

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Analýza magnetického a teplotního pole indukčního
ohřevu nádoby na potraviny**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří KUTHAN**
Osobní číslo: **E13B0368P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Analýza magnetického a teplotního pole indukčního ohřevu nádoby na potraviny**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte a popište problematiku sklokeramických desek s indukčním ohřevem. Uveďte materiálové vlastnosti používaných kovových nádob.
2. Realizujte výpočet magnetického a teplotního pole sklokeramické desky s indukčním ohřevem nádoby na potraviny.
3. Proveďte analýzu z hlediska používané frekvence, velikosti proudu a účinnosti ohřevu.

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


1. Langer, E.: Teorie indukčního a dielektrického tepla. ČSAV Praha
2. <http://www.agros2d.org>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Roman Hamar, Ph.D.
Katedra teoretické elektrotechniky

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


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku indukčního ohřevu, respektive indukčního ohřevu nádoby na potraviny. Hlavním cílem práce je představit indukční ohřev používaný v domácnostech pro vaření. První část práce je zaměřena na teoretický popis indukčního ohřevu a jeho použití při vaření, poukázání na výhody a nevýhody indukčního ohřevu. Druhá část stručně popisuje matematický model indukčního ohřevu. Poslední část se věnuje simulaci konkrétního indukčního vařiče v programu Agros2D. Pomocí simulace je zjištěn vliv frekvence a proudu na ohřev nádoby, rychlost ohřevu a rozložení teploty na dně nádoby.

Klíčová slova

Indukční ohřev, nádoby pro indukční vaření, matematický model, sdružená úloha, magnetické pole, teplotní pole, simulace

Abstract

This Bachelor's thesis deals with the issues of induction heating, in particular the use of induction heating for food. The main focus of the thesis is on induction heating for domestic use in the kitchen. The first part of the thesis deals with a theoretical description of induction heating and its use for cooking, pointing out advantages and disadvantages. The second part briefly describes the mathematical model of induction heating. The last part deals with a simulation of an induction cooker in the Agros2D programme. Simulations are used to find the influence of frequency and current on heating cooking pots, speed of heating and temperature distribution on the base of the pots.

Key words

Induction heating, cooking pots for induction heating, mathematical model, coupled problem, magnetic field, thermal field, simulation

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 4.6.2015

Jiří Kuthan

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanu Hamarovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 POPIS INDUKČNÍHO OHŘEVU	11
1.1 PRINCIP INDUKČNÍHO OHŘEVU.....	11
1.2 INDUKČNÍ VAŘIČ.....	13
1.3 VÝHODY INDUKČNÍHO VAŘIČE	13
1.4 VÝBĚR VHODNÝCH NÁDOB	15
1.5 POKUSY A ZAJÍMAVOSTI INDUKČNÍHO OHŘEVU	15
2 MATEMATICKÝ MODEL INDUKČNÍHO OHŘEVU.....	17
2.1.1 <i>Maxwellovy rovnice</i>	<i>17</i>
2.1.2 <i>Materiálové vztahy.....</i>	<i>18</i>
2.1.3 <i>Magnetický vektorový potenciál.....</i>	<i>18</i>
2.2 MATEMATICKÝ MODEL MAGNETICKÉHO POLE.....	18
2.3 MATEMATICKÝ MODEL TEPLTNÍHO POLE	20
3 SIMULACE INDUKČNÍHO VAŘIČE POMOCÍ PROGRAMU AGROS 2D.....	21
3.1 PROGRAM AGROS2D	21
3.2 FORMULACE PROBLÉMU	22
3.3 MATEMATICKÝ MODEL INDUKČNÍHO VAŘIČE	23
3.3.1 <i>Model magnetického pole indukčního vařiče.....</i>	<i>23</i>
3.3.2 <i>Model teplotního pole indukčního vařiče.....</i>	<i>24</i>
3.4 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI KONKRÉTNÍHO VAŘIČE A NÁDOBY	25
3.4.1 <i>Zjištění protékajícího proudu cívkou</i>	<i>26</i>
3.5 OPTIMALIZACE MODELU	29
3.5.1 <i>Konvergence výsledků modelu</i>	<i>29</i>
3.6 ROZLOŽENÍ TEPLoty NA DNĚ HRNCE.....	31
3.7 ZJIŠTĚNÍ VLIVU FREKVENCE A VELIKOSTI PROUDU NA RYCHLOST OHŘEVU	32
3.7.1 <i>Simulace za účelem zjištění veličiny s větším vlivem na teplotu</i>	<i>34</i>
3.8 ZÁVISLOST BLÍZKOSTI UMÍSTĚNÍ CÍVKY K OHŘÍVANÉ NÁDOBĚ.....	34
ZÁVĚR	36
LITERATURA.....	37
SEZNAM OBRÁZKŮ	39
SEZNAM TABULEK.....	40
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A – POROVNÁNÍ VLIVU FREKVENCE A PROUDU NA RYCHLOST OHŘEVU	1

Seznam symbolů a zkratk

Nejpoužívanější veličiny a jednotky pro elektromagnetické pole

E	V/m	intenzita elektrického pole
D	D/m ²	elektrická indukce
H	A/m	intenzita magnetického pole
B	T	magnetická indukce
A	Wb/m	vektorový magnetický potenciál
J	A /m ²	proudová hustota
Ψ	C	elektrický indukční tok
Φ	Wb	magnetický indukční tok
p_j	W/m ³	měrné Jouleovy ztráty
Q	C	elektrický náboj
ρ	C/m ³	objemová hustota náboje
E_v	V/m	vnucená intenzita elektrického pole
J_v	A/m ²	vnucená proudová hustota
δ	m	hloubka vniku
γ	S/m	elektrická vodivost
ε	F/m	permitivita
μ	H/m	permeabilita

Nejpoužívanější veličiny a jednotky pro teplotní pole

G	°C/m	teplotní gradient
q	W/m ²	tepelný tok
T	°C	teplota
ρ	kg/m ³	objemová hustota
c_p	J/(kg · K)	měrná tepelná kapacita
λ	W/(m · K)	tepelná vodivost
ε_1	-	emisivita

Obecné

f	Hz	frekvence
ω	rad/s	úhlová frekvence
P	W	elektrický výkon, příkon
I	A	elektrický proud

Úvod

V dnešní době je indukční ohřev velmi dobře zvládnutá technologie. V průmyslu se indukční ohřev využívá několik desítek let. Hlavní výhodou indukčního ohřevu je vznik tepla přímo v ohřívaném materiálu, který musí být magneticky vodivý. Indukční ohřev je technologie šetrná k životnímu prostředí, protože při ohřevu nevznikají žádné nechtěné zplodiny. Díky svým výhodám se indukční ohřev dostává do popředí i mimo průmysl a je využíván i v domácnostech k vaření.

První kapitola je zaměřena na teoretický úvod do problematiky. V této části je popsán indukční ohřev a jeho princip. Následně je uvedeno využití indukčního ohřevu v domácnosti, jeho výhody a nevýhody. Dále jsou popsány druhy použitelných nádob pro indukční ohřev a jejich požadované materiálové vlastnosti. Druhá kapitola se věnuje potřebné teorii elektromagnetického a teplotního pole s potřebnými rovnicemi, které jsou nutné pro vytvoření matematického modelu indukčního vařiče. Třetí část obsahuje krátké představení programu Agros2D, který byl použit pro následnou simulaci indukčního vařiče. Dále je formulován model magnetického a teplotního pole konkrétního vařiče. V práci je díky simulaci popsán vliv použité frekvence a proudu na rychlost ohřevu, rozložení teploty na dně hrnce a vliv vzdálenosti cívky od použité nádoby.

1 Popis indukčního ohřevu

Indukční ohřev je již několik desítek let starý. Pro průmyslové využití se princip indukčního ohřevu začal používat již na počátku 20. století. Zpočátku byl indukční ohřev využíván především pro tavení kovů. Teprve po 2. světové válce byla tato technologie využita i v jiných oborech. Postupně se tento způsob ohřevu uplatňuje nejen v hutním a strojírenském průmyslu, ale také v řadě dalších průmyslových odvětví [1].

Pro účely vaření je indukční ohřev využíván především až v posledních letech. Hypoteticky, využití elektrické energie v podobě indukčního ohřevu pro účely vaření by v globálním pohledu znamenalo podstatné úspory energie, neboť ve srovnání s vařením na zemním plynu je indukční vaření energeticky hospodárnější. Na druhou stranu je tepelná energie z elektrické energie dražší než ta ze zemního plynu [2].

Z pohledu vyčerpatelnosti neobnovitelných zdrojů bude využití elektrické energie pro získání tepelné energie do budoucnosti stále aktuálnějším tématem. Prokázané zásoby zemního plynu, jako neobnovitelného zdroje energie, jsou při současné těžební činnosti odhadovány jen na několik desítek let. Další výhodou indukčního ohřevu je odstranění toxických produktů spalování. Dále je nepochybnou výhodou indukčního ohřevu vznik tepla přímo v ohřívaném materiálu a tím vynechání zbytečných ztrát, které by vznikaly při ohřívání přes média. Díky tomu lze relativně snadno regulovat rozložení a intenzitu teploty v ohřívaném materiálu [3][4].

1.1 Princip indukčního ohřevu

Indukční zařízení pro ohřev nádoby na potraviny sestává z vysokofrekvenčního zdroje (měniče), indukční cívky a vsázky, která je v tomto případě samotnou nádobou na potraviny [5].

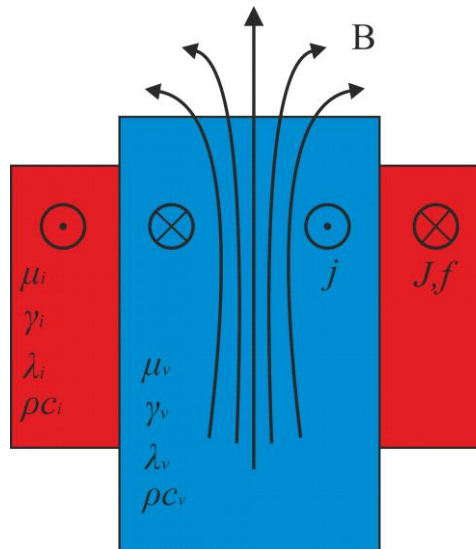
Indukční ohřev je proces ohřívání povětšinou kovového materiálu pomocí elektromagnetické indukce. Hlavní podmínkou je vznik střídavého magnetického pole, kterou lze získat dvěma způsoby. První možností je získat střídavé magnetické pole pomocí cívky, která je napájena vysokofrekvenčním střídavým proudem. Tento způsob se využívá například u kelímkové pece, kanálkové indukční pece, při indukčním pájení a v neposlední řadě pro indukční vaření. Díky vytvoření střídavého magnetického pole pomocí cívky je možno ohřívání předmět do vzniklého magnetického pole pouze vložit a dále s ním nepohybovat.

Druhý způsob je založen na opačném postupu. Magnetické pole je stacionární a je vyvolané pomocí cívky napájené stejnosměrným proudem nebo permanentním magnetem. Vznik elektromagnetické indukce je dosažen pomocí pohybu ohřivaného tělesa, a to rotačním nebo posuvným. Tato práce se zabývá pouze první možností, tedy vyvoláním střídavého magnetického pole pomocí cívky napájené střídavým proudem [6].

Princip indukčního ohřevu je znázorněn na schématu obr. 1.1. Vodivá vsázka je vložena do cívky, která je protékána střídavým proudem s hustotou \mathbf{J} a frekvencí f . Proud vyvolá potřebné proměnné magnetické pole \mathbf{B} , jehož indukční čáry prochází vsázkou a indukují vířivé proudy o hustotě \mathbf{j} . Vzniklé vířivé proudy se uzavírají uvnitř vsázky a generují ztráty. Pomocí frekvence budícího proudu lze řídit hloubku prohřátí vsázky, s rostoucím kmitočtem se generují ztráty v tenčích vrstvách vsázky. Tento jev je nazýván hloubka vniku a je popsán vztahem:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \gamma}}, \quad (1.1)$$

kde f je frekvence, μ je permeabilita, γ je elektrická vodivost [4].



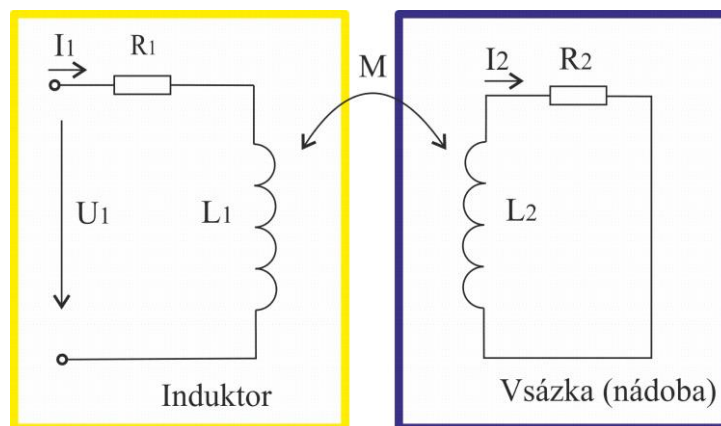
Obr. 1.1 Schématické znázornění indukčního ohřevu (překresleno z [4])

1.2 Indukční vaříč

Indukční vaříč funguje na výše zmíněném indukčním ohřevu. Je složený z indukční cívky, která tvoří elektromagnet a je umístěna pod keramickou, elektricky nevodivou deskou a frekvenčním měničem, který mění frekvenci z 50 Hz na 15 – 30 kHz [7].

Po umístění nádoby, které musí mít magneticky vodivé dno, na sklokeramickou desku, vznikne elektromagnetický obvod, díky němuž je ohřívána pouze nádoba položená na desku. Indukční vaříč si je možno pro jednoduchost představit jako transformátor. Primární vinutí představuje cívka vaříče, která je protékána vysokofrekvenčním proudem. Sekundární vinutí je tvořeno nádobou položenou na desce, která představuje pouze jeden závit [4].

Schematicky si lze indukční vaříč představit dle obr. 1.2. Indukční vaříč je tvořen dvěma cívkami se vzájemnou indukčností M , kde primární cívka o indukčnosti L_1 je napájena proudem o vysoké frekvenci a je v sérii se svým ztrátovým činným odporem R_1 . Sekundární cívka je představována nádobou na potraviny s indukčností L_2 , která je spojena nakrátko s činným odporem R_2 [4].



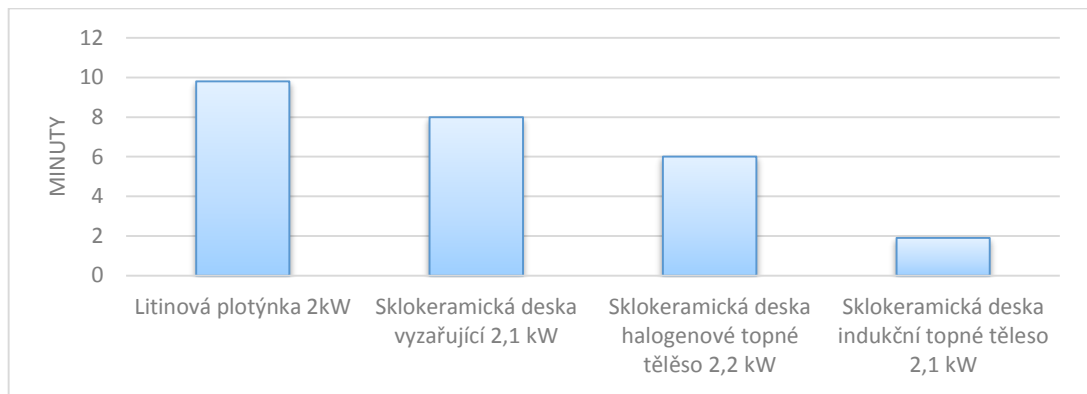
Obr. 1.2 Schéma indukčního vaříče (překresleno z [6])

1.3 Výhody indukčního vaříče

V domácnostech se vaření pomocí elektrické energie vyskytuje již dlouho. Nejedná se ovšem o indukční, ale o klasický ohřev pomocí topné spirály. Ohřev pomocí topné spirály je využíván v mnoha domácích spotřebičích, jako je například rychlovarná konvice, pračka, žehlička a v neposlední řadě i ve sklokeramických deskách pro vaření. Při ohřevu nádoby odporovým ohřevem dochází k mnoha ztrátám, teplo musí projít izolantem, tedy

sklokeramickou deskou a až poté je předáno nádobě, která má být ohřáta. Tímto přechodem dochází k velkým tepelným ztrátám, protože dno hrnce a sklokeramická deska na sebe vždy přesně nedoléhají. Až v posledních letech se i v domácnostech začíná objevovat indukční ohřev k vaření potravin, ačkoliv v průmyslu je indukční ohřev využíván několik desítek let. Hlavní výhodou indukčního vaření je bezpochyby účinnost, která dosahuje až 90 %, čímž výrazně přesahuje účinnost plynového ohřevu. Vysoká účinnost je dosahována díky přímému ohřevu nádoby. Tato přednost v sobě čítá další výhodu, a tou je bezpečnost. Díky přímému ohřevu varné nádoby zůstává varná deska studená, nebo mírně zahřátá od samotné nádoby. Odpadá tak nebezpečí popálení od horké varné desky a také nelehké čištění desky v případě přetečení obsahu nádoby [8][9][10].

Jak je patrné z obr. 1.3 rychlost ohřevu je dalším faktorem, který může zapříčinit upřednostnění indukčního vaření. Přestože obr. 1.3 není zcela adekvátní z důvodu různých výkonů vařičů lišící se maximálně o 0,2 kW, je indukční ohřev bezkonkurenčně nejrychlejší. U indukčního vařiče lze volit z několika režimů vaření. Například normální režim vaření je dvakrát rychlejší než odporové vaření a při volbě režimu rychlého ohřevu je možno dosáhnout až čtyřikrát rychlejšího ohřevu oproti odporovému či halogenovému vaření. Rychlý ohřev výrobcem nazývaný powerBoost, Rapid Start či Sprint, není samozřejmou součástí každé varné desky, ale pouze některých vybraných modelů. Jedná se o funkci, která na dočasnou dobu zvýší výkon a tím umožní rychlejší náběh vaření. Indukční deska v sobě skrývá mnoho užitečných funkcí, které mohou například pomoci zabezpečit domácnost proti případnému vyhoření. Varná deska je nefunkční s jiným nádobím, než je určené pro indukční vaření. V případě zapomenutí vypnutí varné desky se deska po vyvaření vody sama vypne nebo jen udržuje určitou teplotu. Do nedávna byla jedinou zásadní nevýhodou pořizovací cena indukční varné desky. V dnešní době je možné levnější variantu indukční varné desky pořídit od necelých 7 000,- Kč. Tím se nevýhody zredukovaly pouze na jedinou, a tou je nutnost použití magneticky vodivých nádob [8][9][10][11][12].



Obr. 1.3 Ohřev 1 litru vody do bodu varu (převzato z [11])

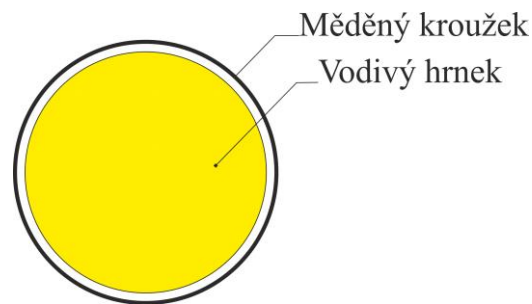
1.4 Výběr vhodných nádob

Jak již bylo zmíněno, menší nevýhodou indukčního ohřevu mohou být právě nádoby. Pro funkčnost indukčního ohřevu je nutné zachovat podmínku vhodného nádobí, které musí být z magneticky vodivého materiálu. Není tedy zcela nutné při zakoupení indukčního vařiče vyměňovat všechno nádobí. Z magneticky vodivého materiálu jsou například staré smaltované nebo litinové nádoby, které lze použít právě na indukční vařiče. Před zakoupením nových nádob určených pro indukční ohřev je možné ověřit funkčnost staré nádoby pomocí obyčejného magnetu, magneticky vodivý materiál magnet přitáhne. Nevhodné nádoby jsou například nádoby z hliníku, mědi či skla. Pod tyto nádoby lze vložit železnou desku, která poslouží jako feromagnetické médium zprostředkující ohřev a následné předání tepla nádobě. Většina novějších nádob má vytvořená dna pomocí lisování několika různých vrstev materiálů, jedná se o sendvičová dna. Hlavní výhodou sendvičového dna je rovnoměrné rozvádění tepla do celé nádoby. I tyto nádoby s sebou přinášejí mnohé nevýhody, například vložení menší vložky, než je celé dno nádoby. Následkem je rychlejší ohřev nádoby v místě, kde je vložka umístěna. S tím je spojená možnost připalování v určitém místě nádoby. Další možnou nevýhodou lisovaných nádob je ztráta rychlé regulace výkonu desky, a to z důvodu velké akumulace tepla v samotném dnu nádoby [12].

1.5 Pokusy a zajímavosti indukčního ohřevu

V této kapitole bude ukázáno několik možných pokusů s indukčním vařičem. Jak již bylo zmíněno v podkapitole 1.2, indukční vařič se dá přirovnat k transformátoru. První pokus je zaměřen na možnost rozsvícení žárovky pomocí cívky indukčního vařiče. Vytvořením měděného prstence a vsazením 6 V žárovky do obvodu, vznikne cívka s jedním závitem, která tvoří sekundární cívku transformátoru. Primární cívkou je plochá cívka indukčního vařiče.

Po přiložení vytvořené cívky se žárovkou k vaříči se ovšem nic nestane, neboť vaříč vyhodnotí, že na něm nestojí žádná nádoba určená pro indukční vaření. Je nutné tedy na vaříč položit nádobu z magnetického materiálu a k němu přiložit vytvořenou cívku se žárovkou, která se následně rozsvítí. Pokus lze opakovat i s výkonnější žárovkou, ale bude zapotřebí i více závitů na sekundární cívce. Lze počítat 6 V na jeden závit, proto je nutné 24 V žárovku navinout celkem 4 závity. Dalším pokusem lze pomocí indukovaných proudů a vzniklému magnetickému poli vznést měděný kroužek. Ochranu vaříče je třeba opět obelstít pomocí magneticky vodivého hrnku s vodou, kolem kterého je položen měděný kroužek (obr. 1.4). Po zapnutí se začne kroužek vznášet ale i velmi zahřívát. Tento jev lze pozorovat i při pokládání magneticky vodivé nádoby na již zapnutý vaříč. Nádoba bude nadlehčována vlivem magnetického pole [7].



Obr. 1.4 Umístění měděného kroužku (překresleno z [7])

2 Matematický model indukčního ohřevu

Indukční ohřev lze matematicky popsat dvěma obecně nelineárními parciálními diferenciálními rovnicemi. Rovnice popisují rozložení magnetického a teplotního pole. Řešení vzniklé soustavy rovnic je značně složité. Hlavním problémem je závislost materiálových vlastností na teplotě.

Tato práce bude zaměřena pouze na základní matematický model indukčního ohřevu, vznikne nám tedy matematický model obsahující magnetické a teplotní pole, která jsou navzájem sdružena [4]. Pro formulaci matematického modelu magnetického a teplotního pole jsou pro přehlednost uvedeny základní vztahy elektromagnetického pole.

2.1.1 Maxwellovy rovnice

Elektromagnetické pole lze vyjádřit pomocí soustavy Maxwellových rovnic.

Integrální tvar:

Diferenciální tvar:

$$1. \text{ MR} \quad \oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l} = \mathbf{I} + \frac{d\psi}{dt} \quad \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$2. \text{ MR} \quad \oint_c \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\frac{d\phi}{dt} \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$3. \text{ MR} \quad \oint_S \mathbf{D} d\mathbf{S} = Q \quad \text{div } \mathbf{D} = \rho \quad (2.3)$$

$$4. \text{ MR} \quad \oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0 \quad \text{div } \mathbf{B} = 0 \quad (2.4)$$

V uvedených vztazích jsou: \mathbf{H} je intenzita magnetického pole, \mathbf{I} je elektrický proud, ψ je elektrický indukční tok, \mathbf{J} je proudová hustota, \mathbf{D} je elektrická indukce, \mathbf{E} je intenzita elektrického pole, ϕ je magnetický indukční tok, \mathbf{B} je magnetická indukce, Q je náboj a ρ je hustota náboje [13].

2.1.2 Materiálové vztahy

Vektory popisující elektromagnetické pole jsou svázány materiálovými vztahy:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{J} = \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{E}_v) \quad (2.7)$$

V uvedených vztazích jsou: ε je permitivita, μ je permeabilita, γ je konduktivita prostředí, \mathbf{E}_v je intenzita vtištěných sil [13][14].

2.1.3 Magnetický vektorový potenciál

Z důvodu výhodnosti řešení elektromagnetického pole pomocí potenciálů¹ je nutné uvést magnetický potenciál \mathbf{A} , který je stanoven vztahem:

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A}. \quad (2.8)$$

Z důvodu nejednoznačnosti vektorového potenciálu, který se může lišit o konstantu a gradient libovolné skalární funkce φ , je nutné zavést Coulombovu podmínku, která je dána vztahem:

$$\text{div } \mathbf{A} = 0 \quad [14]. \quad (2.9)$$

2.2 Matematický model magnetického pole

Matematický model magnetického pole vychází z diferenciálního tvaru první Maxwellovy rovnice (2.1). Maxwellův posuvný proud můžeme díky uvažování kvazistacionárního pole zanedbat a zapsat rovnici ve tvaru:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (2.10)$$

kde \mathbf{H} je intenzita magnetického pole a \mathbf{J} proudová hustota. Díky znalostem materiálových vztahů (2.6) a (2.7) a magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} (2.9), lze rovnici (2.10) přepsat do tvaru:

¹ Potenciálové pole využívá i program Agros2D, který bude použit v následné simulaci.

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right) = \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{E}_v), \quad (2.11)$$

kde μ je permeabilita, \mathbf{E} je intenzita elektrického pole a \mathbf{E}_v je intenzita vtištěných sil. Jak již bylo zmíněno, výhodný postup při řešení elektromagnetického pole je pomocí potenciálů. Proto definujeme intenzitu elektrického pole \mathbf{E} pomocí potenciálních veličin. Dosazením magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} (2.9) do druhé Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru (2.2), dostaneme vztah:

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\operatorname{rot}\mathbf{A} = -\operatorname{rot}\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t},$$

čili

$$\operatorname{rot}\left(\mathbf{E} + \frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}\right) = 0. \quad (2.12)$$

V rovnici (2.12) má výraz v závorce nulovou rotaci, lze ho tedy vyjádřit jako gradient skalárního elektrického potenciálu φ

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} - \operatorname{grad}\varphi. \quad (2.13)$$

Po dosazení intenzity elektrického pole \mathbf{E} (2.13) do rovnice (2.11) získáme rovnici rozložení magnetického pole ve tvaru:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right) = \mathbf{J}_v - \gamma\left(\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} + \operatorname{grad}\varphi\right), \quad (2.14)$$

kde \mathbf{J}_v je hustota vnějších proudů. Jelikož indukční ohřev neobsahuje volné náboje lze poslední člen rovnice (2.14) zanedbat. Po úpravě dostaneme:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right) + \gamma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_v. \quad (2.15)$$

Rovnice (2.15) popisuje rozložení magnetického pole indukčního ohřevu, kde její druhý člen na levé straně $\mathbf{j} = \gamma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}$ udává hustoty indukovaných vířivých proudů. Člen \mathbf{J}_v na pravé straně vyjadřuje hustotu budících proudů. Měrné Joulovy ztráty jsou určeny vztahem:

$$p_J = \frac{\mathbf{j} \cdot \mathbf{j}}{\gamma} = \gamma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right)^2 \quad [14] [15] [16]. \quad (2.16)$$

2.3 Matematický model teplotního pole

Matematický model teplotního pole pro indukční ohřev je popsán Fourier-Kirchhoffovou nestacionární parciální diferenciální rovnicí vedení tepla, která vychází z prvního termodynamického zákona. Energickou bilanci systému lze definovat rovnicí:

$$-\oint_S \mathbf{q} d\mathbf{S} = \int_V \frac{dU_{\text{int}}}{dt} dV - \int_V p dV, \quad (2.17)$$

kde \mathbf{q} je tepelný tok přes hranice tělesa, $\frac{dU_{\text{int}}}{dt}$ je změna vnitřní energie tělesa a p je měrný výkon generovaný vnějšími vlivy. Těmito vlivy mohou být Jouleovy ztráty p_j . Tepelný tok vedením \mathbf{q} je možné vyjádřit ve tvaru

$$\mathbf{q} = -\lambda \text{grad } T, \quad (2.18)$$

kde T je termodynamická teplota. Dále změnu vnitřní energie tělesa lze vyjádřit tvarem

$$\int_V \frac{dU_{\text{int}}}{dt} dV = \int_V \rho c_p \frac{dT}{dt} dV, \quad (2.19)$$

kde ρ je hustota materiálu a c_p tepelná kapacita.

Dosažením vztahů (2.18) a (2.19) do rovnice celkové energetické bilance (2.17) a po matematické úpravě pomocí Gauss-Ostrogradského věty, získáme Fourier-Kirchhoffovu nestacionární parciální diferenciální rovnici vedení tepla

$$\text{div} (\lambda \text{grad } T) + \rho c_p \frac{dT}{dt} = -p_j \quad [17] [18]. \quad (2.20)$$

3 Simulace indukčního vaříče pomocí programu Agros 2D

Poslední kapitola je zaměřena na simulaci konkrétního indukčního vaříče. V tomto případě se jedná o indukční vaříč značky De Gusto typ FTA02 (obr. 3.1), který byl zakoupen pro účely této bakalářské práce. Pro simulaci byl použit obyčejný smaltovaný hrnec, který byl vybrán z důvodu relativně známých materiálových vlastností. Při použití nádob určených pro indukční vaření se lze setkat s dvojitým dnem, které ukrývá spoustu neznámých materiálů. Proto by v modelu bylo mnoho neznámých parametrů. Simulace byla provedena pomocí programu Agros2D. V simulaci byl pozorován vliv frekvence a proudu na činné ztráty v nádobě a především na výslednou teplotu ohřívání nádoby.

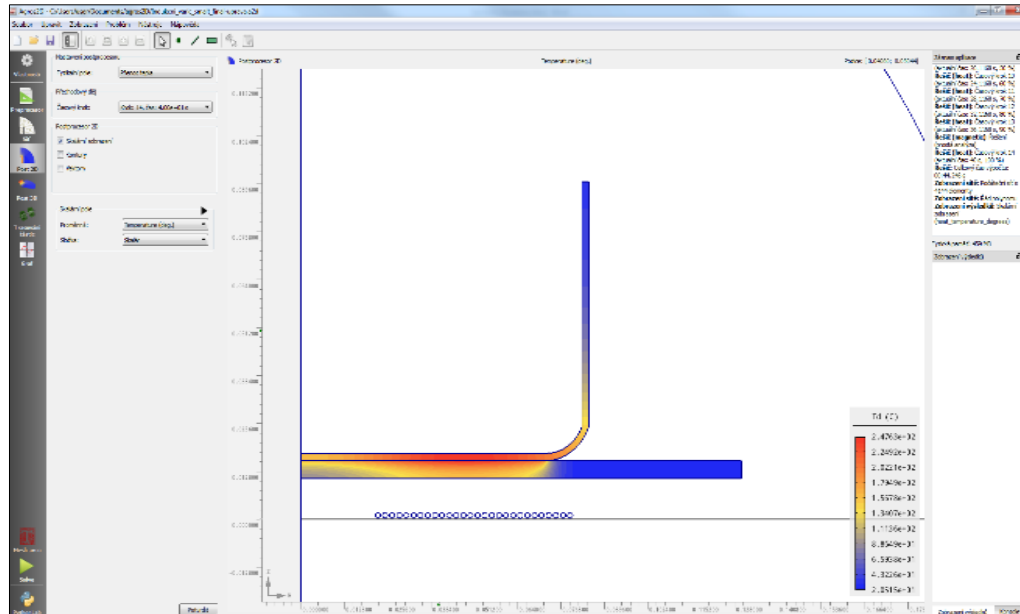


Obr. 3.1 Fotografie indukčního vaříče De Gusto

3.1 Program Agros2D

Agros2D je multiplatformní aplikace určená k řešení fyzikálních polí ve 2D rozložení. Aplikace je založena na knihovně Hermes, která pracuje na základě metody konečných prvků. Tato knihovna je vyvíjena skupinou pod vedením Pavla Šolína na univerzitách a pracovištích po celém světě. Program Agros2D je napsán v jazyce C++ a pracuje se systémy MS Windows, Linux. Aplikace sestává z preprocesoru, procesoru a postprocesoru. Preprocesor slouží k tvorbě geometrie, definici materiálových podmínek a přiřazení okrajových podmínek. Procesor tvoří výpočetní část založenou na knihovně Hermes pracující metodou konečných prvků. Postprocesor (obr. 3.2) slouží k analýze vypočtených dat. Výsledek je zobrazen pomocí barevné mapy, kontur a vektorových polí. Dále je možné zobrazit lokální a integrální veličiny, které lze zobrazit i pomocí grafu. Aplikace je vyvíjena na Katedře teoretické elektrotechniky Fakulty

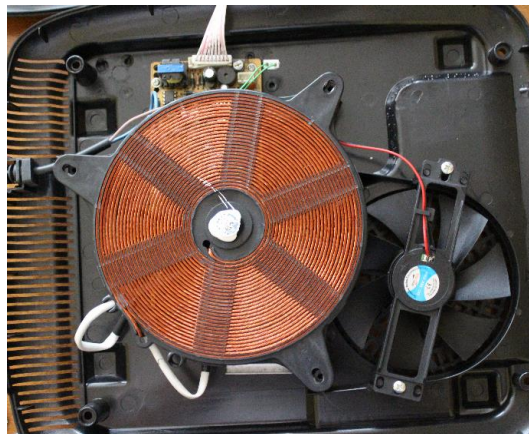
elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni a je volně ke stažení na stránkách www.agros2d.org [19][20][21].



Obr. 3.2 Postprocesor programu Agros2D

3.2 Formulace problému

Pro simulaci byl využit indukční vařič De Gusto (obr. 3.3), který se skládá z indukční cívky, tvořené lankem. Lanko je složeno z velkého množství tenkých měděných vodičů, díky kterým je limitován skinefekt, který vzniká při průchodu budícího proudu o vysoké frekvenci. Dále je indukční vařič tvořen feritovým stíněním, řídicí elektronikou a měničem frekvence z 50 Hz na frekvenci v rozmezí 15 - 30 kHz. Vysoká frekvence zapříčiní velmi malou hloubku vniku do nádoby. Joulové ztráty pak vznikají pouze v povrchových vrstvách použitého hrnce.



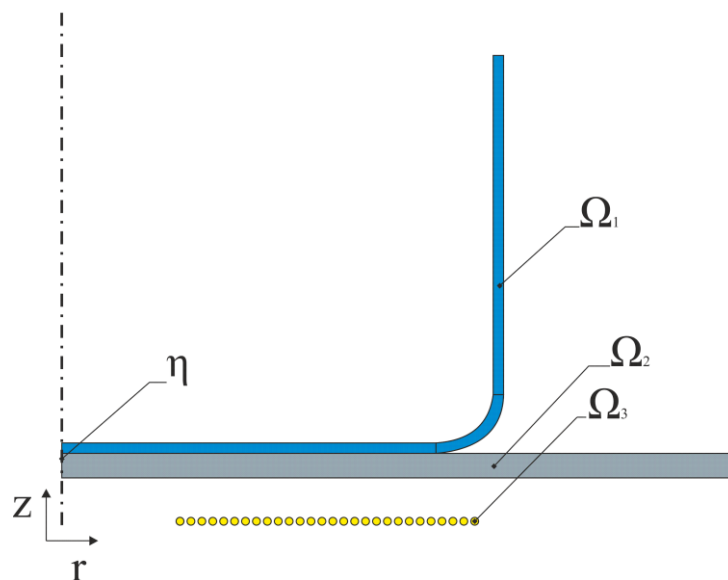
Obr. 3.3 Fotografie vnitřních částí indukčního vařiče De Gusto

3.3 Matematický model indukčního vaříče

Indukční vaříč představuje osově symetrický problém a lze řešit jako 2D úloha. Jedná se o slabě sdruženou úlohu, kde na sebe vzájemně působí magnetické a teplotní pole. Magneticky vodivý hrnec se zahřeje díky protékání vířivých proudů. Úloha se řeší v několika krocích. Nejdříve dochází k výpočtu magnetického pole. Z výsledku magnetického pole (velikosti Joulových ztrát) je následně řešeno teplotní pole [22].

3.3.1 Model magnetického pole indukčního vaříče

Definiční oblast modelu (obr. 3.4) sestává z jednotlivých vodičů cívky Ω_3 , sklokeramické desky Ω_2 , hrnce Ω_1 a vzduchu. Vzduch je ohraničen fiktivní hranicí, která není v obr. 3.4 zakreslena.



Obr. 3.4 Definiční oblast modelu magnetického pole

Pro indukční ohřev je charakteristické harmonicky proměnné magnetické pole. Uvedenou rovnici (2.15) v podkapitole (2.2) lze pomocí symbolicko-komplexní metody přepsat do vztahu:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\bar{\mathbf{A}}\right) + j\omega\gamma\bar{\mathbf{A}} = \bar{\mathbf{J}}_{\mathbf{v}}, \quad (3.1)$$

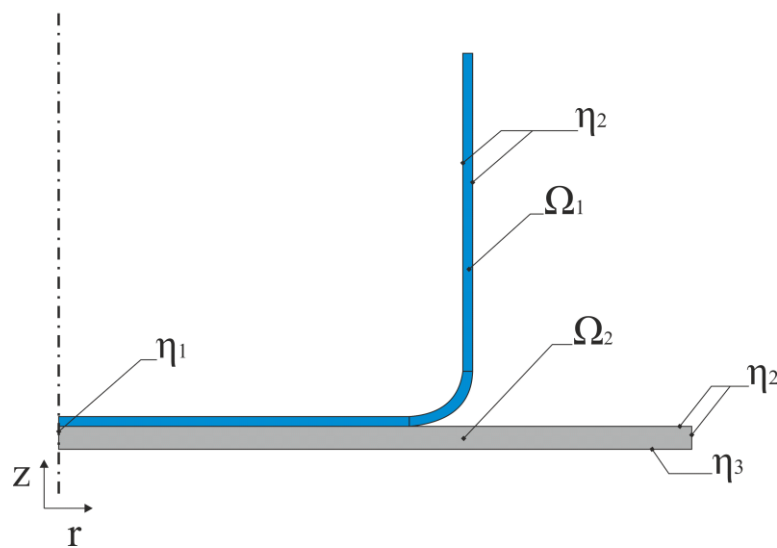
kde $\bar{\mathbf{A}}$ je fázor vektorového magnetického potenciálu a $\bar{\mathbf{J}}_{\mathbf{v}}$ je fázor hustoty vnějších proudů. Tuto rovnici lze pro model indukčního vaříče dále upravit. V induktoru nedochází ke ztrátám vířivými proudy. Rovnice bude tedy bez členu $j\omega\gamma\bar{\mathbf{A}}$. Naopak v ohřívané nádobě vznikají vířivé proudy, ale nevyskytují se proudy budící. V rovnici lze člen $\bar{\mathbf{J}}_{\mathbf{v}}$ zanedbat. V okolní oblasti

modelu, je nulový budící proud, nedochází k Joulovým ztrátám a relativní permeabilita sklokeramické desky a vzduchu $\mu = 1$. Proto je možné vztah přepsat do tvaru: $\text{rot}(\text{rot } \vec{A}) = 0$ [23].

V modelu je nutné zavést umělou hranici, která vymezuje oblast magnetického pole (není v nákresu uvedena z důvodu velké vzdálenosti od modelu). Druhou hranicí je osa symetrie η . Těmito hranicím je nutné předepsat okrajové podmínky. Za předpokladu dostatečné vzdálenosti uměle vytvořené hranice od modelu je hodnota vektorového potenciálu nulová. Na ose symetrie platí stejná okrajová podmínka $A = 0$. Obě podmínky představují Dirichletovy okrajové podmínky, kdy je předepsána hodnota hledané veličiny na hranici [23][24].

3.3.2 Model teplotního pole indukčního vaříče

Definiční oblast teplotního pole indukčního vaříče (obr. 3.5) se skládá pouze z hrnce Ω_1 a sklokeramické desky Ω_2 . V tomto případě je zde zapotřebí definovat tři okrajové podmínky η_1 , η_2 a η_3 , které představují hranice teplotního modelu.



Obr. 3.5 Definiční oblast modelu teplotního pole

Teplotní pole indukčního vaříče je popsáno nestacionární Fourier-Kirchofovou parciální diferenciální rovnicí vedení tepla (3.2)

$$\text{div} (\lambda \text{grad } T) = \rho c \frac{dT}{dt} - p_j \quad (3.2)$$

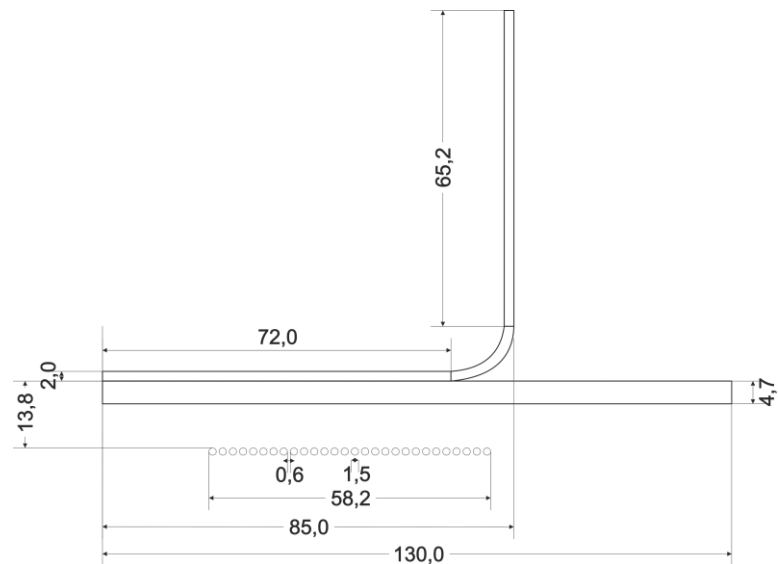
Hraničním oblastem teplotního pole η_1 , η_2 a η_3 je nutné předepsat okrajové podmínky. U hranic η_2 a η_3 se jedná o Dirichletovu okrajovou podmínku a u hranice η_1 se jedná o Neumanovu podmínku. Na hranicích η_2 a η_3 je nutné respektovat přestup tepla konvekcí a radiací. Pro tyto hranice platí rovnice ve tvaru:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = \alpha(T - T_{\text{ext}}) + \varepsilon_1 \sigma (T^4 - T_{\text{ext}}^4), \quad (3.3)$$

kde α je koeficient přestupu tepla, ε_1 je emisivita povrchu, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$), T_0 je teplota hrnce a T_{ext} je teplota okolních objektů. V řešeném problému lze u podmínky η_3 zanedbat druhý člen pravé strany rovnice z malého přestupu tepla mezi dnem hrnce a sklokeramickou deskou. U podmínky η_2 byl použit zobecněný koeficient přestupu tepla respektující i část radiace. Neumanova okrajová podmínka η_1 se nachází na ose symetrie a představuje nulový teplotní tok přes hranici a je dána vztahem $-\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = 0$ [23] [24].

3.4 Materiálové vlastnosti konkrétního vaříče a nádoby

Základní rozměry vaříče jsou uvedeny v obr. 3.6. Indukční cívka se skládá z 28 závitů o průměru 1.5 mm. Budící proud byl stanoven pomocí simulace a měření na 40 A (viz podkapitola níže 3.4.1). Cívka je tvořena mědí s relativní permeabilitou $\mu_r = 1$. Smaltovaný zkušební hrnc má relativní permeabilitu $\mu_r = 300$ a elektrickou vodivost $\gamma = 2 \cdot 10^6 \text{ S/m}$. Sklokeramická deska má relativní permeabilitu $\mu_r = 1$. Okolí hrnce a cívky je obklopeno vzduchem, taktéž s relativní permeabilitou $\mu_r = 1$. Tepelná vodivost smaltovaného hrnce je $\lambda = 80 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, hustota činí $\rho = 7860 \text{ kg}/\text{m}^3$ a měrná tepelná kapacita $c_p = 440 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [24]. Teplotní vodivost sklokeramické desky je $\lambda = 1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, hustota je $\rho = 2500 \text{ kg}/\text{m}^3$ a měrná tepelná kapacita $c_p = 720 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [26]. Na spodní hraně hrnce je uvažován z důvodu vysoké tepelné kapacity varné desky malý přestup tepla konvekcí $\alpha = 2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Na ostatních hranách hrnce je uvažován koeficient přestupu tepla o velikosti $\alpha = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.



Obr. 3.6 Rozměry modelu indukčního vařiče

3.4.1 Zjištění protékajícího proudu cívkou

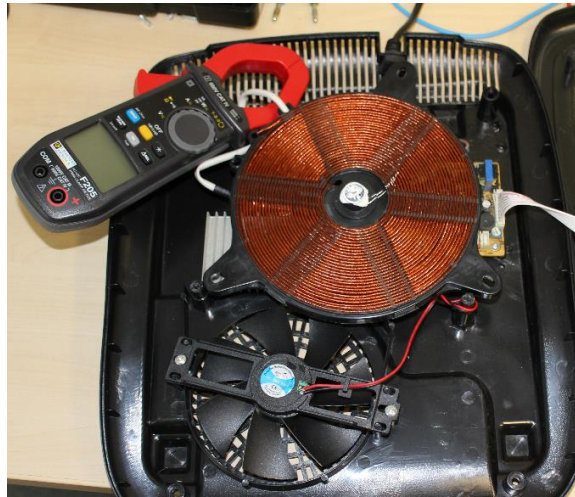
Tato podkapitola je zaměřena na stanovení velikosti proudu protékajícího cívkou. První pokusy při zjišťování velikosti proudu byly prováděny pomocí různých měřících přístrojů. Nejprve byl použit přístroj power monitor, který byl připojen před celý vařič a měřil odběr proudu přímo ze sítě. Odebíraný proud ze sítě není adekvátní proudu v cívce, protože proud cívkou je upraven frekvenčním měničem (obr. 3.7).



Obr. 3.7 Fotografie měření proudu pomocí power monitoru

Další měření proudu probíhalo již na rozebraném indukčním vařiči pomocí klešťového multimetru F250 (obr. 3.8). Po zapojení měřícího přístroje bylo nutné obelstít bezpečnostní ochranu přiložením hrnce nad indukční cívku. Při měření byl zjištěn bohužel také velmi nízký proud. Při přepnutí multimetru na měření frekvence, ukázal tento přístroj hodnotu 100 Hz, což

je pro indukční vařiče velmi nízká frekvence. Tyto multimetry jsou určeny pouze pro nižší frekvence, proto byly naměřené výsledky velmi nepřesné. Dalším pokusem bylo zapojení digitálního multimetru Chauvin Arnoux C. A 8332B, který je ovšem určen také pouze na nižší frekvence a výsledek tak byl stále velmi nepřesný.



Obr. 3.8 Fotografie měření proudu pomocí klešťového multimetru F250

Poslední měření protékajícího proudu cívkou bylo provedeno pomocí analogového ampérmetru. Z důvodu měření tímto přístrojem bylo nutné odšroubovat cívku od řídicí elektroniky a zapojit ampérmetr do obvodu s cívkou. Po zapojení ampérmetru, s rozsahem do 5 A došlo ihned k překročení maximální hranice přístroje a měření nemohlo dále pokračovat. Proto byl využit další analogový ampérmetr určený do 400 A. Po zapojení tohoto přístroje a zapnutí vařiče na 3. výkonnostní stupeň byla naměřena hodnota okolo 200 A. Při zapnutí na 6. výkonnostní stupeň ampérmetr ukázal dokonce hodnotu 400 A. Toto měření vykazovalo extrémní chybovost.

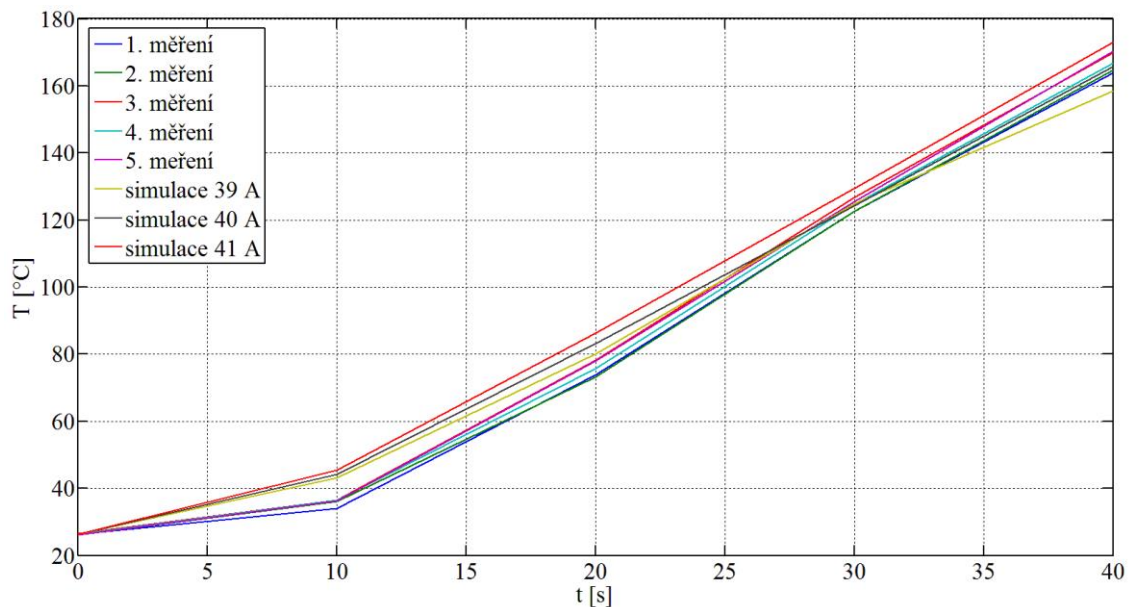
Vzhledem k výše popsaným problémům se přibližná hodnota proudu stanovila z experimentálního měření teploty (obr. 3.9) a následné simulace v programu Agros2D. Experimentální měření teploty probíhalo pomocí termočlánek Greisinger GMH 3250, stopky a kamery. Termočlánek byl umístěn na střed dna smaltovaného hrnce. Stopky byly použity pro stanovení přesného času zapnutí a k měření 10 s úseků. Po těchto intervalech byla vždy odečtena hodnota teploty. Kamera byla použita z důvodu zmenšení nepřesnosti při odečítání naměřených hodnot. Celkový časový úsek byl zvolen pouze na dobu 40 s a to z důvodu velké

rychlosti² ohřevu prázdné nádoby. Měření probíhalo celkem 5 krát. Hrncem byl vždy vychlazen na stejnou počáteční teplotu.



Obr. 3.9 Fotografie měření teploty v závislosti na čase

Z experimentálního měření bylo získáno 5 průběhů teplot (obr. 3.10). V programu Agros2D byla následně upravována simulovaná hodnota proudu protékajícího cívkou tak, aby bylo docíleno co nejlepšího souladu s naměřenými daty. Simulované průběhy teplot pro proudy 39 A, 40 A a 41 A jsou porovnány se změřenými průběhy teplot.



Obr. 3.10 Porovnání experimentálního měření se simulovanými hodnotami

² Po 60 s dosahovala teplota 208 °C.

Z obr. 3.10 je patrné, že k největší odchylce dochází v časovém bodě 10 s. Odchylku lze vysvětlit tím, že indukční vařič se ihned po zapnutí nespustí na maximální výkon, ale pouze na 3. výkonnostní stupeň z celkových 6. Na maximální výkon byl vařič přiveden až ručním nastavením výkonu, který trval v rozmezí 3-5 s.

3.5 Optimalizace modelu

Simulovaný 2D model prošel mnoha úpravami. Nejprve byl navrhnout s cívkou, která byla znázorněna pouze obdélníkem představující průřez cívky. Následně byla vypočítána proudová hustota pomocí vzorce $J = \frac{N \cdot I}{S}$, kde J je proudová hustota, N je počet závitů, I je proud protékající cívkou a S je průřez cívky. Jako ohřívána nádoba byla zvolena nádoba určená pro indukční vaření s lisovaným dnem. Tento model byl velmi neadekvátní z důvodu neznámých materiálových vlastností nádoby. Proto byla nádoba vyměněna za obyčejný smaltovaný hrnec, který měl známé materiálové vlastnosti. Poslední změna proběhla u samotné cívky, která musela být kompletně překreslena na jednotlivé vodiče. Hlavním důvodem překreslení bylo zanedbání koeficientu plnění, který hrál velkou roli při simulaci, neboť mezery mezi samotnými vodiči byly poměrně velké (0,6 mm). Jelikož je cívka tvořena celkem 28 závitů o průměru 1,5 mm bylo přesnější cívkou nasimulovat pomocí jednotlivých závitů.

3.5.1 Konvergence výsledků modelu

Dalším důležitým faktorem optimalizace modelu byla konvergence výsledků. V aplikaci Agros2D lze ručně volit zjemnění sítě h a řád polynomu na jednom elementu p . U teplotního pole je nutné problém řešit jako přechodový děj. Z tohoto důvodu je nutné se zabývat také počtem kroků. Rozhodování o počtu kroků bylo přenecháno programu Agros2D. Zvolena byla adaptivní metoda počtů kroků. Při simulaci bylo možné pozorovat, že byl z počátku časový krok kratší a dále se prodlužoval.

Konvergence byla provedena na domácím počítači ASUS s procesorem Intel Core i5-3230M o frekvenci 2,6 GHz a o velikosti paměti 6 GB s nainstalovaným operačním systémem Windows 7 Profesional 64bit. Při použití jiného počítače se může čas potřebný k výpočtu lišit. Při zvolení většího zjemnění sítě a vyššího řádu polynomu docházelo k nedostatku paměti a program tak nemohl vypočítat výsledek. Velké ulehčení výpočetního procesu bylo docíleno tím, že Joulovy ztráty jsou časově neměnné a není nutné tedy počítat magnetické pole před každým teplotním polem. Magnetické pole stačí tedy počítat na začátku procesu a na jeho konci.

Tab. 3.1 znázorňuje pro stanovené hodnoty h a p výsledky vypočtených hodnot činných ztrát P_j , energie W_m , čas t , a DOFs (degrees of freedom), neboli stupně volnosti, které přímo souvisí s rychlostí výpočtu. Čím vyšší počet stupňů volnosti, tím je větší náročnost výpočtu a výpočet trvá delší dobu. Tab. 3.2 uvádí výsledky konvergence teplotního modelu. V tomto případě se zkoumala teplota v čase 20 s a 40 s, DOFs a čas výpočtu t . Teploty byly odečítány ve středu dna hrnce [23].

Tab. 3.1 Konvergence výsledků modelu magnetického pole

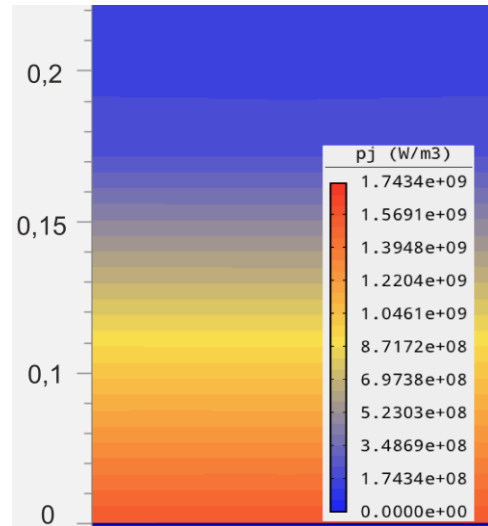
$h-p$	zjemnění ³	P_j (W)	W_m (J)	DOFs	t (s)
0-1	0	2482	0,00121	4912	6,66
1-1	0	2504	0,00122	14584	10,87
0-2	0	1993	0,00337	20248	9,71
1-2	0	1990	0,00337	58768	27,23
1-2	1	1700	0,00406	71508	43,8

Tab. 3.2 Konvergence výsledků modelu teplotního pole

$h-p$	$T_{p\ 20s}$ (°C)	$T_{p\ 40s}$ (°C)	DOFs	t (s)
0-1	109	234	199	6,66
1-1	117,5	246	656	10,87
0-2	97,7	199,3	656	9,71
1-2	98	199	2347	27,23
2-3	80	158,6	19471	43,8

Z výsledků je patrné, že neoptimálnější výpočet je také nejsložitější, který domácí počítač zvládne vypočítat: magnetické pole se zjemněním sítě $h = 1$, řádem polynomu $p = 2$ a zjemněním sítě ke spodní hraně hrnce $zjemnění = 1$ a teplotní pole se zjemněním sítě $h = 2$, řádem polynomu $p = 3$. Zjemnění ke spodní hraně hrnce je výhodné a zároveň nutné z důvodu velmi malé hloubky vniku obr. 3.11, která je zhruba 0,2 mm. Při použití malého zjemnění u spodní hrany hrnce dochází k velkým početním chybám. Při srovnání s experimentálním měřením viz podkapitola 3.4.1 je možné usuzovat, že zvolené zjemnění sítě a řád polynomu s kombinací zjemnění k hraně je správné. Ostatní výsledky lze považovat za velmi nepřesné, díky výsledné teplotě hrnce dosahující 200 °C v čase 40 s. Činné ztráty P_j v prvních případech ($h-p = 0-1$ a $h-p = 1-1$) silně překračují výkon vařiče a v druhých dvou případech ($h-p = 0-2$ a $h-p = 1-2$) mírně přesahují výkon vařiče, který je stanoven výrobcem na 1900 W.

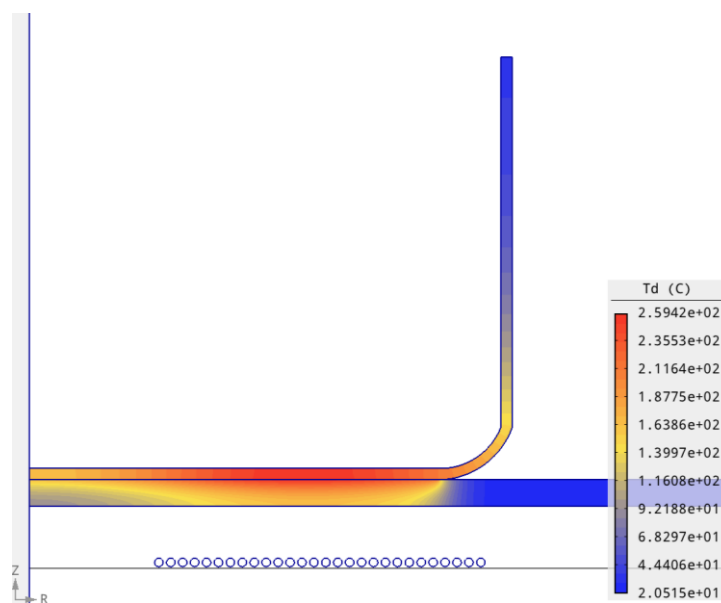
³ Zjemnění bylo provedeno ke spodní hraně hrnce.



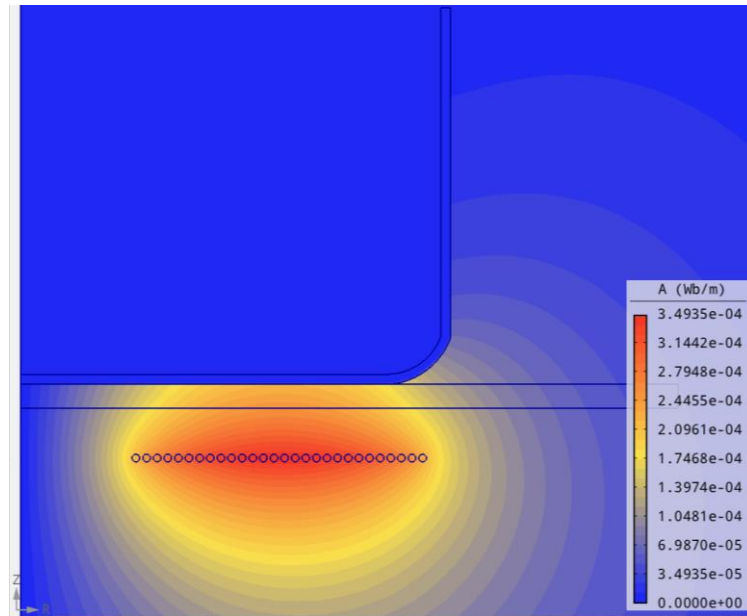
Obr. 3.11 Rozložení měrných ztrát u dna nádoby

3.6 Rozložení teploty na dně hrnce

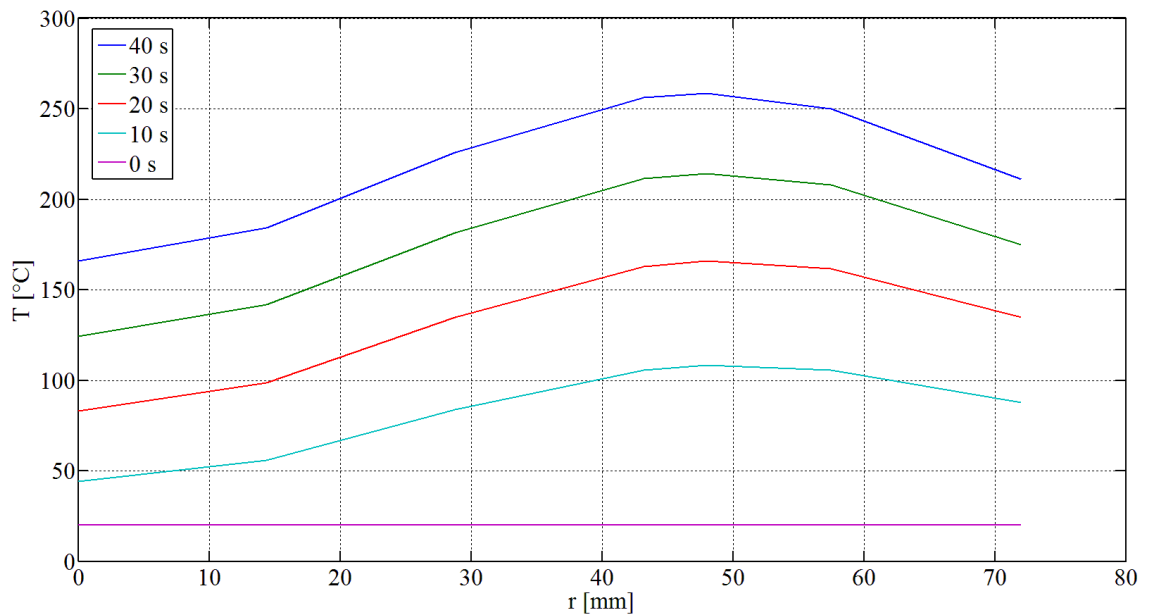
Jak je zřejmé z obr. 3.3, cívka indukčního vařiče není navinutá od samého středu, nýbrž od poloměru 22 mm od středu. Z toho vyplývá, že dno hrnce nebude zahříváno rovnoměrně po celém povrchu. Nejvíce bude dno ohříváno ve středu samotné cívky, tj. zhruba 48 mm od středu. V obr. 3.14 je zobrazeno rozložení teploty v závislosti poloměru hrnce v jednotlivých časech. Je patrné, že nejvyšší teplota je nad cívkou, zatímco ve středu nádoby je teplota zhruba o 60 °C chladnější. Teplo ke středu hrnce se šíří převážně vedením. Na obr. 3.12 je uvedeno teplotní rozložení v celé nádobě. Rozložení vektorového potenciálu, který se uzavírá v povrchu dna, je na obr. 3.13.



Obr. 3.12 Rozložení teplotního pole v čase 40 s



Obr. 3.13 Rozložení vektorového potenciálu



Obr. 3.14 Průběh teploty v závislosti na poloměru

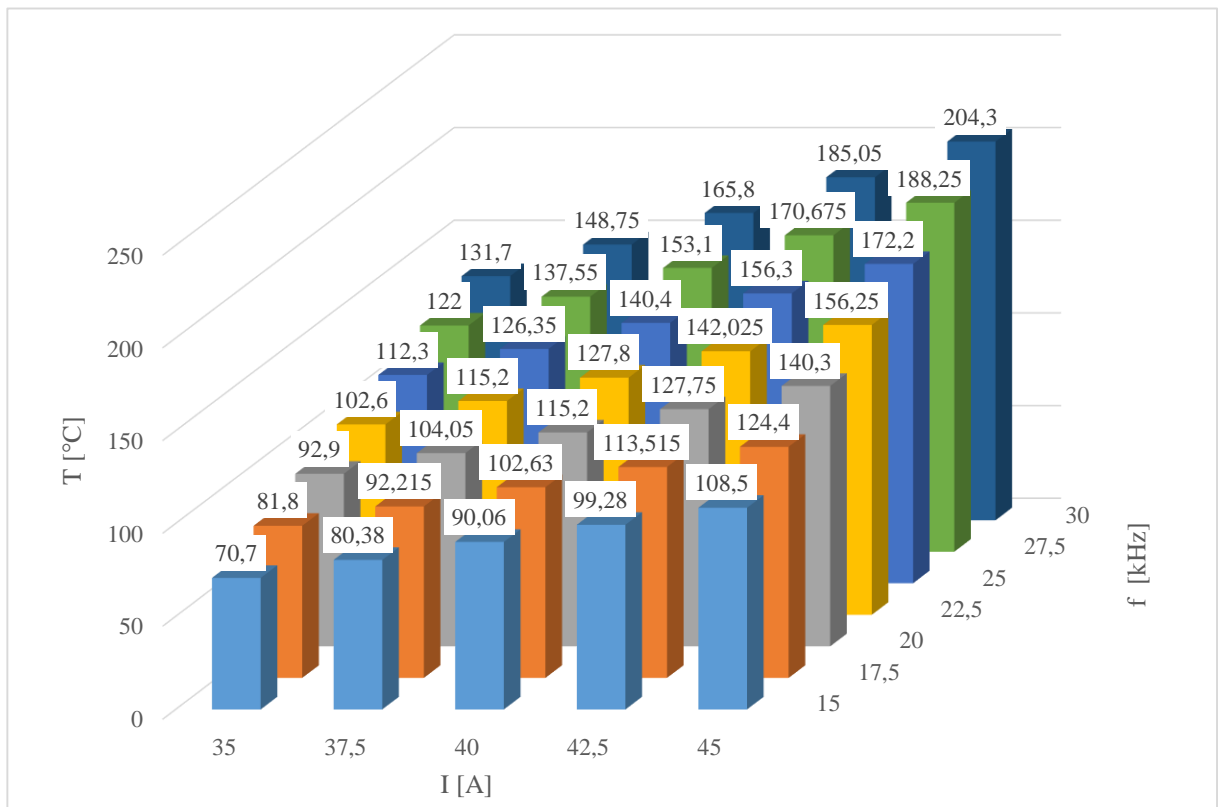
3.7 Zjištění vlivu frekvence a velikosti proudu na rychlost ohřevu

Posledním bodem zadání bakalářské práce je vliv frekvence a proudu na rychlost ohřevu nádoby. Frekvence přímo ovlivňuje hloubku vniku, která je dána vztahem (1.1) v podkapitole 1.1. Platí čím větší frekvence, tím je menší hloubka vniku. Od hloubky vniku se odvíjí hustota Joulových ztrát. Joulovy ztráty jsou přímo úměrné ztrátám přeměněných na teplo. Proto by bylo vhodné mít frekvenci co největší. Konstrukčně to ale není možné, jelikož při vysokých frekvencích dochází i v pleteném drátu z důvodu skinefektu ke ztrátám, a tím pádem

i k nechtěnému zahřívání cívky. Obecně se hodnota frekvence u indukčních vaříčů pohybuje kolem 15 - 30 kHz.

Značný vliv na indukční ohřev má i budicí proud cívky. Budicí proud cívky je přímo úměrný síle magnetického pole. Proto je možné říci, že čím větší proud, tím silnější magnetické pole a rychlejší ohřev. Proud ovšem také nelze z konstrukčních důvodů zvyšovat do nekonečna. Cívka pokusného a simulovaného vaříče De Gusto již po několika minutách vykazovala známky středního zahřátí, proto u vaříče musí být přítomen ventilátor pro chlazení cívky a potřebné bezpečnostní čidla.

Vliv frekvence a proudu na ohřev nádoby byl simulován na modelu z předchozích kapitol. Výsledky simulování jsou znázorněny na obr. 3.15. Teplota byla odečtena pro jednotlivé hodnoty proudů (35 A, 40 A a 45 A) a frekvencí (15 kHz, 20 kHz, 25 kHz a 30 kHz) vždy v čase 40 s. Celkem bylo tedy provedeno 12 simulací a pro jemnější zobrazení v grafu byla provedena aproximace bodů.

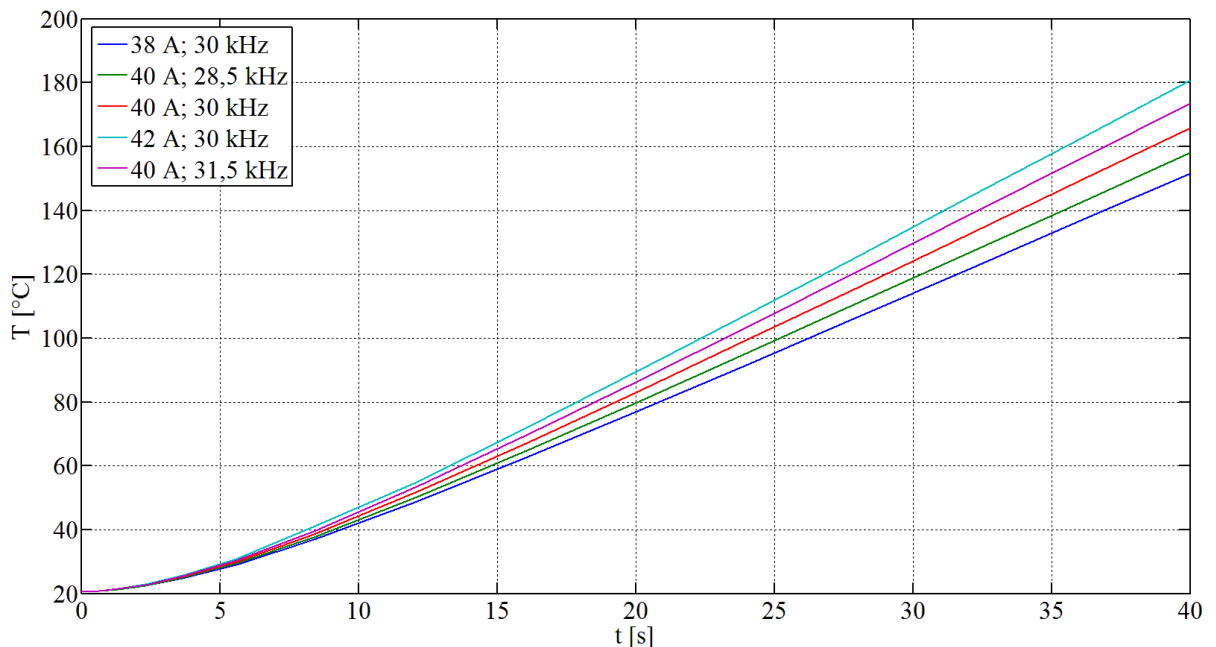


Obr. 3.15 Vliv frekvence a proudu na teplotu v čase 40 s

Výsledek simulace ověřil teoretické předpoklady. Čím větší frekvence a větší proud protéká cívkou, tím dochází k většímu zahřátí nádoby.

3.7.1 Simulace za účelem zjištění veličiny s větším vlivem na teplotu

V kapitole 3.7 byl prokázán značný vliv frekvence a proudu na velikost výsledné teploty. Dále se práce zabývá tím, která z veličin má na ohřev větší vliv. Simulace vycházela z původního modelu vařiče De Gusto s frekvencí 30 kHz a proudem 40 A. Pomocí simulace byla měněna frekvence při konstantním proudu, poté byl měněn proud při konstantní frekvenci. Obě simulace byly prováděny s procentuálním krokem $\pm 1\%$, $\pm 2\%$ a $\pm 5\%$. Výsledky simulace průběhů teplot byly zpracovány do 3 grafů. Pro větší přehlednost je uveden graf s krokem $\pm 5\%$, ostatní grafy jsou uvedeny v příloze (obr. 0.1 a obr. 0.2).



Obr. 3.16 Porovnání vlivu frekvence a proudu na rychlost ohřevu ($\pm 5\%$)

Z výsledků simulace (obr. 3.16) je patrné, že větší vliv na rychlost ohřevu má proud. Při zvýšení proudu o 5 % dojde ke zvýšení teploty o 14,9 °C, zatímco při zvýšení frekvence o 5 % dojde ke zvýšení teploty pouze o 7,7 °C (odchylka odečtena v čase 40 s).

3.8 Závislost blízkosti umístění cívky k ohřivané nádobě

Referenční vzdálenost cívky byla zvolena hodnota 13,8 mm, frekvence 30 kHz proud 40 A. Ostatní materiálové vlastnosti byly stejné jako při simulaci vařiče De Gusto se smaltovaným hrncem. Simulace probíhaly v postupném přibližování cívky o vzdálenost 1 mm. Následně byla

odečítána hodnota činných ztrát P_j , energie W_m a teploty T . Teplota byla odečtena ve středu dna nádoby v čase 40 s. Výsledky simulací jsou uvedeny v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Výsledky přiblížení cívky

Přiblížení (mm)	P_j (W)	W_m (J)	T (°C)
1	1808	0,00433	175,9
2	1924	0,00461	186,7
3	2049	0,00492	198,2
4	2183	0,00525	210,6
5	2326	0,0056	223,9

Z výsledků simulace je patrné, že vzdálenost cívky od nádoby má značný vliv na činné ztráty, a tedy i na ohřev nádoby. Při přiblížení cívky o 5 mm, byla hodnota teploty zvýšena o 58,1 °C oproti původní simulaci vařiče De Gusto, tedy téměř o 35 %. Z výsledků je možné usuzovat, že čím menší bude vzdálenost cívky od nádoby, tím více se bude nádoba zahřívat. Vzdálenost cívky od nádoby ovšem není možné zmenšit na minimum. Je nutno počítat se sníženou možností chlazení a také s větším zahřátím cívky od samotné nádoby, respektive sklokeramické desky.

Závěr

Cílem této práce bylo popsat problematiku indukčního ohřevu nádoby na potraviny. Stěžejním úkolem bylo popsat samotný princip indukčního ohřevu, prostudovat výhody a nevýhody indukčního vaření, uvést materiálové vlastnosti nádob vhodných pro indukční vaření a také poukázat na různé zajímavosti indukčního ohřevu.

Indukční ohřev se v dnešní době dostává stále více do popředí. Mezi hlavní výhody patří účinnost a rychlost ohřevu. K nevýhodám lze zařadit využívání magneticky vodivých nádob určených pro indukci a vyšší pořizovací cenu indukčního vařiče. Hlavními materiálovými vlastnostmi charakterizující varnou nádobu jsou především vysoká magnetická vodivost a vysoká permeabilita.

V druhé kapitole byl stanoven matematický model pro indukční ohřev vycházející z Maxwellových rovnic. Matematický model se skládá z magnetického a teplotního pole, kde jsou pole vzájemně sdružená. Oba matematické modely byly formulovány pomocí parciálních diferenciálních rovnic.

Poslední kapitola byla zaměřena na simulaci konkrétního indukčního vařiče De Gusto. Nejprve by uveden problém indukčního ohřevu, poté bylo formulováno konkrétní magnetické a teplotní pole indukčního vařiče a stanoveny materiálové vlastnosti vařiče a nádoby. Proud protékající cívkou byl stanoven pomocí experimentálního měření teploty na povrchu nádoby a následné simulace. Simulace byla prováděna v programu Agros2D, vyvíjeného na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni. Díky simulaci bylo možné ověřit několik teoretických předpokladů, jako je silná závislost frekvence a proudu na rychlost ohřevu nádoby. Z výsledků je dále patrné, že majoritní vliv na rychlost ohřevu má proud. Simulace také poukázala na nelineární rozložení teploty na dně hrnce. V poslední části práce byla simulována závislost vzdálenosti cívky na hodnotu činných ztrát. Činné ztráty se silně zvyšovaly s přiblížením cívky k ohřívání nádoby. Díky simulaci se ověřily hlavní vlivy na rychlost ohřevu při indukčním vaření. Jsou jimi vysoká frekvence, vysoký proud a co nejmenší vzdálenost cívky od ohřívání nádoby.

Literatura

- [1] PAUKNER, Jaromír a Bohumil BRAUN. *50 příkladů indukčního ohřevu*. Praha: SNTL, 1963. 93s.
- [2] ROT, David. *Efektivní řešení fyzikálně sdružených problémů z oblasti elektrotepelných technologií*. Plzeň, 2009. Disertační práce. Západočeská univerzita.
- [3] Zemní plyn. *Co je zemní plyn* [online]. 2010 [cit. 2015-01-07]. Dostupné z: <http://www.zemniplyn.cz/plyn/>
- [4] DOLEŽEL, Ivo. *Příklady sdružených úloh* [online]. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2014-11-07]. Dostupné z: <http://web.fel.zcu.cz/kte/predmety/EDS.htm>
- [5] Fyzmatik. *Indukční ohřev* [online]. 2009 [cit. 2014-11-07]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/826-indukcni-ohrev.html>
- [6] Autor neuveden, *Indukční ohřev*. In: Power User Mathematic Array, CVUT, Fakulta elektrotechnická, Praha, 2008 [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: http://panther.feld.cvut.cz/cs/wiki/indukcni_ohrev
- [7] ŽILAVÝ, Peter. *Pokusy s indukčním vařičem. Katedra didaktiky fyziky: Matematicko-fyzikální fakulta UK v Praze* [online]. 2008 [cit. 2014-11-01]. Dostupné z: http://kdf.mff.cuni.cz/~zilavy/clanky/Pokusy_s_indukcnim_varicem.pdf
- [8] CHADT, Miloš. *Úsporné indukční vaření aneb Elektřina jak ji neznáte - tentokrát od Fagoru. Abeceda domácích spotřebičů* [online]. 2006 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.chadt.cz/abc/index.php?zam=2&dal=85>
- [9] Víte, co pijete?. *DTest* [online]. 2009, č. 10 [cit. 2014-11-07]. Dostupné z: <https://www.dtest.cz/casopis-82/10-2009>
- [10] ENERGETICKÉ SLUŽBY PRE. *Domácí spotřebiče a úspory energie. TZBinfo* [online]. 2013 [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/10050-domaci-spotrebice-a-uspory-energie>
- [11] MACH, Martin. *Jaký je rozdíl v úspoře energie mezi indukční a sklokeramickou deskou?. Ekolist* [online]. 2008 [cit. 2014-11-08]. Dostupné z: <http://ekolist.cz/cz/zelena-domacnost/dotazy-a-odpovedi/jaky-je-rozdil-v-uspore-energie-mezi-indukcni-a-sklokeramickou-deskou>
- [12] CHADT, Miloš. *Indukci si prostě oblíbíte. Abeceda domácích spotřebičů* [online]. 2011 [cit. 2015-01-28]. Dostupné z: <http://www.chadt.cz/abc/Indukcni-vareni.html?zam=2&str=1&dal=337>
- [13] KARBAN, Pavel. *Matematický popis stacionárního elektrického pole*. [online] Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~karban/ATE/prednaska_02.pdf
- [14] KARBAN, Pavel. *Matematický popis stacionárního elektrického proudového pole a magnetického pole*. [online] Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~karban/ATE/prednaska_03.pdf
- [15] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2001. ISBN 80-7082-826-9.

- [16] DOLEŽEL, Ivo. *Spojité modely elektromagnetických polí* [online]. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2015-01-07]. Dostupné z: <http://web.fel.zcu.cz/kte/predmety/EDS.htm>
- [17] KARBAN, Pavel. *Teplotní pole* [online] Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~karban/ATE/prednaska_05.pdf
- [18] DOLEŽEL, Ivo. *Teplotní pole* [online]. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2015-01-07]. Dostupné z: <http://web.fel.zcu.cz/kte/predmety/EDS.htm>
- [19] KARBAN, Pavel. *Aplikace teoretické elektrotechniky* [online] Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~karban/ATE/prednaska_01.pdf
- [20] KARBAN, Pavel. *Počítačové modelování fyzikálních polí* [online] Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~karban/ATE/prednaska_07.pdf
- [21] Home. *Agros2D* [online]. 2015 [cit. 2015-05-21]. Dostupné z: <http://www.agros2d.org/>
- [22] DOLEŽEL, Ivo. *Sdružené úlohy v silnoproudé elektrotechnice* [online]. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2015-01-07]. Dostupné z: <http://web.fel.zcu.cz/kte/predmety/EDS.htm>
- [23] KARBAN, Pavel. Mach, F., Kůs, P., Pánek, D., Doležel, I.: *Numerical solution of coupled problems using code Agros2D*, Computing, 2015, Volume 95, Issue 1 Supplement, pp 381-408, DOI 10.1007/s00607-013-0294-4
- [24] KARBAN, Pavel. *Matematický popis stacionárního elektrického pole* [online] Učební text. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~karban/ATE/prednaska_02.pdf
- [25] Železo. *Periodická tabulka* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/26.html>
- [26] 1.2 Vlastnosti. II. *Vše o skle* [online]. 2014, (1) [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: http://www.zasklievanie-balkony.eu/files/subor1_1317655943.pdf

Seznam obrázků

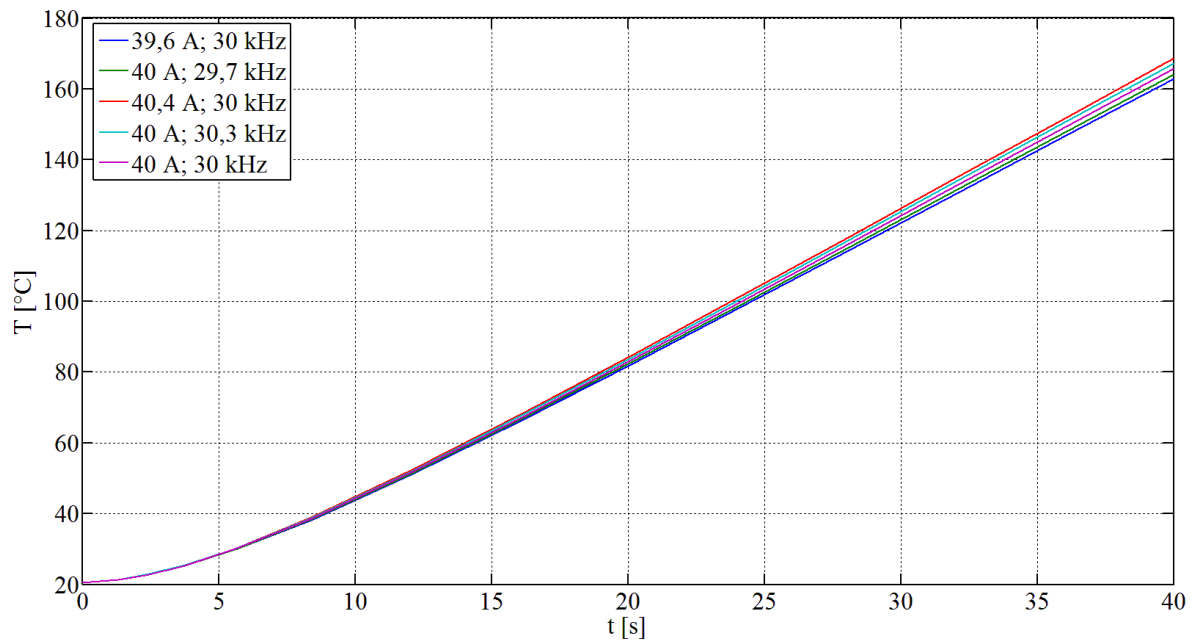
OBR. 1.1 SCHÉMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ INDUKČNÍHO OHŘEVU (PŘEKRESLENO Z [4]).....	12
OBR. 1.2 SCHÉMA INDUKČNÍHO VAŘIČE (PŘEKRESLENO Z [6])	13
OBR. 1.3 OHŘEV 1 LITRU VODY DO BODU VARU (PŘEVZATO Z [11]).....	15
OBR. 1.4 UMÍSTĚNÍ MĚDĚNÉHO KROUŽKU (PŘEKRESLENO Z [7])	16
OBR. 3.1 FOTOGRAFIE INDUKČNÍHO VAŘIČE DE GUSTO	21
OBR. 3.2 POSTPROCESOR PROGRAMU AGROS2D	22
OBR. 3.3 FOTOGRAFIE VNITŘNÍCH ČÁSTÍ INDUKČNÍHO VAŘIČE DE GUSTO	22
OBR. 3.4 DEFINIČNÍ OBLAST MODELU MAGNETICKÉHO POLE.....	23
OBR. 3.5 DEFINIČNÍ OBLAST MODELU TEPLTNÍHO POLE.....	24
OBR. 3.6 ROZMĚRY MODELU INDUKČNÍHO VAŘIČE.....	26
OBR. 3.7 FOTOGRAFIE MĚŘENÍ PROUDU POMOCÍ POWER MONITORU	26
OBR. 3.8 FOTOGRAFIE MĚŘENÍ PROUDU POMOCÍ KLEŠŤOVÉHO MULTIMETRU F250	27
OBR. 3.9 FOTOGRAFIE MĚŘENÍ TEPLTY V ZÁVISLOSTI NA ČASE	28
OBR. 3.10 POROVNÁNÍ EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ SE SIMULOVANÝMI HODNOTAMI.....	28
OBR. 3.11 ROZLOŽENÍ MĚRNÝCH ZTRÁT U DNA NÁDOBY.....	31
OBR. 3.12 ROZLOŽENÍ TEPLTNÍHO POLE V ČASE 40 s.....	31
OBR. 3.13 ROZLOŽENÍ VEKTOROVÉHO POTENCIÁLU	32
OBR. 3.14 PRŮBĚH TEPLTY V ZÁVISLOSTI NA POLOMĚRU	32
OBR. 3.15 VLIV FREKVENCE A PROUDU NA TEPLTU V ČASE 40 s.....	33
OBR. 3.16 POROVNÁNÍ VLIVU FREKVENCE A PROUDU NA RYCHLOST OHŘEVU ($\pm 5\%$)	34
OBR. 0.1 POROVNÁNÍ VLIVU FREKVENCE A PROUDU NA RYCHLOST OHŘEVU ($\pm 1\%$)	1
OBR. 0.2 POROVNÁNÍ VLIVU FREKVENCE A PROUDU NA RYCHLOST OHŘEVU ($\pm 2\%$)	1

Seznam tabulek

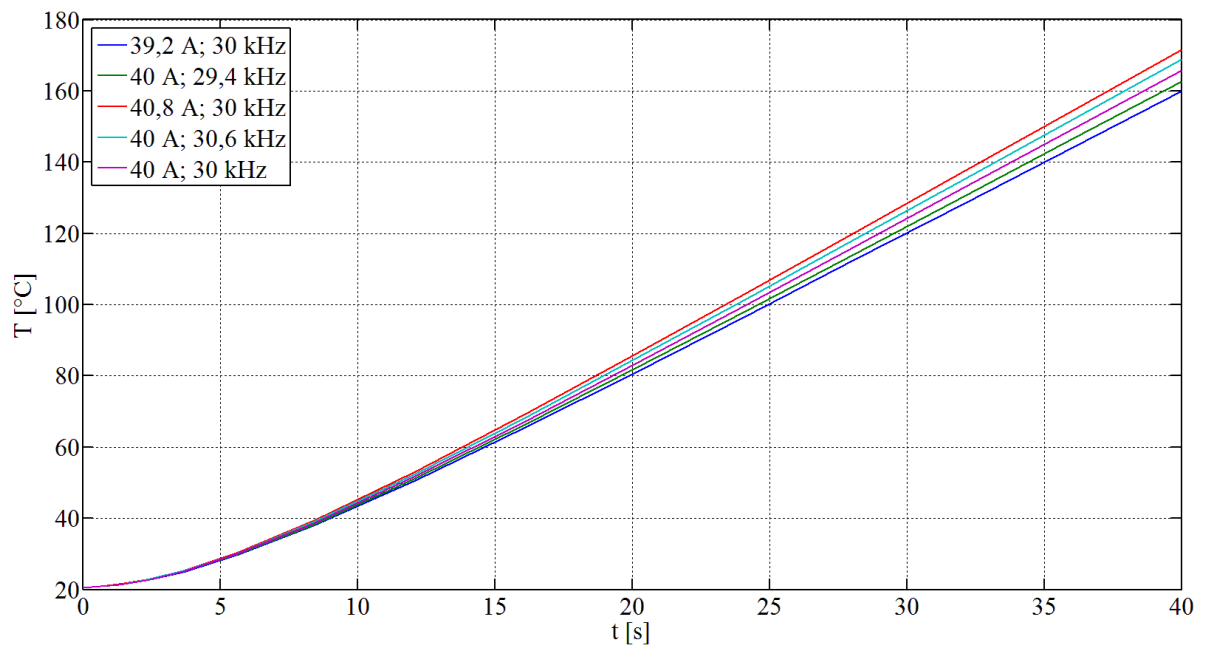
TAB. 3.1 KONVERGENCE VÝSLEDKŮ MODELU MAGNETICKÉHO POLE	30
TAB. 3.2 KONVERGENCE VÝSLEDKŮ MODELU TEPLTNÍHO POLE	30
TAB. 3.3 VÝSLEDKY PŘIBLÍŽENÍ CÍVKY	35

Přílohy

Příloha A – porovnání vlivu frekvence a proudu na rychlost ohřevu



Obr. 0.1 Porovnání vlivu frekvence a proudu na rychlost ohřevu (± 1 %)



Obr. 0.2 Porovnání vlivu frekvence a proudu na rychlost ohřevu (± 2 %)