

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRY ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Indukční kelímková pec s grafitovým kelímkem

vedoucí práce:

Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

2012

autor:

Monika Procházková

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Monika PROCHÁZKOVÁ**
Osobní číslo: **E10N0046P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Indukční kelímková pec s grafitovým kelímkem**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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 se zaměřením na tavení kovů.
2. Stanovte teoreticky rozdíly tavení vsázky v elektricky nevodivém a elektricky vodivém kelímku a jejich dopad na návrh tavicího zařízení.
3. Stanovte základní geometrické a elektrické parametry tavicího zařízení na tavení 100 kg stříbra.
4. Proveďte porovnání parametrů pro tavení v elektricky nevodivém a elektricky vodivém kelímku a stanovte závěry pro praxi z pohledu hodnocení kritériem 3E.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


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

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

Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 3.5.2012

Monika Procházková

.....

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce panu Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou indukčních kelímkových pecí. V první kapitole je popsána teorie indukčního ohřevu se zaměřením na tavení kovů. Druhá a třetí kapitola je zaměřena na teoretický rozbor tavení vsázky, konkrétně na rozdíly v elektricky nevodivém a elektricky vodivém kelímku a jejich dopad na návrh tavicího zařízení. V dalších kapitolách jsou stanoveny základní geometrické a elektrické parametry tavicího zařízení na tavení 100 kg stříbra. Poslední kapitoly pojednávají o rozdílech parametrů pro tavení v elektricky nevodivém a elektricky vodivém kelímku. Nakonec mé práce jsem stanovila závěry pro praxi z pohledu hodnocení kritériem 3E.

Klíčová slova

Indukční kelímková pec, Keramický kelímek, Grafitový kelímek, Geometrický výpočet, Elektrický výpočet

Annotation

Theme: Induction smelting furnace with graphite crucible

This thesis is concerned with induction crucible furnaces problem. There is described a theory of induction heating for melting of metals in the first chapter. The second and third chapter focuses on the theoretical analysis of a cast, specifically the differences in the electrically non-conductive and electrically conductive crucible and their impact on the design melting equipment. There are established the basic geometrical and electrical parameters of melting equipment for melting 100 kg of silver in following chapters. The last chapters deal with the differences in melting parameters for electrically non-conductive and electrically conductive crucible. Finally, I determined conclusion for practice for the evaluation criterion 3E.

Keywords

Induction crucible furnace, Ceramic crucible, Graphite crucible, Geometric calculation, Electrical calculation

Obsah

Úvod	5
1 Historický přehled	6
1.1 Indukční pece kanálkové s uzavřeným železným jádrem	6
1.2 Indukční zařízení bez uzavřeného železného jádra	7
2 Indukční ohřev se zaměřením na tavení kovů	8
2.1 Princip vzniku tepla v indukčních zařízeních	8
2.2 Princip indukční kelímkové pece	13
2.2.1 Tloušťka stěny grafitového kelímku.....	14
3 Indukční kelímkové pece s nevodivým kelímkem	15
3.1 Náhradní uspořádání a elektrické schéma	15
3.2 Indukční kelímková pec pro síťový kmitočet	19
4 Indukční kelímkové pece s vodivým kelímkem	21
4.1 Teorie elektrického výpočtu indukční pece s grafitovým kelímkem [2]	22
4.1.1 Náhradní uspořádání a elektrické schéma	22
4.1.2 Základní rozměry vsázky, induktoru a stínění	28
4.1.3 Vlastní a vzájemné indukčnosti.....	29
4.1.4 Činné odpory	30
4.1.5 Potřebný počet závitů induktoru.....	31
4.1.6 Elektrická účinnost	32
5 Návrh tavicího zařízení na tavení 100 kg stříbra	33
5.1 Geometrické parametry	33
5.2 Elektrické parametry	35
5.3 Tepelný výpočet	39
5.3.1 Ohřev grafitového kelímku.....	40
6 Závěry pro praktické využití a hodnocení kritériem 3E	41
Literatura	41
Přílohy	42

Seznam použitých symbolů

d	[m]	průměr
r	[m]	poloměr
l	[m]	výška, délka
m	[kg]	hmotnost
V	[m ³]	objem
S	[kgm ⁻³]	měrná hmotnost
A	[m ²]	plocha
a	[m]	hloubka vniku naindukovaných proudů
α	[-]	Nagaokův součinitel
F	[-]	Nagaokův součinitel
μ_0	[Hm ⁻¹]	permeabilita vakua
μ_r	[-]	relativní permeabilita
ρ	[Ω m]	měrný elektrický odpor
γ	[Sm ⁻¹]	měrná elektrická vodivost
f	[Hz]	frekvence
ω	[s ⁻¹]	úhlová frekvence
U	[V]	napětí
I	[A]	proud
P	[W]	výkon
Z	[Ω]	impedance
L	[H]	vlastní indukčnost
M	[H]	vzájemná indukčnost
R	[Ω]	činný odpor
C	[F]	kapacita
ϕ	[Wb]	magnetický tok
B	[T]	magnetická indukce
H	[Am ⁻¹]	intenzita magnetického pole
N	[-]	počet závitů
tg δ	[-]	ztrátový úhel
η	[-]	účinnost
ϑ	[°C]	teplota
T	[K]	teplota termodynamická

λ	$[\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$	tepelná vodivost
α	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}]$	součinitel přestupu tepla
σ	$[\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}]$	součinitel sálání
ε	[-]	stupeň černosti
t	[s]	čas
l_t	$[\text{kJkg}^{-1}]$	měrné skupenské teplo tání
c	$[\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
Q	[J]	teplo

Důležité konstanty

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ permeabilita vakua

$\sigma_{\text{c}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ Stefan-Boltzmanova konstanta

Úvod

V indukčních elektrotepelných zařízeních je možno ohřívat a tavit pouze elektricky vodivé materiály. Po vložení elektricky vodivého předmětu do střídavého elektromagnetického pole se v předmětu indukují vířivé proudy, které jej zahřívají. Nespornou výhodou indukčních elektrotepelných zařízení je tedy skutečnost, že teplo potřebné k tavení, prohřátí nebo k povrchovému ohřevu vzniká přímo ve vsázce a není tedy nutný jeho přenos sáláním a prouděním, eventuálně vedením jako je tomu např. u zařízení s nepřímým odporovým ohřevem.

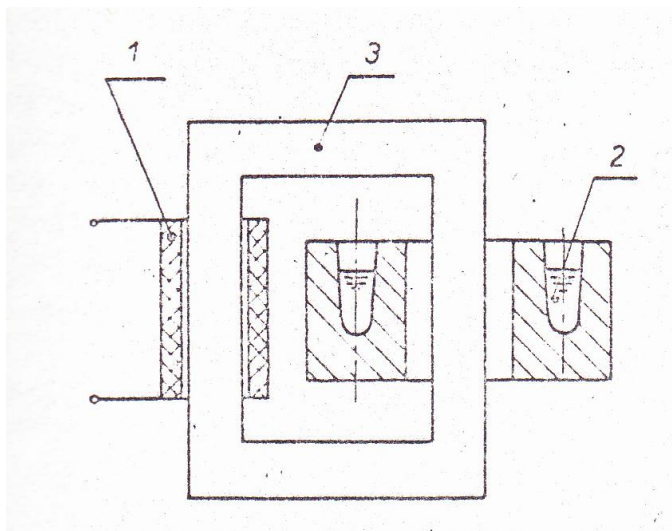
Velmi výhodné je také to, že volbou frekvence napájecího proudu můžeme ovlivnit tloušťku povrchové vrstvy vsázky, která se bude ohřívat. Indukční elektrotepelná zařízení můžeme rozdělit na indukční zařízení tavicí, prohřívací a kalicí. Tavicí indukční zařízení mohou být s uzavřeným železným jádrem, tj. indukční pece kanálkové, nebo bez uzavřeného jádra, tj. indukční pece kelímkové. Právě indukční kelímkové pece jsou předmětem této diplomové práce. Tyto pece bývají většinou napájeny proudy vyšší frekvence. Výhodou indukčních tavicích pecí je víření taveniny uvnitř kelímku, ke kterému dochází vlivem elektrodynamických sil.

Díky tomuto víření dochází k promíchání a homogenizaci roztaveného kovového materiálu a zároveň k vyrovnání teplot v celém objemu taveniny. Používají se především k výrobě kvalitních ocelí. V takovém případě je pec vybavena keramickým kelímkem. Pokud je však požadavek na tavení dobře elektricky vodivého materiálu, jakým je například měď a její slitiny nebo hliník a jeho slitiny, lze nevodivý keramický kelímkem nahradit kelímkem grafitovým, tedy elektricky vodivým. Tím se dosahuje lepší elektrické účinnosti, což je velice důležité.

1 Historický přehled

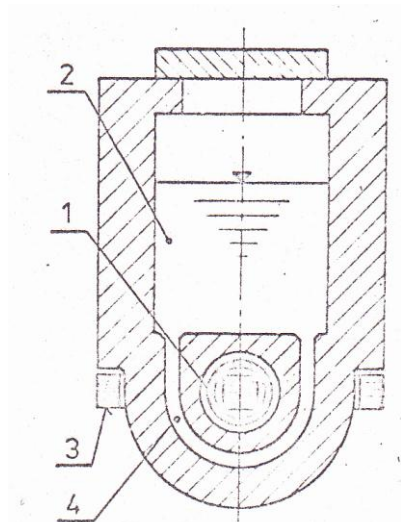
1.1 Indukční pece kanálkové s uzavřeným železným jádrem

Tyto pece byly postaveny v posledním desetiletí devatenáctého století. Tento druh pecí je podle obr. 1 v podstatě transformátor a uzavřeným jádrem 3 z železných plechů, primární vinutí 1 je připojeno ke zdroji střídavého proudu. Sekundární stranou 2 je roztavený kov keramického žlábků. [1]



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

Uvedené pece „s odkrytým kanálkem“ měly v provozu určité nevýhody. Byly proto ve dvacátých letech nahrazeny pecemi poněkud odlišné konstrukce (obr.2). Pec má válcovou nístěj s roztavenou vsázkou 2 a kanálek 4 je zapuštěn pod její dno. Na železném jádře 3 je umístěna primární cívka 1 připojená k síti. Pece tohoto a podobného provedení se používají převážně pro výrobu slitin z barevných kovů. [1]



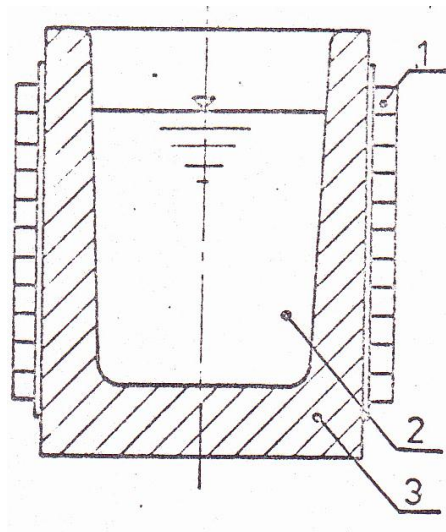
Obr.2: Upravená indukční kanálková pec s uzavřeným železným jádrem [1]

1.2 Indukční zařízení bez uzavřeného železného jádra

Ještě později byla vyvinuta indukční zařízení bez uzavřeného železného jádra (obr. 3). Tato zařízení bývají napájena proudy zvýšených kmitočtů. Na obr. 3 je schematicky vyznačena indukční kelímková pec pro výrobu a tavení oceli. Uvnitř válcové cívky 1 je keramický kelímk 3 se vsázkou 2. Válcové elmag. vlnění, vyzářené vnitřním povrchem cívky, dopadá na povrch vsázky, částečně do ní vstupuje, v ní se utlumuje a vsázka zahřívá. Dopad elmag. vlnění navíc vyvolá intenzivní víření roztavené vsázky, velmi žádoucí pro dokonalé promísení přísad v oceli a vyrovnávání teplot vsázky v kelímku.[1]

Lze předpokládat, že indukční kelímkové pece v mnohých případech postupně vytlačí při výrobě elektrooceli dosud běžné elektrické pece obloukové. Indukční pece na rozdíl od obloukových zatěžují síť rovnoměrně bez proudových nárazů a mimo to nevyžadují grafitové elektrody, které jsou deficitní v celosvětovém měřítku.[1]

Byly již postaveny indukční kelímkové pece pro 100 až 200 t oceli. Jejich připojení k síti nečiní potíže. [1]

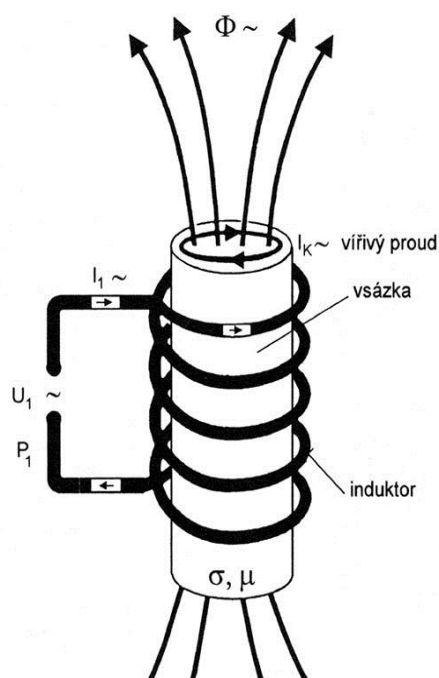


Obr. 3: Indukční zařízení bez uzavřeného železného jádra[1]

2 Indukční ohřev se zaměřením na tavení kovů

2.1 Princip vzniku tepla v indukčních zařízeních

Každé indukční zařízení sestává vždy z cívky, kterou prochází střídavý proud, ze zdroje a vsázky, která přijímá elektromagnetické vlnění vyzářené cívkou. Je to v podstatě vzduchový transformátor, kde cívka je stranou primární a vsázka stranou sekundární, spojenou nakrátko. Průchodem proudem rovinným zářičem vzniká v jeho okolí elektromagnetické vlnění rovinné. Průchodem proudem válcovým zářičem vzniká v okolí tohoto zářiče elektromagnetické vlnění válcové. Válcová cívka, kterou prochází střídavý proud, vyzářuje do své dutiny válcové elektromagnetické vlnění. [4]



Obr. 4: Cívka [4]

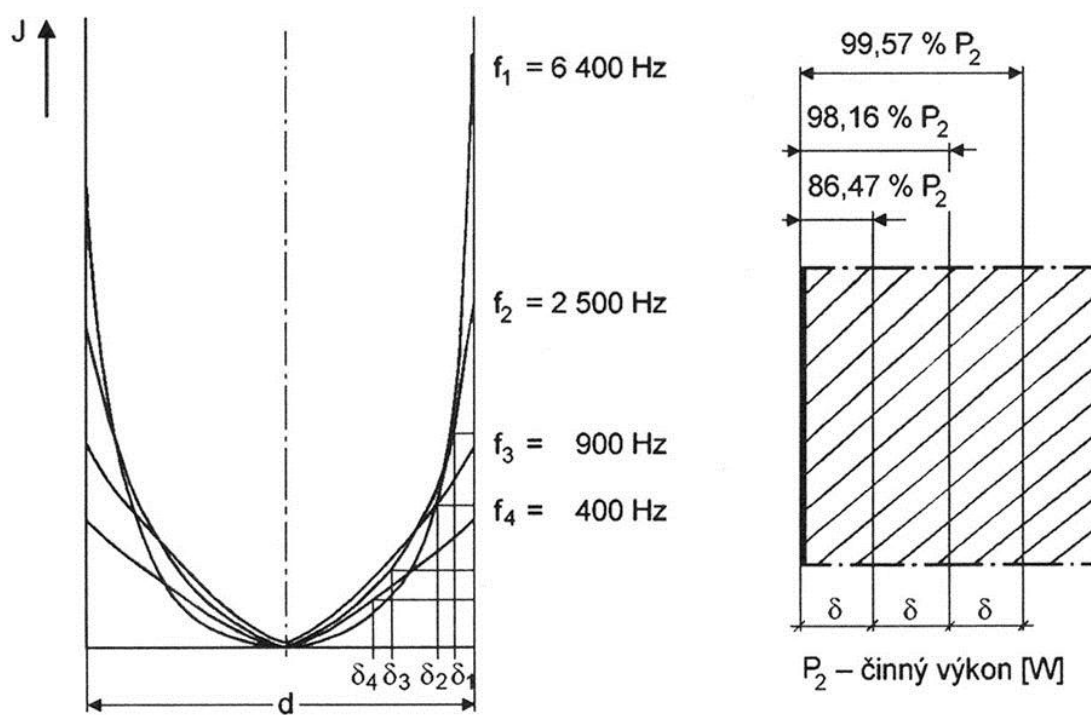
Umístíme-li souose v cívce válcovou elektricky vodivou vsázku, pak dopadající elektromagnetické vlnění vstupuje do vsázky povrchem a vyvolává indukované proudy, jejichž účinkem se vsázka zahřívá. Pronikající elektromagnetické vlnění se utlumuje a jeho energie se mění na energii tepelnou. Hloubka vniku záření závisí na kmitočtu. [2]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \gamma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma}} \quad (2.1)$$

Ve vztahu (2.1) je:

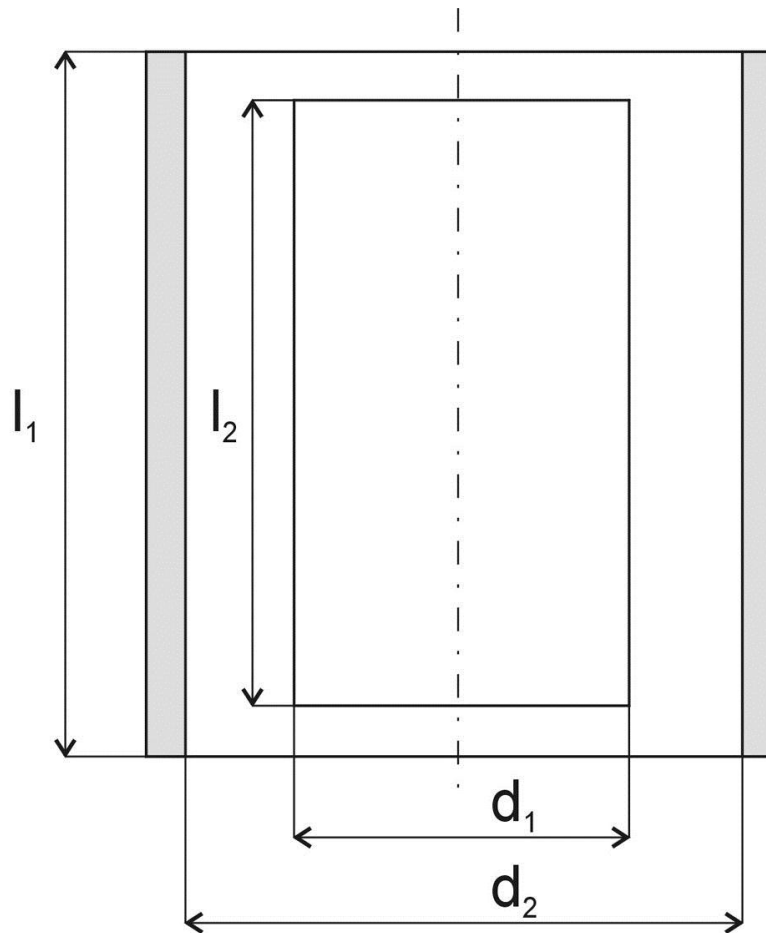
- f kmitočet (Hz)
- μ permeabilita (VS/Am)
- γ konduktivita – elektrická vodivost (Sm^{-1})

Frekvence [Hz]	Hloubka vniku [mm]					
	Cu		Al		Ocel	
	20 °C	1 100 °C	20 °C	660 °C	20 °C	800 °C
50	9,5	31,8	12,2	31,5	8,0	71,2
1 000	2,1	7,1	2,7	7,0	1,8	15,9
10 000	0,67	2,25	0,86	2,2	0,56	5,0
1 000 000	0,067	0,22	0,086	0,22	0,056	0,5



Obr. 5: Závislost hloubky vniku elektromagnetického vlnění na kmitočtu [4]

Elektrická účinnost indukčního ohřevu je závislá na poměru d/δ . Tedy velikosti průměru vsázky ku hloubce vniku podle obr. 5. Také materiál ohřivaného předmětu a jeho teplota ovlivňuje výslednou účinnost indukčního ohřevu.



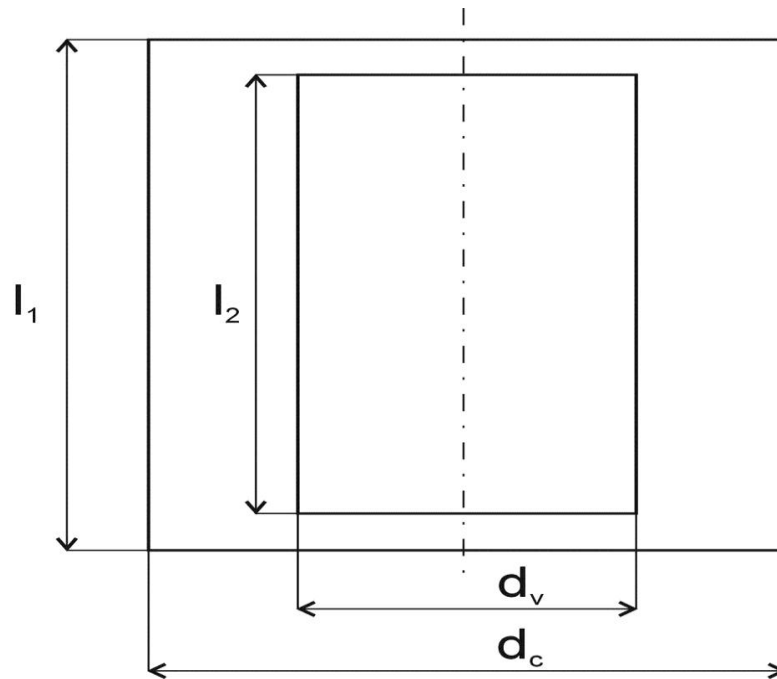
Obr. 6: Dva sousé elektrické obvody [4]

Uvažujeme dva elektrické obvody podle obr. 6, cívku a vsázku. Vnitřní průměr cívky označme d_2 , průměr vsázky je d_1 , hloubky vniku jsou δ_1 , δ_2 . Délky jsou l_1 , l_2 . V této úvaze budeme uvažovat místo skutečných elektrických obvodů s prostorovým rozložením proudu náhradní nulové tloušťky. Je-li hloubka vniku značně menší než příslušný poloměr, jsou náhradní průměry dány výrazy:

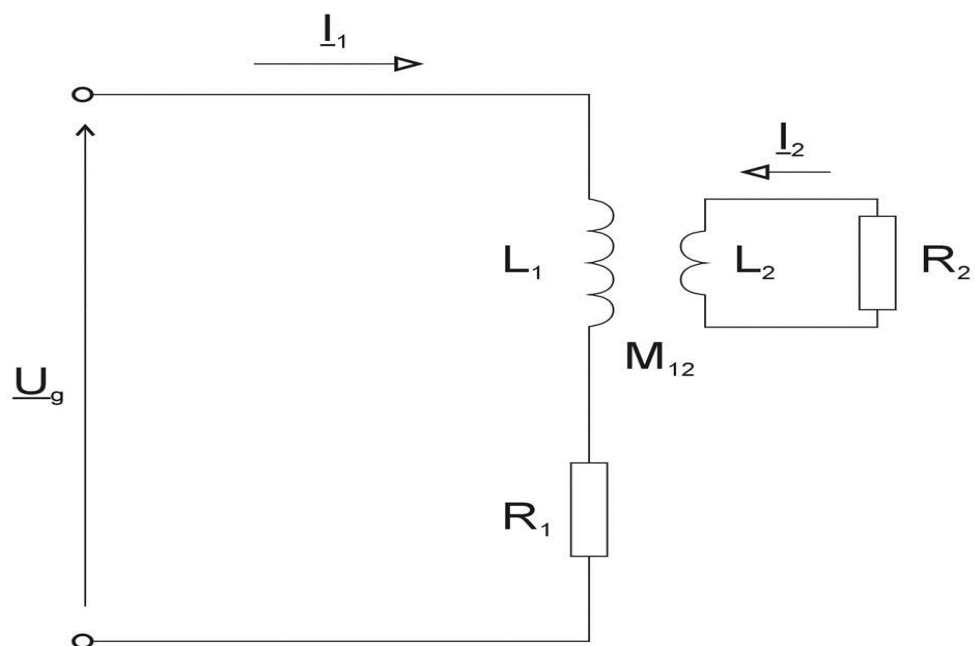
- pro cívku: $d_c = d_1 + \delta_1$ za předpokladu, že $(\delta_1 \ll r_1)$ (2.2)

- pro vsázku: $d_v = d_2 - \delta_2$ za předpokladu, že $(\delta_2 \ll r_2)$ (2.3)

Délky l_1 , l_2 zůstávají beze změny. Místo obr. 3 budeme pro výpočet uvažovat náhradní uspořádání podle obr. 4. Jeho elektrické schéma je na obr. 5.



Obr. 7: Náhradní uspořádání cívky a vsázky [4]



Obr. 8: Elektrické schéma cívky a vsázky [2]

Na obr. 8 značí:

- L_1, L_2 (H) a R_1, R_2 (W) vlastní indukčnosti a odpory cívky a vsázky
- M_{12} (H) vzájemná indukčnost obou obvodů $M_{12} = k_{12} (L_1 \cdot L_2)^{1/2}$
- Proudů v těchto obvodech jsme označili \underline{I}_1 a \underline{I}_2

Na svorky pecní cívky přivádíme ze zdroje střídavý proud o kmitočtu f (Hz) a napětí \underline{U}_g (V). Odvoďme působení druhého obvodu na obvod první. Vyjdeme ze dvou základních rovnic těchto obvodů, z nichž každá značí, že přiváděné napětí se rovná součtu úbytků (2. Kirchhoffův zákon):

$$\underline{U}_g = (R_1 + j\omega L_1) \cdot \underline{I}_1 + j\omega M_{12} \cdot \underline{I}_2 \quad (2.4)$$

$$0 = (R_2 + j\omega L_2) \cdot \underline{I}_2 + j\omega M_{12} \cdot \underline{I}_1 \quad (2.5)$$

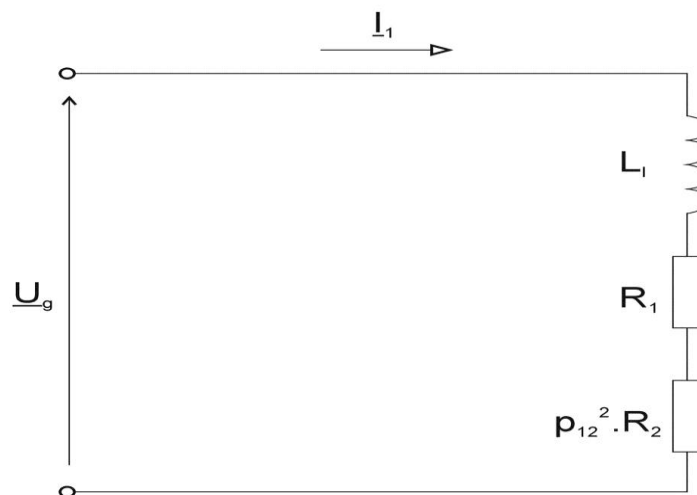
Z druhé rovnice vyjádříme I_2 a dosadíme do první:

$$\underline{U}_g = [(R_1 + p_{12}^2 R_2) + j\omega(L_1 - p_{12}^2 L_2)] \cdot \underline{I}_1 = (R_I + j\omega L_I) \cdot \underline{I}_1 \quad (2.6)$$

Naznačená matematická úprava značí, že jsme převedli hodnoty vsázky (impedanci $Z_2 = R_2 + j\omega L_2$) do prvního obvodu. Výsledný odpor v první obvodu R_I je dán součtem vlastního odporu cívky a převedeného odporu vsázky. Výsledná indukčnost L_I je dána rozdílem vlastní indukčnosti cívky a převedené indukčnosti vsázky:

$$R_I = R_1 + p_{12}^2 R_2; \quad L_I = L_1 - p_{12}^2 L_2; \quad p_{12}^2 = \frac{\omega^2 \cdot M_{12}^2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} \quad (2.7)$$

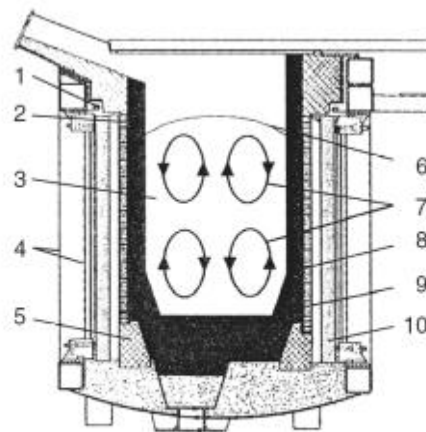
Elektrické schéma podle obr. 8 má po převedení sekundární strany tvar podle obr. 9.



Obr. 9: Elektrické schéma po převedení sekundární strany [2]

2.2 Princip indukční kelímkové pece

Indukční tavicí kelímková pec je schematicky naznačena na **obr. 10**. Sestává z induktoru, kelímku a vsázky. Induktor tvoří válcová cívka, nejčastěji navinuta z měděného dutého profilového vodiče, jenž je protékán vodou. Voda slouží jako chladicí médium. Cívka může být napájena proudem různé frekvence. Tento proud vytváří uvnitř cívky střídavé elektromagnetické pole, v němž je vložen kelímk s elektricky vodivou vsázkou. Ve vsázce se elektromagnetické pole utlumuje a jeho energie se přeměňuje v tepelnou, čímž dochází k ohřevu vsázky. Vhodnou volbou frekvence napájecího proudu induktoru můžeme volit rozložení tepla ve vsázce. Kelímk tavicí pece může být keramický, tedy elektricky nevodivý, nebo elektricky vodivý, např. grafitový nebo vyrobený ze směsi grafitu a šamotu. Magnetický tok, který protéká dutinou induktoru, se uzavírá vně cívky. Může tak vnikat do konstrukčních částí pece a zahřívat je. Abychom tomuto nežádoucímu ohřevu nosných konstrukcí zabránili, opatříme pec vhodným stíněním. To se provádí buď pomocí stínícího pláště z dobře elektricky vodivého materiálu, nebo pomocí svazků transformátorových plechů.[5]



Obr. 10: Indukční kelímková pec [2]

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1 - kroužek spojený nakrátko | 6 - kopulovitá horní hladina |
| 2 - vodou chlazený prstenec | 7 - pohyb taveniny |
| 3 - tavenina | 8 - kelímk |
| 4 - ocelová kostra | 9 - induktor |
| 5 - betonový prstenec | 10 - svazek plechů |

Indukční kelímkové pece s keramickým kelímkem se používají především k výrobě vysoce kvalitní oceli. Nejsou však vhodné pro tavení dobře elektricky vodivých materiálů, jako hliník, měď a slitiny.

Pro tyto materiály má pec s keramickým kelímkem nízkou elektrickou účinnost. Pokud však kelímek nahradíme kelímkem grafitovým, a tedy elektricky vodivým, elektrická účinnost stoupne. [5]

V tomto případě průchodem proudu cívkou vznikne elektromagnetické vlnění, které dopadá na stěnu vodivého kelímku, vstupuje do ní a indukuje proud. Průchodem proudu se kelímek zahřívá a teplo pak předá vsázce, která je v něm vložena. Většina elektromagnetické energie se přemění v teplo již ve stěně kelímku, jen malá část pronikne až ke vsázce a zahřívá ji. Poměr mezi množstvím elektromagnetické energie, které se přemění v teplo již ve vodivém kelímku a elektromagnetickou energií, která pronikne až do vsázky, závisí na tloušťce stěny kelímku. Tento problém je rozebrán v následující kapitole. [5]

2.2.1 Tloušťka stěny grafitového kelímku

Dle [3] se intenzita magnetického pole H_2 na vnější straně vodivého kelímku průchodem stěnou kelímku utlumuje přibližně podle funkce:

$$H_x = H_2 \cdot e^{-\frac{x}{a}}$$

Na vzdálenosti $x = 3a$ má tedy hodnotu:

$$H_{3a} = H_2 \cdot e^{-\frac{3a}{a}} = H_2 \cdot e^{-3} = 0.0498H_2$$

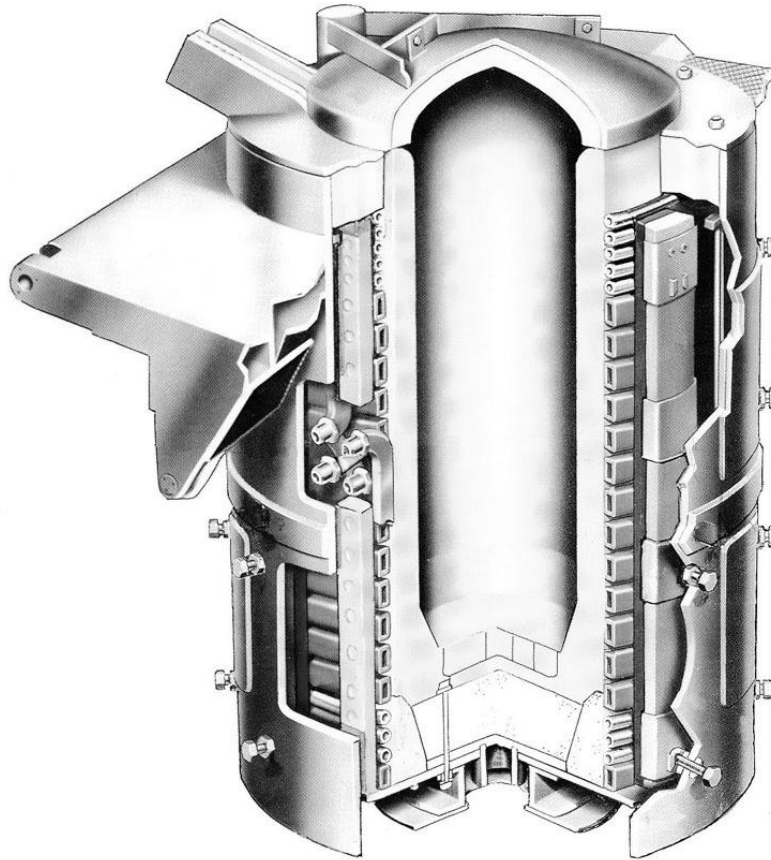
Pokud je tedy tloušťka stěny kelímku rovna trojnásobku hloubky vniku naindukovaných proudů, projde do vsázky pouze 4,98% z hodnoty intenzity magnetického pole na vnější straně kelímku.

V případě, že je tloušťka stěny kelímku rovna $6a$, pronikne do vsázky jen 0,25% z intenzity magnetického pole H_2 :

$$H_{6a} = H_2 \cdot e^{-\frac{6a}{a}} = H_2 \cdot e^{-6} = 2,5 \cdot 10^{-3} H_2$$

Vsázka se ohřívá převážně vedením tepla z ohřátého kelímku. [5]

3 Indukční kelímkové pece s nevodivým kelímkem



Obr. 11: Indukční kelímková pec [2]

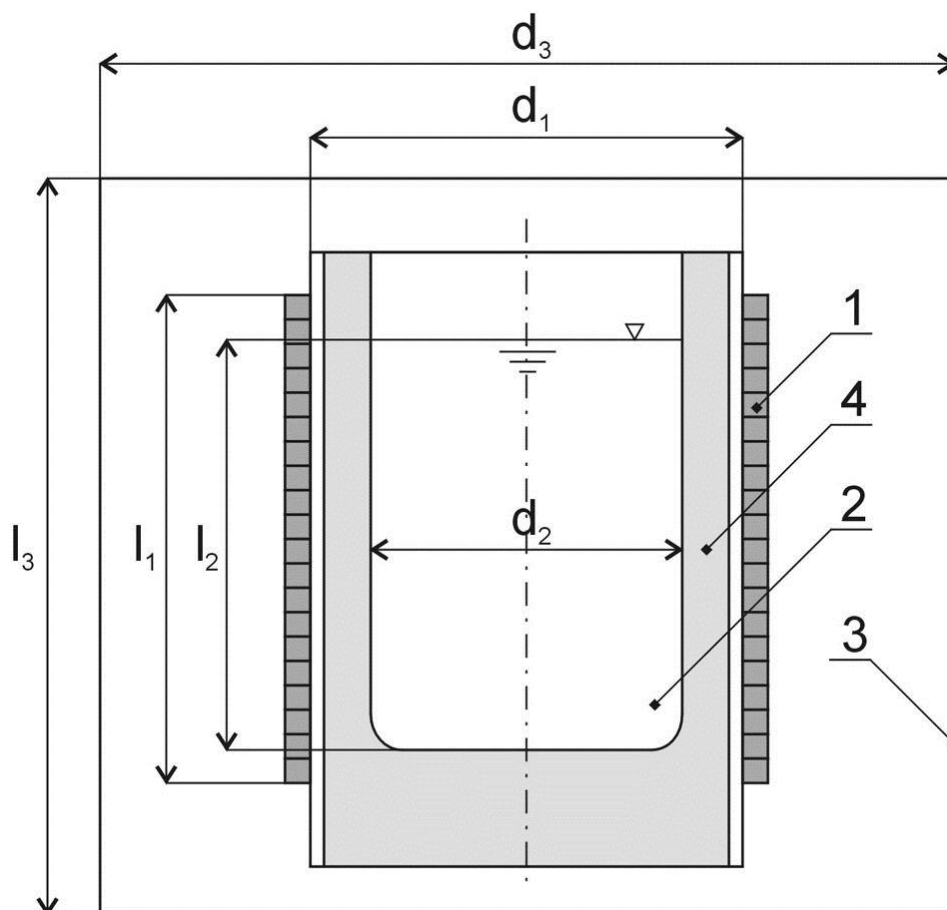
V cívce je umístěn kelímkem, který se pěníuje z keramické hmoty. Pec má buď stínící plášť z mědi, nebo ocelový plášť, který na vnitřní straně nese svazky transformátorových plechů. [2]

3.1 Náhradní uspořádání a elektrické schéma

Uvažuji indukční kelímkovou pec s nevodivým kelímkem a s vodivým pláštěm. Schématicky je tato pec znázorněna na obr. 12. Jedná se o sousední umístění tří elektrických obvodů, a to cívky (induktoru), vsázky a stínícího vodivého pláště.

Indexem 1 jsou označeny parametry týkající se induktoru, index 2 patří vsázce a index 3 ke stínění.

Cívka má vnitřní průměr d_1 , stínící plášť d_3 a d_2 je vnější průměr vsázky. Délky jednotlivých částí indukční kelímkové pece l_1 , l_2 a l_3 .



Obr. 12: Schéma indukční kelímkové pece s vodícím stínícím pláštěm [2]

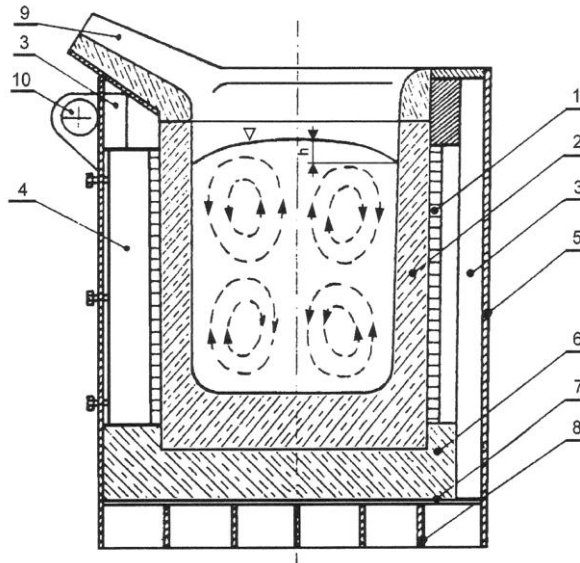
Keramický kelímek 4 je válcového tvaru, elektricky nevodivý, obsahuje vsázku 2 a je ovinut cívkou 1.

Cívka je vinuta zpravidla z měděné trubky obdélníkového průřezu. Cívkou prochází proud zvýšeného kmitočtu (500 až 1000 Hz), příp. proud síťového kmitočtu 50 Hz. Vnitřní povrch cívky vyzařuje do své dutiny elektromagnetické vlnění, které dopadá kolmo na povrch vsázky, je jí pohlcováno a elektromagnetická energie se mění na energii tepelnou. [2]

Dutinou cívky prochází magnetický tok, který se uzavírá vně cívky. Proto je třeba učinit vhodnější opatření, aby intenzita magnetického pole vně pece byla co nejmenší, tudíž aby nedocházelo k zahříváním nosných konstrukcí pece. Toho dosáhneme buď tak, že pec opatříme stínícím pláštěm z dobře vodivého materiálu vhodného průměru, nebo umístíme vně cívky jádro ze železných plechů, kterým se magnetický tok uzavírá. [2]

Indukční kelímkové pece mají vždy stínění, a to buď jako vodivý stínící plášť, nebo jako jádro ze svazků transformátorových plechů vně cívky. [2]

Počítáme-li však menší pece, můžeme zanedbat vliv stínění a počítáme, jako by stínění neměla. Při výpočtu uvažujeme pouze cívku a vsázku, tedy pouze dva na sebe působící obvody. Výpočet se tím zjednoduší a zkrátí. [2]



Obr. 13: Indukční kelímková pec [2]

1 – kruhová ohřívací cívky

- Cívka je navinuta jako jednovrstvová, nejčastěji dutým měděným vodičem čtyřhranného průřezu
- Dutinou vodiče protéká chladicí voda

2 – Keramický zadusaný kelímk pecce

- Nejčastěji z křemičitého písku

3 – Svazky transformátorových plechů

- Jsou svisle uspořádány po celém vnitřním obvodu pláště pece
- Tyto svazky svádějí magnetický tok cívky, aby nezabíhal do pláště a do dalších konstrukčních částí pece

4 – Střední azbestocementové trámce pro cívku

5 – Ocelový plášť pece

6 – Cihlová keramická vyzdívka na dně pece

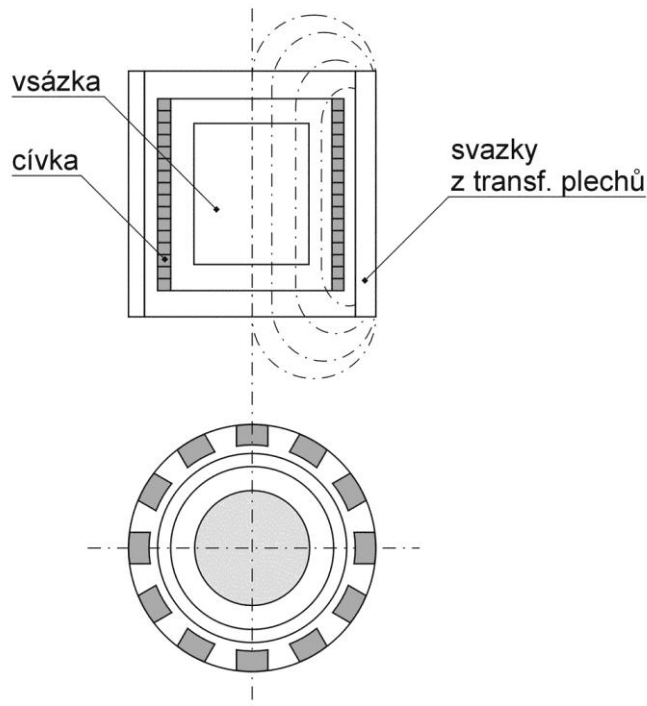
7 – Stínící měděný plech zabraňující vniknutí magnetického toku cívky do mřížového dna pece

8 – Mřížové dno pece

9 – Hubice pro odlévání

10 – Osa, kolem které se pec otáčí při vyklápění, odpichu [2]

- Pec je vyklápěna většinou hydraulickými válci



Obr. 14: Indukční kelímková pec se železným jádrem vně cívky [2]

Je-li indukční kelímková pec opatřena vodivým stínícím pláštěm, sníží se velmi výrazně intenzita magnetického pole vně pláště. Podobného účinku dosáhneme také tak, že vně cívky, místo stínícího vodivého pláště dáme železné jádro z většího počtu svazků z transformátorových plechů, podle obr. 14.

Převážná část magnetického toku buzeného cívkou se bude uzavírat vně cívky magneticky dobře vodivou cestou, tj. svazky transformátorových plechů, uchycených na vnitřní straně pecního pláště z kotlového plechu. Zařazením magneticky vodivých svazků se zmenší magnetický odpor pro magnetický tok buzený cívkou, takže tok poněkud vzroste. Zvětší se vlastní indukčnost pecní cívky, tj. magnetický tok pro jednotkový proud. Rovněž vzroste vlastní indukčnost a vzájemná indukčnost M_{12} .

Pec se stínícím pláštěm vyžaduje cívku s poněkud vyšším počtem závitů a větší kondenzátorovou baterii než je pec s jádrem. [2]

Užitečný výkon je nižší a ztráty v cívce jsou vyšší u pece s pláštěm než u pece s jádrem. Elektrická účinnost je u pece s pláštěm výrazně nižší než u pece s jádrem.

Nejdůležitějším výsledkem provedeného porovnání je zjištění, že účinnost pece se železným jádrem je téměř o 5 % vyšší než u pece se stínícím pláštěm. To přináší v provozu značné úspory elektrické energie, zejména u velkých pecí s nepřetržitým provozem. [2]

Provedení indukční kelímkové pece se železným jádrem je proto technicky dokonalejším řešením. Výrobně však tato pec je dražší a dojde-li při provozu k protavení kelímku, je poškození této pece zpravidla horší, případně dojde k úplnému zničení pece. [2]

3.2 Indukční kelímková pec pro síťový kmitočet

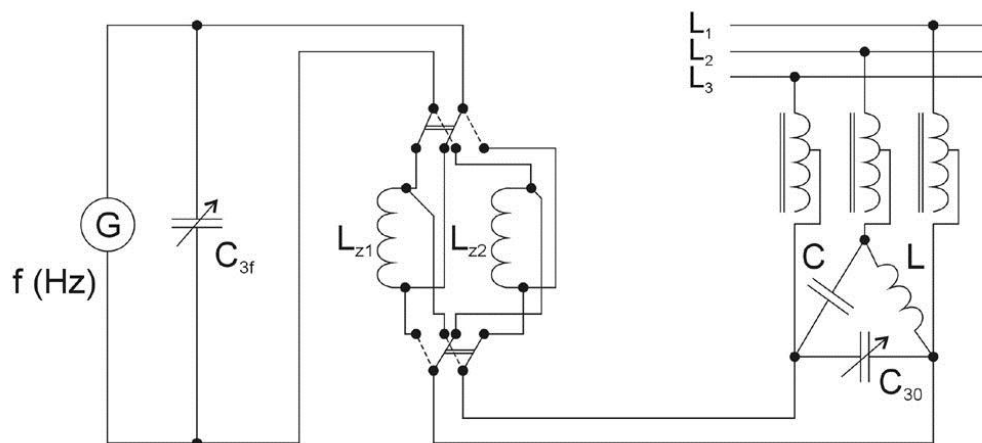
V posledním desetiletí se i u nás poměrně hodně rozšířilo používání indukčních kelímkových pecí, které se přes autotransformátor připojují na trojfázovou síť 3 x 380 V, 50 Hz. Vzhledem k tomu, že v jejich elektricky nevodivém kelímku nastává intenzivní víření roztavené vsázky, mohou se používat pro výrobu legovaných ocelí. V takovém případě lze je plnit již roztavenou vsázkou z pece obloukové nebo martinské („duplex proces“). [1]

Důvodem, proč se tyto pece zavádějí, je nižší investiční náklad, jehož cena je asi 40 % z pořizovacích nákladů pro celé pecní zařízení středofrekvenční. Tento rozdíl v pořizovacích nákladech se částečně zmenší tím, že pec pro 50 Hz má větší, a tedy dražší kondenzátorovou baterii. Obsluha pece přímo připojené k síti je jednodušší. Důležitou roli hraje i elektrická účinnost celého zařízení. [1]

Např. elektrická účinnost samotné kelímkové pece na 1000 kg oceli při 50 Hz je asi 74,5 %, při 1000 Hz je 81,5 %. Při zvýšeném kmitočtu však musíme uvažovat elektrickou účinnost měniče kmitočtu, která bývá u větších zařízení asi 85 %.

Je proto výsledná účinnost indukční pece při 1000 Hz rovna: $0,815 \cdot 0,85 = 0,692$, tedy asi o 5 % nižší.

V posledních letech se používají také indukční kelímkové pece připojené na síťový kmitočet, jde-li o udržení roztaveného kovu na požadované teplotě (pece udržovací). Pecní zařízení má v takovém případě obvykle tři stejné vlastní pece, kelímky s cívkou, jeden společný napájecí generátor a jednu kondenzátorovou baterii pro 50 Hz. V provozu jsou vždy dvě pece, třetí je jako rezerva. [1]



Obr. 15: Elektrické schéma soupecí [1]

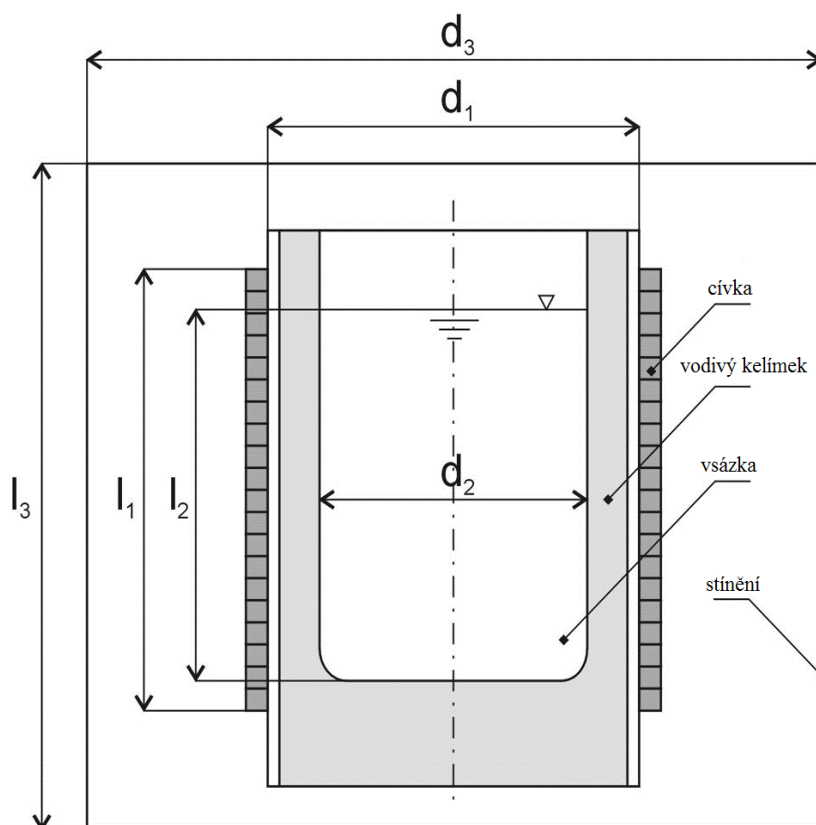
Provedení kelímkových pecí na síťový kmitočet je téměř stejné, jako u pecí na zvýšené kmitočty. Přiváděný výkon bývá obvykle menší než u středofrekvenční pece stejného obsahu kelímkem, takže případné tavení trvá déle. Proto se tyto pece (tavící i udržovací) opatřují keramickým víkem, které zmenšuje ztráty sáláním z povrchu vsázky. Víření roztavené vsázky je tím intenzivnější, čím je kmitočet nižší. Protože příliš vysoké vzdutí by mělo za následek obnažení povrchu lázně a její oxidaci, je nutné snížit víření zmenšením příkonu. [1]

V některých případech se také snižuje cívka, její horní okraj nepřesahuje hladinu lázně, jako je obvyklé u pecí středofrekvenčních. U pecí na síťový kmitočet necháme přesahovat hladinu lázně nad okrajem cívky. Tím se vytvoří na hladině lázně tlumící polštář, který zabrání obnažování jejího povrchu. [1]

Výpočet kelímkové pece na tavení oceli nebo litiny pro síťový kmitočet je stejný jako u pece středofrekvenční. Poněkud odlišný je výpočet pece udržovací. Cívka (počet závitů) se vypočítá podle napětí, výkonu a kmitočtu středofrekvenčního zdroje. Po roztavení vsázky tuto pecní cívku přepneme na síť s kmitočtem 50 Hz. Pec musí být i v tomto případě vyladěna připojením vhodné kondenzátorové baterie pro 50 Hz. Pro tento kmitočet určíme výpočtem výslednou indukčnost L_b , výsledný odpor R_l a potřebnou kapacitu C . Z tohoto dostaneme zatěžovací odpor R_z , který vůči zdroji 50 Hz nahrazuje vyladěnou pec. [1]

4 Indukční kelímkové pece s vodivým kelímkem

Grafitový kelímkem se používá pro tavení dobře elektricky vodivých materiálů, jakými jsou například měď a její sloučeniny nebo hliník a jeho sloučeniny. V případě této pece považujeme vodivý kelímkem za vsázku. Rozhodujícím údajem pro volbu tloušťky stěny grafitového kelímkem je hloubka vniku naindukovaných proudů. Snažíme se volit tloušťku tak, aby byla rovna přibližně trojnásobku hloubky vniku naindukovaných proudů. [3]



Obr. 16: Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem [2]

Indukční pec s nevodivým kelímkem má nízkou elektrickou účinnost při tavení dobře vodivých materiálů, jako jsou měď a její slitiny, hliník a jeho slitiny apod.

Elektrická účinnost podstatně stoupne, jestliže pec opatříme vodivým kelímkem schematicky podle obr. 13 (pro tavení Al a Cu). Jedná-li se o nižší teploty, jaké přicházejí v úvahu při tavení hliníku a jeho slitin, zhotovuje se kelímkem z ocelolitin. Pro vyšší teploty se používají tzv. grafitové kelímky. Zhotovují se ze směsi šamotu a grafitu. Čím více grafitu, tím je kelímkem vodivější. Velká vodivost však není žádoucí. Mezi kelímkem a cívkou je keramická izolační vrstva, která zmenšuje ztrátový tepelný tok ze žhavého kelímkem do vodou chlazené cívkou. [3]

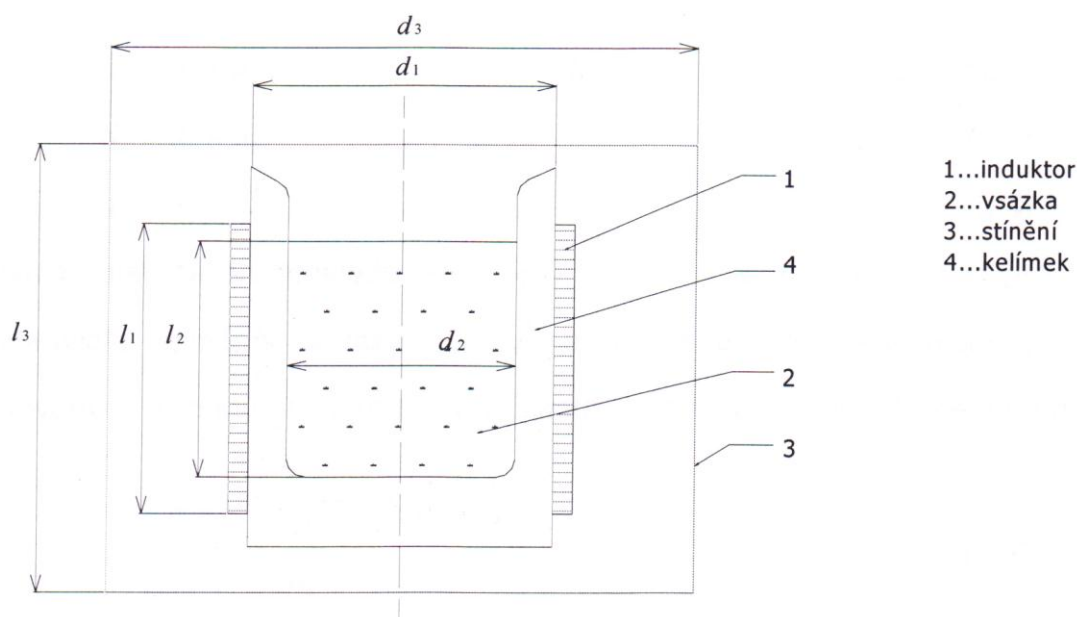
Zavedeme-li do cívky proud, dopadá elektromagnetické vlnění vyzářené vnitřním povrchem cívky na vnější povrch vodivého kelímku, vstupuje do jeho stěny, indukuje proud ve stěně a jeho průchodem se kelímkem zahřívá. Ten potom předává teplo vsázce, vložené do jeho dutiny. Poměry jsou obvykle takové, že ve stěně kelímku se přemění v teplo větší část dopadající elektromagnetické energie, menší část však projde stěnou a zahřívá přímo vsázku. [3]

4.1 Teorie elektrického výpočtu indukční pece s grafitovým kelímkem [2]

4.1.1 Náhradní uspořádání a elektrické schéma

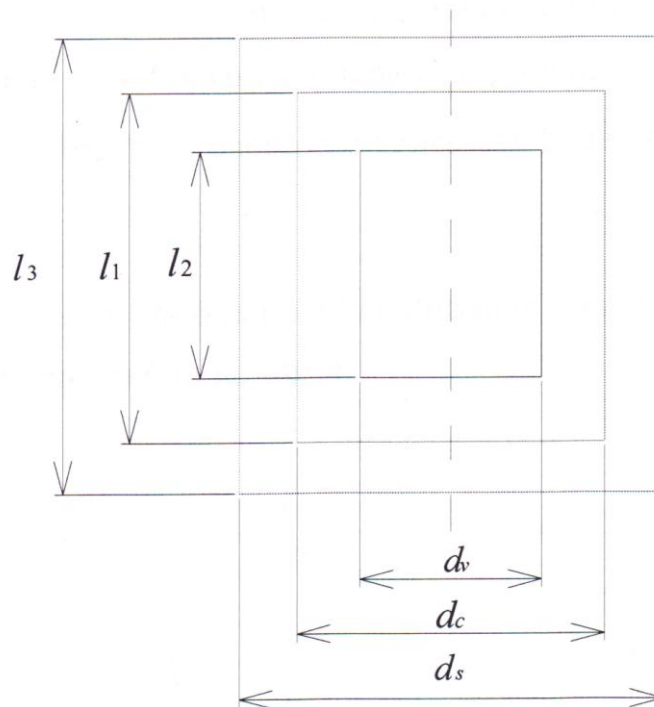
Uvažují indukční kelímkovou pec s vodivým kelímkem a s vodivým pláštěm. Schematicky je tato pec znázorněna na **obr. 17**. Jedná se o sousední umístění tří elektrických obvodů grafitového kelímku, a to cívky (induktoru), vsázky a stínícího vodivého pláště. Indexem 1 jsou označeny parametry týkající se induktoru, index 2 patří ke vsázce a index 3 ke stínění.

Cívka má vnitřní průměr d_1 , stínící plášť d_3 a d_2 je vnější průměr vsázky. Délky jednotlivých částí indukční grafitové pece jsou l_1 , l_2 a l_3 .



Obr. 17: Indukční kelímková pec s vodivým kelímkem [2]

Pokud bude cívka protékána střídavým proudem, začnou se ve vsázce a ve stínění indukovat proudy. Skutečné obvody s prostorově rozloženými proudy nahradíme třemi válcovými tloušťkami, jak je naznačeno na obr. 18.



Obr. 15: Tři válce nulové tloušťky [5]

Průměry náhradních válců určíme za vztahů (2.1), (2.2) a (2.3). Hodnota d_c značí náhradní průměr cívky, d_v náhradní průměr vsázky a d_s náhradní průměr stínícího pláště.

$$d_c = d_1 + a_1 \quad (2.1)$$

$$d_v = d_2 - a_2 \quad (2.2)$$

$$d_s = d_3 + a_3 \quad (2.3)$$

Tyto rovnice platí za předpokladu, že $a_1 \ll r_1$, $a_2 \ll r_2$ a $a_3 \ll r_3$, což je pro tavicí peci zpravidla splněno. Výrazy a_1 , a_2 a a_3 jsou označeny hloubky vniku naindukovaných proudů v jednotlivých částech indukční pece, které určíme ze vztahu:

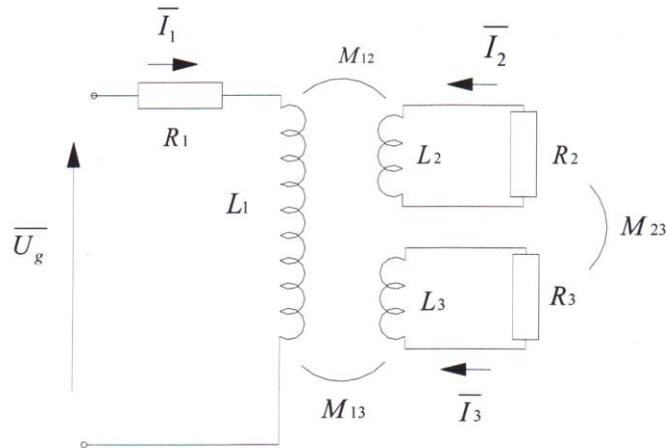
$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \mu_r}} \quad (2.4)$$

Kde jednotlivé symboly značí:

- $\gamma [Sm^{-1}]$ měrnou elektrickou vodivost materiálu, $\gamma = \frac{1}{\rho}$
- $\mu_0 [Hm^{-1}]$ permeabilita vakua, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$
- $\mu_r [-]$ relativní permeabilita příslušného materiálu

a $\omega = 2\pi f$, kde f je frekvence napájecího proudu.

Délky válců náhradního uspořádání zůstávají beze změny a mají tudíž hodnoty l_1 , l_2 a l_3 . Elektrické schéma, které odpovídá náhradnímu uspořádání tří sousedních válců nulové tloušťky, je znázorněno na obr. 19:



Obr. 19: Náhradní uspořádání tří sousedních válců – elektrické schéma [5]

V tomto schématu jsou jako R_1 , R_2 , R_3 označeny činné odpory a jako L_1 , L_2 , L_3 vlastní indukčnosti všech tří částí obvodu, M_{12} , M_{13} , M_{23} značí vzájemné indukčnosti, $M_{12} = \kappa_{12}\sqrt{L_1 \cdot L_2}$, $M_{13} = \kappa_{13}\sqrt{L_1 \cdot L_3}$ a $M_{23} = \kappa_{23}\sqrt{L_2 \cdot L_3}$. κ_{12} , κ_{13} , κ_{23} jsou součinitele vzájemné vazby mezi obvody. Efektivní hodnoty proudů protékajících jednotlivými obvody jsou značeny \bar{I}_1 , \bar{I}_2 a \bar{I}_3 . \bar{U}_g je napětí generátoru, ze kterého je tavicí pec napájena. Obvody jsou indukčně spřažené, proto je nutné impedance vsázky a stínění přepočítat na stranu cívky.

Při výpočtu ze tří rovnic sestavených pomocí 2. Kirchhoffova zákona:

$$\bar{U}_g = \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 + j\omega M_{12} \cdot \bar{I}_2 + j\omega M_{13} \cdot \bar{I}_3 \quad (2.5)$$

$$0 = \bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_2 + j\omega M_{23} \cdot \bar{I}_3 + j\omega M_{12} \cdot \bar{I}_1 \quad (2.6)$$

$$0 = \bar{Z}_3 \cdot \bar{I}_3 + j\omega M_{13} \cdot \bar{I}_1 + j\omega M_{23} \cdot \bar{I}_2 \quad (2.7)$$

kde impedance všech tří obvodů jsou:

$$\bar{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (2.8)$$

$$\bar{Z}_2 = R_2 \cdot j\omega L_2 \quad (2.9)$$

$$\bar{Z}_3 = R_3 \cdot j\omega L_3 \quad (2.10)$$

Z rovnice (2.7) vyjádříme proud \bar{I}_3 a dosadíme do rovnice (2.5) a (2.6). Dostaneme výrazy:

$$\bar{U}_g = \left(\bar{Z}_1 + \frac{\omega^2 M_{13}^2}{\bar{Z}_3} \right) \cdot \bar{I}_1 + \left(j\omega M_{12} + \frac{\omega^2 M_{13} M_{23}}{\bar{Z}_3} \right) \cdot \bar{I}_2 \quad (2.11)$$

$$0 = \left(\bar{Z}_2 + \frac{\omega^2 M_{23}^2}{\bar{Z}_3} \right) \cdot \bar{I}_2 + \left(j\omega M_{12} + \frac{\omega^2 M_{13} M_{23}}{\bar{Z}_3} \right) \cdot \bar{I}_1 \quad (2.12)$$

Pro zjednodušení označme:

$$\bar{K}_1 = \left(\bar{Z}_1 + \frac{\omega^2 M_{13}^2}{\bar{Z}_3} \right), \bar{K}_2 = \left(\bar{Z}_2 + \frac{\omega^2 M_{23}^2}{\bar{Z}_3} \right), \bar{K}_3 = \left(j\omega M_{12} + \frac{\omega^2 M_{13} M_{23}}{\bar{Z}_3} \right)$$

Potom rovnice (2.5) a (2.6) budou mít tvar:

$$\bar{U}_g = \bar{K}_1 \bar{I}_1 + \bar{K}_3 \bar{I}_2 \quad (2.13)$$

$$0 = \bar{K}_2 \bar{I}_2 + \bar{K}_3 \bar{I}_1 \quad (2.14)$$

$$\bar{I}_2 = -\frac{\bar{K}_3}{\bar{K}_2} \cdot \bar{I}_1 \quad (2.15)$$

$$\bar{U}_g = \left(\bar{K}_1 - \frac{\bar{K}_3^2}{\bar{K}_2} \right) \cdot \bar{I}_1 \quad (2.16)$$

Pokud bychom tento výraz dále upravovali, došli bychom k nepřehlednému výsledku. Proto je lepší před dalšími úpravami zhodnotit, zda některé veličiny nejsou v porovnání s ostatními zanedbatelné. Touto úvahou dojdeme k závěru, že hodnoty R_1 a R_3 můžeme zanedbat, neboť u tavicích pecí většinou platí. Že $R_1 < \omega L_1$ a $R_3 < \omega L_3$. U vsázky nemůžeme činný odpor oproti induktivní reaktanci zanedbat. Po dalších úpravách dojdeme k výrazu pro napětí generátoru:

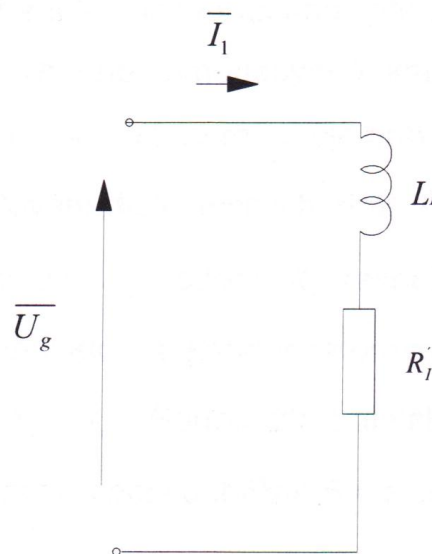
$$\bar{U}_g = \left[\frac{L_1}{L_2} \cdot \psi_{12}^2 \cdot R_2 + j\omega L_1 \cdot (1 - \varepsilon) \right] \cdot \bar{I}_1 = [R_1 + j\omega L_1] \cdot \bar{I}_1 = \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 \quad (2.17)$$

$$\psi_{12} = \frac{\kappa_{12} - \kappa_{13} \cdot \kappa_{23}}{1 - \kappa_{23}^2} \quad (2.18)$$

$$\psi_{13} = \frac{\kappa_{13} - \kappa_{12} \cdot \kappa_{23}}{1 - \kappa_{23}^2} \quad (2.19)$$

$$\varepsilon = \kappa_{12} \cdot \psi_{12} + \kappa_{13} \cdot \psi_{13} = \frac{\kappa_{12}^2 + \kappa_{13}^2 - 2\kappa_{12} \cdot \kappa_{13} \cdot \kappa_{23}}{1 - \kappa_{23}^2} \quad (2.20)$$

Tímto jsme převedli impedance vsázky a stínění na stranu induktoru, a dostáváme tak nové náhradní elektrické schéma, které je na obr. 17.



Obr. 20: Elektrické schéma [5]

Protože jsme zanedbali činné odpory induktoru R_l a stínění R_3 , představuje hodnota R_l' pouze činný odpor vsázky převedený na stranu induktoru:

$$R_l' = \left(\frac{L_1}{L_2} \right) \cdot \psi_{12}^2 \cdot R_2 \quad (2.21)$$

Na obr. 17 je výsledná indukčnost L_l dána výrazem:

$$L_l = L_1 \cdot (1 - \varepsilon) \quad (2.22)$$

Reaktance $\omega L_l = \omega L_1 \cdot (1 - \varepsilon)$ je tedy vlastní reaktance pecní cívky zmenšená o převedené hodnoty reaktancí vsázky a stínění. Pro přesnější výpočet je vhodné do náhradního schématu opět zařadit odpor R_l induktoru. Pak $R_l = R_l' + R_l$ a tím dostáváme impedanci $\bar{Z}_l = R_l + j\omega L_l$. Tato impedance má poměrně malou reálnou složku, z čehož vyplývá, že účinník $\cos \varphi$ pecní cívky je malý:

$$\cos \varphi = \frac{R_l}{Z_l} = \frac{R_l}{\sqrt{R_l^2 + (\omega L_l)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_l^2}} = \frac{1}{Q_l} \quad (2.23)$$

$$\text{Kde } Q_l = \frac{\omega L_l}{R_l} \quad (2.24)$$

Proud \bar{I}_1 , který prochází induktorem, má tedy velkou jalovou složku oproti složce reálné a zdroj proudu je nucen dodávat velké množství jalové energie. Aby se zabránilo tomuto nežádoucímu přenosu jalové energie, připojuje se paralelně k induktoru vhodně dimenzovaná kapacita C , pomocí které se vytvoří oscilační obvod (L_l, C, R_l) , který rezonuje právě na frekvenci přiváděného proudu.

Pro respektování dielektrických ztrát P_k v kondenzátoru C zavádíme do náhradního schématu odpor R_k , odpor R_v respektuje ztráty, které vznikají v pásovém vedení spojujícím induktor a kondenzátorovou baterii. Na obr. 18. a je vyznačen výsledný odpor $R_c = R_k + R_v$. Součet ztrát dielektrických P_k a ztrát P_v v pásovém vedení tvoří u tavicích pecí na ocel přibližně 5% z celkového příkonu P_g a je tedy dán výrazem:

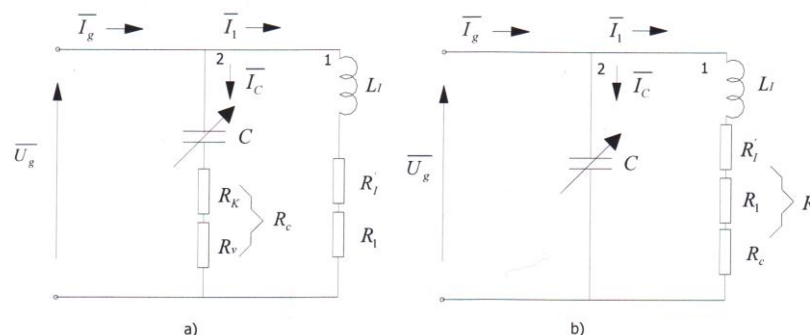
$$P_{cv} = P_k + P_v = 0,05 \cdot P_g \quad (2.25)$$

Pokud odpor R_c přemístíme ve schématu na obr. 18. a z větve 2 do větve 1, nedopustíme se chyby větší než 1% a navíc se nám schéma velmi zjednoduší. Dostaneme tak elektrické schéma, které je na obr. 18. b, v němž jsou všechny činné odpory zařazeny ve větvi 1, odpor R_l je dán výrazem:

$$R_l = R_l' + R_l + R \quad (2.26)$$

Ve větvi 2 je zařazena pouze kapacita C , jejíž velikost určíme ze vztahu:

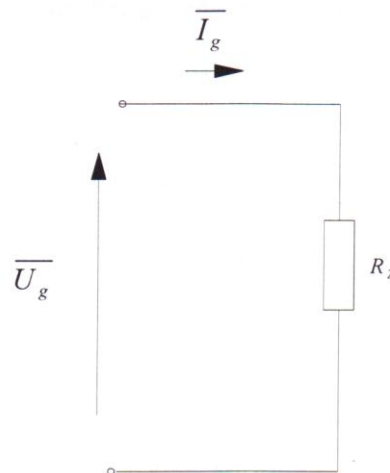
$$C = \frac{L_l}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} \quad (2.27)$$



Obr. 21: Elektrické schéma [5]

V případě vyladěného oscilačního obvodu (L_I, C, R_I) dodává zdroj do obvodu pouze činný příkon, proud \bar{I}_g má pouze reálnou složku a celý obvod se vůči zdroji jeví pouze jako činný zatěžovací odpor R_z . Tento obvod je naznačen na obr. 19. Hodnotu zatěžovacího odporu R_z určíme z výrazu:

$$R_z = \frac{L_I}{C \cdot R_I} \quad (2.28)$$



Obr. 22: Vyladěný oscilační obvod [5]

4.1.2 Základní rozměry vsázky, induktoru a stínění

Při výpočtu základních rozměrů hlavních částí indukční kelímkové pece vycházíme z hmotnosti vsázky. Výsledkem podílu hmotnosti a její měrné hmotnosti je objem vsázky, který je hlavním údajem pro určení vnitřního objemu kelímku. Vnitřní prostor kelímku uvažujeme jako válec o středním průměru d_2 . Volbou vhodného poměru délky a průměru vsázky dostaneme rozměry válcové vsázky. Pro praktické účely se u menších pecí volí poměr $\frac{d_2}{l_2}$ asi 0,7 a u velkých pecí asi 0,8. Při určování těchto hodnot bylo uvažováno jak množství elektromagnetické energie, které je vsázka schopna absorbovat svým povrchem, tak tepelné ztráty, které naopak povrchem vsázky unikají. Vnitřní průměr induktoru d_1 obdržíme tak, že k průměru vsázky d_2 přičteme dvojnásobek tloušťky kelímku. Délka induktoru, navinutého většinou z měděného dutého vodiče obdélníkového průřezu, bývá větší než délka vsázky, y to zpravidla tak, že $l_1 = 1,10 \cdot l_2$.

Průměr vodivého stínícího pláště d_3 se, s ohledem na ztráty v tomto plášti vzniklé, volí jako dvojnásobek vnitřního průměru cívky, tedy $d_3 = 2 \cdot d_1$. Šířka stěny stínění by měla mít optimální tloušťku $\delta_3 = \frac{\pi}{2} \cdot a_3$. Materiálem pro vodivý stínící plášť bývá měď nebo dural. Pro délku pláště zpravidla platí vztah $l_3 = 1,20 \cdot l_1$

4.1.3 Vlastní a vzájemné indukčnosti

K dalšímu výpočtu je potřebné určit vlastní a vzájemné indukčnosti všech tří částí elektrického obvodu, které jsme převedli na náhradní souosé válce nulové tloušťky. Permeabilitu uvnitř induktoru uvažujeme o hodnotě $\mu_r = 1$. Výrazy pro vlastní indukčnosti mají tvar:

$$L_1 = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_1^2}{l_1} \cdot \alpha_1 \quad (2.29)$$

$$L_2 = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_v}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_2^2}{l_2} \cdot \alpha_2 \quad (2.30)$$

$$L_3 = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_s}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_3^2}{l_3} \cdot \alpha_3 \quad (2.31)$$

Výrazem N_1 je dán počet závitů induktoru. Jeho hodnotu budeme znát až na konci výpočtu. N_2, N_3 značí počty závitů vsázky a stíněné. Obě tyto části mají samozřejmě pouze jeden závit, takže $N_2 = N_3 = 1$. Součinitelé α_1, α_2 a α_3 (tzv. Nagaoka) se odečítají z tabulky, např. z tabulky 1 v příloze 1. Jejich hodnota je závislá na poměru $\left(\frac{d_c}{l_1}\right)$ pro α_1 , $\left(\frac{d_v}{l_2}\right)$ pro α_2

a $\left(\frac{d_s}{l_3}\right)$ pro α_3 .

Pro výpočet vzájemných indukčností platí výrazy:

$$M_{12} = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_v}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_1 \cdot N_2}{l_2} \cdot F_{12} \quad (2.32)$$

Obdobně pro M_{12}, M_{23} .

Součinitele vzájemné vazby mezi jednotlivými obvody určíme z výrazů:

$$\kappa_{12}^2 = \frac{M_{12}^2}{L_1 \cdot L_2} = \left(\frac{d_v}{d_c}\right)^2 \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{F_{12}^2}{\alpha_1 \cdot \alpha_2} \quad (2.33)$$

$$\kappa_{13}^2 = \left(\frac{d_c}{d_s}\right)^2 \cdot \frac{l_3}{l_1} \cdot \frac{F_{13}^2}{\alpha_1 \cdot \alpha_3} \quad (2.34)$$

$$\kappa_{23}^2 = \left(\frac{d_v}{d_s}\right)^2 \cdot \frac{l_3}{l_2} \cdot \frac{F_{23}^2}{\alpha_2 \cdot \alpha_3} \quad (2.35)$$

Součinitele F_{12} , F_{13} a F_{23} můžeme odečíst z tabulky tab. 3 v příloze [1] nebo určit podle vztahu:

$$F_{12} = \frac{l_2}{\sqrt{l_1^2 + d_c^2}} \cdot \left[1 + \frac{d_c^2 \cdot l_2^2}{8(l_1^2 + d_c^2)^2} \cdot \left(3 \frac{d_v^2}{l_2^2} - 4 \right) + \frac{d_c^2 \cdot l_1^2 \cdot l_2^2}{32(l_1^2 + d_c^2)^4} \cdot \left(3 \frac{d_c^2}{l_1^2} - 4 \right) \cdot \left(\frac{5}{2} - \frac{d_v^4}{l_2^4} - 10 \frac{d_v^2}{l_2^2} + 4 \right) \right] \quad (2.36)$$

Analogicky pro F_{13} a F_{23} .

Jejich hodnoty jsou závislé na poměrech $\left(\left(\frac{d_c}{l_1} \right), \left(\frac{d_v}{l_2} \right), \left(\frac{l_1}{l_2} \right) \right)$ pro F_{12} , na

$\left(\left(\frac{d_s}{l_3} \right), \left(\frac{d_c}{l_1} \right), \left(\frac{l_3}{l_1} \right) \right)$ pro F_{13} a na $\left(\left(\frac{d_s}{l_3} \right), \left(\frac{d_v}{l_2} \right), \left(\frac{l_3}{l_2} \right) \right)$ pro F_{23} . Ve výrazu (2.36) můžeme

část začínající výrazem $\frac{d_c^2 \cdot l_1^2 \cdot l_2^2}{32(l_1^2 + d_c^2)^4}$ zanedbat.

Z uvedených výrazů je patrné, že součinitele vazby mezi obvody nezávisí na počtu závitů v induktoru N_1 . To je velmi výhodné, neboť je můžeme vypočítat již nyní, kdy skutečný počet závitů ještě neznáme.

4.1.4 Činné odpory

Činný odpor vsázky R_2 a činný odpor stínění R_3 se u tavicích pecí zpravidla rovnají odporu povrchové vrstvy o tloušťce rovné hloubce vniku a_2 , resp. a_3 .

$$R_2 = \rho_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_v}{a_2 \cdot l_2} \quad (2.37)$$

$$R_3 = \rho_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_s}{a_3 \cdot l_3} \quad (2.38)$$

Odpor induktoru určíme podle vztahu:

$$R_1 = \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_c \cdot N_1^2}{a_1 \left(l_1 - \frac{U_g}{15000} \right)} \quad (2.39)$$

Délka cívky je v tomto výrazu redukována součtem všech izolačních mezer mezi závitů. Je uvažováno namáhání izolace napětím 15000 Vm^{-1} .

4.1.5 Potřebný počet závitů induktoru

Pro výpočet použijeme náhradní elektrické schéma z obr.16b. Uvažujeme oscilační obvod (L_I, C, R_I) vyladěný pro kmitočet přiváděného proudu. Zatěžovací odpor R_z , který tento vyladěný obvod respektuje, musí mít velikost, aby mohl ze zdroje odebírat právě plný výkon P_g . Z obr. 16b můžeme napsat 2 rovnice potřebné pro zjištění počtu závitů N_I :

$$1) \quad U_g = Z_I \cdot I_1 = \sqrt{R_I^2 + (\omega L_I)^2} \cdot I_1 = \omega L_I \cdot I_1 = \omega L_I \cdot (1 - \varepsilon) \cdot I_1 \quad (2.40)$$

(U_g a I_1 jsou efektivní hodnoty)

U ocelářských pecí mívá R_I^2 oproti $(\omega L_I)^2$ zanedbatelné velikosti, neboť $R_I^2 < 0,01 \cdot (\omega L_I)^2$. Proto jsme si mohli dovolit výraz (2.40) zjednodušit. Dosadíme do rovnice (2.40) za L_I , dostaneme:

$$U_g = \omega \mu_0 \pi \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_I^2 \cdot \alpha_1}{l_1} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot I_1 = k_1 \cdot N_I^2 \cdot I_1 \quad (2.41)$$

$$\text{kde } k_1 = \omega \mu_0 \pi \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot \frac{\alpha_1}{l_1} \quad (2.42)$$

je pomocná konstanta, kterou můžeme vypočítat bez znalosti počtu závitů N_I .

- 2) Správně navržená pec odebírá ze zdroje plný výkon P_g . Ten se spotřebuje v činných odporech $R_I = R'_I + R_1 + R_c$, kterými prochází proud I_1 . Jak již bylo dříve uvedeno, na pokrytí dielektrických ztrát v kondenzátoru C a na ztráty v pásovém vedení, tedy na ztráty na odporu R_c , je potřeba asi 5% celkového příkonu P_g . Z toho vyplývá, že zbývajících 95% příkonu se spotřebuje v odporech $R'_I + R_1$.

$$P_R = 0,95 \cdot P_g = (R'_I + R_1) \cdot I_1^2 \quad (2.43)$$

Dosazením za R'_I z (2.21) a za R_1 z (2.39) dostaneme rovnici:

$$P_R = \left[\rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_c \cdot N_I^2}{a_1 \left(l_1 - \frac{U_g}{15000} \right)} + \psi_{12}^2 \cdot \left(\frac{d_c}{d_v}\right)^2 \cdot \frac{l_2}{l_1} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \cdot \rho_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_v}{a_2 \cdot l_2} \cdot N_I^2 \right] \cdot I_1^2 = k_2 \cdot N_I^2 \cdot I_1^2, \quad \text{kde}$$

pomocná konstanta k_2 je dána výrazem:

$$k_2 = \pi \cdot d_c \cdot \left[\frac{\rho_1}{a_1 \left(l_1 - \frac{U_g}{15000} \right)} + \rho_2 \cdot \psi_{12}^2 \cdot \frac{d_c}{d_v} \cdot \frac{1}{l_1 \cdot a_2} \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right] \quad (2.45)$$

Řešením rovnic (2.41) a (2.44) dostaneme hledaný proud I_1 a počet závitů induktoru N_1 .

$$I_1 = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{P_R}{U_g} \quad (2.46)$$

$$N_1^2 = \frac{k_2}{k_1^2} \cdot \frac{U_g^2}{P_R} = \frac{U_g}{k_1 \cdot I_1} \quad (2.47)$$

4.1.6 Elektrická účinnost

Výkon P_g dodávaný ze zdroje se celý spotřebuje na odporu R_l . Část P_g pokryje ztráty P_{cv} v kondenzátorové baterii a v pásovém vedení a ztráty P_1 v induktoru. Zbytek tvoří užitečný výkon P_2 , který je zaveden do vsázky. Ztráty ve stínícím plášti můžeme zanedbat, neboť bývají menší než 1% z P_g .

$$P_g = R_l \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + R_l' \cdot I_1^2 + R_c \cdot I_1^2 = P_1 + P_2 + P_{cv} \quad (2.48),$$

Výsledná elektrická účinnost indukční kelímkové pece je dána vztahem:

$$\eta_v = \frac{P_2}{P_g} = \frac{R_l}{R_1 + R_l' + R_c} \quad (2.49)$$

Pokud bychom chtěli určit pouze elektrickou účinnost samotné cívky, použijeme vztah:

$$\eta_1 = \frac{P_2}{P_1 + P_2} = \frac{R_l'}{R_1 + R_l'} \quad (2.50)$$

5 Návrh tavicího zařízení na tavení 100 kg stříbra

Mým úkolem je stanovit základní geometrické a elektrické parametry tavicího zařízení na tavení 100 kg stříbra. Jelikož má indukční pec s keramickým kelímkem malou elektrickou účinnost, tak jsem vybrala právě pec s kelímkem grafitovým.

5.1 Geometrické parametry

Při výpočtu základních rozměrů hlavních částí indukční kelímkové pece vycházíme z hmotnosti vsázky, v mém případě ze 100 kg stříbra. Výsledkem podílu hmotnosti vsázky a její měrné hmotnosti je objem vsázky, který je hlavním údajem pro určení vnitřního objemu kelímku.

$$V = \frac{m_{Ag}}{S} = \frac{100}{10500} = 0.009523809m^3$$

Vnitřní prostor kelímku uvažujeme jako válec o středním průměru d_2 . Volbou vhodného poměru délky a průměru vsázky dostaneme rozměry válcové vsázky. Pro praktické účely se u menších pecí volí poměr $\frac{d_2}{l_2}$ asi 0,7 a u velkých pecí asi 0,8. My zvolíme právě 0,8.

$$V = \pi \cdot \left(\frac{d_2}{2}\right)^2 \cdot \frac{d_2}{0.8} = \frac{\pi d_2^3}{3.2} = 0.98175 \cdot d_2^3 = 0.009523809m^3, \text{ z toho}$$

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{V}{0.98175}} = \sqrt[3]{\frac{0.009523809}{0.98175}} = 0,2133m$$

$$l_2 = \frac{d_2}{0,8} = \frac{0,2133}{0,8} = 0,2667m$$

Hloubka vniku naindukovaných proudů do vsázky:

$$a_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,92 \cdot 10^{-8}}{2\pi \cdot 4000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} = 1,10 \cdot 10^{-3}m$$

Při určování těchto hodnot bylo uvažováno jak množství elektromagnetické energie, které je vsázka schopna absorbovat svým povrchem, tak tepelné ztráty, které naopak povrchem vsázky unikají.

Vnitřní průměr induktoru d_1 obdržíme tak, že k průměru vsázky d_2 přičteme dvojnásobek tloušťky stěny kelímku.

$$d_1 = d_2 + 2\check{s}_3 = 0,2133 + 2 \cdot 0,00033 = 0,219m$$

$$\check{s}_3 = 3a_3 = 3 \cdot 0,0011 = 3,3 \cdot 10^{-3}m$$

$$a_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_1}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,92 \cdot 10^{-8}}{2\pi \cdot 4000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}} = 1,10 \cdot 10^{-3} m$$

Délka induktoru, navinutého většinou z měděného dutého vodiče obdélníkového průřezu, bývá větší než délka vsázky, a to zpravidla tak, že

$$l_1 = 1,10 \cdot l_2 = 1,10 \cdot 0,2667 = 0,2934 m$$

Průměr vodivého stínícího pláště d_3 se s ohledem na ztráty v tomto plášti vzniklé, volí jako dvojnásobek vnitřního průměru cívky, tedy:

$$d_3 = 2 \cdot d_1 = 2 \cdot 0,331 = 0,662 m$$

Náhradní průměr cívky:

$$d_c = d_1 + a_1 = 0,219 + 0,0011 = 0,220 m$$

$$\text{Optimální tloušťka aktivní stěny cívky } z_1 = \frac{\pi}{2} \cdot a_1 = \frac{\pi}{2} \cdot 0,0011 = 0,001723 m = 0,1723 cm$$

Materiálem pro vodivý stínící plášť bývá měď nebo dural. Pro délku pláště zpravidla platí vztah:

$$l_3 = 1,20 \cdot l_1 = 1,20 \cdot 0,02934 = 0,3521 m$$

Hloubka vniku stínění je stejná jako hloubka vniku induktoru, neboť jsou stínění i cívka zhotoveny ze stejného materiálu, tedy:

$$a_3 = a_1 = 1,10 \cdot 10^{-3} m$$

Tabulka 3

frekvence [Hz]		4000	20000	40000	150000
měrný odpor grafitu	$\rho_2[\Omega m]$	0,0000014	0,0000014	0,0000014	0,0000014
permeabilita vakua	$\mu_0[Hm^{-1}]$	1,25664E-06	1,25664E-06	1,25664E-06	1,25664E-06
hloubka naindukovaných proudů	$a_2[m]$	0,009415722	0,004210839	0,002977513	0,001537581
tloušťka stěny kelímku	$3a_2[m]$	0,028247167	0,012632517	0,008932539	0,004612743
vnitřní poloměr induktoru	$r_1[m]$	0,086	0,086	0,086	0,086
tloušťka izolace	[m]	0,005	0,005	0,005	0,005
max. možný poloměr vsázky	$r_2[m]$	0,0527528	0,068367468	0,072067451	0,076387252
výška vsázky	$l_2[m]$	0,18	0,18	0,18	0,18
max. možný objem vsázky	$V[m^3]$	0,001573669	0,002643147	0,002936978	0,003299622
hustota mědi S_{Cu}	$S_{Cu}[kgm^{-3}]$	8930	8930	8930	8930
hustota hliníku S_{Al}	$S_{Al}[kgm^{-3}]$	2700	2700	2700	2700
Hmotnost Cu pro daný objem	$m_{Cu}[kg]$	14,05	23,6	26,23	29,47
hmotnost Al pro daný objem	$m_{Al}[kg]$	4,25	7,14	7,93	8,91

5.2 Elektrické parametry

Provedu elektrický výpočet pece s grafitovým kelímkem a se stíněním ze svazků transformátorových plechů. Uvažuji nejprve frekvenci 4000 Hz.

Parametry cívky jsou stejné jako při výpočtu v kapitole 4.1.

- Měrný elektrický odpor $\rho_1 = 1,92 \cdot 10^{-8} \Omega m$
- Vnitřní průměr induktoru $d_1 = 0,219m$
- Výška induktoru $l_1 = 0,293m$
- Hloubka vniku naindukovaných proudů $a_1 = 1,10 \cdot 10^{-3} m$
- Náhradní průměr cívky $d_c = 0,220m$

Za vsázku v tomto považuji grafitový kelímkem s těmito parametry:

- Měrný elektrický odpor $\rho_2 = 1,4 \cdot 10^{-6} \Omega m$
- Vnější průměr kelímku $d_2 = 0,2133m$
- Výška kelímku $l_2 = 0,2667m$

Hloubka naindukovaných proudů:

$$a_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_2}{\omega \cdot \mu_0 \mu_r}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-6}}{2\pi \cdot 4000 \cdot 4\pi \cdot 1}} = 9,42 \cdot 10^{-3} m$$

Tloušťka stěny kelímku:

$$3 \cdot a_2 = 3 \cdot 9,42 \cdot 10^{-3} = 2,826cm$$

Náhradní průměr:

$$d_v = d_2 - a_2 = 0,2133 - 0,00942 = 0,2038m$$

Nyní z tabulky 1 v příloze 1 určím součinitele α_1 a α_2 :

$$\alpha_1 = f\left(\frac{d_c}{l_1}\right) = f(0,751) = 0,7478$$

$$\alpha_2 = f\left(\frac{d_v}{l_2}\right) = f(0,764) = 0,7452$$

Podle vztahu (2.36) určím součinitele F_{12} :

$$F_{12} = f\left(\frac{d_c}{l_1}, \frac{d_v}{l_2}, \frac{l_1}{l_2}\right) = 0,6877$$

Stínění svazky transformátorových plechů způsobí nárůst magnetického toku buzeného cívkou, neboť jeho vlivem dojde ke snížení magnetického odporu. To se projeví zvětšením indukčností L_1 , L_2 a M_{12} . Do výrazů pro výpočet těchto indukčností je proto nutné dosadit součinitele α_1' , α_2' a F_{12}' , které toto zvýšení respektují:

$$\alpha_1' = 1,14 \cdot \alpha_1 = 1,14 \cdot 0,7478 = 0,8525$$

$$\alpha_2' = 1,14 \cdot \alpha_2 = 1,14 \cdot 0,7452 = 0,8495$$

$$F_{12}' = 1,1 \cdot F_{12} = 1,1 \cdot 0,6877 = 0,7565$$

Součinitel vazby mezi jednotlivými obvody je roven:

$$\kappa_{12}^2 = \left(\frac{d_v}{d_c}\right)^2 \cdot \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{F_{12}'^2}{\alpha_1' \cdot \alpha_2'} = \left(\frac{0,2038}{0,2200}\right)^2 \cdot \frac{0,2930}{0,2667} \cdot \frac{0,7565^2}{0,8525 \cdot 0,8495} = 0,7782$$

$$\kappa_{12} = 0,8821$$

Nyní určím konstanty k_1 a k_2 :

$$k_1 = \omega \mu_0 \pi \cdot (1 - \kappa_{12}^2) \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot \frac{\alpha_1'}{l_1} =$$

$$= 2\pi \cdot 4000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot (1 - 0,7782) \cdot \left(\frac{0,220}{2}\right)^2 \cdot \frac{0,8525}{0,293} = 7,7 \cdot 10^{-4}$$

$$k_2 = \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_c}{a_1 \left(l_1 - \frac{U_g}{15000}\right)} + \rho_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_v}{a_2 \cdot l_2} \cdot \left(\frac{F_{12}'}{\alpha_2'}\right)^2 =$$

$$= 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0,220}{1,1 \cdot 10^{-3} \left(0,293 - \frac{500}{15000}\right)} + 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 0,2038}{9,42 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2667} \cdot \left(\frac{0,7565}{0,8495}\right)^2 = 3,3 \cdot 10^{-4}$$

Ztráty P_{cv} v kondenzátorové baterii a ve spojovacím pásovém vedení odhaduji na 6% z příkonu P_g .

$$P_{cv} = 0,06 \cdot 50000 = 3000W$$

Do cívk je tedy přiváděn výkon:

$$P_R = 0,94 \cdot P_g = 0,94 \cdot 50000 = 47000W$$

Dosadím do vztahu (2.46) pro výpočet proudu cívk:

$$I_1 = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{P_R}{U_g} = \frac{7,7 \cdot 10^{-4}}{3,3 \cdot 10^{-4}} \cdot \frac{47000}{500} = 219,93A$$

Hledaný počet závitů vypočtu ze vztahu (2.47):

$$N_1^2 = \frac{k_2}{k_1^2} \cdot \frac{U_g^2}{P_R} = \frac{U_g}{k_1 \cdot I_1} = \frac{500}{7,7 \cdot 10^{-4} \cdot 219,93} = 2952,53$$

$$N_1 = 54,33 \cong 55$$

$$l_1 \Rightarrow 55 \text{ závitů} \Rightarrow \text{na 1 závit bez izolace } \frac{29,34}{55} = 0,58 \text{ cm}$$

Nyní, když už znám počet závitů induktoru, můžu určit vlastní indukčnosti a činné odpory:

$$L_1 = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot \frac{N_1^2}{l_1} \cdot \alpha_1' = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,202}{2}\right)^2 \cdot \frac{55^2}{0,293} \cdot 0,8525 = 2,26 \cdot 10^{-4} \text{ H}$$

$$L_2 = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_v}{2}\right)^2 \cdot \frac{\alpha_2'}{l_2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,2038}{2}\right)^2 \cdot \frac{0,8495}{0,2667} = 8,3 \cdot 10^{-8} \text{ H}$$

$$R_1 = \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_c \cdot N_1^2}{a_1 \left(l_1 - \frac{U_g}{15000}\right)} = 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0,22 \cdot 55^2}{1,1 \cdot 10^{-3} \left(0,293 - \frac{500}{15000}\right)} = 0,140 \Omega$$

$$R_2 = \rho_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_v}{a_2 \cdot l_2} = 1,4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 0,2038}{9,42 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2667} = 3,56 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$L_l = L_1 \cdot (1 - \kappa_{12}^2) = 2,26 \cdot 10^{-4} \cdot (1 - 0,7782) = 5,01 \cdot 10^{-5} \text{ H}$$

$$\omega L_l = 1,26 \Omega$$

$$p^2 = \kappa_{12}^2 \cdot \frac{L_1}{L_2} = 0,7782 \cdot \frac{2,26 \cdot 10^{-4}}{8,3 \cdot 10^{-8}} = 2118,95$$

$$p = \sqrt{2118,95} = 46,03$$

Celkový odpor R_l vypočítám ze vztahu:

$$R_l = R_1 + p^2 R_2 + R_c = \frac{P_g}{I_1^2} = \frac{50000}{219,93^2} = 1,033 \Omega$$

kde $R_c = R_k + R_v$.

Hledaná kapacita má tedy hodnotu:

$$C = \frac{L_l}{R_l^2 + (\omega L_l)^2} = \frac{5,01 \cdot 10^{-5}}{1,033^2 + 1,26^2} = 1,89 \cdot 10^{-5} \text{ F}$$

Nyní musím provést kontrolu dielektrických ztrát v kondenzátorové baterii, abych ověřila správnost mého odhadu. Nejprve určím jakost obvodu Q_l a proud v kondenzátorové baterii:

$$Q_l = \frac{\omega L_l}{R_l} = \frac{1,26}{1,033} = 1,219$$

$$I_c = I_1 \cdot \frac{Q_1}{\sqrt{1+Q_1^2}} = 219,93 \cdot \frac{1,219}{\sqrt{1+1,219^2}} = 170,1A$$

Ztrátový úhel uvažuji $tg \delta = 3,4 \cdot 10^{-3}$. Potom ztráty v kondenzátorové baterii jsou rovny:

$$P_k = I_c \cdot U_g \cdot tg \delta = 170,1 \cdot 500 \cdot 3,40 \cdot 10^{-3} = 289,17W$$

Celkové ztráty v kondenzátorové baterii a ve spojovacím vedení:

$$P_{cv} = P_k + P_v = 1,1 \cdot P_k = 1,1 \cdot 289,17 = 318,09W$$

Bohužel nedošlo ke shodě. Ztráty P_{cv} v kondenzátorové baterii a ve spojovacím pásovém vedení vyšly mnohem menší, než jsem původně předpokládala, $3000W \neq 318,09W$. Provedu tedy nový odhad těchto ztrát a jejich kontrolu.

Ztráty P_{cv} v kondenzátorové baterii a ve spojovacím pásovém vedení nově odhaduji na 0,7% z příkonu P_g .

$$P_{cv} = 0,009 \cdot P_g = 0,007 \cdot 50000 = 350W$$

$$P_R = 0,991 \cdot P_g = 0,991 \cdot 50000 = 49550W$$

$$I_1 = 231,2A$$

$$N_1^2 = 2808,98$$

$$N_1 = 52,99 \cong 53$$

$$L_1 = 3,29 \cdot 10^{-4} H$$

$$L_2 = 8,3 \cdot 10^{-8} H$$

$$R_1 = 0,130\Omega$$

$$R_2 = 3,56 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$L_l = 6,97 \cdot 10^{-5} H$$

$$\omega L_l = 1,75\Omega$$

$$p^2 = 2400,49$$

$$R_l = 0,626\Omega$$

$$C = 2,68 \cdot 10^{-5} F$$

Nyní musím znovu provést kontrolu dielektrických ztrát v kondenzátorové baterii, abych ověřila správnost mého odhadu. Nejprve určím Q_l a proud v kondenzátorové baterii:

$$Q_l = 1,87$$

$$I_c = 204,06A$$

Ztrátový úhel uvažuji $tg \delta = 3,4 \cdot 10^{-3}$. Potom ztráty v kondenzátorové baterii jsou rovny:

$$P_k = I_c \cdot U_g \cdot tg \delta = 204,06 \cdot 500 \cdot 3,40 \cdot 10^{-3} = 346,90W$$

Celkové ztráty v kondenzátorové baterii a ve spojovacím vedení:

$$P_{cv} = P_k + P_v = 1,10 \cdot P_k = 1,10 \cdot 346,90 = 381,59W$$

Tento výsledek se již dobře shoduje s původním předpokladem, $350W \approx 381,59W$.

Návrh kondenzátorové baterie by však v tomto případě byl velmi problematický, neboť jsem ztráty P_{cv} v kondenzátorové baterii a ve spojovacím vedení jsou při tomto výpočtu rovny 0,7% z příkonu P_g , což je velmi malá hodnota.

Odpor R_c má takovou velikost, že při průchodu proudu I_c v něm vzniknou ztráty

$$P_{cv} = R_c \cdot I_c^2.$$

Z tohoto výrazu mohu určit hodnotu odporu R_c :

$$R_c = \frac{P_{cv}}{I_c^2} = \frac{381,59}{204,06^2} = 9,16 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Teď mohu provést kontrolu $R_l = 0,935\Omega$, které jsem původně určila z P_g a I_1^2 :

$$R_l = R_1 + p^2 R_2 + R_c = 0,130 + 2400,49 \cdot 3,56 \cdot 10^{-4} + 9,16 \cdot 10^{-3} = 0,993\Omega$$

Oba výsledky se dobře shodují.

Navržením správné hodnoty C získávám vyladěný pecní obvod, který se vůči zdroji jeví jako činný zatěžovací odpor R_z :

$$R_z = \frac{L_l}{C \cdot R_l} = \frac{6,97 \cdot 10^{-5}}{2,68 \cdot 10^{-5} \cdot 0,948} = 2,74\Omega$$

Správnost výpočtu ověřím vyčíslením činného výkonu spotřebovaného na odporu R_z .

$$P_z = \frac{U_g^2}{R_z} = \frac{500^2}{2,74} = 91240,87W$$

Nyní mohu určit jednotlivé účinnosti. Součet všech ztrát složeného obvodu:

$$P = P_1 + P_2 + P_{cv} = R_l \cdot I_1^2 = R_1 \cdot I_1^2 + R_l \cdot I_1^2 + R_c \cdot I_1^2 = 6948,95 + 50673,86 + 408,38 = 58031,19W$$

kde P_1 jsou ztráty v cívice a P_2 užitečný výkon ve vsázce.

Výslednou elektrickou účinnost pece určím podle vztahu (2.49):

$$\eta_v = \frac{P_2}{P} = \frac{50673,86}{58031,19} = 0,873 = 87,3\%$$

Při uvažování frekvence 4000Hz mi vyšel potřebný počet závitů induktoru $N_l = 53$.

5.3 Tepelný výpočet

Provedu výpočet tepelných ztrát pro případ tavení stříbra v peci s grafitovým kelímkem. Roztavené stříbro má vyšší teplotu než hliník, tudíž při jeho tavení bude docházet k větším tepelným ztrátám. Nejteplejší část indukční pece je však v tomto případě grafitový kelímkem.

5.3.1 Ohřev grafitového kelímku

Intenzita magnetického pole průchodem stěnou kelímku zmenšuje. Z elektrického výpočtu pece s grafitovým kelímkem vyplynulo, že nejvhodnější by bylo zvolit frekvenci 20000Hz. Tloušťku stěny kelímku jsem zvolila 0,025 m, což je pro danou frekvenci téměř rovno šestinásobku hloubky vniku naindukovaných proudů, viz tabulka 3.

Mohu proto tvrdit, že veškeré teplo vznikne ve stěně kelímku. Do vsázky bude teplo pronikat vedením.

Provedu výpočet ohřevu grafitového kelímku z teploty 20°C na teplotu 1150°C. Nejprve musím určit objemové množství a tím i hmotnost grafitu.

Objem grafitu je tedy:

$$V = 9,523809 \cdot 10^{-3} m^3$$

Grafit má měrnou hmotnost $S = 1750 kg m^{-3}$. Hmotnost kelímku je potom:

$$m = S \cdot V = 1750 \cdot 9,52 \cdot 10^{-3} = 16,6 kg$$

Nyní provedu výpočet pro grafit s těmito parametry:

- Měrná tepelná kapacita $c = 0,708 kJ kg^{-1} K^{-1}$
- Hmotnost $m = 16,6 kg$
- Teplotní rozdíl $\Delta T = T_2 - T_1 = (1150 + 273) - (20 + 273) = 1130 K$
- Výkon do vsázky $P_2 = 50673,86 W$
- Měrné skupenské teplo $l_t = 268 kJ kg^{-1}$

Potřebné teplo:

$$Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta T = 16,6 \cdot 0,708 \cdot 1130 = 13280,66 kJ = kW s = 3,689 kWh$$

$$Q_2 = m \cdot c \cdot \Delta T = 100 \cdot 0,708 \cdot 1130 = 80004 kJ$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = 13280,66 \cdot 10^3 + 80004 \cdot 10^3 = 93284,66 kJ$$

Doba natavení:

$$t = \frac{Q}{P_2} = \frac{93284,66 \cdot 10^3}{50673,86} = 1840 s = 30 \text{ min} = 0,5 h$$

6 Závěry pro praktické využití a hodnocení kritériem 3E

V této diplomové práci jsem se zabývala tematikou indukční kelímkové pece v provedení s keramickým, a hlavně tedy s grafitovým kelímkem, který má mnohem větší elektrickou účinnost a slouží pro tavení dobře elektricky vodivých materiálů, což bylo prioritou pro výběr typu kelímku pro tavení 100 kg stříbra. Stříbro je velice dobře elektricky vodivé. Navrhla jsem tedy geometrické a elektrické parametry tavicího zařízení, konkrétně indukční kelímkové pece s grafitovým kelímkem, pro tavení 100kg stříbra. Pro tavení jsem zvolila frekvenci 4000 Hz, jelikož mi díky výpočtům vyšla jako neoptimálnější pro danou pec a tavený materiál. Při tavení stříbra v indukčním zařízení (4000Hz) s grafitovým kelímkem činí elektrická účinnost 87,3%. Na rozdíl od keramického kelímku, kde bývá elektrická účinnost mnohem nižší, a to přibližně 30%. Navržené tavicí zařízení, tedy pec s grafitovým kelímkem, je tedy vhodná pro tavení 100 kg stříbra. Je důležité ještě říci závěry pro praxi, a to z pohledu hodnocení kritéria 3E, což je zhodnocení z hlediska energetického, ekonomického a ekologického. Co se týká energetického hlediska tak u indukčních pecí s grafitovým kelímkem potřebujeme proudy o mnohem větších kmitočtech, než u pece s nevodivým kelímkem, tj. keramickým. Ekonomicky výhodnější na výrobu zařízení pro tavení materiálů je bez pochyby indukční pec s keramickým kelímkem, ale pokud chceme co nejlépe a nejrychleji roztavit právě dané stříbro, tak musíme samozřejmě investovat více financí do pece s grafitovým kelímkem. Z ekologického hlediska nejsou pece nijak nebezpečné, pouze se musí posléze řešit, jak „zlikvidovat“ staré a opotřebované pece.

Literatura

- [1] Langer, E. – Kožený, J.: Elektrotepelná zařízení indukční. *Základy teorie, výpočty a konstrukce*, Plzeň, VŠSE, 1982
- [2] Langer, E.: Elektrotepelná technika. *Část V. Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení*, Plzeň, Ediční středisko VŠSE, 1975
- [3] Rada, J. a kol.: Elektrotepelná technika. Praha, SNTL, 1985
- [4] Hradílek, Z.: Přednášky – Elektrotepelná technika
- [5] Hájková, K.: Diplomová práce, ZČU-FEL, 2005

Přílohy

Příloha 1

Tabulka 1 – hodnoty součinitele α

d/l	α	d/l	α	d/l	α
0,00	1,000000	0,54	0,806046	1,20	0,647500
0,02	0,991562	0,56	0,800125	1,25	0,638100
0,04	0,983223	0,58	0,794285	1,30	0,629000
0,06	0,974985	0,60	0,788525	1,35	0,620100
0,08	0,966846	0,62	0,782843	1,40	0,611500
0,10	0,958807	0,64	0,777240	1,45	0,603100
0,12	0,950867	0,66	0,771713	1,50	0,595000
0,14	0,943026	0,68	0,766262	1,55	0,587100
0,16	0,935284	0,70	0,760885	1,60	0,579500
0,18	0,927639	0,72	0,755582	1,65	0,572100
0,20	0,920093	0,74	0,750350	1,70	0,564900
0,22	0,912643	0,76	0,745190	1,75	0,557900
0,24	0,905290	0,78	0,740100	1,80	0,551100
0,26	0,898033	0,80	0,735079	1,85	0,544400
0,28	0,890871	0,82	0,730126	1,90	0,537900
0,30	0,883803	0,84	0,725239	1,95	0,531600
0,32	0,876829	0,86	0,720418	2,00	0,525500
0,34	0,869948	0,88	0,715662	2,10	0,513700
0,36	0,863159	0,90	0,710969	2,20	0,502500
0,38	0,856461	0,92	0,706339	2,30	0,491800
0,40	0,849853	0,94	0,701770	2,40	0,481600
0,42	0,843335	0,96	0,697262	2,50	0,471900
0,44	0,836905	0,98	0,692813	3,00	0,429200
0,46	0,830563	1,00	0,688423	3,50	0,394400
0,48	0,824307	1,05	0,677700	4,00	0,365400
0,50	0,818136	1,10	0,667300	5,00	0,319800
0,52	0,812049	1,15	0,657300	10,00	0,203300