

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DISERTAČNÍ PRÁCE

Plzeň, 2017

Ing. Stanislav Jiřinec

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor
v oboru

ELEKTROENERGETIKA

Ing. Stanislav Jiřinec

**Vysokoteplotní tavení nekovových materiálů
elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku**

Školitel: Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

Konzultant specialista: Ing. David Rot, Ph.D.

Doc. Ing. Igor Poznyak, CSc.

Datum státní doktorské zkoušky: 2.10.2014

Datum odevzdání práce: 17.3.2017

V Plzni, 2017

Vysokoteplotní tavení nekovových materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku

Anotace

Disertační práce je zaměřena na problematiku vysokoteplotního tavení elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. V první části je stručně popsána problematika studeného kelímku (kompaktní a segmentové provedení studeného kelímku) se zaměřením především na startovací fázi při tavně elektricky nevodivého materiálu. Další část práce je zaměřena na tvorbu numerických modelů startovací fáze pro jednotlivá konstrukční uspořádání a vlivu polohy a tvaru startovacího materiálu uvnitř vsázky. Dále je práce věnována především optimalizaci tvaru segmentového kelímku, pro který je řešen vliv tvaru a počtu chladících elementů na ztráty. K ověření numerických modelů byl vytvořen měřicí systém. Rozsáhlá měření a numerické simulace umožnily provést výzkum vlivu jednotlivých komponentů studeného kelímku vedoucí k optimalizaci tvaru studeného kelímku. V rámci práce je uvedena celá řada funkčních vzorků segmentového studeného kelímku včetně návrhu kelímku pro zařízení HFG160.

Klíčová slova

Studený kelímek, elektromagnetická indukce, startovací fáze, numerický model, měřicí systém, optimalizace, ANSYS, LabView.

High-temperature melting of non-metallic materials by electromagnetic induction in the cold crucible

Abstract

The dissertation thesis is focused on the high-temperature melting by electromagnetic induction in a cold crucible. The first section briefly describes the issue (compact and segmented cold crucible) focusing primarily on the start-up process during melting the electrically non-conductive material. The second part of the thesis deals with creating numerical models of starting process for different construction solution and the influence of the position and shape of the starting material inside the load. Following part is devoted to optimizing the shape of the segmented cold crucible for which the influence of the shape and number of cooling segments is being solved. To validate the numerical model, a measuring system was developed. Extensive measurements and numerical simulations allow to carry out research on the impact of individual components of the segmented cold crucible and to optimize the shape of the cold crucible. The dissertation thesis contains several own function samples of segmented cold crucible, including design of crucible for HFG160 device.

Key words

Cold crucible, electromagnetic induction, starting process, numerical model, measuring system, optimization, ANSYS, LabView.

Hochtemperaturschmelzen nichtmetallischer Materialien durch elektromagnetische Induktion im Kalttiegel

Kurzfassung

Die Dissertation befasst sich mit Problematik des Hochtemperaturschmelzens durch elektromagnetische Induktion im Kalttiegel. Der erste Teil beschreibt kurz die Kalttiegel-Problematik (Kompakt- und Segment-Tiegel) und widmet sich vor allem der Startphase beim Schmelzen eines elektrisch nichtleitenden Materials. Der zweite Teil beschäftigt sich mit Bildung von numerischen Modellen der Startphase für einzelne Konstruktionsentwürfe und Einfluss der Position und Form des Startmaterials in der Beschickung. Die Dissertation geht ferner vor allem auf die Optimierung der Form des Segment-Tiegels auf, wofür der Einfluss der Form und der Zahl der Kühlelemente auf Verluste untersucht wird. Zur Überprüfung der numerischen Modelle wurde ein Messsystem geschaffen. Zahlreiche Messungen und numerische Simulationen ermöglichten es, die Einflussuntersuchung einzelner Komponenten des Kalttiegels durchzuführen, die zur Optimierung der Tiegelform führten. Im Rahmen der Arbeit wird eine Reihe von Funktionsmustern des Segment-Tiegels einschließlich Entwurf des Tiegels für die HFG160-Anlage aufgeführt.

Schlüsselworte

Kalttiegel, elektromagnetische Induktion, Startphase, numerisches Modell, Messsystem, Optimierung, ANSYS, LabView.

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 15.3.2017

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc., Ing. Davidu Rotovi, Ph.D., Doc. Ing. Igoru Poznyakovi, CSc. a dalším odborníkům z Katedry elektroenergetiky a ekologie za cenné rady a podněty, které mi umožnily vypracování této práce. Dále děkuji svým blízkým, kteří mě po celou dobu mého dosavadního studia podporovali.

Obsah

Seznam použitých symbolů.....	9
1. Úvod	11
1.1. Motivace	11
1.2. Cíle disertační práce a pracovní hypotézy	12
1.3. Historie a současný stav řešené problematiky	12
1.4. Použité vědecké metody zkoumání a struktura práce	14
2. Indukční systém se studeným kelímkem	16
2.1. Princip a konstrukční uspořádání studeného kelímku	16
2.1.1. Studený kelímk s integrovaným induktorem.....	17
2.1.2. Segmentový studený kelímk.....	18
2.2. nezbytné komponenty indukčního systému se studeným kelímkem	20
2.3. Proces tavení ve studeném kelímku	24
2.4. Tavení elektricky nevodivých materiálů – startovací fáze	24
2.5. Bilance výkonů (ztrát)	26
2.6. Tavení elektricky vodivých materiálů	26
3. Matematický model startovací fáze	27
3.1. Rovnice pro elektromagnetické pole [11]	27
3.2. Rovnice pro teplotní pole [11].....	29
3.3. Formulace okrajové úlohy startovací fáze v kompaktním kelímku	31
3.3.1. Výsledky řešení – elektromagnetické pole (EMP)	35
3.3.2. Výsledky řešení – teplotní pole.....	36
3.3.3. Verifikace získaných výsledků a závěrečné zhodnocení	37
3.4. Formulace okrajové úlohy startovací fáze v segmentovém kelímku	39
3.4.1. Výsledky řešení – elektromagnetické pole (EMP)	42
3.4.2. Výsledky řešení – teplotní pole.....	43
3.4.3. Verifikace získaných výsledků a závěrečné zhodnocení	44
3.5. Vliv polohy a tvaru startovacího materiálu	46
3.5.1. Porovnání získaných výsledků	47
4. Segmentový studený kelímk – vliv konstrukčního uspořádání.....	51
4.1. Vliv tvaru elementu studeného kelímku.....	51
4.2. Vliv počtu elementů obdélníkového průřezu na účinnost indukčního zařízení	55
4.3. Pokročilé měření pro analýzu a sběr dat ze studeného kelímku.....	61

4.4. Vliv počtu kruhových trubic se shodným průměrem – rozdílný průměr kelímku	66
4.4.1. Rezonanční obvod a určení proudu induktorem	67
4.4.2. Popis řešené problematiky v ANSYS EM	68
4.4.3. Porovnání získaných výsledků	69
4.5. Vliv počtu kruhových trubic o shodném průměru na výkon přenesený do vsázky a účinnost – rozdílný průměr kelímku	74
4.6. Vliv spoje mezi jednotlivými chladícími trubicemi	79
4.7. Vliv počtu trubic rozdílného průměru na výkon přenesený do vsázky a účinnost – identický průměr studeného kelímku	82
4.8. Vliv dna a bandáže studeného kelímku	87
5. Analytický výpočet rozměrů studeného kelímku pro tavbu Al_2O_3 pomocí HFG160	93
6. Vlastní konstrukce studených kelímků určených k laboratornímu použití	98
6.1. Segmentový studený kelímek s vrtaným dnem	98
6.2. Frézovaný studený kelímek	99
6.3. 3D tisk pro výrobu kolektorů	99
6.4. Konstrukce segmentového studeného kelímku pro HFG160	100
7. Závěr	102
7.1. Vlastní přínos práce (shrnutí)	104
7.2. Další možnosti výzkumu	104
Literatura	106
Příloha 1	109
Struktura vytvořeného programu	109
Publikace	115
Funkční vzorky	116

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Název	Značka	Rožměr
permeabilita	μ	H.m ⁻¹
relativní permeabilita	μ_r	-
rezistivita	ρ_e	Ω .m
elektrická vodivost	γ	S.m ⁻¹
měrná hustota	ρ	kg.m ⁻³
tepelná kapacita	c_p	J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
tepelná vodivost	λ	W.m ⁻¹ .K ⁻¹
součinitel přestupu tepla	α	W.m ⁻² .K ⁻¹
emisivita	ε	-
termodynamická teplota	T	K
rozdíl termodynamických teplot	ΔT	K
počáteční termodyn. teplota	T_p	K
koncová termodyn. teplota	T_M	K
teplota vzduchu	T_{gass}	K
teplota okolních ploch	T_{ext}	K
objemová hustota náboje	ρ_V	C.m ⁻³
plošná hustota náboje	σ	C.m ⁻²
intenzita mag. pole	H	A.m ⁻¹
intenzita el. pole	E	V.m ⁻¹
vnucená intenzita el. pole	E_V	V.m ⁻¹
elektrická indukce	D	C.m ⁻²
magnetická indukce	B	T
proudová hustota	J	A.m ⁻²
vnucená proudová hustota	J_V	A.m ⁻²
vektorový mag. potenciál	A	Wb.m ⁻¹
elektrický potenciál	ϕ	V
mag. indukční tok	φ	Wb
měrné Jouleovy ztráty	w_j	W.m ⁻³
tepelný tok	q	W.m ⁻²
úhlová frekvence	ω	rad.s ⁻¹
frekvence	f	Hz
čas	t	s
hmotnost	m	kg
proud	I	A
napětí	U	V
poloměr	r	m
objem	V	m ³
energie	Q	J
ztráty	P_z	W
Laplaceův operátor	Δ	m ⁻²
ANSYS Parametric Design Language	APDL	-
oxid hlinitý	Al ₂ O ₃	-
oxid zirkoničitý	ZrO ₂	-
křemičitan zirkoničitý	ZrSiO ₄	-
Insulated Gate Bipolar Transistor	IGBT	-
výška vsázky	h_{me}	m
výška induktoru	h_{ind}	m

Název	Značka	Rozměr
měřicí sestava	MS1-MS4	-
teplotní sensor Pt100	T1-T5	-
měřič tlaku (tlakoměr)	PM1-PM4	-
měřič průtoku (průtokoměr)	FM1-FM4	-
studený kelímek	CC	-
Induktor	IND	-
transformátor	TR	-
National Instruments	NI	-
ANSYS EM (Maxwell)	AM	-
chladičí výkon	P_{chl}	W
objemový průtok	Q_V	$l \cdot \text{min}^{-1}$
indukčnost	L	H
odpor	R	Ω
kapacita	C	F
odpor kompenzační baterie	RRC	Ω
kapacita kompenzační baterie	CC	F
odpor primární strany transf.	$RRPT$	Ω
indukčnost prim. strany transf.	$L1$	H
odpor sekundární strany transf.	$RRST$	Ω
indukčnost sek. strany transf.	$L2$	H
vzájemná indukčnost	M	H
odpor induktor-kelímek	RRI	Ω
Indukčnost induktor-kelímek	LI	H
proud induktorem	I_{ind}	A
napětí na induktoru	U_{ind}	V
účinnost	η	-
výkon přenesený do vsázky	P_V	W
ztráty v induktoru	P_i	W
ztráty v trubcích (kelímku)	P_t	W
výkon měřený analyzátozem	P_{Pgrid}	W
celkové ztráty	P_C	W
ztráty na generátoru	P_{gen}	W
ztráty na transformátoru	P_{trans}	W
činný příkon zdroje	P_{ZD}	W
vsázka	VS	-
pracovní teplota	t_{prac}	$^{\circ}\text{C}$
velikost mezery mezi trubcemi	m_t	m
výška	h	m
koeficient zatížení zdroje	k_z	-/%
počet trubic	PT	-
úhel mezi trubcemi	β	$^{\circ}$
mezera mezi trubcemi	m_t	m
vzdálenost mezi trubcemi	a_t	m
hloubka vniku	a	m
Akrylonitrilbutadienstyren	ABS	-
Polyethylentereftalát	PET	-
Polylactid acid	PLA	-
Supervisory Control and Data Acquisition	SCADA	-

1. ÚVOD

Použití elektromagnetické indukce k ohřevu a tavení elektricky vodivých materiálů je v současné době běžnou záležitostí. Méně se však mluví o možnostech tavení elektricky nevodivých materiálů, jako jsou například oxidy křemíku nebo oxidy kovů. Pro tyto účely lze použít tavení elektromagnetickou indukci v tzv. studeném kelímku - ISM (Induction Skull Melting). Jedním z nejdůležitějších procesů při tavně elektricky nevodivých materiálů je startovací fáze. Obrovskou výhodou je možnost dosahovat velmi vysokých teplot taveniny (až 3000 °C) a tím eliminovat nečistoty obsažené ve vsázce. U klasické kelímkové pece by docházelo při velmi vysokých teplotách k nadměrnému opotřebením kelímku a nebylo by možné dosáhnout potřebné čistoty. Velký význam nabývá tavení ve studeném kelímku při nakládání s jaderným odpadem. Radioaktivní odpad je zatavován do skelných matric – dochází k tzv. vitrifikaci.

1.1. MOTIVACE

Hlavní motivací této práce bylo vytvořit ucelený soubor doporučení vedoucí ke zvýšení účinnosti tavy se zaměřením na startovací fázi a konstrukční uspořádání studeného kelímku. V odborné literatuře jsou o této problematice zmínky, ale detailnější výzkum pokrývající jednotlivé aspekty konstrukce na základě poměrně detailních numerických simulací a na základě vlastního měření neprobíhal.

Další aspekt, který výrazně ovlivnil směřování této práce, byla instalace experimentálního zařízení HFG160 v rámci projektu SUSEN. Bohužel k instalaci celého zařízení a uvedení do zkušebního provozu došlo s několikaletým zpožděním až v polovině roku 2016. V průběhu roku 2016 byly provedeny pouze testovací tavy, které měly informativní charakter a měly ověřit funkčnost dílčích částí indukčního systému se studeným kelímkem. Nicméně v rámci projektu SUSEN došlo k zakoupení celé řady zařízení, která umožnila praktické ověření dílčích problémů.

V rámci výzkumu byla navázána úzká spolupráce s Doc. Poznyakem, který působí v Centru výzkumu v Řeži u Prahy a na univerzitě v Petrohradě a dlouhodobě se touto problematikou zabývá.

1.2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

Cíle disertační práce jsem shrnul do následujících bodů:

- a) Vytvořit zjednodušené numerické modely startovací fáze pro kompaktní a segmentové provedení studeného kelímku při respektování elektromagnetického a teplotního pole.
- b) Zhodnotit vliv polohy startovacího materiálu s ohledem na rozložení elektromagnetického a teplotního pole.
- c) Zhodnotit vliv tvaru elementu studeného segmentového kelímku a vliv počtu obdélníkových elementů.
- d) Vytvořit systém pro pokročilé měření a sběr dat ze studeného kelímku - verifikace numerických modelů.
- e) Zhodnotit vliv jednotlivých konstrukčních částí segmentového studeného kelímku s kruhovým průřezem elementů (vliv elementů, vliv spoje mezi elementy, vliv bandáže a dna).
- f) Vytvořit metodiku pro návrh konstrukce segmentového kelímku pro zařízení HFG160.

Nejvýznamnější pracovní hypotézy disertační práce jsem shrnul do následujících bodů:

- a) Poloha a tvar startovacího materiálu výrazně ovlivní rozložení elektromagnetického a teplotního pole.
- b) Tvar elementu segmentového provedení studeného kelímku nebude mít podstatný vliv na ztráty a účinnost indukčního systému.
- c) Počet elementů studeného kelímku ovlivní ztráty a účinnost indukčního systému.
- d) Vliv spoje mezi elementy nebude mít podstatný vliv na ztráty ve studeném kelímku
- e) Měděná bandáž a dno budou mít podstatný vliv na rozložení ztrát a účinnost indukčního systému.

1.3. HISTORIE A SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

První zařízení pracující na bázi studeného kelímku pro tavení kovů a jejich slitin bylo patentováno v roce 1931 firmou Siemens a Halske (Německo) [1]. V 60. a 70. letech byly publikovány první informace týkající se rafinace křemíku. Jednalo se prakticky o tavení elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku. V roce 1963 byly zveřejněny informace o možnostech produkce vysoce čistého oxidu křemíku pomocí studeného kelímku v kombinaci s Czochralského procesem. V roce 1969 byl udělen patent na výrobu multi-krytalických křemíkových bloků sloužících k výrobě solárních článků (J. Reboux - Francie). Tento způsob byl pak implementován společností Madylam (Francie). [2-4]

Velkou zásluhu na rozvoji problematiky studeného kelímku mají ruští vědci. V Rusku probíhal výzkum především na univerzitě v Petrohradě (pod vedením Prof. Petrova), kde se zabývali především tavením elektricky nevodivých materiálů. V roce 1972 pak byla vydána první kniha, která se velice podrobně věnovala tavení elektricky nevodivých materiálů ve studeném kelímku [6]. Důležitým milníkem vývoje byl vznik technologického postupu na tvorbu krystalů, kde byl proces tavení založen na použití "velko-objemového" segmentového kelímku. K růstu krystalů pak docházelo od povrchu směrem do středu taveniny. Na základě této technologie je možné vytvářet speciální typy krystalů, které nejsou v přírodě dostupné. Výsledkem může být například syntetický minerál – Fianyt (Cubic Zirconia), který má obrovskou tvrdost a velice dobré optické vlastnosti [8]. Díky těmto vlastnostem se stal velice populárním pro různé technické aplikace a je možné se s ním setkat i ve šperkařském průmyslu.

Na univerzitě v Hannoveru byl prováděn výzkum zabývající se problematikou tavení slitiny Ti-Al. Výsledná slitina disponuje malou hmotností a velkou tepelnou odolností. Používá se například k výrobě ventilů motorů sportovních vozů. V roce 1995 začal opět na univerzitě v Hannoveru (spolu s dalšími partnery) vývoj zařízení na tavení $ZrSiO_4$, který se používal pro výrobu speciálních sanitárních barev. Na základě rozsáhlého výzkumu potom vzniklo zařízení na bázi studeného kelímku, které sloužilo k produkci $ZrSiO_4$. Do kelímku bylo možné vložit až 950 kg taveného materiálu a produkce činila až 200 kg/h. V roce 2001 byl na univerzitě v Hannoveru zahájen výzkum zaměřený na tavení oxidů ve studeném kelímku. V rámci výzkumu vznikla celá řada publikací zabývající se numerickými modely zohledňující elektromagnetické a teplotní pole včetně proudění taveniny. [7]

Vitrifikace jaderného odpadu do skelných matric pomocí studeného kelímku má poměrně dlouhou historii. První zmínky o této technologii sahají do 70. let minulého století. Vitrifikace jaderného odpadu se průmyslově používá především ve Francii [9]. V České republice se vitrifikací zabývá Ústav jaderného výzkumu v Řeži u Prahy. V současné době má tento institut k dispozici celkem tři zařízení pracující na principu studeného kelímku. Uvedená zařízení jsou v rámci výzkumných projektů využívána i k simulacím jaderných havárií.

V současné době se problematikou tavení elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku zabývá celá řada renomovaných pracovišť. Velice podrobně se stále touto problematikou zabývají na univerzitě v Petrohradu a Hannoveru, kde jsou tato zařízení použita především k experimentálním účelům. Produkce zařízení pracujících na bázi studeného kelímku není z výrobního hlediska masovou záležitostí, ale jedná se prakticky o kusovou výrobu, kde se zařízení navrhuje pro dané aplikační použití. Jednotlivá zařízení se od sebe navzájem liší především svým konstrukčním uspořádáním a použitým generátorem.

1.4. POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOUMÁNÍ A STRUKTURA PRÁCE

Při vypracování disertační práce jsem použil různé vědecké metody zkoumání. Pro splnění cílů disertační práce, získání požadovaných výsledků a závěrů jsem použil především logické metody zkoumání. Výchozím bodem bylo prostudování současného stavu dané problematiky v odborné literatuře a publikacích. Mnohé teoretické a praktické poznatky jsem získal na základě konzultací s Doc. Poznyakem a na základě krátkodobé odborné stáže na univerzitě v Hannoveru. Pro uváděnou problematiku jsem vytvořil celou řadu numerických simulací startovací fáze a konstrukčního uspořádání segmentového studeného kelímku za pomoci software pracující na principu metody konečných prvků. Pro řešení elektromagnetického a teplotního pole jsem používal software ANSYS (programovací jazyk APDL) nebo ANSYS EM (Maxwell). Pro řešení teplotního pole byl pak výhradně používán ANSYS (APDL). V rámci vypracování disertační práce jsem provedl řadu experimentálních měření na funkčních vzorcích studeného kelímku za pomoci mnou vytvořeného měřicího systému. Funkční vzorky byly vytvořeny pomocí 3D tisku. Návrh vzorků probíhal v software SolidWorks. V rámci řešených problémů byla provedena řada analytických výpočtů. Pro některé analytické výpočty pak byly napsány skripty v software Mathematica. Analýza rezonančního obvodu indukčního zařízení byla provedena v software SystemModeler.

První část disertační práce jsem věnoval úvodu do dané problematiky (kapitola 2). Jedná se především o vysvětlení principu funkce studeného kelímku, o konstrukční uspořádání a postupy aplikované při tavně elektricky vodivých a nevodivých materiálů. Značná pozornost je věnována startovací fázi, která je stěžejní při tavení elektricky nevodivých materiálů.

Další část disertační práce (kapitola 3) je věnována vytvoření matematických modelů pro analýzu startovací fáze s respektováním elektromagnetického i teplotního pole pomocí metody konečných prvků a výpočtům pro dvě základní konstrukční uspořádání studeného kelímku (kompaktní a segmentové provedení studeného kelímku). Pro kompaktní provedení je potom provedena analýza uložení startovacího materiálu uvnitř vsázky. Na základě provedené analýzy je možné navrhnout jisté konstrukční úpravy vedoucí ke zvýšení účinnosti procesu tavení. Numerické simulace byly provedeny pomocí multi-fyzikální software ANSYS (programovací jazyk APDL) a ověřeny zjednodušeným analytickým výpočtem.

Následně je pozornost věnována problematice tvaru chladících elementů a jejich vlivu na účinnost systému jako celku (podkapitola 4.1). Při numerických simulacích jsou uvažovány tři nejběžnější tvary elementů segmentového studeného kelímku (kruhový průřez, obdélníkový průřez a průřez ve tvaru trapezoidu). Na základě výsledků jsou opět stanovena určitá doporučení zohledňující i poměrně rozsáhlé vlastní zkušenosti spojené s výrobou studených kelímků. V rámci dané

problematiky je řešen i vliv počtu obdélníkových chladících elementů na účinnost indukčního systému (podkapitola 4.2). K vytvoření numerických modelů byl opět použit multi-fyzikální software ANSYS (programovací jazyk APDL).

Aby bylo možné dílčí numerické simulace ověřit, bylo nezbytné sestavit komplexní indukční zařízení, které by odpovídalo požadavkům na tavbu ve studeném kelímku (podkapitola 4.3). Celé indukční zařízení bylo nutné doplnit o pokročilé měření pro analýzu a sběr dat ze studeného kelímku. Pro konstrukci indukčního zařízení a měřicího systému byly použity komponenty získané na základě projektu SUSEN. Realizovaný systém pro analýzu a sběr dat není určen pouze pro aplikace se studeným kelímkem, ale i pro jiná indukční zařízení. Jádro měřicího systému je postaveno na komponentech od National Instrument (CompactRIO a příslušné měřicí karty) a software LabVIEW.

V rámci měření bylo nezbytné vytvořit celou řadu funkčních vzorků (modelů), které by řešily dílčí aspekty konstrukce studeného kelímku. Při výrobě jednotlivých vzorků byl v hojné míře využíván 3D tisk (podkapitola 6.3), bez kterého by ověření numerických simulací nebylo možné. Veškeré tisky byly provedeny na tiskárně Prusa I3. 3D modely byly vytvářeny pomocí software SolidWorks. Ověřen byl nejběžněji používaný segmentový studený kelímk s kruhovým průřezem elementů.

Vlastní výzkum zahrnoval vliv počtu trubic identického průměru (rozdílný průměr kelímku), vliv elektricky vodivého spojení mezi chladícími trubicemi, vliv počtu trubic rozdílného průměru (zachován identický průměr kelímku) a vliv dna a bandáže na účinnost studeného kelímku (podkapitoly 4.5 - 4.8). V rámci měření a simulací byly zjišťovány nejen ztráty (výkon), ale i pasivní parametry (indukčnost a odpor) dílčích komponentů indukčního systému. Veškeré numerické simulace uváděné v těchto podkapitolách jsou provedeny v software ANSYS EM (Maxwell).

Pro lepší názornost je doplněn i analytický výpočet (postup) pro určení maximálních rozměrů (konstrukce) studeného segmentového kelímku pro tavení oxidů kovů v zařízení HFG160 (kapitola 5). Na základě analytického výpočtu byl vytvořen skript v software Wolfram Mathematica, který umožňuje velice rychlé modifikace konstrukčního uspořádání segmentového studeného kelímku.

V rámci výzkumu vznikla celá řada funkčních vzorků studeného kelímku, díky kterým si bylo možné udělat i značný přehled o technologických postupech spojených s výrobou studených kelímků. Poznatky získané při návrhu měřicího systému a konstrukci funkčních vzorků lze velice dobře aplikovat v technické praxi a vylepšit tak nejenom účinnost indukčního systému ale i technologické postupy používané při výrobě studeného kelímku.

2. INDUKČNÍ SYSTÉM SE STUDENÝM KELÍMKEM

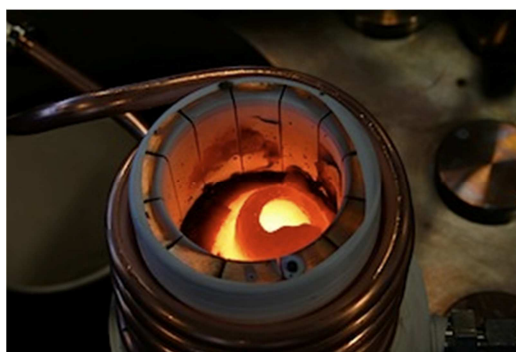
V této kapitole je stručně popsán princip funkce studeného kelímku včetně jeho dvou základních konstrukčních uspořádání (kompaktní a segmentové provedení studeného kelímku). Dále jsou zde uvedeny ostatní části indukčního zařízení se studeným kelímkem nezbytné pro jeho provoz. Poměrně detailně jsou popsány možnosti startovací fáze pro tavení elektricky nevodivých materiálů včetně informací o bilanci výkonů v průběhu tavby. Na závěr jsou uvedeny základní informace o tavení elektricky vodivých materiálů.

2.1. PRINCIP A KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ STUDENÉHO KELÍMKU

Vlastní princip tavení je založen na principu elektromagnetické indukce (indukčním ohřevu). Induktor je protékán střídavým proudem o frekvenci 10 kHz až 5 MHz. Nižší frekvence se používají pro tavení elektricky vodivé vsázky, vyšší frekvence potom pro tavení elektricky nevodivých materiálů (převážně oxidů). Ke generování tepla dochází přímo v ohřívaném materiálu. Při této aplikaci je induktor velice intenzivně chlazen vodou (v případě kelímku s integrovaným induktorem) a v místě jeho kontaktu se vsázkou vzniká při jeho vnitřním povrchu ztuhlá vrstva z taveného materiálu tzv. „skull“, tj. dochází k tavbě ve vlastním materiálu. Teplota ztuhlé vrstvy se pohybuje okolo 100 °C, přičemž tavený materiál může dosahovat teploty až 3000 °C. [7][15]

V současnosti se používají dva druhy konstrukčního uspořádání studeného kelímku – kelímek s integrovaným induktorem a kelímek segmentový.

Technologie studeného kelímku se podle dosavadních zkušeností může uplatnit při výzkumu nových materiálů a při likvidaci nebezpečného odpadu, ale i při tavení materiálů, které pomocí běžných aplikací není možné tavit (např. oxidy kovů, speciální druhy skla, atd.). Reálné zařízení (segmentový studený kelímek) přímo při tavbě je zobrazen na *Obr. 2.1.1*.

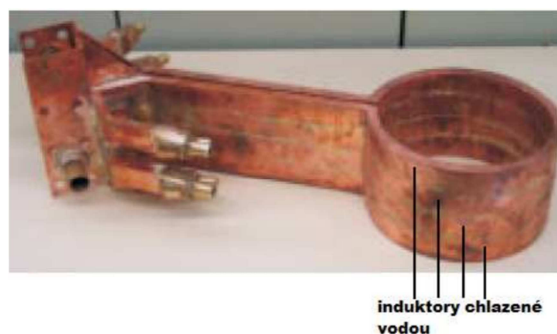


Obr. 2.1.1 Segmentový studený kelímek [16]

2.1.1. STUDENÝ KELÍMEK S INTEGROVANÝM INDUKTOREM

Kelímek s integrovaným induktorem představuje technologicky náročnější řešení. Dříve se toto konstrukční uspořádání nepoužívalo, neboť jako napájecí zdroje byly používány elektronkové generátory, které pracovaly s vysokým napětím pohybujícím se okolo 10 kV a docházelo tak ke zkratu na přívodním pásovém vedení. V současné době se začínají pro tyto účely používat tranzistorové generátory, které pracují s nižším napětím než generátory elektronkové a umožňují tak toto konstrukční uspořádání studeného kelímku uvést do praxe. [15]

Kelímek s integrovaným induktorem (Obr. 2.1.1.1) je tvořen zpravidla několika jednozávitovými měděnými induktory umístěnými nad sebou, každý závit je samostatně chlazen vodou. Dno je rovněž měděné a chlazené vodou. Vlivem intenzivního chlazení dojde k vytvoření ztuhlé vrstvy taveného materiálu. V případě, že by nedošlo k vytvoření ztuhlé vrstvy v oblasti přívodu (na pásovém vedení), tak by mohlo dojít k nežádoucímu zkratu. [20]



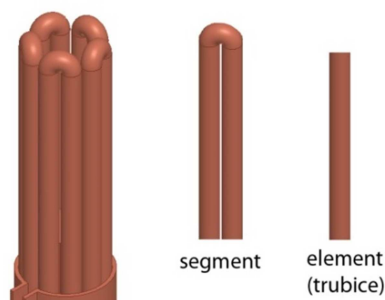
Obr. 2.1.1.1 Kelímek s integrovaným induktorem [22]

Výhodou tohoto uspořádání je vyšší účinnost tavení. Nevýhodou je nemožnost oddělení kelímku a induktoru – nehodí se pro tavení oxidů, protože nelze řídit jejich krystalizaci. Kelímek s integrovaným induktorem se používá především pro tavení skla.

2.1.2. SEGMENTOVÝ STUDENÝ KELÍMEK

Segmentový kelímek je vhodný pro tavení elektricky vodivé vsázky a oxidů kovů. Konstrukčně je tvořen soustavou segmentů, induktorem, dnem a bandáží.

V praxi se pod pojmem segment rozumí dvě spojené trubice (elementy) v případě kruhového průřezu nebo dva spojené elementy v případě obdélníkového průřezu nebo průřezu ve tvaru trapezoidu. Rozdíl mezi segmentem a trubicí (elementem) je uveden na *Obr. 2.1.2.1*.

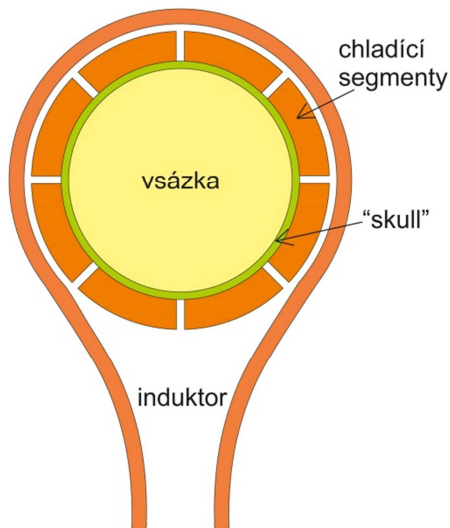


Obr. 2.1.2.1 Rozdíl mezi segmentem a trubicí (elementem)

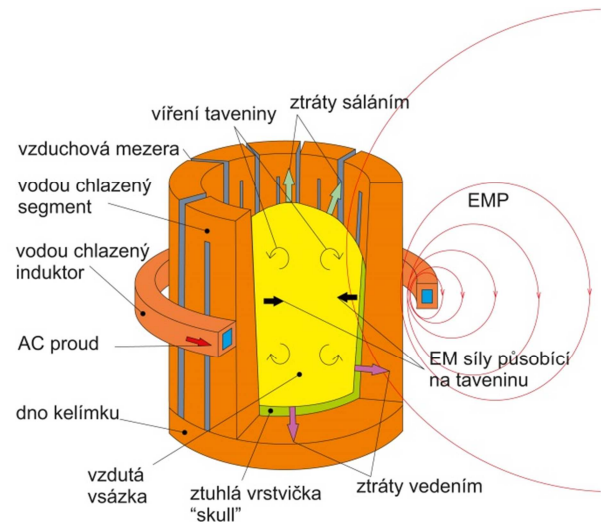
Měděné segmenty jsou duté a intenzivně chlazené vodou. Ve spodní části jsou segmenty napojeny na přívodní a zpětné potrubí sloužící k přívodu a odvodu chladicí vody. Induktor bývá zpravidla více-závitový, zhotovený z mědi a intenzivně chlazen vodou. Dno kelímku je taktéž vyrobeno z mědi a opatřeno chladicím systémem. Mezera mezi segmenty a elementy bývá zpravidla okolo 0,5-1 mm (menší mezera je složitě konstrukčně vyřešit). Tato velikost však postačí k tomu, aby nedocházelo k nedovolenému odtoku taveniny přes segmenty směrem k induktoru.

Tvar chladicích elementů má na funkčnost a účinnost indukčního zařízení se studeným kelímkem určitý vliv. Nejčastěji mají elementy kruhový průřez, neboť obdélníkový tvar je konstrukčně náročnější. Vzhledem k vysokým tlakům dosahovaným uvnitř chladicího segmentu je vhodné volit tloušťku stěny elementu alespoň 1,5 mm. V případě použití trubic by neměl být vnitřní průměr menší než 4 mm. [15] [20]

Ukázka segmentového studeného kelímku je uvedena na *Obr. 2.1.2.2*. Princip funkce je znázorněn na *Obr. 2.1.2.3*.



Obr. 2.1.2.2 Segmentový studený kelímek
– pohled shora



Obr. 2.1.2.3 Segmentový studený kelímek
- konstrukce a zjednodušený princip

Vlivem velice intenzivního chlazení jednotlivých konstrukčních částí dochází k vytvoření ztuhlé vrstvy taveného materiálu (při vnitřní straně segmentů a dně kelímku). Díky tomu, že není použita žádná vyzdívka, jako je tomu u klasické kelímkové pece, nedochází ke kontaminaci výsledné taveniny a tavenina se prakticky taví „sama v sobě“. [7] [20]

2.2. NEZBYTNÉ KOMPONENTY INDUKČNÍHO SYSTÉMU SE STUDENÝM KELÍMKEM

V této podkapitole jsou popsány nejdůležitější komponenty indukčního zařízení se studeným kelímkem. V textu je primárně zmíněno zařízení HFG160 [32], které bylo dodáno a instalováno slovenskou firmou Induktio d.o.o. v roce 2016. Zařízení je umístěno ve Vědecko-technickém parku v Plzni. Jedná se o experimentální zařízení sloužící k tavně oxidů kovů.

Vysokofrekvenční generátor

Velmi důležitým komponentem každého studeného kelímku je generátor. Generátory na nižších frekvencích (řádově desítky kHz) běžně používají IGBT tranzistory. Generátory pracující s nižšími frekvencemi slouží k tavení elektricky vodivých materiálů. Vysokofrekvenční generátory pro tavení elektricky nevodivých materiálů používají výkonové triody. Většina komponentů generátoru je vodou chlazená. Ukázka části vysokofrekvenčního generátoru je uvedena *Obr. 2.2.1*.



Obr. 2.2.1 Ukázka části vysokofrekvenčního generátoru HFG160

Pracovní komora

Pracovní komora plní celou řadu funkcí: zlepšuje chlazení, přispívá k vytvoření ochranné atmosféry, řídí oxidaci a chrání pracovníky při tavně (před elektromagnetickým vlněním, výpary a před únikem taveniny).

Komora je zpravidla tvořena z dvojitých nerezových plátů, tak aby bylo dosaženo co největší odolnosti. Dvojitý plášť komory umožňuje také nezávislé vodní chlazení. Bez ochranné komory by nebylo prakticky možné bezpečně tavit. V ochranné komoře jsou umístěny průzory ze speciálního skla a otvor pro doplňování vsázky. Každá komora by měla být vybavena polohovacím zařízením tak, aby bylo možné dobře manipulovat se studeným kelímkem a vsázkou. V případě tavby oxidů probíhá tavba za přítomnosti kyslíku a z komory jsou odsávány páry uvolňující se z taveniny pomocí filtračního zařízení. V případě, že se taví materiály, které při reakci s kyslíkem negativně mění svoje mechanické vlastnosti (např. titan), tak je nezbytné použít ochrannou atmosféru (např. argon). Pracovní komora s induktorem je na *Obr. 2.2.2*.



Obr. 2.2.2 Pracovní komora HFG160

Chladicí systém

Kvalitní chladicí systém je základem bezpečného provozu daného zařízení. Téměř všechny komponenty indukčního zařízení jsou intenzivně chlazeny vodou. Nejčastěji se používá uzavřený chladicí okruh s výměníkem. Chladicí systém v naší laboratoři však nedisponuje tímto výměníkem, ale používá 3 nerezové tanky, které se mezi sebou přepínají, tak aby nebyla překročena maximální povolená teplota v chladicím tanku. Maximální teplota chladicí vody v systému se pohybuje okolo 30 - 35 °C. Ukázka nerezových chladicích tanků je uvedena na *Obr. 2.2.3*.



Obr. 2.2.3 Nerezové tanky chladícího okruhu HFG160

Řídicí systém

Na rozdíl od starších instalací studeného kelímku je zařízení HFG160 vybaveno moderním řídicím systémem, který zabezpečuje všechny potřebné ovládací a bezpečnostní funkce včetně sběru dat v rámci jednotlivých měření. Jádrem systému je zpravidla průmyslové PLC od renomovaných výrobců. Řídicí systém vyhodnocuje měřené veličiny a plní bezpečnostní funkci (např. v případě nenadálé poruchy odstaví celé zařízení). Řídicí systém je zpravidla vybaven uživatelským rozhraním, které umožňuje obsluze studeného kelímku sledovat jednotlivé měřené veličiny a ukládat měřená data. Ukázka uživatelského rozhraní je uvedena na Obr. 2.2.4.



Obr. 2.2.4 Uživatelské rozhraní HFG160 – Siemens Simatic

V naší laboratoři byl dále nad pracovní komorou umístěn speciální pyrometr, který umožňuje měřit povrchovou teplotu taveniny. Celý prostor pracovní komory je monitorován kamerou připojenou k dataprojektoru tak, aby každý účastník tavby mohl sledovat, co se děje uvnitř pracovní komory.

Instalace indukčního zařízení se studeným kelímkem (bez chladících tanků) v hale F2 ve Vědecko-technickém parku je uvedena na Obr. 2.2.5.



Obr. 2.2.5 Instalace HFG160 (Vědecko-technický park Plzeň)

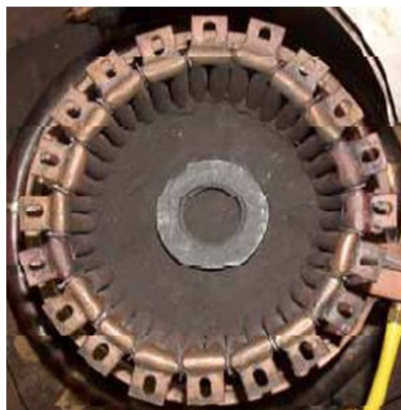
2.3. PROCES TAVENÍ VE STUDENÉM KELÍMKU

Mezi materiály, které se nejčastěji taví ve studeném kelímku, patří především keramiky, oxidy kovů a sklo. Elektrická vodivost těchto materiálů je za běžné pokojové teploty velice malá a nelze je začít tavit elektromagnetickou indukcí bez tzv. startovací fáze. V případě tavby vodivých materiálů náročná startovací fáze odpadá.

2.4. TAVENÍ ELEKTRICKY NEVODIVÝCH MATERIÁLŮ – STARTOVACÍ FÁZE

Startovací fáze spočívá ve zvýšení teploty vsázky na takovou hodnotu, při které dojde ke zvýšení její elektrické vodivosti na hodnotu, při které se již dokáže tavit sama bez dalších podpůrných prostředků. Startovací fáze může být provedena několika způsoby:

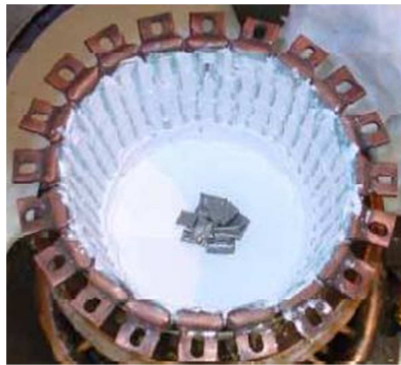
- a) Vložení elektricky vodivého kruhu na povrch nebo přímo do vsázky je jedním z nejrozšířenějších způsobů jak zvýšit elektrickou vodivost (Obr. 2.4.1). Vodivý kruh je nejčastěji vyhotoven z grafitu, iridia nebo karbidu křemíku. Jakmile dojde ke zvýšení teploty vsázky na požadovanou, při které se již vsázka může tavit sama, tak je startovací kruh vyjmut ze vsázky a proces tavby probíhá bez další pomoci. [7] [20]



Obr. 2.4.1 Použití elektricky vodivého grafitového kruhu jako startovacího materiálu [22]

- b) Velice zajímavým řešením startovací fáze při tavbě oxidů kovů je přidání malého množství kovu ve formě prášku nebo drobných kousků (Obr. 2.4.2). Vhodné je překrytí startovacího materiálu vlastním oxidem z důvodu zlepšení přenosu tepelné energie do vsázky a snížení tepelných ztrát. Velikost částic musí být volena tak, aby docházelo k utlumení elektromagnetického vlnění uvnitř startovacího materiálu. Vířivé proudy se uzavírají startovacím materiálem, který oxiduje za přítomnosti kyslíku a mísí se s taveninou. V případě dokonalé oxidace nedochází ke kontaminaci výsledného materiálu. Znečištění nastává pouze

v případě nedokonalé oxidace při nedostatku kyslíku. Bod tavení (varu) startovací materiálu nesmí být vyšší než bod tavení vlastní vsázky. [7] [20]



Obr. 2.4.2 Použití kousků kovu při tavně oxidů [22]

- c) Další možností je využití přímého tepelného ohřevu povrchu vsázky. Nejčastěji se pro tento způsob používá plynový hořák, který se používá pro startovací fázi při tavně skla (Obr. 2.4.3). Pro tuto aplikaci se používá kelímek s integrovaným induktorem. Jakmile je dosaženo požadované teploty, při které může docházet k indukovaní vířivých proudů ve vsázce, je působení hořáku zastaveno. Nevýhodou je možnost kontaminace povrchu vsázky od plynového hořáku. [7] [20]



Obr. 2.4.3 Zkrystalizované sklo po použití plynového hořáku jako startovací fáze [22]

- d) Poslední používanou možností je realizace startovacího procesu pomocí koncentrovaného světelného záření. Tento způsob startovací fáze je poněkud komplikovaně realizovatelný. [7] [20]

2.5. BILANCE VÝKONŮ (ZTRÁT)

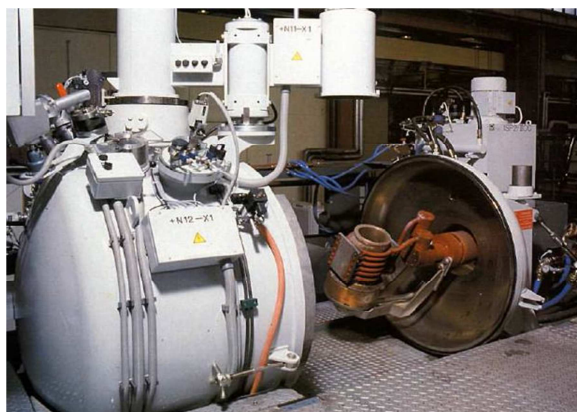
Po skončení startovací fáze je nutno pro další tavení zajistit rovnováhu výkonů, tj. provést bilanci výkonů (ztrát). Je nutné především kompenzovat tepelné ztráty vedením ze vsázky směrem k induktoru a dnem kelímku a ztráty sáláním z povrchu taveniny. V případě, že by docházelo k nedostatečné kompenzaci, mohlo by dojít k zatuhnutí taveniny a ukončení procesu tavby. V případě tavby malého množství materiálu může být problém i malá odchylka od rovnováhy výkonů. V případě, že dojde například ke zvýšení tepelných ztrát sáláním, musí dojít ke zvýšení dodávaného výkonu tak, aby nedošlo k poklesu teploty vsázky a tím ke zvýšení měrného odporu vsázky. [15] [20]

Proces pomalého tuhnutí je možné realizovat několika způsoby, tj. pomalým odseparováním induktoru a kelímku (tato možnost je aplikovatelná u segmentového studeného kelímku), snížením výkonu zdroje nebo Czochralskiho procesem založeným na pomalém tažení zárodečného monokrystalu z taveniny.

2.6. TAVENÍ ELEKTRICKY VODIVÝCH MATERIÁLŮ

Tavení elektricky vodivých materiálů probíhá především za pomoci ochranné atmosféry. Výsledné produkty disponují velice dobrými mechanickými vlastnostmi a čistotou. V případě tavby elektricky vodivých materiálů odpadá velice náročná startovací fáze. Konstrukčně je studený kelímkem pro tavení elektricky vodivých materiálů koncipován jako segmentový. Pro tavení elektricky vodivých materiálů se používá frekvence v rozmezí 10 - 30 kHz. [7] [20]

Mezi nejčastěji tavený elektricky vodivý materiál patří titan, který je nadále využíván v letectví, lékařství a v automobilovém průmyslu. Dříve se titan taval v klasickém keramickém kelímku, kde docházelo ke zvýšenému obsahu kyslíku ve finálním produktu. Nevýhodou byla zvýšená křehkost výsledného odlitku a tím bylo jeho následné použití limitováno. Tavení všech elektricky vodivých materiálů by mělo probíhat za pomoci ochranné atmosféry (vakua). [8]



Obr.2.3 Tavení titanu ve studeném segmentovém kelímku [22]

3. MATEMATICKÝ MODEL STARTOVACÍ FÁZE

Během startovací fáze dochází k vzájemnému ovlivňování elektromagnetického a teplotního pole v materiálu. Problém je proto třeba řešit jako sdruženou úlohu, tzn. že matematický model startovací fáze se skládá jak z rovnic pro nestacionární elektromagnetické pole, tak z rovnic pro pole teplotní. Je zde formulována okrajová úloha startovací fáze v kompaktním studeném kelímku a okrajová úloha startovací fáze v segmentovém studeném kelímku. Výsledky simulací jsou ověřeny zjednodušeným analytickým výpočtem. V rámci kapitoly je posouzen i vliv polohy a tvaru startovacího materiálu na modifikovaném numerickém modelu kompaktního studeného kelímku.

3.1. ROVNICE PRO ELEKTROMAGNETICKÉ POLE [11]

Většina profesionálních programů pro analýzu elektromagnetického pole je založena na řešení parciálních diferenciálních rovnic pro vektorový potenciál, který je definován rovnicí

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (3.1.1)$$

Odvození rovnice pro vektorový potenciál \mathbf{A} vychází z prvních dvou Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.1.2)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.1.3)$$

Z rovnic (3.1.1) a (3.1.3) lze vyjádřit intenzitu elektrického pole ve tvaru

$$\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{E}_v + \mathbf{E}_i \quad (3.1.4)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_v - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_v + \mathbf{J}_i \quad (3.1.5)$$

kde $\mathbf{J}_v = \gamma \mathbf{E}_v$ je proudová hustota vnuceného proudu, odpovídá proudu induktorem připojeného k napájecímu zdroji, $\mathbf{J}_i = \gamma \mathbf{E}_i$ je proudová hustota vířivých proudů. Omezíme-li se na kvazistacionární pole, lze v rov. (3.1.2) zanedbat Maxwellův posuvný proud. Vzhledem k vyšším frekvencím napájecího proudu, je však nutné vzhledem k vlastnostem použitých materiálů kontrolovat, zda je podmínka kvazistacionarity splněna, tj. platí-li

$$J_{ef} \gg \varepsilon \omega E \rightarrow \gamma \gg \varepsilon \omega \quad (3.1.6)$$

Při splnění této podmínky a využití rovnic (3.1.1)–(3.1.3) dostaneme

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \mathbf{A} = \gamma \mathbf{E}_v - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.1.7)$$

Za zjednodušujícího předpokladu lineárního prostředí $\mu = konst.$, pak výsledná parciální diferenciální rovnice pro vektorový potenciál má tvar

$$\Delta \mathbf{A} = \mu \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \mu \mathbf{J}_V \quad (3.1.8)$$

K získání jednoznačného řešení rovnice (3.1.8) je nutné pro danou oblast, kde hledáme rozložení elektromagnetického pole, formulovat okrajové podmínky, počáteční podmínky a podmínky na rozhraní. Programy založené na metodě konečných prvků podmínky na rozhraní nevyžadují, protože vzhledem k použité metodě jsou tyto podmínky splněny automaticky.

Podmínky pro vektorový potenciál na rozhraní Γ_R lze zcela obecně formulovat takto:

- a) Spojitost vektorové potenciálu

$$\mathbf{A}_1(\Gamma_R) = \mathbf{A}_2(\Gamma_R) \quad (3.1.9)$$

- b) rovnice pro normálové derivace

$$\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial \mathbf{A}_1}{\partial \mathbf{n}} - \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial \mathbf{A}_2}{\partial \mathbf{n}} = \mathbf{K}_n \quad (3.1.10)$$

kde \mathbf{K}_n představuje lineární hustotu proudu

Okrajové podmínky pro vektorový potenciál na hranici vyšetřované oblasti Γ_Ω jsou

- a) Dirichletovy – je dáno rozložení vektorového potenciálu

$$\mathbf{A}(\Gamma_\Omega, t) = \mathbf{A}_\Gamma(\Gamma_\Omega, t) \quad (3.1.11)$$

kde \mathbf{A} představuje hledanou hodnotu vektorového potenciálu

a $\mathbf{A}_{\Gamma_\Omega}$ je požadovaná hodnota vektorového potenciálu pro body hranice Γ_Ω

- b) Neumannovy – je známa derivace vektorového potenciálu podle normály

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \mathbf{n}}(\Gamma_\Omega, t) = f_{01}(\Gamma_\Omega, t) \quad (3.1.12)$$

kde f_{01} představuje požadovanou hodnotu derivace \mathbf{A} dle vnější normály

Oblast Ω , kde hledáme rozložení elektromagnetického pole, zpravidla volíme tak, aby bylo možno na základě fyzikální interpretace tyto okrajové podmínky snadno formulovat.

Z vlastností vektorového potenciálu a vektoru \mathbf{B} plyne, že magnetické indukční čáry jsou totožné s ekvipotenciálami vektoru \mathbf{A} , je-li tedy hranice totožná se siločarou, bude pro vektorový potenciál platit podmínka Dirichletova. Je-li hranice rovinou symetrie nebo povrchem dokonale permeabilního materiálu, kde je nulová tečná složka \mathbf{B} , odpovídá to nulové Neumannově podmínce.

V případě kombinace Dirichletovy a Neumannovy podmínky se jedná o tzv. smíšenou okrajovou úlohu.

3.2. ROVNICE PRO TEPLOTNÍ POLE [11]

Fourier-Kirchhoffova rovnice (3.2.1) je speciálním případem energetické rovnice. Za předpokladu pevného skupenství látek, konstantního tlaku, konstantní měrné tepelné kapacity, nulové viskozity a nulové rychlosti ohřívání součástí platí

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\operatorname{div}(-\lambda \operatorname{grad} T) + w_j \quad (3.2.1)$$

V případě indukčních ohřevů w_j představuje měrné Jouleovy ztráty.

Stejně jako v případě řešení elektromagnetického pole je potřeba formulovat okrajové a počáteční podmínky a podmínky na rozhraní pro teplotní pole.

Podmínky na rozhraní

Podmínky na rozhraní dvou materiálů s různými materiálovými parametry vyjadřují, že teploty na obou stranách rozhraní jsou stejné a že rozdíl toků energie k rozhraní a od rozhraní je roven plošné hustotě energie vznikající na rozhraní za jednotku času.

$$T_1 = T_2 \quad (3.2.2)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{n}} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{n}} = q \quad (3.2.3)$$

kde \mathbf{n} představuje normálový vektor se směrem do druhého prostředí a q představuje plošnou hustotu výkonu.

V případě, že na rozhraní nevzniká žádná tepelná energie ($q = 0$), pak platí pro rozhraní rovnice

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{n}} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{n}} \quad (3.2.4)$$

Okrajové podmínky pro teplotní pole

- a) Dirichletova – se používá všude tam, kde je známa teplota na hranici Γ_Ω

$$T(\Gamma_\Omega, t) = T_{\Gamma_\Omega}(\Gamma_\Omega, t) \quad (3.2.5)$$

- b) Neumannova – používá se všude tam, kde je známa velikost toku tepelné energie přes hranici Γ . Využívá se především na osách symetrie, kde je nulový tok tepelné energie přes hranici.

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}}(\Gamma_\Omega, t) = f_{02}(\Gamma_\Omega, t) \quad (3.2.6)$$

kde f_{02} je požadovaná hodnota tepelného toku

- c) Newtonova – používá se především při uvažování konvekce mezi pevnou látkou a kapalinou nebo plynem. Jedním z nejdůležitějších parametrů je součinitel přestupu tepla prouděním α . Jeho správné určení je velice problematické a určuje se na základě tzv. kritérií podobností. Je ovlivňován celou řadou parametrů, např. teplotou, tlakem, viskozitou, atd.

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \alpha (T_{gass} - T) \quad (3.2.7)$$

- d) okrajová podmínka IV. Druhu – respektuje přestup tepla sáláním, které vychází ze Stefan – Bolzmanova zákona.

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \varepsilon c (T_{ext}^4 - T^4) \quad (3.2.8)$$

U indukčních ohřevů dochází zpravidla k ohřevu z nízké teploty na velmi vysokou. Z tohoto důvodu je zapotřebí uvažovat přestup tepla konvekcí a radiací, který je řešen smíšenou okrajovou podmínkou

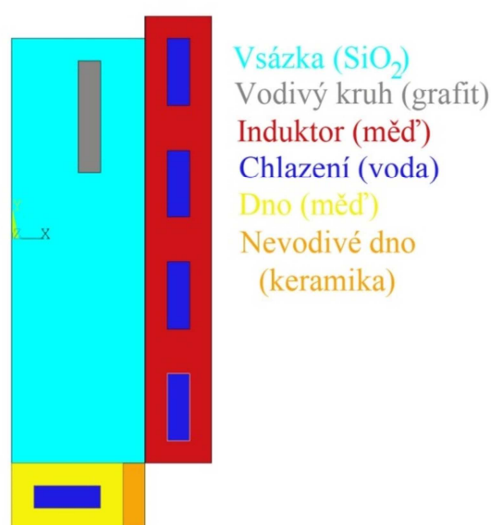
$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \alpha (T_{gass} - T) + \varepsilon c (T_{ext}^4 - T^4) \quad (3.2.9)$$

3.3. FORMULACE OKRAJOVÉ ÚLOHY STARTOVACÍ FÁZE V KOMPAKTNÍM KELÍMKU

V tomto odstavci bude formulována okrajová úloha pro následující uspořádání: induktor je tvořen měděným závitem, který je dutý a rozdělený do několika částí, které jsou intenzivně ochlazovány vodou. Uvnitř induktoru se nachází vsázka ve formě SiO_2 (teplota tavení $1850\text{ }^\circ\text{C}$). Pod povrch vsázky (1 cm) je vložen startovací grafitový kroužek (teplota tavení $3600\text{ }^\circ\text{C}$). Uvažovaná elektricky vodivá část dna je stejně jako induktor měděná a chlazená vodou. Zbylá část dna je elektricky nevodivá a tvořená keramikou.

Průchodem střídavého proudu induktorem dojde k vytvoření elektromagnetického pole, které se uzavírá přes vsázku a indukuje tak proud do grafitového elektricky vodivého kroužku. Teplota tavení grafitu, ze kterého je elektricky vodivý kroužek vytvořen, je samozřejmě vyšší, než teplota tavení SiO_2 , který tvoří vsázku. V případě této startovací fáze je vsázka v pevném skupenství a dochází pouze k jejímu natavení.

Na Obr. 3.3.1 je znázorněn řez konstrukčním uspořádáním studeného kelímku. Rozměry a objemy vybraných konstrukčních částí jsou uvedeny v Tab. 3.3.1. Hodnoty, které jsou dále uváděny, jsou převzaty z prací [10, 12, 13, 27].



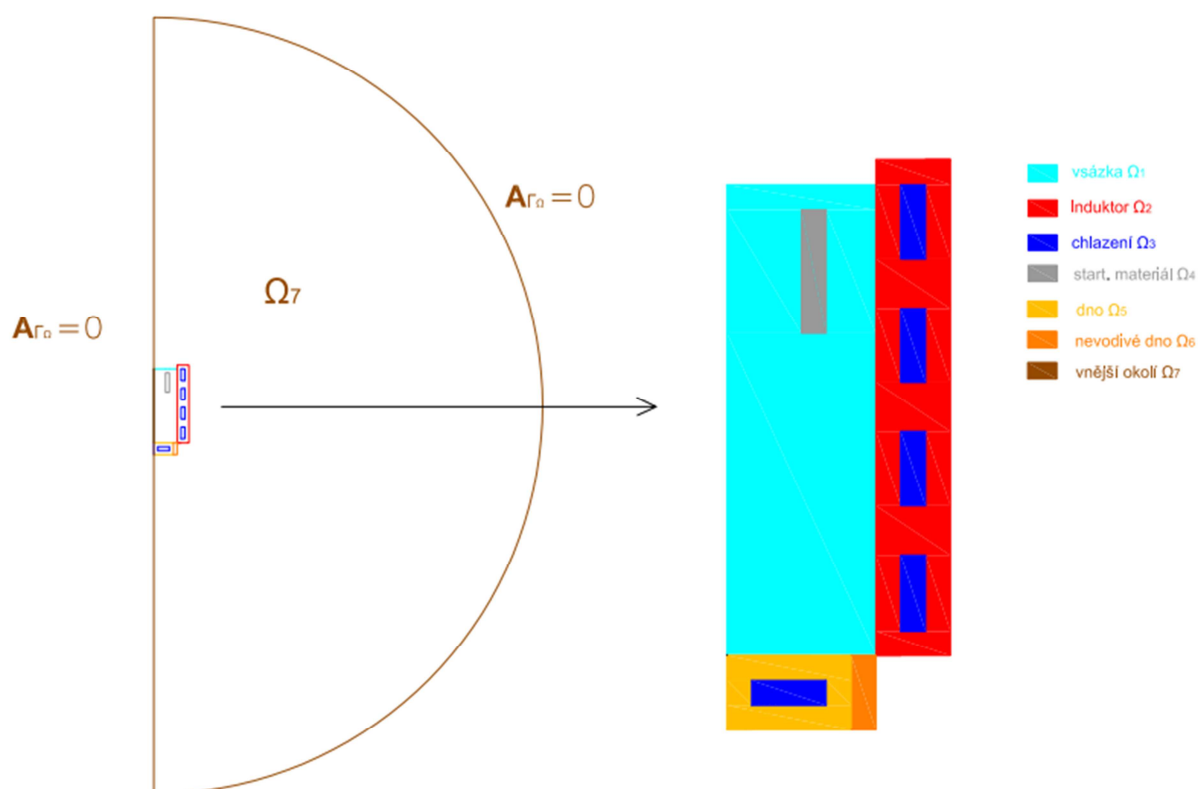
	Startovací materiál	Induktor
r_1 [m]	0,03	0,6
r_2 [m]	0,04	0,09
v [m]	0,05	0,02
	Chlazení	Vsázka
V [m^3]	$26,72 \cdot 10^{-4}$	$24,61 \cdot 10^{-4}$

Tab. 3.3.1 Uvažované rozměry kompaktního studeného kelímku

Obr. 3.3.1 Uvažovaný model kompaktního studeného kelímku včetně přiřazení materiálů jednotlivým oblastem

K řešení této úlohy byl použit multi-fyzikální software ANSYS. Pro analýzu startovací fáze tavby SiO_2 je nutno pro uvažované uspořádání zvolit vhodný tvar oblasti a formulovat pro ni příslušné okrajové a počáteční podmínky. Na Obr. 3.3.2 je znázorněna oblast Ω sestávající z jednotlivých podoblastí.

Vnější okrajová úloha je řešena jako rotačně symetrická s osou symetrie uprostřed vsázky. Problém je dále řešen jako slabě sdružená úloha, tj. nejdříve je vyřešeno elektromagnetické pole a poté na základě rozložení Jouleových ztrát pole teplotní.



Obr. 3.3.2 Numerický model kompaktního kelímku – rozdělení na jednotlivé oblasti

Při zadávání materiálových parametrů je nutné uvažovat jejich teplotní závislost. Tento problém lze vyřešit dvěma způsoby. Prvním z nich je zadat střední hodnotu materiálových parametrů pro daný teplotní rozsah. Další možností, jak zohlednit teplotní závislost materiálových parametrů, je použít postupné řešení, tj. rozdělit křivku teplotních závislostí do několika nezávislých úseků a ty řešit samostatně. Vzhledem ke špatné dostupnosti teplotní závislostí materiálů v požadovaném rozsahu byl pro náš model zvolen první z uvedených postupů, tj. byla uvažována střední hodnota materiálových parametrů. Uvažované materiálové parametry pro jednotlivé oblasti Ω jsou uvedeny v Tab. 3.3.2.

Oblast	Komponent	Materiál	Uvažovaná teplota [°C]	Elektrické vlastnosti		Tepelné vlastnosti		
				μ_r [-]	ρ_e [$\Omega \cdot m$]	ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
Ω_1	Vsázka	SiO ₂	350	1	$1,10 \cdot 10^{-5}$	5200	700	1,78
Ω_2	Induktor	Měď	20	1	$1,75 \cdot 10^{-8}$	8960	385	400
Ω_3	Chlazení	Voda	20	1	-	1000	4180	-
Ω_4	Vodivý kruh	Grafit	900	1	$4,00 \cdot 10^{-5}$	2250	710	25
Ω_5	Dno	Měď	20	1	$1,75 \cdot 10^{-8}$	8960	385	400
Ω_6	Nevodivé dno	Keramika	20	1	-	5923	635	12,44
Ω_7	Okolí	Vzduch	20	1	-	-	-	-

Tab. 3.3.2 Materiálové vlastnosti [35]

Vzhledem k tomu, že je splněna podmínka kvazistacionarity (3.1.6) a je uvažováno lineární prostředí, platí pro elektromagnetické pole upravená rovnice pro vektorový potenciál \mathbf{A} ve tvaru (3.1.8), tu je možno pro jednotlivé podoblasti dále zjednodušit.

Pro oblast vsázky Ω_1 lze rovnici pro vektorový potenciál upravit na tvar

$$\Delta \mathbf{A} = \mu \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.3.1)$$

zde není uvažována proudová hustota vnuceného proudu \mathbf{J}_v , neboť proud je vkládán pouze do oblasti induktoru, tj. oblasti Ω_2 . Rovnice (3.3.1) ve stejném tvaru platí i pro oblast startovacího materiálu Ω_4 a pro oblast vodivého dna Ω_5 .

Pro oblast chladícího média Ω_3 , nevodivého dna Ω_6 a okolí Ω_7 je elektrická vodivost nulová nebo je možné ji zanedbat, tzn. že dojde k dalšímu zjednodušení rovnice pro vektorový potenciál. Výsledkem je potom tvar

$$\Delta \mathbf{A} = 0 \quad (3.3.2)$$

Při řešení elektromagnetického pole je dále uvažována Dirichletova okrajová podmínka (3.1.11) na vnější hranici (půlkružnice s poloměrem 4 m) a v ose symetrie. Počáteční podmínka pro řešení elektromagnetického pole je

$$\mathbf{A}(\Omega, t = 0) = 0 \quad (3.3.3)$$

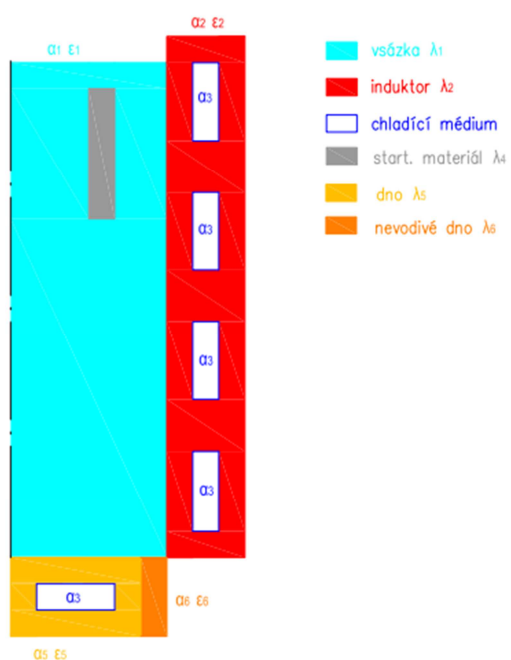
Úloha byla řešena pro následující hodnoty: frekvence napájecího zdroje $f = 1,5 \text{ MHz}$, efektivní hodnota proudu induktorem $I = 1800 \text{ A}$.

Řešení teplotního pole bylo provedeno ve všech oblastech kromě chladícího média (vody) a okolního prostředí. V ose symetrie je uvažován nulový tepelný tok přes hranici

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (3.3.4)$$

na ostatních povrchových plochách směrem do okolního prostředí je uvažována smíšená okrajová podmínka pro teplotní pole (3.2.9). Počáteční teplota byla uvažována 20 °C.

Model respektuje přestup tepla konvekcí mezi induktorem a chladicí vodou pomocí zadaného součinitele přestupu tepla α . Vzhledem k tomu, že nebylo možné zjistit parametry proudění na základě kterých by bylo možné provést přesný výpočet součinitele přestupu tepla byla hodnota tohoto parametru určena na základě obdobných aplikací počítaných na Fakultě strojní ZČU. Ochlazování induktoru je jednou z nejdůležitějších částí modelu. Intenzivní chlazení induktoru způsobuje ochlazování vsázky a vytvoření ztuhlé vrstvy (skull), která tvoří vlastní kelímek. Obdobným způsobem je uvažováno chlazení dna kelímku a konvekce z povrchu taveniny. Taktéž z povrchu celého induktoru jsou v modelu uvažovány tepelné ztráty prouděním a sáláním. Zjednodušený řez vyšetřovaným zařízením je na *Obr. 3.3.3*. Bližší informace o parametrech ovlivňujících teplotní pole jsou uvedeny v *Tab. 3.3.2* a *Tab. 3.3.3*. Teplota okolního prostředí byla uvažována 20 °C.



Povrch	$\varepsilon[-]$	$\alpha [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}]$
Vsázka	0,89	20
Induktor	0,8	20
Chlazení	-	3000
Dno	0,8	20
Nevodivé dno	0,9	20

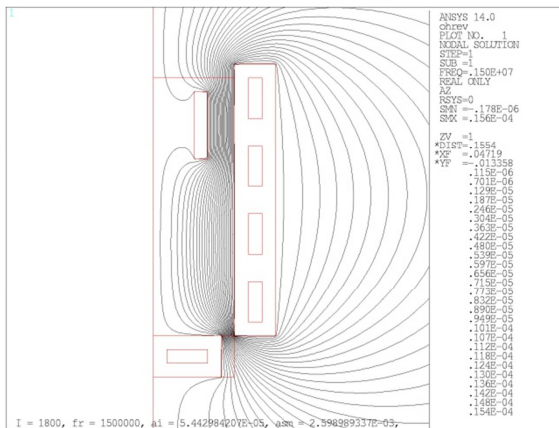
Tab. 3.3.3 Uvažované hodnoty emisivity a součinitele přestupu tepla

Obr. 3.3.3 Numerický model kompaktního kelímku - teplotní pole

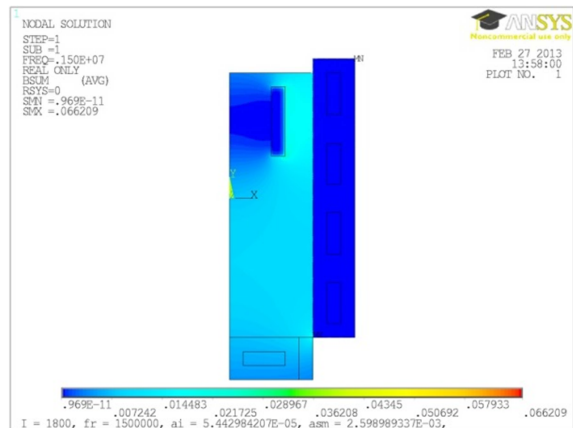
Vzhledem k tomu, že v současné době není na našem pracovišti k dispozici kompaktní provedení studeného kelímku, jsou veškeré numerické modely sestaveny na základě reálných zařízení pracujících na různých specializovaných pracovištích. Z tohoto důvodu nebylo možné výsledky matematického modelu verifikovat měřením.

3.3.1. VÝSLEDKY ŘEŠENÍ – ELEKTROMAGNETICKÉ POLE (EMP)

Rozložení siločar elektromagnetického pole v celém modelu kompaktního studeného kelímku je zobrazeno na Obr. 3.3.1.1. Dle předpokladu je magnetické pole nejsilnější v prostoru mezi induktorem a startovacím materiálem, což je patrné i z rozložení hodnot magnetické indukce v celém modelu na Obr. 3.3.1.2.



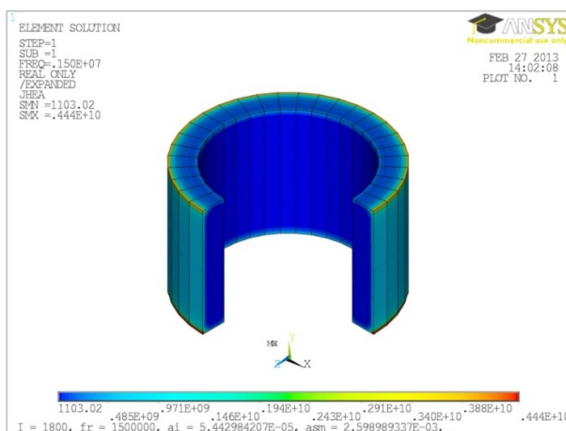
Obr. 3.3.1.1 Rozložení siločar EMP [Wb.m⁻¹]



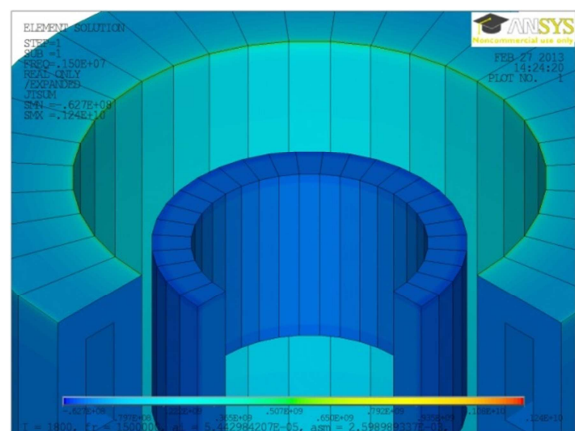
Obr. 3.3.1.2 Rozložení hodnot magnetické indukce [T]

Rozložení měrných Jouleových ztrát ve startovacím materiálu je zobrazeno na Obr. 3.3.1.3. Toto rozložení je rozhodující pro přenos tepla z induktoru do vsázky. Z průběhu jejich rozložení je zřejmé, že nejvíce tepla se přeneše do vnějšího povrchu startovacího materiálu.

Detailní pohled na rozložení proudové hustoty v induktoru a startovacím materiálu představuje Obr. 3.3.1.4. Vlivem geometrického uspořádání induktoru a umístění startovacího materiálu ve vsázce je největší proudové hustoty v oblasti induktoru dosaženo při jeho vnitřním povrchu (zejména pak v horizontální rovině se startovacím materiálem).



Obr. 3.3.1.3 Rozložení měrných Jouleových ztrát [W.m⁻³] ve startovacím materiálu (grafit)



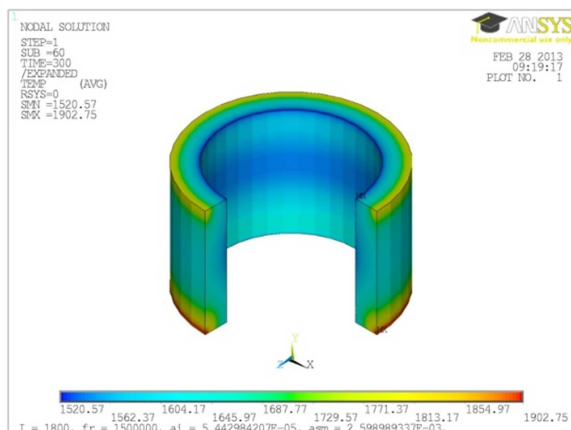
Obr. 3.3.1.4 Rozložení proudové hustoty [A.m⁻²] ve startovacím materiálu a induktoru

3.3.2. VÝSLEDKY ŘEŠENÍ – TEPLOTNÍ POLE

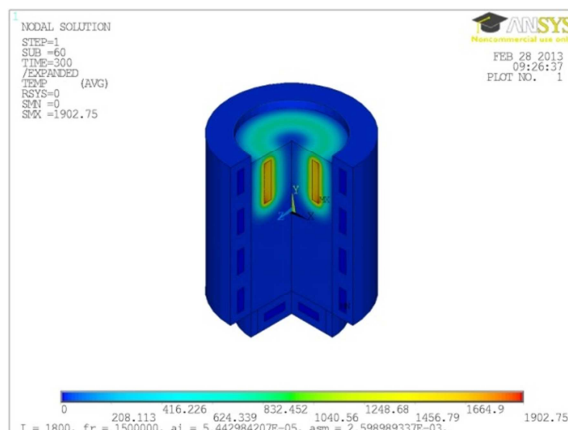
Výpočet teplotního pole vychází z výsledků analýzy EMP (z rozložení měrných Jouleových ztrát). Při výpočtu rozložení teplot je nutno respektovat proces ohřívání materiálu, proto byla provedena transientní teplotní analýza. Teplotní pole bylo vyšetřováno po dobu $t_{OH\dot{R}1} = 300$ sekund, za kterou došlo k dosažení požadované teploty v okolí startovacího materiálu. Časový krok byl vzhledem k optimalizaci výpočetního procesu zvolen 5 sekund.

Rozložení teplotního pole ve startovacím materiálu po $t_{OH\dot{R}1}$ je znázorněno na *Obr. 3.3.2.1* a je patrné, že koresponduje s rozložením měrných Jouleových ztrát uvedených v předchozím odstavci (3.3.1). Nejvyšší teploty je dosaženo při vnějším povrchu startovacího materiálu, především pak ve spodní části, neboť při povrchu vsázky dochází k ochlazování vlivem sálání a proudění.

Rozložení teplotního pole uvnitř celého modelu studeného kelímku je na *Obr. 3.3.2.2*, ze kterého je patrné šíření tepla směrem od startovacího materiálu do vsázky.



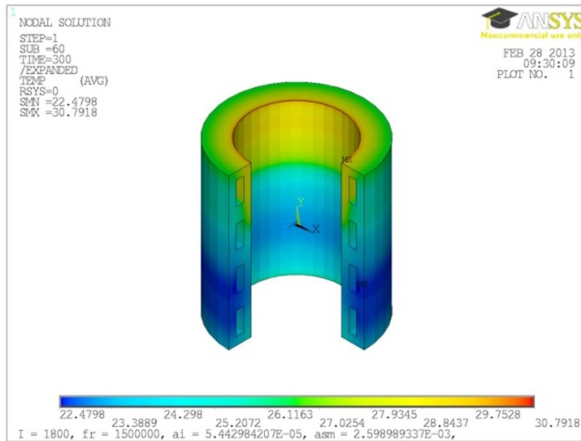
Obr. 3.3.2.1 Rozložení teplotního pole [°C] ve startovacím materiálu po $t_{OH\dot{R}1}$



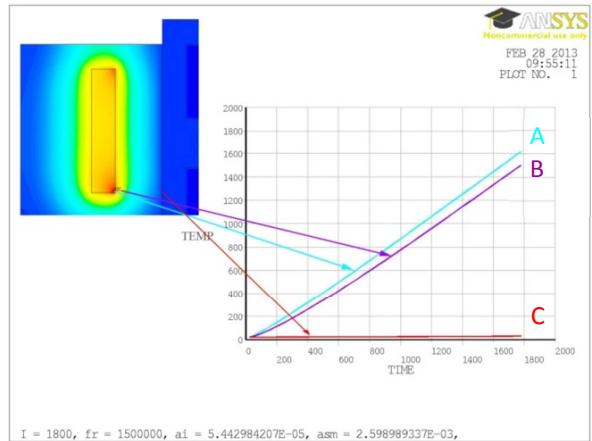
Obr. 3.3.2.2 Rozložení teplotního pole [°C] ve všech pevných částech materiálu po $t_{OH\dot{R}1}$

Rozložení teploty v induktoru je na *Obr. 3.3.2.3* a je vidět, že teplota induktoru po $t_{OH\dot{R}1}$ nevzrostla o více než 11 °C. Nejvyšší teploty je dosaženo na vnitřním povrchu induktoru (v horní části), což je způsobeno především umístěním startovacího materiálu ve vsázce. V případě, že by došlo např. k posunutí startovacího materiálu ve vertikální ose, došlo by také ke změně rozložení teplot v induktoru.

Průběh teplot ve vybraných bodech (v rozsahu od počáteční teploty do teploty tavení SiO_2 , tj. 1850 °C) představuje *Obr. 3.3.2.4*. Požadované teploty bylo dosaženo po $t_{OH\dot{R}1}$. Jako klíčové body byly vybrány body A, B, C: bod A je zvolen na rozhraní mezi vsázkou a vnějším povrchem startovacího materiálu a bod B je ve vzdálenosti 2 mm od startovacího materiálu směrem k induktoru a bod C je umístěný při vnitřním povrchu induktoru.



Obr. 3.3.2.3 Rozložení teplotního pole [°C] v induktoru po $t_{OHŘ1}$



Obr. 3.3.2.4 Průběh teplot [°C] ve vybraných bodech modelu v závislosti na čase

3.3.3. VERIFIKACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ A ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

Verifikaci výsledků lze snadno provést na základě jednoduchého analytického výpočtu respektujícího základní fyzikální procesy. V případě, že zanedbáme ochlazování startovacího materiálu do vsázky, lze použít výpočet dle rovnice (3.3.3.1). V Tab. 3.3.3.1 jsou uvedeny všechny parametry, které jsou pro analytický výpočet nezbytné. Dobu t potřebnou pro ohřev startovacího materiálu lze určit z porovnání vypočtené energie Q a tepelného výkonu P_z dodaného do startovacího materiálu.

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T = P_z t \tag{3.3.3.1}$$

(J; kg, J.kg⁻¹.K⁻¹, K)

Hodnota P_z byla získána z výsledků numerické simulace elektromagnetického pole ve startovacím materiálu (Jouleových ztrát) uvedených v kapitole 3.3.1.

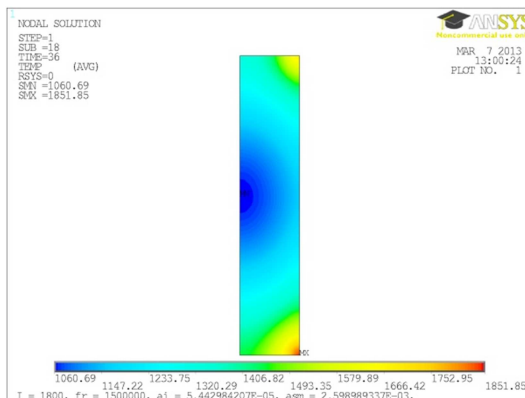
V [m ³]	ρ [kg.m ⁻³]	m [kg]	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	T_p [K]	T_k [K]	Q [J]	P_z [W]	t [s]
0,0001	2250	0,2474	710	20	1900	330231	11390	29

Tab. 3.3.3.1 Parametry ohřevu v kompaktním studeném kelímku včetně analytického výpočtu potřebné doby ohřevu

Pro porovnání analytického výpočtu s numerickým byl vytvořen upravený numerický model, ve kterém bylo zanedbáno ochlazování startovacího materiálu do okolí. Jako porovnávací parametr mezi upraveným numerickým modelem a analytickým výpočtem slouží doba ohřevu, za kterou se startovací materiál zahřeje na požadovanou teplotu při zanedbání ochlazování do okolí.

Řešení teplotního pole ve startovacím materiálu upraveného numerického modelu ukazuje Obr. 3.3.3.1. V tomto případě bylo řešení elektromagnetického pole naprosto totožné s úlohou tavení SiO₂ (identické Jouleovy ztráty ve startovacím materiálu) uvedenou v kapitole 3.3.1. V případě pole

teplotního byl uvažován pouze ohřev startovacího materiálu při zanedbání ochlazování do okolního prostředí. Na základě porovnání potřebné doby ohřevu lze konstatovat, že analytický i numerický model spolu v přijatelných mezích korespondují.



Obr. 3.3.3.1 Rozložení teplot [°C] ve startovacím materiálu bez uvažování vlivu ochlazování do okolního prostředí po 36 s

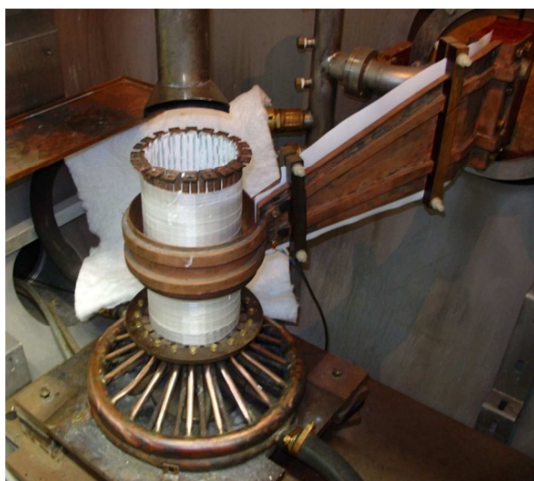
Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že navržený postup pro analýzu elektromagnetického a teplotního pole v kompaktním studeném kelímku (kapitola 3.3.1 a 3.3.2) umožňuje posoudit vliv tvaru, umístění a vlastností startovacího materiálu na proces tavení elektricky nevodivé vsázky s využitím indukčního ohřevu. Pomocí variantních výpočtů je možné navrhovat i konstrukční úpravy celého zařízení tak, aby bylo dosaženo efektivního ohřevu.

3.4. FORMULACE OKRAJOVÉ ÚLOHY STARTOVACÍ FÁZE V SEGMENTOVÉM KELÍMKU

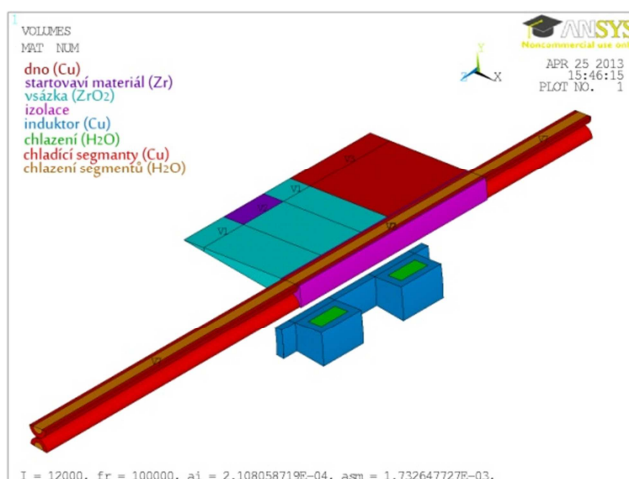
V následující části je řešena startovací fáze tavby oxidu zirkoničitého v segmentovém kelímku (teplota tavení ZrO_2 je $2715\text{ }^\circ\text{C}$). Startovacím materiálem je metalické zirkonium umístěné pod povrchem vsázky.

Segmentový kelímek se od předchozího případu liší tím, že vzhledem k rozložení intenzivně chlazených segmentů je nutno řešit úlohu v trojrozměrném uspořádání (3D úloha). Konstrukční uspořádání jednotlivých částí kelímku (Obr. 3.4.1) umožňuje jako nejmenší symetrickou část modelu vybrat úhel 9° , tím lze snížit počet elementů modelu a výpočetní dobu.

Model byl sestaven pro uspořádání reálného kelímku, který používají na univerzitě v Hannoveru (Obr. 3.4.1), na Obr. 3.4.2 je zobrazen uvažovaný výřez včetně přiřazení materiálů jednotlivým oblastem.



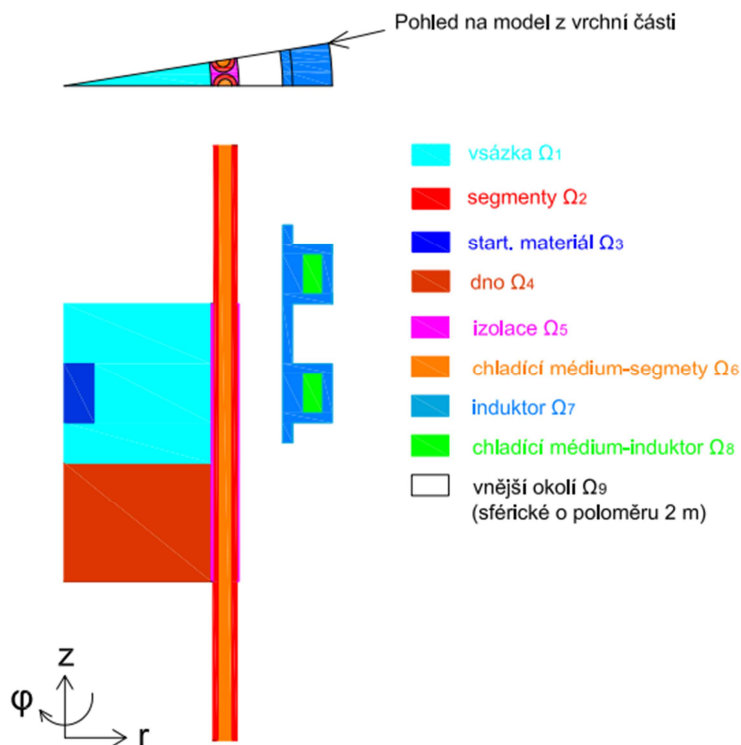
Obr. 3.4.1 Reálné zařízení na univerzitě v Hannoveru [10]



Obr. 3.4.2 Uvažovaný model studeného kelímku segmentového kelímku včetně přiřazení použitých materiálů jednotlivým oblastem

K řešení této úlohy byl stejně jako v předchozím případě použit multi-fyzikální software ANSYS. Problém je řešen jako slabě sdružená úloha, tj. nejdříve je vyřešeno elektromagnetické pole a poté tranzientní teplotní pole.

Řešená oblast Ω , pro model dle Obr. 3.4.2 je znázorněna na Obr. 3.4.3, sestává z jednotlivých podoblastí, jejichž vlastnosti jsou specifikovány v Tab. 3.4.1.



Obr. 3.4.3 Segmentový kelímek – elektromagnetické pole

Oblast	Komponent	Materiál	Uvažovaná teplota [°C]	Elektrické vlastnosti		Tepelné vlastnosti		
				μ_r [-]	ρ_e [$\Omega \cdot m$]	ρ [$kg \cdot m^{-3}$]	c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	λ [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
Ω_1	Vsázka	ZrO ₂	700	1	$1 \cdot 10^9$	5923	635	1,2
Ω_2	Segmenty	Měď	20	1	$1,7 \cdot 10^{-8}$	8960	385	400
Ω_3	Startovací materiál	Metalické zirkonium	1200	1	$1,185 \cdot 10^{-6}$	6200	300	22,6
Ω_4	Dno	Měď	20	1	$1,7 \cdot 10^{-8}$	8960	385	400
Ω_5	Izolace	Keramika	20	1	-	5923	635	12,44
Ω_6	Chlazení	Voda	20	1	-	1000	4180	-
Ω_7	Induktor	Měď	20	1	$1,7 \cdot 10^{-8}$	8960	385	400
Ω_8	Chlazení	Voda	20	1	-	1000	4180	-
Ω_9	Okolí	Vzduch	20	1	-	-	-	-

Tab. 3.4.1 Materiálové parametry [35]

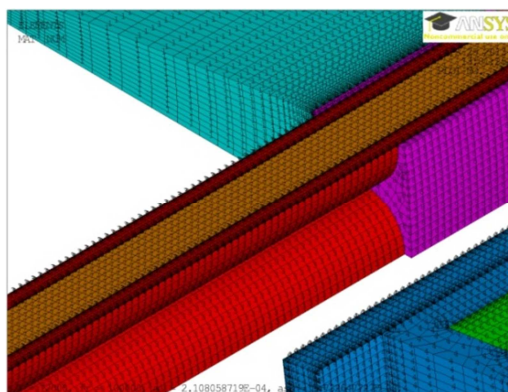
Vzhledem k tomu, že je opět splněna podmínka kvazistacionarity (3.1.6) a uvažováno lineární prostředí, je výchozí rovnice pro analýzu elektromagnetického pole ve tvaru (3.1.8).

Pro oblast vsázky Ω_1 je možné rovnici pro vektorový potenciál upravit na tvar (3.3.1), ve kterém není uvažována proudová hustota vnuceného proudu J_v , neboť vstupní proud je opět uvažován pouze v oblasti induktoru, tj. oblasti Ω_7 . Rovnice (3.3.1) ve stejném tvaru platí i pro oblast segmentů Ω_2 , startovacího materiálu Ω_3 a pro oblast vodivého dna Ω_4 .

Pro oblast izolace Ω_5 , chladicího média v segmentech Ω_6 , chladicího média v induktoru Ω_9 a pro okolní prostředí Ω_9 je možné zanedbat elektrickou vodivost, tzn. že dojde k dalšímu zjednodušení rovnice pro vektorový potenciál. Výsledkem je potom tvar (3.3.2).

Při řešení elektromagnetického pole je dále uvažována Dirichletova okrajová podmínka (3.1.11) na vnější hranici modelu (poloměr 2 m) a v ose. Počáteční podmínka pro řešení elektromagnetického pole je (3.3.3).

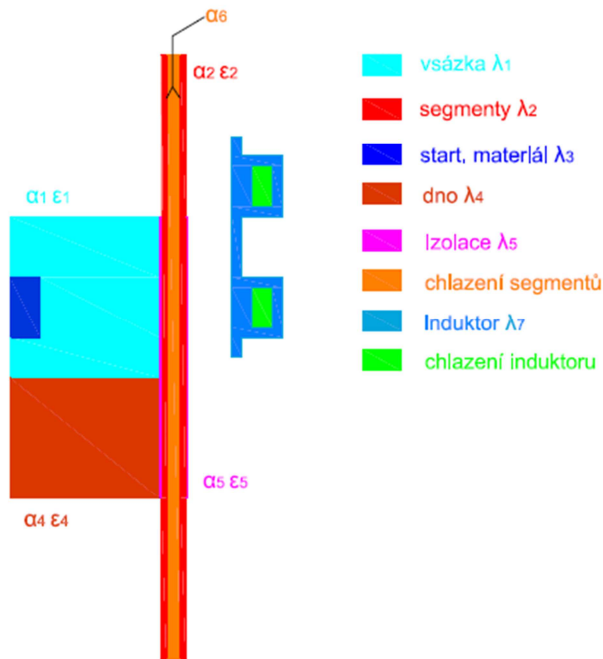
Vzhledem k poměrně geometricky složité úloze a použité frekvenci napájecího zdroje (100 kHz), je potřeba věnovat značnou pozornost diskretizaci modelu. Při volbě elementů sítě, zejména při povrchu materiálů, je nutno respektovat velmi malou hloubku vniku.



Obr. 3.4.4 Diskretizovaný model části segmentového studeného kelímku

Teplotní pole bylo řešeno v oblasti vsázky Ω_1 , chladících segmentů Ω_2 , startovacího materiálu Ω_3 , dna Ω_4 a izolace Ω_5 pomocí Fourier-Kirchhoffovy rovnice (3.2.1). Při řešení byla uvažována smíšená okrajová podmínka (3.2.9) a uvažován nulový tepelný tok na ose symetrie (3.3.4).

Vyšetřovaný model respektuje přestup tepla nucenou konvekcí mezi jednotlivými segmenty a chladící vodou pomocí zadaného součinitele přestupu tepla α . Nucená konvekce chladící vody v jednotlivých segmentech představuje stěžejní část modelu, neboť intenzivní chlazení těchto konstrukčních částí studeného kelímku umožňuje vznik ztuhlé vrstvy (skull) při povrchu vsázky (vnitřním povrchu kelímku). Jelikož se do hodnocení energetické náročnosti tavení vsázky nezahrnují tepelné ztráty v induktoru, nebylo v něm počítáno ani rozložení teplot, lze pak model pro analýzu teplotního pole zjednodušit. Jeho schéma je na Obr. 3.4.5. Bližší informace o uvažovaných parametrech ovlivňujících teplotní pole jsou uvedeny v Tab. 3.4.1 a Tab. 3.4.2. Teplota okolního prostředí byla uvažována 20 °C.



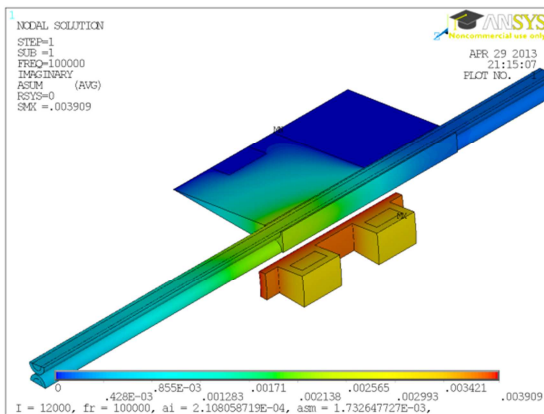
Povrch	$\epsilon[-]$	$\alpha [W.m^{-2}.K^{-1}]$
Vsázka	0,5	20
Chladicí segmenty	0,8	20
Dno	0,8	20
Izolace	0,9	20
Chlazení segmentů	-	10 000

Tab. 3.4.2 Uvažované hodnoty emisivity a součinitele přestupu tepla

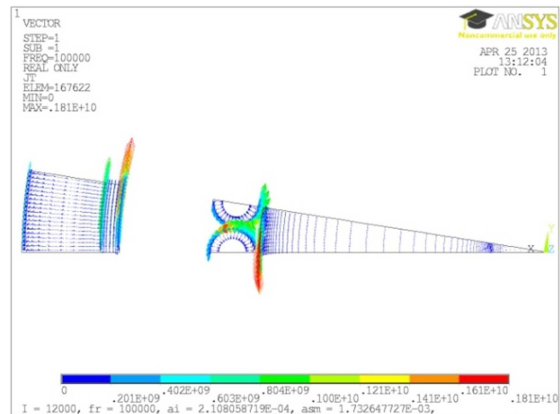
Obr. 3.4.5 Segmentový kelímek – teplotní pole

3.4.1. VÝSLEDKY ŘEŠENÍ – ELEKTROMAGNETICKÉ POLE (EMP)

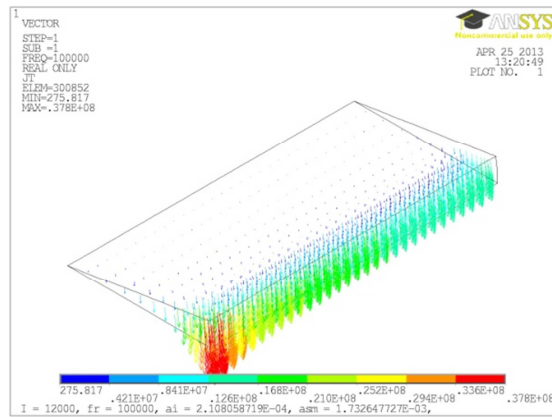
V numerické simulaci byl zvolen napájecí proud 12 kA. Rozložení vektorového potenciálu uvnitř vybraných částí modelu představuje Obr. 3.4.1.1. Rozložení proudové hustoty uvnitř modelu zobrazuje Obr. 3.4.1.2. Detailnější zobrazení rozložení proudové hustoty ve startovacím materiálu je znázorněno na Obr. 3.4.1.3. Nejvyšší proudové hustoty je dosahováno při vnějším povrchu startovacího materiálu, především v jeho horní části.



Obr. 3.4.1.1 Rozložení vektorového potenciálu $[Wb.m^{-1}]$ ve vybraných oblastech modelu



Obr. 3.4.1.2 Rozložení proudové hustoty $[A.m^{-2}]$ ve vybraných oblastech modelu

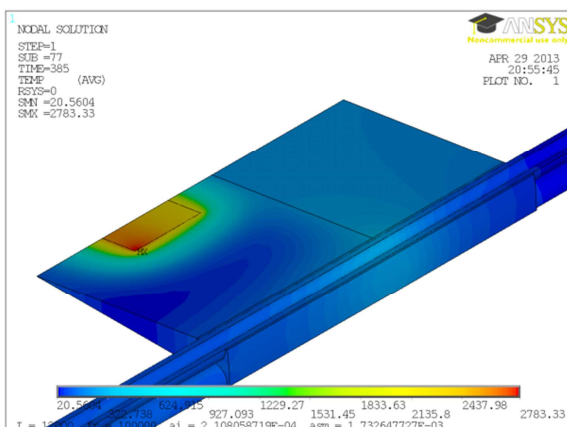


Obr. 3.4.1.3 Rozložení proudové hustoty [$A \cdot m^{-2}$] uvnitř startovacího materiálu

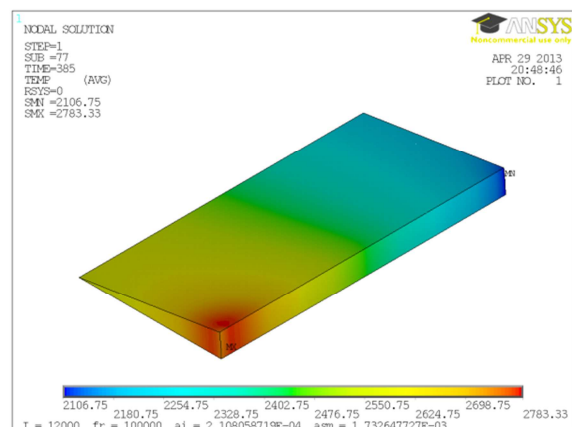
3.4.2. VÝSLEDKY ŘEŠENÍ – TEPLOTNÍ POLE

Výsledné rozložení teplotního pole je dáno rozložením měrných Jouleových ztrát v jednotlivých suboblastech modelu. Teplotní pole bylo vyšetřováno do doby, než začne docházet k tavení ZrO_2 v místě styku se startovacím materiálem. Teplota tavení ZrO_2 je $2715 \text{ } ^\circ\text{C}$. Požadované teploty bylo dosaženo po době $t_{OH\ddot{R}2} = 385$ sekund, přičemž startovací materiál ve formě metalického zirkonia byl po této době kompletně roztaven.

Rozložení teplotního pole vybraných částí modelu po době ohřevu $t_{OH\ddot{R}2}$ představuje Obr. 3.4.2.1. Z obrázku je velice dobře patrné generování tepla ve startovacím materiálu a jeho následné šíření směrem do vsázky. Rozložení teplotního pole uvnitř startovacího materiálu je zobrazeno na Obr. 3.4.2.2. Největší teploty je dosahováno na vnější straně startovacího materiálu, především však v horním rohu. Tato skutečnost pak koresponduje s rozložením proudové hustoty uvnitř startovacího materiálu při řešení EMP (Obr. 3.4.1.3).

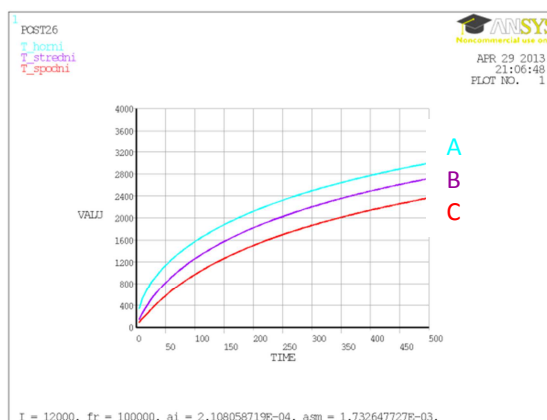


Obr. 3.4.2.1 Rozložení teplotního pole [$^\circ\text{C}$] ve vybraných částech modelu po $t_{OH\ddot{R}2}$



Obr. 3.4.2.2 Rozložení teploty [$^\circ\text{C}$] ve startovacím materiálu modelu po $t_{OH\ddot{R}2}$

K detailnějšímu prozkoumání průběhu teplot ve vybraných bodech startovacího materiálu slouží Obr. 3.4.2.3. Bod A je umístěný při horním rohu startovacího materiálu (oblast s nejvyšší teplotou), bod B je umístěn v prostřední části okraje a bod C je umístěn v dolním rohu.



Obr. 3.4.2.3 Průběh teplot [°C] ve vybraných bodech startovacího materiálu v závislosti na čase

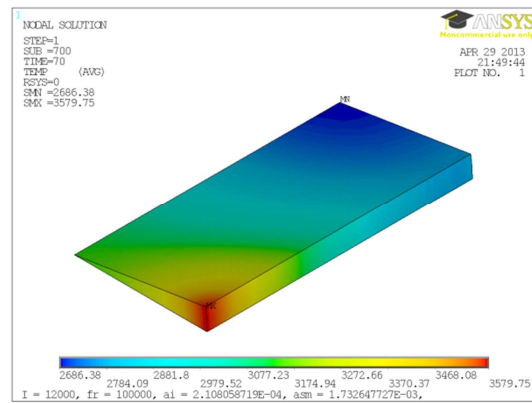
3.4.3. VERIFIKACE ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ A ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ

Přibližnou verifikaci výsledků lze analogicky provést pomocí jednoduchého analytického výpočtu užitím rovnice (3.3.3.1), kde se však zanedbá ochlazování do okolního prostředí (vedením do vsázky). Výsledkem analytického výpočtu je energie potřebná k ohřátí startovacího materiálu z počáteční teploty (teplota okolí) na teplotu požadovanou (teplota tavení vsázky). Potřebné hodnoty pro analytický výpočet jsou uvedeny v Tab. 3.4.3.1. Doba ohřevu startovacího materiálu byla určena z vypočtené energie Q a ze ztrát P_z získaných pomocí numerické simulace popsané v kapitole 3.4.1.

V [m ³]	ρ_m [kg.m ⁻³]	m [kg]	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	T_p [K]	T_k [K]	Q [J]	P_z [W]	t [s]
$2,12 \cdot 10^{-5}$	6200	0,1314	300	20	3000	118328	1680	70,4

Tab. 3.4.3.1 Parametry ohřevu v segmentovém studeném kelímku včetně analytického výsledku potřebné doby ohřevu

Pro porovnání doby ohřevu startovacího materiálu bylo zapotřebí vytvořit upravený numerický model, který zanedbává ochlazování do okolního prostředí stejně jako v případě kompaktního provedení (kapitola 3.3.3). Rozložení elektromagnetického pole je totožné s předchozí úlohou (stejně Jouleovy ztráty ve startovacím materiálu), výsledné rozložení teplotního pole ve startovacím materiálu při zanedbání vlivu ochlazování do okolního prostředí je znázorněno na Obr. 3.4.3.1. Porovnáme-li čas potřebný k ohřevu startovacího materiálu na základě analytického a numerického výpočtu, zjistíme přijatelnou shodu.



Obr. 3.4.3.1 Rozložení teplotního pole [°C] ve startovacím materiálu bez uvažování vlivu ochlazování do okolního prostředí po 70 s

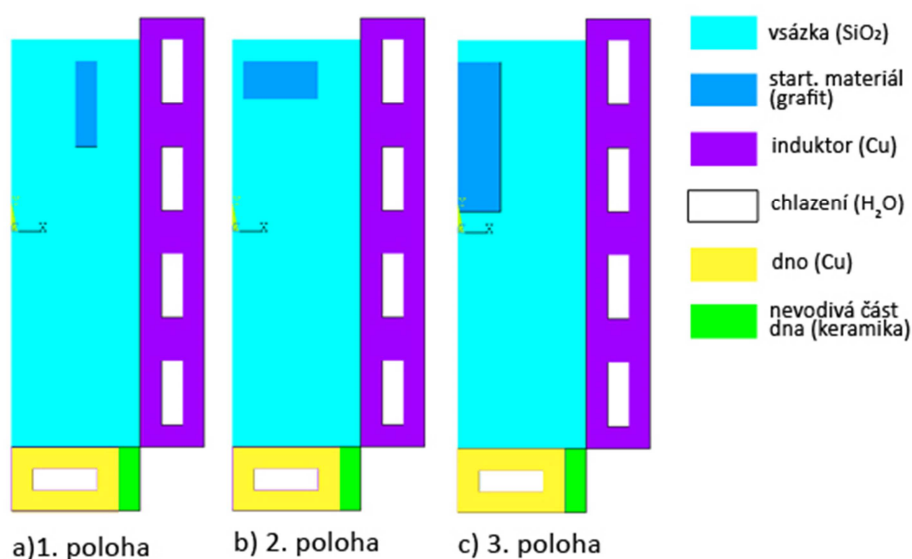
Na základě výsledků získaných v této kapitole (rozložení elektromagnetického a teplotního pole v segmentovém kelímku a výpočet potřebné doby ohřevu) lze posoudit vliv materiálových vlastností na průběh tavení materiálu. Lze proto konstatovat, že navržený model může poskytnout cenné informace pro návrh konstrukčního uspořádání studeného kelímku.

3.5. VLIV POLOHY A TVARU STARTOVACÍHO MATERIÁLU

Hlavním úkolem této podkapitoly je zjistit jak důležitou roli hraje nejen poloha, ale i tvar startovacího materiálu uvnitř vsázky. Při hledání optimální polohy startovacího materiálu uvnitř vsázky studeného kelímku je potřeba vzít v úvahu, že masivně chlazené části induktoru, tvořící tělo studeného kelímku, ovlivní i ohřev startovacího materiálu.

Stávající numerický model kompaktního studeného kelímku uvedený v kapitola 3.3 byl modifikován tak, aby bylo možno posoudit vliv polohy a tvaru startovacího materiálu na rozložení elektromagnetického pole a tím i na rozložení pole teplotního. Z tohoto důvodu byly dále analyzovány tři varianty uložení startovacího materiálu (Obr. 3.5.1).

V prvním modelu byl startovací materiál umístěn vertikálně - Obr. 3.5.1 a) , ve druhém modelu vodorovně – Obr. 3.5.1 b) a ve třetím modelu uprostřed vsázky (v ose symetrie) – Obr. 3.5.1 c). Startovací materiál byl ve všech třech případech uložen 1 cm pod povrchem vsázky. Pro porovnání výsledků, bylo zapotřebí zachovat hmotnost a objem startovacího materiálu.



Obr. 3.5.1 Uvažované pozice startovacího materiálu včetně přiřazení materiálových parametrů

Jednotlivé rozměry startovacího materiálu včetně vypočteného objemu uvádí Tab. 3.5.1 (r_1 představuje vnitřní poloměr startovacího materiálu, r_2 vnější poloměr a h výšku startovacího materiálu).

	r_1 [m]	r_2 [m]	h [m]	V [m ³]
1.poloha	0,03	0,04	0,04	$8,79 \cdot 10^{-5}$
2.poloha	0,005	0,04	0,02	$8,79 \cdot 10^{-5}$
3.poloha	0	0,02	0,07	$8,79 \cdot 10^{-5}$

Tab. 3.5.1 Rozměry uvažovaných startovacích materiálů

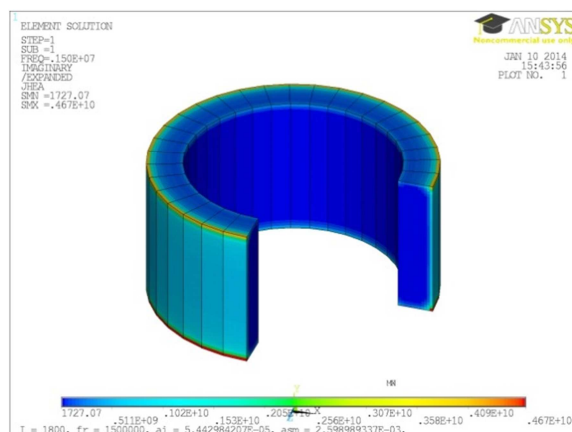
3.5.1. POROVNÁNÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

Jako základní parametry pro porovnání výsledků byly zvoleny tepelné ztráty ve startovacím materiálu P_z , tj. výkon přenesený do startovacího materiálu a maximální teplota T_M dosažená za dobu ohřevu $t_{OHŘ} = 300$ sekund (při výpočtu byl uvažován časový krok 5 s). Získané výsledky jsou uvedeny v *Tab. 3.5.1.1*. Z výpočtu ztrát ve startovacím materiálu P_z je patrné, že největší výkon se přenesl v uspořádání dle *Obr. 3.5.1.1*, nejmenší výkon naopak v uspořádání dle *Obr. 3.5.1.3*. Z hlediska dosažené teploty je však nevhodnější uspořádání dle *Obr. 3.5.1.2*, což je však v rozporu s dosud používaným umístěním startovacího materiálu (viz modely v kap. 3.3 a 3.4).

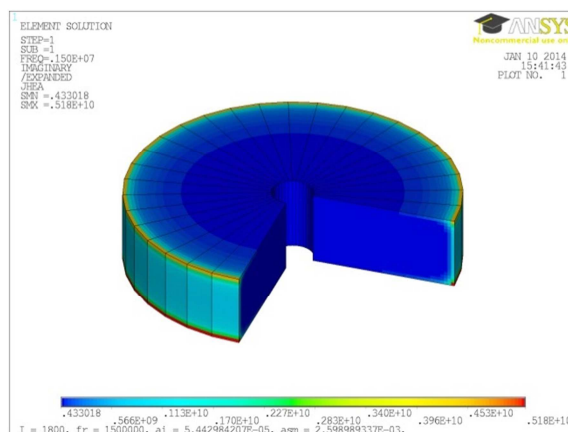
	P_z [W]	T_M [°C]
1. poloha	10568	2013
2. poloha	8302	2247
3. poloha	3473	1216

Tab. 3.5.1.1 Získané výsledky – ztráty a max. teplota

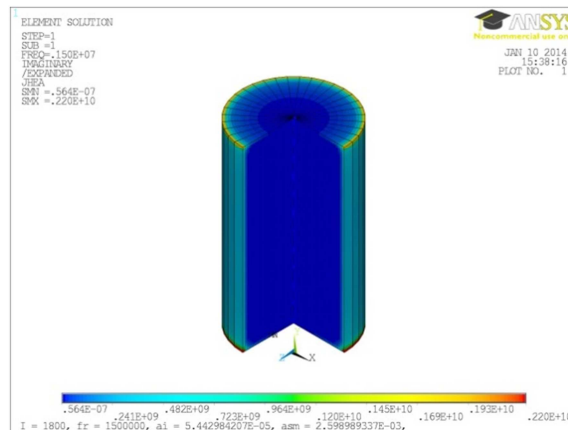
Rozložení měrných Jouleových ztrát uvnitř startovacího materiálu je uvedeno na *Obr. 3.5.1.1*, *Obr. 3.5.1.2* a *Obr. 3.5.1.3*.



Obr. 3.5.1.1 Rozložení měrných Jouleových ztrát [W.m⁻³] uvnitř startovacího materiálu (1. poloha)

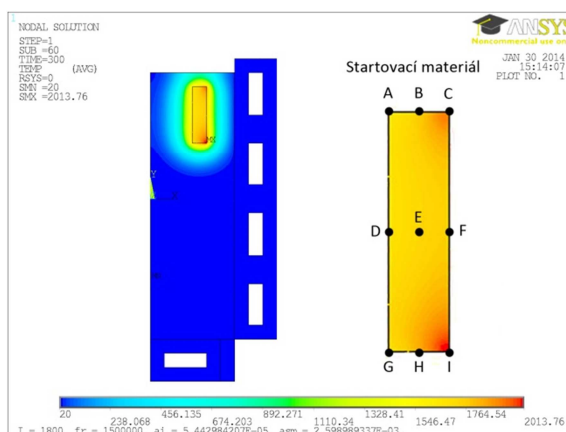


Obr. 3.5.1.2 Rozložení měrných Jouleových ztrát [W.m⁻³] uvnitř startovacího materiálu (2. poloha)

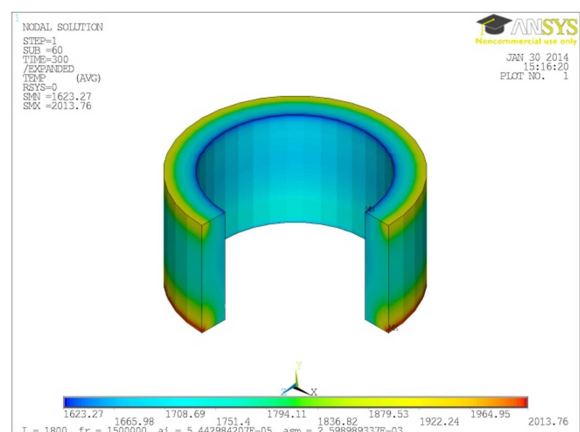


Obr. 3.5.1.3 Rozložení měrných Jouleových ztrát [$W \cdot m^{-3}$] uvnitř startovacího materiálu (3.poloha)

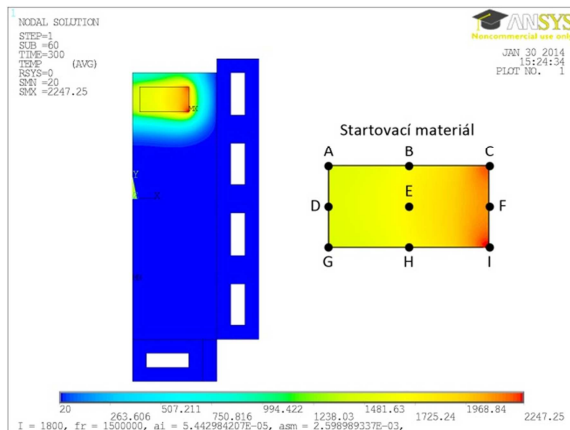
Rozložení teplotního pole uvnitř celého modelu pro jednotlivá umístění startovacího materiálu včetně vyznačených měřicích bodů představuje Obr. 3.5.1.4, Obr. 3.5.1.6 a Obr. 3.5.1.8. Rozložení teplotního pole uvnitř startovacího materiálu je znázorněno na Obr. 3.5.1.5, Obr. 3.5.1.7 a Obr. 3.5.1.9.



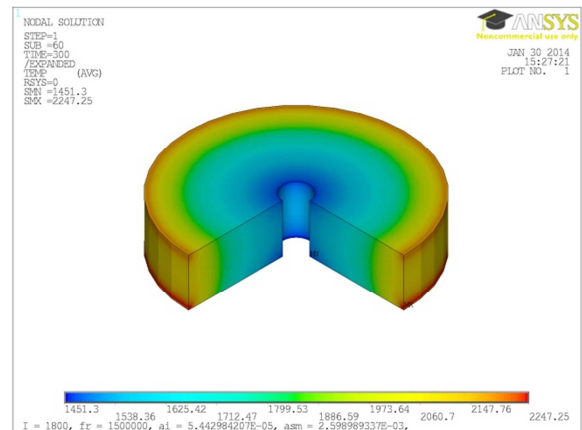
Obr. 3.5.1.4 Rozložení teplotního pole [$^{\circ}C$] v celém modelu (1.poloha)



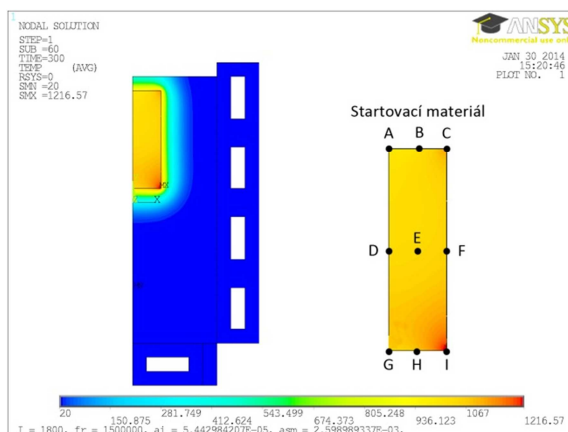
Obr. 3.5.1.5 Rozložení teplotního pole [$^{\circ}C$] ve startovacím materiálu (1.poloha)



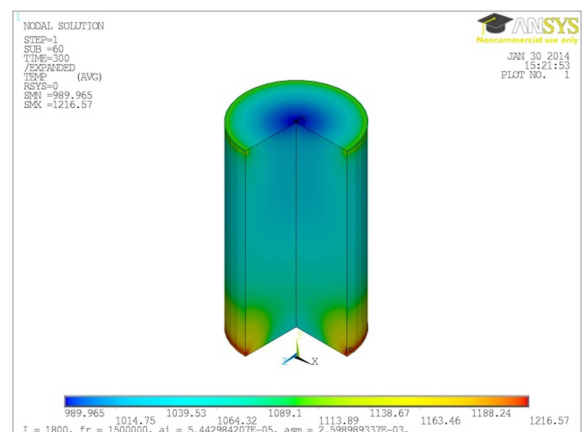
Obr. 3.5.1.6 Rozložení teplotního pole [°C] v celém modelu (2.poloha)



Obr. 3.5.1.7 Rozložení teplotního pole [°C] ve startovacím materiálu (2.poloha)

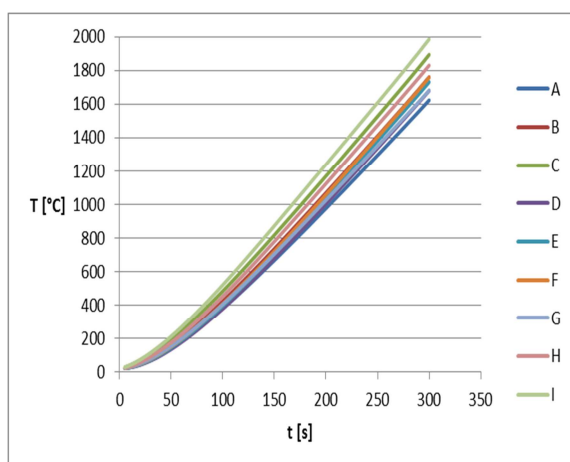


Obr. 3.5.1.8 Rozložení teplotního pole [°C] v celém modelu (3.poloha)

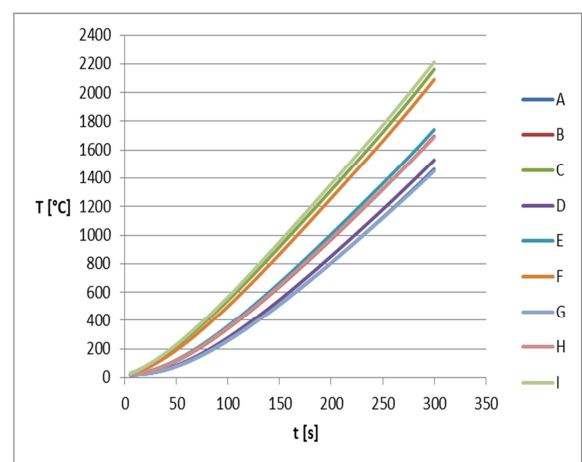


Obr. 3.5.1.9 Rozložení teplotního pole [°C] ve startovacím materiálu (3.poloha)

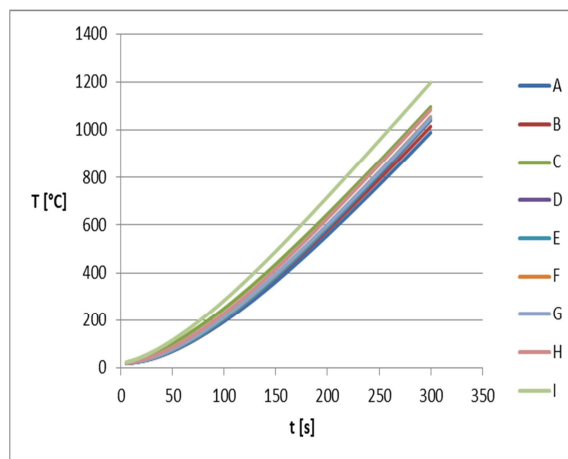
Průběh teplot ve startovacím materiálu ve vybraných bodech (A-I) je uveden na Obr. 3.5.1.10, Obr. 3.5.1.11 a Obr. 3.5.1.12.



Obr. 3.5.1.10 Průběh teplot [°C] ve vybraných bodech (1.poloha)



Obr. 3.5.1.11 Průběh teplot [°C] ve vybraných bodech (2.poloha)



Obr. 3.5.1.12 Průběh teplot [°C] ve vybraných bodech (3. poloha)

Zhodnocení výsledků

Obecně u indukčních ohřevů platí, že čím blíže je ohříváný materiál k induktoru, tím lépe (rychleji) se ohřívá. Pokud je však stěna kelímku masivně chlazená, vznikají uvnitř startovacího materiálu stále větší Jouleovy ztráty při jeho přibližování k induktoru, ale v důsledku silného chlazení kelímku se teplota startovacího materiálu bude snižovat. V případě studeného kelímku proto obecně platí, že čím blíže je startovací materiál k induktoru (a tedy i k chlazeným segmentům), tím větší v něm budou vznikat Jouleovy ztráty. To však neznamená, že se v této pozici bude také lépe ohřívát. Naopak některé simulace ukazují, že vyšší teploty je dosaženo při vzdálenější pozici, při které ve startovacím materiálu vznikají nižší Jouleovy ztráty.

Ve všech případech bylo ohříváné těleso (startovací materiál) stejného objemu. Třetí varianta uvažuje startovací materiál v podobě válce ve středu (v ose) studeného kelímku, v tomto případě je však vzdálenost od induktoru značná a má za následek nízké Jouleovy ztráty ve startovacím materiálu a tedy i nižší výslednou teplotu. V první variantě je uvažován startovací materiál ve formě prstence v blízkosti induktoru, toto umístění má za následek výskyt nejvyšších Jouleových ztrát ze všech variant, avšak blízkost chlazených segmentů má za následek nižší maximální teplotu startovacího materiálu oproti druhé variantě. V případě druhé varianty je startovací materiál ve tvaru prstence umístěn od induktoru dále, což má za následek vznik nižších Jouleových ztrát než u předchozí varianty, ale větší vzdálenost prstence startovacího materiálu od chlazených segmentů má za následek jeho vyšší teplotu. Pro stanovení ideální polohy startovacího materiálu je proto vždy nutné řešit elektromagnetické i teplotní pole a nelze se spolehnout jen na velikost Jouleových ztrát.

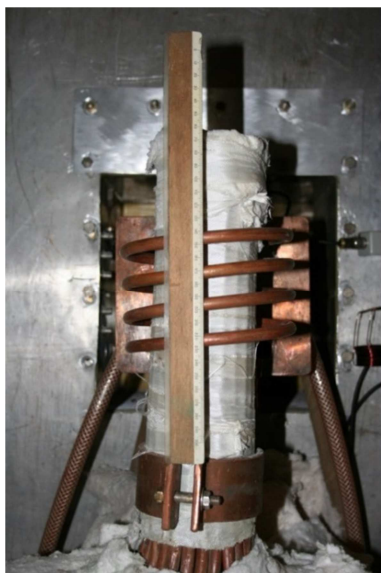
4. SEGMENTOVÝ STUDENÝ KELÍMEK – VLIV KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ

Uvedená kapitola zhodnocuje vliv jednotlivých konstrukčních částí segmentového studeného kelímku. Úvodní část je věnována vlivu tvaru elementu studeného kelímku (různé tvary průřezů elementu) a porovnání počtu elementů obdélníkového průřezu na rozložení ztrát (výkonů) v jednotlivých částech indukčního systému. Další část je věnována vytvořenému měřicímu systému. Na základě měření na vytvořených vzorcích studeného kelímku je pak objasněn vliv jednotlivých konstrukčních částí (pro kruhový průřez elementu) na rozložení ztrát a účinnost indukčního systému.

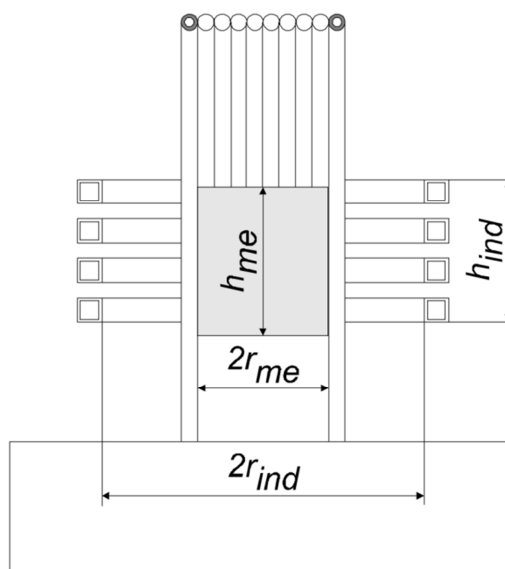
4.1. VLIV TVARU ELEMENTU STUDENÉHO KELÍMKU

Podkapitola zhodnocuje vliv tvaru elementu rozdílného průřezu s ohledem na ztráty, které jsou v těchto elementech generovány. Na základě Jouleových ztrát generovaných v elementech je potom možné stanovit jaké konstrukční uspořádání je z hlediska rozložení ztrát nejvhodnější.

Jak již bylo dříve zmíněno, segmentový studený kelímek se sestává z induktoru, jednotlivých elementů, dna a vsázky. Při řešení byl uvažován čtyř-závitový induktor konstruovaný dle reálného zařízení pracujícího na univerzitě v Petrohradu *Obr. 4.1.1* a *Obr. 4.1.2*. Základní rozměry reálného zařízení jsou uvedeny v *Tab. 4.1.1*.



Obr. 4.1.1 Ukázka reálného zařízení [20]

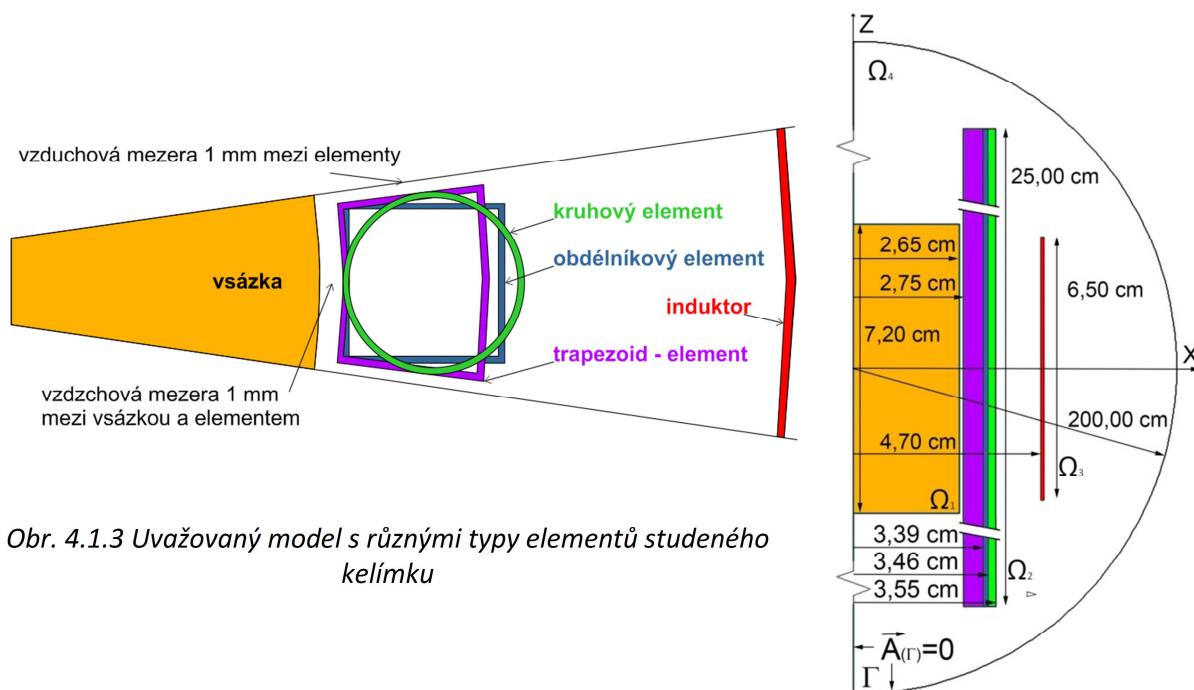


Obr. 4.1.2 Schéma kelímku [20]

Popis	Označení	Rozměr [cm]
Výška vsázky	h_{me}	7,2
Poloměr vsázky	r_{me}	2,65
Výška induktoru	h_{ind}	6,50
Poloměr induktoru	r_{ind}	4,70

Tab. 4.1.1 Základní rozměry uvažovaného zařízení

Pro porovnání byly vybrány tři nejběžnější typy elementů: trubice (kruhový průřez), element čtvercového průřezu a element o průřezu ve tvaru trapezoidu tak, aby byl zachován identický objem. Vliv dna a spojovací bandáže byl zanedbán. Vsázka byla uvažována ve formě roztaveného titanu. Model s uvažovanými typy elementů, který zobrazuje nejmenší symetrický výřez ($360/22$)°, je uveden na Obr. 4.1.3. Vzhledem ke geometrickému uspořádání bylo nezbytné řešit úlohu ve 3D. K provedení simulace byl opět použit software ANSYS (APDL).



Obr. 4.1.3 Uvažovaný model s různými typy elementů studeného kelímku

Obr. 4.1.4 Rozměry uvažovaného modelu

Materiálové parametry jednotlivých konstrukčních prvků, vstupní parametry a vybrané rozměry modelu studeného kelímku jsou uvedeny v Tab. 4.1.2. V průběhu řešení elektromagnetického pole materiálové parametry zůstaly stejné (byl uvažován ustálený stav). Detailní rozměry uvažovaného modelu studeného kelímku jsou uvedeny na Obr. 4.1.4.

Konstrukční část	V [cm ³]	h [cm]	f [kHz]	I [A]	γ [S.m]
Kruhový průřez elementu	12,5	25	10	-	$5,70 \cdot 10^7$
Čtvercový průřez elementu	12,5	25		-	$5,70 \cdot 10^7$
Trapezoid. průřez elementu	12,48	25		-	$5,70 \cdot 10^7$
Induktor	1,78	6,5		4x1000	$5,70 \cdot 10^7$
Vsázka	6,24	7,2		-	$2,38 \cdot 10^6$

Tab. 4.1.2 Nejdůležitější parametry [35]

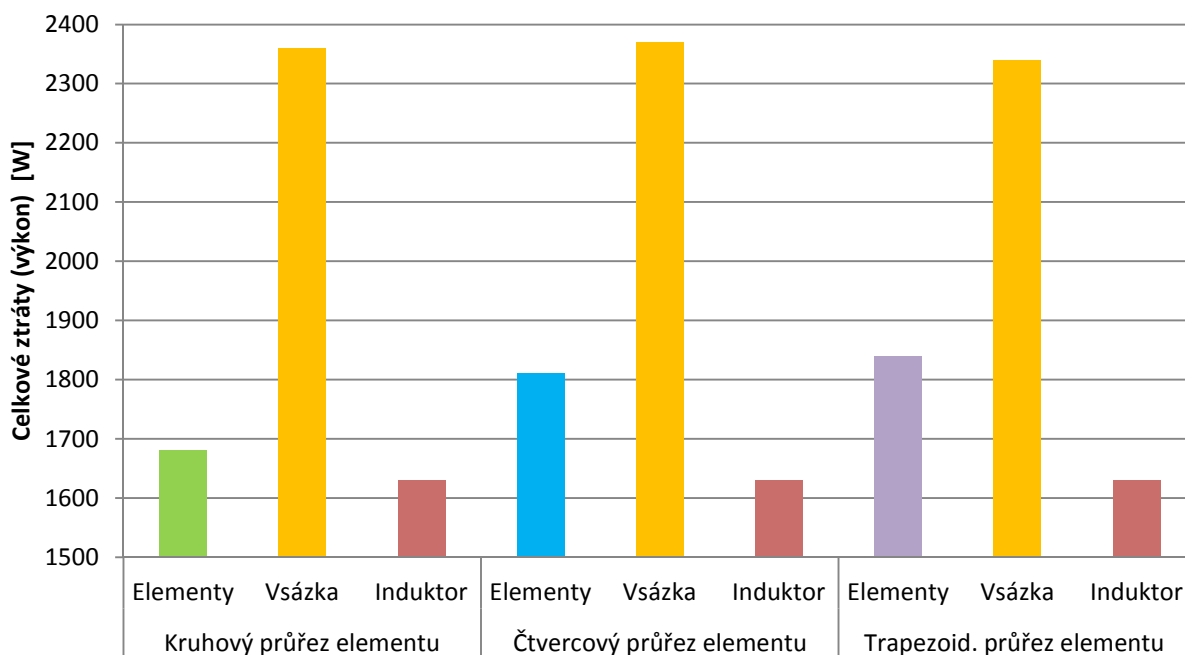
Při řešení elektromagnetického pole bylo uvažováno obdobné nastavení okrajových podmínek, jako v kapitole 3.4. Protože není řešeno rozložení teplotního pole, tak byla provedena určitá zjednodušení. Reálný induktor byl nahrazen tenkou vrstvičkou odpovídající trojnásobku hloubky vniku. Vsázka je uvažována ve formě roztaveného titanu (odpadá náročný proces startovací fáze).

Porovnání Jouleových ztrát v celém modelu pro každý průřez elementu je uvedeno v *Tab. 4.1.3*. Z výsledků je patrné, že nejmenších Jouleových ztrát bylo dosaženo v elementech kruhového průřezu. Naopak nejvyšších Jouleových ztrát bylo dosaženo u elementu o průřezu ve tvaru trapezoidu. V případě elementů a induktoru hovoříme o ztrátách. Naopak v případě vsázky se jedná o užitečný výkon.

Typ elementu	Konstrukční část	Ztráty (výkon) [W] v celém modelu ^o
Kruhový průřez elementu	Elementy	1680
	Vsázka	2360
	Induktor	1630
Čtvercový průřez elementu	Elementy	1810
	Vsázka	2370
	Induktor	1630
Trapezoid. průřez elementu	Elementy	1840
	Vsázka	2340
	Induktor	1630

Tab. 4.1.3 Výsledky ztrát (výkonů) pro různá konstrukční uspořádání

Rozložení ztrát (výkonů) v jednotlivých konstrukčních částech studeného kelímku je uvedeno na *Obr. 4.1.5*.



Obr. 4.1.5 Rozložení ztrát v jednotlivých částech studeného kelímku

Zhodnocení výsledků

Výsledky numerických simulací ukazují, že tvar elementů studeného kelímku má vliv na Jouleovy ztráty, které jsou v nich generovány. V případě čtvercového průřezu elementu jsou Jouleovy ztráty, které jsou v něm generovány přibližně o 8 % vyšší než v případě elementu kruhového průřezu. Výkon přenesený do vsázky je o něco vyšší, což může být způsobeno větším prostorem mezi jednotlivými elementy. Samozřejmě je nutné brát v potaz i numerickou chybu. Jako nejméně efektivní vyšel element ve tvaru trapezoidu, ve kterém jsou generovány nejvyšší Jouleovy ztráty (přibližně o 9 % vyšší v porovnání s variantou s kruhovým průřezem elementu). Ztráty v induktoru a užitečný výkon přenesený do vsázky jsou téměř konstantní

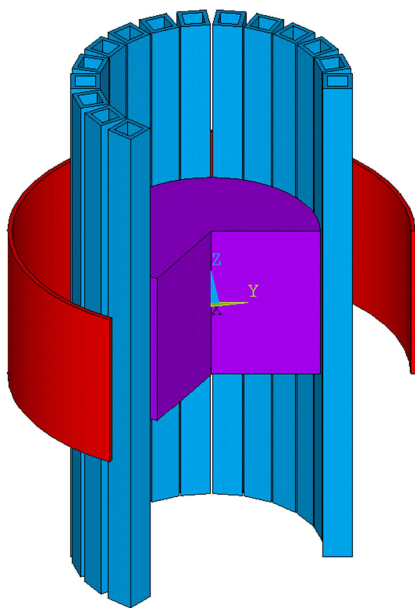
Z výše zmíněných důvodů bych doporučoval používat elementy kruhového průřezu. Duté měděné trubičky jsou poměrně běžně dostupné a dobře se s nimi pracuje při výrobě studeného kelímku.

V určitých případech však není možné z konstrukčních důvodů studený kelímek vytvořit z elementů kruhového průřezu a je nutné použít jiné konstrukční uspořádání. Problém nastává například při výrobě malého experimentálního zařízení, kde není možné trubičky dobře seskládat při velice malém poloměru. Tento problém řeší mnou vytvořený funkční vzorek frézovaného studeného kelímku, který umožňuje velice dobře dodržet mezery mezi jednotlivými segmenty i při velice malých rozměrech. Postup výroby je ale velice náročný a vyžaduje velkou zručnost. Ukázka vyrobených studených kelímků je uvedena v kapitole 6.

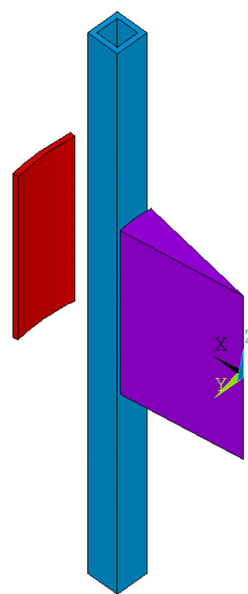
4.2. VLIV POČTU ELEMENTŮ OBDÉLNÍKOVÉHO PRŮŘEZU NA ÚČINNOST INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ

Jak již bylo dříve zmíněno, občas je nezbytné použít k výrobě studeného kelímku elementy obdélníkového průřezu. Jedná se zejména o aplikace, kde je zapotřebí docílit větších průměrů studeného kelímku. Použitím elementů obdélníkového průřezu potom může dojít ke zmenšení vzdálenosti mezi induktorem a vsázkou.

Úkolem této části práce je porovnat rozdílná konstrukční uspořádání segmentového studeného kelímku zhotoveného z různého počtu obdélníkových elementů. Celkové geometrické rozvržení uvažovaného modelu studeného kelímku je uvedeno na *Obr. 4.2.1*. Nejmenší symetrická část modelu studeného kelímku $360^\circ/n$, kde n představuje počet obdélníkových elementů, je na *Obr. 4.2.2*. Díky tomuto uspořádání je opět nutné úlohu řešit ve 3D. Celkový pohled na danou geometrii a okrajové podmínky je uveden na *Obr. 4.2.3*. Materiálové parametry, proud a frekvence použité při simulaci jsou uvedeny v *Tab. 4.2.1*.



Obr. 4.2.1 Geometrické rozvržení modelu



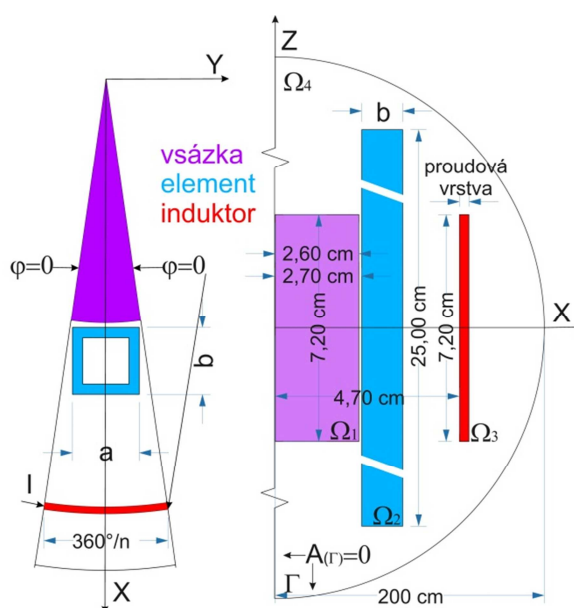
Obr. 4.2.2 Nejmenší symetrická část modelu

Výška elementu (rozměr **b**) zůstala zachována ve všech případech konstantní. Šířka elementu (rozměr **a**) se měnila. Celkem studie uvažuje 7 různých rozměrů obdélníkového elementu. Vsázka je uvažována ve formě roztaveného oxidu hlinitého (Al_2O_3). Proud induktorem je 1 kA s pracovní frekvencí zdroje 1 MHz. Numerická simulace je provedena stejně jako v předchozím případě pro ustálený stav. Uvedená konfigurace je vhodná pro tavení Al_2O_3 nebo ZrO_2 . Na základě ztrát v segmentech a vsázce je možné určit nejefektivnější počet obdélníkových elementů. Vliv dna

a spojovací bandáže byl v tomto případě zanedbán. Reálný induktor byl stejně jako v předchozím případě nahrazen proudovou vrstvou odpovídající tloušťce trojnásobku hloubky vniku.

Konstrukční část	Materiál	Elektrické parametry		Nastavení	
		μ_r [-]	ρ_e [$\Omega \cdot m$]	I [kA]	f [MHz]
Induktor	Měď	1	$1,75 \cdot 10^{-8}$	1	1
Vsázka	Al_2O_3	1	$1 \cdot 10^{-3}$	-	-
Segment/element	Měď	1	$1,75 \cdot 10^{-8}$	-	-

Tab. 4.2.1 Parametry použité v numerickém modelu



Obr. 4.2.3 Geometrické uspořádání vč. vyznačených okrajových podmínek

Pro nalezení optimálního počtu obdélníkových elementů je nutné porovnat ztráty v induktoru, elementech studeného kelímku a výkon přenesený do vsázky. Úkolem je docílit co nejmenších ztrát v elementech studeného kelímku při přenesení maximálního výkonu do vsázky. Numerické simulace byly provedeny celkem pro 7 variant. Varianta pro 64 elementů v uvedené konfiguraci je zmíněna pouze z důvodu zjištění průběhu (trendu) a v technické praxi není z důvodu nedostatečného chlazení jednotlivých elementů použitelná. Uvažované rozměry jsou uvedeny v Tab. 4.2.2.

Elementy [ks]	b [cm]	a [cm]	S [cm ²]
12	0,9	1,39	1,255
16	0,9	1,02	0,920
20	0,9	0,8	0,724
24	0,9	0,66	0,594
28	0,9	0,55	0,502
32	0,9	0,48	0,433
64	0,9	0,21	0,193

Tab. 4.2.2 Uvažované rozměry obdélníkových elementů

Výsledky pro celý model studeného kelímku získané na základě numerických simulací jsou uvedeny v Tab. 4.2.3. Je zde uvedeno celkové rozložení ztrát v induktoru a elementech studeného kelímku včetně výkonu přeneseného do vsázky a účinností pro jednotlivá konstrukční uspořádání. Účinnost je vypočítána na základě rovnice (4.2.1), kde P_v představuje užitečný výkon přenesený do vsázky, P_t ztráty v elementech (trubicích) studeného kelímku a P_i ztráty v induktoru. Uvažovaná účinnost indukčního systému nezahrnuje ztráty v generátoru, kondenzátorové baterii a transformátoru.

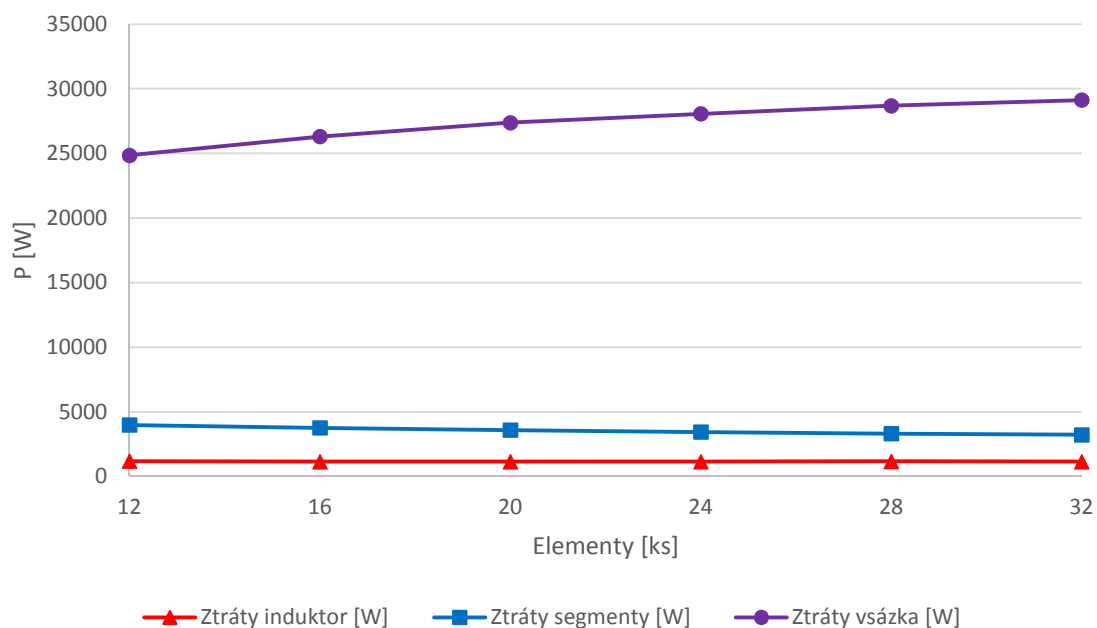
$$\eta = \frac{P_v}{P_t + P_i + P_v} \quad (4.2.1)$$

(-; W, W, W, W)

Elementy [ks]	P_i [W]	P_t [W]	P_v [W]	η [-]
12	1175	3977	24858	0,828
16	1143	3757	26305	0,843
20	1139	3579	27377	0,853
24	1139	3433	28057	0,860
28	1146	3307	28690	0,865
32	1147	3221	29124	0,870
64	1154	3263	30854	0,875

Tab. 4.2.3 Ztráty a účinnost pro jednotlivá konstrukční uspořádání

Rozložení ztrát v induktoru a elementech včetně užitečného výkonu přeneseného vsázky v závislosti na počtu elementů obdélníkového průřezu je uvedeno na Obr. 4.2.4.

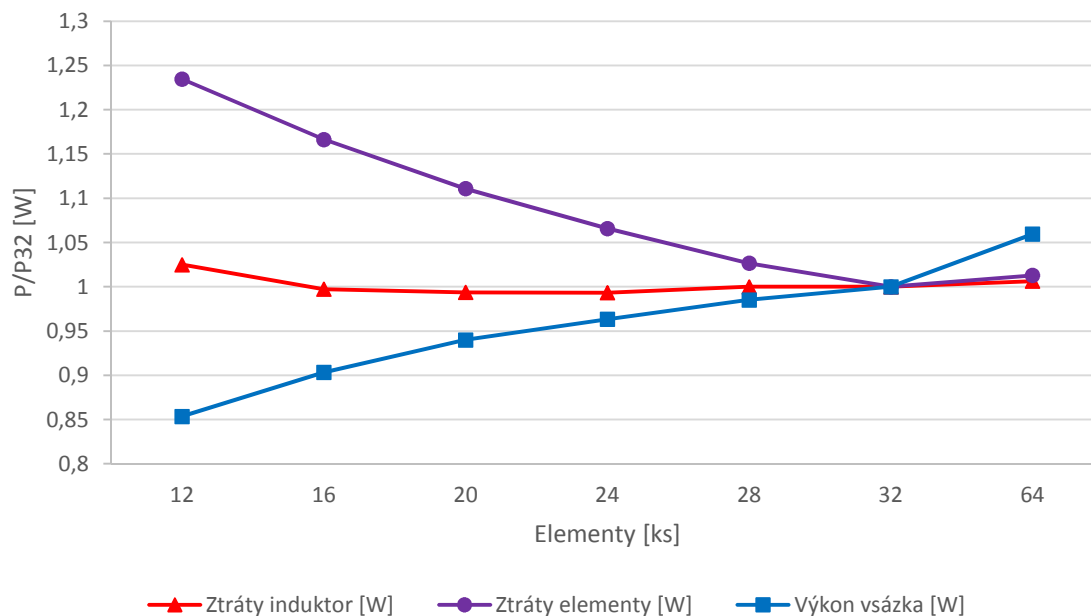


Obr. 4.2.4 Rozložení ztrát v jednotlivých konstrukčních částech

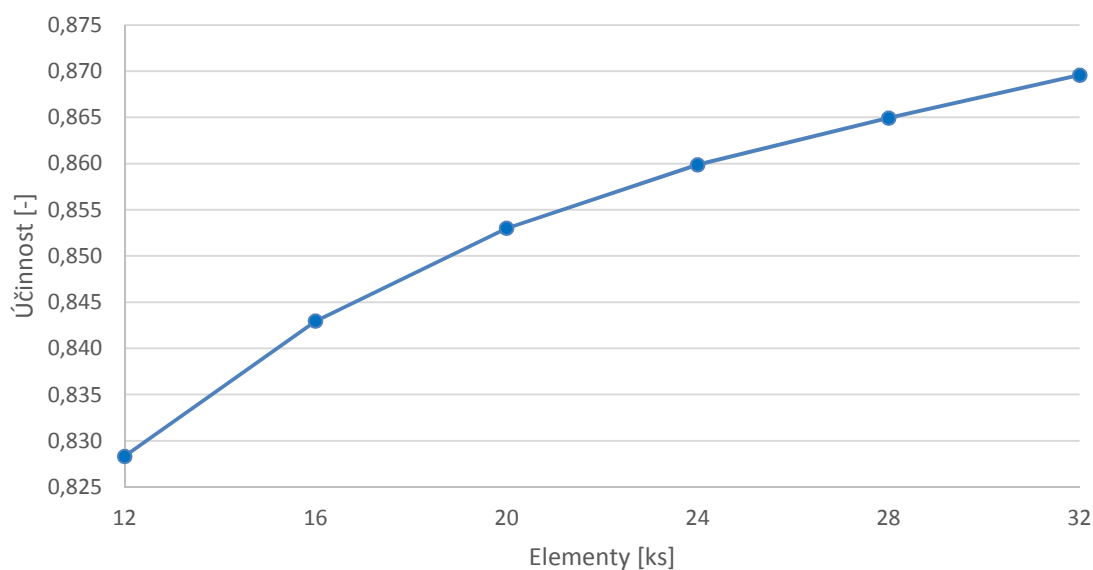
V Tab. 4.2.4. jsou uvedeny ztráty (výkon) v jednotlivých částech systému jako poměrná hodnota. Jako referenční byla vybrána varianta s 32 elementy. Rozložení ztrát (výkonů) jako poměrná hodnota P/P_{32} v závislosti na počtu elementů je uvedeno na Obr. 4.2.5. Účinnost systému v závislosti na počtu elementů je potom znázorněna na Obr. 4.2.6.

Elementy [ks]	Ztráty induktor P/P_{32} [-]	Ztráty elementy P/P_{32} [-]	Výkon vsázka P/P_{32} [-]
12	1,03	1,23	0,85
16	1,00	1,17	0,90
20	0,99	1,11	0,94
24	0,99	1,07	0,96
28	1,00	1,03	0,99
32	1,00	1,00	1,00
64	1,01	1,01	1,06

Tab. 4.2.4 Rozložení ztrát pro jednotlivá konstrukční uspořádání jako poměrná hodnota (P/P_{32})



Obr. 4.2.5 Rozložení ztrát pro jednotlivá konstrukční uspořádání jako poměrová hodnota (P/P_{32})



Obr. 4.2.6 Účinnost indukčního systému

Zhodnocení výsledků

Výsledky numerických simulací ukazují, že ztráty v induktoru budou pro jednotlivá konstrukční uspořádání téměř konstantní. Naopak ztráty v segmentech studeného kelímku budou klesat s rostoucím počtem obdélníkových elementů. Ztráty ve vsázce (užitečný přenesený výkon) budou narůstat s rostoucím počtem obdélníkových elementů. Výše zmíněnou závislost lze předpokládat pro zařízení s podobnými rozměry a vstupními parametry.

Z uvažovaných variant je optimální varianta se 32 trubicemi. Varianta se 64 elementy byla uvažována pouze z teoretického hlediska, neboť z technologického hlediska není prakticky možné použít více než 32 obdélníkových elementů při uvažovaných rozměrech studeného kelímku (je nutné dodržet minimální doporučenou tloušťku stěny trubice a zachovat dostatečný průtok chladicí vody).

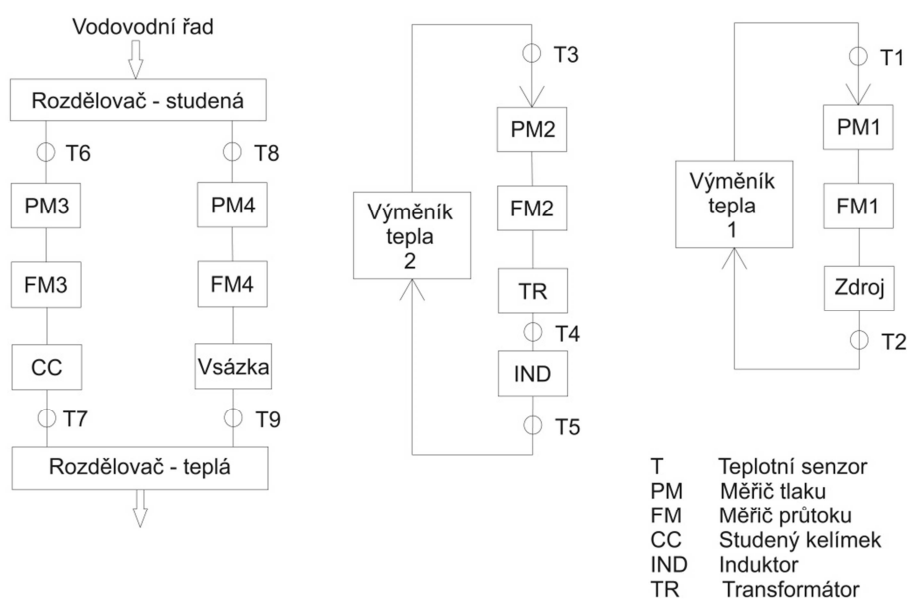
4.3. POKROČILÉ MĚŘENÍ PRO ANALÝZU A SBĚR DAT ZE STUDENÉHO KELÍMKU

Cílem této části dizertační práce je představit vytvořený systém pro měření elektrických a neelektrických parametrů indukčních systémů s hlavním zaměřením na studený kelímek. Výsledky získané na základě měření slouží k porovnání s numerickými simulacemi. Následně je možné provést úpravy indukčních zařízení tak, aby bylo dosahováno vyšší účinnosti systému. Jádro měřicího systému je tvořeno komponenty od společnosti National Instruments (CompactRIO a příslušné měřicí karty) v kombinaci se software LabVIEW. [28, 31]

Sestavený indukční systém se sestává z frekvenčního zdroje Peartec, kondenzátorové (kompenzační) baterie, transformátoru a induktoru. Zdroj je připojen k třífázové síti 3x400V AC. Vstup do zdroje je měřen pomocí průmyslového analyzátoru sítě IME NEMO96HD přes měřicí transformátory proudu 50/5.

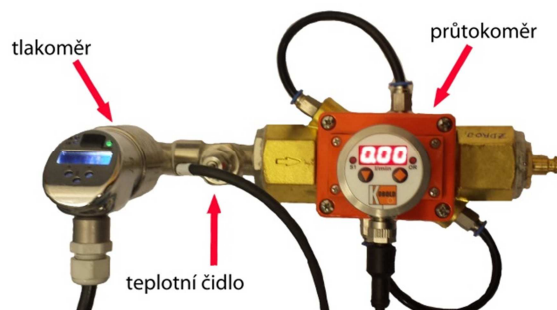
Zdroj disponuje vlastním uživatelským rozhraním, kde je možné zadat základní parametry ohřevu (napětí, proud a frekvence). Komunikace mezi rozhraním a zdrojem probíhá po sériové lince. Kompenzační baterie je zapojena do obvodu sériově. Vodou chlazený transformátor disponuje převodem 16:1. Induktory lze jednoduchým způsobem měnit, čímž je dosaženo značné variability celého indukčního systému.

Chladicí systém je tvořen dvěma výměníky. Jeden slouží pro chlazení zdroje. Druhý slouží k chlazení transformátoru a induktoru. Kelímek je spolu se vsázkou chlazen z vodovodního řadu. V případě potřeby je možné připojit vývody k jednomu z výměníků. Schéma hydraulického zapojení je na Obr. 4.3.1.

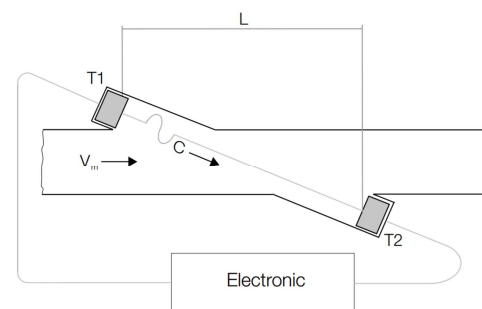


Obr. 4.3.1 Schéma hydraulického zapojení

Průtokoměr, teplotní čidlo a měřič tlaku jsou spojeny do jednotlivých měřicích sestav, které je možné dle potřeby libovolně přepojovat (na obou stranách jsou příruby). Ukázka jedné z měřicích sestav je uvedena na *Obr. 4.3.2*. Pro měření průtoku je použit ultrazvukový průtokoměr Kobold DUK disponující analogovým výstupem 4-20 mA a binárními výstupy, které nebyly pro tuto aplikaci použity. Princip ultrazvukového průtokoměru spočívá na principu ovlivnění ultrazvukové vlny v závislosti na rychlosti proudění. Jedná se o dva snímače umístěné šikmo proti sobě. Snímače fungují simultánně jako vysílač a přijímač ultrazvukových signálů. Implementovaný mikroprocesor vyhodnocuje rozdíl doby průchodu. V případě, že jsou vyhodnocené časy identické, tak tekutina v trubce neproudí. V případě, že tekutina proudí, tak dojde k vyhodnocení časového rozdílu, který je přímo úměrný rychlosti proudění tekutiny. Zjednodušený princip je zobrazen na *Obr. 4.3.3*. [29]



Obr. 4.3.2 Měřicí sestava



Obr. 4.3.3 Princip ultrazvukového průtokoměru [29]

K měření tlaku slouží tlakoměr Endress + Hauser, který je taktéž vybaven analogovým výstupem 4-20 mA. Tlakoměr má v měřicím systému detekovat případné poruchy. Z hlediska výpočtů chladicích výkonů nemá prakticky žádný význam. K měření jednotlivých teplot v systému jsou použita odporová čidla Pt100. Uvedené měřicí přístroje jsou připojeny do příslušných měřicích karet od National Instruments (NI). [30]

Pro analýzu elektrických veličin je použit průmyslový analyzátor sítě IME NEMO96HD (*Obr. 4.3.4*). Použitý analyzátor je připojený k jednotce CompactRIO pomocí sběrnice Modbus RTU (RS485). Celý systém je dále doplněn o optický pyrometr Kleiber 273C (*Obr. 4.3.5*) s měřicím rozsahem 300-2300 °C. Uvedený optický pyrometr disponuje také analogovým výstupem 0-20 mA. Vzhledem k uvedenému rozsahu nebyl při měřeních používán. K měření povrchových teplot je používána primárně termokamera FLIR T335i.

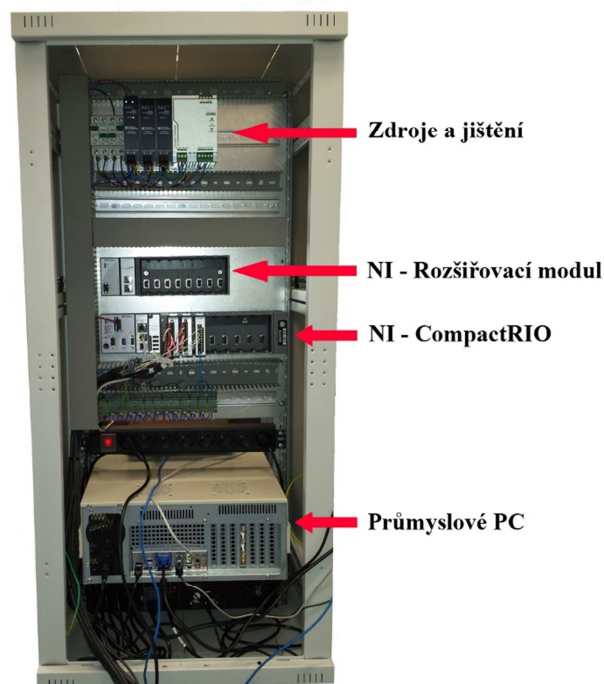


Obr. 4.3.4 Analyzátor sítě IME

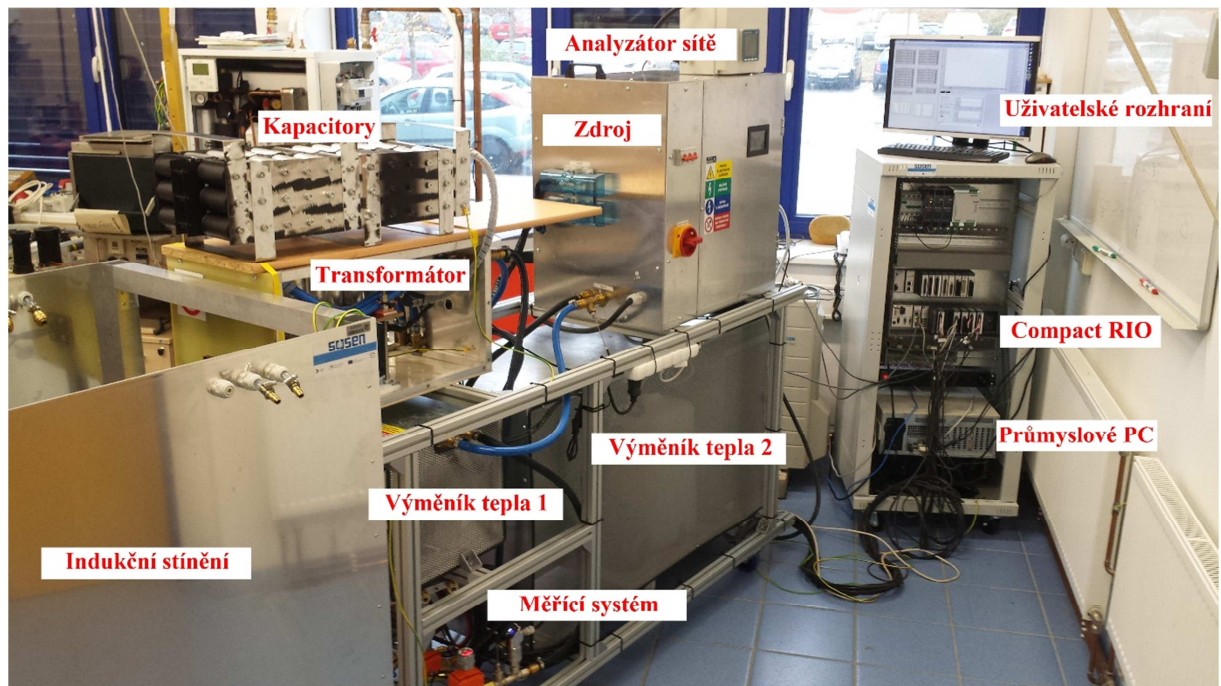


Obr. 4.3.5 Pyrometr Kleiber

Pro sběr a zpracování dat byla použita hardwarová platforma CompactRIO od společnosti National Instruments s příslušnými měřicími kartami. Software LabVIEW byl instalován na průmyslovém PC. Pro docílení větší robustnosti systému byly CompactRIO, průmyslový PC a napájecí zdroje umístěny do RACKu (Obr. 4.3.6). Celý systém pro sběr dat vč. indukčního systému je uveden na Obr. 4.3.7.



Obr. 4.3.6 Hardwarové vybavení RACKu

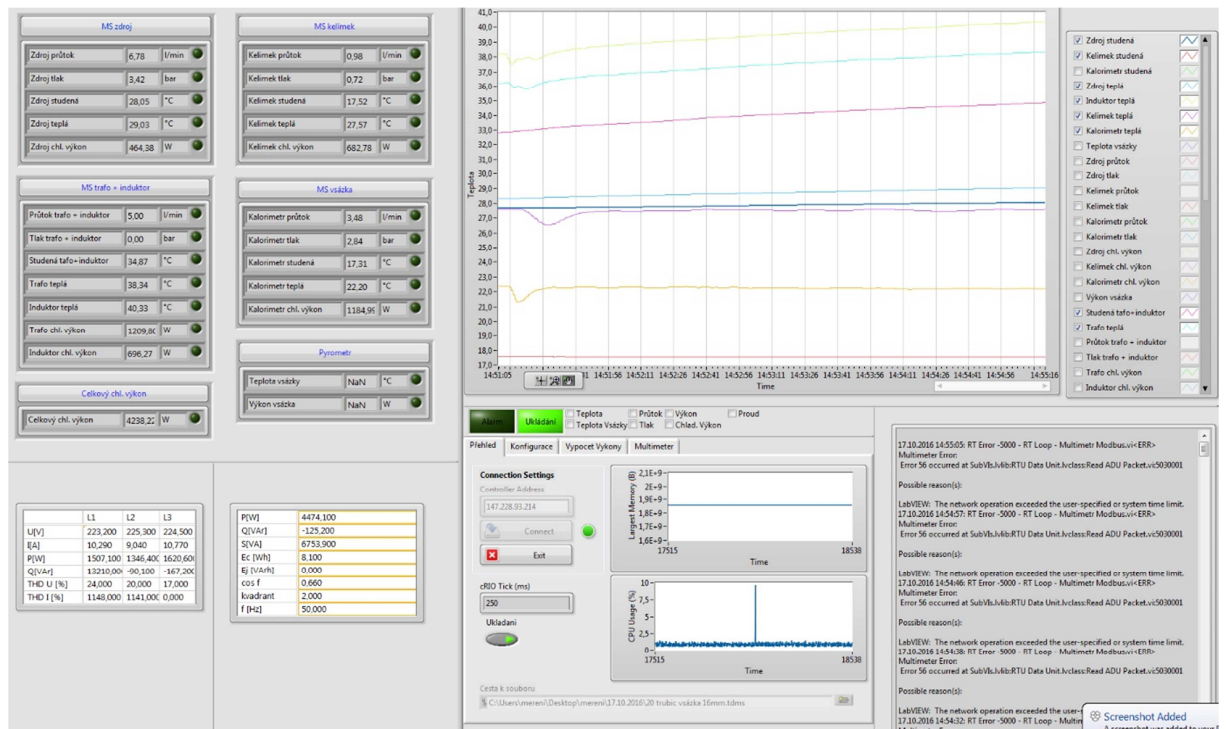


Obr. 4.3.7 Indukční zařízení a systém pro sběr dat

Detailní popis struktury vytvořeného programu je uveden v **Příloze 1**.

Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní bylo vytvořeno s ohledem na přehlednost celého systému. Rozhraní se skládá ze čtyř základních oken. V horním levém okně se zobrazují nejdůležitější informace v jednotlivých konstrukčních částech indukčního systému. Je zde uveden průtok, tlak, teplota vstupní a výstupní chladicí vody a chladicí výkon. Pod tímto oknem jsou zobrazeny elektrické parametry. Pro lepší přehlednost jsou veškeré měřené hodnoty zobrazeny v grafu umístěném v pravém horním rohu. Uživatel si může zvolit, jaké hodnoty chce na grafu aktuálně zobrazovat. Pod grafem se nachází konfigurační okno a okno pro chybová hlášení. V konfiguračním okně je možné nastavit IP adresu zařízení (CompactRIO), nastavit komunikaci s analyzátozem sítě, zvolit cestu souboru pro ukládání dat a zapnout ukládání měřených veličin. Pro lepší variabilitu celého měřicího systému je zde možné upravovat názvy měřených veličin, jednotky, dovolené meze a alarmová hlášení. Ukázka uživatelského rozhraní je uvedena na *Obr. 4.3.8*.



Obr. 4.3.8 Uživatelské rozhraní

Zhodnocení vytvořeného programu

Výsledkem celého snažení je univerzální, modulární, snadno rozšiřitelný a upravitelný systém pro měření elektrických i neelektrických veličin a ztrát (výkonů) v jednotlivých částech indukčního systému. Během realizace jsem narazil na řadu úskalí, která se však podařilo zdárně vyřešit a systém je možné nasadit do ostrého provozu. Systém je primárně používán pro aplikace s indukčními ohřevy (modely studeného kelímku, kalení, atd.). Data získaná na základě měření je možné použít k optimalizaci indukčních ohřevů a k ověření vytvořených numerických modelů.

Vytvořený měřicí systém ve výše zmíněné konfiguraci se hodí především pro experimentální použití. Jedná se především o zařízení, kde je potřeba provádět častější rekonfiguraci systému a velice rychle sbírat a vyhodnocovat měřená data. Pro uvedenou aplikaci by bylo možné použít také hardwarovou platformu CompactDAQ (také od společnosti NI), která by vytvořený program výrazně zjednodušila. Pro průmyslové aplikace bych doporučoval použít průmyslové PLC s běžně dostupnými kalorimetry (měřiče tepla).

4.4. VLIV POČTU KRUHOVÝCH TRUBIC SE SHODNÝM PRŮMĚREM – ROZDÍLNÝ PRŮMĚR KELÍMKU

V této části je zhodnocen vliv rozdílného počtu trubíc shodného průměru na generované ztráty a na pasivní parametry studeného kelímku. Díky poměrně rozsáhlému měření na realizovaném systému (podkapitola 4.3) lze výsledky získané na základě měření porovnat s výsledky získanými na základě numerických simulací. Při měření byl používán induktor stejného průměru, tj. 103 mm. V rámci uvažované konfigurace se mění počet trubíc kelímku (rozměr: D10/8), tj. mění se i průměr kelímku.

Pro posouzení vlivu jednotlivých konstrukčních uspořádání bylo nezbytné vytvořit funkční vzorky zjednodušeného studeného kelímku tvořené pouze různým počtem měděných trubíc, které jsou intenzivně chlazeny vodou. Voda je rozváděna do trubíc pomocí dvou 3D tištěných kolektorů. Uvedené kolektory jsou tištěny z materiálu PET nebo ABS. Více o možnostech 3D tisku kolektorů a ostatních komponentů je uvedeno v kapitole 6.3.

Funkční vzorek zjednodušeného kelímku před zalitím epoxidovou pryskyřicí je uveden na *Obr. 4.4.1*. Po zalití epoxidovou pryskyřicí byl vždy každý vzorek nastříkán teplou odolným sprejem černé barvy tak, aby byla dodržena stejná emisivita povrchu celého vzorku při měření termokamerou. Celkem byly vytvořeny tři vzorky s počtem 18, 20 a 24 trubíc.

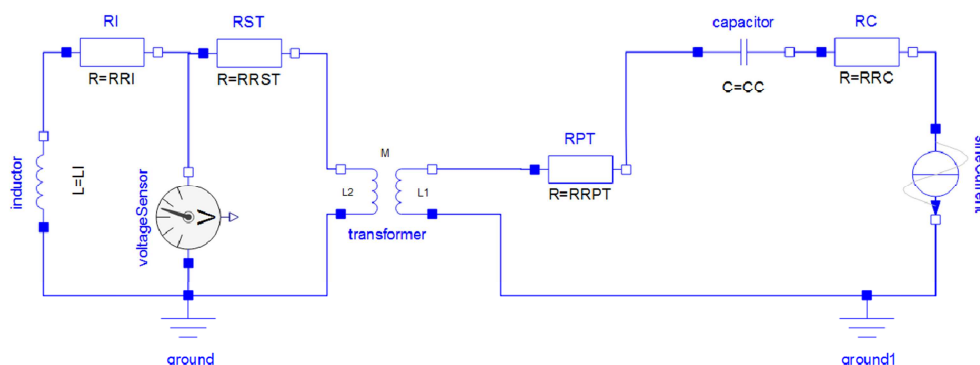


Obr. 4.4.1 Funkční vzorek s 3D tištěným kolektorem před zalitím epoxidovou pryskyřicí

Funkční vzorky byly vždy indukčně ohřívány do ustálené teploty chladicí vody ve všech částech systému. K ustálení teploty ve vzorku studeného kelímku, zdroji, transformátoru a induktoru došlo vždy do 10 min. Výsledky tepelných ztrát získané na základě měření jsou nadále použity pro porovnání s numerickými simulacemi provedených v software ANSYS EM (Maxwell).

4.4.1. REZONANČNÍ OBVOD A URČENÍ PROUDU INDUKTOREM

Pro stanovení napětí a proudů na jednotlivých prvcích byl vytvořen model rezonančního obvodu v software SystemModeler. Rezonanční obvod je tvořen zdrojem, kompenzační baterií, transformátorem a induktorem se studeným kelímkem. Pracovní frekvence generátoru byla nastavena na 12,2 kHz. Tato frekvence je vhodná především pro tavení elektricky vodivých materiálů. Uvedený rezonanční obvod je na Obr. 4.4.1.1.



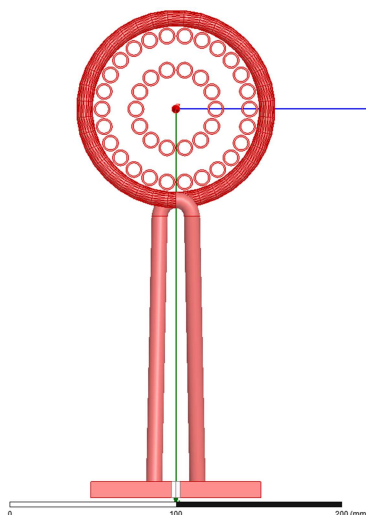
Obr. 4.4.1.1 Rezonanční obvod indukčního zařízení

Parametry potřebné do rezonančního obvodu byly změřeny pomocí precizního LCR metru. Tyto parametry jsou uvedeny v Tab. 4.4.1.1.

Označení	Popis	Hodnota
RRC	Odpor kompenzační baterie	30 mΩ
CC	Kapacita kompenzační baterie	623 nF
RRPT	Odpor primární strany transformátoru	171,2 mΩ
L1	Indukčnost primární strany transformátoru	2508 μH
RRST	Odpor sekundární strany transformátoru	48 mΩ
L2	Indukčnost sekundární strany transformátoru	13,3 μH
M	Vzájemná indukčnost transformátoru	179 μH
RRI	Odpor induktor – kelímek	18 trubic – 2,4 mΩ
		20 trubic – 2,9 mΩ
		24 trubic – 3,8 mΩ
LI	Indukčnost induktor – kelímek	18 trubic – 1014 nH
		20 trubic – 992 nH
		24 trubic – 929 nH

Tab. 4.4.1.1 Hodnoty rezonančního obvodu změřené pomocí precizního LCR metru

Ukázka vytvořeného zjednodušeného modelu v software ANSYS EM (Maxwell) pro mezní varianty je uvedena na Obr. 4.4.1.2. Z uvedeného obrázku je velice dobře patrná změna průměru studeného kelímku při použití 14 a 26 trubic.

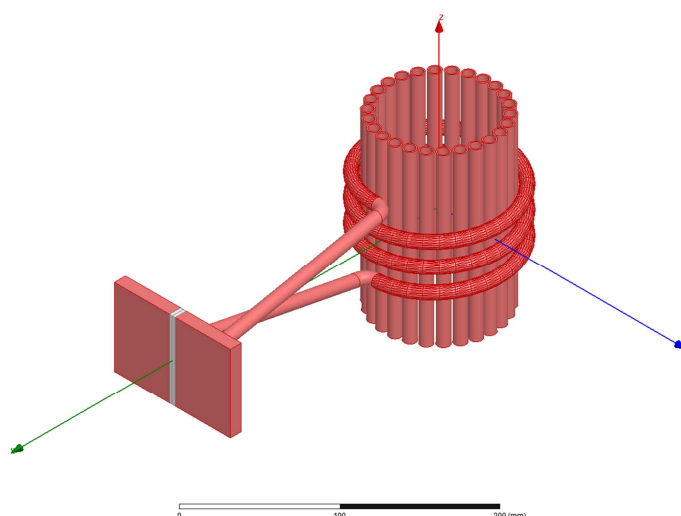


Obr. 4.4.1.2 Induktor a studený kelímek – 2 varianty v jednom obrázku (14 trubic a 26 trubic)

V reálném obvodu byla měřena napětí a pasivní parametry, protože bylo nezbytné určit proud induktorem a určit napětí a proudy na jednotlivých prvcích rezonančního obvodu. Hlavním úkolem provedené simulace je porovnat napětí a proudy na primární a sekundární straně s některými zadanými (nastavenými) hodnotami. Ze simulace je možné určit proud induktorem, který je klíčovým parametrem při numerické simulaci v ANSYS EM.

4.4.2. POPIS ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY V ANSYS EM

Numerický model byl vytvořen v ANSYS EM (Maxwell). Simulace zahrnuje cívku a zjednodušený model studeného kelímku (pouze trubice). Vliv kolektorů chladící vody byl zanedbán, protože kolektor je vyroben z elektricky nevodivého materiálu. Cílem simulace je zjistit systémové parametry (odpor a indukčnost) a ztráty ve vybraných částech modelu. Ukázka modelu v ANSYS EM je uvedena na Obr. 4.4.2.1.



Obr. 4.4.2.1 Ukázka modelu v ANSYS EM

Při simulaci byl použit komplexní 3D model, protože bylo nutné co nejvíce se přiblížit reálnému geometrickému uspořádání. To vede samozřejmě ke zvýšeným nárokům na výpočetní techniku, ale naše laboratoř je vybavena velice výkonným výpočetním serverem, který si s daným problémem velice dobře poradil. Numerické simulace byly provedeny pro 14, 16, 18, 20, 22, 24 a 26 trubic. Materiálové parametry a proud induktorem uvažované při numerické simulaci jsou uvedeny v *Tab. 4.4.2.1.*

Komponent	Materiál	μ_r [-]	γ [S.m ⁻¹]
Induktor	měď	1	45*10 ⁶
Kelímek	měď	1	45*10 ⁶

Tab. 4.4.2.1 Materiálové parametry

4.4.3. POROVNÁNÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ

Hlavním úkolem této části je porovnat výsledky měření se simulací a na jejich základě optimalizovat studený kelímek. Hodnota odporů a indukčností na jednotlivých komponentech byla měřena pomocí precizního LCR metru IETLabs 7600 plus. Naměřené hodnoty byly použity jako vstupní parametry rezonančního obvodu v SystemModeleru. Napětí na induktoru bylo měřeno pomocí osciloskopu Tektronix DPO5204B. Ztráty (chladící výkon) v jednotlivých částech systému byly měřeny pomocí vytvořeného měřicího systému.

Základní přehled o dané problematice představuje *Tab. 4.4.3.1.* Vzhledem k časové náročnosti výroby jednotlivých kolektorů byly vyrobeny pouze tři funkční vzorky. Numerická simulace byla provedena pro celkem 7 variant. Hodnota frekvence zdroje a napětí na induktoru byla u všech variant konstantní. Hodnota proudu induktorem byla stanovena pomocí modelu v SystemModeler. V rámci numerických simulací byla uvažována efektivní hodnota proudu induktorem 670 A.

Počet trubic	Měření	Simulace	f [Hz]	I_{ind} [A]	U_{ind} [V]
14	X	✓	12200	625,08	50
16	X	✓	12200	632,92	50
18	✓	✓	12200	643,5	50
20	✓	✓	12200	657,6	50
22	X	✓	12200	670,36	50
24	✓	✓	12200	701,7	50
26	X	✓	12200	717,70	50

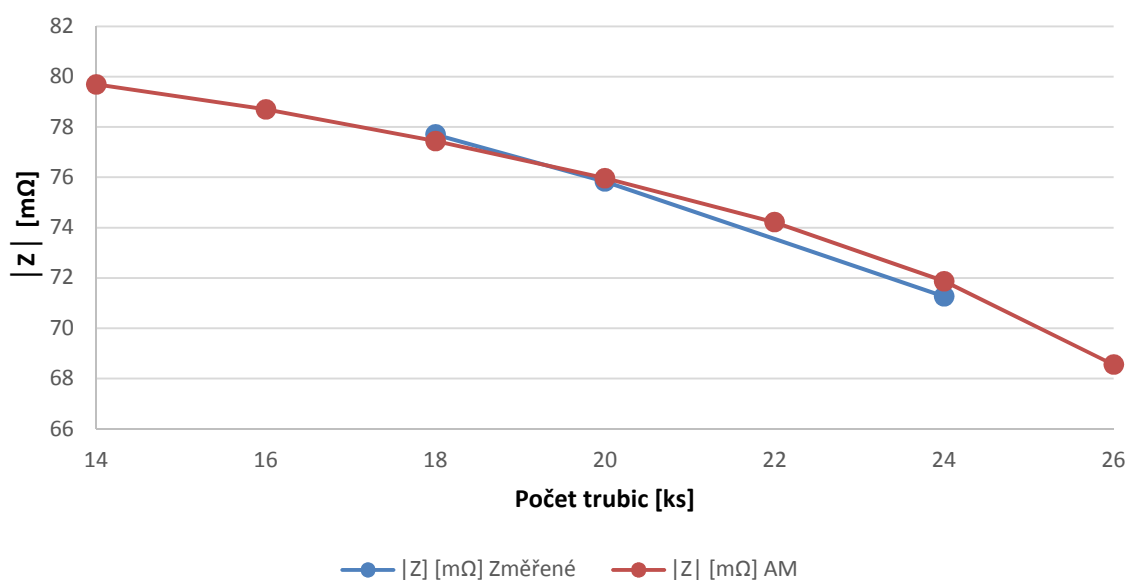
Tab. 4.4.3.1 Základní přehled a informace o systému

V *Tab. 4.4.3.2.* jsou uvedeny pasivní parametry, které byly získané na základě měření a simulací provedených v ANSYS EM. Jako součást výsledků je zde pro orientaci uvedena i impedance pro jednotlivé konfigurace. Porovnáme-li výsledky získané ze simulací s naměřenými hodnotami, je

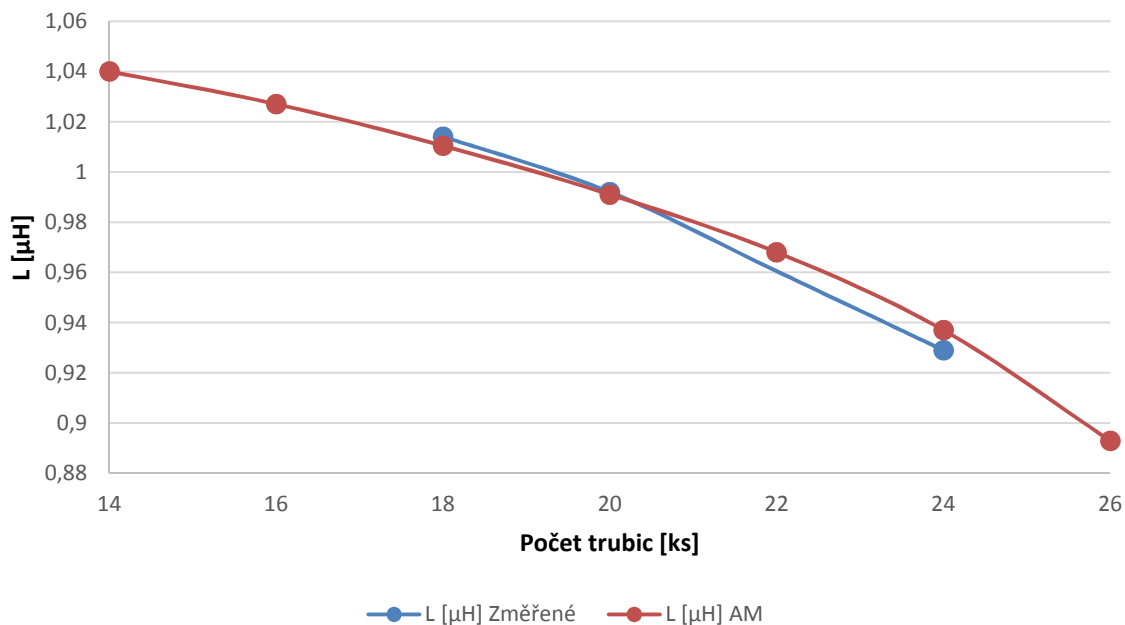
patrná velice dobrá shoda. Odchyłka těchto parametrů se pohybuje řádově v jednotkách procent. Pro lepší přehlednost jsou uvedeny grafy (Obr. 4.4.3.1 - Obr. 4.4.3.3), které srovnávají jednotlivé parametry v závislosti na počtu trubic. Na základě měření a simulací je zřejmé, že celková indukčnost bude nižší se zvyšujícím se počtem trubic o identickém průměru při uvažovaných parametrech a frekvenci. Naopak hodnota odporu se bude zvyšovat s rostoucím počtem trubic při uvažovaných parametrech a frekvenci. Celková impedance se bude snižovat s rostoucím počtem trubic při uvažovaných parametrech a frekvenci.

Počet trubic	Induktor + trubice změřené hodnoty			Induktor + trubice + transformátor změřené hodnoty			Induktor + trubice vypočítané hodnoty (AM)		
	Z [mΩ]	L [μH]	R [mΩ]	Z [mΩ]	L [μH]	R [mΩ]	Z [mΩ]	L [μH]	R [mΩ]
14	-	-	-	-	-	-	79,69	1,040	2,286
16	-	-	-	-	-	-	78,70	1,027	2,465
18	77,70	1,014	2,404	20,51	267,47	985	77,43	1,010	2,685
20	75,83	0,992	2,897	20,28	264,43	1039	75,96	0,991	2,963
22	-	-	-	-	-	-	74,22	0,968	3,319
24	71,26	0,929	3,786	19,55	254,86	1235	71,87	0,937	3,807
26	-	-	-	-	-	-	68,55	0,893	4,640

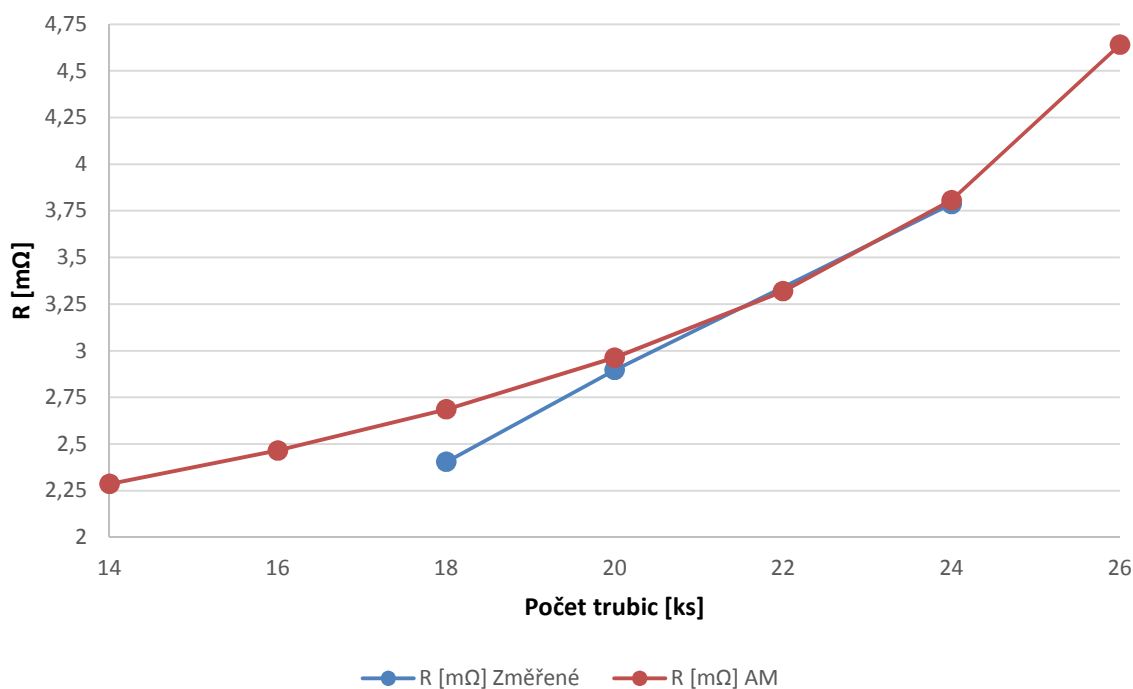
Tab. 4.4.3.2 Pasivní parametry



Obr. 4.4.3.1 Hodnota impedance (induktor + trubice) v závislosti na počtu segmentů



Obr. 4.4.3.2 Hodnota indukčnosti (induktor + trubice) v závislosti na počtu segmentů



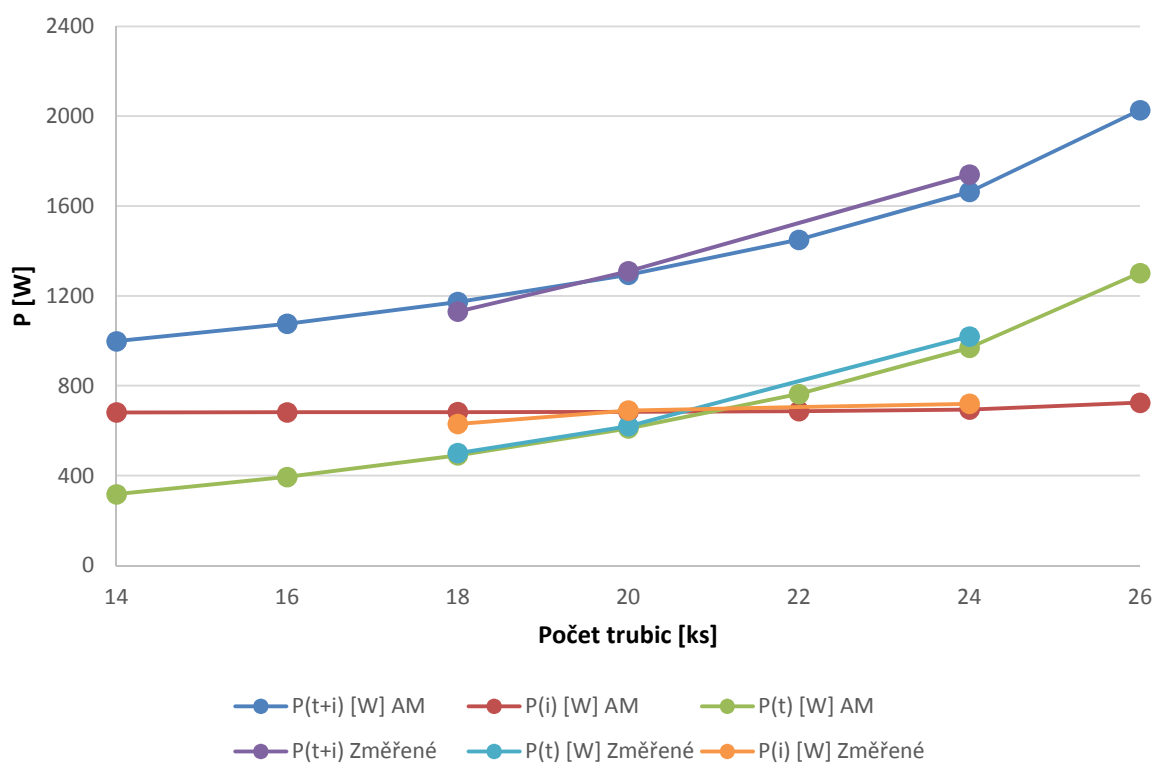
Obr. 4.4.3.3 Hodnota odporu (induktor + trubice) v závislosti na počtu segmentů

Rozložení tepelných ztrát v jednotlivých částech systému získaných na základě měření (NI) a hodnot vypočtených v ANSYS EM (AM) je v Tab. 4.4.3.3. Odchylka naměřených a vypočtených hodnot se opět pohybuje v jednotkách procent. Rozložení ztrát je zobrazeno na Obr. 4.4.3.4. V rámci přehlednosti Obr. 4.4.3.4 zahrnuje pouze ztráty na induktoru (P_i), ztráty v modelu studeného

kelímku-trubicích (P_t) a součet těchto hodnot (P_{t+i}). Ztráty změřené pomocí analyzátoru (P_{Pgrid}), celkové ztráty (P_C), ztráty na generátoru (P_{gen}) a ztráty na transformátoru (P_{trans}) nejsou v Obr. 4.4.3.4 uvedeny.

Počet trubic	Ztráty získané měřením NI							Ztráty získané z AM		
	P_{Pgrid} [W]	P_C [W]	P_{gen} [W]	$P_{trans.}$ [W]	P_{t+i} [W]	P_t [W]	P_i [W]	P_{t+i} [W]	P_t [W]	P_i [W]
14	-	-	-	-	-	-	-	998	317	681
16	-	-	-	-	-	-	-	1076	394	682
18	3150	3100	870	1120	1130	500	630	1173	490	683
20	3360	3300	820	1140	1310	620	690	1294	610	684
22	-	-	-	-	-	-	-	1450	763	687
24	3800	3600	620	1200	1740	1020	720	1663	969	694
26	-	-	-	-	-	-	-	2027	1302	725

Tab. 4.4.3.3 Rozložení tepelných ztrát v indukčním systému v závislosti na počtu segmentů



Obr. 4.4.3.4 Rozložení ztrát v indukčním systému v závislosti na počtu segmentů

Zhodnocení výsledků

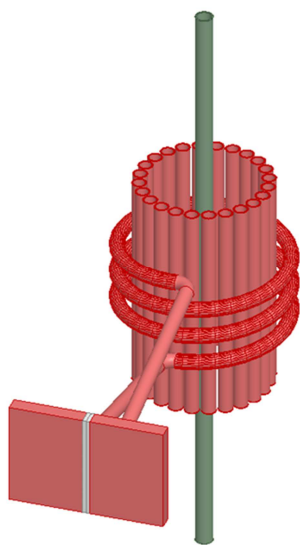
Ztráty v kelímku (trubicích) vzrůstají s rostoucím počtem trubic (o shodném průměru), neboť se také mění průměr uvažovaného kelímku pro jednotlivé konfigurace. Jelikož se průměr induktoru nemění, tak se vzrůstajícím poloměrem kelímku dochází k těsnější vazbě mezi induktorem a kelímek, což má výrazný vliv na ztráty generované v kelímku. Ztráty v induktoru jsou pro všechny

konfigurace téměř konstantní. Drobné odchylky ztrát v induktoru jsou způsobeny chybou měření jednotlivých měřicích přístrojů a numerickou chybou v rámci numerických simulací.

Na základě provedených měření a simulací je zřejmé, že získané výsledky pasivních parametrů a tepelných ztrát spolu v přijatelné míře korespondují. Vytvořený měřicí systém je tedy možné použít pro ověření i dalších geometrických uspořádání studeného segmentového kelímku.

4.5. VLIV POČTU KRUHOVÝCH TRUBIC O SHODNÉM PRŮMĚRU NA VÝKON PŘENESENÝ DO VSÁZKY A ÚČINNOST – ROZDÍLNÝ PRŮMĚR KELÍMKU

Cílem této části práce je určit vliv počtu trubíc kruhového průřezu o identickém průměru na výkon přenesený do vsázky (kalorimetru) a na účinnost indukčního systému. Konfigurace trubíc je shodná s předchozím případem uvedeným v kapitole 4.4 (mění se průměr kelímku). Pro měření výkonu přeneseného do vsázky byly použity kalorimetry se třemi různými průměry (12, 16 a 22 mm) a s parametry uvedenými v *Tab. 4.5.1*. Uvažované průměry byly zvoleny s ohledem na dodržení turbulentního proudění uvnitř kalorimetru a s ohledem na možnost umístění kalorimetru do středu každého vzorku studeného kelímku. Na základě provedených měření a simulací je možné stanovit, zda počet trubíc o identickém průměru tvořící studený kelímek ovlivní výkon přenesený do vsázky (kalorimetru) a následně pak účinnost indukčního systému. Účinnost indukčního systému je počítána na základě rovnice (4.2.1). Uvažovaná konfigurace v ANSYS EM je uvedena na *Obr. 4.5.1*. Ukázka z měření na reálném vzorku je uvedena na *Obr. 4.5.2*.



Obr. 4.5.1 Model ANSYS EM



Obr. 4.5.2 Měření na reálném vzorku

Průměr vsázky [mm]	Tloušťka stěny [mm]	μ_r [-]	γ [S.m ⁻¹]
12	1	76	$2 \cdot 10^6$
16	1	76	$2 \cdot 10^6$
22	1	76	$2 \cdot 10^6$

Tab. 4.5.1 Parametry použitých kalorimetrů

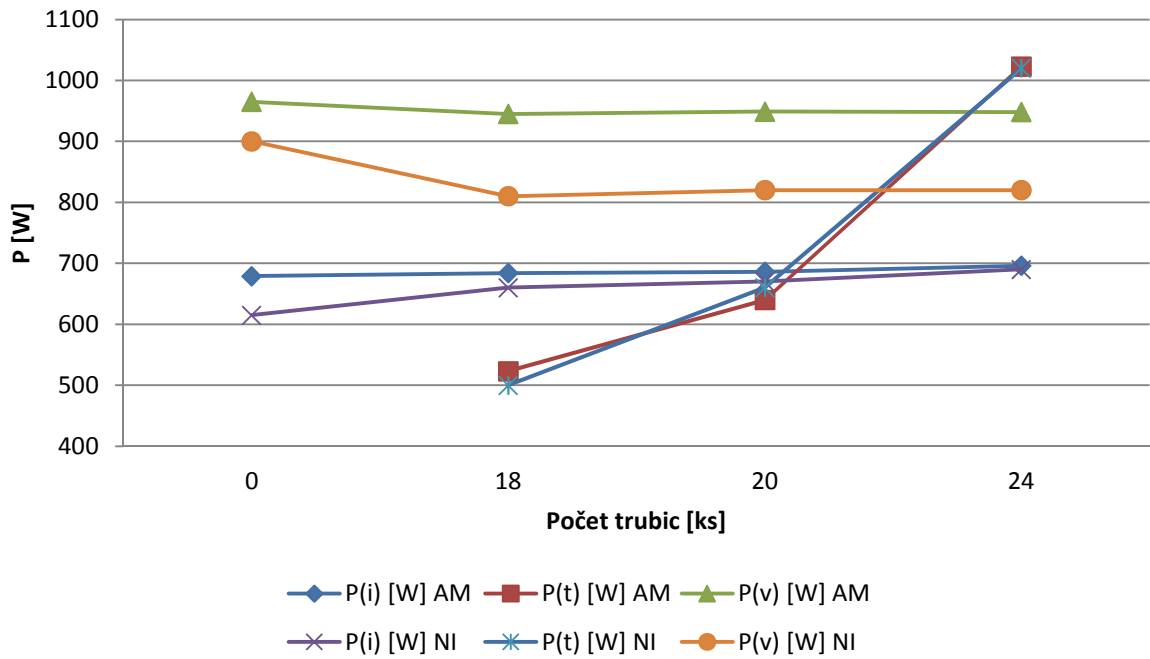
Na základě postupu uvedeném v kapitole 4.4 byly změřeny a vypočítány ztráty v jednotlivých konstrukčních částech indukčního systému. V rámci porovnání jednotlivých variant bylo provedeno také měření ztrát generovaných ve vsázce (kalorimetru) bez kelímků, tak aby bylo možné určit vliv na

výkon přenesený do vsázky (kalorimetru) a na účinnost indukčního systému. Výsledky získané na základě měření (NI) a simulací (AM) jsou uvedeny v Tab. 4.5.2. Součástí Tab. 4.5.2 je i účinnost pro jednotlivá konstrukční uspořádání. V rámci měření byly zjišťovány i pasivní parametry jednotlivých konfigurací, ale v rámci lepší přehlednosti nejsou v této kapitole uvedeny. Stejně tak byly měřeny ztráty na ostatních komponentech indukčního systému (generátoru a transformátoru), ale opět zde nejsou z hlediska lepší přehlednosti uvedeny. Proud induktorem byl uvažován 670 A. Pracovní (rezonanční) frekvencí zdroje byla zvolena 12500 Hz.

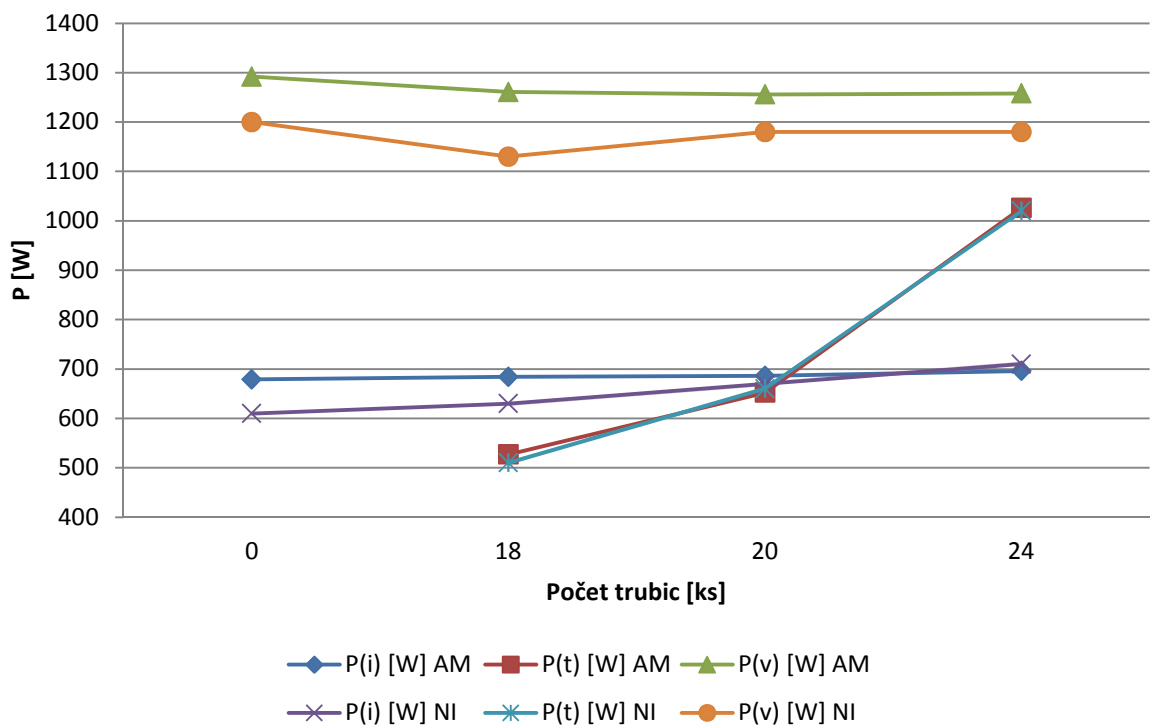
Počet trubic [ks]	Průměr trubic [mm]	Průměr vsázky [mm]	Měření NI					Simulace AM				
			P_{t+i+v} [W]	P_t [W]	P_i [W]	P_v [W]	η [-]	P_{t+i+v} [W]	P_t [W]	P_i [W]	P_v [W]	η [-]
-	-	12	1515	-	615	900	0,594	1644	-	679	965	0,587
-	-	16	1810	-	610	1200	0,663	1971	-	679	1292	0,655
-	-	22	2385	-	585	1800	0,754	2457	-	679	1778	0,723
18	10	-	1130	500	630	-	-	1173	490	683	-	-
18	10	12	1970	500	660	810	0,411	2152	523	684	945	0,439
18	10	16	2270	510	630	1130	0,498	2427	527	684	1261	0,510
18	10	22	2860	500	660	1700	0,594	2951	532	684	1735	0,588
20	10	-	1310	620	690	-	-	1294	610	684	-	-
20	10	12	2150	660	670	820	0,381	2275	640	686	949	0,417
20	10	16	2510	660	670	1180	0,470	2594	652	686	1256	0,484
20	10	22	3090	660	680	1750	0,566	3098	656	685	1757	0,567
24	10	-	1740	1020	720	-	-	1663	969	694	-	-
24	10	12	2530	1020	690	820	0,324	2667	1023	696	948	0,355
24	10	16	2910	1020	710	1180	0,405	2980	1026	696	1258	0,422
24	10	22	3335	1000	660	1675	0,502	3448	1029	694	1725	0,500

Tab. 4.5.2 Ztráty v indukčním systému se vsázkou vč. účinnosti systému

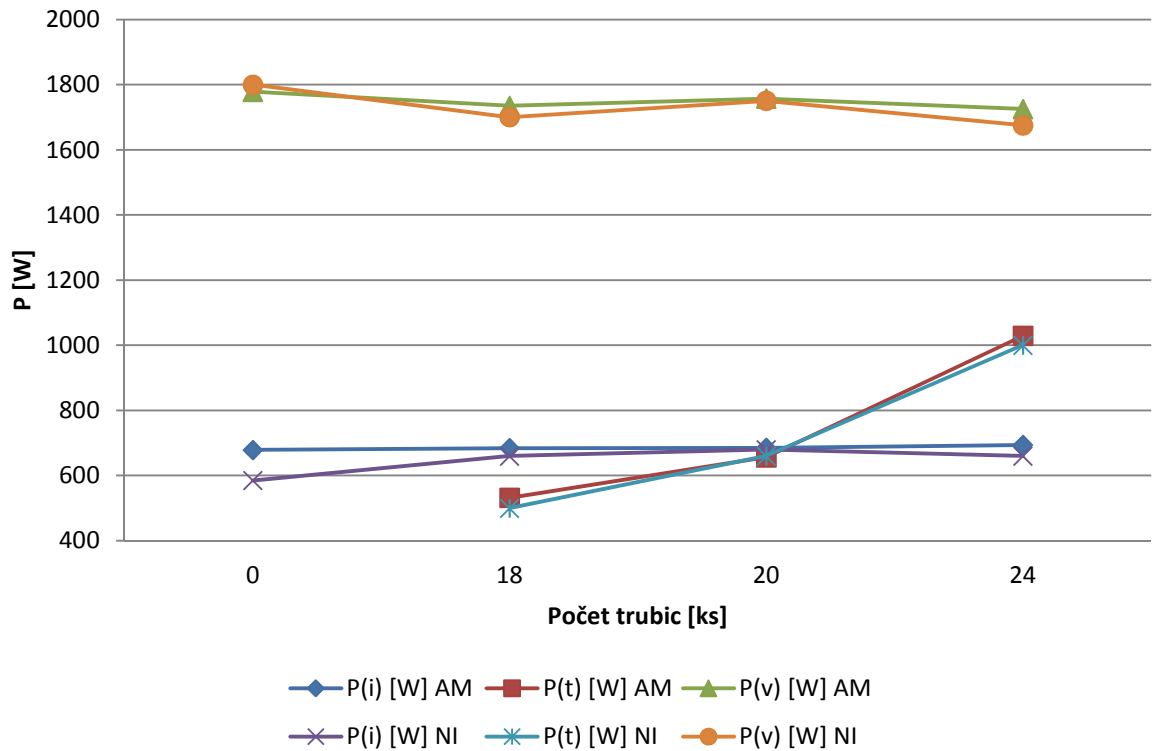
Rozložení ztrát v jednotlivých komponentech indukčního systému v závislosti na počtu trubic je uvedeno na Obr. 4.5.3 (kalorimetr o průměru 12), Obr. 4.6.4 (kalorimetr o průměru 16 mm) a Obr. 4.5.5 (kalorimetr o průměru 22 mm). Účinnost indukčního systému pro jednotlivé konfigurace je uvedena na Obr. 4.5.6.



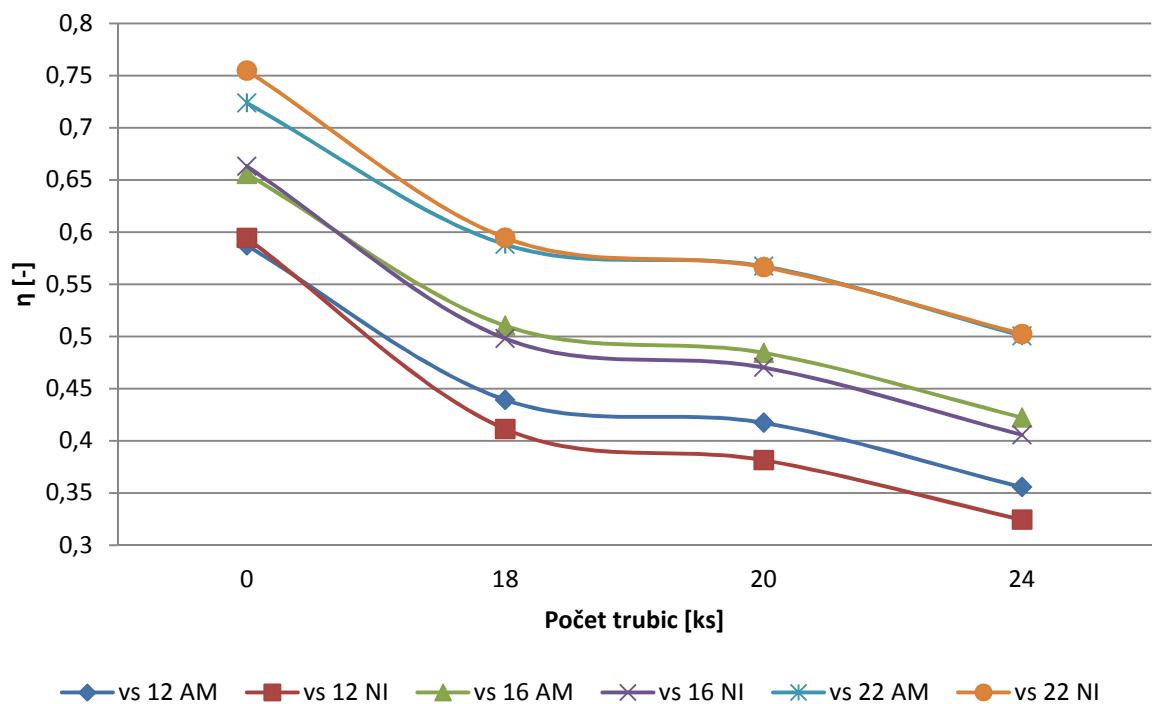
Obr. 4.5.3 Rozložení ztrát v indukčním systému v závislosti na počtu trubic – rozdílný průměr kelímku – vsázka o průměru 12 mm



Obr. 4.5.4 Rozložení ztrát v indukčním systému v závislosti na počtu trubic – rozdílný průměr kelímku – vsázka o průměru 16 mm



Obr. 4.5.5 Rozložení ztrát v indukčním systému v závislosti na počtu trubic – rozdílný průměr kelímku – vsázka o průměru 22 mm



Obr. 4.5.6 Účinnost indukčního systému pro jednotlivá konstrukční uspořádání v závislosti na počtu trubic – rozdílný průměr kelímku

Zhodnocení výsledků

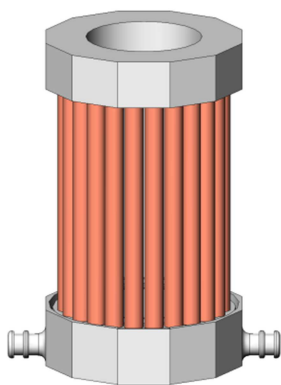
Na základě výsledků získaných z numerických simulací a z měření bylo zjištěno, že rozdílný počet trubic o identickém průměru D10/8 (rozdílném průměru kelímku) nemá výrazný vliv na množství výkonu přeneseného do vsázky identického průměru. Samozřejmě účinnost systému bude výrazně klesat s rostoucím počtem trubic D10/8 pro stejně velké vsázky, což je dáno především větším množstvím materiálu použitého k výrobě studeného kelímku a těsnější vazbou mezi induktorem a studeným kelímekem.

4.6. VLVIV SPOJE MEZI JEDNOTLIVÝMI CHLADÍCÍMI TRUBICEMI

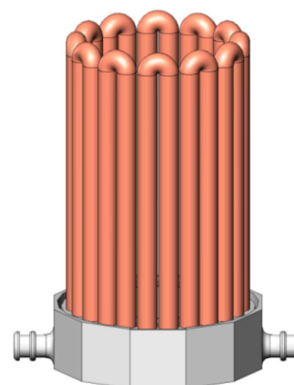
Cílem této části práce je objasnit vliv spojení mezi trubkami v horní části studeného kelímku. Na základě provedených měření a numerických simulací potom stanovit, zda má význam toto vodivé spojení nějakým způsobem optimalizovat s ohledem na účinnost indukčního systému.

Aby bylo možné numerické simulace ověřit bylo nezbytné vytvořit další modely studeného kelímku (reálné vzorky), které by simulovaly vliv spoje mezi jednotlivými trubkami. Měděné trubice byly vyžehány pomocí elektromagnetické indukce. Následně došlo k jejich naplnění pískem a upěchování. Poté bylo provedeno ohnutí trubice ve vyžehané oblasti. Ohnuté trubice byly umístěny opět do 3D tištěného chladicího kolektoru a zalité epoxidovou pryskyřicí. Vliv dna a spojovací bandáže byl stejně jako v předchozích případech zanedbán.

Model uvedený na *Obr. 4.6.1* úmyslně zanedbává vliv elektricky vodivého spojení jednotlivých trubic. Propojení trubic je na obou stranách provedeno stejně jako v podkapitole 4.4 a 4.5 pomocí 3D tištěného kolektoru. Naopak model *Obr. 4.6.2* elektricky vodivé propojení trubic respektuje. Ukázka části funkčních vzorků je uvedena na *Obr. 4.6.3* a *Obr. 4.6.4* (varianta s 20 trubkami). Pro porovnání byla použita konfigurace s 24 trubkami.



*Obr. 4.6.1 Model bez vodivého spojení
– 2 kolektory (varianta s 24 trubíc)*



*Obr. 4.6.2 Model respektující vodivé spojení mezi
trubicemi- 1kolektor (varianta s 24 trubíc)*



Obr. 4.6.3 Reálný vzorek bez vodivého spojení
– 2 kolektory (varianta pro 20 trubic)

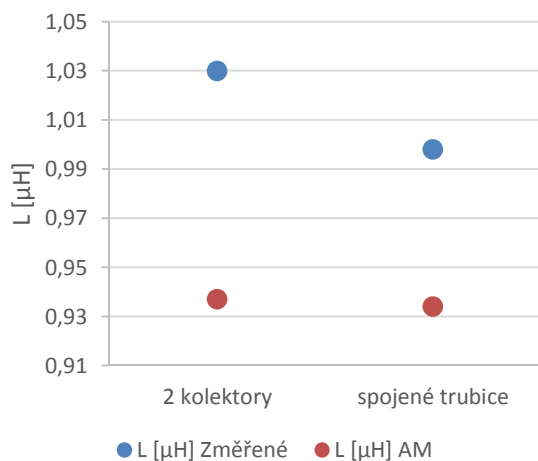


Obr. 4.6.4 Reálný vzorek respektující vodivé
spojení – 1 kolektor (varianta pro 20 trubic)

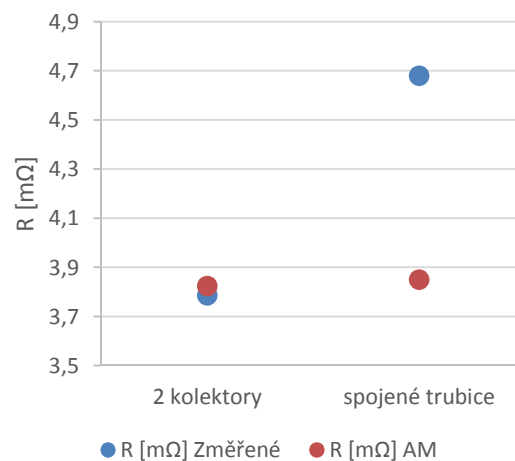
Hodnoty impedance, indukčnosti a odporu získané na základě měření a simulací pro jednotlivé konfigurace jsou uvedeny v Tab. 4.6.1. Grafy zobrazující hodnotu těchto parametrů jsou uvedeny na Obr. 4.6.5 - Obr. 4.6.7.

Konfigurace	Změřené hodnoty (LCR metr)			Vypočítané hodnoty (AM)		
	Z [mΩ]	L [μH]	R [mΩ]	Z [mΩ]	L [μH]	R [mΩ]
2 kolektory (Obr. 4.6.1)	80,94	1,03	3,786	73,65	0,937	3,824
Spojené trubice (Obr. 4.6.2)	78,48	0,998	4,68	73,42	0,934	3,85

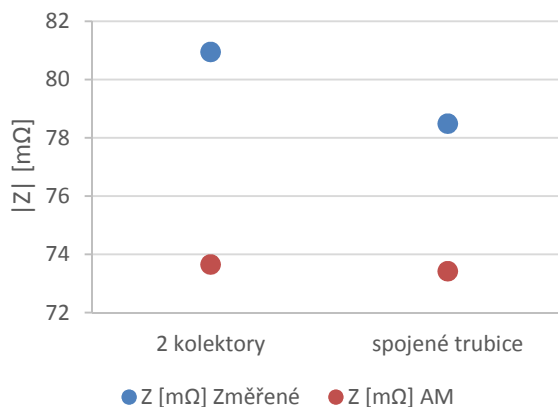
Tab. 4.6.1 Pasivní parametry pro jednotlivé konfigurace



Obr. 4.6.5 Hodnota indukčnosti pro jednotlivé konfigurace



Obr. 4.6.6 Hodnota odporu pro jednotlivé konfigurace

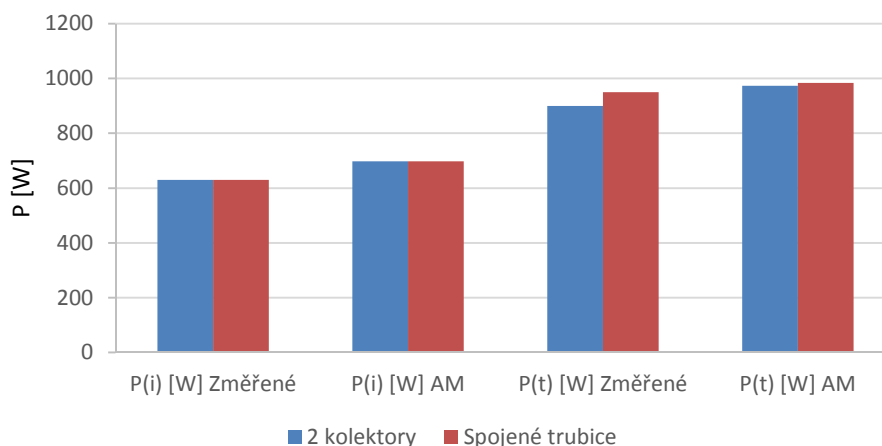


Obr. 4.6.7 Hodnota impedance pro jednotlivé konfigurace

Výsledky ztrát získané na základě měření a simulací pro dané konfigurace jsou uvedeny v Tab. 4.6.2. Pro lepší orientaci v dané problematice je přiložen Obr. 4.6.8, který porovnává rozložení ztrát v jednotlivých konstrukčních částech indukčního systému.

Konfigurace	Měření NI			Simulace AM		
	P_t+P_i [W]	P_t [W]	P_i [W]	P_t+P_i [W]	P_t [W]	P_i [W]
2 kolektory (Obr. 4.6.1)	1530	900	630	1670	973	697
Spojené trubice (Obr. 4.6.2)	1580	950	630	1680	983	697

Tab. 4.6.2 Ztráty v jednotlivých částech indukčního systému pro uvažované konfigurace



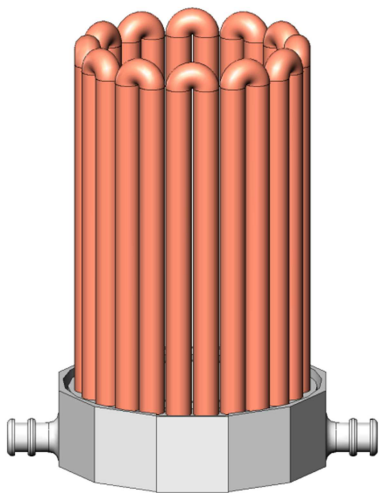
Obr. 4.6.8 Rozložení ztrát v jednotlivých částech indukčního systému pro jednotlivé konfigurace

Zhodnocení výsledků

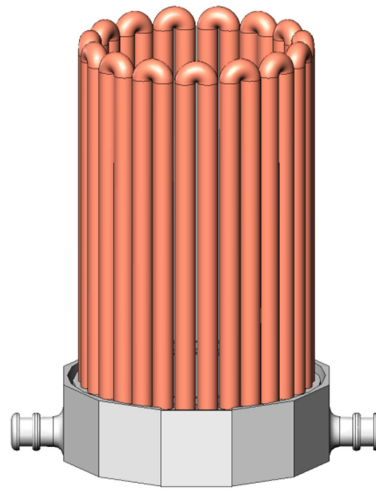
Měřeními a simulacemi bylo zjištěno, že elektricky vodivé spojení mezi dvěma trubicemi v horní části studeného kelímku nemá na ztráty generované ve studeném kelímku podstatný vliv. Elektricky vodivé spojení je možné zanedbat, tj. není nutné toto vodivé spojení nahrazovat např. elektricky nevodivými spojkami.

4.7. VLIV POČTU TRUBIC ROZDÍLNÉHO PRŮMĚRU NA VÝKON PŘENESENÝ DO VSÁZKY A ÚČINNOST – IDENTICKÝ PRŮMĚR STUDENÉHO KELÍMKU

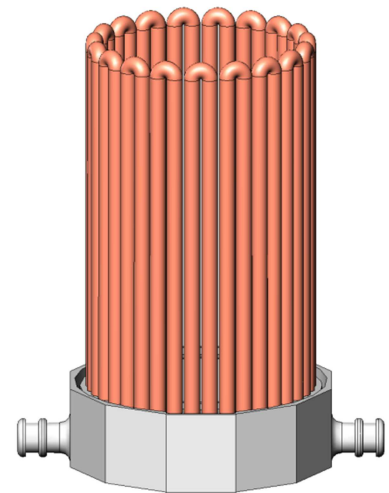
Pro konstrukci studeného kelímku byly použity trubice o průměru 6 (D6/4), 8 (D8/6) a 10 (D10/8) mm při zachování identického vnějšího průměru kelímku. Konfigurace pro jednotlivá uspořádání je uvedena na *Obr. 4.7.1 - Obr. 4.7.3*. Na základě provedených měření a simulací je možné stanovit, zda počet trubec studeného kelímku o rozdílném průměru ovlivní účinnost indukčního systému.



Obr. 4.7.1 Model - 24 trubic



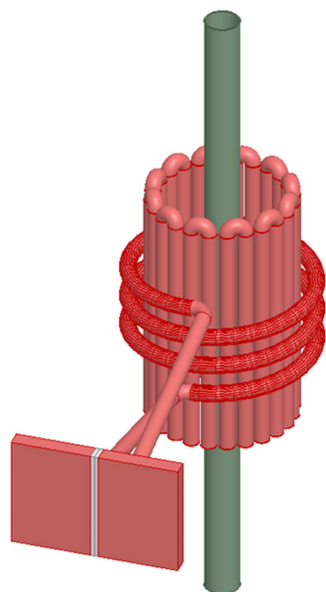
Obr. 4.7.2 Model – 30 trubic



Obr. 4.7.3 Model – 38 trubic

Pro uvažované konfigurace byl měřen i výkon přenesený do vsázky, který byl opět reprezentován kalorimetry rozdílného průměru. Použité kalorimetry jsou identické s kalorimetry uvedenými v kapitole 4.5.

Stejně jako v předchozích případech bylo nezbytné vytvořit další modely studeného kelímku respektující rozdílný počet trubec s rozdílným průměrem. Pro výrobu kelímku s průměrem trubec 10 mm byl použit postup uvedený v kapitole 4.6. Pro průměr 6 a 8 mm byla použita již vyžíhaná měď. Ukázka modelu vytvořené v software ANSYS EM je uvedena na *Obr. 4.7.4*. Ukázka měření na reálném vzorku je uvedena na *Obr. 4.7.5*.



Obr. 4.7.4 Model v ANSYS EM
(24 trubic, vsázka 22m)

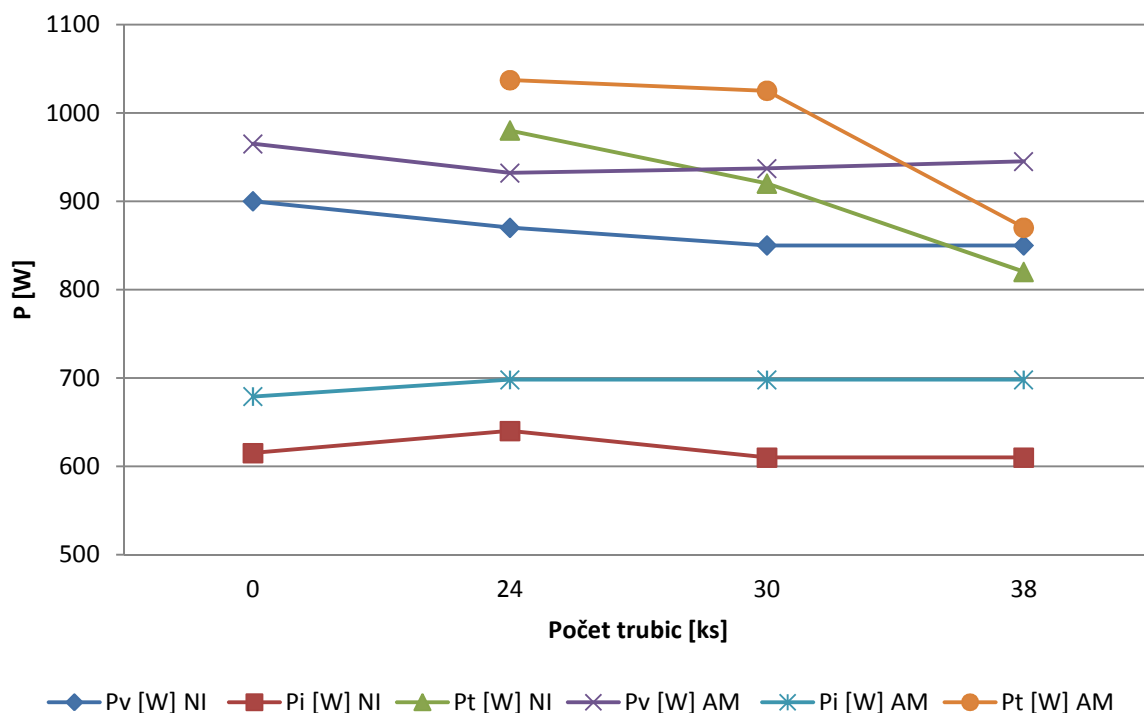


Obr. 4.7.5 Měření na reálném vzorku
(24 trubic, vsázka 12 mm)

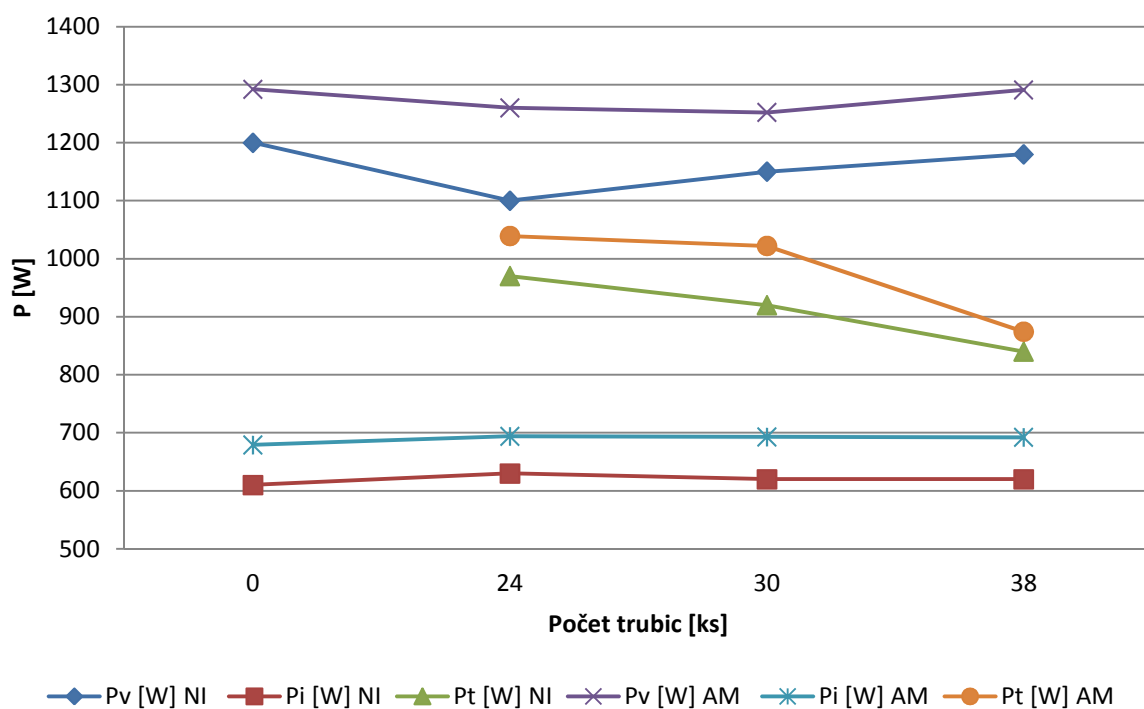
Výsledky ztrát získané na základě měření a simulací jsou uvedeny v Tab. 4.7.1. Součástí výsledků jsou i hodnoty účinnosti pro jednotlivá konstrukční uspořádání. Stejně jako v předchozích bodech, byly měřeny i pasivní parametry a ztráty na ostatních komponentech indukčního zařízení, ale z hlediska přehlednosti zde nejsou opět uvedeny. Rozložení ztrát v jednotlivých konstrukčních částech indukčního systému pro jednotlivé konfigurace vsázek v závislosti na počtu trubic je uvedeno na Obr. 4.7.6, Obr. 4.7.7 a Obr. 4.7.8. Účinnost je potom uvedena na Obr. 4.7.9.

Počet trubic [ks]	Průměr trubic [mm]	Průměr vsázky [mm]	Měření NI					Simulace AM				
			P_{t+i+v} [W]	P_t [W]	P_i [W]	P_v [W]	η [-]	P_{t+i+v} [W]	P_t [W]	P_i [W]	P_v [W]	η [-]
-	-	12	1515	-	615	900	0,594	1644	-	679	965	0,587
-	-	16	1810	-	610	1200	0,663	1971	-	679	1292	0,655
-	-	22	2385	-	585	1800	0,754	2457	-	679	1778	0,723
24	10	-	1580	950	630	-	-	1680	983	697	-	-
24	10	12	2490	980	640	870	0,349	2667	1037	698	932	0,349
24	10	16	2700	970	630	1100	0,407	2993	1039	694	1260	0,421
24	10	22	3200	970	630	1600	0,500	3472	1046	696	1730	0,498
30	8	-	1530	920	610	-	-	1670	978	692	-	-
30	8	12	2380	920	610	850	0,357	2660	1025	698	937	0,352
30	8	16	2690	920	620	1150	0,427	2967	1022	693	1252	0,422
30	8	22	3340	920	620	1800	0,539	3479	1029	693	1757	0,505
38	6	-	1415	805	610	-	-	1531	843	688	-	-
38	6	12	2280	820	610	850	0,373	2513	870	698	945	0,376
38	6	16	2640	840	620	1180	0,447	2857	874	692	1291	0,451
38	6	22	3240	820	610	1810	0,558	3347	877	694	1776	0,531

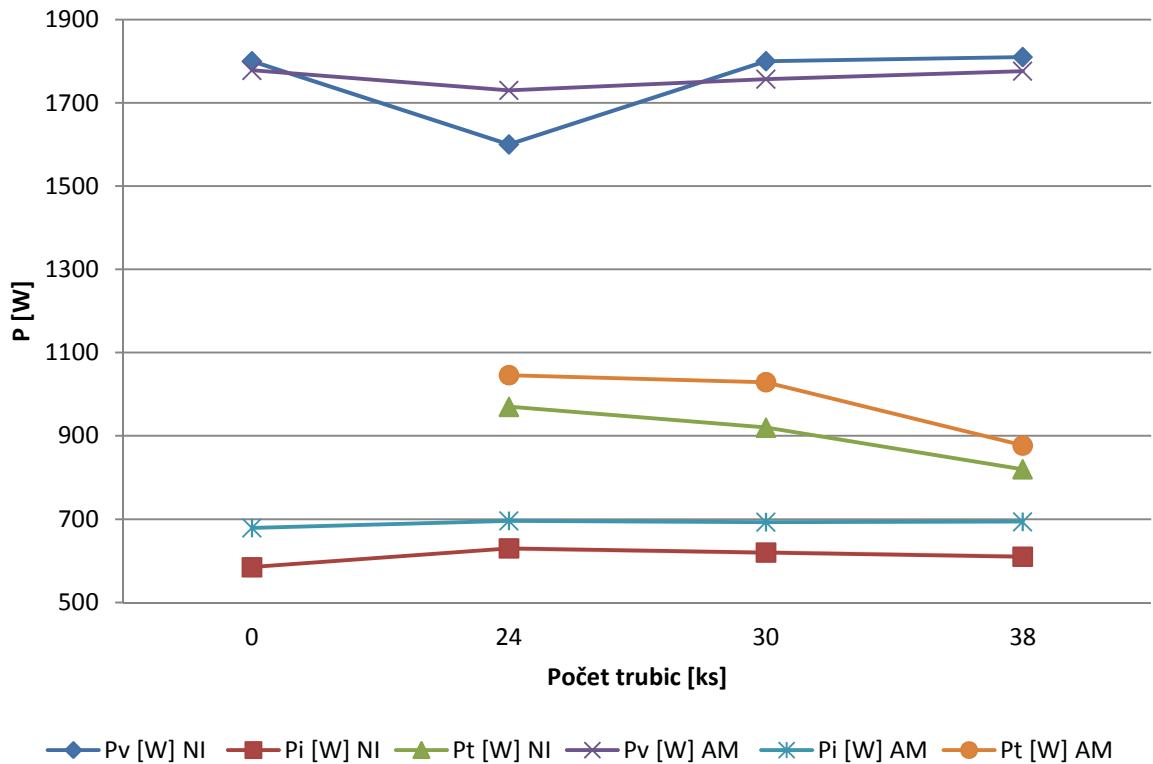
Tab. 4.7.1 Ztráty v indukčním systému vč. účinnosti systému



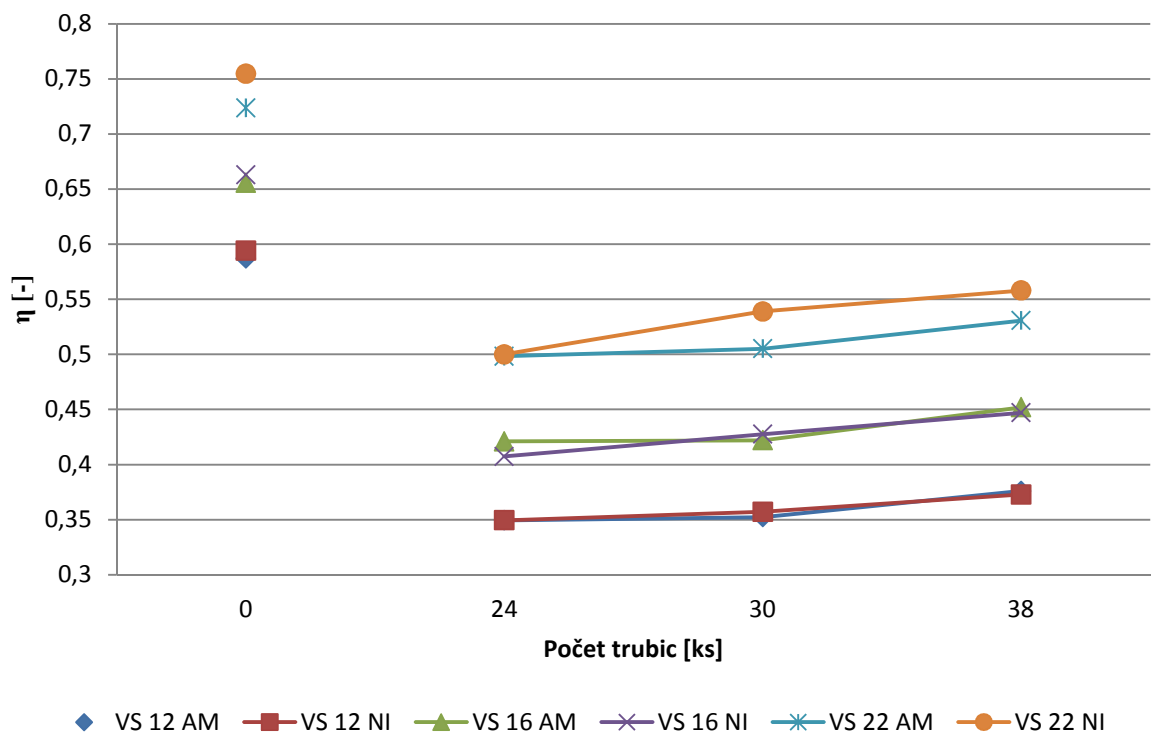
Obr. 4.7.6 Rozložení ztrát v indukčním systému v závislosti na počtu trubíc – identický průměr kelímku – vsázka o průměru 12 mm



Obr. 4.7.7 Rozložení ztrát v indukčním systému v závislosti na počtu trubíc – identický průměr kelímku – vsázka o průměru 16 mm



Obr. 4.7.8 Rozložení ztrát v indukčním systému v závislosti na počtu trubíc – identický průměr kelímku – vsázka o průměru 22 mm



Obr. 4.7.9 Účinnost indukčního systému v závislosti na počtu trubíc – identický průměr kelímku

Zhodnocení výsledků

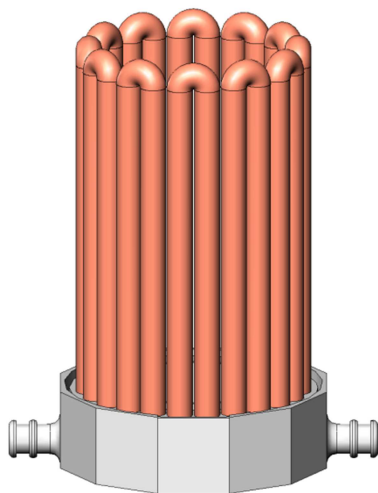
Na základě provedených měření a simulací je možné říci, že počet trubic o rozdílném průměru výrazně ovlivní ztráty v nich generované. Ztráty v kelímku klesají s rostoucím počtem trubic při dodržení identického průměru studeného kelímku (při uvažované konfiguraci a frekvenci). Výkon přenesený do vsázky nepatrně klesne v porovnání s variantou bez kelímku. V případě použití rozdílného počtu trubic bude výkon přenesený do vsázky přibližně konstantní. Pro lepší názornost by bylo vhodné opakovat toto měření se vsázkou (kalorimetrem), který by respektoval daleko těsnější vazbu mezi kalorimetrem a kelímekem.

Vyšší účinnosti (menších ztrát ve studeném kelímku) dosahuje indukční systém s větším počtem trubic o menším průměru při uvažování identického vnějšího průměru kelímku.

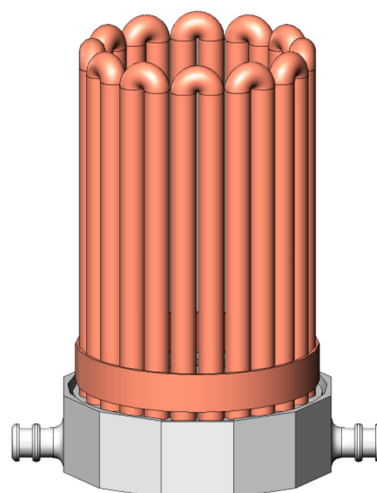
4.8. Vliv dna a bandáže studeného kelímku

Většina segmentových studených kelímků používá masivní měděné dno a měděnou bandáž, která drží studený kelímek pohromadě. Úkolem je zjistit, jakým způsobem tyto konstrukční prvky ovlivní účinnost indukčního systému a navrhnout případné možnosti vedoucí ke zvýšení účinnosti indukčního systému.

K ověření byl vytvořen zjednodušený model studeného kelímku o průměru trubic 10 mm (D10/8) s měděnou přírubou ve spodní části trubic (Obr. 4.8.2), která nahrazovala zároveň bandáž a dno. Díky této bandáži došlo k vzájemnému vyzkratování trubic. Získané výsledky byly porovnány s výsledky získanými pro stejnou konfiguraci bez měděné příruby (Obr. 4.8.1) a s induktorem bez kelímku.



Obr. 4.8.1 Model – 24 trubic

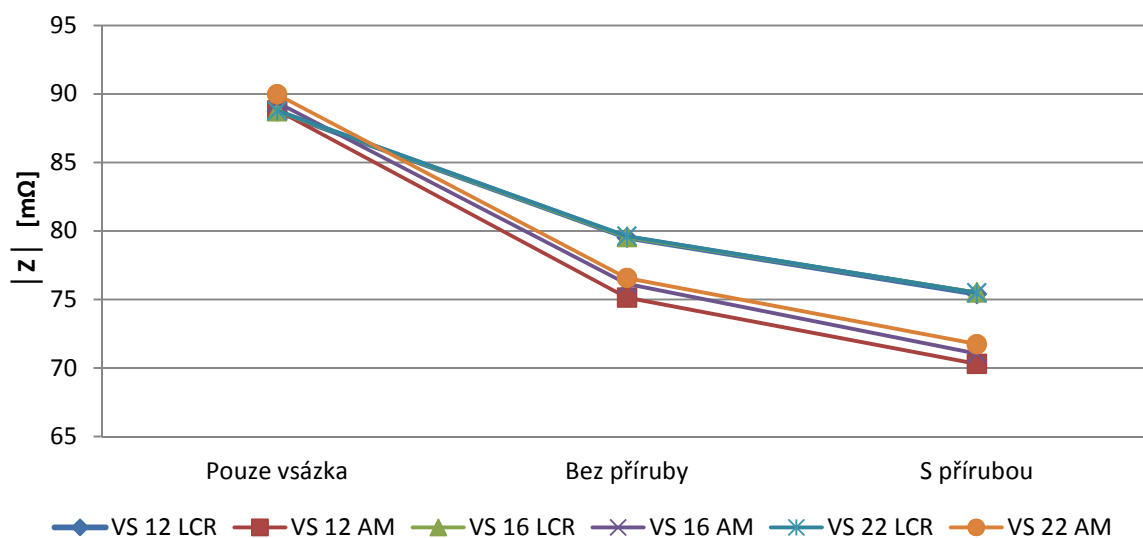


Obr. 4.8.2 Model - 24 trubic s měděnou přírubou

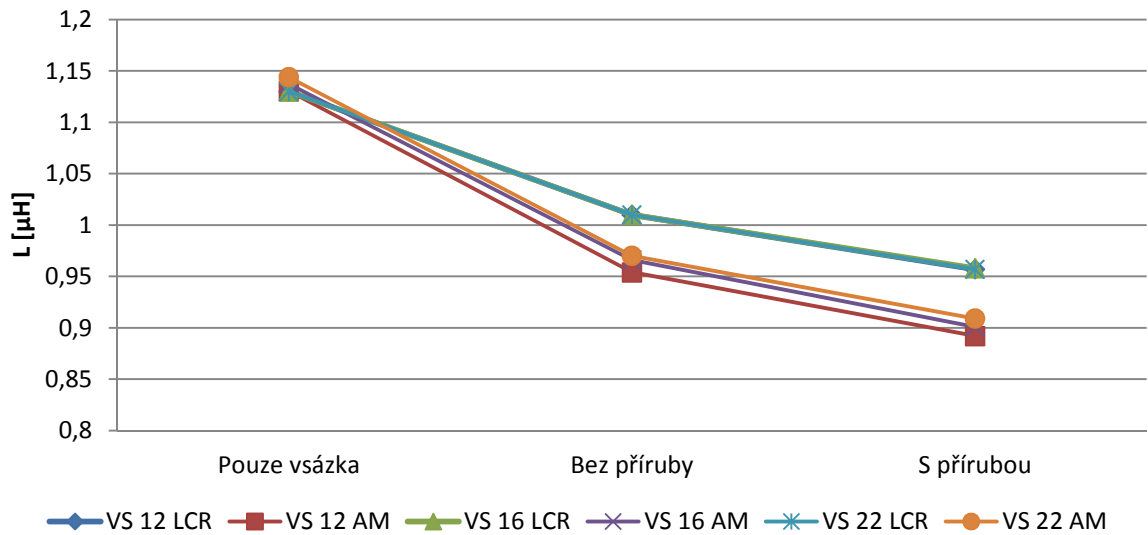
Pasivní parametry získané na základě měření pomocí LCR metru (LCR) a na základě výsledků získaných pomocí ANSYS EM (AM) jsou uvedeny v Tab. 4.8.1. Z výsledků je patrné, že použití měděné příruby ve spodní části modelu studeného kelímku způsobí výrazné zvýšení činného odporu modelu. Indukčnost nepatrně klesne. Hodnoty pasivních parametrů pro vybrané konfigurace jsou uvedeny na Obr. 4.8.3, Obr. 4.8.4 a Obr. 4.8.5.

Konfigurace	Vsázka	Změřené hodnoty (LCR metr)			Vypočítané hodnoty (AM)		
		Z [mΩ]	L [μH]	R [mΩ]	Z [mΩ]	L [μH]	R [mΩ]
Pouze vsázka	12	88,730	1,130	2,120	88,821	1,130	3,767
Pouze vsázka	16	88,741	1,130	2,510	89,393	1,137	4,514
Pouze vsázka	22	88,766	1,130	3,301	89,967	1,144	5,628
24 tr. bez příruby	-	78,483	0,998	4,680	73,498	0,935	3,840
24 tr. bez příruby	12	79,519	1,010	6,100	75,138	0,954	6,107
24 tr. bez příruby	16	79,555	1,010	6,550	76,140	0,966	6,850
24 tr. bez příruby	22	79,623	1,010	7,330	76,559	0,970	7,950
24 tr. s přírubou	-	74,778	0,950	5,510	69,401	0,882	4,774
24 tr. s přírubou	12	75,408	0,957	6,530	70,299	0,892	6,238
24 tr. s přírubou	16	75,513	0,958	6,840	71,048	0,901	6,735
24 tr. s přírubou	22	75,491	0,957	7,430	71,744	0,909	7,453

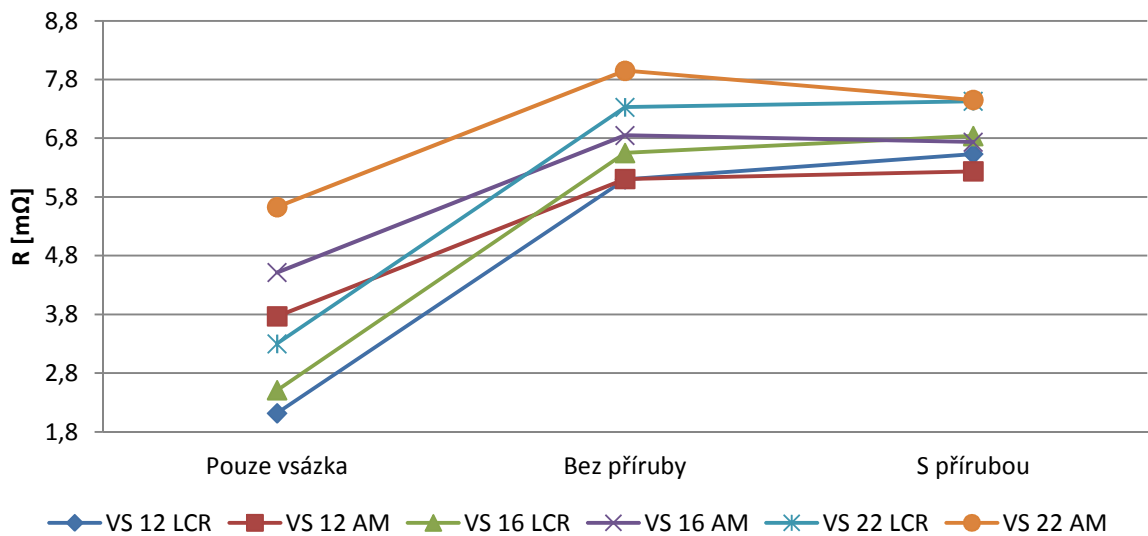
Tab. 4.8.1 Pasivní parametry pro vybrané konfigurace



Obr. 4.8.3 Hodnota impedance pro vybrané konfigurace



Obr. 4.8.4 Hodnota indukčnosti pro vybrané konfigurace

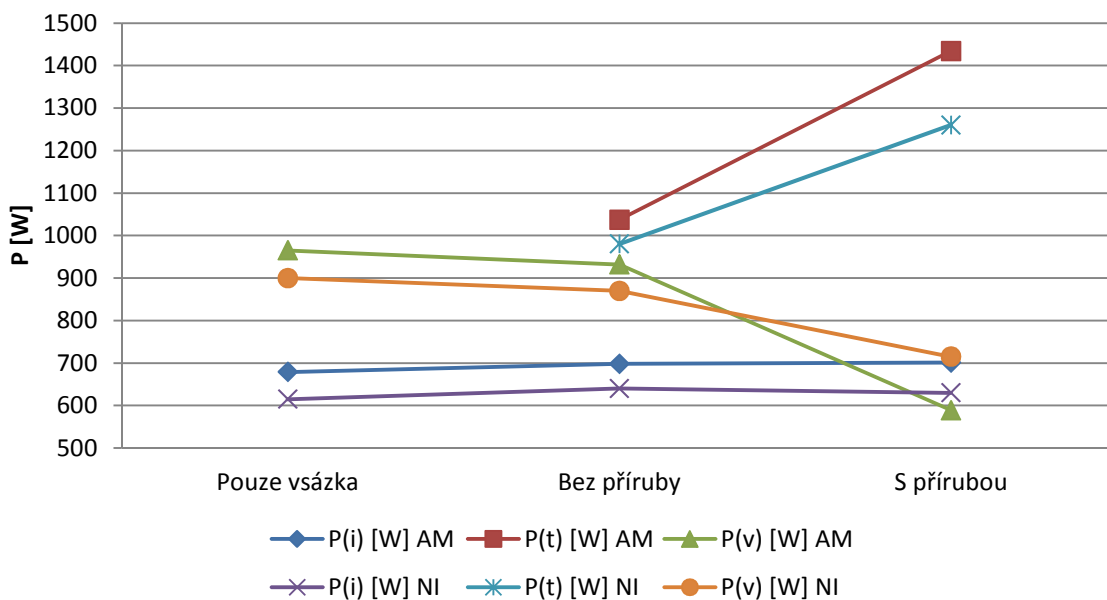


Obr. 4.8.5 Hodnota odporu pro vybrané konfigurace

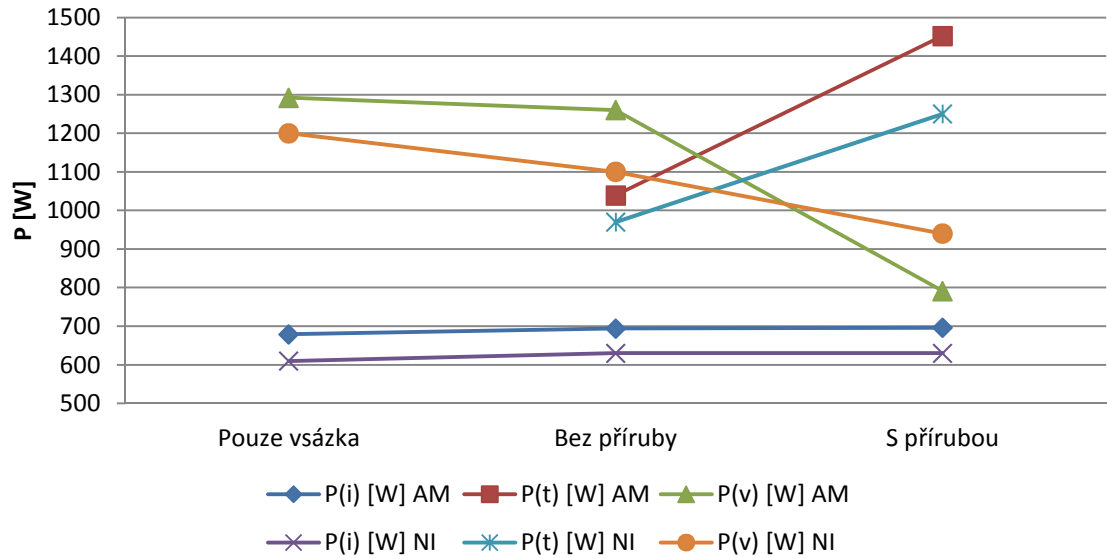
Výsledky ztrát získané na základě měření na funkčních vzorcích a na základě numerických simulací jsou uvedeny v *Tab. 4.8.2*. Rozložení ztrát v jednotlivých konstrukčních částech je uvedeno na *Obr. 4.8.6*, *Obr. 4.8.7* a *Obr. 4.8.8*. Účinnost je potom uvedena na *Obr. 4.8.9*.

Konfigurace	Průměr trubic [mm]	Průměr vsázky [mm]	Měření NI					Simulace AM				
			P_{t+i+v} [W]	P_t [W]	P_i [W]	P_v [W]	η [-]	P_{t+i+v} [W]	P_t [W]	P_i [W]	P_v [W]	η [-]
Pouze vsázka	-	12	1515	-	615	900	0,594	1644	-	679	965	0,587
Pouze vsázka	-	16	1810	-	610	1200	0,663	1971	-	679	1292	0,655
Pouze vsázka	-	22	2385	-	585	1800	0,754	2457	-	679	1778	0,723
24 trubic bez příruby	10	-	1580	950	630	-	-	1680	983	697	-	-
24 trubic bez příruby	10	12	2490	980	640	870	0,349	2667	1037	698	932	0,349
24 trubic bez příruby	10	16	2700	970	630	1100	0,407	2993	1039	694	1260	0,421
24 trubic bez příruby	10	22	3200	970	630	1600	0,500	3472	1046	696	1730	0,498
24 trubic s přírubou	10	-	1950	1320	630	-	-	2072	1386	686	-	-
24 trubic s přírubou	10	12	2605	1260	630	715	0,274	2724	1434	701	589	0,216
24 trubic s přírubou	10	16	2820	1250	630	940	0,333	2939	1452	696	791	0,269
24 trubic s přírubou	10	22	3170	1240	630	1300	0,41	3255	1477	696	1082	0,332

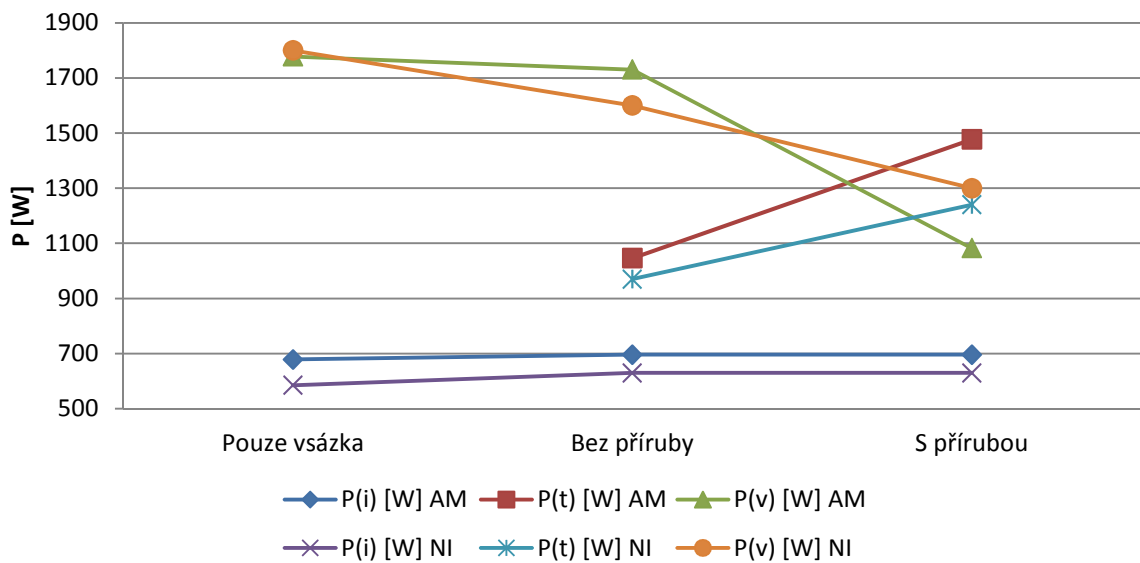
Tab. 4.8.2 Ztráty v indukčním systému vč. účinnosti



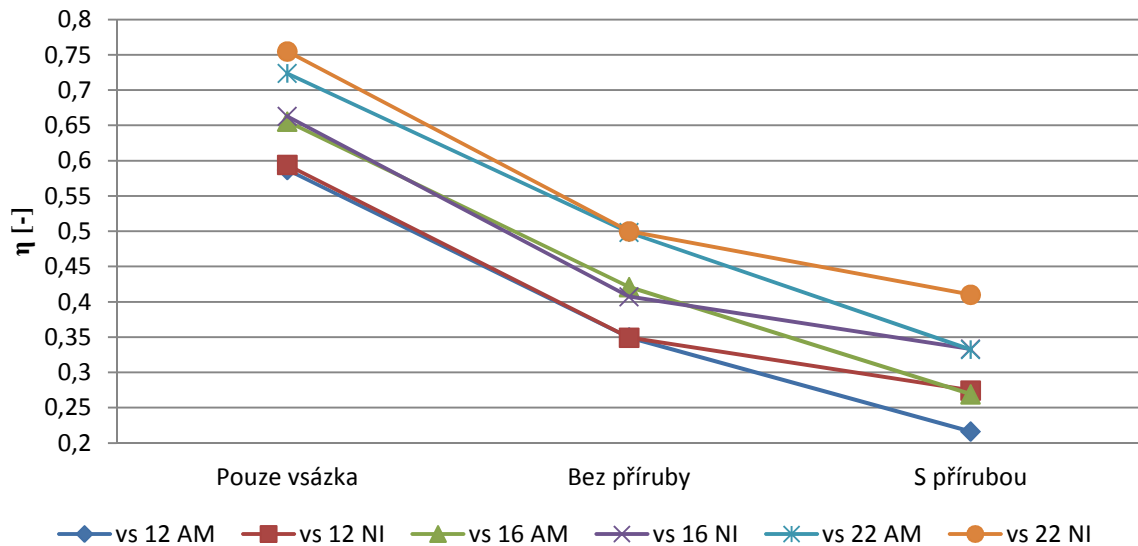
Obr. 4.8.6 Rozložení ztrát v indukčním systému - průměr vsázky 12 mm



Obr. 4.8.7 Rozložení ztrát v indukčním systému - průměr vsázky 16 mm



Obr. 4.8.8 Rozložení ztrát v indukčním systému – průměr vsázky 22 mm



Obr. 4.8.9 Účinnost indukčního systému pro jednotlivé konfigurace

Zhodnocení výsledků

Na základě provedených měření a simulací je možné konstatovat, že měděné dno a bandáž výraznou měrou způsobují snížení účinnosti indukčního zařízení. Dochází zde nejenom k ovlivňování ztrát ve vlastní konstrukci studeného kelímku, ale také k výraznému snížení výkonu přeneseného do vsázky. Vlivem elektricky vodivého spojení jednotlivých trubic pomocí příruby dojde nejenom k uzavírání vířivých proudů vlastní přírubou, ale i možnosti uzavírání axiálních proudů přes spoje mezi trubicemi v horní části modelu studeného kelímku.

Ztráty v induktoru jsou, stejně jako v předchozích případech, téměř konstantní. Ze získaných výsledků je patrná větší diference mezi hodnotou změřenou a hodnotou získanou na základě numerických simulací pro kelímek a vsázku. Tato odchylka byla pravděpodobně způsobena nedokonalým spojením některých párů trubic s měděnou přírubou funkčního vzorku.

Z výše zmíněných důvodů bych doporučoval používat k výrobě dna a bandáže elektricky nevodivé materiály, které by zamezily vzniku vířivých proudů po obvodu studeného kelímku. K výrobě dna lze použít teplotně odolné keramiky disponující velkou tepelnou vodivostí, tak aby bylo možné v dostatečné míře odvádět teplo ze dna studeného kelímku a zároveň nedošlo k jeho mechanickému poškození v průběhu tavby. K výrobě bandáže by bylo možné použít teplotně odolné stahovací pásky, které by pomohly držet konstrukci studeného kelímku pohromadě.

5. ANALYTICKÝ VÝPOČET ROZMĚRŮ STUDENÉHO KELÍMKU PRO TAVBU Al_2O_3 POMOCÍ HFG160

V této části práce je navržen komplexní postup pro výrobu studeného kelímku, který byl použit u zařízení umístěného v hale F2 (VTP Plzeň). Jedná se o zařízení HFG160 instalované slovinskou společností Induktio d.o.o., která dodávala kompletní zařízení pro vysokoteplotní tavení oxidů kovů ve studeném kelímku [32]. Pro danou aplikaci bylo nutné navrhnout a vyrobit vlastní studený kelímek, který by odpovídal požadovaným parametrům.

Při orientačním návrhu se vychází z parametrů instalované vysokofrekvenčního zdroje a z tepelného toku, který je potřebný k roztavení příslušného oxidu kovu (v našem případě Al_2O_3). Z minimálního tepelného toku lze vypočítat maximální možné rozměry studeného kelímku. V rámci výpočtu je uvažován koeficient zatížení zdroje, tak aby byl dodržen dostatečný prostor pro regulaci zdroje během tavy.

Při analytickém výpočtu byly uvažovány materiálové parametry Al_2O_3 v roztaveném stavu při teplotě 2500 °C. Chladicí trubice byly na základě poznatků z předchozích kapitol zvoleny kruhového průřezu o průměru 1 cm a tloušťce stěny 2 mm (s ohledem na bezpečný provoz). Pro výrobu dna a bandáže byla použita měď. Chladicí trubice musí mít dostatečnou délku tak, aby je bylo možné upevnit k masivnímu měděnému dnu pomocí měděné bandáže a bylo možné provést jejich připojení k chladicímu systému studeného kelímku. Studený kelímek je z bezpečnostního hlediska nutné volit s dostatečným přesahem tak, aby nedocházelo k úniku vsázky z kelímku. U kelímků malých průměrů se nepoužívá aktivně chlazené dno. Nejčastěji se dno vyrábí z mědi a jeho výška se pohybuje okolo 10 cm.

Parametry potřebné k výpočtu rozměrů studeného kelímku jsou uvedeny v *Tab. 5.1*. Parametry zařízení byly získané na základě technických podkladů dodaných výrobcem zařízení.

Popis	Označení	Velikost	Jednotky
Činný příkon zdroje	P_{zD}	160	kW
Výstupní napětí zdroje	U_z	500 – 10000	V
Pracovní teplota Al_2O_3	t_{prac}	2500	°C
Měrný tepelný tok k roztavení Al_2O_3	q	500	$kW.m^{-2}$
Uvažovaná vodivost Al_2O_3 v roztaveném stavu	γ	66,67	$S.m^{-1}$
Poměr mezi průměrem a výškou vsázky	d_2/h_2	1	-
Koeficient zatížení zdroje	k_z	0,4/40	-%
Velikost mezery mezi trubicemi	m_t	0,5	mm

Tab. 5.1 Parametry nezbytné k výpočtu rozměrů studeného kelímku [20], [32], [33]

Použití indexů je podle metodiky uvedené v Tab. 5.2.

Popis	Index
Induktor	1
Vsázka	2
Chladicí trubice	3
Dno kelímku	4
Přepočítaná hodnota	'

Tab. 5.2 Metodika indexace

Maximální ohřívání povrch vnějšího pláště vsázky (bez podstav) lze vypočítat na základě rovnice (5.1).

$$S_{P2} = \frac{P_z * k_z}{q} = \frac{160 * 10^3 * 0,4}{500 * 10^3} = 0,128 \text{ m}^2 \quad (5.1)$$

$$S_{P2} = 2\pi * r_2 * h_2 \quad (5.2)$$

Dále vyjádříme poměr mezi průměrem a výškou vsázky

$$\frac{d_2}{h_2} = \frac{2r_2}{h_2} = 1 \quad (5.3)$$

Vyjádřením h_2 z rovnice (5.3) a dosazením do rovnice (5.2) získáme vztah (5.4), ze kterého vyjádříme poloměr vsázky (5.5)

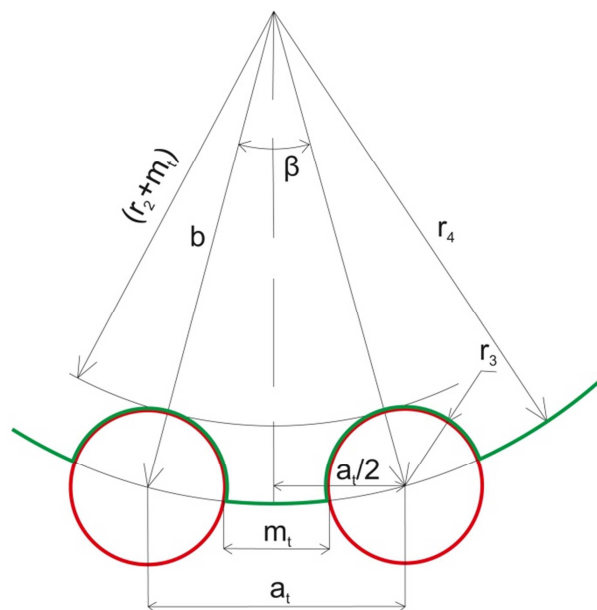
$$S_{P2} = 2\pi * r_2 * h_2 = 4\pi * r_2^2 \quad (5.4)$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{S_{P2}}{4\pi}} = \sqrt{\frac{0,128}{4\pi}} = 0,101 \text{ m} = 10,1 \text{ cm} \quad (5.5)$$

Výška vsázky je potom vypočítána jako dvojnásobek poloměru vsázky (5.6).

$$h_2 = 2r_2 = 2 * 0,101 = 0,202 \text{ m} = 20,2 \text{ cm} \quad (5.6)$$

Z vypočtených hodnot je nutné určit počet trubic, tak aby se jednalo o celé sudé číslo (jednou trubicí proudí voda vzhůru, druhou se potom vrací zpět). Zároveň je nezbytné dodržet požadovanou mezeru mezi jednotlivými trubicemi ($m_t = 0,5$ mm). Geometrická dispozice je uvedena na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 Geometrická dispozice

Délku přepony b vypočítáme dle vztahu (5.7) jako součet poloměru vsázky r_2 a poloměru trubice r_3 a posunutím o mezeru m_t tak, aby bylo následně možné dodržet příslušnou mezeru mezi trubicemi studeného kelímku.

$$b = r_2 + r_3 + m_t = 0,101 + 0,005 + 0,0005 = 0,1065 \text{ m} = 10,65 \text{ cm} \quad (5.7)$$

Vzdálenost $a_t/2$ je dána vztahem (5.8), kde a_t představuje vzdálenost mezi středy dvou trubic při respektování požadované mezery mezi nimi.

$$\frac{a_t}{2} = \frac{2r_3 + m_t}{2} = \frac{2 * 0,005 + 0,0005}{2} = 0,00525 \text{ m} = 0,525 \text{ cm} \quad (5.8)$$

Následně provedeme výpočet úhlu β mezi trubicemi pomocí goniometrické funkce (5.9)

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{\frac{a_t}{2}}{b} = \frac{0,00525}{0,107} = 0,04907 \quad (5.9)$$

$$\beta = 5,6^\circ$$

Počet trubic určíme ze vztahu (5.10)

$$PT = \frac{360^\circ}{\beta} = \frac{360^\circ}{5,6^\circ} = 64,28 \quad (5.10)$$

Nyní je zapotřebí upravit výpočet poloměru vsázky r_2 tak, abychom dostali správný počet trubic, tj. 64 trubic. Úhel β' je pak upravený úhel pro 64 trubic a získáme ho dle vztahu (5.11)

$$\beta' = \frac{360^\circ}{PT'} = \frac{360^\circ}{64} = 5,625^\circ \quad (5.11)$$

Na základě nového úhlu vypočítáme novou délku strany b'

$$b' = \frac{\frac{a_t}{2}}{\sin \frac{\beta'}{2}} = \frac{0,00525}{0,0490} = 0,1071 \text{ m} = 10,71 \text{ cm} \quad (5.12)$$

Upravený poloměr r_2' získáme dle vztahu (5.13)

$$r_2' = b' - m_t - r_3 = 0,1071 - 0,0005 - 0,005 = 0,1016 \text{ m} = 10,16 \text{ cm} \quad (5.13)$$

Upravená výška vsázky h_2' je pak dána vztahem (5.14).

$$h_2' = 2 * r_2' = 2 * 0,1016 = 0,2032 \text{ m} = 20,32 \text{ cm} \quad (5.14)$$

Výška induktoru by potom měla být o 10 % vyšší než výška vsázky (5.15)

$$h_1 = h_2' * 1,1 = 0,2032 * 1,1 = 0,2235 \text{ m} = 22,35 \text{ cm} \quad (5.15)$$

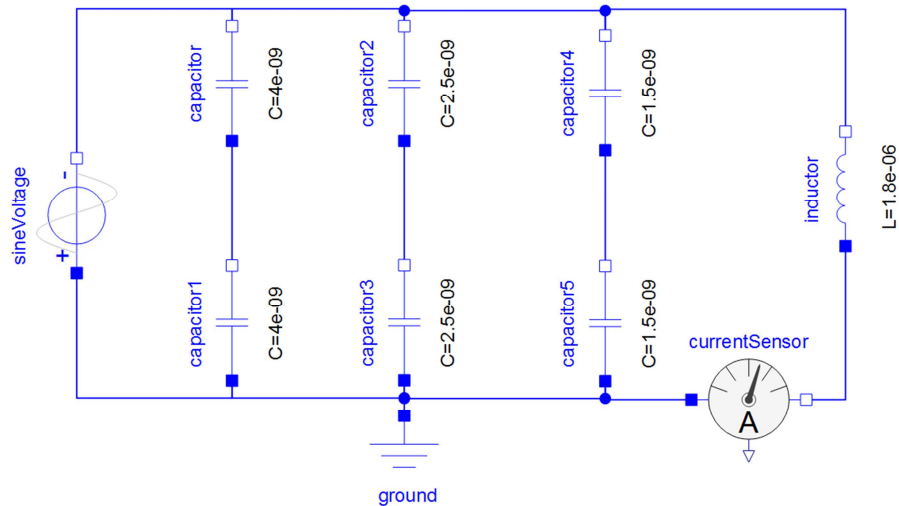
V dalším kroku je nezbytné určit poloměr dna studeného kelímku dle rovnice (5.16). Výška dna byla stanovena na 10 cm. Dno tvoří zároveň oporu pro chladící trubice a tvoří tak nezbytnou konstrukční část.

$$r_4 = r_2' + m_t + r_3 = 0,1016 + 0,0005 + 0,005 = 0,1071 \text{ m} = 10,71 \text{ cm} \quad (5.16)$$

Stanovení napájecího proudu a frekvence vysokofrekvenčního zdroje

Klíčovým parametrem rozhodujícím o úspěšnosti tavy elektromagnetickou indukcí je hloubka vniku (a). Hloubka vniku je ovlivněna zvolenou frekvencí a materiálovými parametry. Vztah pro její výpočet je uveden v rovnici (5.18). Praktické poznatky ukazují, že by se poloměr vsázky pro efektivní ohřevy pohybovat v rozmezí 2,5-3 hloubky vniku [19].

Potřebné parametry lze určit z rezonančního obvodu instalovaného u daného indukčního zařízení. Uvažovaný rezonanční obvod vč. parametrů vytvořený v SystemModeler je uveden na Obr. 5.2.



Obr. 5.2 Rezonanční obvod HFG160

Oscilační obvod zdroje je tvořen celkem šesti kondenzátory a indukčností, která reprezentuje použitý induktor, studený kelímek a vsázku. U_z představuje napětí zdroje. Aby bylo dosaženo optimálního provozu při tavbě, je nutné provozovat obvod v rezonanci tak, aby nedocházelo k přetěžování jednotlivých komponentů systémů a docházelo k přesunu energie mezi kondenzátory a cívkou. Ve skutečnosti není činný odpor nulový. Celkovou kapacitu obvodu vypočítáme z rezonančního obvodu ($C = 4 \text{ nF}$).

Rezonanční frekvenci obvodu vypočítáme dle Thomsonova vztahu (5.17)

$$f = \frac{1}{2\pi * \sqrt{L * C}} = \frac{1}{2\pi * \sqrt{1,8 * 10^{-6} * 4 * 10^{-9}}} = 1,876 \text{ MHz} \quad (5.17)$$

Ze spočtené frekvence určíme hloubku vniku taveného materiálu (5.18)

$$a_2 = \sqrt{\frac{2}{2\pi * f * \gamma * \mu_0}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi * 1,876 * 10^6 * 66,67 * 4\pi * 10^{-7}}} = 0,045 \text{ m} \quad (5.18)$$

Z napětí zdroje (uvažováno 40 % zatížení z max. napětí) vypočítáme proud induktorem, který je potřebný pro numerické simulace (5.19).

$$I_2 = \frac{U_z * k_z}{X_L} = \frac{10000 * 0,4}{2\pi * f * L} = \frac{4000}{2\pi * 1,876 * 10^6 * 1,8 * 10^{-6}} = 188,62 \text{ A} \quad (5.19)$$

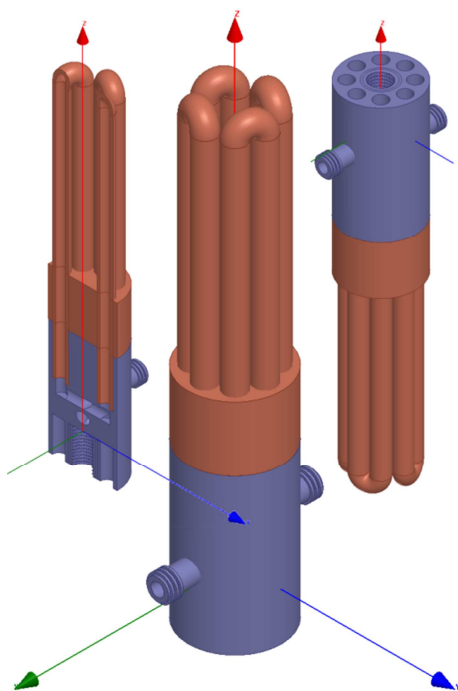
Na základě výše zmíněné postupu byl v programu Wolfram Mathematica vytvořen skript, který výpočty zautomatizoval. Nyní je možné provádět návrhy designu segmentového studeného kelímku téměř okamžitě.

6. VLASTNÍ KONSTRUKCE STUDENÝCH KELÍMKŮ URČENÝCH K LABORATORNÍMU POUŽITÍ

Kapitola popisuje vlastní experimentální a inovativní design studeného kelímku. Jedná se o dva funkční vzorky studeného kelímku. Prvním je segmentový studený kelímek s vrtaným dnem. Druhým je pak frézovaný studený kelímek vytvořený z jednoho kusu měděného válce. Kolektor pro chladící vodu je v obou případech vytvořen pomocí 3D tisku. Funkční vzorky byly vytvořeny za účelem otestování numerických simulací a otestování zdroje pro indukční ohřevy umístěného v naší laboratoři. Informace o možnostech 3D tisku chladících kolektorů jsou uvedeny také v této kapitole. Na závěr je zmíněna konstrukce segmentového studeného kelímku určeného pro použití v zařízení HFG160.

6.1. SEGMENTOVÝ STUDENÝ KELÍMEK S VRTANÝM DNEM

Segmentový studený kelímek s vrtaným dnem inovuje tradiční uspořádání studeného kelímku. Hlavní inovace spočívá ve vrtaném dně a použití 3D tištěného kolektoru. Kelímek je tvořen čtyřmi páry dutých trubic, které procházejí masivním měděným dnem. Chladící trubice jsou upevněny přímo do 3D tištěného kolektoru chladící vody. Kolektor je opatřen přírubami, které umožňují připojení chladící vody. 3D model je uveden na *Obr. 6.1.1*. Reálný výrobek je pak na *Obr. 6.1.2*.



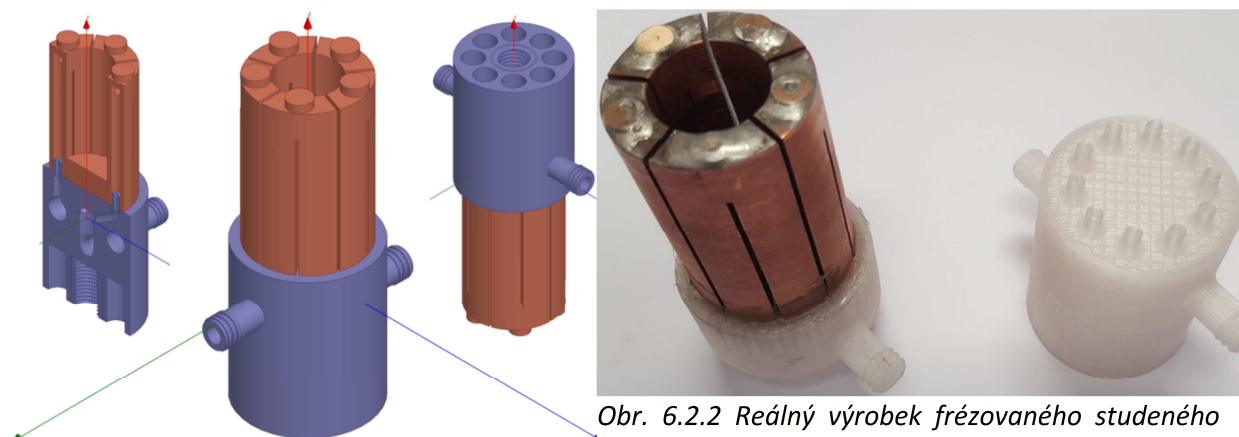
Obr. 6.1.1 3D model segmentového studeného kelímku s vrtaným dnem



Obr. 6.1.2 Reálný výrobek studeného kelímku s vrtaným dnem a 3D tištěným kolektorem

6.2. FRÉZOVANÝ STUDENÝ KELÍMEK

Frézovaný studený kelímek je vyroben z jednoho kusu měděného válce. Kolektor je stejně v předchozím případě vytvořen pomocí 3D tisku. Hlavní výhodou oproti ostatním uspořádáním je kompaktní provedení s výraznou redukcí Joulových ztrát ve dně studeného kelímku. Konstrukčně je frézovaný kelímek tvořen čtyřmi páry frézovaných chladících smyček, které jsou ze spodní části provrtané. Mezera mezi jednotlivými chladícími smyčkami je frézována. V každé vrcholku chladícího segmentu je vyvrtán otvor, který umožňuje průchod vody chladící smyčkou. Otvor je na povrchu zaslepen zátkou. Dno je integrované. 3D design frézovaného kelímku je na *Obr. 6.2.1*. Reálný funkční vzorek je na *Obr. 6.2.2*.



Obr. 6.2.1 3D model frézovaného studeného kelímku

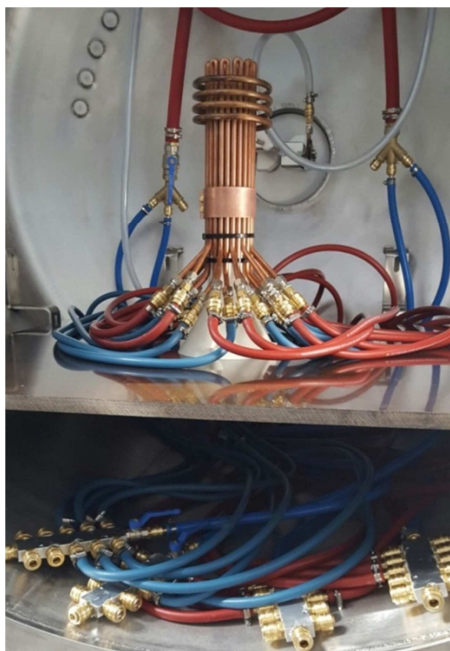
Obr. 6.2.2 Reálný výrobek frézovaného studeného kelímku s 3D tištěným kolektorem

6.3. 3D TISK PRO VÝROBU KOLEKTORŮ

U menších studených kelímků nastává problém s připojením chladících smyček. U výše zmíněných kelímků by ani klasické připojení pomocí hadic nebylo vzhledem k velice malým rozměrům možné. Proto jsem přistoupil k výrobě kolektorů pomocí 3D tisku. Pro tisk byla používána jedna z nejlevnějších 3D tiskáren od společnosti Průša Research. Největším problémem při použití 3D tisku bylo zachování těsnosti kolektoru a vytvoření kvalitního spoje mezi chladící smyčkou a kolektorem. Jako nejvýhodnější se jeví využití epoxidové pryskyřice, která velice dobře zaceluje póry vzniklé při 3D tisku. Pro tisk kolektorů je vhodné použít filament na bázi PET nebo ABS. Testován byl také materiál PLA, který má lepší kvalitu tisku, ale při delším používání kolektoru docházelo k samovolnému odlamování přírub kolektoru.

6.4. KONSTRUKCE SEGMENTOVÉHO STUDENÉHO KELÍMKU PRO HFG160

Segmentový studený kelímek pro vysokofrekvenční zdroj HFG160 byl vytvořen dle klasického uspořádání. V době realizace nebylo možné zakoupit materiály pro bandáž a dno, které by umožnily provést optimalizaci ztrát uvedenou v kapitole 4.8. To znamená, že chladicí segmenty jsou tvořeny trubicemi kruhového průřezu. Dno je zhotoveno z masivního měděného válce, který spolu s chladicími trubicemi k němu připevněnými umožňuje velice dobrý odvod tepla ze dna studeného kelímku. Vzhledem k rozměrnější konstrukci je výhodnější použít k připojení chladících segmentů hadic a rychlospojek. Celá sestava je potom umístěna do polohovacího zařízení, které umožňuje pohyb studeného kelímku uvnitř induktoru. Hadice a kolektory musí být důkladně chráněny pro případ úniku taveniny z kelímku. Studený kelímek zhotovený pro generátor HFG 160 je na Obr. 6.4.1.



Obr. 6.4.1 Studený kelímek pro generátor HFG 160

Testovací tavba byla provedena pro směs Al_2O_3 a ZrO_2 . Startovacím materiálem pro tuto směs může být metalické zirkonium nebo hliník. V našem případě byly použity kousky hliníku. Směs musí být před tavbou důkladně promíchaná. Vnitřní část studeného kelímku a dna se potře touto směsí rozmíchanou s vodou. Tím dojde k vytvoření izolační vrstvy mezi trubicemi studeného kelímku. Směs se umístí zhruba do poloviny kelímku a důkladně upěchuje. Poté se vloží startovací materiál. Následně dojde k překrytí startovacího materiálu tavenou směsí. Poté následuje tavení, při kterém dochází k promíchávání taveniny pomocí elektrodynamických sil. Výsledný tavený produkt je uveden na Obr. 6.4.2.



Obr. 6.4.2 Výsledná tavená směs Al_2O_3 a ZrO_2

Na základě kontroly výsledného produktu bylo zjištěno, že došlo k dostatečnému promíchání taveniny a k rovnoměrnému rozložení “skull” vrstvy při vnitřním povrchu studeného kelímku díky rovnoměrnému chlazení segmentů. Lze tedy konstatovat, že navržený a vyrobený segmentový studený kelímek funguje dle teoretických předpokladů.

7. ZÁVĚR

Předkládaná dizertační práce je věnována problematice vysokoteplotního tavení elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Byla zde popsána základní konstrukční uspořádání studeného kelímku (kompaktní a segmentové provedení). Velký důraz byl kladen na různé možnosti startovací fáze.

V rámci dizertační práce jsem vytvořil numerické modely respektující elektromagnetické a teplotní pole pro kompaktní a segmentový studený kelímek. V případě startovací fáze byly zhodnoceny možnosti vložení startovacího materiálu do vsázky s ohledem na rozložení elektromagnetického a teplotního pole. Na základě provedených simulací byla stanovena určitá doporučení, která umožnila tento energeticky náročný proces do jisté míry zefektivnit. Navržená struktura jednotlivých modelů vytvořených v software ANSYS (APDL) dovoluje provádět dílčí i rozsáhlejší úpravy geometrie a modifikovat materiálové vlastnosti jednotlivých technologických částí. Na základě výpočtů pro různé varianty lze optimalizovat návrh studeného kelímku. Vytvořené numerické modely lze pomocí parametrů velice rychle rekonfigurovat pro potřebné aplikace. Na základě provedené studie lze konstatovat, že poloha a tvar startovacího materiálu poměrně výrazně ovlivní rozložení elektromagnetického a teplotního pole (potvrzena pracovní hypotéza **a**) uvedená v podkapitole 1.2).

V další části jsem zkoumal vliv různých tvarů elementů studeného kelímku (chladící element kruhového průřezu, obdélníkového průřezu a průřezu ve formě trapezoidu). Na základě provedené analýzy byl vyhodnocen optimální tvar průřezu chladícího elementu pro uvažované rozměry studeného kelímku. Optimální pro danou konfiguraci je kruhový průřez elementu studeného kelímku. Rozdílný průřez jednotlivých elementů má vliv na ztráty v něm generované a nelze tvrdit, že tento vliv je zanedbatelný. Do jisté míry tím byla vyvrácena pracovní hypotéza **b**) uvedená v podkapitole 1.2. Při návrhu konstrukce studeného kelímku je nutné vycházet nejen ze simulací, ale zejména také z konstrukčních možností tak, aby bylo možné studený kelímek skutečně vyrobit.

Pro segmentový kelímek s obdélníkovými chladícími elementy jsem provedl zhodnocení vlivu počtu chladících elementů na ztráty generované ve studeném kelímku a zhodnocení vlivu počtu chladících elementů na výkon přenesený do vsázky. Na základě dosažených výsledků bylo zjištěno, že z hlediska účinnosti indukčního systému lepší používat větší počet chladících elementů při zachování stejného průměru kelímku (potvrzena hypotéza **c**) uvedená v podkapitole 1.2 pro obdélníkový průřez elementu).

V rámci dizertační práce jsem vytvořil měřicí systém pro analýzu a sběr dat z indukčních zařízení postavený na hardwarové platformě CompactRIO od společnosti National Instrument. Vytvořený měřicí systém pak umožnil částečné ověření numerických modelů. Měřicí systém byl navržen s ohledem na velkou variabilitu systému tak, aby jej bylo možné aplikovat i na jiná indukční zařízení převážně experimentálního charakteru. Systém by bylo vhodné použít i na zařízení instalované ve vědecko-technickém parku v Plzni (zařízení HFG160).

Pro ověření numerických simulací bylo nutné vyrobit celou řadu funkčních vzorků (modelů). K výrobě chladících kolektorů byl vytvořen technologický postup, který umožnil použít 3D tisk v kombinaci se zalévací epoxidovou pryskyřicí. Uvedený postup je možné aplikovat i v technické praxi pro větší modely chladících kolektorů. Takto vytvořené kolektory vydrží tlak až 3-4 Bar a teplotu do 90 °C.

Díky navrženému měřicímu systému, vytvořeným funkčním vzorkům (modelům) a numerickým simulacím v ANSYS EM bylo možné provést poměrně detailní analýzu vlivu jednotlivých konstrukčních částí segmentového studeného kelímku (kelímek vytvořený z trubic) na účinnost tavení.

V první části analýzy byl zkoumán vliv počtu trubic identického průměru (rozdílný průměr kelímku) včetně vlivu na přenesený výkon do vsázky (kalorimetru).

Druhá část analýzy respektovala vliv elektricky vodivého spojení mezi trubicemi. Na základě získaných výsledků je zřejmé, že toto spojení není potřeba optimalizovat. Ztráty generované v modelu bez elektricky vodivého spojení a s elektricky vodivým spojením jsou téměř identické (potvrzena hypotéza **d**) uvedená v podkapitole 1.2).

Ve třetí části analýzy byl sledován vliv počtu trubic o rozdílném průměru (identický průměr kelímku) a jejich vliv na účinnost indukčního systému. Díky dosaženým výsledkům je možné říci, že počet trubic rozdílného průměru (při zachování vnějšího průměru kelímku) výraznou měrou ovlivní ztráty v nich generované (potvrzena hypotéza **c**) uvedená v podkapitole 1.2 pro kruhový průřez elementu).

Čtvrtá část analýzy zohledňuje vliv měděné bandáže a měděného dna, které výrazně ovlivní ztráty generované v kelímku a ve vsázce (kalorimetru). Na funkčním vzorku (modelu) s měděnou přírubou bylo zjištěno, že měděná bandáž a měděné dno způsobí podstatný nárůst ztrát v kelímku (včetně dna) a zároveň dojde k výraznému poklesu výkonu přeneseného do vsázky (kalorimetru). Měděné dno a bandáž způsobují podstatný problém v konstrukci běžně používaných segmentových studených kelímků (potvrzena hypotéza **e**) uvedená v kapitole 1.2). Tento konstrukční problém je

možné vyřešit pomocí dna z keramiky s velkou tepelnou vodivostí a pomocí elektricky nevodivé bandáže.

V závěru práce je uveden jednoduchý analytický výpočet pro návrh studeného kelímku pro zařízení HFG160, který umožní snadné určení maximálních rozměrů studeného kelímku. V rámci práce je dále zmíněna celá řada funkčních vzorků a postupů, které lze při realizaci studeného kelímku aplikovat.

7.1. VLASTNÍ PŘÍNOS PRÁCE (SHRnutí)

Vlastní přínos práce jsem shrnul do následujících bodů:

- a) Vytvořil jsem základní numerické modely respektující startovací fázi (rozložení elektromagnetického a teplotní pole) včetně vlivu polohy startovacího materiálu uvnitř taveniny.
- b) Objasnili jsem vliv tvaru elementu segmentového studeného kelímku na generované ztráty a výkon přenesený do vsázky včetně vlivu počtu obdélníkových elementů.
- c) Vytvořil jsem měřicí systém pro analýzu a sběr dat z indukčního zařízení se studeným kelímkem umožňující značnou rekonfiguraci systému.
- d) Zhodnotil jsem vliv dílčích konstrukčních částí segmentového studeného kelímku s kruhovým průřezem (vliv počtu elementů, vliv spoje mezi elementy, vliv bandáže a dna) – ověřeno měřeními a simulacemi.
- e) Navrhl jsem technologický postup výroby chladících 3D tištěných kolektorů a funkčních vzorků studeného kelímku.
- f) Formuloval jsem základní rovnice pro analytický výpočet umožňující snadný návrh segmentového kelímku pro zařízení HFG160.

7.2. DALŠÍ MOŽNOSTI VÝZKUMU

Další možností optimalizace segmentového studeného kelímku jsou úzce spjaté s uvedením zařízení HFG160 do ostrého provozu. Numerické modely bude možné ověřit i při vyšších frekvencích. V případě reálného provozu zařízení HFG160 bude možné provádět rozsáhlý materiálový výzkum spojený s tavením elektricky nevodivých materiálů (oxidů). Na základě poznatků získaných z reálných měření bude možné vytvořit a verifikovat komplexnější numerické modely zohledňující i proudění uvnitř studeného kelímku.

Dále bych doporučoval mnou navržený měřicí systém implementovat na zařízení HFG160, což by umožnilo preciznější měření především neelektrických veličin a přesnější vyhodnocení ztrát v jednotlivých komponentech indukčního systému a zlepšení sběru a vyhodnocení dat. Současný systém instalovaný na zařízení HFG160 umožňuje sledovat pouze aktuální hodnoty měřených veličin a není možné sledovat například průběhy teplot a ztrát v závislosti na čase. Zároveň by bylo možné měřit i na dalších komponentech indukčního systému, kde v současné době není toto měření nainstalováno.

Dále by bylo vhodné vytvořit 3D tištěný kolektor podle postupu uvedeného v kapitole 6.3 i pro zařízení HFG160 a důkladně ho otestovat při reálném provozu. Pokud by však došlo k poruše chladicího systému, popřípadě vniku vody do taveniny, způsobilo by to značné komplikace v průběhu tavby a vedlo by to k poškození dílčích částí zařízení. Z výše zmíněného důvodu je nutné při implementaci tohoto konstrukčního řešení postupovat velice opatrně. V současné době se o aplikaci 3D tisku na chladicí kolektory tohoto typu nikdo nepokusil.

Do budoucna by bylo vhodné laboratoř vybavit zařízením, které by umožňovalo alespoň částečně měřit proudění uvnitř vsázky. Na základě měření a simulací proudění by bylo možné vytvářet velice komplexní studie.

LITERATURA

- [1] SIEMENS & HALSKE. Verfahren zum Schmelzen schwersmeizbarer Metalle, insbesondere von Tantal, Wolfram, Thorium oder Legierungen dieser Metalle in Einem wassergekühlten Behälter, German, Pat. 518.499, 1931.
- [2] STERLING, H.F., WARREN, R.W. Brit.Pat 871156/7/8 Nov., 1957.
- [3] STERLING, H.F., WARREN, R.W. Cold Crucible for High-Temperature Melting Processes, Nature 192, 1961.
- [4] STERLING, H.F., WARREN, R.W. High Temperature Melting without Contamination in Cold Crucibles, Metallurgia 67, 1963.
- [5] REBOUX, J. US Patent 3,461,215 filed 27, 1967 August 1969.
- [6] PETROV, Y.B., RATNIKOV, D.G. Cold crucibles, Metallurgy 1972.
- [7] MÜHLBAUER, A. History of Induction Heating and Melting, Germany: Vulkan-Verlag GmbH, 2008. 212 s.
- [8] BYNDIN, Y.M., DOBROVOLSKAYA, V.I., RATNIKOV, D.G. Induction Heating in Manufacturing of especially Pure Materials, Leningrad, Mashinostroenie, 1980.
- [9] MOULIN, J., REBOUX, J. Nouveaux développements dans la fusion électrique des verres réfractaires, verres et réfractaires, 26, N 4-5, 1972.
- [10] NACKE, B., BEHRENS, T., KUDRYASH, M. Schmelzen von Oxiden mit der Skull-Melting-Methode. [Konferenz] // Workshop Elektroprozessstechnik – Erwärmen und Schmelzen mit elektrothermischen und alternativen Verfahren. - Ilmenau : TU Ilmenau, 2004.
- [11] JIŘINEC, S. Přenos elektrické energie do vsázky při tavení elektromagnetickou indukcí. Plzeň, 2014. Práce ke státní doktorské zkoušce. Fakulta elektrotechnická ZČU. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.
- [12] JEKABSONS, N., JAKOVICS, A., NACKE, B. Model of Protective (Skull) Layer in the Inductor-Crucible Furnace [Konferenz] // International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing. - Hanover, 2003.
- [13] Nacke, B. Modelling of Key Factors in Melting of Oxides in Inductor Crucible [Konferenz] // Proceedings of the Electromagnetic Processing of Materials International Conference. - Riga, 2003.
- [14] NIEMANN, B., NACKE, B., KUDRYASH, M. Investigation of mass and heat transfer of molten glass in the inductor crucible [Konferenz] // Proceedings of International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing (MEP2008). - Hanover, 2008.
- [15] JANDA, M. Přednosti tavení materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku. Plzeň, 2011. 60 s. Diplomová práce. ZČU, Fakulta elektrotechnická.

- [16] INDUCTION MELTING FURNACE WITH COLD CRUCIBLE. www.induction-heating.com [online]. [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: <http://www.induction-heating.com.cn/Technology/INDUCTION-MELTING-FURNACE-WITH-COLD-CRUCIBLE-163.html>
- [17] TORGE, B. Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2007
- [18] ROT, D. Efektivní řešení sdružených problémů v elektrotepelné technice. Plzeň, 2005. Písemná práce k SDZ. Západočeská univerzita v Plzni.
- [19] LANGER, E. Elektrotepelná technika, Ediční středisko VŠSE, Plzeň 1974.
- [20] POZNYAK, I. Indukční tavení ve studeném kelímku (konzultace), Plzeň 2011-2016.
- [21] UMBRASHKO, Andrejs, et al.: Experimental investigations and numerical modelling of the melting process in the cold crucible, COMPEL [online]. 2005, 24, [cit. 2014-02-01]. Dostupný z WWW: <http://www.modlab.lv/publications/2005/Padova_LES.pdf>.
- [22] TORGE, B. Prozessorientierte Analyse der induktiven Skull-Melting-Technologie bei Verwendung eines Transistorumrichters, Cuvillier Verlag, Göttingen 2007.
- [23] RUDNEV, V., LOVELOSS, D., COOK, R., BLACK, M. Handbook of induction heating, New York: Marcel Dekker, 2003, 777 str.
- [24] ANSYS® Academic Research, Release 14.5, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc.
- [25] POLÁK, J. Variační principy a metody teorie elektromagnetického pole. 1. vyd. Praha: Academia, 1988. 311 s.
- [26] KÜPFMÜLLER, K., MATHIS, W., REIBIGER, A. Theoretische Elektrotechnik: eine Einführung. 16., vollst. neu bearb. und aktualisierte Aufl. Berlin: Springer, ©2005. XXI, 733 s. Springer-Lehrbuch. ISBN 3-540-20792-9.
- [27] BEHRENS, T., KUDRYASH, M., NACKE, B., LOPUKH, D., MARTYNOV, A., LOGINOV, I. Induction Skull Melting of Y 2O 3-BaO-CuO in a Cold Crucible. [Konference] // Proceedings of the International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing. - Hannover, 2003. - stránky 249-254.
- [28] National Instruments [online]. 2016 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.ni.com/compactrio/>
- [29] Kobold [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: http://koboldusa.com/sites/default/files/product_files/DUK-ultrasonic-flowmeter-operations-manual.pdf
- [30] Endress+Hauser [online]. 2015 [cit. 2016-02-11]. Dostupné z: <http://www.endress.com/en/Tailor-made-field-instrumentation/pressure/Absolute-gauge-Ceraphant-PTC31>

- [31] J. TRAVIS, J. KRING, LabVIEW for everyone: graphical programming made easy and fun. 3rd ed. /. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, c2007. ISBN 9780131856721.
- [32] Induktio d.o.o. Projektová dokumentace HFG160. Ljubljana, 2016.
- [33] POZNYAK, I., A. PECHENKOV a A. SCHATUNOV. Electrical Conductivity Measurement of Oxides Melts. International Scientific Colloquium Modelling for Material Processing. Riga, 2016, , 6.
- [34] LUPI, S., FORZAN, M., ALIFEROV, A. , Induction and direct resistance heating. New York: Springer, 2014. ISBN 9783319034782.
- [35] JAHM software. Material Properties Database MPDB

PŘÍLOHA 1

STRUKTURA VYTVOŘENÉHO PROGRAMU

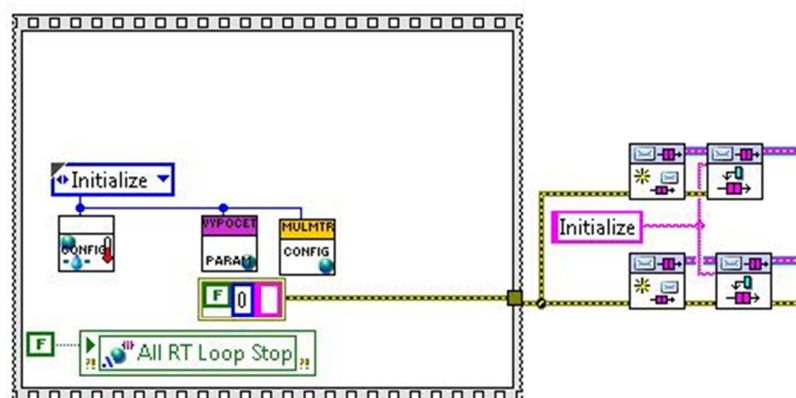
Program pro sběr dat z měřících zařízení byl vytvořen v softwaru LabVIEW od společnosti National Instruments. Samotný projekt je rozdělen na dvě části. První část pracuje v místním průmyslovém počítači a stará se zejména o vizualizaci dat a jejich ukládání. Druhá část je stažena do vzdáleného systému CompactRIO. Hlavním úkolem programu v CompactRIO je sběr dat z měřících karet, jejich úprava, výpočet potřebných hodnot a následná komunikace s průmyslovým počítačem.

Program vytvořený pro CompactRIO:

Vytvoření program pro Compact RIO se sestává z šesti paralelních smyček:

- Multimetr Modbus
- RSI Low Speed
- UI Command Loop
- Message Handling Loop
- Watchdog Loop
- System Health and Monitoring Loop

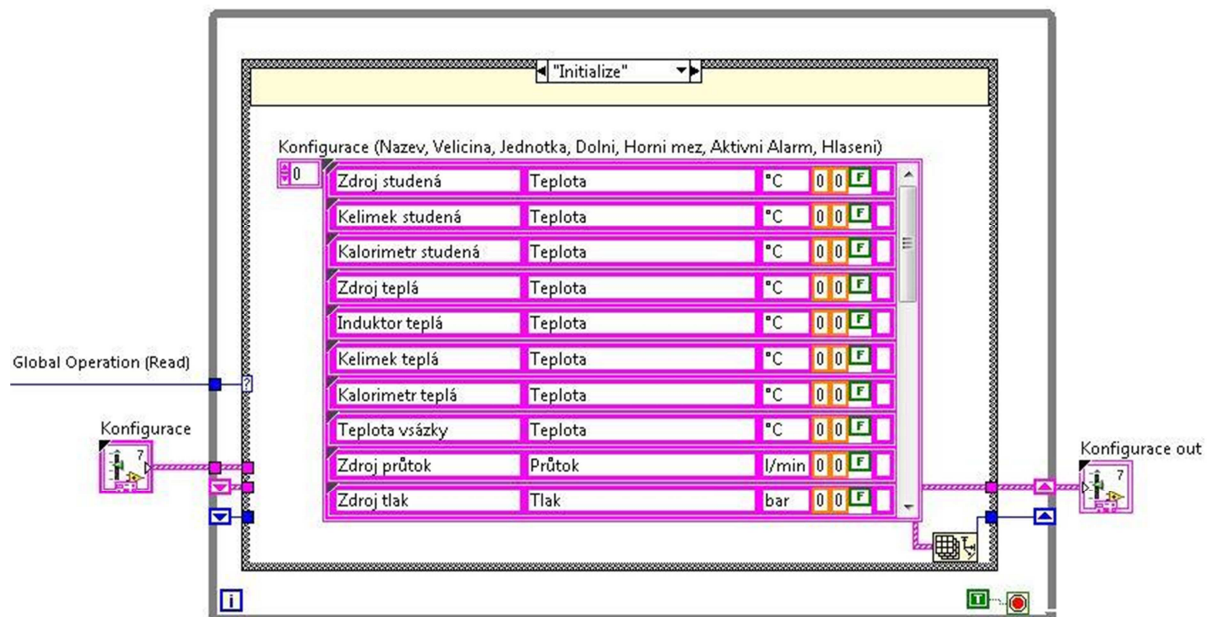
Smyčka UI Command Loop přijímá zprávy z uživatelského rozhraní. Message Handling Loop se stará o všechny zprávy přicházející z ostatních smyček. Watchdog Loop zasílá periodické zprávy k ověření, zda je systém schopný odpovídat na zprávy. System Health and Monitoring Loop zasílá diagnostické informace a monitorovací data do uživatelského rozhraní. Inicializace základních parametrů a jejich případná úprava probíhá pomocí sekvenční struktury, která je vidět na *Obr. 0.1*.



Obr. 0.1 Sekvenční struktura pro inicializaci

V rámci sekvenční struktury je možné nastavit základní parametry komunikace s analyzátozem sítě, která probíhá pomocí protokolu Modbus RTU (RS485). Jedná se o COMport

zařízení CompactRIO, ID číslo analyzátoru sítě, přenosovou rychlost a paritu. Dále je zde možné nastavit parametry vsázky pro výpočet dodávaného výkonu do vsázky (měrná tepelná kapacita, hmotnost, atd.) Inicializace měřených veličin v chladícím okruhu se provádí v subVI Konfigurace, kde je možné přejmenovat měřené veličiny, změnit jejich jednotky, nastavit základní meze a hlášení hodnot mimo stanovené meze. Tyto parametry může uživatel změnit pro dané měření pomocí uživatelského rozhraní. Ukázka inicializace je na obrázku *Obr. 0.2*.



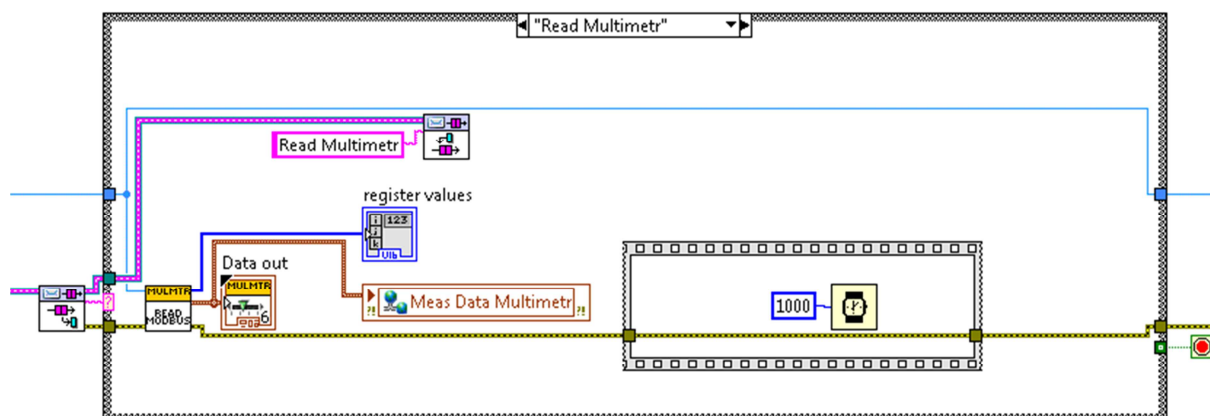
Obr. 0.2 Inicializace měřených parametrů

Předávání hodnot mezi jednotlivými paralelními smyčkami je zajištěno pomocí front (queue). Nejprve je nutné danou frontu vytvořit pomocí funkčního bloku (Obtain Queue). Jako první se do fronty uloží zpráva inicializace (Enqueue Element). Zpráva je předána do jednotlivých paralelních smyček. V paralelních smyčkách je nutné zprávu oddělit z fronty (Dequeue Element). Zpráva je nadále předána k dalšímu zpracování. Pokud se má výstupní hodnota paralelní smyčky dostat na vstup jiné, dojde k jejímu zapsání do fronty a celý proces se opakuje.

Smyčka Multimetr Modbus RTU

Tato smyčka se stará o vyčítání hodnot z analyzátoru sítě pomocí protokolu Modbus RTU (RS485). Smyčka (*Obr. 0.3*) obsahuje podmínkovou strukturu, která řídí jednotlivé kroky smyčky. Nejprve dojde k inicializaci a poté k navázání spojení s analyzátozem. Podmínková struktura přejde do stavu čtení parametrů. Zde je určena počáteční adresa v registru a počet prvků určených pro čtení. Některé hodnoty jsou složeny z více slov nebo obsahují znaménko, které je přenáшено v odděleném

registru. Proto je nutné hodnoty sestavit, přidat k nim potřebná znaménka a převést na základní jednotky uvedené v inicializaci. Dále dochází ke spojení hodnot s názvy, jednotkami a mezemi. Soubor těchto dat je zapisován do globální proměnné, pomocí které jsou hodnoty předávány do programu zajišťujícího uživatelské rozhraní. Poslední část podmínkové struktury slouží k ukončení komunikace. Vzorkovací frekvence stažených dat z analyzátoru sítě je 1s (omezeno přenosovými možnostmi protokolu Modbus RTU).



Obr. 0.3 Čtení hodnot z analyzátoru sítě

Smyčka RSI Low Speed

Další část programu tvoří smyčka pro čtení hodnot z měřících karet umístěných v CompactRIO slotech. V našem případě byly použity 3 karty pro měření teplot (NI 9217) a jedna karta analogových vstupů 0(4) – 20 mA (NI 9203). Vzorkovací frekvence měřících karet je 250 ms. Tuto hodnotu je možné v programu měnit dle potřeby. V této smyčce dochází ke “škálování” měřených veličin, výpočtu chladícího výkonu, vytvoření pole a ke kontrole horní a spodní meze. Pokud je aktivní alarmové hlášení, dojde k zapsání spodního nebo horního alarmu do příslušné položky pole. Tato data jsou předávány do globální proměnné.

Výpočet ztrát v jednotlivých komponentech probíhá pomocí kalorimetrické rovnice (0.1) na základě měrné tepelné kapacity, rozdílu teplot a průtoku. Při výpočtu je uvažováno, že 1 kg vody odpovídá 1 litru vody.

$$P_{chl} = c_p(T_2 - T_1) \frac{Q_v}{60} \quad (0.1)$$

W; J/(kg.K), K, l/min

Program vytvořený pro místní počítač:

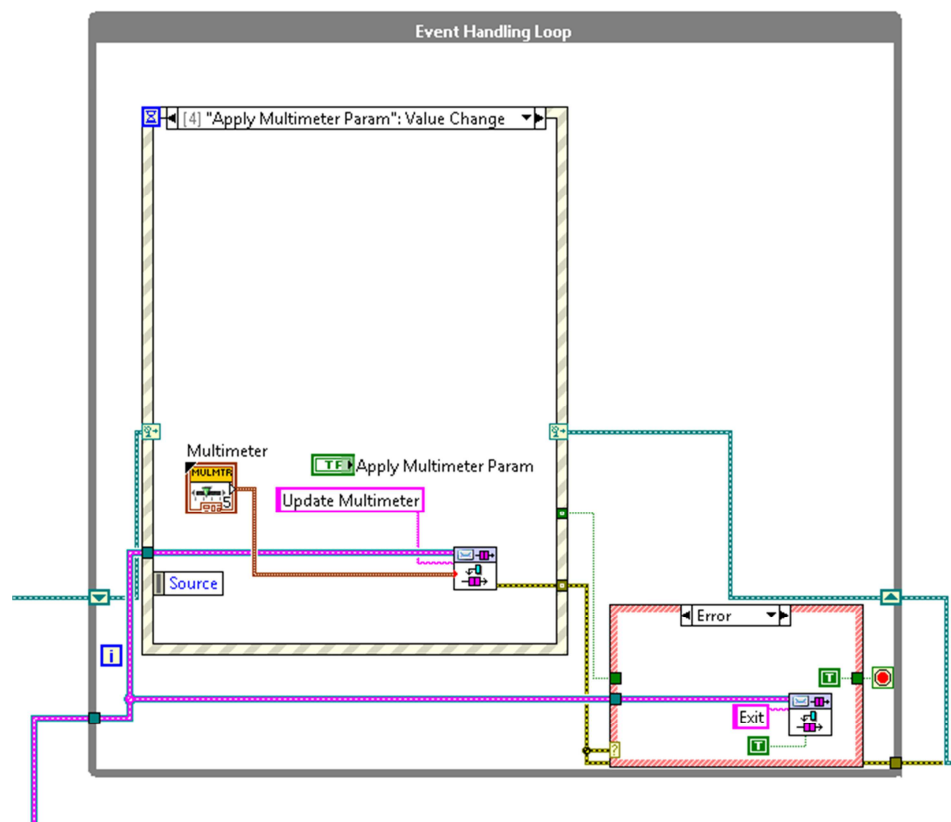
Tato část programu vytváří uživatelské rozhraní, umožňuje změnu potřebných parametrů, slouží pro ukládání měřených dat do souboru a vykresluje požadované grafy. Program v této části je rozdělen na tři paralelní smyčky:

- Event Handling Loop
- UI Message Loop
- Monitoring Loop

Komunikace mezi jednotlivými smyčkami probíhá pomocí "front", podobně jako u programu pro CompactRIO. Data jsou předávána mezi CompactRIO a průmyslovým počítačem pomocí globálních proměnných. Komunikace probíhá prostřednictvím Ethernetu.

Event Handling Loop

Tato smyčka (Obr. 0.4) zpracovává všechny uživatelské akce a zprávy z uživatelského rozhraní. Jedná se o změny parametrů komunikace, názvu měřených veličin, nastavení veličin zobrazovaných v grafu, připojení vzdáleného zařízení CompactRIO a nastavování cesty ukládání měřených veličin. Přijaté zprávy jsou předávány smyčce UI Message Loop prostřednictvím fronty.



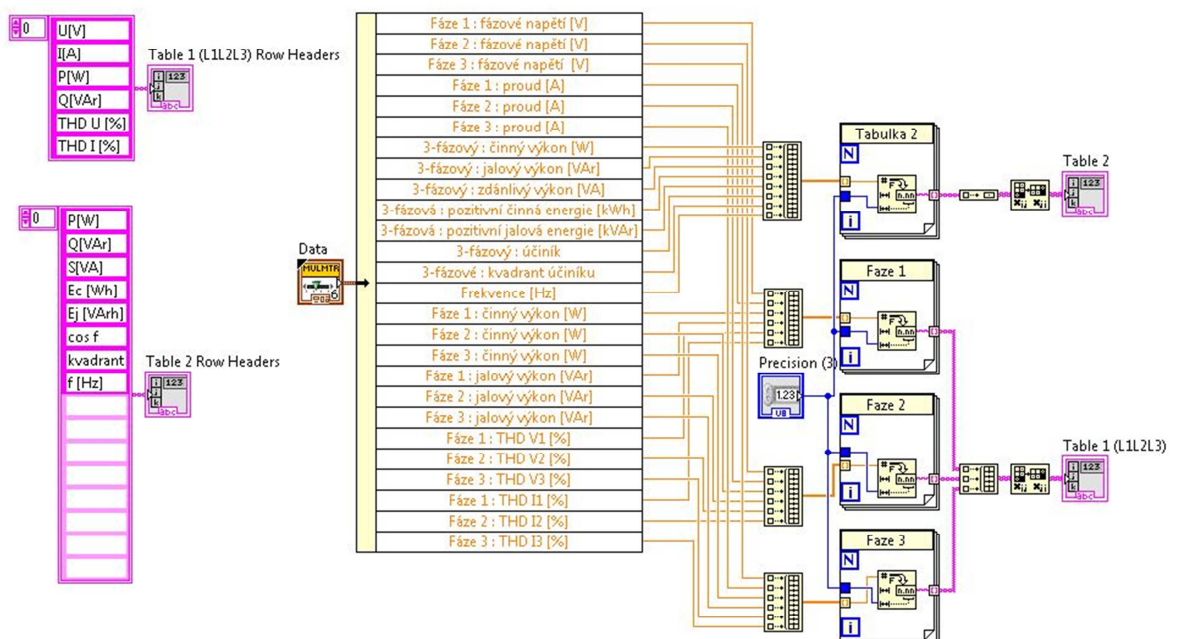
Obr. 0.4 Event handling loop

UI Message Loop

Tato část programu zpracovává všechny zprávy přicházející pomocí fronty z Event Handling Loop a Monitoring Loop. Změněné parametry zapisuje do globálních proměnných, pomocí kterých jsou data přenášena do Compact RIO. Probíhá zde navázání komunikace mezi počítačem a CompactRio.

Monitoring Loop

Monitoring loop slouží pro čtení dat z programu uloženého v CompactRIO. Data jsou posílána pomocí globálních proměnných. Přijatá data jsou dále zpracována pro vizualizaci v uživatelském rozhraní a uložena na pevný disk počítače. Na Obr. 0.5 je část programu sloužící k rozdělení přijatých dat z globální proměnné (data z analyzátoru sítě) na jednotlivé měřené veličiny a následné sestavení do tabulek. Jsou zde vytvořeny dvě tabulky. V jedné jsou zobrazeny naměřené hodnoty napětí, proudu, výkonů a celkového harmonického zkreslení v jednotlivých fázích a v druhé jsou hodnoty celkových výkonů, energie, frekvence a účinníku. Popis jednotlivých řádků tabulek je vidět na levé části obrázku.



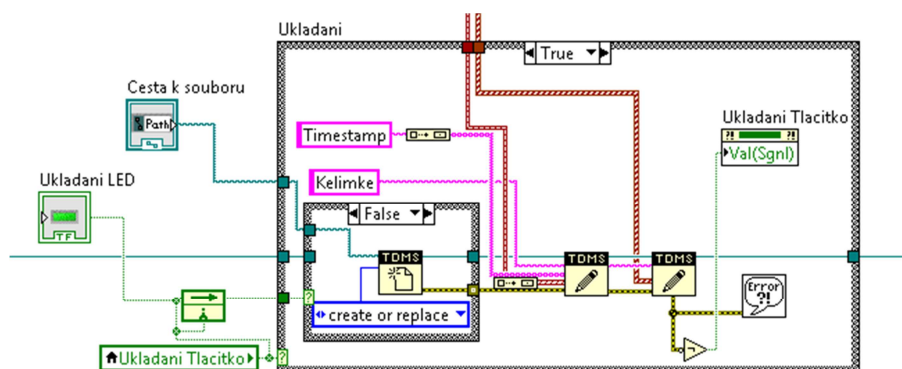
Obr. 0.5 Ukázka uspořádání dat do tabulek z globální proměnné

Pomocí globálních proměnných jsou čteny i data z měřících karet. Do programu na místním počítači je zasílána hodnota měřené veličiny, spodní a horní meze (alarm). K těmto hodnotám je přidán název a jednotka měřené veličiny. Data jsou rozdělena do jednotlivých tabulek dle chladících

smyček (kelímek, zdroj, vsázka, transformátor + induktor). Jedná se o vstupní a výstupní teplotu chladicí vody, tlak v chladicí smyčce, průtok a vypočítanou hodnotu chladícího výkonu.

Tyto měřené veličiny je také možné graficky zobrazit na uživatelském rozhraní. Z hodnot jsou nejprve vytvořeny průběhy a poté je přidán popis a jednotka měřené veličiny. Veškeré hodnoty jsou zobrazeny v jednom grafu a uživatel si může zvolit, které hodnoty chce v grafu zobrazovat.

Veškeré měřené hodnoty je možné ukládat do souboru (formát TDMS) na pevný disk počítače. Uživatel nejprve zvolí cestu, kam má být daný soubor uložen a poté stiskne tlačítko pro ukládání. Program vytvoří soubor na pevném disku počítače a ponechá ho otevřený pro uložení dat. O ukládání informuje rozsvícená kontrolka. Ukončení a uzavření souboru se provede po opětovném stisku tlačítka pro ukládání. Soubor je možné otevřít v programu Microsoft Excel a následně upravovat. Ukázka tohoto programu je na obrázku *Obr. 0.6*.



Obr. 0.6 Ukázka části programu pro ukládání dat

PUBLIKACE

JIŘINEC, S., ROT, D. Cold crucible HFG160. *Electroscope*, 2017, roč. 2017, č. 1, s. 1-5. ISSN: 1802-4564

JIRINEC, S., ROT, D. Data Acquisition System for Cold Crucible. *TRANSACTIONS ON ELECTRICAL ENGINEERING*. Praha: ERGO NOMEN, 2017, 2017(1). ISSN 1805-3386.

JIRINEC, S., ROT, D. Optimization of Cold Crucible Shape with Different Number of Rectangle Segments. *TRANSACTIONS ON ELECTNCAL ENGINEERING*. Praha: ERGO NOMEN, 2017, 2017(2), ISSN 1805-3386.

ROT, D., JIŘINEC, J., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J. Advanced measurements for analysis and data acquisition from the cold crucible. In *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Praha: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 533-536. ISBN: 978-1-5090-0908-4

LUCÁK, J., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J. Method for determining the amplitude of the furnace temperature of the heating element in an electric muffle furnace. In *Proceedings of the 13th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2016*. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2016. s. 1-3. ISBN: 978-80-89402-85-4

ROT, D., JIŘINEC, J., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J., POZNYAK, I. Experimental design of the cold crucible. In *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 511-514. ISBN: 978-1-5090-0908-4

LUCÁK, J., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J. The behaviour of heating coil during regulation. In *Proceedings of the 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Prague: Czech Technical University in Prague, 2016. s. 515-518. ISBN: 978-1-5090-0908-4

ROT, D., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J., POZNYAK, I. Electrical efficiency of induction furnace with cold crucible via different segments width. In *Proceedings of the 2015 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE)*. Ostrava: Technical University of Ostrava, 2015. s. 17-20. ISBN: 978-1-4673-6788-2

ROT, D., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J., POZNYAK, I. Electrical efficiency of induction furnace with cold crucible with varied number of rectangle segments. In *Proceedings of the 8th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering (ELEKTROENERGETIKA 2015)*. Košice: Technical University of Košice, 2015. s. 269-272. ISBN: 978-80-553-2187-5

ROT, D., JIŘINEC, S. Vliv provedení segmentu studeného kelímku na jeho účinnost. In *Sborník konference TechSoft Engineering ANSYS 2015 : setkání uživatelů a konference*. 2015: TechSoft Engineering, spol. s r.o., 2015. s. 1-9. ISBN: 978-80-905040-4-2

KOŽENÝ, J., POZNYAK, I., ROT, D., JIŘINEC, S., KŘESINA, M. Influence of the segments shape to cold crucible power losses. In *Workshop Elektroprocesstechnik*. Ilmenau: Förderkreis Elektrowärme Ilmenau e.V., 2014. s. 1-7. ISBN: neuveden

JIŘINEC, S. Optimalizace tvaru studeného kelímku. In *Elektrotechnika a informatika 2014 - sborník Elektrotechnika*. Plzeň: Západočeská universita v Plzni, 2014. s. 49-52. ISBN: 978-80-261-0367-7

KOŽENÝ, J., POZNYAK, I., ROT, D., JIŘINEC, S., KŘESINA, M. Power losses in induction furnace with cold crucible with different segments shape. *Electroscope*, 2014, roč. 2014, č. 1, s. 1-4. ISSN: 1802-4564

ROT, D., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J., KŘESINA, M. The Influence of the Position of the Starting Material during Melting by the Electromagnetic Induction in a Cold Crucible. In *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering*. Brno: Brno University of Technology, 2014. s. 533-537. ISBN: 978-1-4799-3806-3

KŘESINA, M., ROT, D., JIŘINEC, S., KOŽENÝ, J. The way to design an energy passive block of flats. In *Proceedings of the 12th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2014 (EEE 2014)*. Bratislava: Slovak University of Technology in Bratislava, 2014. s. 1-4. ISBN: 978-80-89402-70-0

JIŘINEC, S., ROT, D., KOŽENÝ, J. *Modelování startovací fáze tavby SiO₂ elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Ostrava: VSB - Technical University, 2013. ISBN 978-80-248-2988-3.

JIŘINEC, S., ROT, D., KOŽENÝ, J. *Modelování startu tavby oxidů kovů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. Košice: Technical University of Košice, 2013. ISBN 978-80-553-1441-9.

JIŘINEC, S. *Tavení elektricky nevodivých materiálů elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. ISBN 978-80-261-0234-2.

JIŘINEC, S. *Tavení elektromagnetickou indukcí ve studeném kelímku*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. ISBN 978-80-261-0017-1.

FUNKČNÍ VZORKY

JIŘINEC, S., ROT, D. *Frézovaný studený kelímek s 3D tištěným kolektorem*. 2015.

JIŘINEC, S., ROT, D. *Přípravky pro ověřování účinnosti studeného kelímku*. 2015.

JIŘINEC, S., ROT, D. *Segmentový studený kelímek s vrtaným dnem a 3D tištěným kolektorem*. 2015.

JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. *Sada přípravků pro testování účinnosti studených kelímků*. 2016.

JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. *Sestava pro měření účinnosti indukčních ohřevů*. 2016.

JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. *Polohovací zařízení se stíněním EMP pro FRQ60*. 2016.

JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. *Polohovací zařízení pro HFG160*. 2016.

JIŘINEC, S., ROT, D., JIŘINEC, J. *Segmentový studený kelímek pro HFG160*. 2016.