

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh experimentálního studeného kelímku**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Evžen VYROUBAL**  
Osobní číslo: **E13N0037P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Návrh experimentálního studeného kelímku**  
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. Proveďte rešerši technologie studeného kelímku pro vysokofrekvenční indukční ohřev. Zaměřte se konstrukční aspekty důležité pro stavbu pece.
2. Formulujte matematický model obecného systému pro indukční ohřev a proveďte jeho teoretický rozbor.
3. Navrhněte základní uspořádání všech důležitých součástí experimentálního zařízení pro tavení nízkoteplotních nemagnetických kovů, které bude využívat technologii studeného kelímku. Stanovte jeho základní parametry.
4. Na základě formulovaného modelu proveďte komplexní návrh všech dílčích součástí experimentálního zařízení a proveďte citlivostní studii provedeného návrhu.
5. Vytvořte výrobní dokumentaci experimentálního zařízení.

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

1. K. Pericleousa, V. Bojarevicsa, G. Djambazova, R.A. Hardingb, M. Wickinsb: Experimental and numerical study of the cold crucible melting process, Applied Mathematical Modelling, 2006
2. S. Matsuzawa, K. Hirata, T. Yoshimura, G. Yoshikawa, F. Miyasaka: Numerical Analysis of Cold Crucible Induction Melting Employing FEM and MPS Method, IEEE Transactions on Magnetics, 2013
3. V. Rudnev, D. Loveless, R. L. Cook, M. Black: Handbook of Induction Heating, CRC Press, 2002

Vedoucí diplomové práce: Ing. František Mach  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014  
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

V předkládané diplomové práci je popsán návrh experimentálního indukční pece s technologií studeného kelímku. Práce je zpracována za účelem objasnění konstrukčních aspektů a návrhu zařízení pro tavení nízkoteplotních, nemagnetických kovů. V této diplomové práci (dále jen DP) je mimo jiné popsán návrh dílčích komponent indukční pece, dále pak zpracována citlivostní analýza hlavních parametrů navrhovaného zařízení a sestavena výrobní dokumentace k výrobě funkčního prototypu výše zmíněného druhu indukční pece.

## **Klíčová slova**

Kelímková indukční pec, studený kelímek, citlivostní analýza, počítačový model, magnetické pole, teplotní pole, Agros2D.

## **Abstract**

This master's thesis describes the design of experimental cold crucible induction melting furnace. The purpose of this master thesis is the clarification of all construction aspects and the design of an experimental induction furnace for melting low-temperature and nonmagnetic metals. Furthermore, the thesis aims to describe the design of all the components used in this experimental project and the sensitivity analysis of the most important components is also discussed. Finally, the production documentation necessary for the production of a functional prototype of the experimental cold crucible melting furnace is constructed.

## **Key words**

Cold crucible induction melting furnace. Design of furnace component. Cold crucible. Sensitivity analysis. Computer model. Electromagnetic field. Thermal field. Agros2D.

## **Prohlášení**

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

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

.....

Podpis

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františkovy Machovi za konzultace, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY INDUKČNÍHO TAVENÍ .....</b>	<b>12</b>
1.1 HISTORIE INDUKČNÍCH TAVÍCÍCH PECÍ .....	12
1.2 SOUČASNÉ VYUŽITÍ METODY TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU .....	13
1.2.1 Vitřifikace jaderného odpadu .....	13
1.2.2 Tavení křemíku pro solární články .....	14
1.2.3 Výroba syntetických diamantů .....	15
<b>2 DRUHY TAVÍCÍCH ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>15</b>
2.1 NEPŘÍMÝ ODPOROVÝ OHŘEV .....	16
2.2 INDUKČNÍ KANÁLOVÁ PEC .....	16
2.3 ELEKTRICKÁ OBLOUKOVÁ PEC .....	16
2.4 INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC .....	17
2.4.1 Rozdělení kelímkových pecí .....	19
2.5 INDUKČNÍ KELÍMKOVÁ PEC S TECHNOLOGIÍ STUDENÉHO KELÍMKU .....	20
2.5.1 Výhody použití studeného kelímku .....	20
2.5.2 Induktorová stěna kelímku .....	22
2.5.3 Segmentová stěna kelímku .....	22
2.5.4 Tavení materiálů s vysokou elektrickou vodivostí .....	22
2.5.5 Tavení materiálů s nízkou elektrickou vodivostí .....	23
2.5.6 Tvar kelímku a uspořádání cívek .....	23
2.6 DRUHY NAPÁJECÍCH ZAŘÍZENÍ INDUKČNÍCH PECÍ .....	25
2.6.1 Frekvenční měniče .....	25
2.6.2 Rotační měniče .....	26
2.6.3 Iontové měniče kmitočtu .....	26
2.6.4 Magnetické násobiče kmitočtu .....	27
2.6.5 Tyristorové měniče kmitočtu .....	27
<b>3 MATEMATICKÝ MODEL PECE .....</b>	<b>28</b>
3.1.1 Matematický model magnetického pole .....	28
3.1.2 Matematický model teplotního pole .....	31
<b>4 NÁVRH SOUČÁSTÍ KELÍMKOVÉ PECE: .....</b>	<b>32</b>
4.1 NAPÁJENÍ .....	32
4.2 CHLAZENÍ .....	33
4.3 ŘÍZENÍ .....	35
4.4 DOBA TAVENÍ .....	36
4.5 VÝPOČTY PARAMETRŮ PECE .....	37
4.6 NÁVRH KELÍMKU PECE .....	38
4.7 NÁVRH INDUKTORU PECE .....	39
4.8 NÁVRH VYKLÁPĚCÍHO ZAŘÍZENÍ PECE .....	40
<b>5 SIMULACE PECE V PROGRAMU AGROS2D .....</b>	<b>40</b>
5.1 DEFINICE ZKOUMANÉHO MODELU .....	41



---

5.2	ŘEŠENÍ MODELU PECE A DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	42
5.3	CITLIVOSTNÍ STUDIE NÁVRHU PECE .....	45
<b>6</b>	<b>TECHNICKÁ DOKUMENTACE EXPERIMENTÁLNÍ PECE .....</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>48</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>1</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>2</b>

## Seznam symbolů

$I$ .....	Elektrický proud [A]
$U$ .....	Elektrické napětí [U]
$f$ .....	Frekvence [Hz]
$\mu$ .....	Permeabilita [H/m]
$P$ .....	Výkon [W]
$c_p$ .....	Měrná tepelná kapacita [J/ kg K]
$\gamma$ .....	Elektrická vodivost [S/m]
$\lambda$ .....	Součinitel tepelné vodivosti [W/m K]
$\rho$ .....	Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]
$E$ .....	Intenzita elektrického pole [V/m]
$H$ .....	Intenzita magnetického pole [A/m]
$v$ .....	Rychlost proudění kapaliny [m/s]
$\eta$ .....	Absolutní vazkost kapaliny [ $\text{Ns/m}^2$ ]
$g$ .....	Gravitační zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]
$s$ .....	Měrná váha kapaliny [ $\text{N/m}^3$ ]
$\omega$ .....	Úhlová frekvence [rad/s]
$R$ .....	Elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$L$ .....	Indukčnost [H]
$R_e$ .....	Mez turbulentního proudění [-]
$R_\theta$ .....	Tepelný odpor [ $^\circ\text{C/W}$ ]
$T_\theta$ .....	Doba ustálení teplotního ohřevu [s]
$Q$ .....	Množství tepla [C]
$m$ .....	Hmotnost [kg]
$T$ .....	Teplota [K]

## **Úvod**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh experimentální indukční pece s technologií studeného kelímku, dále jen CCIF (Cold Crucible Induction Furnace). Práce je rozdělena do následujících částí.

V první části je zpracován přehled historie tavení v indukčních pecích, se zaměřením na technologii CCIM. Dále jsou zmíněny hlavní výhody a nevýhody použití této technologie a následně je popsán návrh a výpočet indukční pece.

V další části práce je proveden návrh všech součástí systému, jakými jsou například chlazení a napájení. Před shrnutím výsledků návrhu zařízení je provedena citlivostní studie a nakonec je vyhotovena výrobní dokumentace.

# 1 Úvod do problematiky indukčního tavení

Indukční tavení pomocí technologie studeného kelímku (ISCCM – Induction Skull Cold Crucible Melting) je perspektivní metoda pro vysokoteplotní tavení materiálů, v porovnání se stávajícími technologiemi, nižšími ekonomickými náklady na provoz, jak je zmíněno v následujících odstavcích. Hlavní výhodou navrhovaného prototypu pece je především velmi nízké znečištění materiálu při tavení, čehož lze hojně využívat ve farmaceutickém, geologickém a hutním průmyslu.

## 1.1 Historie indukčních tavících pecí

První indukční pec byla sestavena v roce 1900, jejím autorem byl Fredrik Adolf Kjellin. První Kjellinova indukční kanálková pec měla nadměrně velkou spotřebu elektrické energie, a proto vznikla její druhá a třetí generace, přičemž třetí generace vyrobená v roce 1903 disponovala dostatečně sníženou spotřebou elektrické energie, která představovala 800 kWh na tunu oceli, aby mohla být masivně průmyslově využívána. F. A. Kjellin nechal svou indukční pec v roce 1905 patentovat [12]. Vzhledem k dobovým nízkým cenám elektrické energie vycházelo napájení pomocí generátoru o síle 3000 V finančně přibližně stejně jako nákup paliva pro pec se spalovacím ústrojím, nicméně tavení materiálů s vysokým bodem tání při vysoké výstupní kvalitě materiálu bylo po ekonomické stránce podstatně výhodnější, oproti provozu standartní spalovací pece. Jedny z prvních pecí využívaly například Kruppovi továrny v německém Essenu, které za světových válek vyráběly zbraně, a v jisté podobě tyto továrny fungují dodnes (vyrábí například eskalátory a výtahy). Tyto pece pracovaly na frekvencích 5-15 Hz. Inovací Kjellinových pecí vznikly pece typu Rochling-Rodenhauser, které měly dva uzavřené kanálky se společným centrálním vyhříváním. [4]

V roce 1903 pan H. Moissan navrhoval využití vysokofrekvenčního ohřevu, který se dostal do praxe až po roce 1916. Hlavním problémem byla produkce vysoké frekvence 20 kHz. První experimentální generátor typu Spark-Gap-Generator byl vyvinut na Princetonské univerzitě spolu s prototypem první vysokofrekvenční tavící pece. Poté se vývoj tohoto typu pece zastavil až do vynálezu kapacitorů s průmyslově použitelnou efektivitou. Uvedení vysoké frekvence v technologii indukčních pecí odstartovat v roce 1920 pan M.G. Ribaud, který experimentoval s nejnovější verzí Spark-Gap-Generatoru při frekvencích 50 až 100 kHz. Další vývoj nastal s inovací zdroje frekvence, tedy představením generátoru typu Motor-

Generátor, který zpočátku generoval frekvenci v rozmezí 5 až 8 kHz, nicméně nahradil nestabilní a neekonomický generátor typu Spark-Gap. [4]

Následný vývoj pokračoval vývojem generátorů v roce 1930, kdy V. P. Vologdin sestavil indukční pec s napájecím zdrojem 30 kW a 200 kHz. Jednalo se o pec typu Ajax-Wyatt. Vývoj indukčních pecí pokračoval a jejich vývoj urychlila druhá světová válka, během níž byl zaveden například systém použití dvou různých kmitočtů pro napájení jednoho induktoru. Princip duálního kmitočtu spočívá v použití jednofázového napájení o střední frekvenci pro tavení vsázky a vícefázového napájení o vyšší frekvenci pro roztavení kovu na počátku tavicího cyklu (historicky se využívalo 990 Hz pro počáteční roztavení vsázky a 33 Hz pro její tavení a prohřívání). Historicky největší indukční kelímková pec byla instalována během druhé světové války v Americe a měla objem 7,5 tuny. [4]

Z dnešního pohledu je technologie kelímkových pecí velmi perspektivní, splňuje požadavky na nízkou hladinu zplodin, nízkou energetickou náročnost tavicího procesu, přesnou ovladatelnost procesu a možnost vysoké automatizace procesu. Významnou výhodou je možnost počítačové simulace tavného procesu, což umožňuje nastavit požadovanou kvalitu roztaveného materiálu. [4]

## **1.2 Současné využití metody tavení ve studeném kelímku**

V současné době se indukční kelímkové pece využívají pro svoji víceúčelovost například pro vitrifikaci odpadu nebo výrobu syntetických diamantů. Tyto způsoby využití výše zmíněných pecí jsou popsány v následujících odstavcích.

### **1.2.1 Vitrifikace jaderného odpadu**

Podstatou vitrifikace (zeskelnatění) je úprava vysoce rizikového aktivního jaderného odpadu na stabilní materiál, v tomto případě sklo. Nejprve je nutné odstranit z odpadu vodu a následně do vsázky přidat sklotvorné přísady (křemík a další látky). Dále se roztaví vsázka a při teplotě kolem 1200 °C vzniká křemičité nebo borokřemičité sklo. Výsledné vitrifikované odpady mají vysokou odolnost vůči vyluhování vodou, dobrou tepelnou vodivost, mechanickou pevnost a další obdobné vlastnosti. Pro zvýšení tepelné vodivosti vitrifikovaného odpadu se kapky skla obalují roztaveným olovem nebo hliníkem. [6]

Zpracování a recyklace vyhořelého, vysoce rizikového jaderného paliva umožňuje obnovit 96 % recyklovaného materiálu, který bude znovu použit pro výrobu elektrické energie. Zbývající 4 % vyhořelého jaderného paliva jsou konečným odpadem. Pomocí vitrifikačního procesu je tento odpad integrován do skleněné struktury, která je bezpečná a stabilní po tisíceletí. Tyto struktury jsou pro skladování následně umístěny do nerezových nádob. [6]

#### **Výhody vitrifikace při použití studeného kelímku:**

- Zvýšení počtu vitrifikací (výhoda velkého objemu zpracovávaného odpadu),
- Prodloužení životnosti zařízení. Životnost studeného kelímku je 10 krát větší než u jiných tavících nádob. Jeho studená struktura není citlivá na korozi, protože je chráněná vrstvou ztuhlého skla vytvořeného mezi strukturou a skleněnou lázní,
- Vitrifikace širší škály produktů za účelem snížení objemu konečného odpadu. Studený kelímek umožňuje vitrifikaci různých druhů odpadů díky jeho studené struktuře a vysoké teplotě při tavení.

#### **1.2.2 Tavení křemíku pro solární články**

Konvenční techniky pro výrobu ingotů z polykrystalického křemíku pro vytvoření solárních článků jsou tvořeny metalurgickým způsobem, který je v dnešní době poměrně zastaralý. Dále je na výrobu těchto ingotů nutné použít velice drahé kelímky a formy za účelem dosažení nejvyšší čistoty. Při použití nejkvalitnějších kelímků stále vzniká problém kontaminace taveniny křemíkem a grafitem, jež se zde používají pro struktury forem a pecí. Při použití technologie indukčního tavení ve studeném kelímku je minimalizován kontakt vsázky (ingotu) se stěnami kelímku, z čehož vyplývá i minimální kontaminace taveného ingotu křemíku. Tato technologie je náročnější na řízení, nicméně je ekonomicky výhodnější oproti původně používané metalurgické technologii. Segmenty kelímku jsou chlazeny vodou a jsou vedeny až na dno kelímku. Tyto segmenty jsou vertikálně a zároveň vzájemně elektricky izolované. [7]

Vlivem přivedení chlazených segmentů na dno kelímku je magnetické pole na dolním konci kelímku sníženo postupně, a ne skokem, nedochází tedy k rychlému ochlazení ingotu.

Dále se pod segmenty nachází pomocné topné zařízení, které ohřívá ingot pohybující se směrem dolů. Vysokofrekvenční cívky jsou umístěny v blízkosti dna kelímku, aby vyrovnaly roztavenou zónu křemíku ve spodní části kelímku. Všechna tato opatření minimalizují dobu přechodu ingotu ze studeného kelímku do pomocného topného zařízení. [7]

Topné zařízení je nastaveno na teplotu, která se s posunem ingotu snižuje. Významný rozdíl v procesu tuhnutí ingotu křemíku oproti běžným kovům spočívá v tom, že ingot křemíku má tendenci v důsledku rychlých teplotních změn praskat. Pro specifické vlastnosti křemíku je tedy nezbytné postupné ohřívání, stejně tak jako i ochlazování ingotu v průběhu posunu ingotu pecí. Nezbytné jsou pečlivé kontroly teplot pro zabránění degradaci krystalů. Během tuhnutí a chlazení ingotu dochází k výskytu poruch v krystalech způsobených vnitřním pnutím a deformací, kterým lze předcházet správným nastavením teplot v celém procesu indukčního tavení ingotu. [7]

### 1.2.3 Výroba syntetických diamantů

Metoda studeného kelímku se využívá ve šperkařském průmyslu pro výrobu syntetických diamantů, které se označují obchodním názvem zirkony. Používají se jako náhražka pravých diamantů, ve stomatologii a při určování stáří krystalizačních vyvřelých hornin, přičemž ani specialista bez potřebné techniky nerozpozná zirkon od pravého diamantu.

Pro výrobu zirkonů se využívá principu zónové krystalizace při teplotě 2800 °C. Hlavní výhodou zirkonů je nízká cena, která se pohybuje od 30 do 100 dolarů za kilogram.

Lze je vyrábět v různých barevných odstínech a sytostech. [5]

## 2 Druhy tavících zařízení

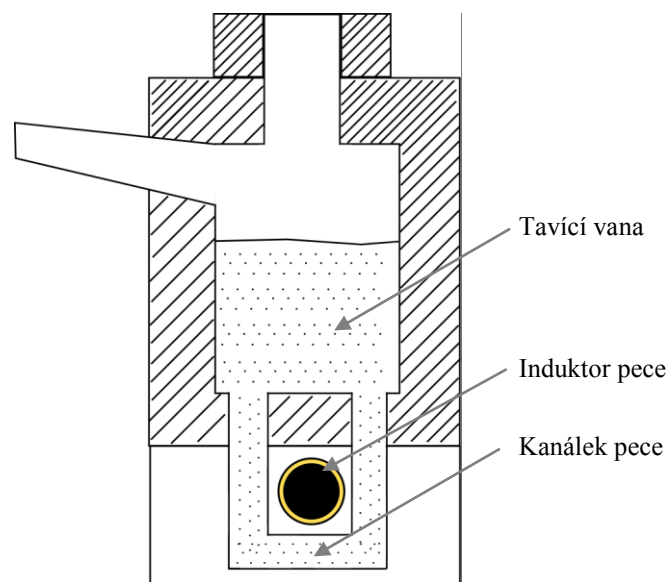
V následující kapitole jsou přiblíženy způsoby využití kelímkových pecí v současnosti. Tyto pece se využívají nejen v hutním, ale také ve zdravotním a odpadním průmyslu, jako efektivní zařízení pro tavení materiálů (v porovnání s původními odporovými tavnými zařízeními). Dále jsou zde zmíněny nejpoužívanější druhy tavných pecí. [8]

## 2.1 Nepřímý odporový ohřev

V odporové peci s nepřímým ohřevem vsázky probíhá přeměna elektrické energie na teplo v odporovém topném článku, ze kterého je teplo přenášeno do vsázky termokineticky (tedy pomocí konvekce, kondukce, radiace, nebo kombinací předchozích způsobů přenosu tepla). Tato zařízení obsahují komorovou pec, kde se míchá vsázka, a dále pak topné elementy. Pece s nepřímým ohřevem jsou využívány například pro tavení skla a kovu, pro tepelně-chemické zpracování, smaltování a letování.

## 2.2 Indukční kanálová pec

Tento typ pecí se využívá především ve slévárenském průmyslu pro tavení oceli a její přehřívání. Kanálové pece jsou konstruovány pro slitiny železa a pro neželezné kovy (např. měď, hliník, zinek, olovo). Induktor je umístěn na dně vany pece, kde zahřívá materiál, který je kolem induktoru veden kanálkem. Induktory jsou v těchto pecích napájeny obvykle síťovým kmitočtem 50 Hz. Tepelná výměna mezi roztavenou vsázkou v kanálku a vsázkou na dně vany pece je možná především vlivem pohybu (cirkulaci) roztaveného kovu. [9]



Obr. 2.2.1 – Průřez indukční kanálové pece

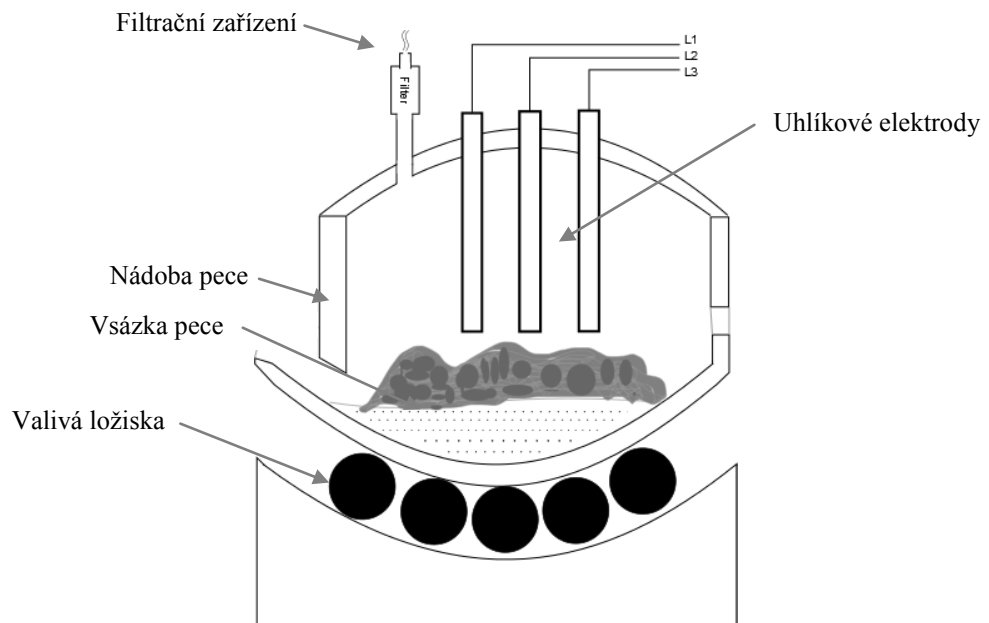
## 2.3 Elektrická oblouková pec

Tento typ pecí je v současnosti nejvíce používán pro tavení velkého množství vsázky (například 300 t), kdy dosahují tyto pece výkonů až 200 MVA. Nejčastější provedení napájení



těchto pecí je třífázové při objemu vsázky od 80 do 150 tun.

Tavení probíhá pomocí uhlíkových elektrod, které vytvoří mezi vsázkou (startovacím materiálem) a elektrodou elektrický výboj (oblouk).



Obr 2.4.1 – Oblouková pec

## 2.4 Indukční kelímková pec

Indukční kelímkové pece jsou v současnosti základními a nejčastěji využívanými zařízeními pro tavení ocelí, litin a neželezných kovů. Používají se pro tavení tuhé vsázky, uskladnění tekutého kovu a přimíchání stopových přísad. Na obrázku Obr.2.6.1 je znázorněna kelímková pec s nevodivým kelímkem, která je nejčastěji používána. [10]

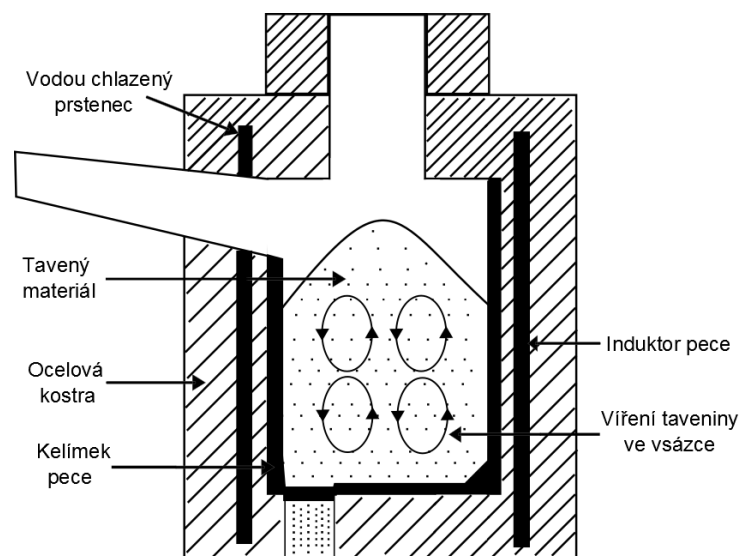
Standardně je kelímková pec provedena z válcové cívky, jenž je tvořena dutým měděným vodičem, a její vinutí je jednovrstvé. Dutý vodič má nejčastěji čtverhranný průřez a v jeho dutině protéká chladicí kapalina. Kelímek tohoto druhu pece se vyrábí převážně z křemičitého písku, tímto procesem vzniká keramický kelímek. Dalším typem jsou grafitové kelímky (jsou tvořeny slitinou železa a uhlíku, obsah uhlíku musí být vyšší než 2,44%). Kelímek může být vyroben i z měděných profilů a to pouze v případě, že je dostatečně chlazen vodou. Po obvodu pece jsou svisle uspořádány svazky elektrotechnických plechů, které uzavírají magnetický tok vně cívky.

Vně cívky se tok zavádí proto, aby nezasahoval do konstrukčních částí pece. Dále pec obvykle obsahuje měděný plech, který stíní magnetický tok cívky, a tím zabraňuje jeho vnikání do mřížového dna pece. Mezi další konstrukční části kelímkové pece patří středící žáruvzdorné cementové trámce pro cívku, ocelový plášť pece, cihlová keramická vyzdívka na dně pece, hubice pro odlévání a osa pro vyklápění kelímku pece. V indukčních tavicích pecích lze tavit různé druhy kovů, zejména se zde vyrábí oceli vysoké kvality. [11]

Mezi další výhody kelímkových pecí patří silné víření tekutiny způsobené elektrodynamickými (Lorenčovými) silami, dochází tak k rovnoměrnému míchání vsázky. Tlak magnetických sil působící na vsázku má za následek vznik podtlaku u stěn kelímku a přetlaku v ose tavného materiálu. Vlivem těchto sil se tavenina vzdouvá ve středu kelímku. [11]

Rozměry pece určuje především kapacita kelímku, která se pohybuje od 10 kg až do 100 tun. S velikostí kelímku je nutné měnit i kmitočet napájecího proudu. Kmitočet se tedy může pohybovat v rozsahu hodnot od síťového kmitočtu 50 Hz až do 10 kHz.

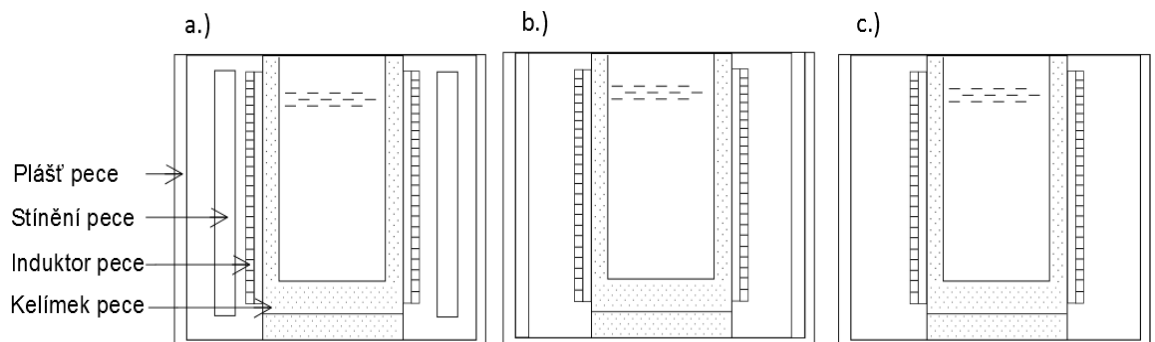
Vinutí induktoru, kterým proudí chladicí médium, má obvykle šířku vnitřní stěny v rozmezí 1 – 4 mm, zároveň při použití kmitočtu 50 Hz může průměr vnitřní stěny dosáhnout až 15 mm. Vzhledem k dutému profilu částečně eliminujícím skin efekt vede celý průměr vodiče téměř veškerý proud. Optimální šířka vnitřní stěny se stanovuje výpočtem. [11]



Obr. 2.6.1 - Indukční kelímková pec

### 2.4.1 Rozdělení kelímkových pecí

Kelímkové pece lze rozdělit podle způsobu napájení na jedno, dvoj nebo trojfázové, na indukční s jedním, nebo více vinutími a s napájením jedním nebo více kmitočty. Podle kmitočtu se pece dělí na napájení síťovým kmitočtem 50 Hz, se zvýšeným kmitočtem a s vysokým kmitočtem. Podle druhu kelímku na vodivý a nevodivý kelímek. Konstrukce kelímku může být, jak je znázorněno na Obr. 2.6.2 **a.)** uzavřená stíněná, **b.)** uzavřená nestíněná, nebo za **c.)** Otevřená nestíněná.

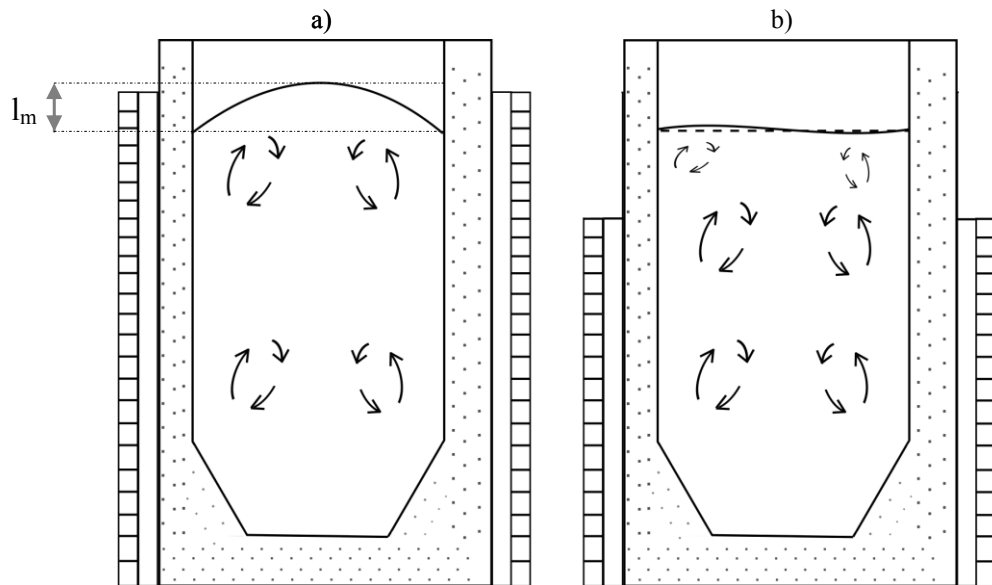


Obr. 2.6.1 – Konstrukce kelímkových pecí

Pro napájení kelímkových pecí se do kmitočtu 1 kHz využívají tyristorové měniče, pro kmitočty do 10 kHz tranzistorové měniče, přičemž se obvykle jedná o vsázku s hmotností mezi 100 g a 100 kg.

Elektromagnetické (Lorenovy) síly, které vznikají jako důsledek působení proudů indukovaných ve vsázce a magnetického pole induktoru, způsobují pohyb roztavené vsázky v kelímku (její míchání). Charakter a intenzita pohybu roztavené vsázky je dána rozměrem kelímku, množstvím dodané energie, kmitočtem, počtem fází induktoru a v neposlední řadě umístěním induktoru vzhledem k hladině roztavené vsázky. [1]

Pokud je obvod symetrický, probíhá cirkulace roztavené vsázky v jednofázové peci dle Obr. 2.6.1. Na povrchu roztavené vsázky se vytvoří vzdušný meniskus, jehož výška s rostoucím napájecím kmitočtem klesá. Pro získání vzdušného menisku je nutné, aby byl induktor umístěn nad úroveň hladiny roztavené vsázky. Jelikož je cílem této diplomové práce (dále jen DP) navrhnout kelímkovou pec, která poskytuje minimální kontakt roztavené vsázky s kelímkem, je při návrhu zohledněna a požadována maximální možná výška vzdušného menisku. [1]



Obr. 2.6.3 – Pohyb roztavené vsázky v indukční peci

- $l_m$  je hladina vzdušné vsázky; a) Symetrické umístění induktoru, b) Asymetrické umístění induktoru.

## 2.5 Indukční kelímková pec s technologií studeného kelímku

Jednou ze zásadních výhod při použití metody ohřevu pomocí studeného kelímku je možnost tavení materiálů o teplotách tání až 3000 °C. Další ze zásadních výhod, jež tato technologie tavení poskytuje, je minimalizace kontaktu tavného materiálu především se stěnou pece. To je způsobeno tím, že se tavený materiál taví zejména na povrchu a dochází k vzniku vzdušné hladiny. Tam kde se roztavený materiál dotýká kelímku, nedochází k jeho tavení, což je důsledkem stálého chlazení kelímku, kdy se na vnitřní stěně v místech styku kelímku s roztavenou vsázkou vytváří slabá vrstva krusty (tzv. skull efekt). Navíc při uvážení působení menisku je plocha styku roztavené vsázky a kelímku minimální. Studený kelímek se používá především pro tavení materiálů s nízkou elektrickou vodivostí. Mezi takové materiály například patří oxidy kovů a sklo. [10]

### 2.5.1 Výhody použití studeného kelímku

Použití metody studeného kelímku je vhodné pro výrobu monokrystalů, skla nebo keramiky, kdy je nutné přivést k reakci všechny potřebné složky najednou. Při relativně vysokých teplotách bývá keramika obvykle vyrobena sintrováním, přičemž je nutné, aby byl základní materiál důkladně promíchán, což zabezpečí přirozené proudění roztavené vsázky

v kelímku. Dále je dosažena vyšší čistota materiálu, jak již bylo popsáno výše (vlivem vzniku skull efektu). [18]

Působením skull efektu je chemická čistota roztaveného materiálu vyšší než čistota materiálu, který je na vstupu procesu tavení, jelikož při vyšších teplotách dochází k odpařování těkavých složek materiálu, jako jsou alkalické oxidy, chloridy, nitridy, sulfáty a další.

Tento druh pece nepotřebuje k tavení elektrody, které se používají při tavení například v obloukové peci. Tím se šetří materiál a náklady, zároveň nedochází k znečištění taveniny. Není potřeba využívat iridiový kelímek pro růst krystalů. Tento kelímek má omezenou životnost vlivem jeho deformace při práci a tendenci k praskání. Také pořizovací náklady tohoto kelímku jsou vysoké a výroba velkých formátů je velmi obtížná.

Tavící proces je možné provádět v různých atmosférách, například ve vzduchu, v oxidačních a redukčních plynech, ve vodíku a kyslíku, stejně tak v inertních plynech a ve vakuu. Různé druhy pracovních atmosfér umožňují zvýšení efektivity tavení a provozu. [18]

Mezi další výhody patří velký tavící výkon, tedy velká elektrotermická účinnost pece, možnost získávání slitin s malým obsahem příměsí (plynů, nekovových částic), malá hodnota oxidování stopových prvků, promíchávání roztavené vsázky (vyrovnávání teplota v objemu roztavené vsázky), jednoduchá manipulace s pecí a z toho plynoucí automatizace procesů.

Tento druh kelímkové pece je oproti standartní kelímkové peci vybaven nejen chlazením induktoru, ale také samotného kelímku, a to nejčastěji pomocí vody s nuceným oběhem. Vlivem chlazení kelímku dochází k tavení vsázky převážně uvnitř materiálu a na povrchu, kde je materiál ve styku s kelímkem, dochází jen k minimálnímu tavení.

Existují dva základní typy pecí se studeným kelímkem, u prvního druhu je stěna kelímku tvořena samotným induktorem, což vyžaduje velmi výkonné chlazení, a druhý typ je tvořen dutými segmenty, které jsou protékány chladičem, například vodou. Obecně se technologie tavení ve studeném kelímku používá pro tavení materiálu se špatnou elektrickou vodivostí, jako jsou například oxidy kovů a sklo, jenže pro tavení těchto materiálů je zapotřebí takzvaný startovací proces tavení, který je popsán v podkapitole níže. [13]

### 2.5.2 Induktorová stěna kelímku

Stěna kelímku je tvořena samotným induktorem. Tento typ kelímku je tvořen cívkou s jedním závitem, popřípadě z více cívek uložených nad sebou. Využívá se především pro tavení materiálů s nízkou elektrickou vodivostí, jako jsou například oxidy železa, keramika a sklo. Tavení zde probíhá od povrchu materiálu, kde se utvoří skořápka (skull efekt), jelikož je materiál v bezprostřední blízkosti chlazené cívky.

Tento typ kelímku vykazuje vysokou elektrickou účinnost, jelikož zde nevznikají přídavné ztráty ve stěně kelímku. Cívka, která tvoří stěnu kelímku, dosahuje účinnosti až 50 %. Nevýhodami jsou ale složitá konstrukce, nutnost velmi intenzivního chlazení a vysoké napájecí napětí induktoru až 1000 V z důvodu prevence vzniku zkratu na napájecích svorkách. [13]

### 2.5.3 Segmentová stěna kelímku

Stěna kelímku je tvořena dutými segmenty, které jsou chlazené například vodou. Chlazený je také induktor. Segmenty mohou mít různý profil, například obdélníkový nebo válcový, a jsou vyráběny z nemagnetických kovů, jako jsou například hliník, nerezová ocel a měď.

U tohoto druhu konstrukce je nutné minimalizovat velikost mezery mezi jednotlivými segmenty na nejmenší možnou hodnotu, což zlepší účinnost pece vlivem poklesu ztrát v jednotlivých segmentech. Induktor musí být od kelímku dobře odizolován, jelikož dochází při tavení v peci k indukci elektrického napětí do stěny (segmentů) kelímku. Tento typ kelímku dosahuje u materiálů s vysokou elektrickou vodivostí až 33 % a u materiálů s nízkou elektrickou vodivostí až 90 % účinnosti. [13]

### 2.5.4 Tavení materiálů s vysokou elektrickou vodivostí

Tavení elektricky dobře vodivých materiálů v pecích s technologií studeného kelímku (ISCCM – Induction skull cold crucible melting) se obecně provádí v oddělených, vodou chlazených kelímcích, které jsou umístěny uvnitř induktoru. Pro zvýšení účinnosti pece lze pracovat v ochranné atmosféře nebo ve vakuu, kde se snižují ztráty zejména přenosem tepla.

Magnetické pole, vytvořené induktorem, prochází skrz kelímek až do vsázky, kde se následně indukuje elektrické pole, a vlivem vzniku Joulových ztrát dochází k ohřevu a roztavení vsázky. Magnetické pole dále působí na vsázku tak, že vznikem vířivých proudů, které interagují s elektromagnetickým polem induktoru, dochází k proudění a promíchávání materiálu v kelímku. V místech, kde se roztavená vsázka dotýká kelímku, dochází k vytvoření skořápky (skull efekt), jenž zabraňuje přenosu tepla a dalšímu ochlazení vsázky. V pecích typu studený kelímek se taví například titan, wolfram a zirkon. [13]

### 2.5.5 Tavení materiálů s nízkou elektrickou vodivostí

Proces tavení materiálů s nízkou elektrickou vodivostí vychází z principu přenosu energie do vsázky pomocí vysokofrekvenčního elektromagnetického pole o vysoké intenzitě. Jelikož mají elektricky špatně vodivé materiály za normálních teplot velmi nízkou elektrickou vodivost, je nutné zavést startovací proces, který je při tomto druhu tavení zásadní.

Startovací proces je postup přidávání směsí materiálů do vsázky během tavení tak, aby bylo dosaženo chemicky čistých materiálů po skončení tavicího procesu. Příkladem startovacího procesu je přidávání elektricky vodivých kovů, jako jsou kovové hobliny a kovový šrot. Nevýhodou přidávání těchto příměsí je možnost samovznícení z důvodu reakcí kovů a kyslíku, proto je důležité přidávat různé příměsi v různých fázích tavení ve správném objemu a pro správný materiál.

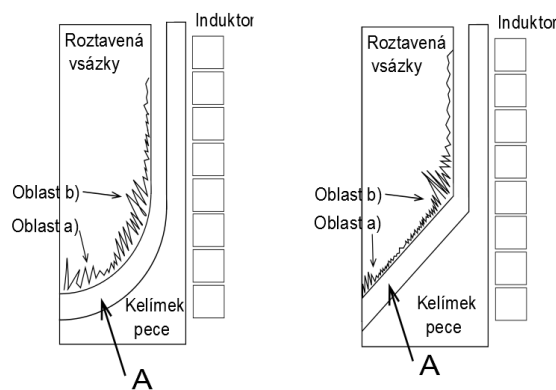
Dalším typem startovacího procesu je použití vodivého kroužku, který se zahřívá vlivem působení elektro-magnetického pole induktoru pece. Kroužek je nutné vyndat z pece ve chvíli, kdy se přestane zahřívát vlivem vzrůstu vlastní teploty. Dalším způsobem je použití plazmy, tedy plynu, který se skládá z negativních a pozitivních iontů, elektronů a vybuzených neutrálních atomů. Nejčastěji používanými plazmovými plyny jsou argon, vodík, dusík a kyslík. Pro vznik plazmy se používají plazmové hořáky, které vznítí plyn pomocí regulovaného elektrického oblouku.

### 2.5.6 Tvar kelímku a uspořádání cívek

Vnitřní a vnější tvar kelímku ovlivňuje rozložení elektromagnetických sil a možnost levitace roztavené vsázky v kelímku. Z těchto důvodů je vhodné posoudit, jaký tvar kelímku je vhodný pro kterou aplikaci. Pomocí simulace jednotlivých tvarů kelímků a dále pomocí numerické analýzy metodou konečných prvků byla zjištěna závislost odstředivé magnetické

síly (umožňující levitaci materiálu) především na vnějším tvaru kelímku. Obecně lze říci, že Lorentzovy síly, které v kelímku působí na roztavenou vsázku, jsou vyvolány vířivými proudy, které tečou ve spodní části kelímku a proudem induktoru. [20]

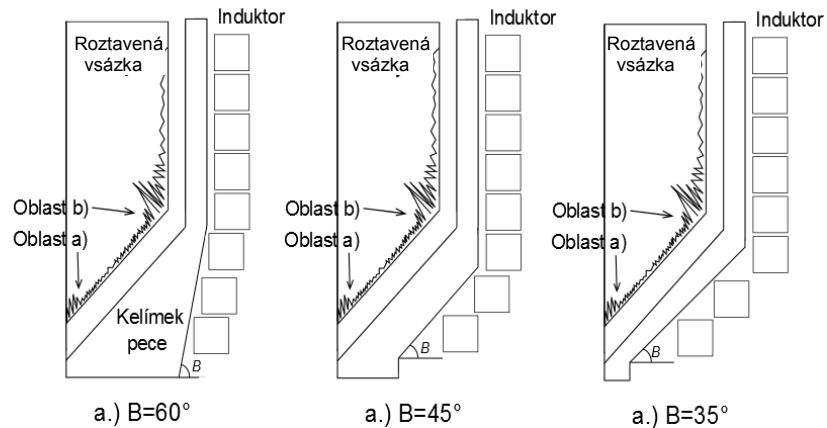
Konvenční tvar kelímku vykazuje vyšší hodnoty síly v blízkosti dolní části kelímku. Tyto síly jsou nepřímo úměrné druhé mocnině vzdálenosti mezi závitů induktoru a roztavenou vsázkou. V konvenčním tvaru kelímku se tedy indukují pouze slabé Lorentzovy síly v bodě A viz. Obr. 2.5.6.1, na kterém jsou znázorněny dva základní vnitřní tvary kelímku. Oba dva druhy vykazují stejně slabé síly v bodu A. Jediným zásadním rozdílem je změna objemu vsázky, která vychází z tvaru kelímku. Oblast *a*) znázorňuje rozložení vířivých proudů na dně kelímku, oblast *b*) znázorňuje proud indukovaný z induktoru. [20]



Obr. 2.5.6.1 - Rozložení odstředivých magnetických sil roztavené vsázky.

Zásadní změny v rozložení sil lze pozorovat při různých vnějších tvarech kelímku. Tyto změny jsou způsobeny především vlivem polohy cívky vůči vsázce. Rozdílné vlastnosti jsou patrné z následujícího obrázku, kde jsou graficky naznačeny vektory působení magnetické síly. Dále lze z obrázku určit, že maximální výšky levitace materiálu v kelímku je možné dosáhnout při úhlech  $B=45^\circ$  a  $35^\circ$ . [20]





Obr. 2.5.6.2 - Vliv tvaru kelímku na rozložení sil ve vsázce

Vzhledem k tomu, že je na povrchu roztavené vsázky rovnoměrně rozložené působení elektrodynamických sil a zároveň jsou naindukované magnetické síly úměrné množství elektrické energie dodávané induktorem pece, je možné nechat levitovat až několik kilogramů roztaveného kovu. [20]

## 2.6 Druhy napájecích zařízení indukčních pecí

Za účelem výběru vhodného napájecího zdroje pro stavbu experimentálního tavného zařízení následuje přehled druhů napájecích zařízení.

### 2.6.1 Frekvenční měniče

Frekvenční měniče, tedy přesněji řečeno impulsně regulované napájecí zdroje s indukčností (pro kmitočty nad 20 kHz), jsou v dnešní době nejvíce využívané zdroje. Lze je najít v osvětlení běžné domácnosti stejně tak, jako i v řízení elektromotorů trakčních vozidel, jako spínací prvky se u tohoto typu měničů využívají výkonové tranzistory (jako například IGBT tranzistory). Pro aplikaci indukčního ohřevu jsou velmi vhodné, jelikož dosahují až 90% účinnosti, jsou poměrně kompaktní a nabízejí plynulou regulaci kmitočtu na výstupu zdroje. Z ekonomické stránky jsou vzhledem ke své rozšířenosti cenově dostupné, dosahují dlouhé životnosti, která je určena z pravidla dimenzováním systému vůči zátěži, a dostatečným odvodem Jouleova tepla, jenž vzniká zejména na spínacích prvcích zdroje.

Nevýhodou tohoto systému je, v případě napájení ze síťového rozvodu, deformace sinusového průběhu, na který se vlivem spínání vysokých hodnot proudu namodulují vysoké kmitočty, jež nejsou v síťovém rozvodu žádané, proto se tyto prvky vybavují poměrně složitými, pasivními a aktivními sinusovými filtry, jejichž účelem je zmírnit (v ideálním případě odstranit) vysoké namodulované kmitočty.

Výkonnostně jde o měniče kmitočtu, jež dokáží na svém výstupu vyprodukovat stovky ampér v široké škále frekvencí. Cena tohoto zdroje se odvíjí především od frekvenčního spektra a výkonu, které dokáže vyprodukovat (čím širší spektrum a výkon, tím vyšší cena zdroje). Tento typ zdroje je vybrán jako zdroj pro kelímkovou pec navrhovanou v této DP, a to především pro jeho vysokou účinnost, kompatibilitu a všestrannost. [15]

### 2.6.2 Rotační měniče

Rotační měniče kmitočtu, nebo také rotační generátory, jsou zdroje podporující rozsah kmitočtů od 500 Hz do 10 kHz. Používají se pro napájení indukčních pecí tavicích a prohřívacích zařízení. V tomto případě se jedná o generátor elektrické energie, který je svojí konstrukcí podobný alternátoru pro výrobu elektrické energie.

Generátor je obvykle poháněný asynchronním motorem s kotvou nakrátko. Statorem generátoru prochází tak zvané pracovní vinutí, do nějž se indukuje kmitočet, který je úměrný úhlové rychlosti otáčení motoru a nepřímo úměrný pólové rozteči drážek tohoto vinutí.

Účinnost tohoto soustrojí klesá s rostoucí hodnotou výstupního kmitočtu (například při výkonu 300 kW a kmitočtu 1 kHz je účinnost rotačního měniče přibližně 85 %). Nevýhodou tohoto typu zdroje, který byl první zdrojem kmitočtu (pro radiotelegrafii), je jeho masivnost, dále je třeba provádět mazání pohyblivých částí a připravit betonové základy pro toto soustrojí. Při patřičné údržbě se vyznačuje se dlouhou životností. [15]

### 2.6.3 Iontové měniče kmitočtu

Jedná se o nástupce rotačních měničů. Ke své činnosti toto zařízení odebírá z napájecí sítě trojfázovou energii pomocí transformátoru a zapojení hvězda-lomený trojúhelník, výstupy vinutí transformátorů napájí tyatrony (jde o výkonový usměrňovač, který je uzavřen v plynu plněné trubici, je možné jej funkcí přirovnat k obecné usměrňovací diodě), dále je zde řídicí obvod, který slouží ke změně polarity a induktor, sloužící pro sběr

(nasčítání a zesílení energie). Výhodou oproti rotačnímu zařízení je fakt, že není potřeba doladovat zdroj v závislosti na zátěži a vlivem jeho vlastního zahřátí na požadovanou výstupní hodnotu kmitočtu.

Zařízení je oproti svým předchůdcům menších rozměrů, nevyžaduje údržbu, jelikož nemá pohyblivé části (mazání). Nevýhodou těchto strojů byla, i přes jejich 95% účinnost, nespolehlivost v provozu a krátká životnost tyatronů, které se poškodily vlivem zpětných zápalů a bylo nutné je brzy měnit. (Po zhasnutí tyatronu musí nastat dokonalá deionizace rtuťových par v baňce, aby se stal tyatron po přiložení záporného napětí na mřížku zcela nevodivý. Vzhledem k době deionizace 10 až 4 sec nebyla zaručena dostatečná spolehlivost, ani při odebíraném kmitočtu nižším než 1 kHz). [15]

#### 2.6.4 Magnetické násobiče kmitočtu

V principu se jedná o třífázový transformátor, na jehož sekundární výstupy vinutí jsou připojeny tlumivky s jádrem. Pecní obvod je připojen na nulový vodič a na spojené výstupy za tlumivkami. Při tomto zapojení se jedná o násobič tří fází, tedy trojnásobku 50 Hz, a zdroj tak působí kmitočtem 150 Hz.

Při využití vyšších harmonických kmitočtů lze pec napájet například 9 x 50 Hz, tedy 450 Hz (pro třetí harmonickou). Hlavní výhodou oproti rotačnímu ústrojí je kompaktnost a vyšší účinnost. [15]

#### 2.6.5 Tyristorové měniče kmitočtu

Následujícím vývojovým krokem bylo využití tyristorů, které kombinovaly kladné vlastnosti předchozích druhů zdrojů, tedy zejména dlouhou životnost, bezúdržbovost a vysokou účinnost až 95 %. Tyristorový měnič se sestává z trojfázového tyristorového můstkového usměrňovače a střídače a řídicího obvodu spínání tyristorů.

Střídač pracuje tak, že je střídavě otevřena jedna dvojice tyristorů, které se po dané době uzavřou, a stejnosměrný proud z usměrňovače prochází druhou dvojicí tyristorů. Tyto cykly se neustále opakují. Kmitočet je neustále udržován na stejné hodnotě vlivem působení zpětné vazby vlastního kmitočtu, jež je ovlivněn zahříváním vsázky.

Tyristorové měniče byly v současnosti nahrazeny tranzistorovými měniči kmitočtu, jelikož například technologie IGBT tranzistorů nabízí možnost spínání stejných výkonů vyšší frekvencí a řídicí obvod je také podstatně jednodušší. [15]

### 3 Matematický model pece

V této kapitole je uvedeno odvození matematického modelu pro přenos tepla a rozložení magnetického pole pomocí parciálních diferenciálních rovnic. Matematické modely slouží k výpočtu parametrů pece, především pro účely simulace teplotních a elektromagnetických polí, například pomocí programu Agros2D. Pro následné odvození uvažujeme homogenní médium. Při simulaci pece není uvažováno proudění roztavené vsázky v kelímku a vznik volné hranice na povrchu vsázky. [18]

#### 3.1.1 Matematický model magnetického pole

Výchozími vztahy pro stanovení matematického modelu magnetického pole jsou především Ampérův zákon a Faradayův indukční zákon. V tomto případě použijeme jejich diferenciální tvary.

Ampérův zákon celkového proudu, tedy první Maxwellova rovnice v diferenciálním tvaru,

Rov. 3.1.1.1

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}.$$

Faradayův indukční zákon, tedy druhá Maxwellova rovnice v diferenciálním tvaru,

Rov. 3.1.1.2

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}.$$

Dalším, pro odvození potřebným vztahem, je zákon kontinuity elektrického proudu,

Rov. 3.1.1.3

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

$$(I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \cdot dV).$$

Kde  $\mathbf{D}$  je elektrická indukce,  $\mathbf{B}$  je magnetická indukce,  $\mathbf{J}$  je proudová hustota,  $t$  je čas a  $\rho$  je hustota.

Dále pro odvození elektromagnetického pole skalárně vynásobíme první Maxwellovu rovnici vektorem  $\mathbf{E}$  a druhou vektorem  $\mathbf{H}$ , z čehož vyplyne následující vztah, který dále upravujeme,

Rov. 3.1.1.4

$$\mathbf{E} \cdot \text{rot } \mathbf{H} - \mathbf{H} \cdot \text{rot } \mathbf{E} = \mathbf{J} \times \mathbf{E} + \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\mathbf{E} \cdot \text{rot } \mathbf{H} - \mathbf{H} \cdot \text{rot } \mathbf{E} = -\text{div} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}).$$

Takto získanou rovnici je nutné integrovat přes objem. Dále pak její poslední člen převedeme podle Gauss-Ostrogradského věty na plošný integrál, za součin  $\mathbf{J} \times \mathbf{E}$  dosadíme intenzitu elektrického pole včetně vtištěných sil a získáme následující vztah,

Rov. 3.1.1.5

$$0 = \int_V \mathbf{J} \times \mathbf{E} dV + \int_V \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \int_V \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \int_V \text{div} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dV$$

$$\int_V \mathbf{J} \times \mathbf{E} dV = \int_V \frac{\mathbf{J}^2}{\gamma} dV + \int_V \mathbf{E} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} dV + \int_V \mathbf{H} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} dV + \oint_S (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) dS.$$

Výsledný vztah energetické bilance lze přepsat do následujícího tvaru,

Rov. 3.1.1.6

$$P_V = P_J + P_e + P_m + P_N [W]$$

kde  $P_V$  je výkon vtištěných sil,  $P_J$  jsou Jouleovy ztráty,  $P_e$  je výkon potřebný k vytvoření elektrického pole,  $P_m$  je výkon potřebný k vytvoření magnetického pole a  $P_N$  lze interpretovat jako přenesený výkon.

Při využití harmonických napájecích zdrojů, lze využít ke zjednodušení výpočtů symbolicko-komplexní metodu (SKM),

Rov. 3.1.1.7

$$\frac{d}{dt} \rightarrow j\omega, \omega = 2 \cdot \pi \cdot f [rad / s].$$

Pokud budeme uvažovat relativně pomalé časové změny, kdy lze zanedbat posuvný proud, zjednoduší se rovnice následujícím způsobem, dále pak lze intenzitu elektrického pole  $\mathbf{E}$  rozepsat do následujícího vztahu,

Rov. 3.1.1.8

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{A}$$

kde  $\mathbf{E}'$  je zobecněná intenzita elektrického pole, která je složena z intenzity elektrického pole  $\mathbf{E}$  a z intenzity elektrického pole indukovaného pohybem nábojů v magnetickém poli  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ .

Následný vztah se získá dosazením Lorentzových sil do druhé Maxwellovy rovnice.

**Rov. 3.1.1.9**

$$\operatorname{rot}(\mathbf{E}' - \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) = -\frac{\partial \operatorname{rot} \mathbf{A}}{\partial t}$$

Záměnou časové derivace a prostorového operátoru rotace dostaneme následující vztah,

**Rov. 3.1.1.10**

$$\operatorname{rot}(\mathbf{E}' - \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}) = -\operatorname{rot} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}.$$

Dále pak odstraněním operátoru rotace získáváme řešení v následujícím tvaru,

**Rov. 3.1.1.11**

$$\mathbf{E}' = \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A} - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad} \varphi + \mathbf{g}(t).$$

Dále vynásobíme rovnici elektrickou vodivostí  $\gamma$  a získáme tak celkovou proudovou hustotu v následujícím tvaru,

**Rov. 3.1.1.12**

$$\mathbf{J} = \gamma \cdot \mathbf{E}' = \gamma \cdot \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A} - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \cdot \operatorname{grad} \varphi + \gamma \cdot \mathbf{g}(t).$$

Následně posoudíme fyzikální význam všech členů jednotlivých složek proudové hustoty v získaném vztahu,

**Rov. 3.1.1.13**

$$\mathbf{J}_{pohyb} = \gamma \cdot \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A}$$

$$\mathbf{J}_{trans} = -\gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

$$\mathbf{J}_{pot} = -\gamma \cdot \operatorname{grad} \varphi$$

$$\mathbf{J}_{ext} = -\gamma \cdot \mathbf{g}(t)$$

Kde  $J_{pohyb}$  je proudová hustota vyvolaná pohybem v magnetickém poli (vyjadřuje pohybovou složku vířivých proudů).  $J_{trans}$  je dána časovou derivací magnetického toku a vyjadřuje transformační složku vířivých proudů.  $J_{pot}$  je potenciální složka proudové hustoty (bez rotace), která představuje hustotu proudu z vnějšího zdroje pole a  $J_{ext}$  je proudová hustota, která je pouze časově závislá a představuje vnější zdroje energie. [18]

Matematický model magnetického pole lze zapsat následující rovnicí:

Rov. 3.1.1.14

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \mathbf{A}) \right) - \gamma \cdot \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A} + j \omega \gamma \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ext}}$$

### 3.1.2 Matematický model teplotního pole

Teplotní pole je vyvoláno Joulovými ztrátami ve vsázce. Celkovou energetickou bilanci lze vyjádřit pomocí prvního zákona termodynamiky, tedy následujícím vztahem:

Rov. 3.1.2.8

$$P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = \frac{dU_{\text{int}}}{dt} + P_g$$

Kde  $P_{\text{in}}$  a  $P_{\text{out}}$  představují vstupující a vystupující tepelný tok do homogenního tělesa.  $P_g$  vyjadřuje výkon generovaný v objemu tělesa vnějším zdrojem energie (například Jouleovy ztráty) a člen  $dU_{\text{int}}/dt$  představuje změnu vnitřní energie systému.

Rozdíl funkce tepelného toku, lze vyjádřit následujícím vztahem:

Rov. 3.1.2.9

$$P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = - \int_V \operatorname{div} \lambda \cdot \operatorname{grad} T \cdot dV$$

Stejného výsledku odvození lze dosáhnout integrací celkového toku přes povrch elementární krychle a následným použitím Gaussovy věty.

Rov. 3.1.2.10

$$P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = \int_S \mathbf{q} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \operatorname{div} \cdot \mathbf{q} \cdot dV = - \int_V \operatorname{div} \cdot \lambda \cdot \operatorname{grad} T \cdot dV$$

Změna vnitřní energie systému, která je akumulována v objemu  $dV$  je dána vztahem:

Rov. 3.1.2.11

$$\frac{dU_{\text{int}}}{dt} = \int_V \rho c_p \frac{dT}{dt} dV$$

Kde  $\rho$  je hustota materiálu a  $c_p$  je tepelná kapacita látky. Časovou derivaci lze dále rozepsat do následujícího vztahu.

Rov. 3.1.2.12

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T$$

Kde první člen na pravé straně představuje rychlost akumulace vnitřní energie a druhý člen rychlost konvektivního toku, který vzniká vlivem pohybu média. Ve většině praktických případů je majoritní časová změna a rychlostní člen minoritní (zanedbatelný), výjimkou jsou zařízení na míchání a čerpání roztavených kovů.

Výkon generovaný vnějším zdrojem energie lze zapsat ve tvaru:

Rov. 3.1.2.13

$$P_g = \int_V p \cdot dV$$

Kde  $p$  představuje měrný výkon dodaný zdrojem. Dosazením všech členů do tepelné bilance získáme následující vztah.

Rov. 3.1.2.14

$$-\int_V \operatorname{div} \cdot \lambda \cdot \operatorname{grad} T \cdot dV = \int_V \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_V q \cdot dV$$

Eliminací elementárního objemu  $dV$  (tedy bilance platí pro libovolný objem) získáme nestacionární Fourierovu-Kirchhoffovu parciální diferenciální rovnici pro vedení tepla v následujícím tvaru.

Rov. 3.1.2.15

$$\operatorname{div} \lambda \cdot \operatorname{grad} T + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -p$$

Kde  $T$  je termodynamická teplota,  $\rho$  je hustota materiálu,  $c_p$  je tepelná kapacita látky a  $p$  je vnější zdroj tepla. Dále je provedeno dosazení z Rov. 3.1.2.6. [18]

Rov. 3.1.2.16

$$-\operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T) + \rho \cdot c_p \cdot (-v \cdot \operatorname{grad} T + \frac{\partial T}{\partial t}) = p$$

## 4 Návrh součástí kelímkové pece:

Nejprve je nutné stanovit, který typ kelímkové pece s technologií studeného kelímku, bude předmětem návrhu v této diplomové práci. Pro laboratorní a výzkumné účely je vybrána indukční kelímková pec bez vnějšího stínění induktoru transformátorovými plechy, s vodivým kelímkem z dutých měděných segmentů lichoběžníkovitého tvaru pro tavení materiálu, jako je například hliník.

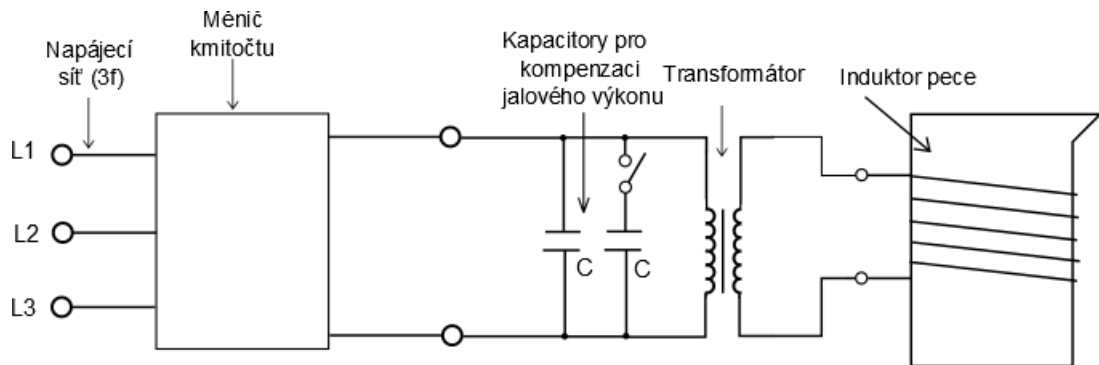
### 4.1 Napájení

Obecně je součástí systému napájení napájecí zdroj (v případě této DP jde o frekvenční měnič) a kondenzátorová baterie (pro kompenzaci jalového výkonu induktoru pece), dále pak silnoproudé spojky kondenzátorové baterie a napájecího zdroje, obvod pro symetrizaci zatížení sítě (je použit jen v případě využití zdroje se síťovým kmitočtem 50 Hz, přičemž je většinou vestavěný ve frekvenčním měniči), systém regulace výkonu (v této DP je výkon pece regulován nastavením parametrů frekvenčního měniče), systémy pro zapínání



pece a přepínání kondenzátorových baterií (pokud je systém v této sestavě použit). Následuje obecné schéma zapojení napájecího zdroje pece. [9]

Pro napájení navrhované indukční pece lze použít například tyristorový měnič kmitočtu typu TMK - G1 400, který poskytuje výstupní frekvenční rozsah 4 až 10 kHz a výkon až 60 kW, při velikosti napětí do 400 V, od společnosti Roboterm s.r.o.



Obr 4.1.1 – Napájecí obvod kelímkové pece

## 4.2 Chlazení

Při návrhu systému chlazení indukční pece je cílem odvést, především prostřednictvím konvekce, takové množství tepla, aby nedošlo při chodu systému pece k poškození či deformaci induktoru a chlazeného kelímku. Vzhledem k povaze této práce bude k regulaci průtoku vody v systému sloužit vodní čerpadlo s nastavitelnou rychlostí proudění vody v systému. Při provozu systému chlazení se zaměříme na splnění turbulentní podmínky proudění chladiva, která bude popsána následovně tak, aby se v žádné části chladicího systému nevyskytovala voda v podobě páry, což by způsobilo ztrátu chladicího efektu a vedlo by k destrukci celého zařízení.

Proudění chladicího média v induktoru a ostatních rozvodech chlazení je obvykle voleno v rozmezí  $1,5$  až  $2 \text{ ms}^{-1}$  a to tak, aby se zabránilo vzniku zmiňované páry v okruhu, čímž by došlo k přerušení odvodu tepla z pece a ke zničení induktoru, přičemž je nutné uchládit minimálně 20 až 25 % příkonu pece a také teplo, které projde stěnou kelímku ze zahřáté vsázky.

Pro zabezpečení vhodného chlazení je zapotřebí splnit takzvanou podmínku turbulentního proudění chladiva, která je stanovena tak, že Reynoldsovo číslo  $R_e$  je větší než 2 300. Toto číslo vypočteme dle následujícího vztahu. [14]

Rov. 4.2.17

$$R_e = \frac{v \cdot d \cdot s}{\eta \cdot g} \geq 2300,$$

kde  $v$  [m/s] je střední rychlost proudění chladiva,  $d$  [m] je průměr cívky induktoru (trubky),  $s$  [N/m<sup>3</sup>] je měrná váha kapaliny,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] je gravitační zrychlení a  $\eta$  [Ns/m<sup>2</sup>] je absolutní vazkost kapaliny.  $\eta$  je ale teplotně závislá konstanta. Teplotní závislost následuje v tabulce. [14]

Teplota [°C]	0	20	50	80	100
Vazkost $\eta$	182,3	102,4	56	36,2	$28,8 \cdot 10^{-6}$

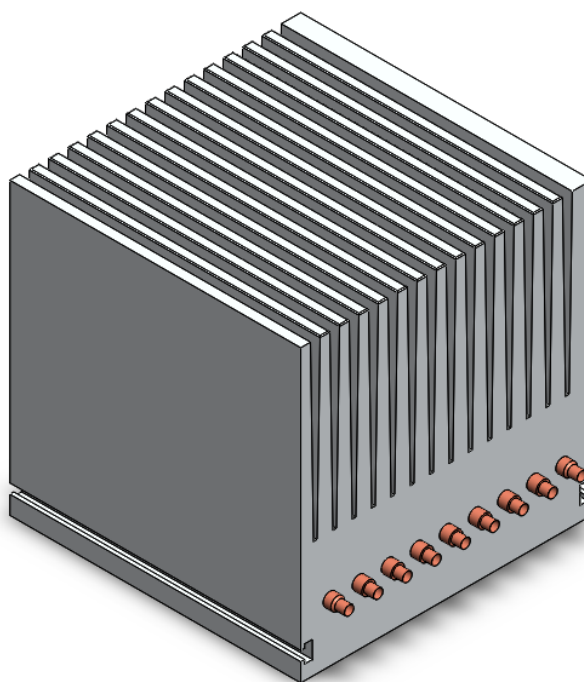
Tab. 4.2.1 – Tabulka absolutní vazkosti vody

Navrhovaný systém chlazení pece lze rozšířit o kontrolu teploty vody v různých částech okruhu, což umožní lépe řídit a regulovat chladicí okruh. Kontrola teploty může být aplikována v jednoduché podobě, například jako spínací bimetalový kontakt nebo jako složitý systém teplotních čidel s patřičným hardwarem pro vyhodnocení údajů z čidel. Oba druhy systémů budou v závislosti na teplotě vody řídit rychlost chodu vodního čerpadla a tím nepřímo i rychlost chlazení. Na následujícím Obr. 4.2.3 je vyobrazeno čerpadlo, které by bylo vhodné pro zabezpečení cirkulace vody. Pro účely navrhované pece může být použito čerpadlo typu LAING D5 ½" AG, které nabízí několik úrovní regulace rychlosti průtoku kapaliny čerpadlem.



Obr. 4.2.3 – Vodní čerpadlo

Hlavní součástí systému je chladič, který je zvolen jako pasivní s ventilátorem pro zvýšení účinnosti. Masivní kus hliníku s hlubokým žebrováním bude konvekcí odvádět teplo z měděné části rozvodu chladicí kapaliny, a tím ochlazovat systém. Na Obr. 4.2.4 je pohled na masivní hliníkový chladič, který bude nutné opatřit ventilátorem pro zajištění nuceného oběhu vzduchu kolem chladiče, tak aby se zvýšila jeho schopnost chlazení. Tepelný odpor, na který je nutné chladič dimenzovat je uveden v kapitole **Výpočty parametrů pece** v této DP.



Obr. 4.2.4 – Pasivní chladič

### 4.3 Řízení

Řízení kelímkové pece bude v rámci této DP obstarávat výkonový kmitočtový pulzní měnič napájecího zdroje jednak změnou velikosti kmitočtu, ale také změnou velikosti napájecího proudu. Změnami těchto veličin, jak je patrné například z výpočtu doby tavení vsázky, lze docílit rozdílné efektivity provozu pece a také je tímto způsobem přímo ovlivněna výška vzdmutí hladiny roztavené vsázky (meniskus).

Vzhledem k ostatním typům napájecích zdrojů je frekvenční pulzní měnič ideální volbou, především kvůli své kompaktnosti a vysokému výkonu, přičemž jeho řízení je v porovnání s ostatními zdroji triviální, je tedy vhodný pro tuto experimentální pec.

## Volba frekvence

Velikost kmitočtu výrazně ovlivňuje výšku menisku a účinnost pece. Zvýšením proudové hustoty neboli amplitudy proudu dojde ke zvýšení menisku. Zvýšením amplitudy proudu dojde ke zvýšení magnetické indukce v okolí cívky, přičemž je energie magnetického pole dána druhou mocninou indukce, což vyvolá pokles energie, která udržuje hladinu roztavené vsázky, a ta tímto způsobem poklesne.

Při zachování stejné proudové hustoty lze změnou kmitočtu napájení induktoru zjistit, že výška vzdmutí hladiny (menisku) klesá s rostoucí hodnotou frekvence, přičemž pro nízké frekvence v řádech desítek hertzů dosahuje výška menisku svého maxima. [21]

## Signalizace havarijních stavů

Signalizace není součástí návrhu indukční pece. Jelikož je navrhovaná pec určena pro laboratorní použití, není v návrhu nutné uvažovat signalizace vzniku havarijních stavů pece, protože pec nebude používána bez dozoru obsluhy. Dále pak určité zabezpečení provozu pece představuje zdroj napájení, který dokáže detekovat fatální poruchy induktoru, jako je například rozpojení obvodu induktoru (například přetavením) nebo změnu skupenství, což vyvolá výraznou změnu v odběru proudu, kterou opět profesionální frekvenční měnič detekuje.

## 4.4 Doba tavení

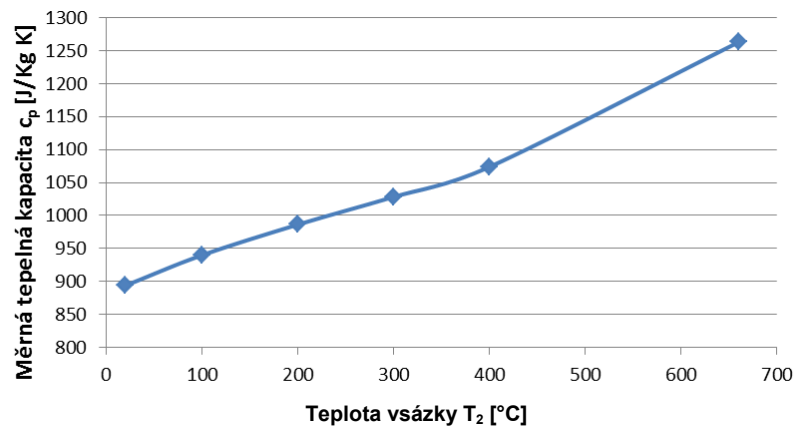
Doba tavení určuje čas potřebný ke změně skupenství vsázky z pevného na kapalné takovým způsobem, aby došlo k rovnoměrnému prohřátí vsázky. Dobu tavení je vhodné dodržovat tak, aby v materiálu nedošlo ke strukturálním změnám, jež mohou nastat při přehřátí taveného materiálu. Dále je nutné zohlednit teplotní závislost měrné tepelné kapacity vsázky na změně skupenství vsázky. Dobu tavení lze stanovit z následujících vztahů:

**Rov. 4.4.18**

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

$$t = \frac{Q}{P} [s]$$

kde  $m$  je hmotnost vsázky,  $c$  je měrná tepelná kapacita materiálu vsázky,  $\Delta T$  je rozdíl teploty okolí a teploty roztavené vsázky. Závislost změny tepelné kapacity na skupenství vsázky je znázorněna na následujícím grafu:



Obr. 4.4.1 - Teplotní závislost měrné tepelné kapacity hliníku na teplotě vsázky

#### 4.5 Výpočty parametrů pece

Výpočet parametrů indukční pece je rozdělen na tři části. Nejprve je nutné určit geometrické rozměry, následuje výpočet parametrů bez uvážení stínění pece a nakonec je proveden přepočít parametrů tak, aby bylo respektováno stínění. Výpočty jsou provedeny dle následujících vztahů. Vzhledem k tomu, že jsou následující výpočty určeny pro standartní kelímkovou pec, je nutné počítat s tím, že jde vzhledem k technologii studeného kelímku o výpočty přibližné. Vlivem chlazení kelímku pece jsou hodnoty ztrát a výkonů rozdílné oproti standartní indukční kelímkové peci. Výpočty druhé a třetí části, tedy výpočet parametrů pece se a bez stínění, jsou v **příloze D** této DP. Výpočty jsou provedeny pro tavení hliníkové vsázky. [14] [15] [17]

- **Výpočet objemu dutiny kelímku V:**

Rov. 4.5.19

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{0,5}{2375} = 0,000211 [m^3]$$

kde  $m$  [kg] je hmotnost vsázky a  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] je hustota vsázky.

- **Vnitřní průměr kelímku  $d_2$ :**

Rov. 4.5.20

$$V = \pi \cdot \left(\frac{d_2}{2}\right)^2 \cdot \frac{d_2}{0,8} = \frac{\pi \cdot d_2^3}{3,2} = 0,98125 \cdot d_2^3 \Rightarrow d_2 = \sqrt[3]{\frac{V}{0,98125}} = 0,0598 [m]$$

kde koeficient 0,8 je volba poměru mezi šířkou a výškou kelímku. Hodnota zvolena jako typická doporučená hodnota pro návrhy těchto druhů pecí. [14]

- **Výška kelímku  $l_2$  a výška induktoru pece  $l_1$ :**

K vypočtené hodnotě  $l_2$  je nutné připočítat výšku vzdmutí hladiny roztavené vsázky  $h_0$  (menisku) z **Rov.4.5.50**.

**Rov. 4.5.21**

$$\frac{d_2}{l_2} = 0,8 \Rightarrow l_2 = \frac{d_2}{0,8} + h_0 = 0,0931[m]$$

$$l_1 = 90\% \cdot l_2 = 0,1024[m]$$

- **Dále je nutné zvolit vnitřní průměr induktoru  $d_1$ , který byl zvolen 6 [cm].**
- **Výpočet hloubky vniku do induktoru  $a_1$ ,**

**Rov. 4.5.22**

$$a_1 = \sqrt{\frac{2}{\omega \lambda \mu}} = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_1}{f \cdot \mu_r}} = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{1,92 \cdot e^{-8}}{10000 \cdot 1}} = 0,0697[cm]$$

kde  $\rho_1$  [ $\Omega/m$ ] je rezistivita měděného induktoru a  $\mu_{r2}$  [H/m] je relativní permeabilita mědi.

- **Výpočet hloubky vniku do vsázky**

**Rov. 4.5. 23**

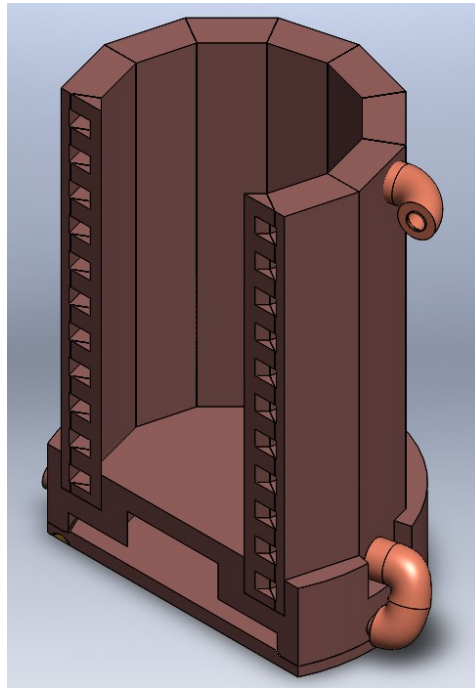
$$a_2 = \sqrt{\frac{2}{\omega \lambda \mu}} = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{\rho_2}{f \cdot \mu_{r2}}} = 503,3 \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot e^{-5}}{10000 \cdot 1}} = 1,5916[cm]$$

Kde  $\rho_2$  [ $\Omega/m$ ] je rezistivita vsázky a  $\mu_{r2}$  [H/m] je relativní permeabilita vsázky.

## 4.6 Návrh kelímku pece

Kelímek indukční pece je tvořen jednotlivými segmenty lichoběžníkovitého tvaru, jež jsou uspořádány do kruhového tvaru pece, uvnitř segmentů jsou umístěny horizontálně prostupující kanálky, jimiž proudí chladivo. Jednotlivé segmenty jsou vzájemně odizolovány takovým způsobem, aby nebyly vodivě propojeny, segmenty jsou nalakovány, čímž se zabrání vodivým spojením segmentů pomocí proudícího chladiva.

Odizolování segmentů při použití technologie vodivého kelímku je velmi zásadní pro dobrou účinnost pece, jelikož rozdělením kelímku na nevodivě spojené segmenty zabráníme vytvoření naindukovaného magnetického pole, které by svým směrem působení potlačovalo magnetické pole vytvořené induktorem. Segmenty jsou mezi sebou odděleny teplotně odolnou skelnou tkaninou. Vodivý materiál byl použit především pro zvýšení efektivity provozu pece.



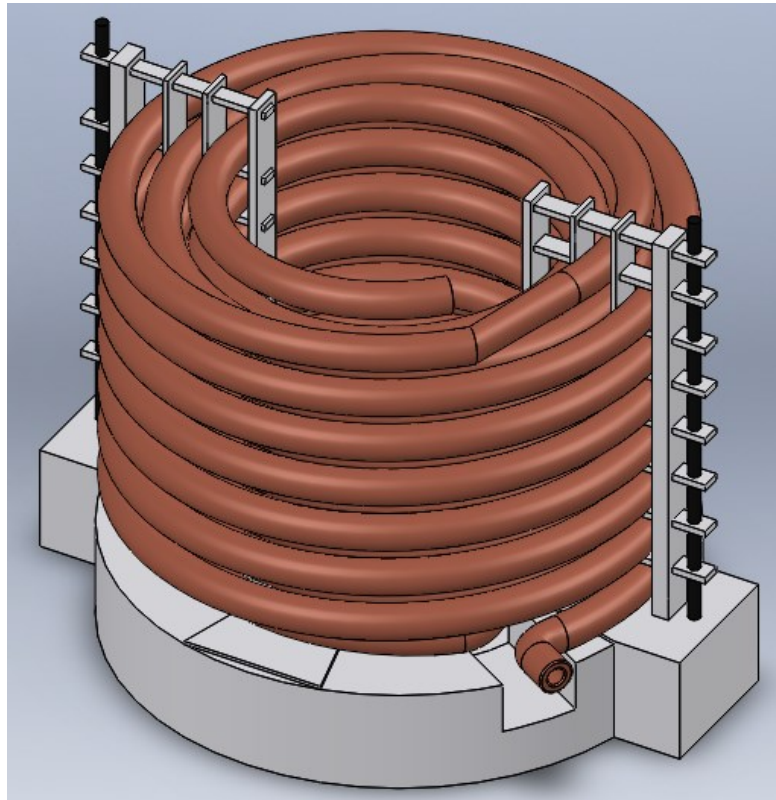
Obr. 4.6.2 – Kelímek navrhované indukční pece

#### 4.7 Návrh induktoru pece

Induktor je navržen jako dutá válcová cívka, která je protékána chladivem, v tomto případě vodou. Cívka je vinuta po vnějším obvodu kelímku pece, povrch cívky je izolovaný lakem a celá cívka je na místě upevněna pomocí sloupků, které jsou rozmístěny po obvodu kelímku pece. Ve sloupcích jsou otvory pro jednotlivé závitky induktoru.

Pro účely praktického návrhu sloupků by měly být sloupky rozděleny do jednotlivých sekcí (pater), což by usnadnilo montáž induktoru. Všechny sekce, které by byly naskládány na sebe, by poté mohly být spojeny po obou stranách šrouby.

V neposlední řadě budou na sloupcích připevněny stínící plechy pece a to tak, že budou obepínat induktor po jeho vnějším obvodu, přičemž s induktorem nebudou vodivě spojeny.



Obr. 4.7.3 – Induktor pece s podstavcem

#### 4.8 Návrh vyklápěcího zařízení pece

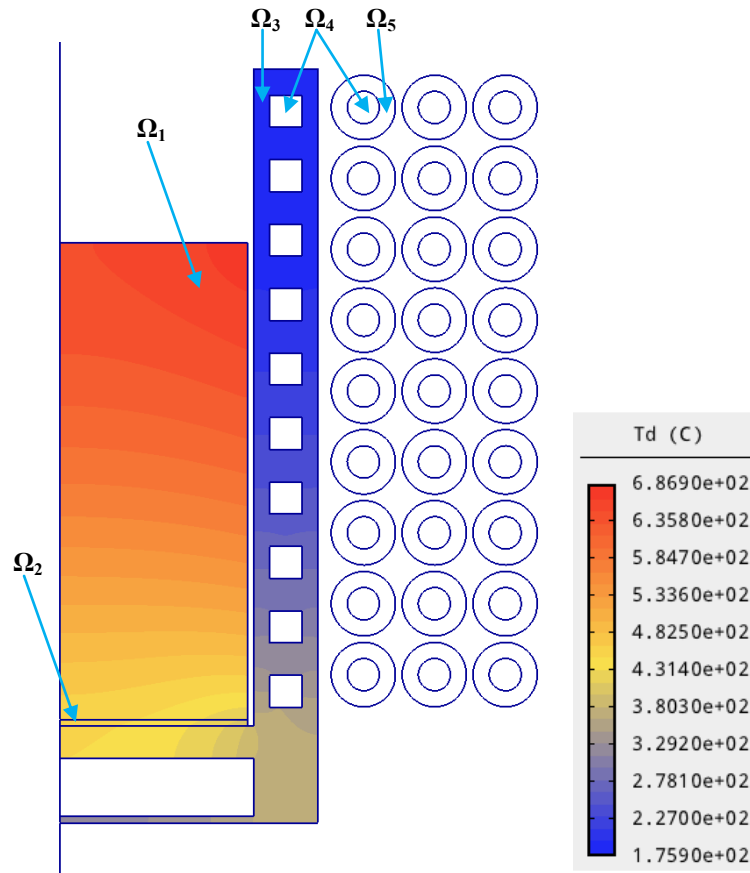
Pro účely vylévání roztaveného materiálu z pece je celý systém kelímku a induktoru umístěn na podstavci, jenž je možné vykloupat do strany. K tomuto podstavci bude induktor připojen lankovým (nebo páskovým) měděným vodičem pro přívod elektrické energie a přívod a odvod chladící vody bude zajištěn hadicovými spoji.

### 5 Simulace pece v programu Agros2D

Pomocí programu Agros2D je v následující kapitole nasimulována indukční kelímková pec s technologií studeného kelímku, která je v této DP navrhována. Model pece je simulován pomocí kombinované problematiky teplotního a elektromagnetického pole podle matematických modelů zmíněných v kapitolách výše. Jak již bylo řečeno, jedná se o simulaci reálné problematiky pomocí matematických modelů, u kterých nelze zohlednit množství parametrů, jako jsou například interakce mezi magnetickým a teplotním polem a mnohé další proměnné, působící při reálném chodu pece. Jedná se tedy o přibližnou simulaci navzájem provázaných vlastností a polí.



## 5.1 Definice zkoumaného modelu



V jednotlivých oblastech  $\Omega_n$  určíme lokální platnou podobu matematického modelu magnetického pole (dále jen  $\mathbf{M}$ ) a modelu teplotního pole (dále jen  $\mathbf{T}$ ). Následují lokální modely polí v jednotlivých oblastech  $\Omega_n$ . Remanentní indukce  $B_r$  je rovna 0. Rychlost přirozeného míchání roztavené vsázky zanedbáme, jelikož je poměrně malá.

**Rov. 3.1.3.24**

$$\Omega_1 - \mathbf{M} : \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} (\text{rot } \mathbf{A}) \right) + j\omega\gamma\mathbf{A} = 0$$

$$\Omega_1 - \mathbf{T} : -\text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = p$$

$$\Omega_2 - \mathbf{M} : \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} (\text{rot } \mathbf{A}) \right) + j\omega\gamma\mathbf{A} = 0$$

$$\Omega_2 - \mathbf{T} : -\text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = p$$

$$\Omega_3 - \mathbf{M} : \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} (\text{rot } \mathbf{A}) \right) + j\omega\gamma\mathbf{A} = 0$$

$$\Omega_3 - \mathbf{T} : -\text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

$$\Omega_4 - \mathbf{M} : \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} (\text{rot } \mathbf{A}) \right) = 0$$

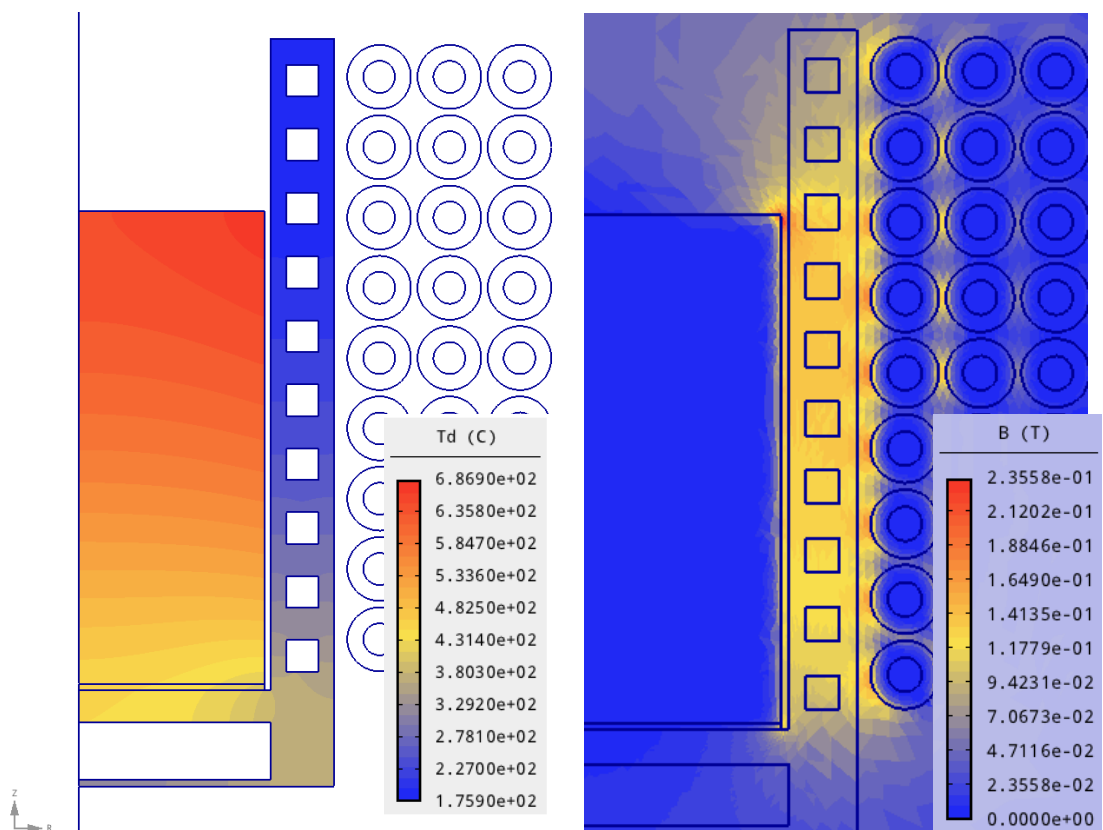
$$\Omega_4 - \mathbf{T} : -\text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

$$\Omega_5 - \mathbf{M} : \text{rot} \left( \frac{1}{\mu} (\text{rot } \mathbf{A}) \right) + j\omega\gamma\mathbf{A} = J_{\text{ext}}$$

$$\Omega_5 - \mathbf{T} : -\text{div}(\lambda \cdot \text{grad } T) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = p$$

## 5.2 Řešení modelu pece a diskuze výsledků

Řešení probíhá pomocí metody konečných prvků. Pro magnetické pole byla zvolena metoda harmonické analýzy a pro teplotní pole byl simulován přechodový děj, při řešení nelineární úlohy pomocí Newtonovy metody.



Obr. 5.5- Model rozložení teploty a indukce v kelímkové peci při tavení hliníku

Parametry modelu indukční pece, který je zobrazený na Obr. 5.5, jsou vypočtené pomocí vztahů popsaných v kapitole 4.5. **Výpočet parametrů pece**, nicméně tento výpočet je vhodný pro standartní kelímkovou indukční pec, je tedy zkorigovat výpočet tak, aby jej bylo možné použít pro technologii studeného kelímku. Převážná většina parametrů kelímkové pece odpovídá jak technologii studeného kelímku, tak i technologie standartní kelímkové pece, jde například o rozměry pece, pro vhodné navržení systému byly parametry jakými jsou například ztráty, kmitočty, vzdálenosti vsázky od stěny kelímku a proud převzatý z modelu pece v programu Agros2D.

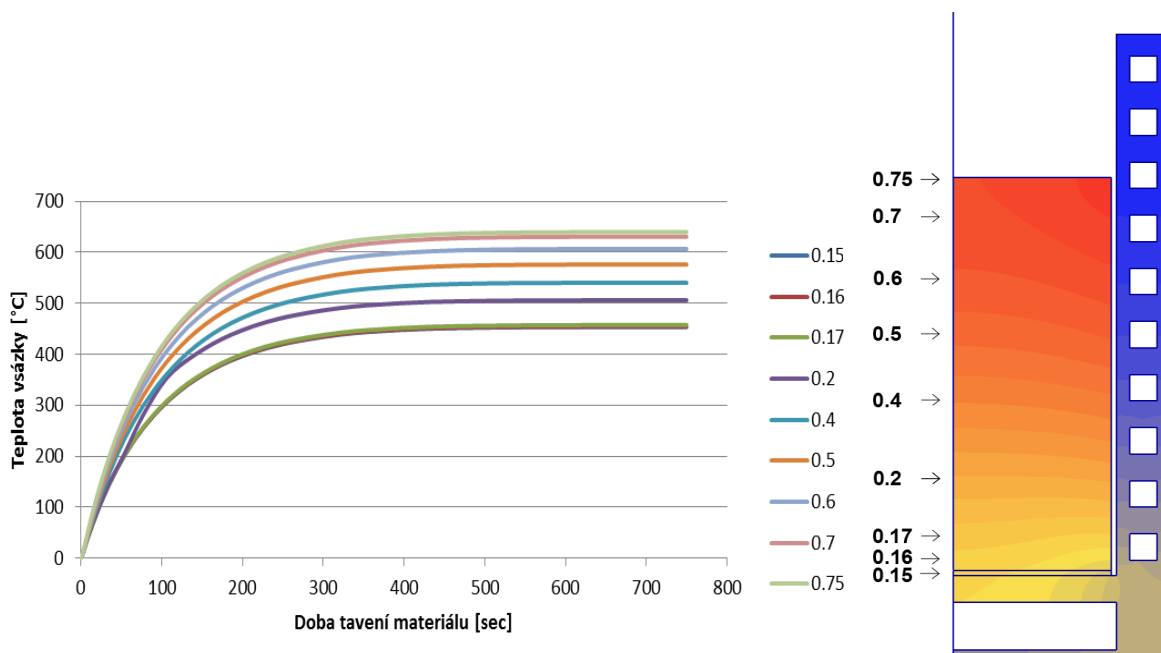
Jednotlivé parametry zkorigované s výpočty a použité pro simulaci indukční pece jsou k dispozici v následující tabulce:

Základní parametry pece	Hodnota	Jednotky
Napájecí napětí induktoru $U_g$	100	[V]
Napájecí kmitočet induktoru $f$	10	[kHz]
Napájecí proud induktoru $I$	475	[A]

Základní materiálové parametry	Hodnota	Jednotky
Měrná tepelná kapacita mědi $c_{p(660^\circ\text{C})}$	387	[J/kg K]
Měrná tepelná kapacita hliníku $c_{p(660^\circ\text{C})}$	1067	[J/kg K]
Tepelná vodivost mědi $\lambda$	401	[W/m K]
Tepelná vodivost hliníku $\lambda$	208	[W/m K]
Konduktivita mědi $\gamma$	58,11e6	[S/m]
Konduktivita hliníku $\gamma$	37,70e6	[S/m]
Počet závitů induktoru	21	[Z]

Tab. 5.6 – Přehled základních veličin pece

Následně je zobrazena na Obr. 5.7 teplota tavení vsázky pece v závislosti na umístění zkoumaného bodu ve vsázce v časovém průběhu. V příloze C, této DP je vložena tabulka velikosti teploty v závislosti na pozici zkoumaného bodu ve vsázce, která byla získána pomocí simulací modelu pece v programu Agros2D.



Obr. 5.7 – Časový průběh ohřevu vsázky v závislosti na poloze

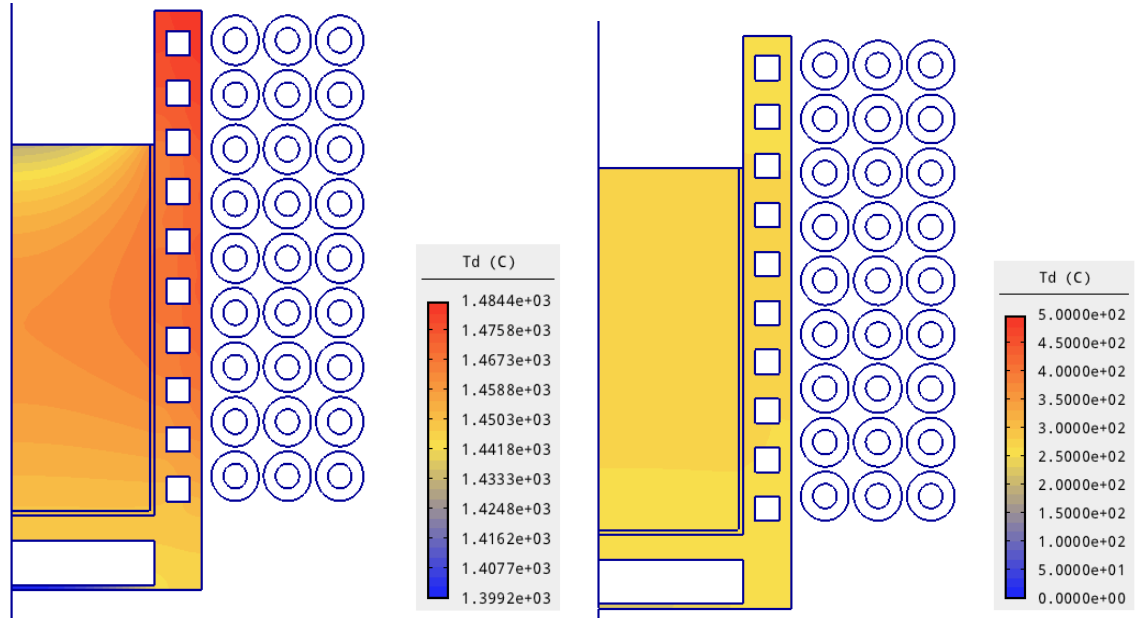
V následující tabulce je popsán vliv změny konduktivity segmentu stěny kelímku pece na velikost ztrát ve vsázce, v segmentu pece a ve skull vrstvě.

$\gamma$ [S/m]	100	300	500	5000
<b>P<sub>j</sub> skull (W)</b>	93.71	93.71	93.70	93.53
<b>P<sub>j</sub> vsázka (W)</b>	2881.00	2881.00	2880.00	2875.00
<b>P<sub>j</sub> segment (W)</b>	29.65	88.93	148.20	1480.00

Tab. 5.8 – Vliv změny konduktivity na velikost ztrát

Pomocí simulací indukční pece bylo zjištěno, že je nežádoucí, když se vsázka dotýká bočních stěn kelímku. V tomto případě dojde k významnému poklesu výkonu pece, například v případě tavení hliníku se na vnitřní boční stěně kelímku vytvoří následkem skull efektu tenká vrstva kovu, která absorbuje elektromagnetické pole, který produkuje induktor pro ohřev vsázky, přestože je vrstva kovu na boční stěně poměrně slabá, způsobí významný pokles elektromagnetického pole a tím velmi výrazně zpomalí či úplně zastaví proces tavení vsázky. Na Obr. 5.9 je simulované tavení vsázky křemíku a na Obr. 5.10 je simulace tavení hliníku.

Rozdíl tavení obou kovů při stejných parametrech pece spočívá právě ve vytvořeném skull efektu, který u křemíkové vsázky nesnižuje působení elektromagnetického pole induktoru.



Obr. 5.10 – Simulace pece s SI vsázkou

Obr. 5.10 – Simulace pece s AL vsázkou

		$d_{vs} = d_{kel}$	$d_{vs} < d_{kel}$
Al - Hliník (W)	Pj vsázka	431	93.71
	Pj skull	2610	2881.00
SI - Křemík (W)	Pj vsázka	1.833e-06	-
	Pj skull	0	-

Tab. 5.11 – Vyhodnocení ztrát při různém průměru a typu vsázky

Kde  $d_{vs}$  je průměr vsázky a  $d_{kel}$  je průměr kelímku indukční pece. Simulace proběhly při konduktivitě v segmentu kelímku 100 [S/m].

### 5.3 Citlivostní studie návrhu pece

Analýza citlivosti matematického modelu pece vychází z metody OFAT (One Factor at a Time) Pomocí této metody se zjistí vliv dílčích parametrů  $x_i$  na každý stanovený funkcionál  $F_j$  pomocí změny parametrů o krok  $\delta$ . V případě této DP budeme zkoumat vliv změny napájecího proudu induktoru a kmitočtu na změnu ztrát ve vsázce pece a ve skull vrstvě, změna proudu a frekvence je zkoumána pro +/- 2,3 a 5 % ze základní vypočtené hodnoty. Základní hodnota proudu je 475 A, a základní hodnota kmitočtu je 10 kHz.

Sledování vlivu změn parametrů pece je zaneseno do následující tabulky stejně tak, jako i výsledky citlivostní analýzy  $EE_j^i$ .

Veličina	Rozsah	Přepočet rozsahu	$P_j$ vsázky [W]	$P_j$ skull [W]	Citlivostní analýza $EE_j^i$
Proud (A)	475 A +2%	484.5	2997	97.50	<b>12.21</b>
	475 A +3%	489.25	3056	99.42	<b>12.28</b>
	475 A +5%	498.75	3176	103.30	<b>12.42</b>
	<b>475 A</b>	<b>475</b>	<b>2881</b>	<b>93.75</b>	1
	475 A -2%	465.5	2767	90.00	<b>12.00</b>
	475 A -3%	460.75	2711	88.18	<b>11.93</b>
	475 A -5%	451.25	2600	84.58	<b>11.83</b>
Kmitočet (Hz)	10 kHz +2%	10200	2913	95.08	<b>0.16</b>
	10 kHz +3%	10300	2929	95.76	<b>0.16</b>
	10 kHz +5%	10500	2960	97.11	<b>0.16</b>
	<b>10 kHz</b>	<b>10000</b>	<b>2881</b>	<b>93.71</b>	1
	10 kHz -2%	9800	2849	92.34	<b>0.16</b>
	10 kHz -3%	9700	2833	91.65	<b>0.16</b>
	10 kHz -5%	9500	2800	90.26	<b>0.16</b>

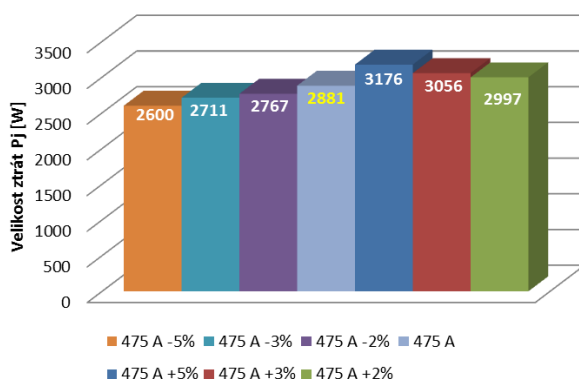
Tab. 7.2 – Přehled výsledků citlivostní analýzy pro dílčí parametry

Pomocí následujícího vztahu vypočteme citlivost systému pece na změny parametrů:

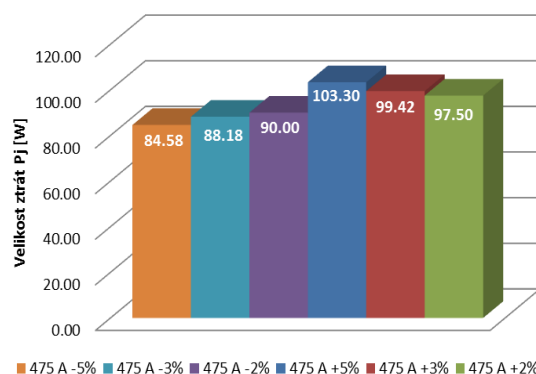
Rov. 7.25

$$EE_j^i = \frac{F_j(x_1, \dots, x_i + \delta, \dots, x_n) - F_j(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\delta}$$

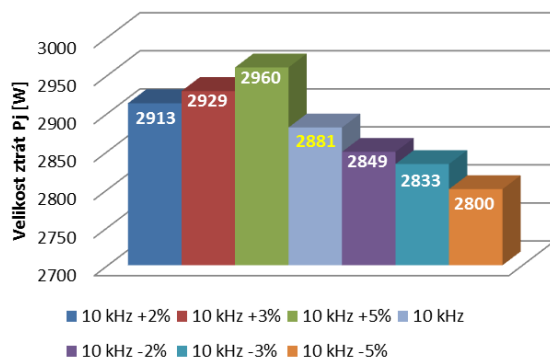
Vliv změn jednotlivých parametrů znázorněn do jednotlivých grafů:



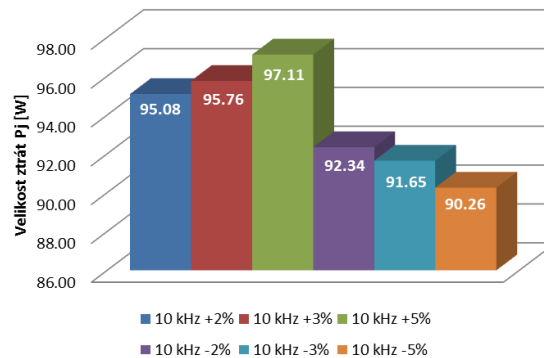
Obr. 7.5 – Závislost ztrát ve vsázce na napájecím proudu



Obr. 7.5 – Závislost ztrát ve skull vrstvě na napájecím proudu



Obr. 7.7 – Závislost ztrát ve vsázce na napájecím kmitočtu



Obr. 7.7 - Závislost ztrát ve skull vrstvě na napájecím kmitočtu

## 6 Technická dokumentace experimentální pece

Návrh technické dokumentace je vypracován v programu SolidWorks, modely byly vyhotoveny na školním počítači s licenci pro Západočeskou Univerzitu v Plzni. Technická dokumentace je zařazena do DP jako přílohy na konci práce.

Kelímek pece se skládá z 11 segmentů a jednoho spojovacího segmentu (který rozvádí chladicí kapalinu v kelímku). Segmenty jsou vzájemně odizolovány lakováním povrchu (lakovány jsou i kanálky uvnitř segmentů) a mezi stěny je vložena vložka ze skelného vlákna. Induktor pece je obdobně ošetřen lakem a případně také ovinut skelným vláknem v podobě pásy. Induktor je napájen ze zdroje, a proto je odizolován od kelímku nevodivými spojkami na jeho koncích. Segmenty drží pohromadě dno kelímku, se zářezy pro jednotlivé segmenty. Dno kelímku je zespodu opatřeno víkem. Celá konstrukce pece je postavena na vyklápěcí kolíbkou, tak aby se dala vylévat roztavené vsázka. Následuje tabulka s jednotlivými díly:

Označení přílohy	Typ dílu systému indukční pece
Příloha E	Segmenty kelímku pece
Příloha F	Dno pece
Příloha G	Víko dna pece
Příloha H	Induktor pece
Příloha I	Chladič pece
Příloha J	Vodní čerpadlo
Příloha K	Vylévací zařízení
Příloha L	Kompletní sestava pece

Tab. 6.3 – Přehled jednotlivých dílů pece v jednotlivých přílohách

## 7 Závěr

Tato DP se zabývá návrhem experimentální indukční pece s technologií studeného kelímku. Na začátku práce byla provedena rešerše tavení v obecné kelímkové peci a v peci s technologií studeného kelímku. Následující část práce se zabývá návrhem parametrů pece, poté je práce zaměřena na rozbor zjednodušeného modelu pece, který byl proveden v programu Agros2D. V poslední části práce je zpracována kompletní výrobní dokumentace pro navrhovanou indukční pec.

Během návrhu pece se ukázalo, že tavení nízkoteplotních nemagnetických kovů v peci s technologií studeného kelímku obnáší řešení problematiky počátku tavení, kdy vytvořená několik mikrometrů silná vrstva ztuhlého kovu na vnitřním povrchu kelímku působí vlastním naindukovaným magnetickým polem proti smyslu magnetického pole induktoru pece. Tento jev se postupně eliminuje vlastním zahříváním vsázky, kdy klesá její vodivost. V případě vsázky, jakou je například křemík, tento jev nevzniká, jelikož se v kelímku nevytvoří vodivá vrstva na vnitřní straně kelímku.

Pomocí simulací v programu Agros2D bylo dále zjištěno, že se během tavení vsázky nijak významně nemění její vodivost a v neposlední řadě také fakt, že pokud se vsázka po vložení do kelímku pece nedotýká bočních stěn pece, je proces tavení v tomto druhu pece efektivnější.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MATSUZAWA, Shuhei, Katsuhiko HIRATA, Takahiro YOSHIMURA, Gaku YOSHIKAWA, Fumikazu MIYASAKA, M.L. ELLIOTT a D.L. LESSOR. Numerical Analysis of Cold Crucible Induction Melting Employing FEM and MPS Method: Cold crucible melter assessment. In: *IEEE Transactions on Magnetics*. 1996, s. 183-183. DOI: 10.1007/978-3-540-72816-0\_4723.
- [2] PERICLEOUS, K., V. BOJAREVICS, G. DJAMBAZOV, R.A. HARDING, M. WICKINS, E.L. BIRD a C.E. Jr. HOLCOMBE. Experimental and numerical study of the cold crucible melting process. In: *Applied Mathematical Modelling*. 2006, s. 183-183. DOI: 10.2172/147719.
- [3] RUDNEV, Valery. *Handbook of induction heating*. New York: Marcel Dekker, c2003, xi, 777 p. ISBN 08-247-0848-2.
- [4] MÜHLBAUER, A. History of induction heating and melting. Essen: Vulkan, c2008, x, 202 p. ISBN 38-027-2946-3
- [5] GINTEROVÁ, Monika. Studený kelímek: Experimentální pokusy Ústavu jaderného výzkumu Řež (ÚJV) [online]. ÚJV, 2004 [cit. 2014-11-16]. Dostupné z: <http://3pol.cz/232-podivuhodny-kelimek> . Reportáž o výzkumu.
- [6] AREVA. The Cold Crucible: a world first for high-level waste[online]. 2013 [cit.2014-11-16]. Dostupné z: <http://www.areva.com/EN/operations-3400/the-cold-crucible-a-world-first-for-highlevel-waste.htm>
- [7] KANEKO, Terouki MISAWA a Kazuyoshi TABATA. R&D CENTER. COLD CRUCIBLE INDUCTION CASTING OF SEMI-CONDUCTOR SILICON FOR SOLAR CELL [online]. Osaka, 1990, 1990 [cit. 2014-11-16]. Dostupné z: <http://www.induction-heating.com.cn/uploadfile/20121119/20121119145654700.pdf>
- [8] Jouleovo teplo [online]. [cit. 2014-11-16]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Jouleovo\\_teplo](http://cs.wikipedia.org/wiki/Jouleovo_teplo)
- [9] HRADÍLEK, Zdeněk. Elektrotepelná technika: simulace - počítačové programy. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2001, 192 s. ISBN 80-707-8874-7.
- [10] ROT, D. A KOŤENÝ, J. MODELOVÁNÍ STARTU TAVBY OXIDŮ ELEKTROMAGNETICKOU INDUKCÍ VE STUDENÉM KELÍMKU. ELECTROSCOPE IV. 2010. ISSN 1802-4564.
- [11] RADA, J. A KOL. ELEKTROTEPELNÁ TECHNIKA. PRAHA : SNTL, 1985. ISBN 3-486-26215-7
- [12] KJELLIN, Fredrik Adolf. Electric furnace [patent]. Grant, US 800857 A. Uděleno 6. Června 1905.
- [13] CONSARC ENGINEERING LIMITED. Induction Skull Melting [online]. [cit. 2015-02-09]. Dostupné z: [http://www.consarceng.com/pages/product\\_induction\\_skull\\_melting.html](http://www.consarceng.com/pages/product_induction_skull_melting.html)
- [14] LANGER, Emil. *Elektrotepelná technika: Teorie a výpočty indukčních a dielektrických zařízení. Část 5*. Plzeň: Vys. škola strojní a elektrotechn., 1973.
- [15] LANGER, E a J KOŽENÝ. *Elektrotepelná zařízení indukční: Základy teorie, výpočty a konstrukce*. Plzeň: Vys. škola strojní a elektrotechn., 1982.
- [16] Cold Crucible Induction Melting Background and State of the Art. Dostupné z: <http://www.fissoreagency.com/pages/wp-content/uploads/2009/09/CCIM.pdf>
- [17] KOŽENÝ, J., MÜHLBAUER, A. a NACKE B. *Elektrotechnický obzor*. 1987, roč. 76, č. 7, s25.
- [18] MAYER, Daniel. Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry. 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012, 531 s. ISBN 978-80-7232-424-8.
- [19] BEHRENS, Von Torge. Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier, 2007. ISBN 978-386-7274-050.
- [20] Levitation Melting of Several Kilograms of Metal with Cold Crucible: IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL. 30, NO. 6, NOVEMBER 1994. [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=334207>
- [21] WEISS, Pavel. Vývoj a počítačová realizace level-set algoritmu pro modelování indukčního míchání roztaveného kovu v kelímku. Praha, 2014. Diplomová Práce. ČVUT. Vedoucí práce Prof.Ing. Ivo Doležal, CSc.
- [22] KOŽENÝ, Jiří, MUHLBAUER a B NACKE. Příspěvek k výpočtům indukčních kelímkových pecí z hlediska praktických zkušeností. *Elektrotechnický obzor*. Praha: Elektrotechnický svaz československý, 1987, roč. 76, 7, s.5.

## Přílohy

### Příloha A – Tabulka hodnot součinitelů $\alpha$

d/l	$\alpha$	d/l	$\alpha$	d/l	$\alpha$
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	0.90529	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

**Příloha B –  
Tabulka hodnot součinitelů F**

$d_c/l_1$	$dv/l_2$	$l_1/l_2$								
		0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	20
0.1	0.08	1.22007	1.09103	0.98551	0.89803	0.82451	0.70810	0.62027	0.55172	0.49677
	0.10	1.22022	1.09112	0.98557	0.89807	0.82454	0.70812	0.62028	0.55172	0.49677
	0.12	1.22041	1.09123	0.98564	0.89811	0.82457	0.70813	0.62028	0.55173	0.49677
0.2	0.16	1.14452	1.03935	0.94757	0.86862	0.80074	0.69110	0.60707	0.51091	0.48759
	1.18	1.14553	1.03994	0.94793	0.86886	0.80090	0.69119	0.67120	0.54094	0.48761
	0.20	1.14666	1.04060	0.94734	0.86913	0.80108	0.69128	0.60717	0.54098	0.48763
	0.22	1.14790	1.04132	0.94879	0.86942	0.80128	0.69138	0.60723	0.54101	0.48766
	0.24	1.14926	1.04211	0.94928	0.86794	0.80150	0.69150	0.60730	0.54105	0.48769
0.3	0.26	1.05756	0.97680	0.89964	0.83013	0.76872	0.66720	0.58797	0.52496	0.47387
	0.28	1.06040	0.97846	0.90068	0.83081	0.76918	0.66744	0.58811	0.52505	0.47393
	0.30	0.06343	0.98023	0.90179	0.83154	0.76969	0.66770	0.58826	0.52515	0.47399
	0.32	1.06665	0.98212	0.90296	0.83232	0.77022	0.66798	0.58843	0.52525	0.47406
	0.34	1.07006	0.98411	0.90412	0.83314	0.77078	0.66828	0.58860	0.52536	0.47413
0.4	0.23	0.97837	0.91585	0.85042	0.78896	0.73335	0.63959	0.56527	0.50565	0.45702
	0.36	0.98763	0.92131	0.85386	0.79124	0.73493	0.64043	0.56577	0.50596	0.45723
	0.40	0.99786	0.92735	0.85766	0.79377	0.73668	0.64136	0.56632	0.50631	0.45747
	0.44	1.00910	0.93394	0.86182	0.79653	0.73860	0.64238	0.56692	0.50670	0.45773
	0.48	1.02105	0.94105	0.86631	0.79952	0.74067	0.64349	0.56758	0.50712	0.45801
0.5	0.40	0.92510	0.86862	0.80854	0.75158	0.69971	0.61167	0.54146	0.48489	0.43863
	0.45	0.94053	0.87783	0.81442	0.75552	0.70247	0.70247	0.54236	0.48548	0.43902
	0.50	0.95747	0.88797	0.82088	0.75987	0.70552	0.70552	0.54335	0.48612	0.43946
	0.55	0.97581	0.89896	0.82791	0.76460	0.70884	0.70884	0.54444	0.48683	0.43995
	0.60	0.99546	0.91075	0.83546	0.76969	0.71242	0.71242	0.54562	0.48759	0.44047
0.6	0.45	0.88143	0.82671	0.76964	0.71574	0.66674	0.58352	0.51702	0.46334	0.41936
	0.50	0.89782	0.83667	0.77605	0.72013	0.70552	0.58524	0.51808	0.46404	0.41984
	0.55	0.91561	0.84748	0.78306	0.72492	0.70884	0.58714	0.51924	0.46480	0.42037
	0.60	0.93469	0.85911	0.79061	0.73007	0.71242	0.58919	0.52049	0.46562	0.42095
	0.65	0.95497	0.87149	0.79866	0.73558	0.71624	0.59138	0.52184	0.46651	0.42156
	0.70	0.97631	0.88455	0.80718	0.74142	0.72029	0.59382	0.52328	0.46747	0.42223
0.7	0.55	0.86387	0.80125	0.74159	0.68743	0.63913	0.55825	0.49422	0.44273	0.40064
	0.60	0.88091	0.81183	0.74857	0.69228	0.64263	0.56025	0.49546	0.44357	0.40122
	0.65	0.89907	0.82343	0.75605	0.69747	0.64538	0.56239	0.49681	0.44446	0.40185
	0.70	0.91825	0.83509	0.76398	0.70299	0.65038	0.56469	0.49824	0.44543	0.40253
	0.75	0.93835	0.84766	0.77234	0.70862	0.65460	0.56712	0.49977	0.44645	0.40325
	0.80	0.95926	0.86078	0.78108	0.71494	0.65905	0.56958	0.50139	0.44754	0.40402

<b>0.8</b>	0.65	0.84910	0.77889	0.71641	0.66158	0.61360	0.53445	0.47245	0.42288	0.38247
	0.70	0.86542	0.78930	0.72345	0.66657	0.61726	0.53660	0.47383	0.42381	0.38313
	0.75	0.88261	0.80030	0.73090	0.67185	0.62115	0.53889	0.47529	0.42480	0.38384
	0.80	0.90059	0.81183	0.73874	0.67742	0.62525	0.54131	0.47684	0.42586	0.38459
	0.85	0.91927	0.82385	0.74693	0.68326	0.62956	0.54386	0.47847	0.42697	0.38538
	0.90	0.93587	0.83635	0.75545	0.68934	0.63406	0.54653	0.48019	0.42815	0.38622
<b>0.9</b>	0.70	0.81812	0.74756	0.68600	0.63257	0.58611	0.50990	0.45045	0.40302	0.36441
	0.75	0.83237	0.75690	0.69247	0.63724	0.58959	0.51199	0.45181	0.40395	0.36508
	0.80	0.84735	0.76675	0.69930	0.64217	0.59328	0.51422	0.45325	0.40495	0.36579
	0.85	0.86302	0.77709	0.70648	0.64738	0.59717	0.51657	0.45479	0.40600	0.36655
	0.90	0.87934	0.78787	0.71400	0.65283	0.60126	0.51904	0.45640	0.40712	0.36735
	0.95	0.89623	0.79908	0.72183	0.65952	0.60554	0.52163	0.45809	0.40829	0.36819
	1.00	0.91365	0.81068	0.72995	0.66444	0.60999	0.52434	0.45987	0.40951	0.36908
1.05	0.93153	0.82264	0.73836	0.67058	0.61461	0.52718	0.46172	0.41079	0.37000	
<b>1.0</b>	0.80	0.79991	0.72584	0.66305	0.60947	0.56342	0.48868	0.43090	0.38506	0.34787
	0.85	0.81289	0.73462	0.66927	0.61405	0.56689	0.49081	0.43231	0.43231	0.34857
	0.90	0.82649	0.74384	0.67581	0.61887	0.57054	0.49306	0.43380	0.43380	0.34932
	0.95	0.84070	0.75349	0.68267	0.62393	0.57139	0.49544	0.43536	0.43536	0.35011
	1.00	0.85548	0.76255	0.68984	0.62922	0.57841	0.49792	0.43701	0.43701	0.35094
	1.05	0.87080	0.77401	0.69731	0.63475	0.58261	0.50052	0.43873	0.43873	0.35181
	1.10	0.88663	0.78484	0.70506	0.64049	0.58699	0.50324	0.44053	0.44053	0.35272
	1.15	0.90293	0.79604	0.71309	0.64645	0.59153	0.50606	0.44241	0.44241	0.35673

**Příloha C –****Tabulka velikosti teploty v závislosti na pozici zkoumaného bodu ve vsázce.**

<b>d [mm]</b>	<b>0.155</b>	<b>0.16</b>	<b>0.17</b>	<b>0.2</b>	<b>0.4</b>	<b>0.5</b>	<b>0.6</b>	<b>0.7</b>	<b>0.75</b>
<b>t [sec]</b>	<b>T [K]</b>	<b>T [K]</b>	<b>T [K]</b>	<b>T [K]</b>	<b>T [K]</b>	<b>T [K]</b>	<b>T [K]</b>	<b>T [K]</b>	<b>T [K]</b>
<b>0</b>	273.15	273.15	273.15	273.15	273.15	273.15	273.15	273.15	273.15
<b>3.33333</b>	289.035	288.907	288.665	288.047	286.957	287.655	288.883	290.542	291.447
<b>6.66667</b>	305.063	304.947	304.73	304.197	304.298	306.088	308.724	311.976	313.644
<b>11.5033</b>	327.168	327.115	327.031	326.934	330.591	334.238	338.671	343.511	345.817
<b>20.4696</b>	364.969	365.027	365.174	365.849	375.973	382.682	389.665	396.403	399.385
<b>34.9426</b>	418.043	418.256	418.729	420.479	439.377	450.104	460.335	469.438	473.255
<b>53.6388</b>	474.012	474.397	475.225	478.149	506.483	521.519	535.263	546.962	551.711
<b>77.2531</b>	529.011	529.573	530.771	534.91	573.027	592.571	610.019	624.472	630.211
<b>106.385</b>	579.63	580.364	581.92	587.237	634.861	658.796	679.795	696.801	703.433
<b>142.292</b>	624.311	625.203	627.089	633.485	689.645	717.266	741.188	760.323	767.706
<b>187.187</b>	661.926	662.952	665.115	672.413	735.33	765.94	792.27	813.158	821.159
<b>244.823</b>	691.35	692.472	694.836	702.789	770.879	803.819	832.035	854.296	862.781
<b>319.823</b>	711.62	712.808	715.308	723.711	795.373	829.934	859.461	882.681	891.505
<b>394.823</b>	720.867	722.085	724.648	733.256	806.556	841.862	871.994	895.656	904.637
<b>469.823</b>	724.709	725.94	728.529	737.222	811.204	846.821	877.205	901.052	910.098
<b>544.823</b>	726.118	727.353	729.951	738.676	812.908	848.638	879.116	903.03	912.1
<b>619.823</b>	726.529	727.766	730.367	739.101	813.406	849.17	879.674	903.609	912.685
<b>694.823</b>	726.584	727.821	730.423	739.158	813.473	849.241	879.749	903.686	912.763
<b>750</b>	726.54	727.777	730.379	739.113	813.426	849.194	879.701	903.639	912.717

**Příloha D – Pokračování výpočtu parametrů pece s a bez stínění**

- **Náhradní průměr cívky  $d_c$ .**

**Rov. 4.5.26**

$$d_c = d_1 + a_1 = 0,0607[m]$$

- **Náhradní průměr vsázky  $d_v$ .**

**Rov. 4.5.27**

$$d_v = d_2 + a_2 = 0,0439[m]$$

➤ **Výpočet elektrických parametrů bez stínění**

- **Výpočet pomocných součinitelů**

**Rov. 4.5.28**

$$\alpha_1 = f \cdot \left( \frac{d_c}{l_1} \right) = f(0,6518) \rightarrow \alpha'_1 = 0,77724[-]$$

$$\alpha_2 = f \cdot \left( \frac{d_v}{l_1} \right) = f(0,4289) \rightarrow \alpha'_2 = 0,84334[-]$$

$$k_{1,2}^2 = \left( \frac{d_v}{d_c} \right)^2 \cdot \left( \frac{l_1}{l_2} \right) \cdot \frac{F_{1,2}'^2}{\alpha'_1 \cdot \alpha'_2} = 0,90901$$

$$F_{1,2}' = f \cdot \left( \frac{d_c}{l_1}; \frac{d_v}{l_2}; \frac{l_1}{l_2} \right) = f(1,1) \rightarrow F_{1,2}' = 0,82671$$

Vypočtené hodnoty pomocných součinitelů  $\alpha_{1,2}$  a  $F_{1,2}$  odečteme z tabulek pro hodnoty daných součinitelů z Přílohy [A a B].

- **Výpočet pomocných konstant**

**Rov. 4.5.29**

$$k_1 = \omega \cdot (1 - k_{1,2}^2) \cdot \mu_0 \cdot \pi \cdot \left( \frac{d_c}{2} \right)^2 \cdot \frac{\alpha_1}{l_1} = 9,6e^{-4}$$

$$k_2 = \left[ \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_c}{\alpha_1 \cdot \left( l_1 - \frac{U_g}{15000} \right)} + \rho_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_v}{\alpha_2 \cdot l_2} \cdot \left( \frac{F_{1,2}'}{\alpha'_2} \right)^2 \right] = 0,000874$$

- **Odhad celkových ztrát**

**Rov. 4.5.30**

$$P_c = P_c' - P_g = 920 - 23000 = 22080W$$

$P_g$  je příkon ze zdroje.  $P_c'$  je přibližný odhad celkových ztrát, který je pro tento typ pece odhadnutý na 24 % z příkonu ze zdroje. Tento odhad ztrát bude následně výpočtem upřesněn.

- **Výpočet induktoru**

Výpočet proudu pece

**Rov. 4.5.31**

$$I_1 = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{P_c}{U_g} = \frac{9,6e^{-4}}{8,74e^{-4}} \cdot \frac{22080}{100} = 242,34[A]$$

Kde  $P_c$  [W] je celkový odhadovaný výkon, který je dán rozdílem příkonu pece a vypočtených ztrát.  $U_g$  [V] je velikost napětí napájecího zdroje induktoru.

- **Výpočet rozměrů induktoru****Rov. 4.5.32**

$$l = \pi \cdot d_2 \cdot Z = 3,9469[m]$$

$$S = \frac{2 \cdot I \cdot l \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot \Delta U} [mm^2] \rightarrow d_i = \sqrt{\frac{2 \cdot I \cdot l \cdot \cos \varphi}{\gamma \cdot \Delta U \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 242,34 \cdot 3,9469 \cdot 0,9998}{58,108 \cdot 3 \cdot 3,14}} = 1,8688[mm]$$

$$d_{ind} = d_i + a_1 + d_{chl} = 1,8688 + 0,6974 + 5 = 7,5662[mm]$$

Kde  $Z$  je počet závitů induktoru,  $d_2$  [m] je vnější průměr kelímku,  $l$  [m] je délka induktoru,  $\cos \varphi$  je účinník napájecího zdroje,  $\Delta U$  [V] je maximální úbytek napětí (pro indukční ohřev 3 % z napětí zdroje induktoru),

$\gamma$  [S \* m /mm<sup>2</sup>] je měrná elektrická vodivost (konduktivita) mědi,  $d_i$  [mm] je průměr mědi v závitě induktoru,  $a_1$  [mm] je hloubka vniku do měděného vodiče,  $d_{chl}$  [mm] je průměr chladicí dutiny uvnitř závitě induktoru, která je protékána chladícím médiem a  $d_{ind}$  [mm] je celkový průměr jednoho závitě induktoru pece.

- **Výpočet počtu závitů induktoru****Rov. 4.5.33**

$$N_1 = \sqrt{\frac{k_2}{k_1^2} \cdot \frac{U_g^2}{P_c}} = 20,7358 \Rightarrow 21 \text{ závitů}$$

Kde  $k_1$  a  $k_2$  jsou pomocné konstanty vypočtené v Rov. 4.5.36.

- **Výpočet vlastní indukčnosti induktoru**

Rov. 4.5.34

$$L_1 = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot \frac{\alpha_1}{l_1} \cdot N_1^2 = 1,33e^{-5} = 13,3[\mu H]$$

$$L_{l,1} = L_1 \cdot (1 - k_{1,2}^2) = 6,7358e^{-6}[H]$$

$$R_1 = \rho_1 \cdot \frac{\pi \cdot d_c \cdot N_1^2}{a_1 \cdot \left(l_1 - \frac{U_g}{15000}\right)} = 0,0268 = 26,8[m\Omega]$$

Kde  $L_1$  [H] je vlastní indukčnost cívky,  $L_{l,1}$  [H] je celková indukčnost zařízení proti zdroji a  $R_1$  [Ω] je odpor cívky.

- **Výpočet vlastní indukčnosti vsázky**

Rov. 4.5.35

$$L_2 = \mu_0 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_v}{2}\right)^2 \cdot \frac{\alpha_2}{l_2} = 1,57e^{-8} = 157[\mu H]$$

$$R_2 = \rho_2 \cdot \frac{\pi \cdot d_v}{a_2 \cdot l_2} = 0,0008467 = 0,8467[m\Omega]$$

Kde  $L_2$  [H] je vlastní indukčnost vsázky a  $R_2$  [Ω] je odpor vsázky.

- **Výpočet převodního poměru  $p^2 R_2$** 

Rov. 4.5.36

$$p^2 = k_{1,2}^2 \cdot \frac{l_1}{l_2} = 423,779[-]$$

$$p = \sqrt{p^2} = 20,5859$$

$$p^2 \cdot R_2 = 0,3588$$

- **Výpočet celkového odporu  $R_I$** 

Rov. 4.5.37

$$R_I' = p^2 \cdot R_2 + R_1 = 0,3856[\Omega]$$

$$R_I = R_1 + \rho \cdot R_2 + R_I' = \frac{P_g}{I_1^2} = 0,3916[\Omega]$$

Kde  $I_1$  je proud induktorem.

- **Výpočet kapacity induktoru  $C'$** 

Rov. 4.5.38

$$C' = \frac{L_I}{R_I^2 + \omega^2 \cdot L_I^2} = 4,0254e^{-5} = 40,25[\mu F]$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = 62831,85[rad \cdot s^{-1}]$$



- **Výpočet činitele jakosti  $Q_I$**

Rov. 4.5.39

$$Q_I = \frac{\omega \cdot L_I}{R_I} = 1,0807$$

- **Výpočet proudu pro kondenzátorovou baterii**

Rov. 4.5.40

$$I_c = I_1 \cdot \frac{Q_I}{\sqrt{(1+Q_I^2)}} = 177,8694[A]$$

- **Kontrolní přepočít dielektrických ztrát**

Rov. 4.5.41

$$P_k = I_c \cdot U_g \cdot \operatorname{tg} \delta = 177,87 \cdot 100 \cdot 0,0034 = 60,4756[W]$$

$$R_c' = \frac{P_c'}{I_c^2} = 0,002103[\Omega]$$

$$R_I = R_1 + p^2 \cdot R_2 + R_c' = 0,7772[\Omega]$$

Kde  $P_k$  [W] jsou dielektrická ztráty,  $R_c'$  [Ω] je reálný celkový odpor,  $R_I$  [Ω] je oscilační odpor obvodu pece.

- **Výsledný odpor vůči zdroji  $R_z$**

Rov. 4.5.42

$$R_z = \frac{L_I}{C' \cdot R_1} = 6,2485[\Omega]$$

- **Celkové ztráty**

Rov. 4.5.43

$$P_z = \frac{U_g^2}{R_z} = 1600,382[W]$$

$$P_1 = R_1 \cdot I_1^2 = 847,2428[W]$$

$$P_2 = p^2 \cdot R_2 \cdot I_1^2 = 11352,44[W]$$

$$P_C = P_k + P_v = 66,5232[W]$$

- **Výpočet účinnosti**

Rov. 4.5.44

$$\eta_C = \frac{P_1}{P_1 + P_2} = 93,06[\%]$$

$$\eta_V = \frac{P_2}{\sum P} = 92,55[\%]$$

### - Výpočet výšky menisku $h_0$

Vypočteme výšku menisku, neboli výšku vzdmutí hladiny roztavené vázky, dle následujících vztahů:

**Rov. 4.5.45**

$$q = \frac{P_2}{\pi \cdot d_2 \cdot l_2} = 1,5 \cdot 10^5 [W / m^2]$$

$$h_0 = 0,3223 \cdot \frac{q}{s} \cdot \sqrt{\frac{\mu_r}{f \cdot \rho}} =$$

$$0,3223 \cdot \frac{1,5 \cdot 10^5}{2623} \cdot \sqrt{\frac{1}{10000 \cdot 1,1047 \cdot 10^{-7}}} = 0.62 [cm]$$

Kde  $q$  [W/m<sup>2</sup>] je měrný příkon do vsázky,  $s$  [kg/m<sup>3</sup>] je měrná hmotnost vsázky,  $f$  [Hz] je kmitočet napájecího zdroje,  $\rho$  [Ω/m] je měrný elektrický odpor vsázky, a  $\mu_r$  [H/m] je relativní permeabilita vsázky.

### - Výpočet okruhu chlazení

Pomocí stanovení meze turbulentního proudění  $Re$  vypočteme při zvoleném průměru induktoru potřebnou rychlost proudění vody v okruhu chlazení pece tak, aby docházelo k rovnoměrnému chlazení pece a aby nedošlo k vytvoření páry v okruhu chlazení, což by vedlo k přehřátí a destrukci induktoru.

**Rov. 4.5.46**

$$R_e = \frac{v \cdot d \cdot s}{\eta \cdot g} > 2320$$

$$R_e = \frac{1,5 \cdot 0,005 \cdot 9,72 \cdot 10^8}{36,20 \cdot 9,81} = 20528,1565 < 2320$$

$$R_g = \frac{\Delta \mathcal{G}}{P} = \frac{660,3 - 20}{2883} = 0,22 [^\circ C / W]; C_g = c \cdot m = 0,5 \cdot 896 = 448 [J / ^\circ C]$$

$$T_g = R_g \cdot C_g = 99,5 [sec]$$

Kde  $v$  [m/s] je rychlost proudění vody v okruhu chlazení,  $V$  [m<sup>3</sup>] je objem chladícího media (vody) v okruhu chlazení,  $d$  [m] je průměr induktoru,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] je gravitační zrychlení,  $s$  [N/m<sup>3</sup>] je měrná hmotnost kapaliny,  $\eta$  [Ns/m<sup>2</sup>] je absolutní vazkost kapaliny a  $R_e$  [-] je mez turbulentního proudění.  $R_g$  [°C/W] je tepelný odpor, na který musí být chladič pece dimenzován,  $C_g$  [J/°C] je tepelná kapacita chladiče,  $P_p$  [W] je výkon ve formě ztrát, který je nutné uchladiť a  $T_g$  [sec] je doba ustálení teplotního ohřevu chladiče.

- **Výpočet doby tavení vsázky**

**Rov. 4.5.47**

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 0,5 \cdot 1264 \cdot (660,3 - 20) = 404669,6 [C]$$

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{404669,6}{1024} = 395,19 [s] \cong 6,6 [\text{min}]$$

Kde  $t[s]$  je doba tavení vsázky,  $P[W]$  je výkon k uchlazení,  $m$  je hmotnost vsázky,  $c$  je měrná tepelná kapacita roztavené vsázky,  $\Delta T$  je rozdíl teploty okolí a teploty roztavené vsázky. 3593

➤ **Výpočet elektrických parametrů se stíněním transformátorovými plechy**

Použitím stínění se zvýší vlastní indukčnost induktoru a elektromagnetické pole bude uzavřeno uvnitř pece, díky čemuž stoupne efektivita pece a zmírní se dopad rušení okolních zařízení elektromagnetickým polem. Pro výpočet parametrů pece se stíněním pomocí transformátorových plechů použijeme stejné vzorce jako při výpočtu parametrů pece bez stínění, jen započítáme změnu vstupních koeficientů  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  tak, aby tyto koeficienty respektovaly použití stínění. Koeficienty jsou zvýšené na základě poznatků z měření z citované literatury. Pro přehlednost budou zmíněny pouze výsledky, jelikož jsou vztahy pro výpočet totožné s výpočtem bez použití stínění. [22]

Nejprve je tedy nutné koeficienty  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$  vynásobit konstantami, čímž vzniknou koeficienty  $\alpha'_1$  a  $\alpha'_2$ . [22]

- **Výpočet pomocných součinitelů**

**Rov. 4.5.48**

$$\alpha''_1 = 1.14 \cdot \alpha_1 = f \cdot \left( \frac{d_c}{l_1} \right) = f(0,6518) \rightarrow \alpha'_1 = 0,7772[-]$$

$$\alpha''_2 = 1.06 \cdot \alpha_2 = f \cdot \left( \frac{d_v}{l_1} \right) = f(0,4290) \rightarrow \alpha'_2 = 0.8433[-]$$

$$k_{1,2}^2 = \left( \frac{d_v}{d_c} \right)^2 \cdot \left( \frac{l_1}{l_2} \right) \cdot \frac{F_{1,2}'^2}{\alpha'_1 \cdot \alpha'_2} = 0,3504$$

$$F_{1,2}' = f \cdot \left( \frac{d_c}{l_1}; \frac{d_v}{l_2}; \frac{l_1}{l_2} \right) = f(1,1) \rightarrow F_{1,2}' = 0.82671$$

Vypočtené hodnoty pomocných součinitelů  $\alpha_{1,2}$  a  $F_{1,2}$  odečtěte z tabulek pro hodnoty daných součinitelů z příloh A a B na konci této práce.

## - Výpočet pomocných konstant

	Bez stínění	Se stíněním
$k_1 [-]$	$9,6e^{-4}$	$1,09e^{-3}$
$k_2 [-]$	0,000874	0,000937

Rov. 4.5.49

$$k_1 = 1,09e^{-3}$$

$$k_2 = 0,000937$$

## - Odhad celkových ztrát

	Bez stínění	Se stíněním
$P_c [W]$	22080	22080

Rov. 4.5.50

$$P_c = 22080[W]$$

## - Výpočet proudu v induktoru

	Bez stínění	Se stíněním
$I_1 [A]$	242,34	257,82

Rov. 4.5.51

$$I_1 = 257,82[A]$$

## - Výpočet rozměrů induktoru

	Bez stínění	Se stíněním
$l [m]$	3,9469	3,5710
$d_{ind} [mm]$	7,5662	7,5309

Rov. 4.5.52

$$l = 3.5710[m]$$

$$d_{ind} = 7.5309[mm]$$

## - Výpočet počtu závitů induktoru

	Bez stínění	Se stíněním
$N_1$ [Z]	21	19

Rov. 4.5.53

$$N_1 = 19 \text{ závitů}$$

## - Výpočet vlastní indukčnosti induktoru

	Bez stínění	Se stíněním
$L_1$ [ $\mu\text{H}$ ]	13,3	10,95
$L_{1,1}$ [ $\mu\text{H}$ ]	6,7358	5,5139
$R_1$ [m $\Omega$ ]	26,8	21,9216

Rov. 4.5.54

$$L_1 = 10,95 [\mu\text{H}]$$

$$L_{1,1} = 5,5139e^{-6} [\text{H}]$$

$$R_1 = 21,9216 [\text{m}\Omega]$$

## - Výpočet vlastní indukčnosti vsázky

	Bez stínění	Se stíněním
$L_2$ [ $\mu\text{H}$ ]	157	156,88
$R_2$ [m $\Omega$ ]	0,8467	0,8467

Rov. 4.5.55

$$L_2 = 156,88 [\mu\text{H}]$$

$$R_2 = 0,8467 [\text{m}\Omega]$$

- Výpočet převodního poměru  $\rho^2 R_2$ 

	Bez stínění	Se stíněním
$\rho^2$	423,7791	346,9031
$\rho$	20,5859	18,6253
$\rho^2 R_2$	0,3588	0,2937

Rov. 4.5.56

$$p^2 = 346,903 \text{ [–]}$$

$$p = 18,6253$$

$$p^2 \cdot R_2 = 0,2937$$

- Výpočet celkového odporu  $R_I$

	Bez stínění	Se stíněním
$R_I' [\Omega]$	0,3856	0,3157
$R_I [\Omega]$	0,3916	0,3460

Rov. 4.5.57

$$R_I' = 0,3157 [\Omega]$$

$$R_I = 0,3460 [\Omega]$$

- Výpočet kapacity induktoru  $C'$

	Bez stínění	Se stíněním
$C' [\mu F]$	40,25	45,7

Rov. 4.5.58

$$C' = 45,7 [\mu F]$$

- Výpočet činitele jakosti  $Q_I$

	Bez stínění	Se stíněním
$Q_I [-]$	1,0807	1,0012

Rov. 4.5.59

$$Q_I = 1,0012$$

- Výpočet proudu pro kondenzátorovou baterii

	Bez stínění	Se stíněním
$I_c [A]$	177,8694	182,4183

Rov. 4.5.60

$$I_c = 182,4183 [A]$$

- **Kontrolní přepočít dielektrických ztrát**

	Bez stínění	Se stíněním
$P_k$ [W]	60,4756	62,0222
$R_c$ [mΩ]	0,002103	2,05
$R_l$ [Ω]	0,7772	0,6616

Rov. 4.5.61

$$P_k = 62,0222[W]$$

$$R_c' = 2,05[m\Omega]$$

$$R_l = 0,6616[\Omega]$$

- **Výsledný odpor vůči zdroji  $R_z$** 

	Bez stínění	Se stíněním
$R_z$ [Ω]	6,2485	5.5042

Rov. 4.5.62

$$R_z = 5.5042[\Omega]$$

- **Celkové ztráty**

	Bez stínění	Se stíněním
$P_z$ [W]	1600,382	1816,808
$P_1$ [W]	847,2428	729,4761
$P_2$ [W]	11352,44	974,4470
$P_c$ [W]	66,5232	68,2245

Rov. 4.5.63

$$P_z = 1816.808[W]$$

$$P_1 = 729.4761[W]$$

$$P_2 = 974,447[W]$$

$$P_c = 68,22448[W]$$

- **Výpočet účinnosti**

	Bez stínění	Se stíněním
$\eta_c$ [%]	93,06	93,06
$\eta_v$ [%]	92,55	92,45

Rov. 4.5.64

$$\eta_C = 93,06[\%]$$

$$\eta_V = 92,45[\%]$$

- Výpočet výšky menisku  $h_0$ 

	Bez stínění	Se stíněním
$h_0$ [cm]	0,62	0,62

Rov. 4.5.65

$$h_0 = 0.62[cm]$$

## - Výpočet okruhu chlazení

	Bez stínění	Se stíněním
$R_e$ [-]	20528,1565	20528,1565
$R_{\vartheta}$ [°C/W]	0,22	0,22
$T_{\vartheta}$ [sec]	99,5	99,5

Rov. 4.5.66

$$R_e = 20528,1565 < 2320$$

$$R_g = 0.22[°C / W]$$

$$T_g = 99,5[sec]$$

## - Výpočet doby tavení vsázky

	Bez stínění	Se stíněním
$Q$ [C]	404669,6	404669,6
$t$ [s]	395,19	395,19

Rov. 4.5.67

$$Q = 404669,6[C]$$

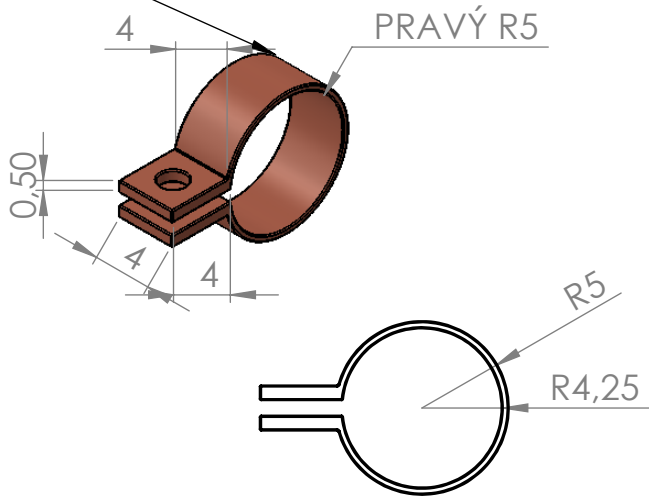
$$\frac{404669,6}{1024}$$

$$1024$$

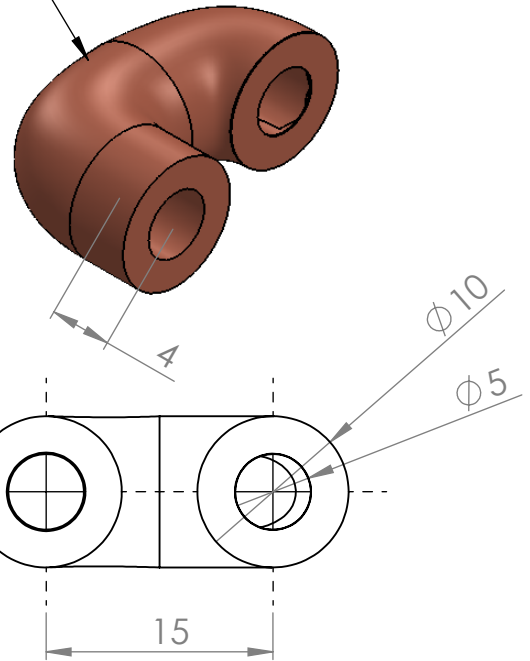
$$t = 395,19[s] \cong 6,6[\text{min}]$$



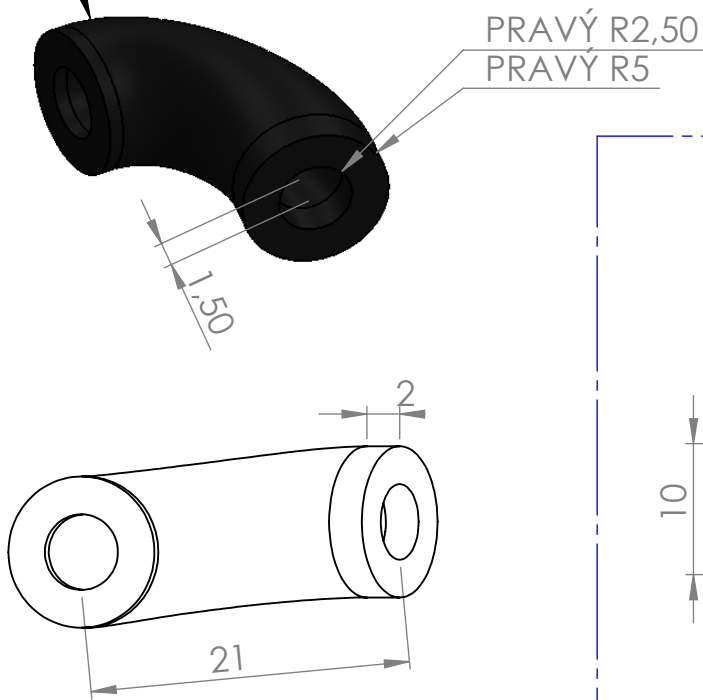
# Měděná kabelová spojka, pro připojení vodičů



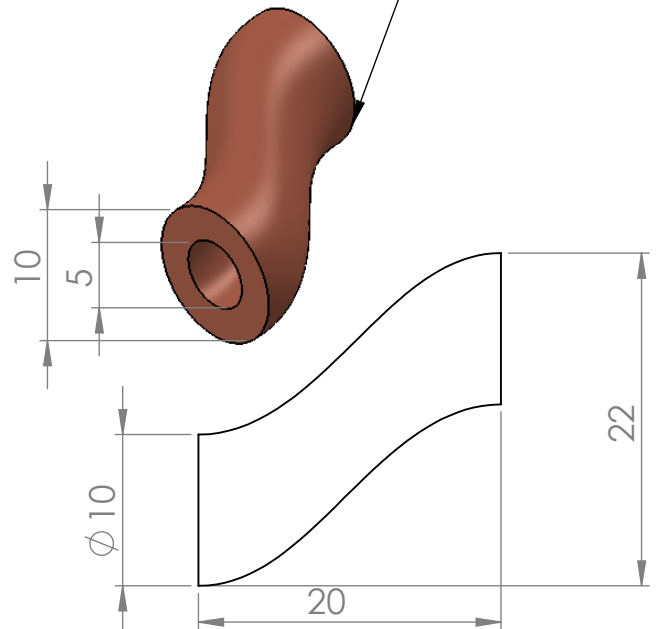
## Měděná spojka segmentu kelímku a dna kelímku



## Plastový spoj induktoru a kelímku



## Měděná spojka závitů induktoru



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
DRSNOST:  
TOLERANCE:  
LINEÁRNÍ:  
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	NÁZEV	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Vyroubal		
PŘEZKOUŠEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			
		MATERIÁL:	
		HMOTNOST:	

NÁZEV:  
Příloha M

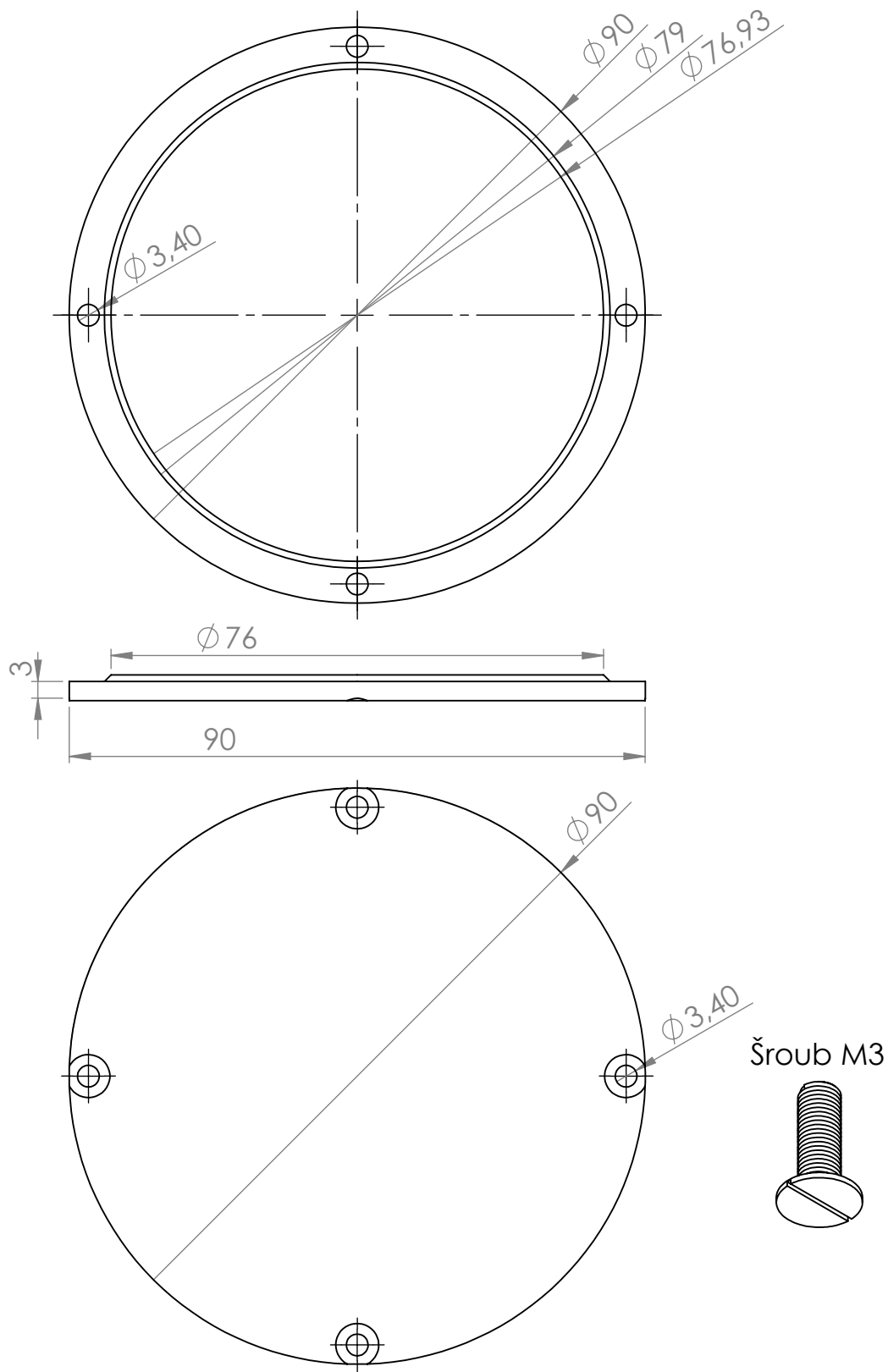
Č. VÝKRESU

Spojovací\_prvky

A4

MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
 DRSNOST:  
 TOLERANCE:  
 LINEÁRNÍ:  
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	NÁZEV	PODPIS	DATUM	
NAVRHL	Vyroubal			
PŘEZKOUŠEL				
SCHVÁLIL				
VÝROBA				
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:
				HMOTNOST:

NÁZEV:

Příloha G

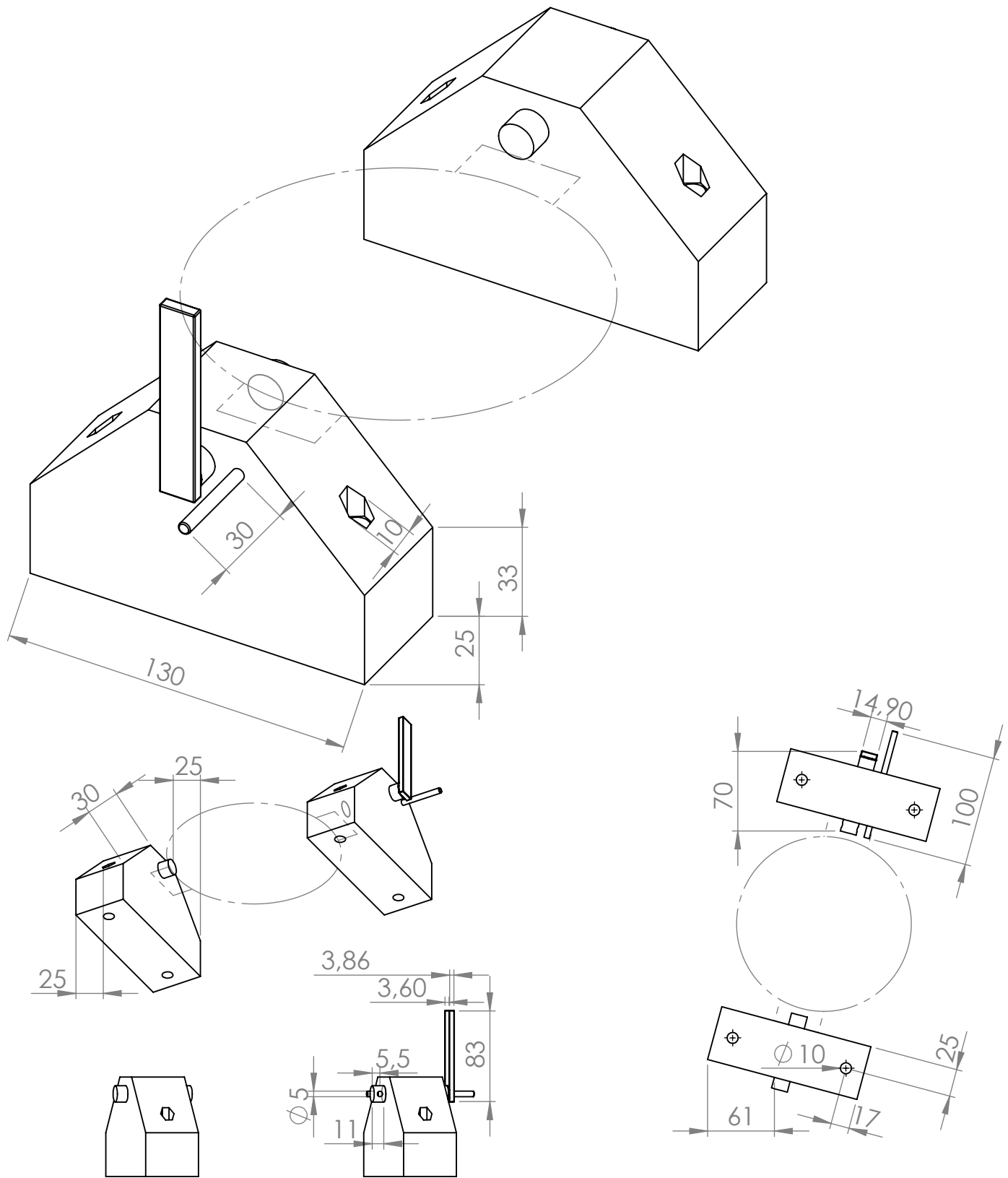
Č. VÝKRESU

Viko\_dna

A4

MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
 DRSNOST:  
 TOLERANCE:  
 LINEÁRNÍ:  
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	NÁZEV	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Vyrubal		
PŘEZKOUŠEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

MATERIÁL:  
 Ocel

NÁZEV:

Příloha K

Č. VÝKRESU

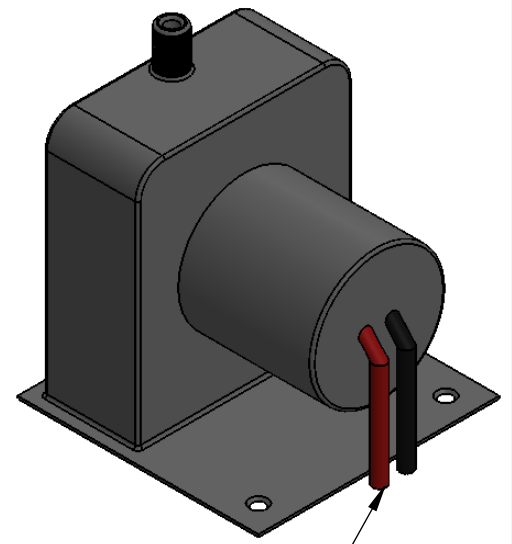
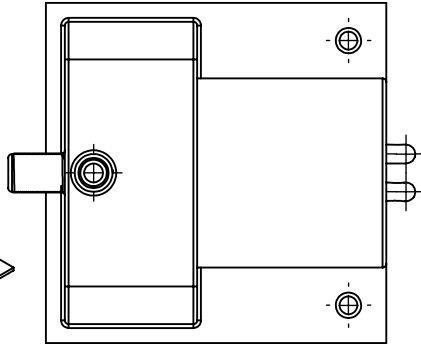
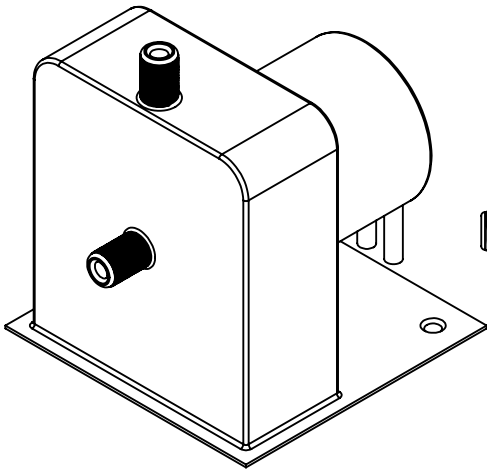
Vylevací\_zarizeni

A4

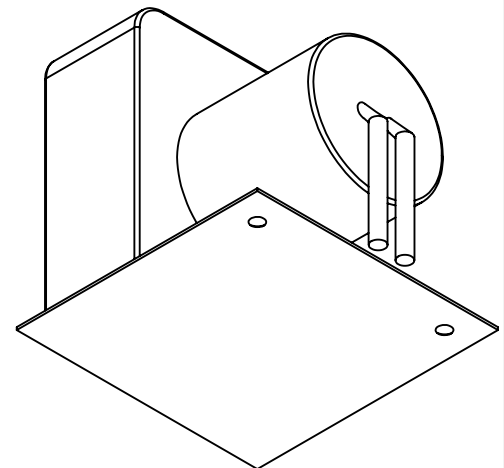
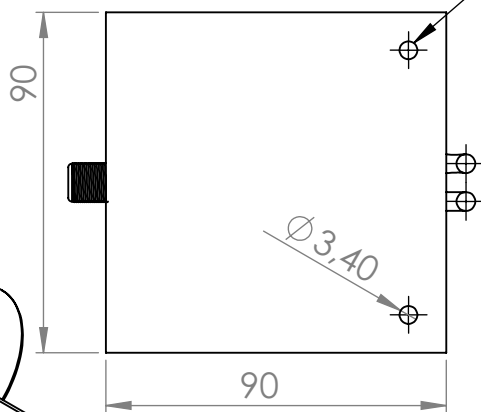
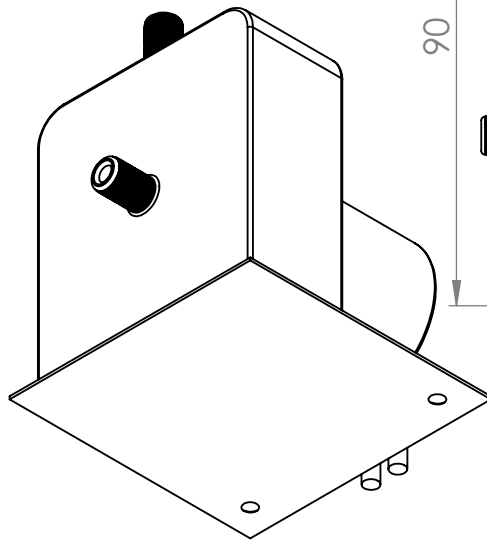
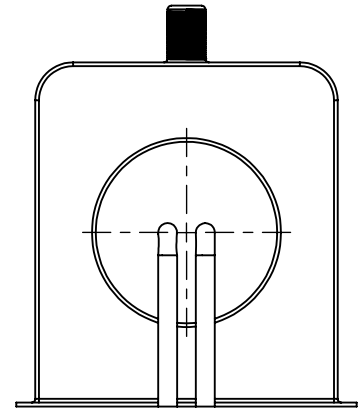
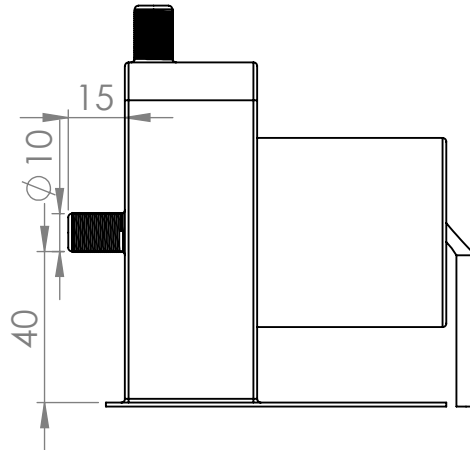
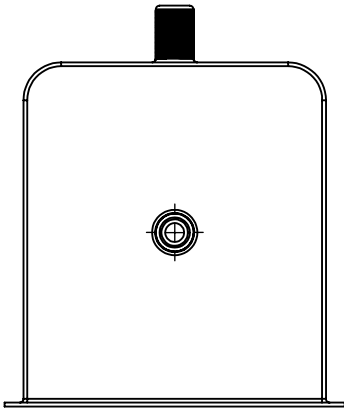
HMOTNOST:

MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



Napájení čerpadla



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
DRSNOST:  
TOLERANCE:  
LINEÁRNÍ:  
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

Typ čerpadla: LAING D5 AG

	NÁZEV	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Vyroubal		
PŘEZKOUŠEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

NÁZEV:

Příloha J

Čerpadlo je sestavený celek

Č. VÝKRESU

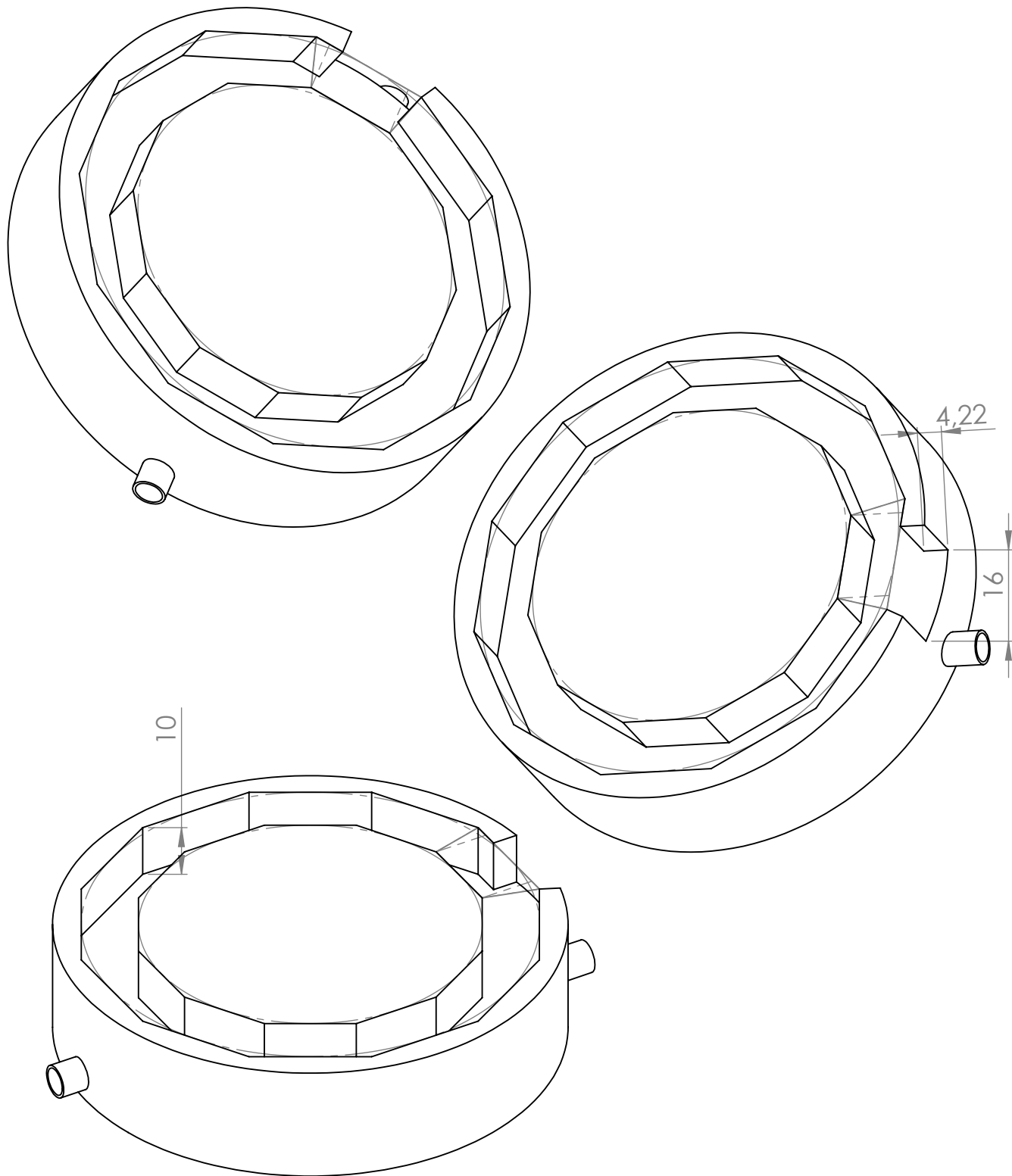
Cerpadlo

A4

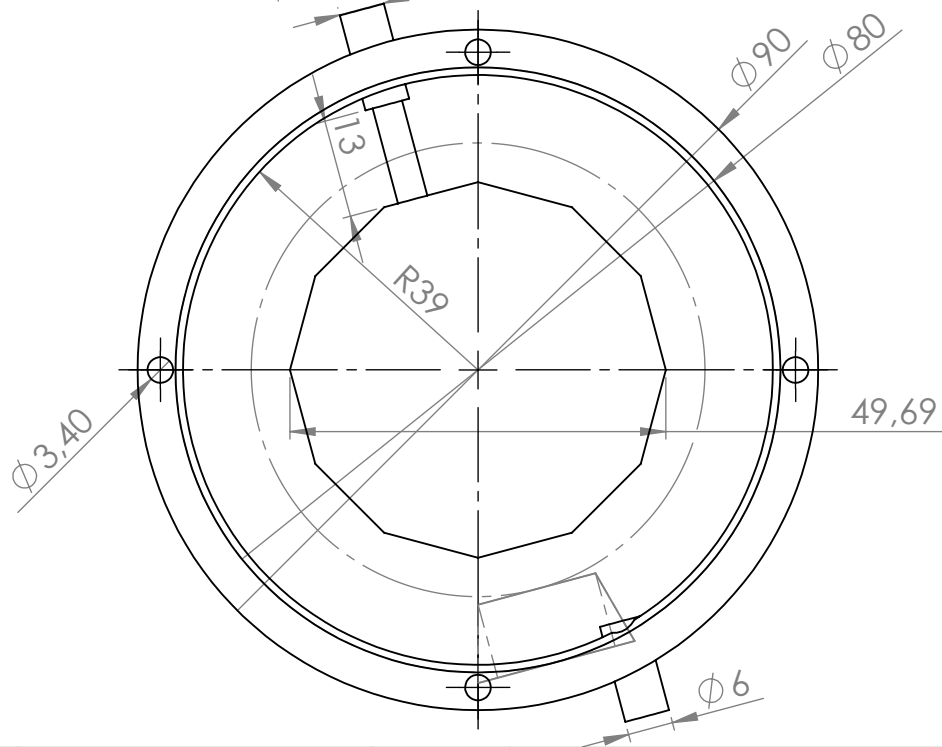
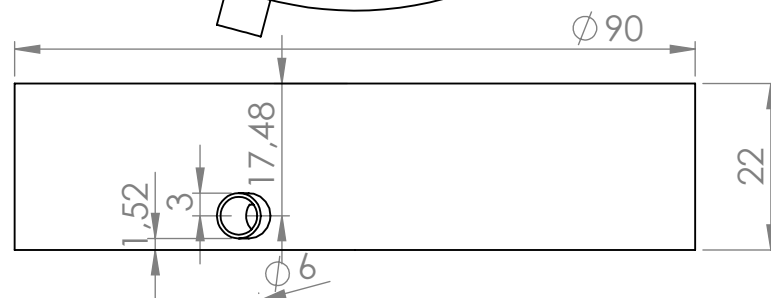
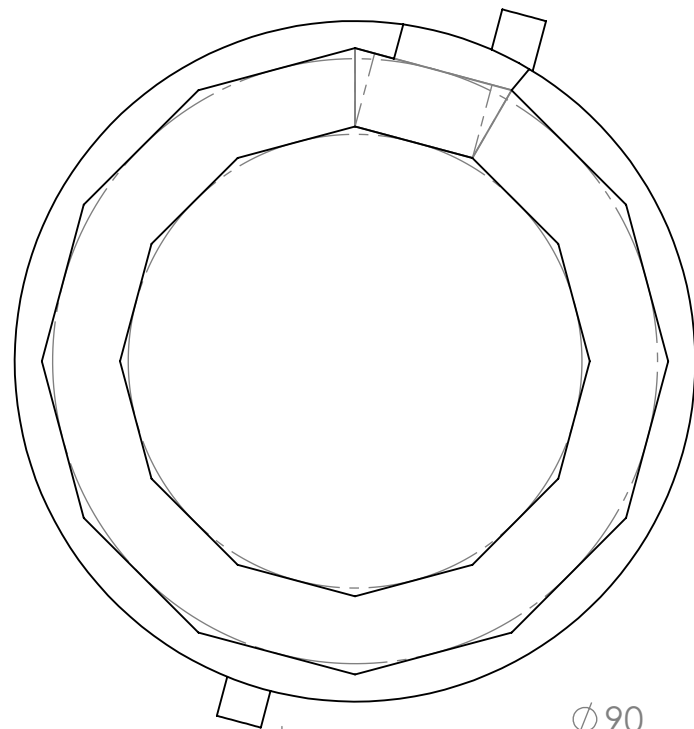
HMOTNOST:

MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:			OPRACOVÁNÍ:	ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
NAVRHL	PODPIS	DATUM			NÁZEV: Příloha F - 2	
PŘEZKOUŠEL						
SCHVÁLIL						
VÝROBA						
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:	Č. VÝKRESU	Dno pece_2
					MĚŘÍTKO:1:1	A4
				HMOTNOST:		LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
DRSNOST:  
TOLERANCE:  
LINEÁRNÍ:  
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	NÁZEV	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Vyroubal		
PŘEZKOUŠEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

MATERIÁL:

HMOTNOST:

NÁZEV:

Příloha F - 1

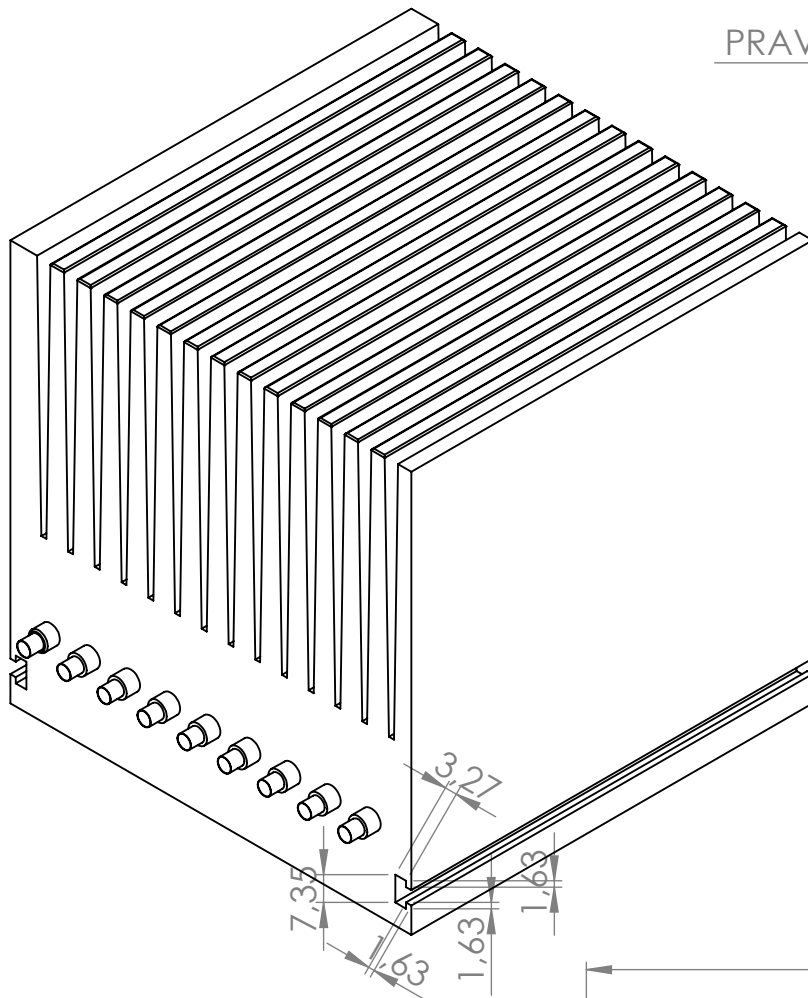
Č. VÝKRESU

Dno pece\_1

A4

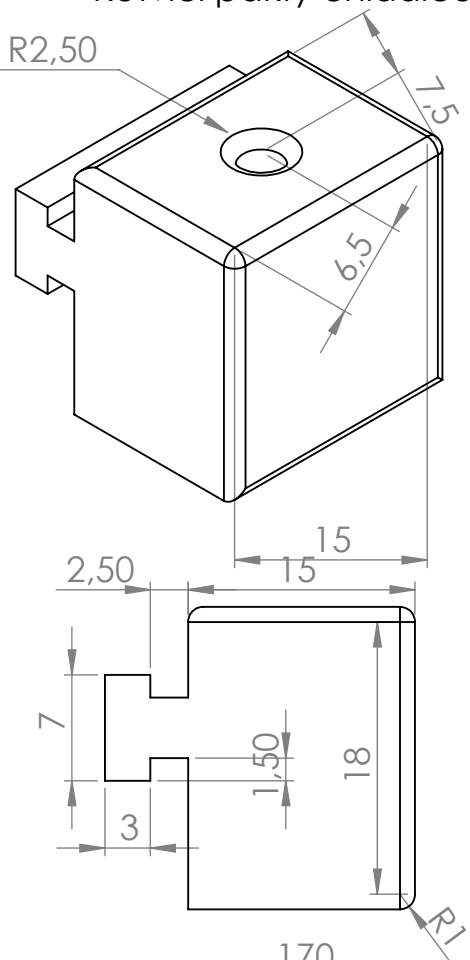
MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



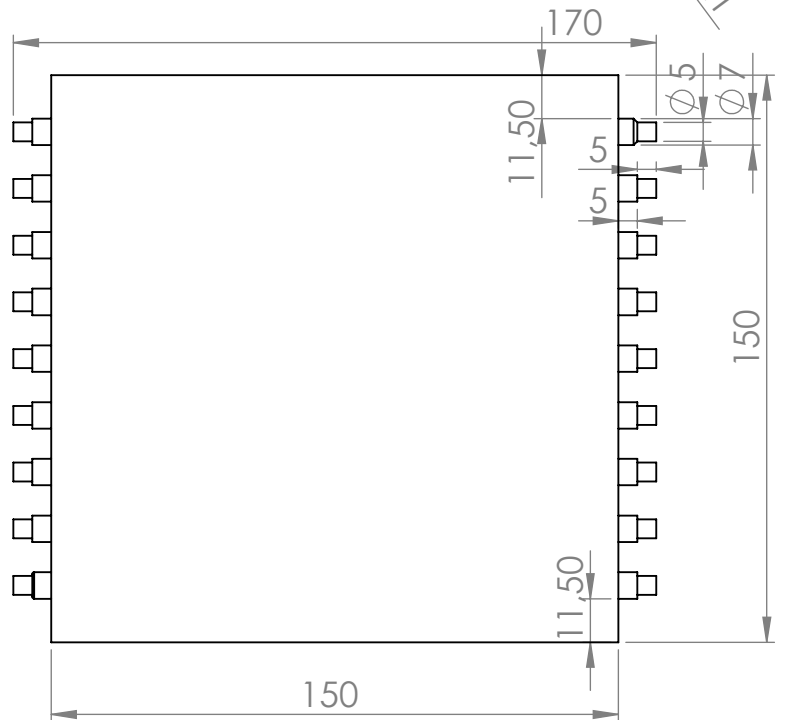
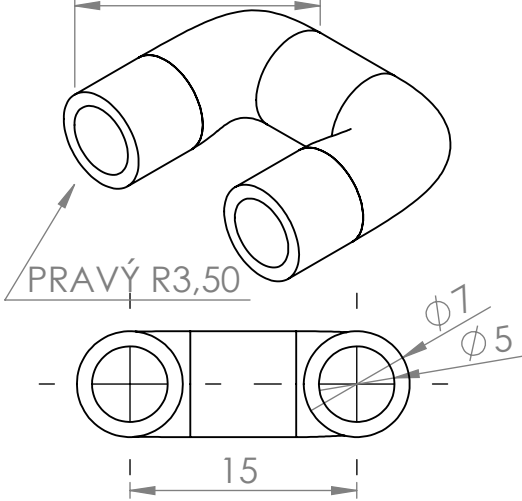
Kotvící pakty chladiče

PRAVÝ R2,50



Měděné spojky

21



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
DRSNOST:  
TOLERANCE:  
LINEÁRNÍ:  
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	NÁZEV	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Vyroubal		
PŘEZKOUŠEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

MATERIÁL:  
Hliník  
Měděné spojky

NÁZEV:

Příloha I

Č. VÝKRESU

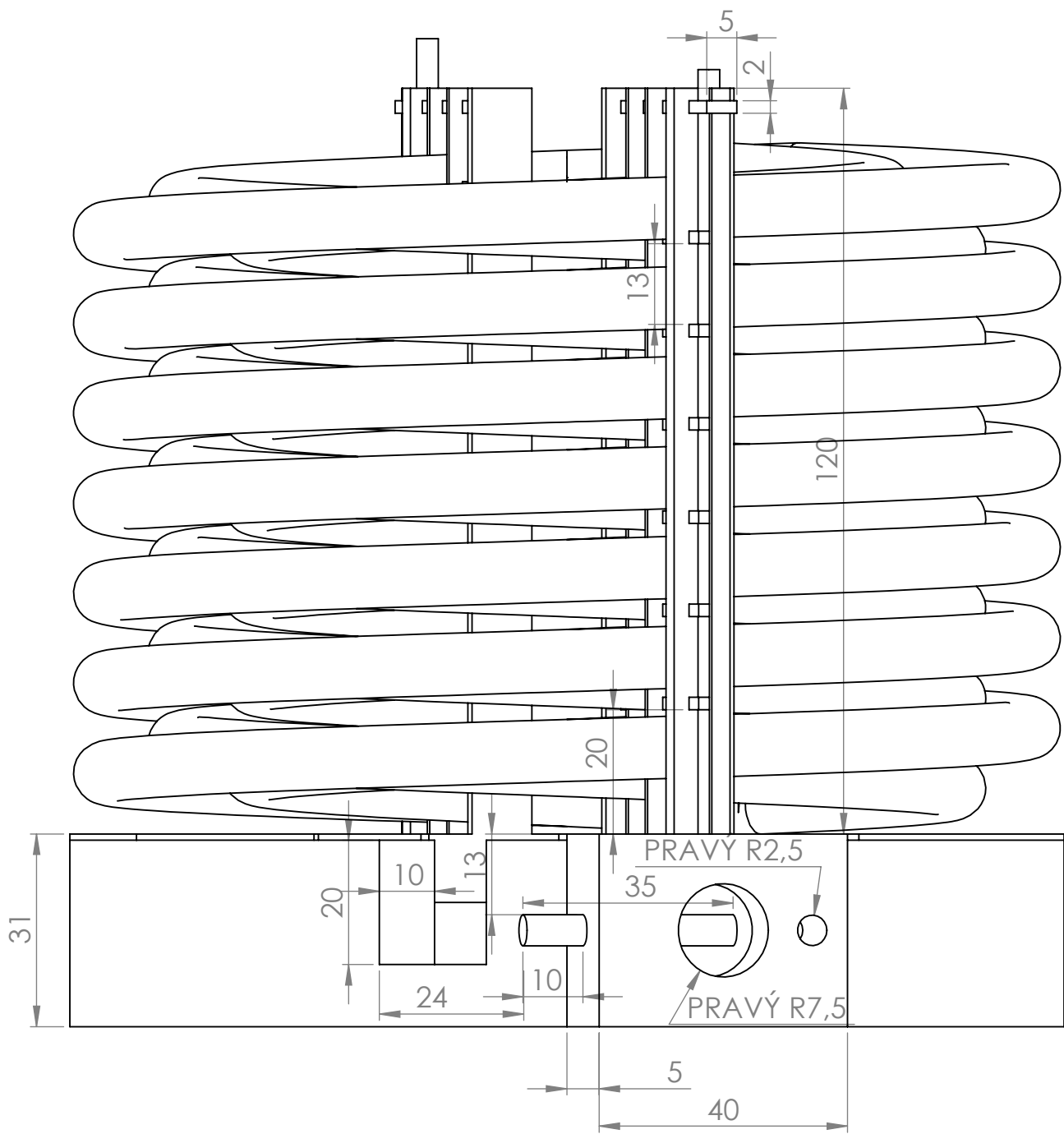
Chladic

A4

HMOTNOST:

MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
 DRSNOST:  
 TOLERANCE:  
 LINEÁRNÍ:  
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:  
 Lakování mědi  
 Ovin induktoru skelným  
 vláknem

ODSTRANIT  
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

Induktor má 21 z, tedy 3 x 7 závitů

	NÁZEV	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Vyroubal		
PŘEZKOŠEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

NÁZEV:

Příloha H - 1

MATERIÁL:  
 Keramický materiál  
 Induktor z mědi

Č. VÝKRESU

Induktor

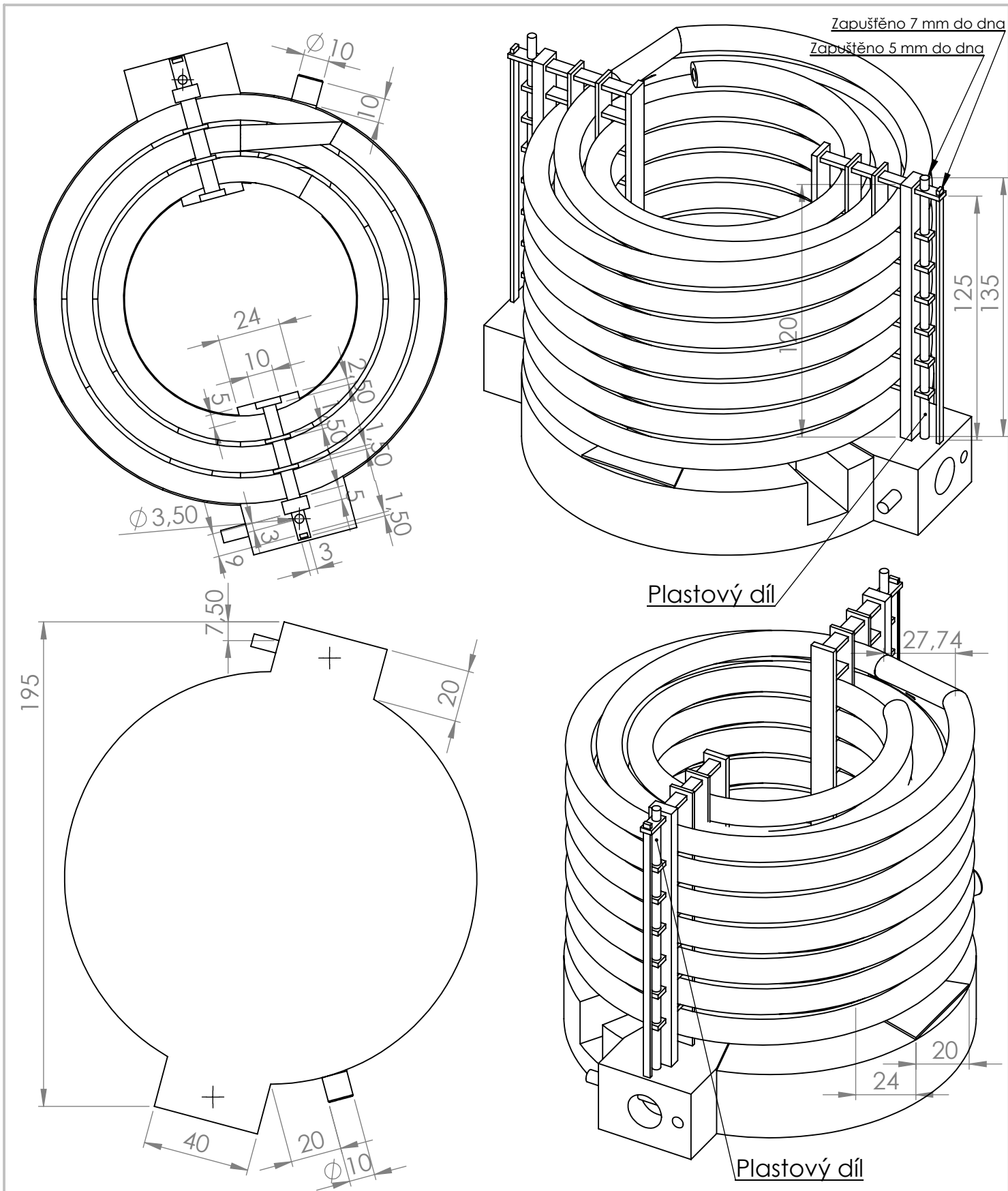
A4

HMOTNOST:

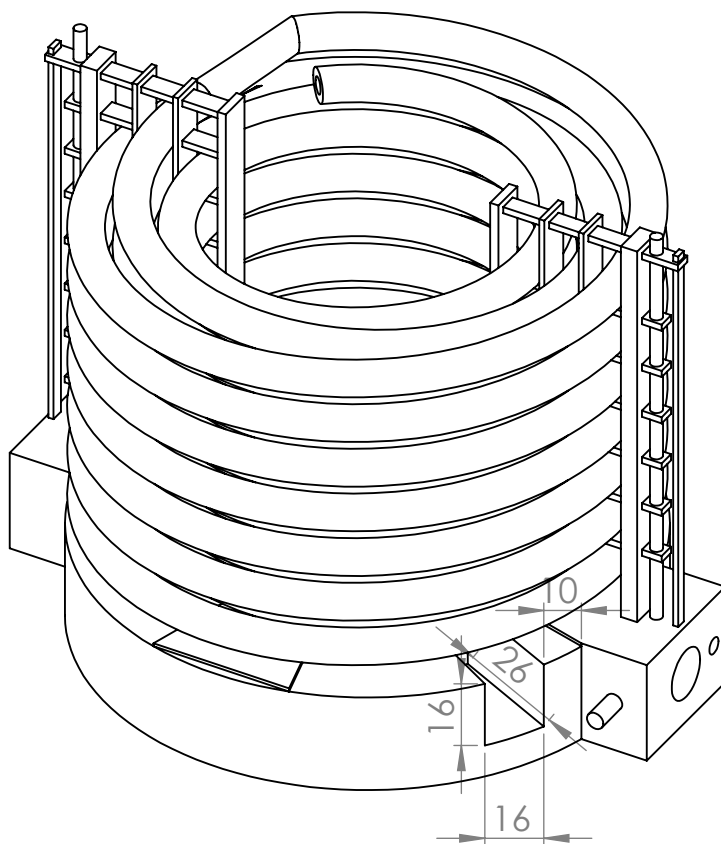
MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ





POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ: <b>Lakování mědi</b> Ovin induktoru skelným vláknem	ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
				Induktor má 21 z, tedy 3 x 7 závitů	
NÁZEV	PODPIS	DATUM		NÁZEV:	
NAVRHL	Vyroubal			Příloha H - 2	
PŘEZKOUSĚL					
SCHVÁLIL					
VÝROBA					
Z. JAKOSTI				Č. VÝKRESU	
			MATERIÁL: Měděný induktor Ostatní prvky keramické Plastové čepy		Induktor_2
			HMOTNOST:	MĚŘÍTKO:1:1	A4
					LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
DRSNOST:  
TOLERANCE:  
LINEÁRNÍ:  
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:  
**Lakování mědi**  
Ovin induktoru skelným  
vlákem

ODSTRANIT  
OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

Induktor má 21 z, tedy 3 x 7 závitů

NÁZEV	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Vyroubal	
PŘEZKOŠEL		
SCHVÁLIL		
VÝROBA		
Z. JAKOSTI		

MATERIÁL:

Lakovaná měď

HMOTNOST:

NÁZEV:

Příloha H - 3

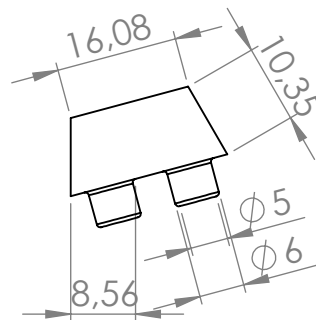
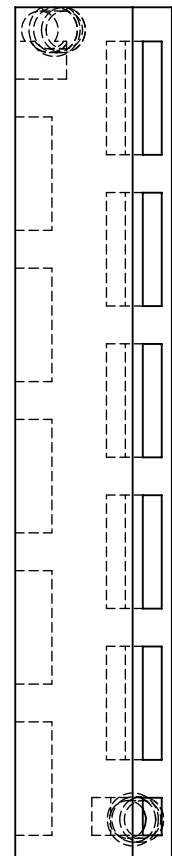
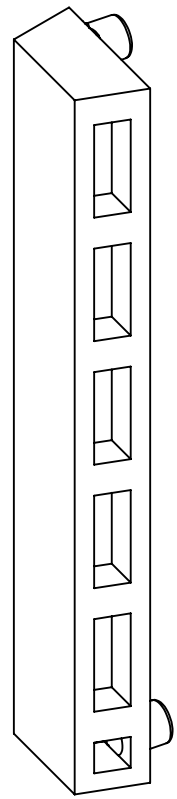
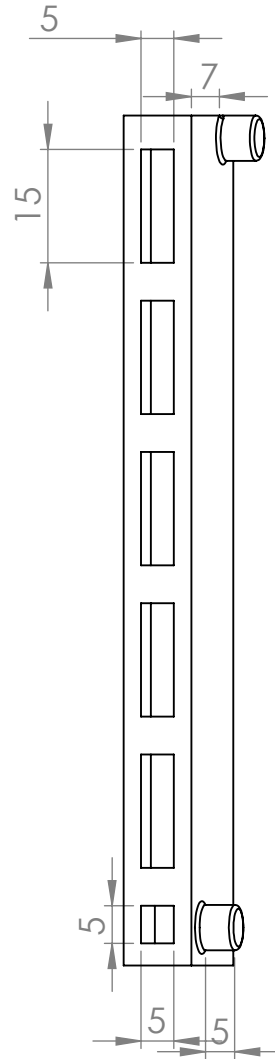
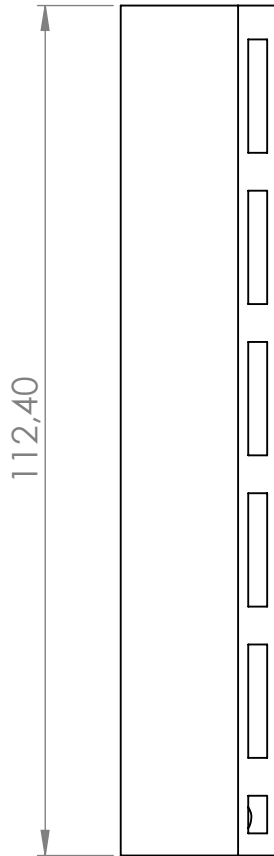
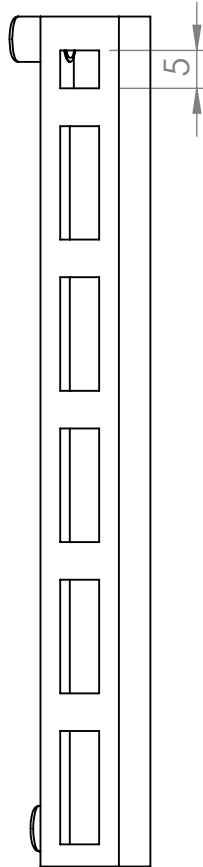
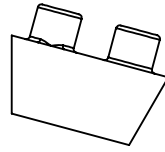
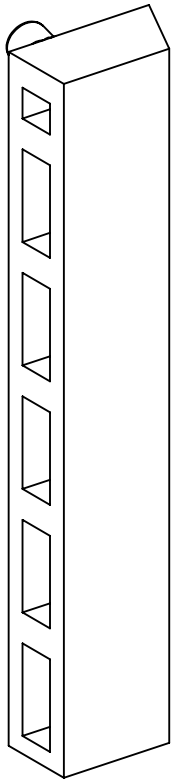
Č. VÝKRESU

Induktor\_3

A4

MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
DRSNOST:  
TOLERANCE:  
LINEÁRNÍ:  
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

Spojuje jednotlivé kanálky kelímku s přívodem a  
odvodech chladicí kapaliny

	NÁZEV	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Vyroubal		
PŘEZKOUŠEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

MATERIÁL:  
Měď

HMOTNOST:

NÁZEV:

Příloha E -2  
Segment spojovací

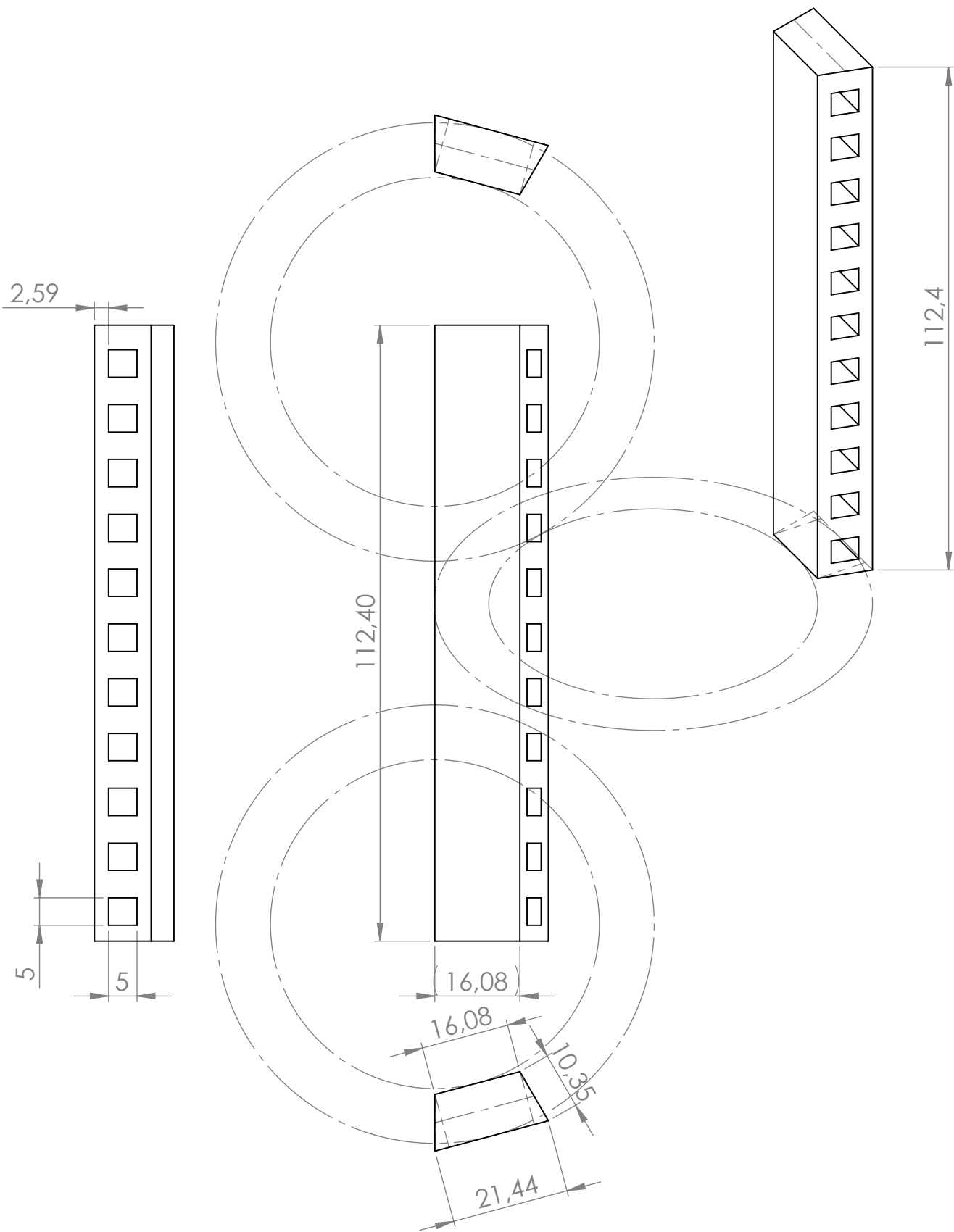
Č. VÝKRESU

Segment Spoj.

A4

MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
 DRSNOST:  
 TOLERANCE:  
 LINEÁRNÍ:  
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

NÁZEV	PODPIS	DATUM
NAVRHL	Výroubač	
PŘEZKOUŠEL		
SCHVÁLIL		
VÝROBA		
Z. JAKOSTI		
MATERIÁL: Měď		
HMOTNOST:		

NÁZEV:

Příloha E - 1

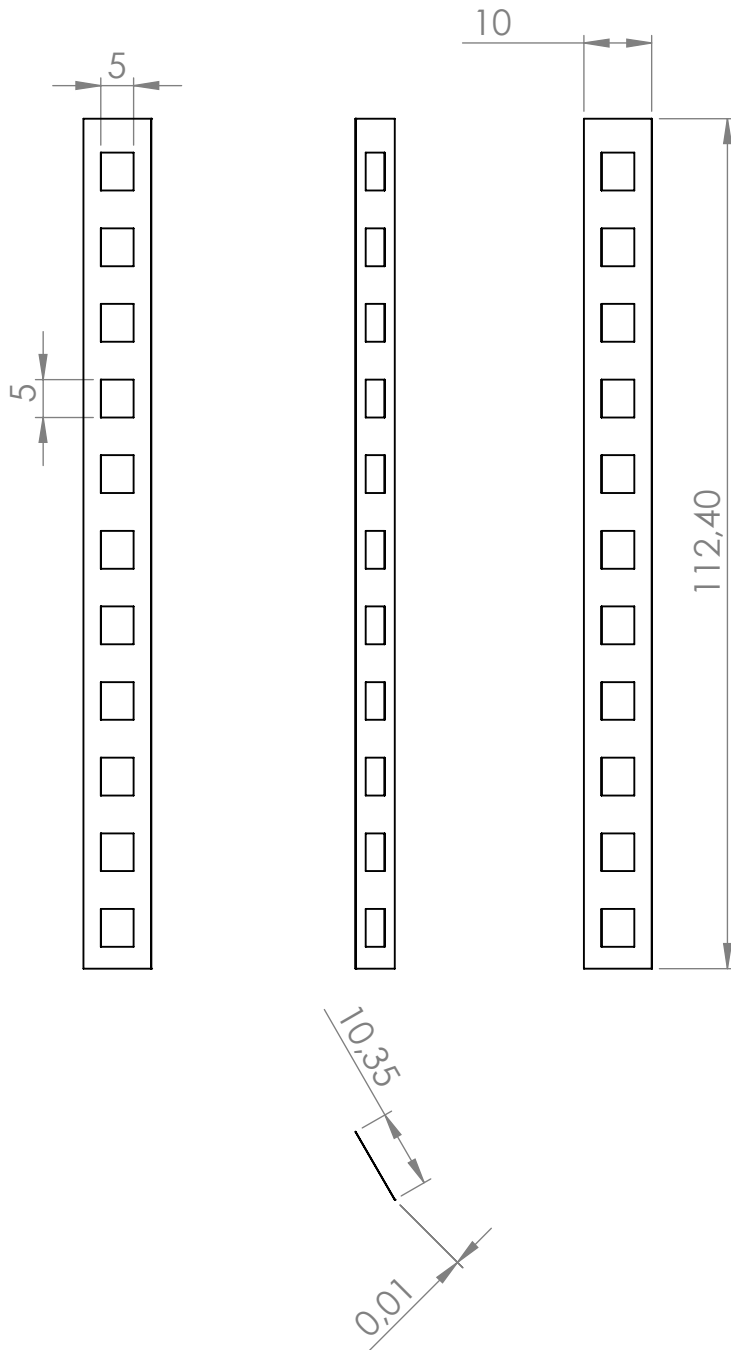
Č. VÝKRESU

Segment

A4

MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
 DRSNOST:  
 TOLERANCE:  
 LINEÁRNÍ:  
 ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÍ:

ODSTRANIT  
 OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	NÁZEV	PODPIS	DATUM	
NAVRHL	Vyroubač			
PŘEZKOUŠEL				
SCHVÁLIL				
VÝROBA				
Z. JAKOSTI				
				MATERIÁL: Skelné vlákno
				HMOTNOST:

NÁZEV:

Příloha E - 3

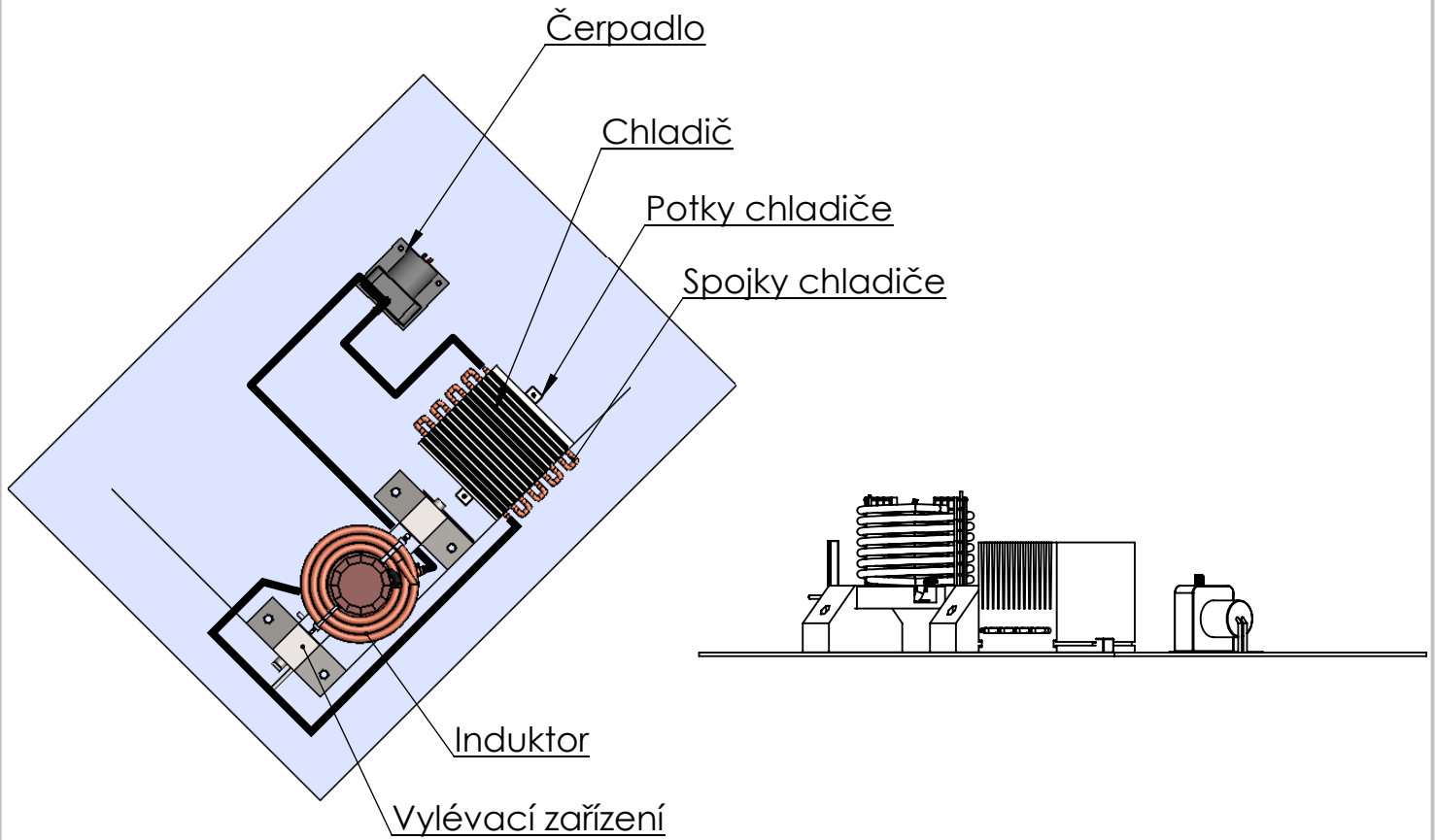
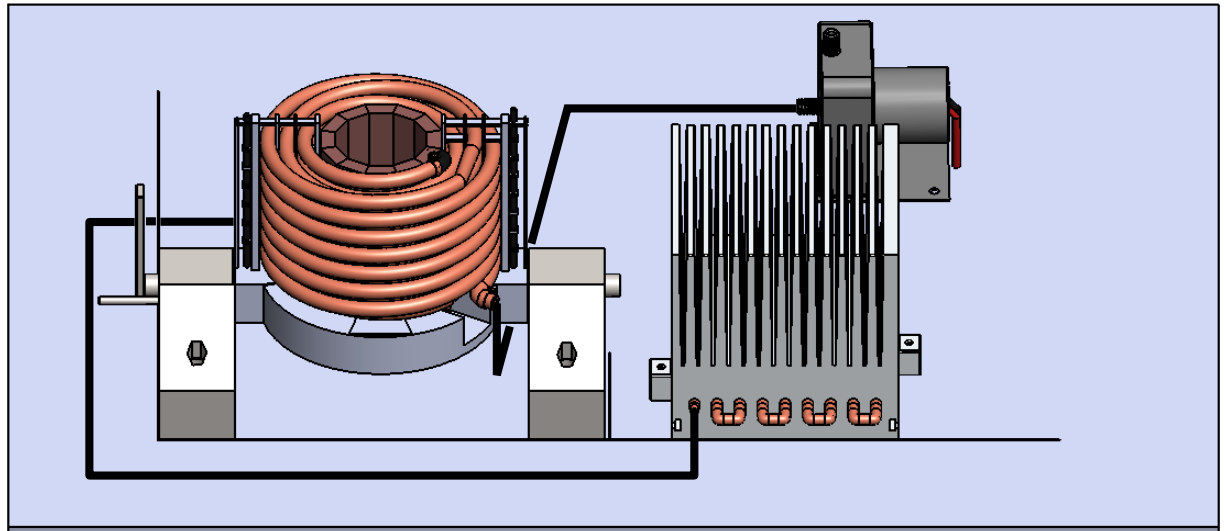
Č. VÝKRESU

Skelne\_vlakno\_E3

A4

MĚŘÍTKO:1:1

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: ÚHLOVÁ:		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
NAVRHL	Vyroubal	PODPIS	DATUM	NÁZEV:	Příloha L	
PŘEZKOUSĚL				Sestava systému pece		
SCHVÁLIL				Č. VÝKRESU	Sestava.2.1.4	
VÝROBA					A4	
Z. JAKOSTI			MATERIÁL:			
			HMOTNOST:	MĚŘÍTKO: 1:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ	