecí nehrozí žádné opalování elektrod, které by bylo třeba vyměnit. Například u obloukových pecí s přímým ohřevem je spotřeba tavných elektrod 3 až 6 kg na jednu tunu oceli. Oproti tomu mají tavicí indukční pece své nevýhody. Asi tou největší je jejich vysoká pořizovací cena oproti zmiňovaným odporovým a palivovým. Tavicí indukční pece totiž potřebují ke svému provozu kmitočtové měniče, což způsobuje zvýšení ceny těchto zařízení.

Další podstatnou ekonomickou výhodou těchto zařízení je, že se během kratší doby docílí potřebné tavicí teploty materiálu a zároveň při jeho tavení dochází k rovnoměrnému ohřevu nebo lze ohřívat pouze určitá místa.

K provozu indukčních pecí je potřeba stínění pomocí vodivého pláště nebo svazků z transformátorových plechů. To znamená, že dochází opět k navýšení materiálu potřebného k chodu indukčních tavicích pecí a tím dochází k navýšení jejich ceny. Ovšem investované prostředky do instalace stínění mají za následek omezení nežádoucích účinků, jako je přídatná ztráta v konstrukci zařízení a nedochází k nežádoucím účinkům rozptylového elektromagnetického pole na konstrukci zařízení.

Další výhodou z ekonomického hlediska je získání dokonalé homogenní slitiny, kterou u jiných druhů pecí nezískáme, neboť u nich nenastává víření taveniny působením elektrodynamických sil.



## 5.2 Energetika [11, 15]

V oblasti energetiky nás bude nejvíce zajímat parametr spojený s příkonem, který využíváme k tavení. V případě indukčních tavicích pecí potřebujeme menší příkon pro tavení stejné hmotnosti materiálu než u odporových pecí. U těchto pecí dochází k větším ztrátám. Tepelný výkon vychází ze vzorce:

$$P = \frac{Q}{t} [W], \quad (18)$$

energie k ohřátí:

$$Q = G * c * \Delta T [J]. \quad (19)$$

Například pro ocel o průměru 10 cm je měrná spotřeba energie ze sítě rovna asi 0,4 kWh.kg<sup>-1</sup> při kmitočtu 1000Hz, naopak u obloukových pecí s přímým ohřevem je spotřeba elektrické energie je 800 kWh na jednu tunu oceli. [11,15]

Mezi další výhody patří to, že u indukčních tavicích pecí nedochází k proudovým rázům tak jako tomu je například u pecí obloukových.

Ovšem i v této oblasti narazíme na nevýhody. Mezi nevýhody řadíme to, že většina pecí je jednofázových což má za následek nesymetrii v síti. Proto je nutné připojit pece, pracující s proudem o kmitočtu 50 Hz, k síti přes symetrizační člen.

## 5.3 Ekologie

Z ekologického hlediska se jedná o druh pecí, které nejsou pro životní prostředí a zdraví škodlivé, a to z toho důvodu, že při jejich používání nedochází k únikům nebezpečných oxidů a dusičnanů z povrchu jednotlivých vrstev vsázky. Protikladem jsou například plynové pece. V provozu je můžeme nejčastěji vidět umístěné společně s pecemi obloukovými. Tavení v indukčních pecích probíhá při nižších teplotách než je tomu u již zmiňovaných obloukových pecí. Při tavení v pecích (indukčních i obloukových) dochází k uvolňování kovových prachů ze vsázky, ale využitím vyšší teploty jsou u obloukových pecí prachové částičky mnohonásobně menší a tím i nebezpečnější, protože je můžeme snadněji vdechnout. Lidské tělo není schopno tento prach z těla vyloučit a to vede k jeho usazování v lidských tkáních.

## 6 Závěr

Tato bakalářská práce řeší problém indukčních ohřevů a hlavním tématem byly kelímkové tavicí pece.

V první řadě jsem se zabýval aplikačními procesy indukčních ohřevů v oblastech prohřívání, pájení, svařování a tavení a jejich porovnáním s jinými metodami při využití těchto aplikačních procesů.

V hlavní části práce jsem se zabýval jednotlivými druhy pecí, které se využívají v praxi a následně zjišťoval jejich výhody a nevýhody. Prvním druhem kelímkové pece, který byl v této práci zmíněn je pec indukční kanálková. Tento druh pece měl několik konstrukčních variant, jejichž praktická aplikace se využívá v oblasti tavení slitin z barevných kovů. Dalšími druhy indukčních kelímkových pecí byly pec kelímková a s vodivým kelímkem. Tato pec má hlavní využití v oblasti mincovnictví. U těchto druhů pecí jsem řešil možnosti odstínění elektromagnetické indukce a to variantou s dobře vodivým pláštěm nebo za pomoci svazků transformátorových plechů. V porovnání obou variant jsem se zaměřil na jejich účinnost. Hodnoty účinnosti varianty s využitím vodivého pláště byly nižší než u varianty s použitím transformátorových svazků, naopak pořizovací cena tohoto řešení byla vyšší. Zásadním zjištěným faktem u tohoto druhu pecí bylo to, že se pec bez stínění nesmí provozovat, neboť by došlo k destrukci okolních kovových konstrukcí.

Práce samozřejmě neopomíná ani téma efektivního tavení kovů. V této kapitole jsem došel k závěru, že při změně teploty vsázky se mění její vlastnosti a to v závislosti na zvoleném tavicím materiálu a intenzitě magnetického pole. Tato kapitola také zahrnuje podtéma zabývající se vzduťm vsázky a jejím pohybem v kelímku.

Dalším tématem práce jsou zdroje pro napájení indukčních zařízení. Jako první způsob bylo zmiňováno napájení síťovým kmitočtem. Hlavním problémem tohoto řešení je nesymetrické zatížení jednofázovou indukční pecí a z toho vyplývající nutnost použití symetrizačního členu pro připojení do třífázové sítě. Dalším druhem napájení bylo využití rotačního měniče kmitočtu proudu. U těchto zdrojů se dosahuje vysoké účinnosti při kmitočtu 500 Hz. Při vyšších kmitočtech účinnost klesá, a proto se používala kombinace s magnetickými násobiči kmitočtů. Moderní metodou napájení je použití tyristorových a

tranzistorových měničů s účinností až 95 % oproti rotačním měničům, jejichž účinnost se pohybuje mezi 80 % - 85 %. Předchůdcem tyristorových měničů byly iontové měniče kmitočtu. U tohoto druhu napájení docházelo k častým poruchám. Proto již dnes nejsou využívány. Posledním zmiňovaným zdrojem napájení jsou elektronkové generátory, které jsou využívány pro indukční pece s vysokými kmitočty.

Závěrečným a neméně důležitým tématem, které práce řeší je hodnocení indukčních kelímkových pecí tzv. kritériem 3E. Pod názvem 3E se skrývá hodnocení ekonomické, ekologické a energetické. V každé z této oblastí jsem porovnával výhody a nevýhody při využití indukčních tavicích pecí v praxi. Mezi nejpodstatnější zjištění v jednotlivých oblastech mohu zmínit například pohled z hlediska škodlivosti na zdraví a znečišťování životního prostředí. Tento druh pecí nijak neškodí zdraví a nepředstavuje žádné zatížení pro životní prostředí. Ekonomicky jsou výhodné zejména proto, že dochází k rychlému a přesnému ohřevu daného materiálu. Z energetického hlediska je největší výhoda v tom, že efektivněji ohřívají tavené materiály než např. pece odporové.

## Seznam použité literatury a internetových zdrojů

- [1] LANGER, Emil a Jiří KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE v Plzni - ediční středisko, 1982. ISBN 55-095-82.
- [2] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. 2. přep. a dop. vyd. Praha: Academia, 1979, 319 s. ISBN 21-116-64
- [3] RADA, Josef. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1985, 344 s. ISBN 04-525-85
- [4] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika: Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*. 2. vyd. Plzeň: VŠSE v Plzni - ediční středisko, 1975. ISBN 55-061-72.
- [5] INDUCTOTHERM GROUP COMPANY. *Co je indukční ohřev?* [online]. 2015 [cit.2015-04-19]. Dostupné z: [www.inductoheat.eu/fileadmin/pdf/Was\\_ist\\_Induktion/was\\_ist\\_Induktion-CZECH.pdf](http://www.inductoheat.eu/fileadmin/pdf/Was_ist_Induktion/was_ist_Induktion-CZECH.pdf)
- [6] PAVLÍČEK, Karel. *Stínění indukční kelímkové pece*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce.
- [7] FORMÁNEK, Jaroslav. *Možnosti zvyšování účinnosti tavení v indukčních kelímkových pecích*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce.
- [8] MILKA, Jiří. *Energetické problémy indukčních elektrotepelných zařízení*. Brno, 2011. Bakalářská práce.
- [9] Žihání na měkko - Bodycote. *Žihání na měkko - Bodycote* [online]. 2015 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.bodycote.com/cs-CZ/services/heat-treatment/annealing-normalising/soft-annealing.aspx>
- [10] POTŮČEK, Milan. *Průmyslové využití indukčních ohřevů*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. ZČU.Přílohy
- [11] HRADÍLEK, Zdeněk, Ilona LÁZNIČKOVÁ a Vladimír KRÁL. *Elektrotepelná technika*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 264 s. ISBN 978-80-01-04938-9.
- [12] EFD Induction GmbH. *EFD Induction GmbH* [online]. 2015 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.efd-induction.com/>

- [13] ABP Induction System GmbH. *ABP Induction Systems GmbH* [online]. 2015 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.abpinduction.com/>
- [14] EMAG eldec Induction GmbH. *EMAG eldec Induction GmbH* [online]. 2015 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.eldec.de/>
- [15] Elektro časopis pro elektrotechniku. *Elektro časopis pro elektrotechniku: Elektrický ohřev odporový, dielektrický, obloukový, elektronový a laserový* [online]. 2015 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/elektricky-ohrev-odporovy-dielektricky-obloukovy-elektronovy-a-laserovy-6--13695>
- [16] Linn High Therm GmbH. *Linn HighTherm GmbH* [online]. 2015 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: <http://www.linn-high-therm.de/>