



## Posudek disertační práce

### **Ing. Oldřich Kroupa: Nový fyzikální laboratorní model indukčního zařízení s přídatnými konstrukčními prvky a válcovou magnetickou vsázkou.**

Předložená práce je experimentální, doplněná simulací. Lze v ní nalézt kapitoly odpovídající klasickému uspořádání. V anotaci je výstižný popis obsahu práce, ke své škodě však autor neuvádí konkrétní dosažené praktické výsledky.

Úvod je ve dvou kapitolách, v první se vysvětluje smysl a cíle práce, ve druhé je úvod do problematiky indukčního ohřevu, mj. zejména je popsán skinefekt ve válcových souřadnicích. K jejímu obsahu mám tuto připomínku: Vztah (2.1) na str. 21 je zajímavý a běžně se neuvádí. Měl by být odkaz, případně naznačeno odvození. Pokud je konstanta  $K$  bezrozměrná, nevychází výsledek rozměrově. Pod odmocninou by měla být absolutní permeabilita, jinak vyjdou veličiny v druhé odmocnině.

Kapitoly 3 a 4 obsahují teoretické vztahy potřebné k vytvoření modelu pro simulaci indukčního ohřevu. Je zaměřena zejména na výpočty metodou konečných prvků a zanedbává jiné možnosti. Cívka je dostatečně jednoduchý prvek, takže lze pro intenzitu či indukci magnetického pole na její ose použít jednoduchý analytický výraz. Pole v kterémkoliv bodě kromě vinutí lze spočítat jednoduchou numerickou integrací pomocí Biot-Savartova zákona. Použití jednodušších metod navíc umožní ověření správnost metod složitějších. Správně se používá případ kvazistacionárního elektromagnetického pole, ale jeho přípustnost se redukuje jen na zanedbání posuvného proudu. Pro tento případ je typičtější fakt, že elektromagnetická vlna se šíří nekonečnou rychlostí, všechny body mají stejnou fázi. Stacionární pole popisované na str. 34 s indukčním ohřevem nesouvisí a nemá smysl se jím zabývat.

Následující kapitoly popisují experiment, kapitola 5 je věnována realizaci laboratorního vzorku, jeho odstínění a měření rozptylového magnetického pole. Kapitola 6 je pak zaměřena na konstrukci měřícího prvku, malé cívky. Smysl stínění autor spatřuje především v tom, že stíněním se může zvýšit užitečné pole v cívce, tedy ekonomický efekt. Kromě toho ale stínění má zajistit elektromagnetickou kompatibilitu, tedy redukci rušení silným polem z cívky. Jako nejvhodnější stínění správně navrhuje magnetický obvod, který svým uspořádáním redukuje boční pole a nepotřebuje ke své funkci vířivé proudy, které jej zahřívají. Bohužel svazky transformátorových plechů netvoří uzavřený obvod, takže se účinek stínění snižuje. Eliminace silnějšího čelního pole je obtížnější i s feromagnetickým stíněním. V práci se realizuje toto stínění vířivými proudy. Bez analýzy či alespoň vysvětlení se používají konstrukční prvky ve formě prstenců rozličného provedení a zapojení. Účinné odstínění vířivými proudy lze očekávat jen od kruhové měděné desky nad čelem cívky.

Prostorové měření magnetického pole probíhá ručně v bodech měřící desky. Měřícím prvkem je originální cívka podrobně popsána. V praxi se velmi často používá Hallova sonda, mající nesporné výhody. V práci je o ní pouze zmínka až později a bez diskuse. K ověření funkce měřící aparatury je porovnána simulace a výsledky měření u budící cívky. Toto porovnání je však netradiční ve formě dvou individuálních grafů na str. 65 Úkolem čtenáře je zjistit míru

souhlasu. Tradičně se používá jeden graf. Simulace se uvádí čarou a experiment body, např. křížky, takže je na první pohled vidět úroveň souhlasu.

Další dvě kapitoly popisují experiment, sedmá kapitola se zaměřila na postup měření a posouzení přesnosti. Velmi rozsáhlá osmá kapitola uvádí výsledky. U postupu měření překvapí velký skok ve volbě frekvencí: 50 Hz na začátku, 4,1 a 10 kHz na konci. Lepším přístupem by byla logaritmická stupnice frekvencí, např. 30, 100, 300 Hz, 1, 3 a 10 kHz. Tím by se autor vyhnul i silnému síťovému rušení, o jehož vlivu se nezmiňuje. Na str. 71 se mluví o frekvenční závislosti impedance cívky s velkým počtem závitů. Není však vysvětleno, co se tím přesně rozumí, ani uveden graf.

Měření se soustředilo především na výzkum efektivnosti stínění. Uvádí se mnoho výsledků ve formě tabulek, prostorových a parametrických grafů. Obvykle je uvedena diskuse výsledků, někde však chybí. Pro tuto kapitolu platí zlaté pravidlo, že méně znamená více. V záplavě tabulek a grafů jsem ztrácel přehled. Při tom v diskusi autor prokazuje, že je s fyzikálními problémy dobře obeznámen a umí výsledky vysvětlit, např. výraznější stínění svazkem hliníkových lanek v důsledku skin efektu v porovnání s plnými prvky. Nejúspěšnější stínění je feromagnetickými plechy. Autor definuje míru stínění a na ní ukazuje, že v některých případech se kromě potlačení vnějšího pole podařilo zesílit pole v cívce. Podrobně se porovnává stínění dosažené všemi konstrukčními prvky. Značná pozornost je též věnována vlastnímu ohřevu, uvádějí se časové průběhy teploty na vsázce, ale i dalších prvcích. Zde jsem ale nenalezl diskusi, ačkoliv některé časové průběhy teploty jsou divné.

V kapitole obsahující výsledky měření se autor nevyhnul typické chybě při uvádění výsledků. Experimentální hodnoty po přepočtu jsou uváděny až na 5 platných číslic. Při tom 1% relativní přesnost je nepravděpodobná, takže by stačily tři platné číslice. Přesnost by se také dala zjistit z opakovaných měření.

Poslední dvě kapitoly se věnují simulaci. Devátá kapitola rozebírá přípravu modelů a desátá uvádí výsledky simulace. Při zadávání parametrů se předpokládá nulová vodivost transformátorových plechů. Tím se vylučují vířivé proudy, které asi nebudou při vyšších frekvencích zanedbatelné. Oproti experimentu je kromě stínění transformátorovými plechy uvedeno i stínění vodivým pláštěm. Výsledky se dosti liší. Pole v okolí stínění je odlišné, uvnitř cívky dochází jednak ke zvýšení pole (transformátorové plechy), jednak k jeho snížení (vodivý plášť). Překvapivé je to, že se podle simulace teplota vsázky vykazuje výrazný gradient i po hodině zahřívání. Opět by bylo lépe, kdyby se místo záplavy výsledků porovnala simulace a experiment (alespoň kvalitativně), uvedly nejdůležitější výsledky a provedla jejich důkladná diskuse.

Kapitola diskuse v práci není, avšak dílčí diskuse je obvykle po prezentaci výsledků. V závěru autor podrobně uvádí, co udělal, postrádám však přehled dosažených výsledků, jejich praktický význam a návrh na postup dalšího řešení. V seznamu literatury jsou především monografie.

V tomto textu jsem uvedl hlavní připomínky. K práci mám další dílčí dotazy, poznámky a doporučení, které nejsou zásadní. Předal jsem je autorovi zejména s cílem upozornit ho na to, čeho se má v další odborné práci vyvarovat.

Jak vyplývá z předchozího textu, význam disertační práce pro obor je v realizaci funkční aparatury, provedených měření a simulacích. Tvoří solidní základ pro systematický výzkum indukčního ohřevu s cílem jej zefektivnit zejména s ohledem na energetické úspory a dosažení kvalitních výrobků.

Postup při řešení je originální. Autor realizoval funkční vzorek, sestavil měřící aparaturu, provedl vyhodnocení měření a použil simulace. Originální je nápad s měřící deskou. Vytčené cíle byly splněny. Překvapivé je to, že měření bylo, asi s ohledem na možnosti pracoviště, provedeno ručně, což je dnes již dosti vzácné. Pro podobná měření používáme plně automatizovanou aparaturu, obsahující počítačem řízený posuv, Hallovu sondu, případně řízený generátor. Výsledkem je tabulka naměřených hodnot, která se dále zpracovává. Systematický výzkum indukčního ohřevu předpokládá podobné vybavení.

Disertační práce obsahuje nové výsledky, jak experimentální, tak výpočetní. Jejím přínosem je zejména systematický výzkum různých způsobů stínění a možnost zefektivnění indukčního ohřevu. Autor pracuje na katedře s poněkud jiným zaměřením (méně teoretickým), měl malé zkušenosti a omezené technické možnosti. Navzdory těmto omezením je práce významným přínosem v oblasti analýzy indukčního ohřevu. Vykonal mnoho tvůrčí práce. Na druhé straně se nevyhnul některým chybám.

Práce je napsána netradičně a v detailech se liší od standardního technického či vědeckého textu. To však není na úkor srozumitelnosti. Je členěna logicky a výsledky jsou prezentovány systematicky. Jazyková úroveň je dobrá. Na 180 stránkách jsem našel jen několik chyb. S ohledem na některé odchylky od standardu uvádím na konci posudku své formální výhrady.

Doktorand pravidelně publikoval své výsledky ve sbornících. Je autorem či spoluautorem 11 publikací. Jeho publikace jsou aktuální

Na základě výše uvedeného hodnocení doporučuji disertační práci Ing. Oldřicha Kroupy k obhajobě a po jejím úspěšném obhájení udělení titulu PhD.

Liberec 26. 2. 2014

  
M. Košek

#### **Dodatek – připomínky ke zpracování**

1. Odkazy se uvádějí velmi často v nadpisu, a to i hlavních kapitol, např. str. 14: „Úvod a cíle disertační práce [3]“. Jsou však i citace v textu.

2. Odkaz na obrázek je vždy v prvním pádu, např. str. 20 první řádek shora: "Indukční kelímková pec na Obrázek 2.1 sestává ...". Jde asi o konvenci převzatou z angličtiny: Figure 2.1. V českém textu se odkazy píší s malými písmeny a skloňují.
3. Na veličiny se někdy odkazuje symbolem a nikoliv slovně, typický případ je na str. 32, poslední řádek: „Jestliže bude  $\varepsilon$  lineární ...“.
4. Překlepy jsem našel jen dva: str. 30 v nadpisu kapitoly, str. 45 druhý řádek shora.
5. Ve dvou případech se opakuje věta (str. 95, konec předposledního odstavce) nebo její část, str. 106, třetí řádek zdola.
6. Nevymazaná pracovní poznámka je na str. 57, předposlední řádek.
7. V některých částech jsou jen obrázky, žádný text, např. podkapitola 6.7 na str. 63 – 65, nebo podkapitola 10.1 na str. 152 až 155. Nadpis a legenda k obrázkům jsou však dostatečně vysvětlující.
8. Jednotky se uvádějí různě: kurzívou (str. 54), v hranatých závorkách (str. 62) nebo standardním způsobem (většina).
9. Nepoužívá se semilogaritmický tvar pro hodnotu veličin, např. na str. 62 by bylo vhodnější psát  $26 \mu\text{T}$  místo  $0,000026 \text{ T}$ , nebo na straně 140 poslední řádek, by mělo místo  $\gamma = 56\,000\,000 \text{ S/m}$  být lépe  $\gamma = 5,6 \cdot 10^7 \text{ S/m}$ .
10. V kapitole 2 se používá operátor  $\nabla^2$ , v kapitole 3 se používá Laplaceův operátor  $\Delta$ .

## Posudek oponenta disertační práce

**Diplomová práce:** Nový fyzikální laboratorní model indukčního zařízení s přídatnými konstrukčními prvky a magnetickou válcovou dutou vsázkou

**Autor:** Ing. Oldřich Kroupa

**Vedoucí práce:** Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

**Oponent práce:** Ing. Ladislav Musil, Ph.D.

Hodnocená práce má dvě základní chyby.

- První chybou je příliš velké množství méně důležitých informací. Autor při tvorbě této práce nevybral jeden způsob z různých variant, ale použil měřicí metody a zpracoval a prezentuje získaná data mnoha různými způsoby. Ve výsledku je práce plná nepřehledného množství velmi podobných obrázků, grafů, tabulek a textových popisů. Navíc mnohé prezentují to samé, pouze jinak. Platí zde, že méně je někdy více.
- Druhou chybou práce je, že text je velmi špatně strukturován a vzájemně provázán. V textu je velmi těžké něco konkrétního dohledat i orientovat se v něm bez soustavného studování "od začátku do konce". Strukturu textu jsem nebyl schopen sledovat ani běžným postupným čtením bez dělání poznámek a výpisků. Popisy obrázků, grafů a tabulek často nepřinášejí všechny důležité informace pro jejich pochopení, či porovnání s jinými grafy apod. Mnohde jsou popisy u dvou grafů, u kterých se předpokládá porovnávání, úplně stejné, jen se liší umístěním v jiné kapitole (např. grafy 8.25, 8.27). Čtenář je tak nucen vyhledávat v textu i několik stránek dopředu. I v textu je běžně bez jakéhokoliv odkazu předpokládána znalost informací uvedených o mnoho stránek dříve. Členění do kapitol nepovažuji za logické a vhodně provedené. Také zvolené typografické zpracování není řešeno dobře. Způsobuje, že práce působí dojmem monolitického textu, což dále čtenáři znesnadňuje orientaci v kapitolách podkapitolách, podkapitolách podkapitol a v ještě jedné úrovni podkapitol.

Celkově je čtení této disertační práce velmi obtížné.

K práci mám následující připomínky:

- str. 24 dole: pro platnost uvedené rovnosti nestačí pravoúhlost souřadnic.
- str. 25: dvě veličiny s rozdílným fyzikálním rozměrem by neměly být pokládány jako sobě rovné i když je uváděna jejich nulovost.
- str 53: v nárysu měřicí desky na obrázku 5.15 je deska zbytečně zrcadlově opačně, než na fotce pod ní.
- str 53: označení bodů v měřicí desce je zvoleno velmi neintuitivně a tedy nevhodně. Osa symetrie cívký je označena písmenem "L". Body "M" a "K", nebo "J" a "N" jsou na stejných poloměrech. V axiálním směru značí snižující se číslo větší vzdálenost od plochy symetrie cívký.
- str. 65: Při srovnání numerické simulace a měření si musí čtenář dopočítat relativní odchylky sám.

- kap. 8: Zvolené používání 3D grafů považuji za příliš časté a málo názorné.
- kap. 8: K jednotlivým "podpodkapitolám" by bylo více než vhodné doplnit zobrazení geometrického uspořádání.
- str. 135: V práci uvažované úlohy považuji za takové, pro jejichž případné modelování ve 3D by stačil výkonnější stolní počítač.
- str. 139: V popisu okrajových podmínek je nevhodné používání anglických názvů v českém textu. Předpokládám, že pod názvem "mesh" je skryta hodnota maximální velikosti elementu.
- str. 155: Zobrazení pro různé proudy na obr. 10.9 a na obr. 10.10 jsou stejná. Liší se pouze ve škále, která je jednoduše přepočítatelná.
- V práci mi chybí kapitola se srovnáním naměřených a vypočtených hodnot. Jediné takovéto srovnání jsem našel pro jeden model v kapitole o měřící cívce. Bez tohoto srovnání nemají kapitoly o modelování (kapitola 9 a 10) v práci o fyzikálním modelu dobrý důvod.

K práci bych měl následující dotazy:

- V nadpisu práce je použit termín nový fyzikální model. Existoval starý fyzikální model? Co je na novém modelu nové?
- str. 63 a kapitola 10: obrázky 6.4 a 6.5 jsou prakticky shodné - proč jsou presentovány oba? Analogicky totéž platí pro zobrazení polí v kapitole 10.
- str. 66 - 68: V kapitole s názvem "Zhodnocení" je popis další cívky. Navíc je uvedeno, že nebyla oceňována. Proč jsou tedy tyto informace v práci uváděny a proč v této kapitole?
- kap. 8.1.4: Porovnání vlivu stínění je uděláno pro stejné hodnoty proudu induktorem. Nemělo by být porovnání děláno pro stejnou hodnotu magnetické intenzity v cívce?
- kap 9.3: Proč je v práci zařazena kapitola 9.3 obsahující výčet možností a schopností programu RillFEM? Jaký má obsah této kapitoly odborný přínos? Nejedná se o reklamu?
- kap. 9.7: Proč je mezi kapitolu popisující matematické modely fyzikálního modelu pece a kapitolu s výsledky z těchto modelů zařazena kapitola o modelování konkrétní indukční pece? Jaký má tato kapitola vztah k práci o fyzikálním modelu indukční pece?

Celkově mám jako čtenář pocit, že sice autor udělal relativně větší množství odborné práce na uspokojivé úrovni, ale dohotovení disertační práce bylo provedeno příliš ve spěchu. Práce by mohla být pro obor přínosná. Publikační činnost autora považuji za dostatečnou. Práci doporučuji k obhajobě.

V Českých Budějovicích dne 3.6.2014

  
Ladislav Musil

## OPONENTSKÝ POSUDOK

dizertačnej práce

*„Nový fyzikálny laboratórny model indukčného zariadenia s prídavnými konštrukčnými prvkami a magnetickou dutou valcovou vsádzkou“*

Autor práce: Ing. Oldřich Kroupa  
Školiteľ: prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

### 1. Zhodnotenie významu dizertačnej práce (DP)

Indukčný ohrev v tepelných technológiách mal, má, aj v budúcnosti bude mať význačné postavenie. Je určujúcim ohrevom predovšetkým v oblastiach plastického a tepelného spracovania kovov, uplatňuje sa v širokom spektre priemyselných odvetví, preniká do komunálnej sféry, vrátane domácností. Z tohto pohľadu téma dizertačnej práce p. Ing. Kroupu je aktuálna, jej riešenie má opodstatnenie a použiteľný vedecký potenciál. Zvlášť v súčasnosti, kedy si treba uvedomovať a riešiť energetickú náročnosť premien akejkoľvek formy energie na technologické teplo, nevynímajúc elektrotepelnú premenu. Táto nevyplýva len z tepelných parametrov spracovávanej vsádzky (relatívne vysoké hodnoty hmotnostnej tepelnej kapacity, ktorú napokon nevieme ovplyvniť), ale aj z rôznych Jouleových strát v konkrétnom zariadení, podľa miesta ich generovania. Oceňujem, že p. Ing. Kroupa, iste na návrh školiteľa, si vybral za úlohu riešiť predmetné straty v tieniacich prvkoch indukčných zariadení. Osobne mi nedá nevyzdvihnúť aj ďalšie pozitívum práce, t.j. skutočnosť, že práca má prevažne experimentálny charakter. V dobe počítačových simulácií, ktoré sú pohodlnejšie a časovo menej náročné, je to chvályhodný počin.

### 2. Hodnotenie postupu riešenia, použitých metód a splnenie cieľov dizertačnej práce

Ak začnem porovnaním cieľov DP, prezentovaných v I. kapitole a ich postupným napĺňaním v kapitolách V. až XI., konštatujem, že ciele práce sú splnené. Týmto kapitolám prirodzene predchádza stručný teoretický základ problematiky, spracovaný rešeršne a uvedený v kapitolách II. až IV. Sú spracované prehľadne a v podstate správne, s drobnou kritickou poznámkou, že priebehy  $H/H_2$  a  $E/E_2$  na obrázkoch 2.3. a 2.4. nevyplývajú priamo zo všeobecných riešení (2.19.) a (2.20.), v ktorých formálne existujú aj spätné zložky oboch intenzít, ale prináležia partikulárnym riešeniam, ktoré autor neuviedol. Je to len metodická chyba. Naopak, z pohľadu postupu riešenia oceňujem zaradenie kapitoly III. s vysvetlením indukčného ohrevu pomocou vektorového magnetického potenciálu. To isté, pre ucelenie problematiky, konštatujem aj pre kapitolu IV. s námietkou, že rovnica (4.1.) nie je rozmerovo homogénna. Takú dostaneme, ak tretí člen ľavej strany rovnice predelíme tepelnou difuzivitou.

Zrkadlom vlastnej práce a prínosu dizertanta sú kapitoly V. až XI., ktoré počtom 154 strán a ďalších príloh poukazujú na nadmerný obsah a rozsah, prináležiace DP (z tohto pohľadu si dovoľujem odporučiť komisii určité obmedzenia počtu strán).

V kapitolách V. a VI. Ing. Kroupa obsírne popisuje konštrukciu laboratórneho modelu a jeho prvkov, konštrukciou meracej sondy vrátane cievky, ktorých vplyv na elektromagnetické pole kontroloval meraním, analytickým výpočtom a počítačovou simuláciou. Autor na viacerých miestach operuje s názvom „metóda fyzikálneho modelovania“. To nepokladám za správne, ak vychádzam z predpokladu zhodnosti pojmov v českom a slovenskom jazyku. Metóda fyzikálneho modelovania je totiž založená na teórii podobnosti, kritériách podobnosti, teda aj viazanosti mierok podobnosti medzi modelom a originálom zariadenia. Model, ktorý to nerešpektuje je fyzický (hmotný) model. Tento detail však neovplyvňuje výsledky merania v kapitolách VII. a VIII. s obmedzením, že platia len pre zvolené prúdy v induktore a frekvencie poľa.

### 3. Stanovenie k výsledkom DP

Predmetné výsledky sú výsledkom VII. a VIII. kapitoly, ktorých rozsah znovu poukazuje na skutočnosť, že dizertant sa problematike venoval dlhodobo, s potrebnou dávkou trezlivosti, že merania boli časovo náročné a že obsiahli širokú škálu možností tienenia modelu s rôznymi prídavnými prvkami. Aj z tohto hľadiska sa dá tvrdiť, že stanovené ciele boli splnené vyčerpávajúco a znamenajú konkrétny prínos DP k skvalitneniu tienenia indukčných zariadení. Sprievodný text v týchto kapitolách je zrozumiteľný, aj keď s ohľadom na jeho množstvo dá sa v ňom ťažšie orientovať, grafické výsledky sú prehľadné a pokladám ich za objektívne, tým aj za použiteľné. Konkrétnym prínosom autora sú dosiahnuté výsledky dotýkajúce sa znižovania intenzity magnetického poľa indukčného zariadenia prostredníctvom prídavných tieniacich prvkov. Rovnako pozitívne hodnotím paralelne urobenú počítačovú simuláciu laboratórneho modelu, ktorej výsledky v grafickej podobe sú zaujímavé, aj keď niektoré pre veľkosť písma slabšie čitateľné.

### 4. Systémovosť, prehľadnosť, úprava DP

K týmto bodom hodnotenia DP nemám pripomienky, ktoré by zásadne ovplyvnili jej úroveň, až na široký obsah a rozsah. Dali by sa zúžiť napríklad menej podrobným popisom tvorby tieniacich prvkov a popisom konštrukcie fyzického modelu indukčného zariadenia.

### 5. Publikácie študenta a použitá literatúra

Aj keď počet prameňov použitej literatúry nepresahuje bežný priemer v DP, oceňujem ich adresnosť, resp. ich priamu súvislosť s riešenou témou. Dostatočný počet vlastných publikácií, vrátane funkčných vzoriek a autorizovaných softvérov Ing. Kroupu, v dobrom zmysle slova, len zvyrazňujú náročnosť riešenej problematiky.

### 6. Záver

Zodpovedne vyhlasujem, že dizertačnú prácu p. Ing. Oldřicha Kroupu, s názvom uvedeným v záhlaví posudku, jednoznačne odporúčam k obhajobe.

***V rámci obhajoby mám pre dizertanta tieto otázky:***

1. Na strane 28 uvádzate vzťah (2.25.). Je všeobecne platný alebo platí len pre niektoré tepelné technológie s použitím indukčného tepla?
2. Napájacie prúdy induktorov boli zvolené pre jednotlivé skupiny meraní ľubovoľne alebo s určitým úmyslom? (Napríklad s ohľadom na možnosti napájacích zdrojov?)



3. Ako si vysvetľujete zlomy priemerných teplôt vsádzky prvkov a induktora pri niektorých meraniach? (napríklad na strane 127, 129, 130).
4. Akú máte predstavu o konštrukčných možnostiach realizácie prídavného tienia na tégľových peciach s ohľadom na ich prevádzkový režim?

V Košiciach, 19.2.2014



doc. Ing. Pavel Novák, CSc.