

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor v oboru

Elektroenergetika

Ing. Oldřich Kroupa

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

Školitel: prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

Datum státní doktorské zkoušky: 1. 12. 2011

Datum odevzdání práce: 29. 11. 2013

V Plzni, 2013

Anotace

V mé disertační práci se zabývám použitím přídavných konstrukčních prvků u nového mnou zkonstruovaného fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení, který rovněž umožňuje ohřev válcové duté magnetické vsázky umístěvané do dutiny induktoru tohoto zařízení, s vyvozením závěrů na snížení energetické náročnosti ohřevů elektromagnetickou indukcí. V práci jsou popsány zvolené metody zkoumání celého systému, tedy metoda měření, analytický a numerický výpočet. Dále zde uvádím popis nově zkonstruované měřicí cívky malého průměru a nové aplikace, která slouží pro výpočty a vykreslení grafů získaných měření na fyzikálním laboratorním modelu indukčního zařízení, které jsem obě vytvořil. U jednotlivých kapitol jsou popsána shrnutí a jednotlivé poznatky dosažené užitím zvolených metod a v závěru práce jsou uvedené dosažené závěry a návrh na další zaměření výzkumu v této oblasti. Úvodní část mé práce se zabývá teorií elektromagnetického vlnění s důrazem na rozložení elektromagnetického pole kolem válcového induktoru a dále polem teplotním.

V práci se dále zaměřuji na metody zjišťování rozložení elektromagnetického a teplotního pole nového fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení doplněného o přídavné konstrukční prvky v otevřených a uzavřených variantách a o magnetickou válcovou dutou vsázku. Účelem použití těchto prvků je snížení měrné energetické náročnosti ohřevů elektromagnetickou indukcí, tedy zvýšení celkové účinnosti indukčního ohřevu, a to omezením rozptylového elektromagnetického pole kolem uvedeného zařízení. Rozptylový magnetický tok způsobuje v konstrukci elektricky vodivých částí indukčních zařízení nežádoucí tepelné ztráty vířivými proudy, které zhoršují celkovou energetickou bilanci daného systému a tedy jeho účinnost. Prezentuji zde metody zjišťování válcového elektromagnetického pole kolem uvedeného indukčního zařízení analytickým výpočtem, měření a numerickým výpočtem.

Výsledky vyplývající z počítačové simulace na základě zadaných hodnot odpovídajících novému fyzikálnímu modelu porovnávám s měření na tomto modelu. Numerické výpočty jsem prováděl v programu RillFEM 2D (FEM). V práci rovněž popisuji konstrukci nového fyzikálního modelu i nové měřicí cívky určené k měření indukovaného napětí. Dále popisuji novou aplikaci vytvořenou v programovacím jazyce JAVA určenou pro znázornění naměřených hodnot získaných měření s nově zkonstruovanou měřicí cívkou. Tuto aplikaci jsem navrhl a realizoval pro urychlení metody měření. Dále prezentuji výsledky měření a počítačové simulace, přičemž v závěru této práce je uvedeno porovnání výsledků, získané poznatky a další cíle. V příloze uvádím další výsledky a grafy z důvodu jejich značného množství, které považuji za vhodné uvést pro získání podrobnější představy o dané problematice a jejím rozsahu.

Abstract

In my dissertation I deal with the use of additional structural components for the new me constructed laboratory physical model of the induction device, which also allows heating of the hollow cylindrical magnetic charge being placed into the cavity of the inductor device to draw conclusions on increasing of induction heating efficiency. The paper describes the chosen method of examining the entire system, the method of measurement, analytical and numerical calculation. Then I present the description of the newly designed measuring coil of small diameter and a new application that is used for calculations and plotting graphs obtained by measuring the physical laboratory model of the induction device that I created both. A summary of the individual findings obtained using selected methods is described for each chapter and the conclusions reached and the proposal to further focus of research in this area are given in the result. The introductory part of my work deals with the theory of electromagnetic waves with emphasis on electromagnetic field distribution around a cylindrical inductor and the temperature field. In the work I also focus on methods for detecting the distribution of electromagnetic and temperature fields of new physical laboratory model of the induction device supplemented by additional structural elements in open and closed versions and magnetic hollow cylindrical charge. The purpose of using these elements is to reduce the energy intensity of specific electromagnetic induction heats, thus increasing the overall efficiency of induction heating, by reducing the stray electromagnetic field around said device. Stray magnetic flux causes in the construction of electrically conductive parts of induction equipment unwanted heat losses by eddy currents, which deteriorate the overall energy balance of the system and thus its efficiency. I present methods for detecting electromagnetic field around a cylindrical induction device mentioned analytical calculation, measurement and numerical calculation. The results of computer simulation on the basis of input values corresponding to the new physical model will compare the measurements with this model. Numerical calculations were done in the RillFEM 2D (FEM) application. The paper also describes the construction of a new physical model and new measurement coil for measuring the induced voltage. Then I describe a new application created in the Java programming language designed to represent the measured values obtained by measuring with the newly constructed measuring coil. This application was proposed and implemented to speed up the measurement method. In addition I present the results of measurements and computer simulations. In the result of this work is a comparison of the obtained results, lessons learned and other future aims. In the appendix I present further results and charts because of their considerable extent. These results were said to obtain a more detailed picture of the problem and its extent.

Klíčová slova

Indukční ohřev, elektromagnetické pole, teplotní pole, válcový induktor, fyzikální model, Maxwellovy rovnice, vlnové rovnice, Besselovy funkce, počítačová simulace, měřicí cívka malého průměru, RillFEM 2D, stínění elektromagnetického pole, válcová dutá vsázka, svazky transformátorových plechů, přídavné konstrukční prvky, numerický model, snížení energetické náročnosti

Keywords

Induction heating, electromagnetic field, temperature field, cylindrical inductor, physical model, Maxwell's equations, wave equations, Bessel's functions, computer simulation, measuring coil of small diameter, RillFEM 2D software, shielding of the electromagnetic field, cylindrical hollow charge, bundles of transformer sheets, additional structural elements, numerical model, the reduction of energy intensity

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou v roce 2013 na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím legálního softwaru a citovaných pramenů a odborných publikací.

V Plzni dne 29. 11. 2013

Ing. Oldřich Kroupa

Poděkování

Děkuji tímto mému školiteli panu **prof. Ing. Jiřímu Koženému, CSc.** za poskytnutý čas, cenné rady a zkušenosti, které mně byly předány při zpracování této práce, a dále za metodické vedení a velkou dávku trpělivosti.

Obsah

POUŽITÉ VELIČINY A VÝZNAČNÉ KONSTANTY.....	11
1 ÚVOD A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE [3].....	14
2 PROBLEMATIKA ELEKTROTEPELNÝCH ZAŘÍZENÍ [3], [4].....	17
2.1 INDUKČNÍ ZAŘÍZENÍ [1], [4]	19
2.1.1 <i>Indukční tavicí pec kelímková [3], [4].....</i>	<i>19</i>
2.2 TEORIE INDUKČNÍHO OHŘEVU [1], [2], [3], [4].....	21
2.2.1 <i>Maxwellovy rovnice</i>	<i>21</i>
2.2.2 <i>Vlnové rovnice</i>	<i>22</i>
2.3 VÁLCOVÉ ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ [2], [3], [4].....	24
2.4 NAINDUKOVANÉ TEPLO [2], [4]	27
2.4.1 <i>Vliv relativní permeability μ_r na indukční ohřevy.....</i>	<i>28</i>
2.5 ROZPTYLOVÉ POLE [1], [4].....	28
3 TEORIE INDUKČNÍHO OHŘEVU POMOCÍ MAGNETICKÉHO VEKTOROVÉ POTENCIÁLU A [5], [4], [6]	30
3.1 PODMÍNKY NA ROZHRANÍ, OKRAJOVÉ PODMÍNKY	34
3.2 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY	36
3.3 ROZLOŽENÍ ZTRÁT	36
3.4 ROVNICE PRO KVAZISTACIONÁRNÍ POLE ŘEŠENÉ POMOCÍ VEKTOROVÉHO POTENCIÁLU, PRO 2D ÚLOHY	37
3.5 ROVNICE PRO KVAZISTACIONÁRNÍ POLE ŘEŠENÉ POMOCÍ VEKTORU MAGNETICKÉ INTENZITY, PRO 2D ÚLOHY	38
4 TEPLITNÍ POLE [5], [4].....	39
4.1 PODMÍNKY NA ROZHRANÍ	40
4.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY	40
4.3 POČÁTEČNÍ PODMÍNKY	42
5 NOVÝ FYZIKÁLNÍ LABORATORNÍ MODEL INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ	43
5.1 POPIS JEDNOTLIVÝCH KONSTRUKČNÍCH ČÁSTÍ ZKOUMANÉHO MODELU	43
5.1.1 <i>Induktor.....</i>	<i>45</i>
5.1.2 <i>Stínění svazky transformátorových plechů</i>	<i>46</i>

5.1.3	<i>Vsázka</i>	46
5.1.4	<i>Přídavné konstrukční prvky</i>	48
5.1.5	<i>Měřicí deska</i>	52
5.2	ANALYTICKÝ VÝPOČET INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE H PRÁZDNÉHO INDUKTORU [4]	54
6 NOVÁ MĚŘICÍ CÍVKA PRO ZJIŠTĚNÍ ROZLOŽENÍ INTENZITY MAGNETICKÉHO POLE H V OKOLÍ ZKOUMANÉHO INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ..		
56		
6.1	ZDŮVODNĚNÍ KONSTRUKCE NOVÉ MĚŘICÍ CÍVKY	56
6.2	INDUKČNÍ SONTA A NOVÁ MĚŘICÍ CÍVKA	57
6.3	NOVÁ MĚŘICÍ CÍVKA MALÉHO PRŮMĚRU.....	58
6.4	URČENÍ KONSTANTY k NOVÉ MĚŘICÍ CÍVKY	59
6.5	STRUČNÝ POPIS VÝROBNÍHO POSTUPU	61
6.6	PŘÍKLAD PRAKTICKÉ APLIKACE SPOJENÝ S UKÁZKOU SROVNÁVACÍHO MĚŘENÍ - OVĚŘENÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÉ SIMULACE MĚŘENÍM	61
6.7	NUMERICKÝ MODEL RILLFEM 2D	63
6.8	MĚŘENÍ NOVOU MĚŘICÍ CÍVKOU	65
6.9	ZHODNOCENÍ	66
7 MĚŘENÍ NA NOVÉM FYZIKÁLNÍM MODELU INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ		
69		
7.1	MĚŘENÍ Vlivu STÍNĚNÍ NA ROZLOŽENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE KOLEM NOVÉHO FYZIKÁLNÍHO LABORATORNÍHO MODELU INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO SÍŤOVÝ A VYSOKÝ KMITOČET [4], [19], [20].....	69
7.2	MĚŘENÍ Vlivu PŘÍDAVNÝCH KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ NA ROZLOŽENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE KOLEM NOVÉHO FYZIKÁLNÍHO LABORATORNÍHO MODELU INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO SÍŤOVÝ A VYSOKÝ KMITOČET [19].....	73
7.2.1	POPIS MĚŘENÍ A DŮLEŽITÉ POZNATKY.....	73
7.3	MĚŘENÍ Vlivu VÁLCOVÉ MAGNETICKÉ DUTÉ VSÁZKY A PLOCHÉ KRUHOVÉ MĚŘENÉ DESKY	75
8 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ MĚŘICÍMI CÍVKAMI NA NOVÉM FYZIKÁLNÍM LABORATORNÍM MODELU INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ		
77		
8.1	Vliv STÍNĚNÍ (VIZ KAPITOLA 7.1)	77

8.1.1	<i>Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při síťovém kmitočtu (50Hz) napájecího proudu induktoru.....</i>	77
8.1.2	<i>Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při kmitočtu napájecího proudu induktoru 4100 Hz</i>	81
8.1.3	<i>Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při kmitočtu napájecího proudu induktoru 10 000 Hz.....</i>	85
8.1.4	<i>Vyhodnocení výsledků získaných měření vlivu stínění při rozdílném kmitočtu a vyvození praktických závěrů</i>	89
8.2	VLIV PŘÍDAVNÝCH KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ	96
8.2.1	<i>Výsledky měření pro frekvenci 4 000 Hz</i>	97
8.2.2	<i>Výsledky měření pro frekvenci 10 000 Hz</i>	100
8.2.3	<i>Shrnutí a diskuze dosažených výsledků.....</i>	103
8.3	VSÁZKA A VODIVÁ DESKA UMÍSTĚNÁ NAD INDUKTOREM	115
8.3.1	<i>Vsázka a vodivá deska umístěná nad induktorem 50 Hz</i>	115
8.3.2	<i>Vsázka a vodivá deska umístěná nad induktorem 4100 Hz</i>	120
8.3.3	<i>Vsázka a vodivá deska umístěná nad induktorem 10 000 Hz</i>	125
8.3.4	<i>Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] vlivem vsázky a vodivé desky pro induktor s frekvencí napájecího proudu 4 100 Hz.....</i>	130
8.3.5	<i>Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] vlivem vsázky a vodivé desky pro induktor s frekvencí napájecího proudu 10 000 Hz.....</i>	133
9	SIMULACE LABORATORNÍHO MODELU.....	135
9.1	METODA NUMERICKÉHO VÝPOČTU	135
9.2	POČÍTAČOVÁ SIMULACE INDUKČNÍCH ZAŘÍZENÍ	135
9.3	POPIS PROGRAMU RILLFEM	136
9.4	SIMULACE VLIVU STÍNĚNÍ NA ROZLOŽENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE KOLEM NOVÉHO FYZIKÁLNÍHO LABORATORNÍHO MODELU INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	138
9.5	SIMULACE VLIVU PŘÍDAVNÝCH KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ NA ROZLOŽENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE KOLEM NOVÉHO FYZIKÁLNÍHO LABORATORNÍHO MODELU INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	142
9.5.1	<i>Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a měděným prstencem</i>	142

9.5.2	<i>Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a dvěma uzavřenými závit</i>	144
9.5.3	<i>Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a dutým kruhovým vodičem</i>	145
9.5.4	<i>Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a hliníkový plným kruhovým vodičem</i>	146
9.6	SIMULACE Vlivu VÁLCOVÉ MAGNETICKÉ DUTÉ VSÁZKY A PLOCHÉ KRUHOVÉ MĚDĚNÉ DESKY	148
9.7	SIMULACE INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECE	149
9.7.1	<i>Uvedení do problému</i>	149
9.7.2	<i>Řešený problém</i>	149
10	VÝSLEDKY SIMULACE LABORATORNÍHO MODELU	152
10.1	INDUKTOR A INDUKTOR SE STÍNĚNÍM SVAZKY TRANSFORMÁTOROVÝCH PLECHŮ	152
10.1.1	<i>Vyhodnocení simulace pro induktor napájený proudem 23 A</i>	155
10.1.2	<i>Vyhodnocení simulace vlivu stínění svazky transformátorových plechů pro napájecí proud induktoru 23 A</i>	157
10.2	INDUKTOR SE STÍNĚNÍM VODIVÝM PLÁŠTĚM	159
10.2.1	<i>Vyhodnocení simulace vlivu stínění vodivým pláštěm pro napájecí proud induktoru 23 A</i>	160
10.3	PŘÍDAVNÉ KONSTRUKČNÍ PRVKY	161
10.3.1	<i>Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a měděným prstencem</i>	161
10.3.2	<i>Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a dvěma uzavřenými závit</i>	164
10.3.3	<i>Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a dutým kruhovým vodičem</i>	166
10.3.4	<i>Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a hliníkový plným kruhovým vodičem</i>	168
10.3.5	<i>Zhodnocení a porovnání výsledků získaných simulací induktoru se stíněním transformátorovými plechy a přídatnými konstrukčními prvky</i>	170
10.4	VÝSLEDKY SIMULACE DUTÉ VÁLCOVÉ VSÁZKY A MĚDĚNÉ KRUHOVÉ DESKY	173
10.4.1	<i>4 kHz a 15 A</i>	174
10.4.2	<i>10 kHz a 18 A</i>	175

10.5	VÝSLEDKY NUMERICKÉHO MODELU INDUKČNÍ KELÍMKOVÉ PECE.....	176
11	ZÁVĚR.....	181
12	RESUME.....	185
	LITERATURA.....	186
	VLASTNÍ PUBLIKACE.....	188
A	DALŠÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	190
A.1	VLIV STÍNĚNÍ	190
A.1.1	<i>Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při síťovém kmitočtu (50Hz) napájecího proudu induktoru.....</i>	<i>190</i>
A.1.2	<i>Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při síťovém kmitočtu napájecího proudu induktoru 4 100 Hz</i>	<i>194</i>
A.1.3	<i>Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při síťovém kmitočtu napájecího proudu induktoru 10 000 Hz</i>	<i>198</i>
A.1.4	<i>Porovnávací tabulky zhodnocení vlivu stínění transformátorovými plechy</i>	<i>202</i>
A.2	VLIV PŘÍDAVNÝCH KONSTRUKČNÍCH PRVKŮ	205
A.2.1	<i>Výsledky měření pro frekvenci 4 000 Hz</i>	<i>205</i>
A.2.2	<i>Výsledky měření pro frekvenci 10 000 Hz</i>	<i>216</i>
B	LITTLECOIL LC-31 - APLIKACE PRO VIZUALIZACI ROZLOŽENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE KOLEM INDUKČNÍHO ZAŘÍZENÍ	228
B.1	ÚVOD.....	228
B.2	ZÁKLADNÍ POPIS	228

Příloha A a Příloha B jsou obsaženy pouze v elektronické verzi disertační práce.

Použité veličiny a význačné konstanty

Elektrické veličiny a konstanty

a – hloubka pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivého prostředí [m]

I – elektrický proud [A]

A – magnetický vektorový potenciál [Wb/m]

B – vektor magnetická indukce [T]

D – elektrická indukce [C/m²]

E – vektor intenzity elektrického pole [V/m]

H – vektor intenzity magnetického pole [A/m]

J – vektor proudové hustoty [A/m²]

J_v – vektor proudové hustoty vnuceného proudu [A/m²]

N – Poyntingův vektor [W/m²]

R – elektrický odpor [Ω]

R_{2l} – činný odpor vsázky [Ω]

f – kmitočet napájecího proudu induktoru [Hz]

ε – permitivita prostředí [F/m]

ε_0 – permitivita vakua [F/m]

ε_r – relativní permitivita prostředí [-]

μ – permeabilita prostředí [H/m]

μ_0 – permeabilita vakua [H/m]

μ_r – relativní permeabilita prostředí [-]

σ – plošná hustota náboje na rozhraní [C/m²]

ρ_R – rezistivita (měrný elektrický odpor) [Ωm]

γ – konduktivita (měrná elektrická vodivost) [S/m]

ρ – objemová hustota náboje [C/m³]

ρ_V – objemová hustota volného náboje [C/m³]

φ – skalární elektrický potenciál [V]

K_N – velikost hustoty plošného proudu na rozhraní [A/m]

ω – úhlová frekvence [1/s]

N_i – počet závitů cívky [-]

Φ – magnetický indukční tok [Wb]

L – indukčnost [H]

Tepelné veličiny a konstanty

T – teplota [$^{\circ}\text{C}$]

ν – termodynamická teplota [K]

c – měrná tepelná kapacita [J/kgK]

λ – součinitel tepelné vodivosti [W/mK]

α – součinitel přestupu tepla prouděním [W/m²K]

P, P_{ii} – činný výkon [W]

P_{2l} – indukovaný výkon ve vsázce [W/m]

P_l – příkon na jednotku plochy vsázky (velikost Poyntingova vektoru) [W/m²]

w_J – měrné Jouleovo ztráty [W/m³]

W_J – celkové Jouleovo ztráty [W]

Q_0 - objemová hustota tepelné energie [W/m³]

q - plošná hustota energie vznikající na rozhraní za jednotku času (tepelný tok) [W/m²]

σ - Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8}$ [W/m²K⁴]

ε - emisivita [-]

Geometrické veličiny a konstanty

h – vzdutí vsázky [m]

x, y, z – souřadnice kartézského souřadného systému [m]

r, φ, z – poloměr r , úhel φ , souřadnice z (výška) válcového souřadného systému;

jejich velikost: poloměr r [m], úhel φ [rad], souřadnice z (výška) [m]

d – průměr [m] (stejný symbol je použit pro pomocnou veličinu Zmenšení intenzity magnetického pole H vlivem přídavného konstrukčního prvku d [%])

V – objem [m³]

S – průřez [m²]

Ostatní veličiny a konstanty

ρ_h – hustota materiálu [kg/m³]

ρ_{vs} – hustota vsázky [kg/m³]

π – Ludolfovo číslo (3,14159265), matematická konstanta

t – čas [s]

τ_r – časová konstanta [s]

v – rychlost [m/s]

$J_n(kr)$ – cylindrická funkce 1. druhu (Besselova), n -tého řádu, argumentu kr

$N_n(kr)$ – cylindrická funkce 2. druhu (Neumannova), n -tého řádu, argumentu kr

c – rychlost světla, $c = 3 \cdot 10^8$ [m/s]

Rozlišení typu veličin v textu:

K... veličina obecně, bez rozlišení (Times New Roman obyčejně)

K... skalární veličina (Times New Roman kurzívně)

K... vektor (Times New Roman tučně kurzívně)

K ... fázor vektoru (Times New Roman tučně kurzívně podtrženě)

1 Úvod a cíle disertační práce [3]

Indukční ohřev je možné provádět pouze u elektricky vodivých materiálů. Pokud vložíme předmět z elektricky vodivého materiálu do střídavého magnetického pole, dochází v něm k indukci vířivých proudů, jejichž průchodem materiálem s elektrickým odporem se tento materiál bude zahřívat. Indukční zařízení můžeme přirovnat k transformátoru, přičemž výstupní vinutí bude představovat vsázka, která je spojena nakrátko. Podstatná je skutečnost, že doprava tepla do vsázky nenastává tepelným spádem (jako například u zařízení odporových s nepřímým ohřevem), ale že teplo je transportováno střídavým elektromagnetickým polem a vznikne tedy přímo ve vsázce. Vsázka bude potom nejteplejším objektem celé soustavy, respektive všechny ostatní celky mohou být studené. Právě vznik tepla přímo ve vsázce a její víření, přestože vsázka nebude galvanicky s ničím vázána, jsou největší výhody indukčního ohřevu. U indukčního ohřevu můžeme bez problémů dosáhnout neobvykle vysoké měrné příkony do vsázky a navíc vhodnou volbou frekvence napájecího proudu induktoru (v jehož magnetickém poli se vsázka nachází) s výhodou ovlivníme rozložení tepla vyvíjeného ve vsázce i intenzitu víření vsázky. Indukční ohřev získal pro tyto svoje výhody v metalurgii a ve strojírenství široké spektrum uplatnění.

Typickým představitelem průmyslového indukčního ohřevu je kelímková indukční pec (popis viz. Kapitola 2.1.1). Na fakultě elektrotechnické však dosud takové zařízení chybělo a přístup k reálným pecím v průmyslových závodech byl značně omezen vzhledem k informační politice těchto závodů. Průmyslové podniky, které v tomto odvětví podnikají a u kterých by bylo možné danou problematiku prakticky ověřit, byly v posledních letech navíc silně redukovány. Kromě vysoké pořizovací ceny takového zařízení je nutné brát v úvahu ještě bezpečnostní hledisko při potenciálním úmyslu pořídit takové zařízení do univerzitní laboratoře. Proto jsem se rozhodl pro konstrukci nového fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení, na kterém by bylo možné bez problémů sledovat a měřit jevy, které nastávají u průmyslové indukční kelímkové pece, a tudíž nový fyzikální model by měl v maximální možné míře odpovídat reálnému indukčnímu zařízení.

Jednou z možností, jak zefektivnit provoz indukčních kelímkových pecí, je doplnit tyto pece o přídavné konstrukční prvky vhodných tvarů i umístění. Prvky jsou vyrobeny z dobře elektricky vodivého materiálu, obvykle z mědi. Přídavné konstrukční prvky tedy pracují na principu stínění pomocí stínícího vodivého pláště (viz Kapitola 2.5) a jsou jeho další doplňující variantou. Stejně, jako dva základní druhy stínění, i tento doplňkový druh stínění omezuje nežádoucí vlivy rozptylového elektromagnetického pole na konstrukci

indukčních zařízení s cílem zvýšit účinnost celého procesu indukčního ohřevu. Konstrukční návrh a zhotovení nového fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení pracujícího i s vysokou frekvencí napájecího proudu induktoru a nových přídatných prvků, měření na doplněném fyzikálním modelu, počítačová simulace aktuální geometrie a vyhodnocení vlivu rozdílných konstrukčních prvků na rozložení elektromagnetického pole a tím na účinnost a tedy i energetickou náročnost indukční kelímkové pece jsou předmětem mé práce.

Mým cílem tedy bylo:

- 1) Zkonstruovat nový fyzikální laboratorní model indukčního zařízení, jehož součástí je induktor napájený ze zdroje vysokého kmitočtu, a stínění svazky dobře magneticky vodivých transformátorových plechů. Zde bylo úkolem porovnat vliv stínění pro různé zvolené kmitočty.
- 2) Doplnit tento fyzikální model o nové přídatné konstrukční prvky v uzavřené (kruhy nakrátko) a otevřené verzi a pomocí zvolené měřicí metody vyhodnotit jejich vliv při vysoké frekvenci napájecího proudu induktoru na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení a vyvodit závěry s ohledem na snížení energetické náročnosti ohřevů elektromagnetickou indukcí při potenciální aplikaci nových prvků u skutečně průmyslové indukční kelímkové pece.
- 3) Doplnit nový fyzikální model z 1) (tj stíněný induktor) o plochou kruhovou desku ve formě nového přídatného prvku reprezentujícího stínící dobře elektricky vodivý plech umístěný u reálného zařízení v dolní části pece a dále o dutou válcovou magnetickou vsázku umístěnou v dutině induktoru a na které by bylo možné realizovat její ohřev elektromagnetickou indukcí při vysokém kmitočtu napájecího proudu induktoru. Úkolem zde tedy bylo provést ohřev nové vsázky a opět porovnat a posoudit dosažené výsledky
- 4) Provést numerickou simulaci pro induktor, stínění, vsázku, uzavřené přídatné konstrukční prvky a plochou kruhovou desku a porovnat dosažené výsledky
- 5) Provést numerickou simulaci pro indukční kelímkovou pec ISTOL 700Kg se vsázkou a dvěma přídatnými prvky – plochým kruhem nakrátko umístěným v horní části pece a plochou kruhovou deskou umístěnou v dolní části pece a porovnat dosažené výsledky

Pokud vlivem přídatného stínícího prvku nebo základního druhu stínění vzroste například intenzita magnetického pole H v daném bodě, ze zákona elektromagnetické indukce vyplývá, že vzroste i indukovaný proud v elektricky vodivém materiálu umístěném do daného

bodů a tím i oteplení tohoto materiálu ve formě Jouleových ztrát. Použití základních druhů stínění nebo přídavných konstrukčních prvků je tedy jednou z možností, jak lze snížit energetickou náročnost ohřevů elektromagnetickou indukcí. Kategoricky bych tuto možnost zařadil mezi konstrukční metody snížení energetické náročnosti indukčního ohřevu. Při detailnějším prostudování problematiky uvedené v této práci je zřejmé, že zatímco u mého laboratorního modelu je možné aplikovat téměř libovolné geometrie a druhy stínění s minimálními požadavky na úpravu celého zařízení, v praxi je úprava již hotové indukční kelímkové pece často technicky nebo ekonomicky obtížná. Proto je moje indukční zařízení potenciálně velmi vhodné i v souvislosti s perspektivní aplikací vhodných konstrukčních prvků u nově vyráběných průmyslových indukčních zařízení.

2 Problematika elektrotepelných zařízení [3], [4]

V dnešní době můžeme konstatovat, že pro většinu výrobních procesů je nezbytně nutná mechanická práce a technologické teplo. Oba tyto pojmy mají ve výrobě zcela zásadní význam. Dalšími aplikacemi je například teplo pro vytápění a klimatizaci místností a prostorů nebo pro ohřev užitkové vody. Energetické využití se přirozeně liší podle stupně průmyslové vyspělosti, a tak v moderních průmyslových státech se přibližně 80 % veškeré prvotní konzumované energie spotřebovává na technologické teplo a pro vytápění (například ve Švédsku se pro vytápění spotřebovává dokonce až 50 % prvotní energie).

Především díky pokroku ve vědeckotechnickém rozvoji v předminulém a především v minulém století docházelo postupně k přechodu z tepla palivového na teplo elektrické u mnoha technologických procesů z důvodu zvýšení produktivity práce, jakosti výrobků, zhodnocení surovin a v neposlední řadě také z důvodu ekonomického snížení výrobních nákladů. Dalším pozitivem je otázka životního a pracovního prostředí především z důvodu absence exhalací. Výrobní linky s elektrotepelnými zařízeními vynikají možností snadné mechanizace a všestranné samočinné říditelnosti s využitím počítačové techniky a kybernetiky, přičemž nelze opomenout ani možnost jednoduchého rozšíření a modernizace prvků. Většina současných technologií je na použití elektrického tepla přímo založena a nejsou jinak vůbec realizovatelné. Tyto technologie můžeme hledat například v automobilovém průmyslu, leteckém a raketovém průmyslu, ve výrobě valivých ložisek, v jaderné energetice, průmyslu sklářském, plastů, skleněných vláken, při výrobě hliníku, v elektronice, při výrobě obuvi, při chemických procesech v plazmě, při přetavování speciálních kovů v elektronových pecích, při výrobě ušlechtilých ocelí v obloukových pecích, při pěstování velkých monokrystalů i při výrobě bižuterie a galanterie. Při pročitání širokého pásma uplatnění se naskýtá myšlenka, že dnes v podstatě neexistuje tepelná technologie, kam by elektrotepelná technika nepronikla, nebo v které by se v nejbližší době nechystala nějakým způsobem prosadit.

Velkými výhodami moderních elektrotepelných zařízení jsou funkční pohotovost, vysoká účinnost, dále to, že mohou dosahovat libovolných, přesně říditelných teplot a jejich průběhů. Dále je většinou také zajištěna úplná reprodukovatelnost procesů a splněna podmínka pro celkové šetření pracovními silami, pracovním prostorem a přirozeně i prvotní energií. Příčinu těchto kladů můžeme hledat ve zlepšení účinnosti celého uzavřeného výrobního cyklu. To znamená, že je například méně vadných výrobků (zmetků) a tím i vratného materiálu, nebo že jsou menší materiálové přídavky na propal a opracování. Často

se například ohřívá jen ta konkrétní část materiálu, kterou je potřeba dále zpracovat, a rovněž mohou být kupříkladu vypuštěny některé výrobní operace. Je podstatné si uvědomit, že mnoho prvotní energie můžeme ušetřit jen tím, že námi sledovaná zařízení budou odebírat energii jen v době jejich pracovní činnosti. V porovnání s tím kupříkladu velká zařízení palivová budou potřebovat palivo i v nepracovní směně, o nedělích a o svátcích, protože je nutné je udržovat na teplotě keramické vyzdívky zařízení z důvodu udržení přijatelné životnosti vyzdívky.

V současné době stále intenzivněji dochází k zmenšování zásob ropy, zemního plynu a uhlí. Můžeme tedy předpokládat postupnou tendenci lidské populace ponechat si tyto zmíněné suroviny pro potřebu především chemického průmyslu a dále jimi neplýtvat spalováním pro výrobu tepla. V souvislosti s tímto můžeme tedy jasně predikovat snahu o získávání tepla a energie z jiných energetických zdrojů, například z jaderné reakce. Význam elektrotepelné techniky ve výrobě i při vytápění tím zcela jistě dále vzroste. Již řadu let můžeme ve světovém měřítku pozorovat snahu přejít na elektrické systémy vytápění. Příčinu tohoto stavu je nutné opět hledat v situaci, kdy naprostá většina států je přinucena k maximálnímu šetření naftou a plynem a navíc samozřejmě ubývá i tříděného uhlí, které se hodí pro spalování v malých topeništích. Dále ještě existuje určitá zásoba méně hodnotného energetického uhlí pro elektrárny a přirozeně v důsledku předchozích faktů vzrůstá výroba elektrické energie v jaderných elektrárnách.

Shrme-li výše uvedená fakta, je zřejmé, že elektrotepelná technika dnes tvoří rozsáhlý vědní obor, přičemž základní dělení zařízení můžeme provést právě podle principu přeměny elektrické energie na teplo v těchto zařízeních na:

- a) **odporová zařízení**
- b) **indukční zařízení**
- c) **dielektrická zařízení**
- d) **oblouková (výbojová) zařízení**
- e) **plazmová zařízení**
- f) **elektronová zařízení**
- g) **laserová zařízení**

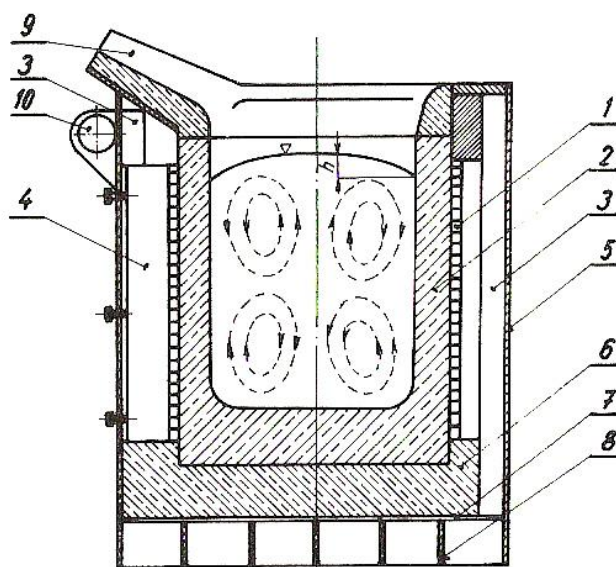
Na závěr této kapitoly je nutno si uvědomit, že právě díky rozmanitosti využití elektrotepelných technologií v praxi zde existuje množství možností, jak zajistit úsporu prvotní energie. Tyto možnosti jsou v oblasti tepla největší ze všech ostatních oblastí a jsou také snáze dosažitelné než jinde. Chceme-li například zvýšit účinnost elektrického motoru

o několik procent, můžeme se dostat do značných problémů. V porovnání s tímto případem je potom zmenšení ztrát tepelných a elektrotepelných zařízení často poměrně snadné, protože jak provozně tak konstrukčně jsou u nich vždy další nevyčerpané možnosti. Ve své práci se i já zabývám snížením měrné energetické náročnosti indukčních ohřevů některých příkladů z praxe pomocí konstrukčních úprav, respektive dodatečným přidáním přídavných konstrukčních prvků s cílem omezení rozptylového magnetického pole, které tvoří v konstrukčních částech takových zařízení nežádoucí Jouleovy ztráty. V provozu jsou dále tepelná zařízení velmi tepelně a mechanicky namáhána. Jejich účinnost tímto namáháním přirozeně také rychle klesá, není-li jim věnována odpovídající údržba a péče.

2.1 Indukční zařízení [1], [4]

Jestliže elektromagnetické vlnění dopadá na elektricky vodivou stěnu, dojde ve stěně ke vzniku indukčního tepla. Dochází k částečnému odrazu vlnění, část vlnění ovšem do stěny vstupuje a vyvolá naindukovaný proud, jehož průchodem stěnou se tato stěna ohřívá. Hlavní výhodou indukčního ohřevu je vznik tepla přímo v zahřívané vsázce, teplo tedy do ní nevstupuje jejím povrchem, jak je to běžné u jiných způsobů ohřevu. Vznik tepla přímo ve vsázce má za příčinu velmi rychlé ohřívání a současně malé ztráty v daném systému. Další nespornou výhodou je skutečnost, že vhodnou volbou kmitočtu můžeme volit tloušťku vrstvy u povrchu vsázky, ve které teplo vzniká. Příkladem indukčního zařízení je kelímková indukční tavicí pec, jejíž problematiku stručně naznačím v následující kapitole.

2.1.1 Indukční tavicí pec kelímková [3], [4]



Obrázek 2.1: Indukční kelímková pec [3], [4]

Indukční kelímková pec na Obrázek 2.1 sestává z následujících částí:

- 1. válcová ohřívací cívka = induktor** – bývá nejčastěji navinuta dutým měděným vodičem čtverhranného průřezu, dutinou vodiče protéká chladicí voda, cívka bývá navinuta jako jednovrstvá
- 2. keramický zadusný kelímek** – materiál tvoří křemičitý písek (SiO_2 – oxid křemičitý)
- 3. svazky elektrotechnických transformátorových plechů** – svazky jsou svisle uspořádány po vnitřním obvodu pláště pece a mají za úkol omezit vliv rozptylového magnetického toku induktoru na konstrukci pece
- 4. středící trámce pro cívku** – materiál tvoří žárobeton, pro válcovou ohřívací cívku (viz 1.)
- 5. ocelový plášť pece**
- 6. cihlová keramická vyzdívka pod kelímkem pece**
- 7. stínící měděný plech** – jako jeden z možných konstrukčních prvků k ovlivnění rozptylového magnetického toku cívky, kterými se dále zabývám v Kapitola 2.5.
- 8. mřížové dno pece**
- 9. hubice pece pro odlévání**
- 10. osa otáčení** – kolem této osy se otáčí pec při vyklápění - odpichu, přičemž pohonem vyklápění jsou hydraulické válce

Nyní si uvedme základní parametry pecí nejčastěji používaných v průmyslu. Napájecí proudy cívky induktoru jsou řádově kiloampéry a do cívky jsou vedeny vodiči z měděných pásů a ohebných lan, chladicí voda sloužící pro chlazení dutých měděných vodičů potom izolačními hadicemi. Pece napájíme proudy se středním kmitočtem, velké pece 500 Hz, menší pece až do 4 kHz, nebo s průmyslovým kmitočtem 50 Hz. Indukční tavicí pece používáme k tavení kovů a k výrobě vysoce kvalitních ocelí pro rozmanité průmyslové aplikace.

Výraznou výhodou indukčních tavicích pecí je silné víření taveniny, jehož příčinou jsou elektrodynamické síly. Stručně rozebereme princip víření uvnitř taveniny. U stěny kelímku vzniká v tavenině podtlak vlivem tlakového působení elektrodynamických sil na vsázku, v ose taveniny dochází naopak k přetlaku. Tímto dochází k pohybu taveniny podél vnitřní stěny kelímku a ke vzdouvání v ose vsázky indukční pece.

Rozhodujícím faktorem je zde míra vzdutí, kterou vyjádříme pomocí vzorce:

$$h = K \frac{P_1}{\rho_{vs}} \sqrt{\frac{\mu_r \gamma}{f}}, \quad (2.1)$$

kde P_1 ... příkon na jednotku plochy vsázky (Poyntingův vektor – viz. dále),

uvažujeme válcovou plochu přivrácenou k cívice

K ... konstanta

ρ_{vs} ... měrná hustota vsázky

μ ... relativní permeabilita vsázky (většinou $\mu_r = 1$)

γ ... konduktivita (měrná elektrická vodivost) vsázky

f ... frekvence (kmitočet) proudu v cívice.

Z uvedeného vzorce je zřejmé, že vzdutí h a tím i intenzita víření roste s příkonem P_1 , s γ a s klesající frekvencí.

Nevýhodou je, že víření limituje příkon především u pecí pro 50 Hz a u lehkých kovů (hliník). Přiměřené víření je metalurgicky velmi vítané, neboť zajišťuje naprostou homogenitu kovu, a to pokud jde o složení i teplotu.

2.2 Teorie indukčního ohřevu [1], [2], [3], [4]

Nyní popíšme elektromagnetické pole u indukčního ohřevu pomocí obecných vlnových rovnic pro šíření elektromagnetického vlnění. Tyto rovnice odvodíme z Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru.

2.2.1 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru:

$$1. \operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$2. \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$3. \operatorname{div} \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} = \rho \quad (2.4)$$

$$4. \operatorname{div} \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = 0, \quad (2.5)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]

$$\varepsilon_0 \cong \frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-9} = \frac{10^7}{4\pi c^2} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ [F/m]}$$

Pozn. V nevodivém prostředí ($\gamma = 0$) platí: $\mu_0 \cdot \varepsilon_0 = \frac{4\pi}{10^7} \cdot \frac{10^7}{4\pi c^2} = \frac{1}{c^2}$,

kde c je rychlost světla, $c = 3 \cdot 10^8$ [m/s]

\mathbf{H} ... je vektor intenzity magnetického pole [A/m]

\mathbf{E} ... je vektor intenzity elektrického pole [V/m]

γ ... je konduktivita, měrná elektrická vodivost [S/m]

ρ ... je hustota náboje [C/m³]

Vlnové rovnice získáme postupem, kdy se na 1. a 2. Maxwellovu rovnici aplikuje další operace rotace a vztah vektorového počtu: $\text{rot}(\text{rot } \mathbf{H}) = \text{grad}(\text{div } \mathbf{H}) - \nabla^2 \mathbf{H}$, kde první člen v rozdílu je roven nule. Tímto získáme obecně platné **rovnice šíření elektromagnetického vlnění** v prostředí, kde ε_r , μ_r , γ jsou materiálové konstanty.

2.2.2 Vlnové rovnice

Složka magnetická je vyjádřena rovnicí:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Složka elektrická je vyjádřena rovnicí:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \text{grad} \frac{\rho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (2.7)$$

Pro další teorii nebudeme uvažovat volné náboje ρ , vezmeme proto $\rho = 0$. Rovnice (2.7) tím přejde na tvar:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

Z rovnic (2.6) a (2.8) dále odvodíme rovnice:

Pro elektricky nevodivé prostředí:

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (2.10)$$

Pro elektricky vodivé prostředí:

$$\nabla^2 \underline{\mathbf{H}} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \underline{\mathbf{H}}}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\nabla^2 \underline{\mathbf{E}} = \gamma \mu_0 \mu_r \frac{\partial \underline{\mathbf{E}}}{\partial t} \quad (2.12)$$

Dále z rovnic (2.6) a (2.8) aplikací na **fázory** pomocí **vyjádření časových derivací** a úpravou přejdeme na obecné rovnice pro harmonické elektromagnetické vlnění:

$$\nabla^2 \underline{\mathbf{H}} + k^2 \underline{\mathbf{H}} = 0 \quad (2.13)$$

$$\nabla^2 \underline{\mathbf{E}} + k^2 \underline{\mathbf{E}} = 0, \quad (2.14)$$

kde pro pravoúhlé souřadnice (trojrozměrné) platí: $\nabla^2 \underline{\mathbf{H}} = \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial z^2}$.

Pro názornost a tím pro jednodušší matematické řešení budou jevy uvažovány jako jednorozměrné. To znamená, že $\underline{\mathbf{H}}$ a $\underline{\mathbf{E}}$ budou záviset jen na souřadnici x a nikoliv na y a z .

Potom tedy platí:

$$\frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial z^2} = 0 \quad \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{E}}}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{E}}}{\partial z^2} = 0,$$

$\underline{\mathbf{H}}$ a $\underline{\mathbf{E}}$ budeme uvažovat konstantní v každém bodě roviny kolmé na osu x , určené souřadnicí x . Tím zavedeme tzv. **rovinnou vlnu**.

Ve vztazích (2.13) a (2.14) dále platí:

$$k^2 = (\omega^2 \mu \varepsilon - j \omega \mu \gamma) = -j \omega \mu (\gamma + j \omega \varepsilon)$$

$$k = \alpha - j\beta, \quad k^2 = \alpha^2 - 2j\alpha\beta - \beta^2 \quad (2.15)$$

kde k ... konstanta šíření

α ... fázová konstanta

β ... měrný útlum

Konstanta k charakterizuje šíření elektromagnetického vlnění v uvažovaném prostředí při harmonickém průběhu fázorů $\underline{\mathbf{E}}$ a $\underline{\mathbf{H}}$ při úhlovém kmitočtu ω .

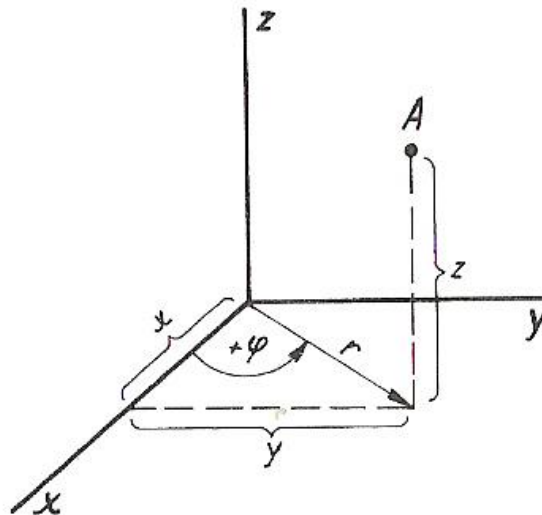
Nyní se v dalším zaměřím na plnou válcovou vsázku.

2.3 Válcové elektromagnetické vlnění [2], [3], [4]

Většina předmětů, které chceme indukčně ohřívat, bývá v technické praxi obvykle válcového tvaru. Také velké množství cívek a mnoho různých vinutí má válcový tvar. Z těchto důvodů probereme vlastnosti a zákonitosti elektromagnetického vlnění v těchto válcových útvarech.

Pro zjednodušení budeme uvažovat jevy ve válcových útvarech teoreticky nekonečně dlouhých, neboť v takových útvarech dané jevy závisí jen na jednom rozměru, tj. obvykle na poloměru r .

Válcové elektromagnetické vlnění se nachází například v dutině dlouhé válcové cívky, kterou prochází střídavý proud. K rozboru poměrů a jevů ve válcových útvarech je výhodné zavést válcové (cylindrické) souřadnice podle Obrázek 2.2.



Obrázek 2.2: Válcové souřadnice [2], [4]

Dle Obrázek 2.2 je určen libovolný bod A poloměrem r , úhlem φ a souřadnicí z . Je zřejmé, že mezi válcovými souřadnicemi a souřadnicemi pravoúhlými platí vztahy:

$$\begin{aligned} x &= r \cos \varphi \\ y &= r \sin \varphi \\ z &= z \end{aligned} \tag{2.16}$$

V pravoúhlých souřadnicích je $\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2}$

Ve válcových souřadnicích je:

$$\nabla^2 \underline{\mathbf{H}} = \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \underline{\mathbf{H}}}{\partial r} \quad (2.17)$$

Pokud bude jev záviset na souřadnici r a bude konstantní pro všechny φ a z , potom platí:

$$\frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial \varphi^2} = \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial z^2} = 0$$

Pak pro náš případ již s fázory:

$$\nabla^2 \underline{\mathbf{H}} = \frac{\partial^2 \underline{\mathbf{H}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \underline{\mathbf{H}}}{\partial r} = \frac{d^2 \underline{\mathbf{H}}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \underline{\mathbf{H}}}{dr} \quad (2.18)$$

Nyní se vrátíme zpátky k vlnovým rovnicím. Náš zjednodušený fyzikální model a jemu odpovídající model matematický předpokládá, že například intenzita magnetického pole $\underline{\mathbf{H}}$ se bude měnit pouze s poloměrem r a vzhledem k φ a z bude konstantní, právě jak bylo uvedeno výše.

Dosazením válcových souřadnic do obecné rovnice pro harmonický průběh $\underline{\mathbf{H}}$ (2.13) a jejím řešením obdržíme pro $\underline{\mathbf{H}}$ následující vztah:

$$\underline{\mathbf{H}} = C_1 J_0(kr) + C_2 N_0(kr) \quad (2.19)$$

Podobně pro $\underline{\mathbf{E}}$ s respektováním vazby na $\underline{\mathbf{H}}$ (vyplývá z 1. Maxwellovy rovnice (2.2)) obdržíme:

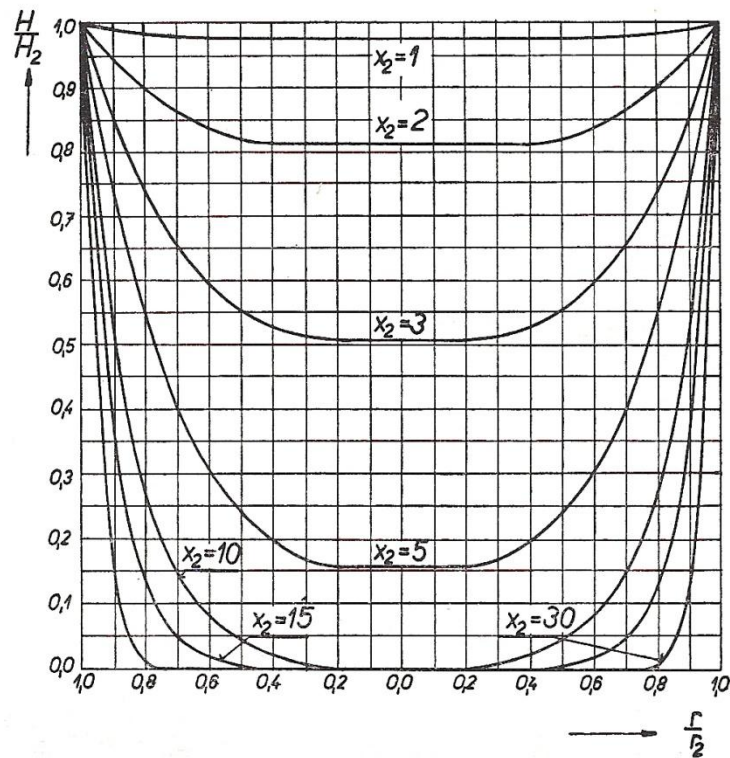
$$\underline{\mathbf{E}} = + \frac{k}{\gamma} [C_1 J_1(kr) + C_2 N_1(kr)], \quad (2.20)$$

kde $J_n(kr)$...je cylindrická funkce 1.druhu (Besselova), n -tého řádu, argumentu kr

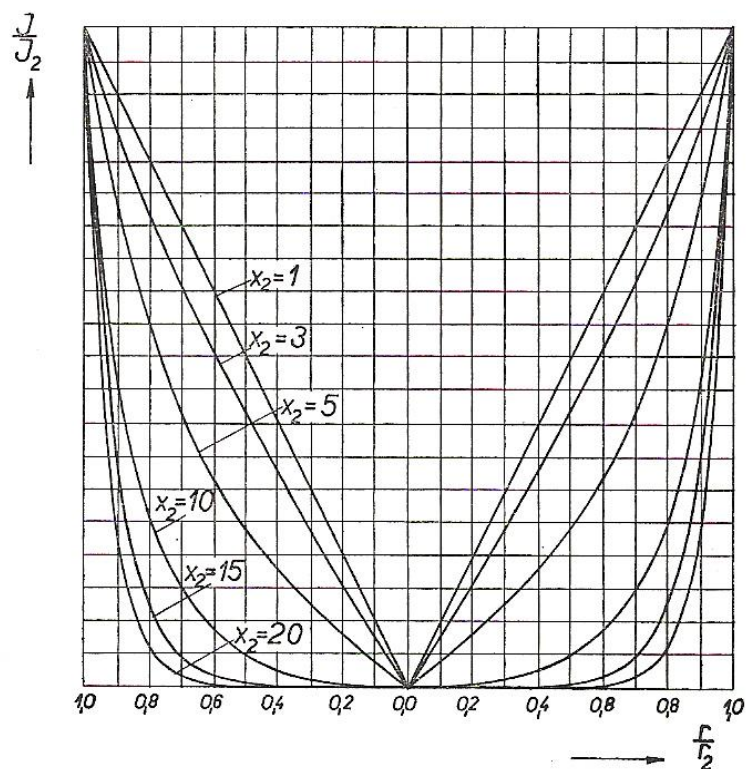
$N_n(x)$...je cylindrická funkce 2. druhu (Neumannova), n -tého řádu, argumentu kr

C_1, C_2 ...jsou integrační konstanty

Pro průběhy $\underline{\mathbf{H}}$ a $\underline{\mathbf{J}}$ ($\underline{\mathbf{E}}$) v plně válcové a elektricky vodivé vsázce platí následující grafy:



Obrázek 2.3: Rozložení intenzity magnetického pole \underline{H} pro plnou válcovou a elektricky vodivou vsázku v závislosti na argumentu x_2 [2], [4]



Obrázek 2.4: Rozložení proudové hustoty \underline{J} (respektive intenzity elektrického pole \underline{E}) pro plnou válcovou a elektricky vodivou vsázku v závislosti na argumentu x_2 [2], [4]

Pozn. 1: Platí $\underline{J} = \gamma \cdot \underline{E}$, graf pro poměrnou hodnotu $\frac{\underline{E}}{\underline{E}_2}$ bude identický jako pro $\frac{\underline{J}}{\underline{J}_2}$.

Pozn. 2: Index 2 charakterizuje ohřivanou vsázku, proměnná x_2 potom představuje proměnnou v dané vsázce, přičemž platí:

$$x_2 = \frac{r_2}{a_2} \sqrt{2} \quad [-], \quad (2.21)$$

kde a_2 je relativní hloubka pronikání elektromagnetického vlnění do elektricky vodivé vsázky a platí pro ni vztah:

$$a_2 = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}} \quad [\text{m}] \quad (2.22)$$

2.4 Naindukované teplo [2], [4]

Množství naindukovaného tepla ve vsázce lze odvodit třemi způsoby. Jedná se o:

1. přímé odvození množství tepla (tj. Jouleovy ztráty)
2. nepřímé odvození množství tepla ve vsázce
3. odvození množství tepla z Poyntingova vektoru N (tj. množství tepla z absorbované elektromagnetické energie)

Přímé odvození množství tepla je nepřehledné a prakticky nepoužívané. Nejvýhodnější se jeví odvození nepřímé, kde se používá metoda běžná pro transformátory, kdy hodnota impedance ze sekundární strany je převedena na stranu primární. Množství indukovaného tepla je zde odvozeno následujícím postupem:

1. Pro činný odpor vsázky R_{21} , který převádíme na stranu cívky, platí vztah:

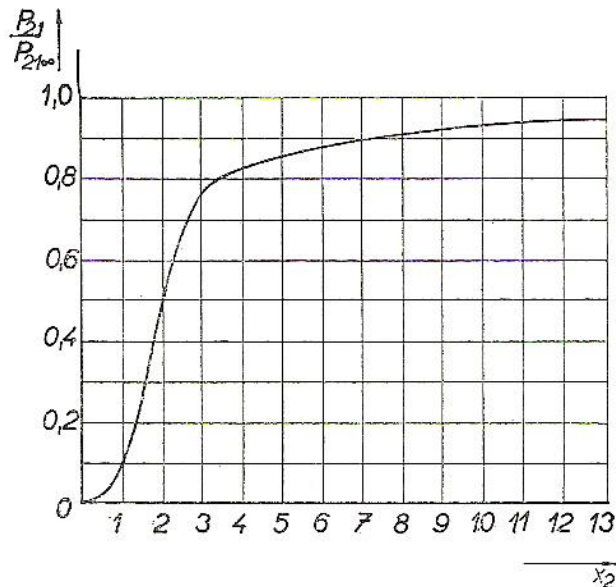
$$R'_{21} = \frac{2\pi x_2}{\gamma} N_{11}^2 P(x_2) \quad (2.23)$$

2. Prochází-li tímto odporem cívkový proud I_1 (max. hodnota), vznikne množství tepla

P'_{21} :

$$P'_{21} = \frac{1}{2} R_{21} I_1^2 = \frac{2\pi x_2}{\gamma} N_{11}^2 P(x_2) \frac{1}{2} I_1^2 = \pi \rho_R x_2 P(x_2) (N_{11} I_1)^2 = \pi \rho_R x_2 P(x_2) H_2^2$$

$$P'_{21} = \pi \rho_R x_2 P(x_2) H_2^2 \quad [\text{W/m}] \quad (2.24)$$



Obrázek 2.5: Závislost indukovaného výkonu P_{21} ve vsázce na argumentu x_2 [2], [4]

Pro $r_2 \leq a_2$ nastává tzv. elektromagnetická průzařnost plné válcové vsázky. Důsledkem je nedosažení požadované teploty při kalení, prohřátí za účelem tváření za tepla a nedosažení tavicí teploty při tavení materiálů nevhodných rozměrů.

Pro efektivní indukční ohřev plné válcové vsázky je nutná správná volba kmitočtu f pro poloměr ohřívání vsázky. Pro praktické účely se vychází ze vztahu:

$$r_2 = (2,5 - 3)a_2 \quad (2.25)$$

2.4.1 Vliv relativní permeability μ_r na indukční ohřevy

Značnou roli u feromagnetických materiálů hraje relativní permeabilita μ_r . Důležitý je pro nás vztah:

$$\mu_r(\nu, H) = 1 + (\mu_{r,20} - 1)\varphi(\nu), \quad (2.26)$$

kde $\varphi(\nu)$ udává průběh funkce respektující změnu μ_r s teplotou. Pro teplotu $T = 20^\circ\text{C}$ je $\varphi(\nu) = 1$. Pro Curieův bod T_c je $\varphi(\nu) = 0$ a $\mu_r = 1$ a pro teploty nad T_c je tedy $\mu_r = 1$.

2.5 Rozptylové pole [1], [4]

V případě indukčního ohřevu hraje důležitou roli rozptylové elektromagnetické pole induktoru, především v indukčních kelímkových pecích toto pole způsobuje přídavné ztráty v konstrukci zařízení v důsledku vzniku vířivých proudů. Nežádoucí účinky tohoto elektromagnetického rozptylového pole lze výrazně omezit použitím stínění.

Rozlišujeme dva základní druhy stínění:

- a) stínění elektricky vodivým pláštěm (aktivní)
- b) stínění svazky trafoplechů

Stínění provedené pomocí stínícího pláště (z mědi, hliníku, duralu) pracuje na principu elektromagnetické indukce, kdy vzniklé naindukované pole v plášti působí proti původnímu poli, a tudíž vně použitého stínění je výsledné pole (jedná se tedy o součet pole rozptylového od induktoru a pole od stínění) téměř bez účinků na konstrukci.

Další typ stínění, technicky dokonalejší, představuje stínění svazky dobře magneticky vodivých transformátorových plechů. Tento druh stínění pracuje na principu vysoké magnetické vodivosti těchto trafoplechů, kterými se rozptylové elektromagnetické pole uzavírá a jeho působení na konstrukci je takřka zanedbatelné.

Tyto základní druhy stínění jsou prvním a nutným prvkem k efektivnímu indukčnímu ohřevu, protože výrazným způsobem snižují měrnou energetickou náročnost celého procesu.

Další dodatečnou možností, jak zefektivnit provoz indukčních kelímkových pecí, je doplnit tyto pece o přídavné konstrukční prvky rozmanitých tvarů i umístění. Materiál těchto prvků tvoří dobře elektricky vodivý kov, obvykle měď. Přídavné konstrukční prvky zde fungují na principu stínění pomocí stínícího vodivého pláště a jsou jeho doplňující variantou. Stejně jako dva základní druhy stínění, které jsou uvedeny výše, i tento doplňkový druh stínění omezuje nežádoucí vlivy rozptylového elektromagnetického pole na konstrukci sledovaného zařízení s cílem zvýšit účinnost celého indukčního procesu. Navržení a zhotovení nových přídavných prvků, měření s těmito prvky na nově vytvořeném fyzikálním laboratorním modelu indukčního zařízení, počítačové simulace těchto uspořádání a vyhodnocení vlivu těchto prvků na rozložení elektromagnetického pole a tím na účinnost a tedy i energetickou náročnost indukční kelímkové pece jsou cílem této disertační práce.

3 Teorie indukčního ohřevu pomocí magnetického vektorové potenciálu A [5], [4], [6]

V další teorii vyjdeme z Maxwellových rovnic uvedených v Kapitola 2.2.1 (rovnice (2.2) až (2.5)), které popisují obecně elektromagnetické pole, a dosadíme-li do nich známé materiálové vztahy:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} , \quad (3.3)$$

získáme potom zjednodušené Maxwellovy rovnice pro nepohybující se kontinuum:

$$1. \operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.4)$$

$$2. \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$3. \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho_v \quad (3.6)$$

$$4. \operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (3.7)$$

K popisu elektromagnetického pole dochází u Maxwellových rovnic tedy pomocí vektorových veličin \mathbf{E} , \mathbf{D} , \mathbf{B} , \mathbf{H} , \mathbf{J} . Pro zmíněné veličiny platí na rozhraní následující podmínky:

$$\begin{aligned} E_{t1} - E_{t2} &= 0 \\ D_{n1} - D_{n2} &= \sigma \\ B_{n1} - B_{n2} &= 0 \quad , \\ H_{t1} - H_{t2} &= K_N \\ J_{n1} - J_{n2} &= 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

kde indexy 1,2 ... představují prostředí na jedné a druhé straně rozhraní

index t ... představuje složku vektoru tečnou k rozhraní

index n ... představuje složku vektoru kolmou k rozhraní

σ ... je plošná hustota náboje na rozhraní [C/m^2]

K_N ... velikost hustoty plošného proudu na rozhraní [A/m]

Velmi důležitá je skutečnost, že tyto podmínky definují spojitost pouze jedné složky vektorů. Jestliže budeme vektory uvažovat z obecného hlediska, nemůžeme zaručit jejich spojitost na rozhraní, což je velmi nevýhodné pro numerické výpočty. Toto je hlavní důvod,

proč uvedeme druhý způsob popisu elektromagnetického pole, a to právě popis pomocí potenciálů.

Při definování potenciálových veličin vyjdeme ze čtvrté Maxwellovy rovnice (3.7). Z teorie elektromagnetického pole víme, že tato rovnice nám fyzikálně vyjadřuje, že vektorové pole magnetické indukce je nezářidlové. Pro jeho popis použijeme vektorový potenciál \mathbf{A} [Wb/m], který definuje následující vztah:

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (3.9)$$

Dosadíme tuto definici do druhé Maxwellovy rovnice (3.5) a po úpravě dostaneme:

$$\text{rot} \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.10)$$

Výraz (3.10) má v závorce nulovou rotaci, můžeme ho tedy vyjádřit jako gradient skalárního potenciálu φ :

$$-\text{grad } \varphi = \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.11)$$

Úpravou získáme intenzitu elektrického pole v závislosti pouze na potenciálech:

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.12)$$

Nyní vyjdeme z materiálových vztahů $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$, $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ a $\mathbf{J} = \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{E}_v) = \gamma \mathbf{E} + \mathbf{J}_v$, a dosadíme definiční vztahy (3.9) a (3.12) do první (3.4) a třetí (3.6) Maxwellovy rovnice. Tímto obdržíme rovnice, které popisují elektromagnetické pole pouze na základě potenciálů \mathbf{A} a φ :

$$\text{rot } \frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} + \gamma \left(\text{grad } \varphi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \left(\text{grad } \varphi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = \mathbf{J}_v \quad (3.13)$$

$$\text{div } \varepsilon \text{ grad } \varphi + \text{div } \varepsilon \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\rho_v, \quad (3.14)$$

kde \mathbf{J}_v ... představuje proudovou hustotu vnuceného proudu [A/m²]

ρ_v ... značí objemovou hustotu volného náboje [C/m³]

První člen v rovnici (3.13) a druhý člen v rovnici (3.14) obsahuje divergenci vektorového potenciálu. Důležitý je fakt, že ta není definičním vztahem (3.9) nikterak určena a lze ji tudíž libovolně zvolit. Toho využijeme při úpravě oddělení obou rovnic uvedené soustavy.

Odvození rovnic (3.13) a (3.14) jsme provedli bez zjednodušujících podmínek přímo z Maxwellových rovnic (3.4) až (3.7). Platnost těchto rovnic nabývá tedy stejně obecného významu jako platnost Maxwellových rovnic a použitých materiálových vztahů. V následujících úpravách již uijeme zjednodušující předpoklady, které plynou ze znalosti vlastností pole a prostředí.

Dle předpokladů, kterých nyní uijeme, provedeme následující členění:

- A. pole na:
1. nestacionární
 2. kvazistacionární
 3. stacionární
- B. prostředí na:
1. s časově nebo prostorově konstantními či proměnnými parametry
 2. lineární či nelineární

ad. A.1. Nestacionární pole

U tohoto případu pole nelze zanedbat posuvný proud (na rozdíl od pole kvazistacionárního). Je-li prostředí navíc lineární, nevodivé, s prostorově i časově konstantním ε , potom lze pro získání dvou nezávislých rovnic aplikovat tzv. Lorenzovu kalibrační podmínku:

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = -\mu\varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (3.15)$$

Jestliže je navíc μ prostorově konstantní, získáme pomocí Lorenzovy podmínky (3.15) a vektorové identity $\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{A} - \Delta \mathbf{A}$ následující dvě nezávislé rovnice:

$$\Delta \mathbf{A} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J}_v \quad (3.16)$$

$$\Delta \varphi - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho_v}{\varepsilon} \quad (3.17)$$

Závěrem je důležité uvést, že při modelování indukčních ohřevů v našich případech se nestacionární pole (jak bude dále ukázáno) nevyskytuje.

ad. A.2. Kvazistacionární pole

Uvažujeme-li kvazistacionárního pole, potom můžeme zanedbat posuvný proud. Z rovnice (3.13) je potom možné odstranit člen $\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon \left(\operatorname{grad} \varphi + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right)$. Jestliže bude ε lineární a

prostorově konstantní a $\rho_v = 0$ v celém prostoru, potom můžeme s výhodou užít Coulombovu kalibrační podmínku:

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0 \quad (3.18)$$

Rovnice (3.14) má potom na libovolné oblasti tvar:

$$\Delta \varphi = 0 \quad (3.19)$$

Gradient skalárního potenciálu pak můžeme považovat za nulový:

$$\operatorname{grad} \varphi = 0 \quad (3.20)$$

Nyní zanedbáme posuvný proud a použijeme vztah (3.20), z rovnice (3.13) získáme následující vztah:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_v \quad (3.21)$$

Jestliže je μ lineární a prostorově konstantní, lze rovnici (3.21) upravit pomocí vektorové identity $\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{A} - \Delta \mathbf{A}$ a použitím Coulombovy kalibrační podmínky (3.18) na tvar:

$$-\Delta \mathbf{A} + \mu \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mu \mathbf{J}_v \quad (3.22)$$

V našem případě modelování indukčního ohřevu je kvazistacionární pole využíváno ve všech vodivých oblastech daného uspořádání. V podstatě to znamená, že posuvný proud můžeme oproti proudu vodivostnímu bez problémů zanedbat, a to díky dostatečné vodivosti těchto oblastí. Pro harmonické průběhy je fázor vodivostní proudové hustoty určen výrazem $\underline{\mathbf{J}}_{\text{vod}} = \gamma \underline{\mathbf{E}}$ a fázor posuvné proudové hustoty $\underline{\mathbf{J}}_{\text{posuv}} = j\omega \varepsilon \underline{\mathbf{E}}$. Nyní je zřejmé, že pro posouzení, zda můžeme posuvný proud zanedbat, stačí porovnat hodnoty γ a $\omega \varepsilon$.

Například pro austenitickou ocel s vodivostí $\gamma = 1,38 \cdot 10^6$ S/m při frekvenci $f = 50$ Hz a permitivitě vzduchu $\varepsilon_r = 1$ se hledaný součin rovná $\omega \varepsilon = 2,77 \cdot 10^{-9}$. Z porovnání je zřejmé, že posuvný proud můžeme zanedbat.

ad. A.3. Stacionární pole

V tomto typu pole můžeme zanedbat všechny časové derivace. Za použití Coulombovy kalibrační podmínky (3.18) a jestliže ε je prostorově konstantní, získáme opět z rovnice (3.14) rovnici (3.19) a gradient φ lze položit nulový. Z rovnice (3.13) pak vznikne následující tvar:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{J}_v \quad (3.23)$$

Nyní provedeme identickou úpravu, kterou jsme upravili rovnici (3.21) na rovnici (3.22), a získáme tím rovnici pro konstantní a lineární μ :

$$-\Delta \mathbf{A} = \mu \mathbf{J}_v \quad (3.24)$$

Pro modely indukčních ohřevů jsou rovnice pro stacionární pole (3.23) a (3.24) používány pro výpočet nevodivých oblastí. Zdůvodníme to tím, že pro běžně používané frekvence při indukčních ohřevech je vlnová délka elektromagnetického vlnění mnohem větší než běžné rozměry zařízení.

Budeme-li například uvažovat frekvenci 50 Hz, je vlnová délka ve vakuu (ve vzduchu) 6000 km, přičemž rozměry zařízení činí řádově metry.

Porovnáním rovnic (3.21) a (3.22) s rovnicemi (3.23) a (3.24) zjistíme, že se liší pouze vodivostním členem. Je zřejmé, že se jedná o velkou výhodu, neboť potom můžeme pro vodivé i nevodivé oblasti použít rovnice (3.21) nebo (3.22) za předpokladu, že v nevodivých oblastech bude $\gamma = 0$.

3.1 Podmínky na rozhraní, okrajové podmínky

Počítaný model většinou sestává z více oblastí s různými materiálovými vlastnostmi. Sousedí-li potom spolu dvě oblasti s různými materiálovými vlastnostmi, nemůžeme jejich hranice považovat za regulární body a neplatí na nich odvozené diferenciální rovnice. Pro takové hranice bude platit:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 &= \mathbf{A}_2 \\ \frac{1}{\mu_1} \operatorname{rot}_t \mathbf{A}_1 - \frac{1}{\mu_2} \operatorname{rot}_t \mathbf{A}_2 &= \mathbf{K}_N \end{aligned} \quad (3.25)$$

Při tvorbě těchto modelů musíme tedy zadat také podmínky pro body hranice Γ počítaného modelu. Pro modely elektromagnetického pole se používají tyto podmínky:

1. Dirichletova podmínka
2. Neumannova podmínka
3. podmínky periodicity a antiperiodicity

ad 1. Dirichletova okrajová podmínka

Udává přímo požadovanou velikost počítané veličiny v každém bodě hranice Γ .

$$\mathbf{A}(\Gamma, t) = \mathbf{A}_r(\Gamma, t), \quad (3.26)$$

Kde \mathbf{A} ... je neznámá hodnota vektorového potenciálu počítaná pomocí rovnice (3.21) nebo (3.22).

\mathbf{A}_r ... je zadaná hodnota vektorového potenciálu pro body hranice Γ .

Dirichletova podmínka určuje rovněž derivaci vektorového potenciálu v kterémkoli směru tečném k hranici Γ a tím i normálovou složku rotace \mathbf{A} , což je normálová složka magnetické indukce. Pomocí této podmínky tedy můžeme zadat požadovanou hodnotu \mathbf{B}_n . Jestliže například zadáme \mathbf{A}_r konstantní na určité části hranice, je \mathbf{B}_n na této části nulové. To lze výhodně použít především u symetrických modelů, je-li hranice totožná se siločárou.

ad. 2. Neumannova podmínka

Tato podmínka zadává derivaci \mathbf{A} podle vnější normály hranice.

$$\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial n}(\Gamma, t) = f(\Gamma, t), \quad (3.27)$$

kde f ... je požadovaná hodnota derivace dle vnější normály.

Vysvětleme si nyní význam Neumannovy podmínky. Neumannova podmínka určuje velikost tečné složky vektoru \mathbf{B} . Jestliže položíme Neumannovu podmínku rovnou nule, potom má vektor $\mathbf{B}(\Gamma, t)$ směr normály k hranici. Toho můžeme znovu s výhodou využít při zadávání symetrie, jestliže víme, že siločáry budou hranicí procházet v kolmém směru.

ad. 3. Podmínky periodicity a antiperiodicity

Vyjadřují vztah mezi hodnotami počítané veličiny dvou odpovídajících si bodů na tvarově stejných částech hranice.

Podmínky periodicity:

$$\begin{aligned} A(\Gamma_1, t) &= A(\Gamma_2, t) \\ \frac{\partial A}{\partial n}(\Gamma_1, t) &= \frac{\partial A}{\partial n}(\Gamma_2, t) \end{aligned} \quad (3.28)$$

Podmínky antiperiodicity:

$$\begin{aligned} A(\Gamma_1, t) &= -A(\Gamma_2, t) \\ \frac{\partial A}{\partial n}(\Gamma_1, t) &= -\frac{\partial A}{\partial n}(\Gamma_2, t) \end{aligned} \quad (3.29)$$

Použijeme je například při modelování elektrických točivých strojů nebo při modelování ohřevu ozubených kol s nesymetrickými zuby.

Smíšené okrajové podmínky

Tyto podmínky užíváme tehdy, jestliže na jednotlivých částech hranice použijeme různé druhy z výše uvedených okrajových podmínek.

3.2 Počáteční podmínka

Při řešení rovnic kvazistacionárního či nestacionárního pole je potřeba zadat hodnoty A v řešeném modelu v počátečním čase. Obvykle tuto počáteční podmínku uvažujeme jako homogenní a nulovou.

$$A(\Omega, t = 0) = A_0(\Omega) \quad (3.30)$$

U nestacionárního pole je třeba navíc zadat počáteční rychlost změny A .

$$\frac{\partial A}{\partial t}(\Omega, t = 0) = F_0(\Omega) \quad (3.31)$$

I tuto podmínku obvykle zadáváme nulovou.

3.3 Rozložení ztrát

Jestliže spočteme rozložení vektoru A v prostoru a čase ve všech důležitých oblastech počítaného modelu, hledáme pak u modelů indukčních ohřevů rozložení Jouleových ztrát, které získáme z těchto spočtených hodnot.

Rozložení Jouleových ztrát tedy získáme ze vzorce:

$$w_J = (\mathbf{J} + \mathbf{J}_v) \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{E}_v) \quad (3.32)$$

Pro izotropní materiál můžeme psát:

$$w_J = \gamma \|\mathbf{E} + \mathbf{E}_v\|^2 = \gamma \left\| \mathbf{E} + \frac{\mathbf{J}_v}{\gamma} \right\|^2, \quad (3.33)$$

kde \mathbf{E} získáme z rovnice (3.12) při současném respektování rovnice (3.20). Vyjde tedy:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.34)$$

Nyní dosadíme vztah (3.34) do rovnice (3.33) a získáme finální vztah:

$$w_J = \gamma \left\| -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \frac{\mathbf{J}_v}{\gamma} \right\|^2 \quad (3.35)$$

Pohledem na daný problém z matematického hlediska dospějeme k závěru, že můžeme při řešení rovnice (3.21) nebo (3.22) vložit nenulový vnučený proud do oblasti s nulovou vodivostí. Tomu budou pak odpovídat nenulové Jouleovy ztráty. V těchto oblastech pak nemůžeme počítat Jouleovy ztráty tímto postupem.

3.4 Rovnice pro kvazistacionární pole řešené pomocí vektorového potenciálu, pro 2D úlohy

Obecně můžeme říci, že při řešení rovnic (3.21) a (3.22) můžeme u některých uspořádání uvažovat pouze jednu složku vektoru \mathbf{A} a dvě prostorové souřadnice. U některých dostatečně dlouhých uspořádání bude mít vektor \mathbf{A} v celé počítané oblasti stejný směr a jeho velikost se v tomto směru nebude měnit. Položíme-li v tomto směru osu z kartézských souřadnic, jsou složky A_x a A_y nulové a pro složku A_z bude mít rovnice (3.21) tvar:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu_y} \frac{\partial}{\partial x} A_z - \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu_x} \frac{\partial}{\partial y} A_z + \gamma \frac{\partial A_z}{\partial t} = J_{vz} \quad (3.36)$$

Obdobná situace nastává i u osově symetrických zařízení. Potom převedeme rovnici (3.21) do válcových souřadnic s osou z v ose symetrie, složky A_z a A_r budou nulové a složka A_φ se nebude měnit s úhlem φ . Pro složku A_φ pak bude platit:

$$-\frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\mu_r} \frac{\partial}{\partial z} A_\varphi - \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{\mu_z r} \frac{\partial}{\partial r} r A_\varphi + \gamma \frac{\partial A_\varphi}{\partial t} = J_{v\varphi} \quad (3.37)$$

Zbývá dodat, že u těchto modelů je vždy vnučený proud kolmý na rovinu, v níž pole počítáme.

3.5 Rovnice pro kvazistacionární pole řešené pomocí vektoru magnetické intenzity, pro 2D úlohy

Jestliže budeme mít celé uvažované uspořádání dostatečně dlouhé ve směru osy induktoru, bude potom vektor magnetické intenzity s touto osou rovnoběžný a ve směru této osy konstantní. Využijeme pak toho, že je vždy tečný k rozhraní a rozdíl tečných složek je nulový (to za předpokladu nulových proudů na rozhraní; viz rovnice (3.8)). Pole vektoru \mathbf{H} je tedy prostorově spojitě. Jestliže osu z položíme do směru osy induktoru, postačí vyjádřit rovnici pro složku H_z a prostorové souřadnice x a y . Využijeme k tomu materiálové vztahy (3.2), (3.3) a Maxwellovy rovnice (3.4) až (3.7).

Pro složku H_z získáme rovnici:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\gamma_y} \frac{\partial}{\partial x} H_z - \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\gamma_x} \frac{\partial}{\partial y} H_z + \mu \frac{\partial H_z}{\partial t} = 0 \quad (3.38)$$

Tato rovnice má stejný tvar jako rovnice (3.36), můžeme tedy s výhodou použít stejný program pro její řešení, pouze přejmenujeme proměnné a parametry. V rovnici (3.38) se vyskytuje zlomek $1/\gamma$, nemůžeme tedy touto rovnicí modelovat nevodivé oblasti. Modelujeme tedy pouze ohřivanou oblast a velikost proudů induktorem zadáváme pomocí okrajových podmínek.

Analogický model můžeme vytvořit i pro osově symetrické uspořádání například u toroidního induktoru.

4 Teplotní pole [5], [4]

Teplotní pole bude obecně popsáno rovnicí:

$$-\operatorname{div} \lambda \operatorname{grad} T + \rho_h c \frac{dT}{dt} + \lambda \tau_r \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = Q_0 \quad (4.1)$$

Člen v rovnici (4.1), který obsahuje druhou derivaci teploty podle času, nám respektuje konečnou rychlost šíření tepla, přičemž tento člen nemůžeme zanedbat pouze při velmi rychlých změnách teploty. U indukčních ohřevů je proto možno tento člen bez problémů zanedbat.

Druhý člen rovnice (4.1) obsahuje substanciální derivaci, kterou rozepíšeme dle vzorce:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T, \quad (4.2)$$

kde \mathbf{v} ... je rychlost skutečného kontrolního bodu, ve kterém sledujeme teplotu vzhledem k soustavě souřadnic,

$\frac{\partial T}{\partial t}$... je rychlost změny teploty nového myšleného kontrolního bodu, jenž je ve stejný okamžik na stejném místě, ale vzhledem k soustavě souřadnic se nepohybuje.

Jestliže spojíme náš skutečný kontrolní bod s látkou, bude \mathbf{v} rychlost kontinua vzhledem k soustavě souřadnic.

Člen $\mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T$ bude u indukčních ohřevů pevných látek uplatněn především u kontinuálního ohřevu (např. dlouhá tyč, která projíždí krátkým induktorem). V těch aplikacích, ve kterých dochází k ohřevu tělesa nepohyblivého vzhledem k induktoru, položíme vždy $\mathbf{v} = 0$ a navíc úplnou derivaci teploty podle času nahradíme derivací parciální.

Q_0 v rovnici (4.1) označuje objemovou hustotu tepelné energie, která v daném bodě vznikne za jednotku času, přičemž vznikem tepelné energie myslíme přeměnu energie na tepelnou energii z jakékoli jiné formy energie. V modelech indukčních ohřevů nahradíme obvykle Q_0 pouze Jouleovým teplem w_J .

Pro teplotní pole modelů indukčních ohřevů můžeme tedy psát Fourierovu rovnici ve tvaru:

$$-\operatorname{div} \lambda \operatorname{grad} T + \rho_h c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_h c \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} T = w_J \quad (4.3)$$

Zbývá dodat, že podle toho, jestli v rovnici (4.3) můžeme zanedbat časovou derivaci, dělíme i teplotní pole na stacionární a nestacionární.

4.1 Podmínky na rozhraní

Je důležité zmínit fakt, že podmínky na dokonale tepelně vodivém rozhraní dvou materiálů, které mají různé materiálové parametry, vyjadřují, že teploty na obou stranách rozhraní jsou stejné a také že rozdíl toků energie k rozhraní a od rozhraní je roven plošné hustotě energie vznikající na rozhraní za jednotku času.

$$\begin{aligned} T_1 &= T_2 \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} &= q \end{aligned} \quad (4.4)$$

kde \mathbf{n} ... je jednotkový normálový vektor mající směr do prostředí 2

q ... je plošná hustota energie vznikající na rozhraní za jednotku času [W/m²]
(tepelný tok)

Na ose symetrie bude potom platit:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (4.5)$$

Jestliže bude mít rozhraní konečnou vodivost λ a nebude na něm vznikat tepelná energie, pak pro toto rozhraní budou platit následující podmínky:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} &= \alpha(T_2 - T_1) \\ \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

Kde α ... je součinitel přestupu tepla prouděním [W/m²K].

4.2 Okrajové podmínky

1) Dirichletova okrajová podmínka

Dirichletova okrajová podmínka bude ve tvaru:

$$T(\Gamma, t) = T_r(\Gamma, t) \quad (4.7)$$

Podmínku aplikujeme tam, kde předem známe hodnotu teploty na hranici Γ .

2) Neumannova okrajová podmínka

Neumannova okrajová podmínka je vyjádřena rovnicí:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n}(\Gamma, t) = f_0(\Gamma, t) \quad (4.8)$$

Tuto podmínku užijeme tam, kde předem známe velikost toku energie přes hranici Γ . Často se například tato podmínka zadává na osách symetrie, na kterých je nulový tok přes hranici.

3) Newtonova okrajová podmínka

Newtonovu okrajovou podmínku vyjadřuje vztah:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_{\text{gas}} - T) \quad (4.9)$$

Newtonovu podmínku užijeme při modelování konvekce. Používá se na rozhraní pevné fáze s kapalinou či plynem.

Součinitel přestupu tepla prouděním α je funkcí geometrie a vlastností povrchu pevného tělesa, dále vlastností kapaliny, a to především viskozity, rychlosti, způsobu proudění a samozřejmě tepelných vlastností kapaliny, přičemž v matematických modelech je často nutno respektovat teplotní závislost $\alpha(T)$. U indukčních ohřevů se přestup tepla prouděním významně uplatní při nižších teplotách, tedy přibližně do 500°C.

4) Okrajové podmínky IV. druhu

Okrajovými podmínkami IV. druhu bývají obvykle označeny podmínky respektující přestup tepla radiací (zářením).

Stefan-Boltzmannův zákon vyjadřuje, že tepelný tok odváděný radiací je úměrný rozdílu čtvrtých mocnic teplot povrchu tělesa a okolí a konstantě radiačních ztrát C . Konstanta C zahrnuje vliv geometrie tělesa a vlastností povrchu. Uveďme si názorný příklad s lesklostí povrchu sledovaného materiálu - leštěný kov bude vyzařovat do okolí méně energie, než neleštěný materiál. Konstanta C se obvykle vyjadřuje jako součin emisivity ε a Stefan-Boltzmannovy konstanty σ . Okrajová podmínka pak má tvar.

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \sigma \varepsilon (T_{\text{ext}}^4 - T^4) = C(T_{\text{ext}}^4 - T^4), \quad (4.10)$$

kde σ ... Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

ε ... emisivita [-]

Přestup tepla radiací nemůžeme zanedbat především při vyšších teplotách. Je důležité si uvědomit, že u indukčních ohřevů, jako jsou například ohřevy pro kalení, ohříváme těleso z nízkých na relativně vysoké teploty. Je proto zapotřebí respektovat přestup tepla jak konvekcí, tak radiací. Okrajová podmínka bude mít potom tvar:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_{\text{gas}} - T) + \sigma\varepsilon(T_{\text{ext}}^4 - T^4) \quad (4.11)$$

5) Podmínky periodicity a antiperiodicity

Podmínky periodicity a antiperiodicity se u teplotních modelů rovněž vyskytují. Jejich použití i tvary jsou stejné jako u pole elektromagnetického.

4.3 Počáteční podmínka

U nestacionárního teplotního pole musíme zadat počáteční podmínku:

$$T(\Omega, t = 0) = T_0, \quad (4.12)$$

kde T_0 ... je počáteční rozložení teploty v oblasti Ω .

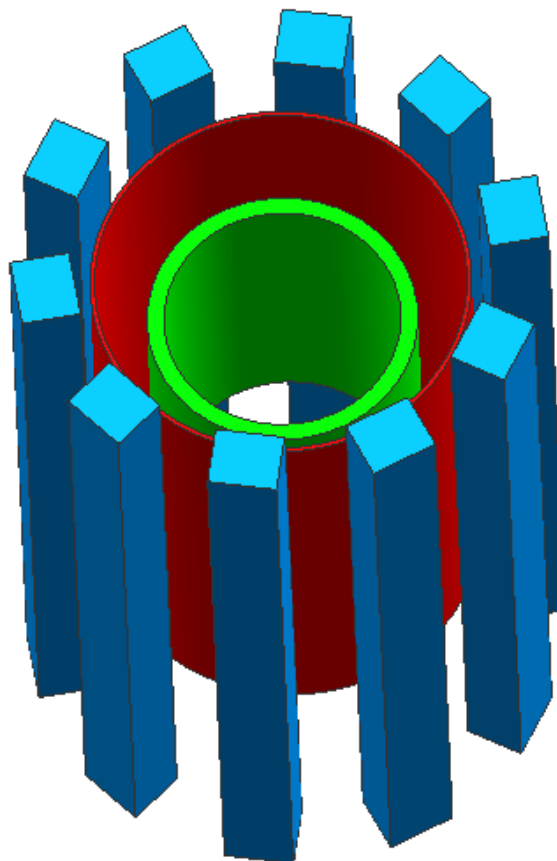
Pakliže ohříváme těleso z ustálené teploty, zadáváme tuto podmínku obvykle homogenní a rovnou teplotě okolí. Mnohdy však je tato podmínka nehomogenní a daná rozložením teploty na konci předcházejícího technologického procesu.

5 Nový fyzikální laboratorní model indukčního zařízení

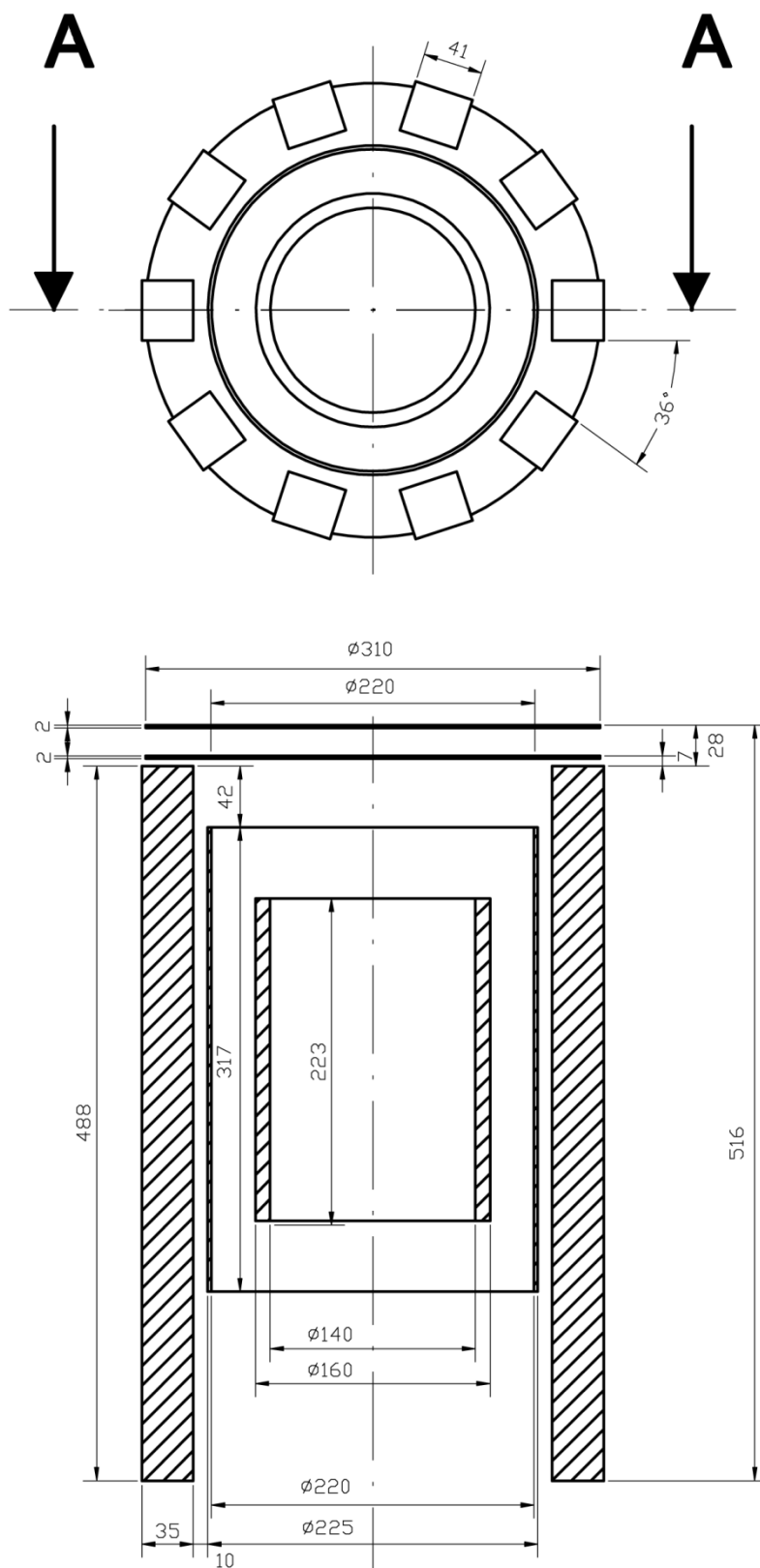
Vytvořil jsem nový fyzikální laboratorní model indukčního zařízení, který poměrem rozměrů induktoru při napájení proudem o vysoké frekvenci odpovídá reálné indukční kelímkové peci v průmyslovém podniku. Zařízení se skládá z částí, které budou popsány v následujícím textu.

5.1 Popis jednotlivých konstrukčních částí zkoumaného modelu

Základní částí nového laboratorního modelu je induktor (viz Obrázek 5.1 a Obrázek 5.2) s napájecím proudem o síťovém nebo vysokém kmitočtu podle zvoleného napájecího zdroje. Další části indukčního zařízení již volím dle momentální potřebné geometrie zařízení a jedná se o stínění svazky transformátorových plechů, válcovou dutou magnetickou vsázkou a různé přídatné konstrukční prvky.



Obrázek 5.1: 3D model nového laboratorního indukčního zařízení v konfiguraci induktor (červená), stínění svazky transformátorových plechů (modrá), válcová magnetická dutá vsázka (zelená)

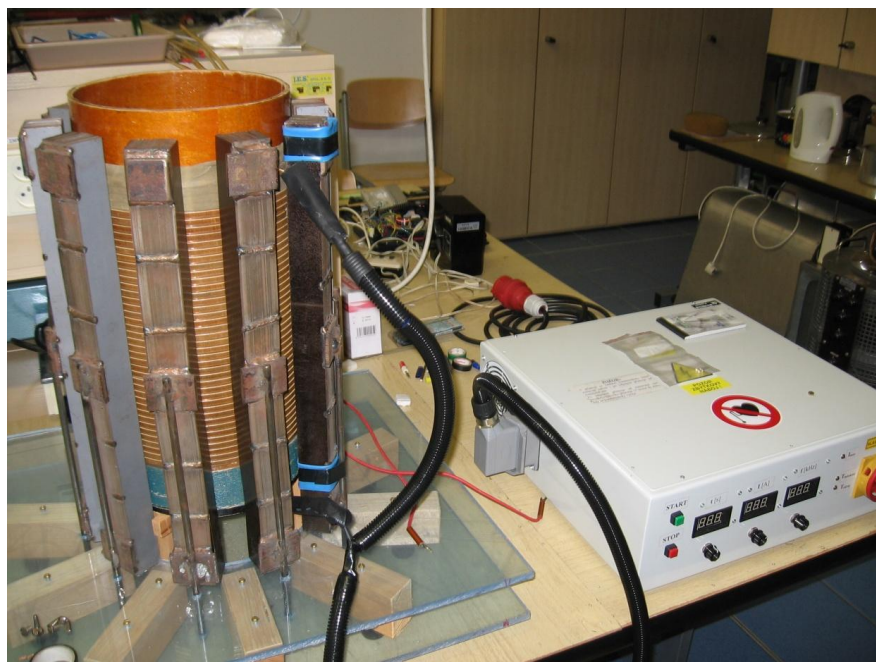


ŘEZ A-A

Obrázek 5.2: 2D výkres nového fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení

5.1.1 Induktor

Induktor z měděného vodiče obdélníkového průřezu (viz Tabulka 5.2) je vinut na válci z elektricky nevodivého tvrzeného papíru Obrázek 5.3. Válec z tvrzeného papíru je umístěna na dřevěné konstrukci, která vlastně reprezentuje podstavec sloužící nejen pro vystředění induktoru, ale i k umístění válcového magnetického nebo nemagnetického modelu vsázky. Induktor má vně vyvedeny svorky, ke kterým je možné připojit zvolený zdroj pomocí šroubového spojení s mosaznými šrouby a matkami, jinak by docházelo k tepelným ztrátám ve šroubech z magnetického materiálu. Geometrické rozměry induktoru jsou uvedeny v Tabulka 5.1.



Obrázek 5.3: Nový fyzikální laboratorní model indukčního zařízení v konfiguraci induktor se stíněním svazky transformátorových plechů (vlevo) připojený na nový vysokofrekvenční pulzní zdroj (vpravo)

Tabulka 5.1: Geometrické rozměry induktoru

Výška induktoru	317 mm
Vnější průměr induktoru	225 mm
Vnitřní průměr induktoru	220 mm
Počet závitů	42

Tabulka 5.2: Geometrické rozměry vodiče induktoru

tloušťka	2,5 mm
Výška	6,7 mm

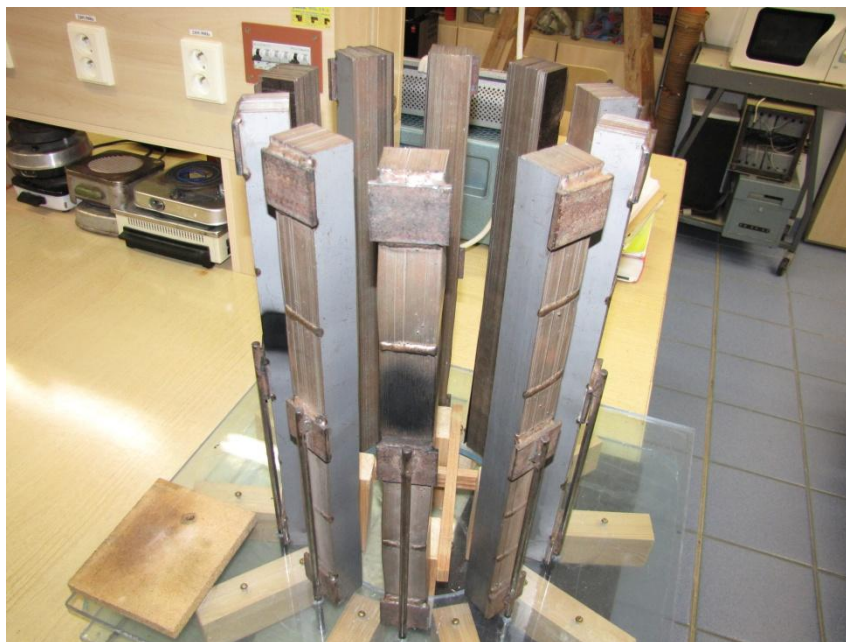
5.1.2 Stínění svazky transformátorových plechů

Stínění tvoří deset svazků transformátorových plechů (viz Obrázek 5.1, Obrázek 5.2 a Obrázek 5.4), jejichž materiálem jsou orientované plechy válcované za studena jednotlivě odizolované barvou a izolačním bezbarvým lakem. Všechny deset svazků tvaru kvádru (viz Tabulka 5.3) je pravidelně rozmístěno po vnějším obvodu induktoru a z důvodu izolační jistoty je vzdálenost přilehlých stěn svazků od vnějšího povrchu vodičů induktoru pevně fixována polystyrénovou vložkou na 10 mm.

Přesahy stínících svazků jsou vůči induktoru 129 mm ve spodní části pod induktorem a 42 mm v horní části modelu nad induktorem.

Tabulka 5.3: Geometrické rozměry stínícího svazku

Tloušťka stínícího svazku	35 mm
Šířka stínícího svazku	41 mm
Výška stínícího svazku	488 mm



Obrázek 5.4: Stínící svazky vytvořené z transformátorových plechů

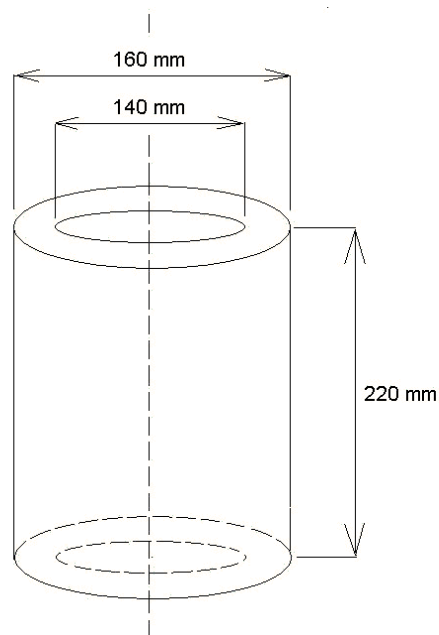
5.1.3 Vsázka

Aby bylo možné realizovat ohřev materiálu na novém modelu indukčního zařízení, nechal jsem zhotovit válcovou magnetickou dutou vsázku odpovídající svými rozměry s ohledem na velikost mého induktoru a použitou vysokou frekvenci jeho napájecího proudu rozměrům reálné průmyslové válcové vsázky indukční kelímkové pece. Vsázka je znázorněna na Obrázek 5.1, Obrázek 5.2, přičemž je zachováno měřítko a umístění v novém modelu

indukčního zařízení. Samotnou vsázku ukazují na Obrázek 5.6 a pracovním nákresem na Obrázek 5.5. Materiálem vsázky je magnetická měkká ocel s obsahem uhlíku menším než 0,2 %. Vnější a vnitřní válcová stěna mají vroubkovaný matný tmavě fialový povrch. Zabarvení vzniklo oxidací během prvního ohřevu na 250 °C. Horní a dolní stěna dutého válce má hladký matný kovový povrch.

Tabulka 5.4: Geometrické rozměry vsázky

Výška vsázky	220 mm
Vnější průměr vsázky	160 mm
Vnitřní průměr vsázky	140 mm



Obrázek 5.5: Pracovní náčrt magnetické válcové duté vsázky



Obrázek 5.6: Magnetická válcová dutá vsázka s černými matnými kruhy určenými k měření teploty na povrchu vsázky optickým pyrometrem při známé emisivitě ε [-]

5.1.4 Přídavné konstrukční prvky

Použité prvky různého typu, tvaru a materiálu jsem pro účely tohoto měření umístil 10 mm nad horním koncem stínícího svazku (viz Obrázek 5.16). Fixaci prvku v dané poloze jsem dosáhl buď polystyrenovými vložkami nebo samovolně, tj. samotná fixace v měřicí desce plynoucí z tvaru zkoumaného prvku již postačovala a nebylo nutné již prvek sekundárně jistit v zamýšlené poloze přídavným upevňováním. Zkoumané prvky znázorňuje Obrázek 5.7. Geometrické rozměry, které jednoznačně identifikují konkrétní prvek, jsou přehledně zobrazeny v tabulkách níže. Přídavné konstrukční prvky, které představují závit nakrátko (Kapitola 5.1.4.1 - 5.1.4.4), mám k dispozici v uzavřené i otevřené variantě, jak jsem naznačil dále.



Obrázek 5.7: Nové přídavné konstrukční prvky – 1. řada zleva (nahore): dva měděné závitky uzavřené, měděný trubkový dutý vodič uzavřený, měděný trubkový dutý vodič otevřený, 2. řada zleva (dole): plochý měděný prstenec otevřený s vyřízlou výsečí, dva měděné závitky otevřené, plný vodič se šroubovým spojem uzavřený

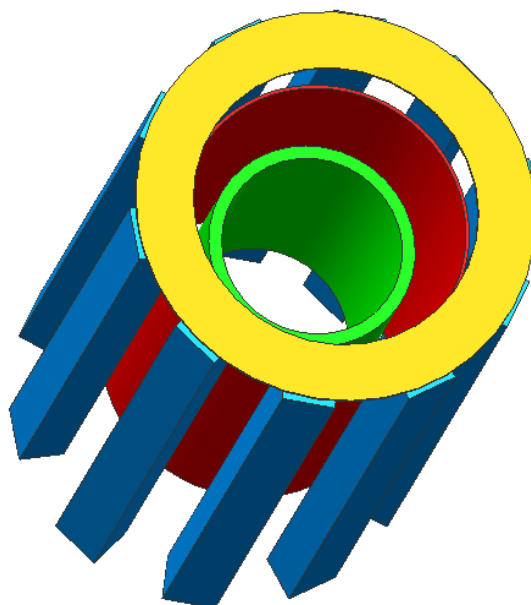
5.1.4.1 Plochý měděný prstenec (plochý kruh nakrátko)

Otevřený plochý měděný prstenec (viz Obrázek 5.9) jsem vytvořil vyříznutím výseče 40° z uzavřeného měděného prstence (viz Obrázek 5.8). Uzavřený prstenec jsem potom

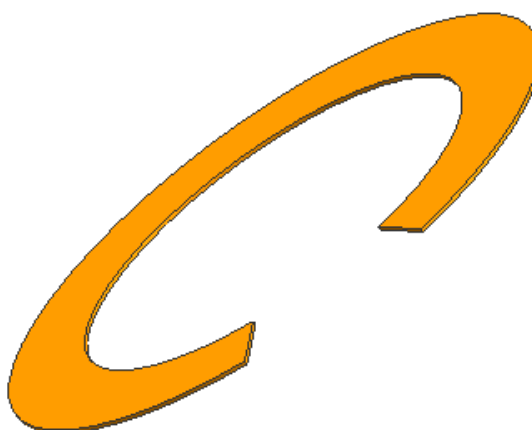
opětovně vytvořil upevněním původně vyříznuté výseče (Obrázek 5.7) pájeným spojem pomocí pájky, elektrického vaříče a cínu.

Tabulka 5.5: Geometrické rozměry plochého měděného prstence

Výška	2 mm
Vnější průměr	310 mm
Vnitřní průměr	220 mm



Obrázek 5.8: Uzavřený plochý měděný prstenc umístěný na novém fyzikálním laboratorním modelu indukčního zařízení v konfiguraci vsázka, induktor, stínění, prstenc (pohled shora)



Obrázek 5.9: Otevřený plochý měděný prstenc

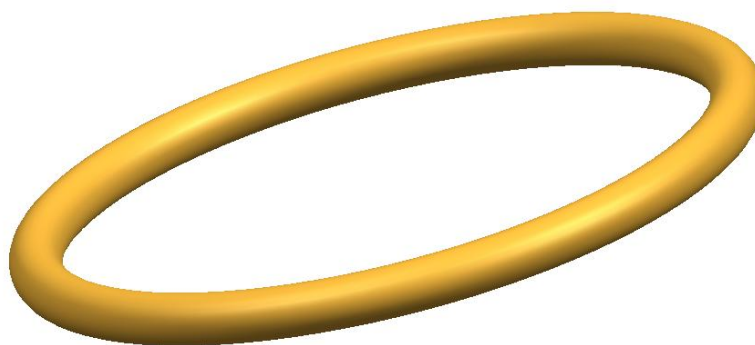
5.1.4.2 Měděný trubkový dutý vodič

Měděné trubkové vodiče mám k dispozici celkem tři. Jeden jsem nechal trvale uzavřený (viz Obrázek 5.10), kdy konce trubky jsem k sobě spojil pájkou, druhý je trvale

otevřený a poslední je uzavřený pomocí krátké elektricky vodivé spojky upevněné na konce trubky pomocí cínu, kdy spojku mohu kdykoli odstranit při zahřátí spoje.

Tabulka 5.6: Geometrické rozměry měděného trubkového dutého vodiče

Tloušťka stěny	2 mm
Průměr trubky	20,9 mm
Vnitřní průměr	245 mm



Obrázek 5.10: Měděný trubkový dutý vodič

5.1.4.3 Hliníkový plný lanový vodič

Uzavřený hliníkový plný lanový vodič je rovněž rozpojitelný pomocí koncovek a šroubového spoje (viz Obrázek 5.11).

Tabulka 5.7: Geometrické rozměry hliníkového plného lanového vodiče

Průměr závitu	14,8 mm
Vnitřní průměr	240 mm



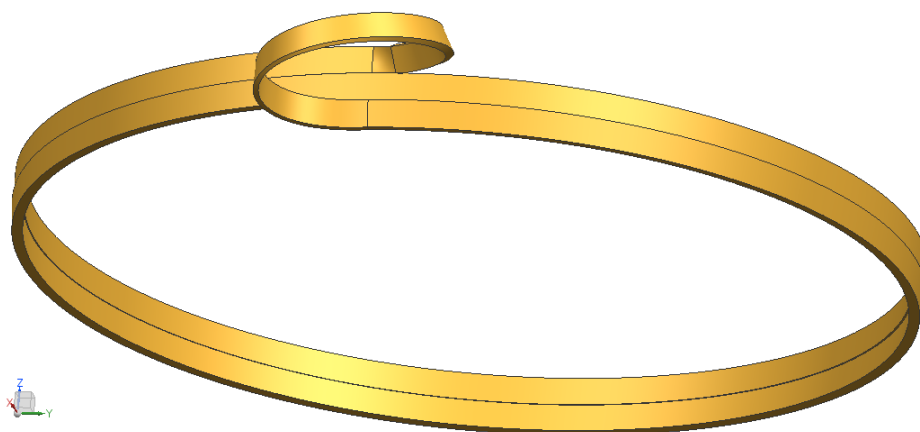
Obrázek 5.11: Hliníkový plný lanový vodič

5.1.4.4 Dva měděné závity umístěné těsně nad sebou

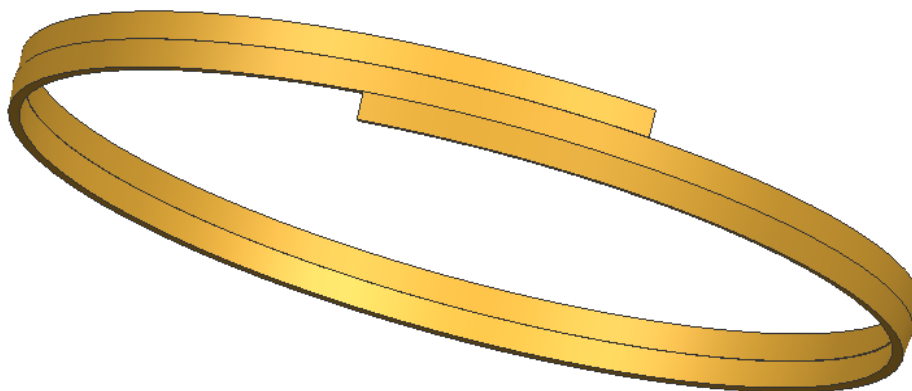
Dva měděné závity mám k dispozici jak v uzavřené (viz Obrázek 5.12) tak v otevřené (viz Obrázek 5.13) verzi.

Tabulka 5.8: Geometrické rozměry dvou měděných závitů

Výška závitu	6,7 mm
Tloušťka závitu	2,7 mm
Vnitřní průměr	221 mm



Obrázek 5.12: Dva měděné závity uzavřené

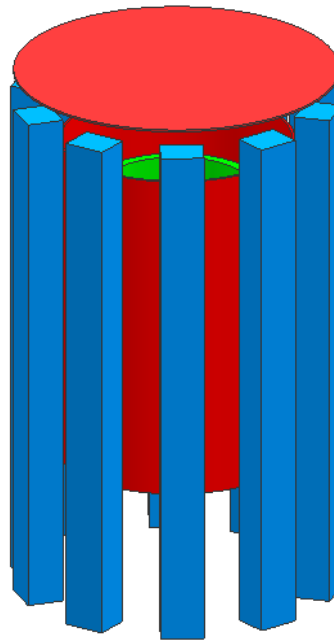


Obrázek 5.13: Dva měděné závity otevřené

5.1.4.5 Kruhová měděná deska

Tabulka 5.9: Geometrické rozměry kruhové měděné desky

Výška	2 mm
Průměr	310 mm



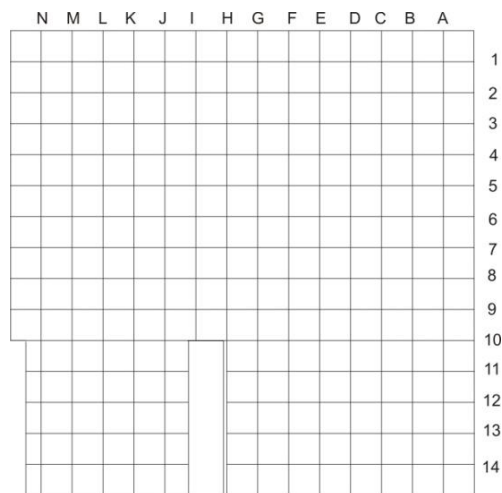
Obrázek 5.14: Kruhová měděná deska umístěná na novém modelu indukčního zařízení

5.1.5 Měřicí deska

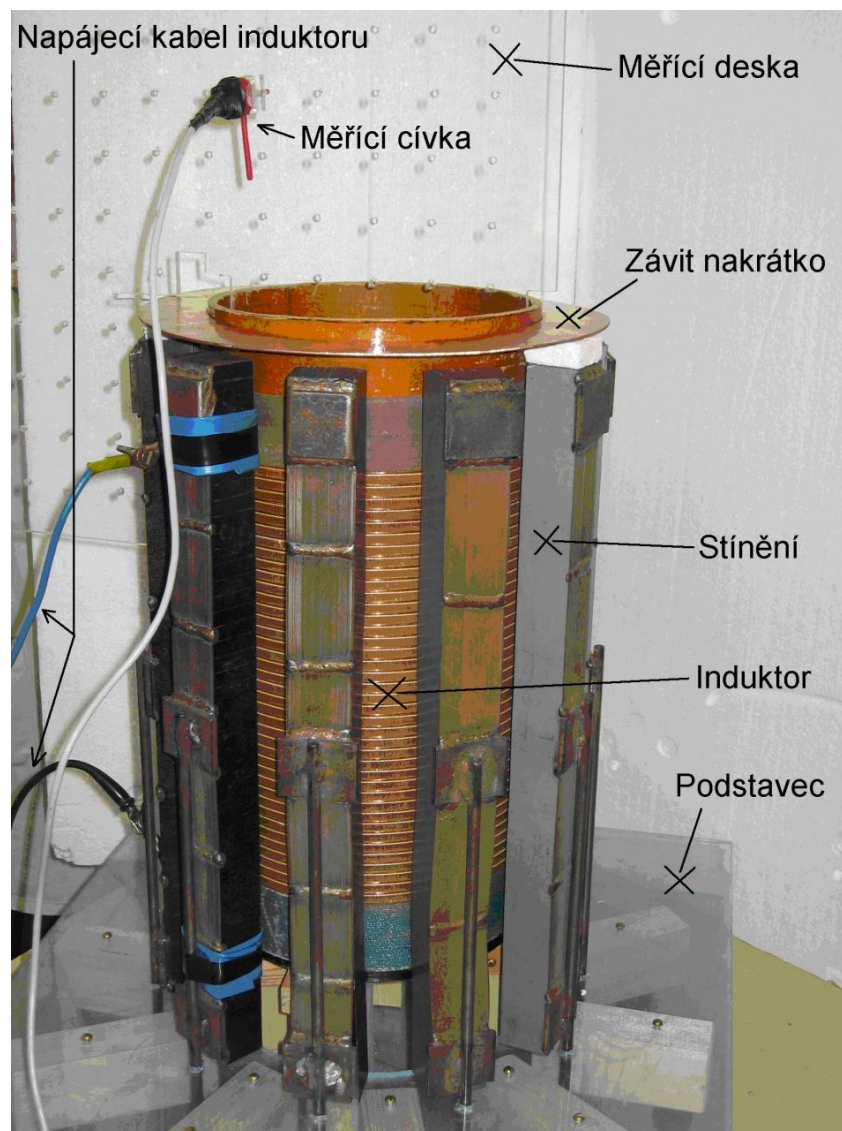
Měřicí deska slouží pro dočasnou pevnou fixaci měřicí cívky malého průměru při měření intenzity magnetického pole rozptylového magnetického toku v okolí zkoumaného indukčního zařízení. Měřicí cívku zasouvám při měření do otvorů v desce o průměru 4 mm, který se shoduje s průměrem upevňující tyčinky, která je součástí měřicí cívky. Každý otvor představuje zároveň jeden měřený bod měřené sítě (viz. Obrázek 5.15). Sousední otvory mají osovou vzdálenost 40 mm. Měřenou síť jsem označil písmeny ve sloupcích a čísly v řadách. Celou měřicí desku potom zasunu do dutiny induktoru a deska v ní je upevněna pomocí dvou vyřezaných mezer, jak je názorně vidět v Obrázek 5.16. Desku jsem vyrobil z průhledného plexiskla a má tvar čtverce o délce strany 600 mm.

Pro vyhodnocení vlivu použitých prvků jsou důležitá tato geometrická srovnání:

1. Poloha sloupce L je shodná s axiální osou z induktoru.
2. Spodní okrajová hrana desky (= fiktivní řada 15 viz Obrázek 5.15) představuje radiální osu r induktoru
3. Řada 1 se nachází ve výšce 440 mm nad horním koncem induktoru
4. Řada 12 se nachází ve výšce horního konce induktoru.
5. Přídavný konstrukční prvek se nachází v oblasti mezi řadami 10 a 11 a v závislosti na typu prvku a jeho geometrických rozměrech mezi sloupci I až G



Obrázek 5.15: Nárys měřicí desky [19]



Obrázek 5.16: Nový fyzikální model indukčního zařízení (celkový pohled) – induktor, stínění svazky transformátorových plechů, přídatný konstrukční prvek – plochý měděný prstenec (závit nakrátko), měřicí cívka pro měření indukovaného napětí v rozptylovém elektromagnetickém poli kolem zkoumaného indukčního zařízení.

5.2 Analytický výpočet intenzity magnetického pole H prázdného induktoru [4]

Pro kontrolu změřených nebo simulovaných hodnot a pro získání představy o velikosti intenzity magnetického pole H v dutině uvnitř induktoru mohu provést jednoduchý analytický výpočet pro napájecí proud induktoru o velikosti 15 A. V tomto výpočtu vycházím z hodnoty vlastní indukčnosti L laboratorního induktoru spočtené na základě geometrických rozměrů a počtu závitů induktoru (viz Tabulka 5.1):

$$L = \mu_0 \mu_r \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \frac{N^2}{l} \alpha = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,22}{2}\right)^2 \frac{42^2}{0,317} \cdot 0,761 = 202,288 \mu\text{H} \quad (5.1)$$

Měřením jsem pro samotný induktor změřil hodnotu vlastní indukčnosti $L = 205,7 \mu\text{H}$.

Z hodnoty vlastní indukčnosti induktoru L nyní určím maximální hodnotu magnetického toku ϕ_{\max} .

$$\psi_{\max} = N \cdot \phi_{\max} = L \cdot I \cdot \sqrt{2} \quad (5.2)$$

Odtud ϕ_{\max} :

$$\phi_{\max} = \frac{L}{N} \cdot I \cdot \sqrt{2} = \frac{202,288 \cdot 10^{-6}}{42} \cdot 15 \cdot \sqrt{2} = 102,171 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} \quad (5.3)$$

Požadovanou hodnotu H_{\max} získám úpravou vzorce $\phi_{\max} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H_{\max} \cdot S$:

$$H_{\max} = \frac{\phi_{\max}}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \pi \cdot r^2} \quad (5.4)$$

$$H_{\max} = \frac{102,171 \cdot 10^{-6}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \pi \cdot 0,11^2} = 2138,861 \text{ A/m}$$

Nyní spočítám efektivní hodnotu intenzity magnetického pole H prázdného induktoru:

$$H_{\text{ef}} = \frac{H_{\max}}{\sqrt{2}} = 1512,403 \text{ A/m}$$

Druhým způsobem analytického výpočtu je výpočet přímo přes intenzitu magnetického pole H . Pokud jsou rozměry induktoru nesrovnatelně menší vzhledem k vlnové délce:

$$\lambda_{50} = \frac{v}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{50} = 6000 \text{ km} \quad (5.5)$$

(resp. $\lambda_{4100} = 73,17 \text{ km}$, $\lambda_{10000} = 30 \text{ km}$) $\rightarrow r \ll \lambda \dots$ v mém případě je tato podmínka splněna, lze tedy intenzitu magnetického pole určit pomocí elementárního vzorce:

$$\underline{H}_0 = H_0 = N_1 \cdot I_1 \quad (5.6)$$

Magnetické pole uvnitř induktoru je homogenní.

V mém případě je počet závitů cívky $N = 42$ a proud tekoucí závitěm je 15 A. Přepočtu počet závitů N na počet závitů osově délky N_1 takto:

$$N_1 = \frac{N}{l} = \frac{42}{0,317} = 132,492 \text{ m}^{-1} \quad (5.7)$$

$$\underline{H}_0 = H_0 = N_1 \cdot I_1 = 132,49 \cdot 15 = 1987,382 \text{ A/m}$$

Efektivní hodnota intenzity magnetického pole H v dutině induktoru se rovná $H_0 = 1987,382 \text{ A/m}$ a její průběh je tedy konstantní.

Nyní formou tabulky (Tabulka 5.10) znázorním vypočtené efektivní hodnoty intenzity magnetického pole H pro tři hlavní mnou uvažované napájecí proudy induktoru 15 A, 23 A a 31 A pro obě metody.

Tabulka 5.10: Efektivní hodnoty intenzity magnetického pole H vypočtené analytickým výpočtem oběma způsoby uvedenými výše pro různé proudy

Vypočtené hodnoty H_{ef} pro různé proudy			
Proud I_{ef} [A]	Metoda	Výsledek H	Jednotka
15	L	1512,403	A/m
15	H	1987,382	A/m
23	L	2319,015	A/m
23	H	3047,319	A/m
31	L	3125,629	A/m
31	H	4107,256	A/m

6 Nová měřicí cívka pro zjištění rozložení intenzity magnetického pole H v okolí zkoumaného indukčního zařízení

Tato kapitola popisuje mnou nově zkonstruovanou speciální měřicí cívku určenou k identifikaci elektromagnetického pole se síťovým a vysokým kmitočtem. V oblasti indukčních ohřevů tuto cívku používám k určování intenzity magnetického pole H ve zvoleném bodě v okolí libovolného indukčního zařízení prostřednictvím změřených indukovaných elektrických napětí v této cívce. Indukovaná napětí poté elementárními vzorci pře počítám na hodnotu intenzity magnetického pole H . Takto můžu určit složky intenzity magnetického pole odpovídající směrům souřadných os zvoleného systému. Příkladem praktické aplikace zařízení je zde v mém případě zjištění velikosti intenzity magnetického pole v libovolném bodě okolí válcového induktoru napájeného harmonickým proudem se síťovým kmitočtem.

6.1 Zdůvodnění konstrukce nové měřicí cívky

V rámci této práce se zabývám možnostmi zvýšení účinnosti indukčního ohřevu. Zaměřuji se zde na možnost použití nových konstrukčních prvků ovlivňujících aktivní elektromagnetické pole induktoru. Rozhodl jsem se zvolit metodu fyzikálního modelování a numerické simulace. K tomuto účelu jsem zkonstruoval nový laboratorní model indukčního zařízení s novými přídavnými konstrukčními prvky (viz Kapitola 5). Jejich vliv na průběh elektromagnetického pole sleduji měřením, analytickým výpočtem a počítačovou simulací. Jako bezproblémové by se jevílo na první pohled měření speciální měřicí indukční sondou, která je součástí kompaktního přenosného zařízení. Tento přístroj lze s výhodou použít pro měření magnetické indukce v okolí zkoumaného indukčního zařízení napájeného střídavým proudem s nízkou nebo vysokou frekvencí. Nevýhodou indukční sondy (Obrázek 6.1) je kulová měřicí hlavice s průměrem o velikosti 125 mm, který je příliš velký a neumožňuje měřit intenzitu magnetického pole v bodech zvolené měřicí roviny se vzájemnou vzdáleností menší než je uvedený průměr. Dále u měřicích cívek, které slouží pro měření naindukovaných napětí při vysokém kmitočtu, je vhodné optimalizovat a nalézt vhodný počet závitů a průměr vodiče cívky. Na základě předchozích experimentálních zkušeností jsem se rozhodl pro konstrukci vlastního měřicího zařízení, jehož základem je cívka malého průměru s vhodným počtem závitů (Tabulka 6.2).

6.2 Indukční sonda a nová měřicí cívka

Indukční sondu tvoří kulová měřicí hlavice a vlastní tělo indukční sondy, které obsahuje digitální měřicí výpočetní jednotku (viz Obrázek 6.1).



Obrázek 6.1: Indukční sonda ELT 400

Indukční sonda od firmy Narda Safety Test solution GmbH se používá k praktickým měřením indukce magnetického pole B [T], jedná se o typ přístroje ELT 400, BN 2304. Nejistota měření použité indukční sondy je $\pm 4\%$ (od 50 Hz do 120kHz). Pro měření se používají různé režimy (viz Tabulka 6.1).

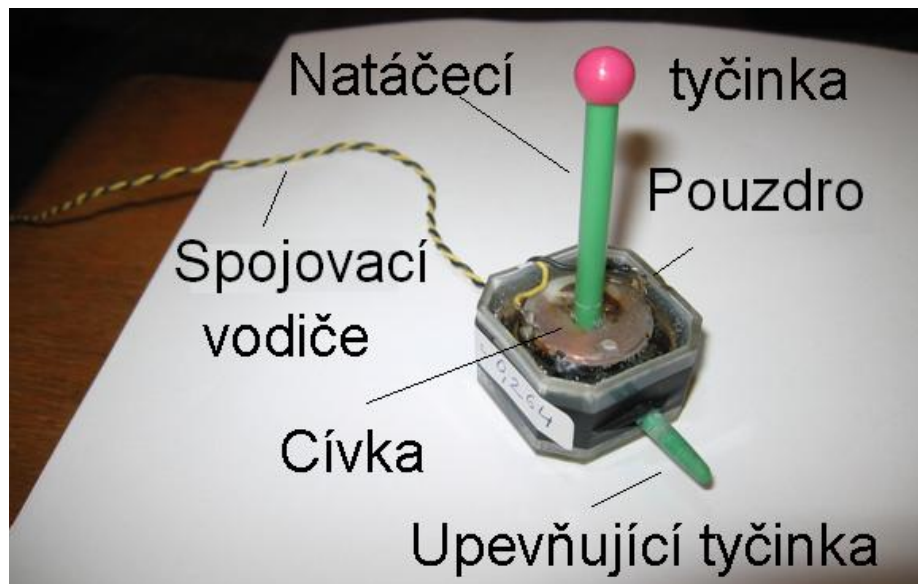
Tabulka 6.1: Režimy indukční sondy ELT 400

Aplikace	Charakteristiky
Magnetické míchání roztavených kovů	velmi silná pole, nízké frekvence
V domácnosti	slabá pole 50 (60) Hz
Indukční ohřev / tavení	velmi silná pole, 50 Hz – 20 kHz
Žihání	velmi silná pole, 10 kHz – 30 kHz
Odporové a bodové svařování	50 Hz, pulzní
Středofrekvenční svařování	pulzní frekvenční měnič

Měřicí hlavice uvedené sondy sestává z měřicí jednotky a elektricky nevodivého plastového ochranného kulového pouzdra. Měřicí jednotku potom tvoří tři pevně fixované měřicí cívky uspořádané tak, aby měřily naindukovaná napětí ve třech směrech souřadného systému. Výpočetní jednotka umístěná v těle sondy přepočítává indukovaná napětí na hodnotu výsledné magnetické indukce pomocí známých vztahů (6.1). Poslední vzorec nám demonstruje přepočítání velikosti magnetické indukce B na velikost intenzity magnetického pole H [4], [13] a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Intenzita magnetického pole H zde probíhá elektricky nevodivém prostředí s $\mu_r = 1$.

$$\begin{aligned}
 B &= k \frac{U_{ef}}{4,44 f} [T] \\
 B_{rad} &= k \frac{U_{rad}}{4,44 f} [T] \\
 B_{ax} &= k \frac{U_{ax}}{4,44 f} [T] \\
 B_{tg} &= k \frac{U_{tg}}{4,44 f} [T] \\
 B &= \sqrt{B_{rad}^2 + B_{ax}^2 + B_{tg}^2} [T] \\
 B = \mu_0 H &\Rightarrow H = \frac{B}{\mu_0} [A.m^{-1}]
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

6.3 Nová měřicí cívka malého průměru



Obrázek 6.2: Nová měřicí cívka

V porovnání s měřicí sondou používám pouze jednu měřicí cívku (Obrázek 6.2), kterou natáčím a zároveň fixuji v měřicí desce (Obrázek 5.15) tak, aby postupně umožňovala měřit indukovaná napětí ve směrech souřadných os. Pomocí nové měřicí cívky malého průměru umím jednoduše identifikovat indukované napětí do této cívky v daném bodě například v axiálním a radiálním směru rotačně symetrického válcového indukčního zařízení pouze jejím natočením do požadovaného směru. Pomocí uvedených vztahů (6.1) dále převedu tato napětí na složky magnetické indukce, určím výslednou indukci geometrickým součtem obou složek a z ní vypočítám hledanou intenzitu magnetického pole H . Výpočet zde provádím zcela analogicky jako probíhá u indukční sondy. Pozici měřicí cívky fixuji v plastové měřicí desce se zakreslenou geometrickou sítí (Obrázek 5.15) pomocí zasunutí upevňující tyčinky

(Obrázek 6.2) do otvorů měřicí desky, které představují měřené body. U sledovaného modelu indukčního zařízení předpokládám, že vsázka je vystavena účinkům podélného elektromagnetického pole, a proto lze také v souvislosti s rotačně symetrickým uspořádáním složku závislou na úhlu natočení na daném poloměru a dané výšce považovat za konstantní a pro malou hodnotu zanedbat.

Vlastní měřicí cívka malého průměru sestává z cívky vinuté z tenkého vodiče a umělohmotného průhledného pouzdra, ve kterém je cívka umístěna (Obrázek 6.2, Tabulka 6.2).

Tabulka 6.2: Parametry měřicí cívky

Parametry měřicí cívky	
Vnější průměr	20 [mm]
Vnitřní průměr	9 [mm]
Výška	13 [mm]
Počet závitů	21000 [-]
Hmotnost	24 [g]
Průměr Cu vodiče	0,050 [mm]

6.4 Určení konstanty k nové měřicí cívky

Abych mohl přepočítat indukované napětí na intenzitu magnetického pole pomocí známých vzorců (6.1), musím nejprve provést kalibraci měřicí cívky s cílem zjištění konstanty k této cívky. K tomu jsem použil měřicí obvod, jehož základem je válcový dlouhý solenoid (rozměry viz Tabulka 6.3), do jehož středu byla umístěna měřicí cívka [16], [17].

Tabulka 6.3: Parametry kalibračního solenoidu

Parametry solenoidu	
Vnější průměr	114 [mm]
Vnitřní průměr	110 [mm]
Délka	1000 [mm]
Počet závitů	530 [-]
Průměr Cu vodiče	2 [mm] (s izolací)
Označení	EU 409

Konstanta mojí měřicí cívky stanovená kalibrací je $k = 0,264$. Další možností zjištění konstanty k je výpočet (6.2). Pro vícevrstvé vinutí měřicí cívky nelze přesně spočítat náhradní plochu cívky A nutnou k výpočtu konstanty měřicí cívky. Hodnotu konstanty k umím s omezenou přesností spočítat dvěma způsoby pomocí níže uvedených vztahů [18].

2 způsoby výpočtu konstanty měřicí cívky k :

Parametry měřicí cívky nutné k výpočtu:

N ...počet závitů cívky [-]

A ...náhradní plocha cívky [m^2]

d_2 ...vnější průměr cívky [m]

d_1 ...vnitřní průměr cívky [m]

$$k = \frac{1}{NA}, \quad (6.2)$$

kde k ... je konstanta měřicí cívky [$1/\text{m}^2$].

1. Výpočet k , kde parametr A je s omezenou přesností vypočten pomocí střední hodnoty průměrů cívky D_m :

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{NA} = \frac{1}{21000\pi\left(\frac{D_m}{2}\right)^2} = \\ &= \frac{1}{21000\pi\left(\frac{d_2 + d_1}{4}\right)^2} = \\ &= \frac{1}{21000\pi\left(\frac{0,02 + 0,009}{4}\right)^2} = \\ &= 0,288 \end{aligned} \quad (6.3)$$

2. Výpočet k , kde parametr A je vypočten pomocí věty o střední hodnotě integrálního počtu rovněž s omezenou přesností:

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{NA} = \frac{1}{21000 \frac{\pi}{4} \frac{1}{d_2 - d_1} \int_{d_1}^{d_2} y^2 dy} = \\ &= \frac{1}{21000 \frac{\pi}{12} \left[\frac{d_2^3 - d_1^3}{d_2 - d_1} \right]} = \\ &= \frac{1}{21000 \frac{\pi}{12} [d_2^2 + d_2 d_1 + d_1^2]} = \\ &= \frac{1}{21000 \frac{\pi}{12} [0,02^2 + 0,02 \cdot 0,009 + 0,009^2]} = \\ &= \frac{1}{21000 \cdot 17,305 \cdot 10^{-5}} = 0,275 \end{aligned} \quad (6.4)$$

Určení k cejchováním (kalibrací, tj. měřením) [16]: $k = 0,264$

Tabulka 6.4: Způsoby určení konstanty měřicí cívky k

Způsob určení k	Výsledek
Výpočet (3)	$k = 0,288$
Výpočet (4)	$k = 0,275$
Měření	$k = 0,264$
Zvolená hodnota k ve vzorci (6.1)	$k = 0,264$ (měření)

6.5 Stručný popis výrobního postupu

Vlastní měřicí cívka malého průměru sestává z cívky vinuté z tenkého vodiče a umělohmotného průhledného pouzdra, ve kterém je cívka umístěna (Obrázek 6.2). Na dno pouzdra jsem nejprve nalepil vteřinovým lepidlem umělohmotnou podložku o tloušťce 2 mm, která umožní zdvih a vystředění cívky tak, aby její kontakty zasahovaly nad vrchní okraj pouzdra a umožnily připojení spojovacích vodičů. Kolmo na axiální osu cívky ve směru její radiální osy jsem umístil upevňující umělohmotnou tyčinku, která umožňuje umístění cívky do otvorů měřicí desky, které představují měřicí body. Tato upevňující tyčinka má průměr shodný s průměrem otvoru v měřicí desce (4 mm). V dutině cívky se nachází ještě natáčecí tyčinka, která slouží pro natáčení měřicí cívky do axiálního a radiálního směru a vizuální kontrolu správného natočení této cívky. Takto sestavené uspořádání jsem zalil tekutou akrylátovou hmotou, která byla během 45 minut vytvrzena ve speciální vakuové nádobě.

Poslední konstrukční částí jsou spojovací vodiče v konfiguraci kroucené dvojlinky z tenkého drátu prokroucené k omezení vlivu případného okolního elektromagnetického pole. Spojovací vodiče jsem poté připojil k digitálnímu multimetru, kterým měřím indukovaná napětí do měřicí cívky. Spojovací vodiče můžu také připojit na osciloskop přes příslušnou sondu. Měřicí cívku dokážu měřit pole se síťovým i vysokým kmitočtem napájecího proudu induktoru. Srovnávací měření, která jsem prováděl po zhotovení měřicí cívky, ukázaly shodu výsledků získaných rozdílnými metodami a správnou funkci nové měřicí cívky.

6.6 Příklad praktické aplikace spojený s ukázkou srovnávacího měření - ověření výsledků numerické simulace měřením

Na praktickém příkladu demonstruji ověření výsledků numerické simulace měřením. Níže uvedené grafy demonstrují průběh intenzity magnetického pole H pro samotný induktor (Tabulka 5.1) napájený harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz při $U = 128$ V s proudem $I_{ef} = 31$ A. Grafy na (Obrázek 6.3 - Obrázek 6.4) představují výsledky získané numerickou simulací v programu RillFEM 2D [12] a grafy na (Obrázek 6.8 a Obrázek 6.9) představují

výsledky získané měřením s novou měřicí cívkou. Pro názornost zde provádím porovnání získaných hodnot intenzity magnetického pole H u řady 9 (Obrázek 5.15) pro obě výše uvedené metody. Do grafů na (Obrázek 6.4 a Obrázek 6.5) jsem tuto řadu dokreslil formou vektoru, zatímco u ostatních grafů (Obrázek 6.6 - Obrázek 6.9) jsou hodnoty řady 9 přímo viditelné. Pozici řady 9 zde ukážu na nárysu měřicí desky (viz Obrázek 5.15). Kromě dobře viditelných vyřiznutých mezer pro zasunutí desky do induktoru (v levém dolním rohu) je zde názorně vidět měřená a diskutovaná řada 9, která je charakterizována měřenými krajními body A9 [0,44; 0,271], N9 [-0,08; 0,271] a vnitřním bodem řady 9 ležícím na axiální ose z induktoru L9 [0; 0,271]. Vztažný bod je zde střed induktoru se souřadnicemi S [0,0] a vzdálenost měřených bodů je 0,04 m.

Nyní provedu demonstraci výpočtu (6.1) intenzity magnetického pole H ze změřených hodnot indukovaného napětí u_i pomocí měřicí cívky pro bod L9 [0; 0,271]:

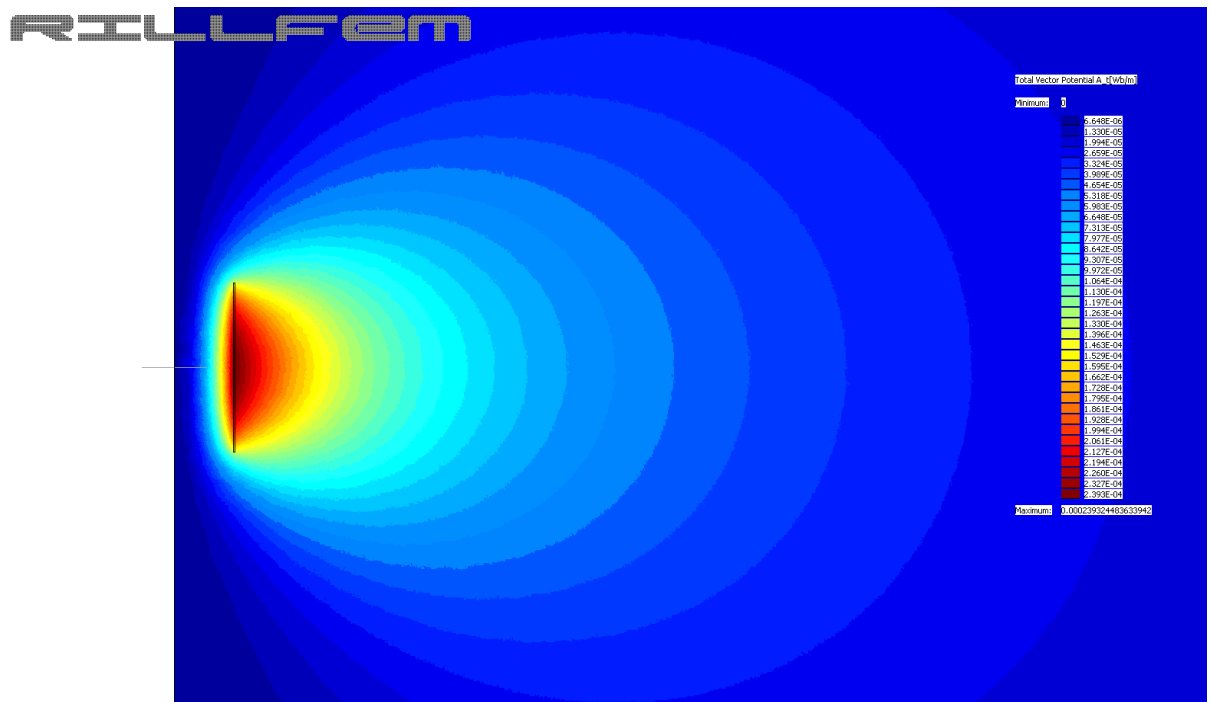
$$\begin{aligned}
 u_{rad} &= 777[\text{mV}] = 0,777[\text{V}] \\
 u_{ax} &= 22[\text{mV}] = 0,022[\text{V}] \\
 B_{rad} &= 0,264 \cdot \frac{0,777}{4,44 \cdot 50} = 0,000924[\text{T}] \\
 B_{ax} &= 0,264 \cdot \frac{0,022}{4,44 \cdot 50} = 0,000026[\text{T}] \\
 B &= \sqrt{B_{rad}^2 + B_{ax}^2} = \sqrt{0,000924^2 + 0,000026^2} = \\
 &= 0,000924[\text{T}] \\
 H &= \frac{B}{\mu_0} = \frac{0,000924}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 735,590399[\text{A} \cdot \text{m}^{-1}] \\
 \Rightarrow H_{L9} &= 735,6[\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]
 \end{aligned}$$

Srovnání výsledků provádím v závěru této kapitoly. Srovnávám vždy spolu samostatně hodnoty plošných grafů (tj. Obrázek 6.4, Obrázek 6.5, Obrázek 6.9) a hodnoty 2D grafů (tj. Obrázek 6.6, Obrázek 6.7, Obrázek 6.8). Hodnoty řady 9 je potom možné srovnávat v obou typech grafů (Obrázek 6.4 - Obrázek 6.9).

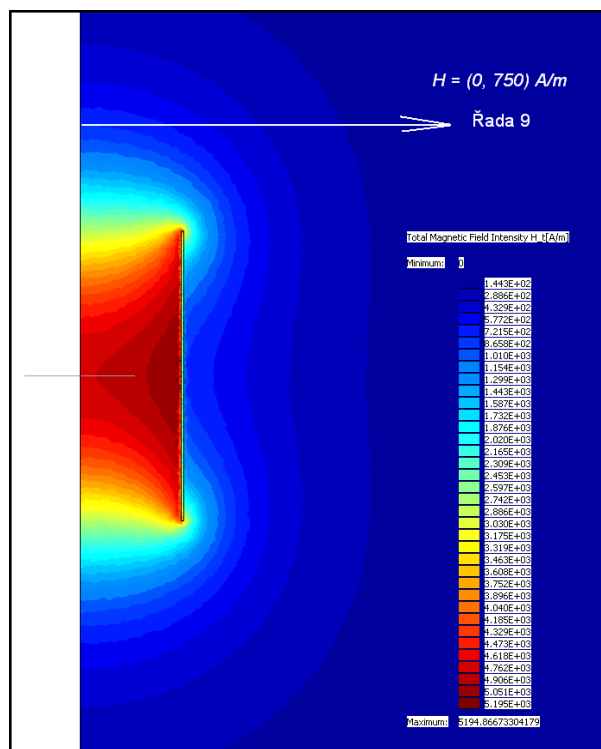
Pozn. Nejistoty měření použitých měřicích přístrojů důležitých pro získání zde uvedených výsledků:

- Indukované napětí u_i do měřicí cívky - měřeno digitálním multimetrem True RMS Multimeter 703, Finest, na rozsahu 4 V, rozlišení 1 mV: 0,75% + 3,
- $I_{ef} = 31 \text{ A}$ - měřeno analogovým elektromagnetickým ampérmetrem A ~ 5, 100 (v.č. 9044150) na rozsahu 100 A: třída přesnosti ~ 1.

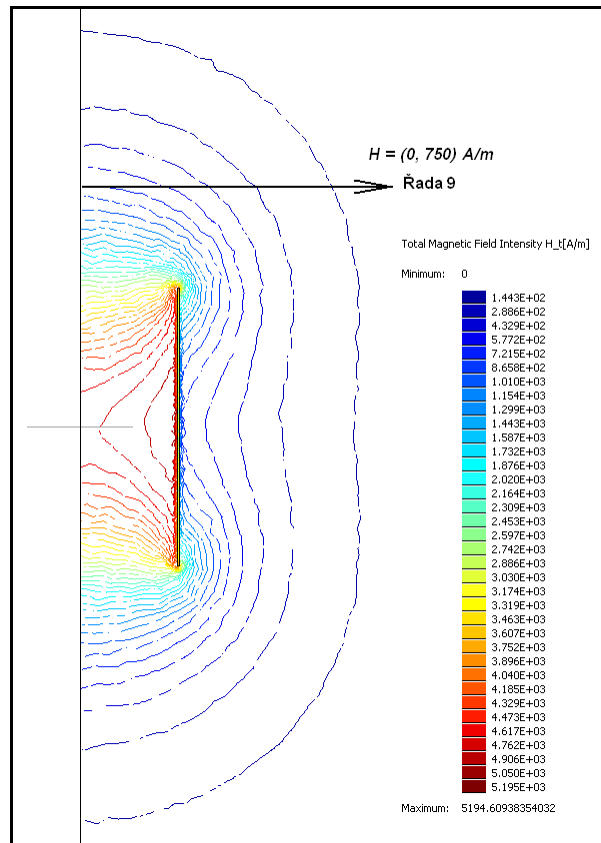
6.7 Numerický model RILLFEM 2D



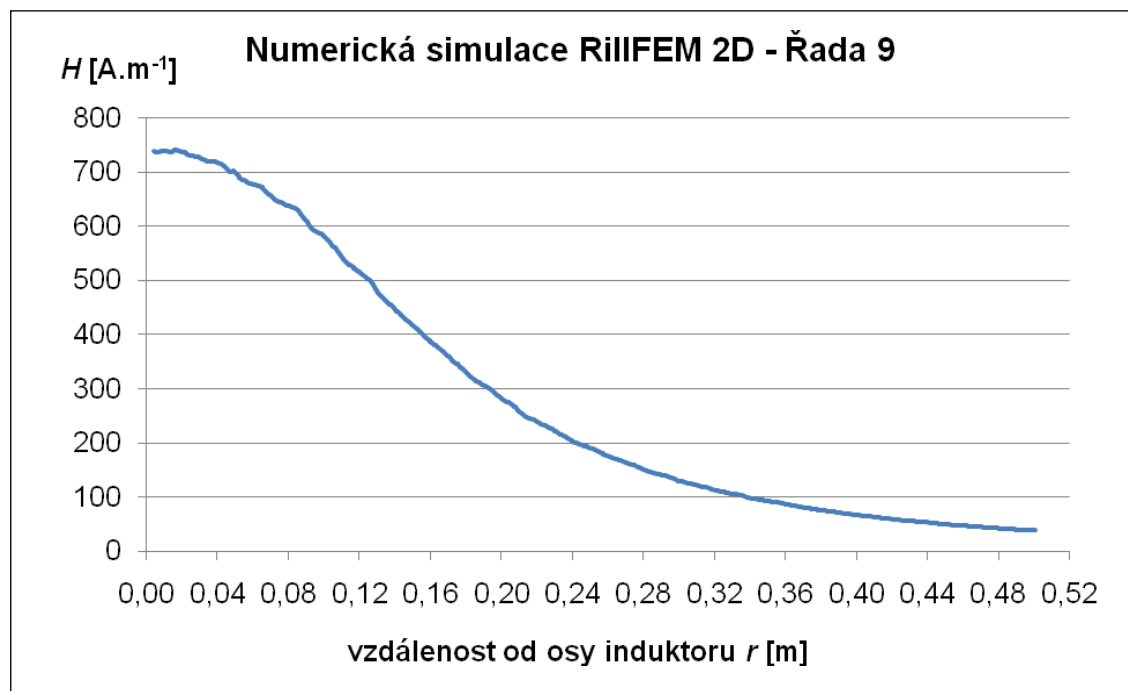
Obrázek 6.3: Rozložení magnetického vektorového potenciálu A [Wb.m⁻¹] pro samotný induktor napájený harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz



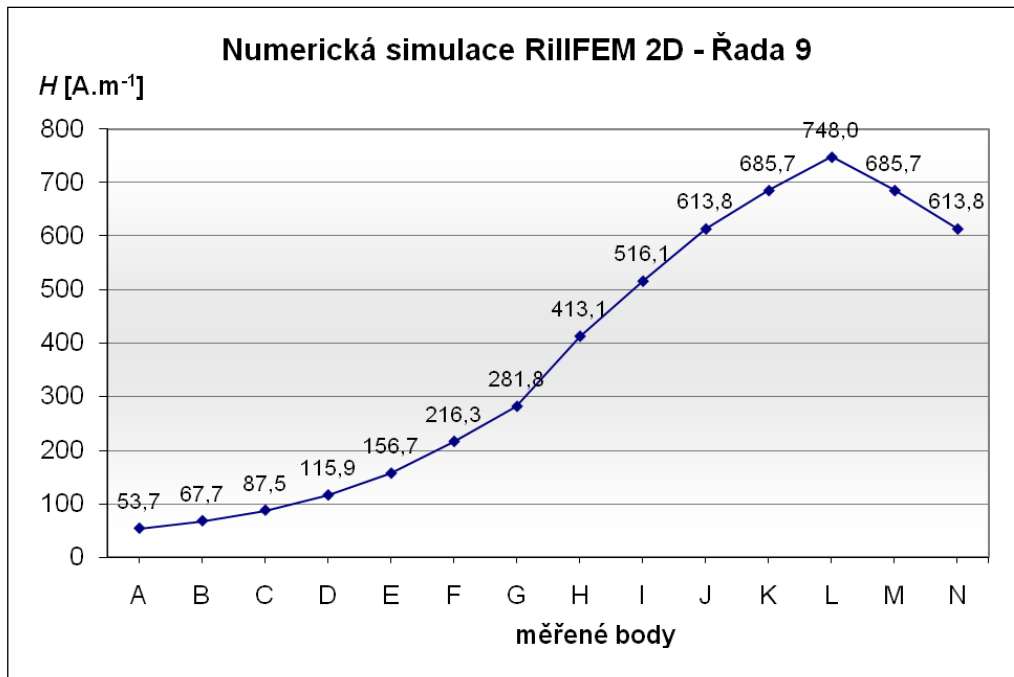
Obrázek 6.4: Velikost simulované intenzity magnetického pole H pro samotný induktor napájený harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz (barevná stupnice $H_{min} = 0 \text{ A.m}^{-1}$, $H_1 = 144 \text{ A.m}^{-1}$, $H_{max} = 5195 \text{ A.m}^{-1}$); řada 9 je zvýrazněna bílou polopřímkou – $H_{min} = 0 \text{ A.m}^{-1}$ až $H_{max} = H_{L9} = 750 \text{ A.m}^{-1}$



Obrázek 6.5: Velikost simulované intenzity magnetického pole H pro samotný induktor napájený harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz (barevná stupnice $H_{min} = 0 \text{ A.m}^{-1}$, $H_1 = 144 \text{ A.m}^{-1}$, $H_{max} = 5195 \text{ A.m}^{-1}$) – izolonie; řada 9 je znázorněna černě – $H_{min} = 0 \text{ A.m}^{-1}$ až $H_{max} = H_{L9} = 750 \text{ A.m}^{-1}$

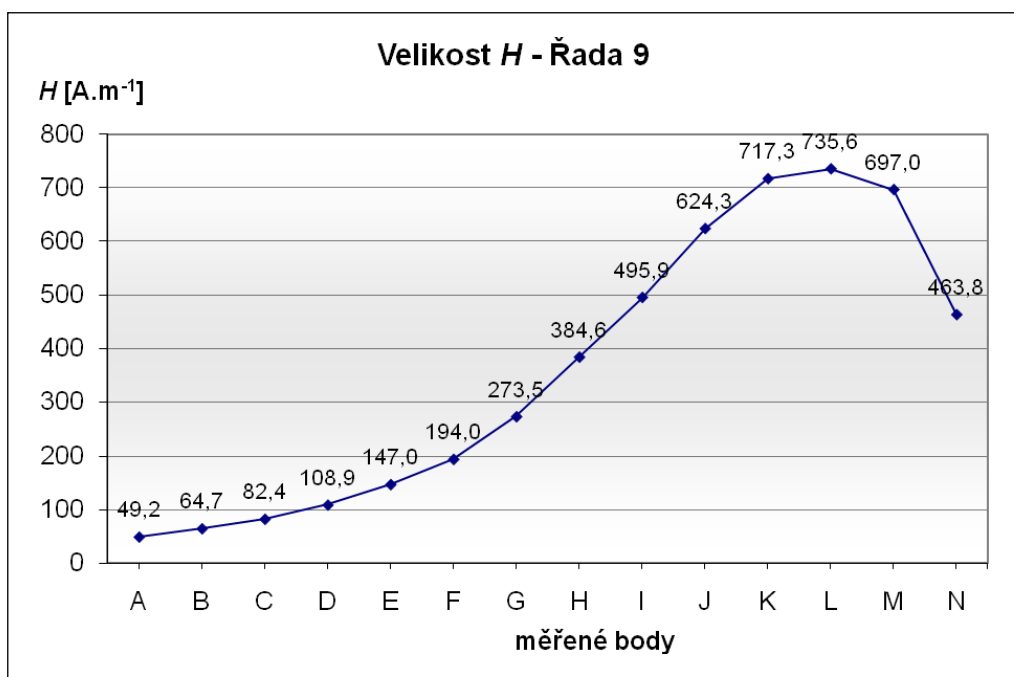


Obrázek 6.6: Velikost simulované intenzity magnetického pole H pro samotný induktor napájený harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz – řada 9 (přímo vykreslený 2D graf programem RillFEM 2D); osa y : hodnoty v rozmezí $H_{min} = 38,5 \text{ A.m}^{-1}$, $H_{max} = H_{L9} = 740,3 \text{ A.m}^{-1}$, $H_{A9} = 53,6 \text{ A.m}^{-1}$; osa x : hodnoty vykresleny na vzdálenosti 0,5 metru od osy symetrie induktoru

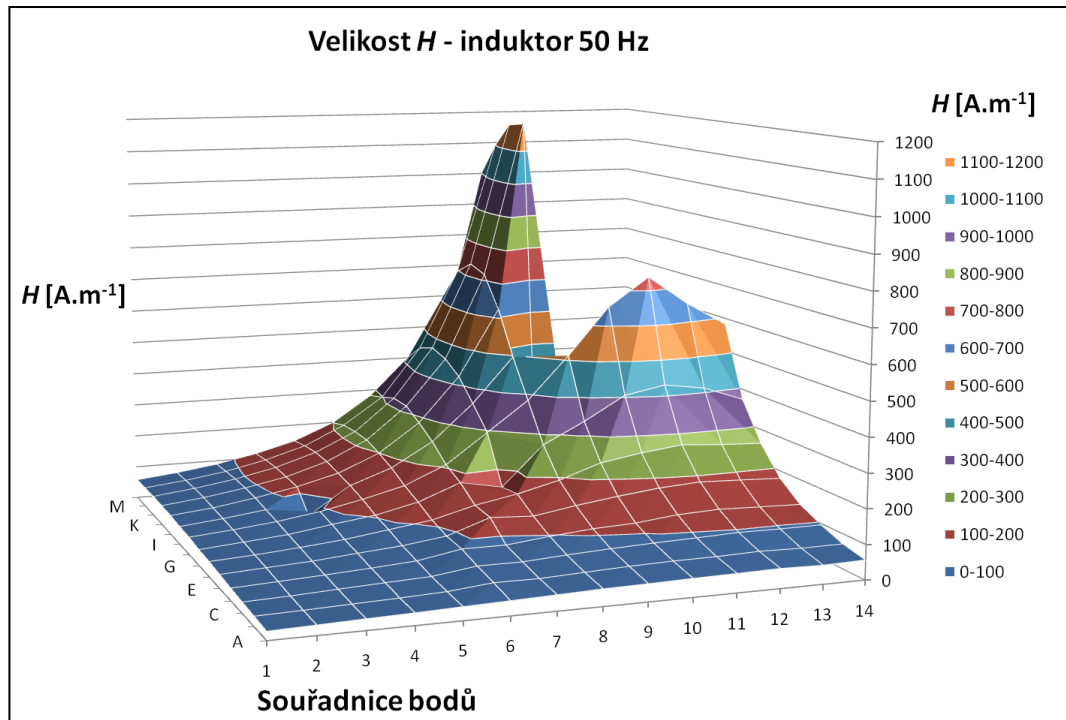


Obrázek 6.7: Velikost simulované intenzity magnetického pole H pro samotný induktor napájený harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz – řada 9 (hodnoty odečteny přes funkci odečet hodnoty veličiny ve vykresleném grafu (Obr. 5) podle polohy kurzoru); osa y : hodnoty v rozmezí $H_{A9} = 53,7$ A.m⁻¹, $H_{L9} = 748$ A.m⁻¹, osa x : hodnoty vykresleny na intervalu -0,08 m až 0,44 m vzhledem k ose symetrie induktoru (v bodech A9 až N9), bod L9 leží na ose symetrie, tj. osa symetrie induktoru: $x = L$, vzdálenost sousedních bodů je 4 cm

6.8 Měření novou měřicí cívkou



Obrázek 6.8: Velikost změřené intenzity magnetického pole H pro samotný induktor napájený harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz – řada 9; osa y : hodnoty v rozmezí $H_{A9} = 49,2$ A.m⁻¹, $H_{L9} = 735,6$ A.m⁻¹, osa x : hodnoty vykresleny na intervalu -0,08 m až 0,44 m vzhledem k ose symetrie induktoru (v bodech A9 až N9), bod L9 leží na ose symetrie, tj. osa symetrie induktoru: $x = L$, vzdálenost sousedních bodů je 4 cm



Obrázek 6.9: Velikost změřené intenzity magnetického pole H pro samotný induktor napájený harmonickým proudem o frekvenci 50 Hz – řada 9 je dobře viditelná na zobrazené mřížce (souřadnice bodů, číslo 9); osa y : hodnoty v rozmezí $H_{min} = 0 \text{ A.m}^{-1}$, $H_{max} = 1200 \text{ A.m}^{-1}$, $H_1 = 100 \text{ A.m}^{-1}$ osa x : hodnoty vykresleny na ploše měřicí desky v bodech A1 až N14 (vzdálenost sousedních bodů je 4 cm), osa symetrie induktoru: $x = L$, tj. L1 – L14; parametry řady 9: $H_{min} = 0 \text{ A.m}^{-1}$, $H_{max} = 800 \text{ A.m}^{-1}$

6.9 Zhodnocení

Nyní provedu srovnání grafických výstupů srovnáním mezních hodnot H pro řadu 9 formou tabulky (Tabulka 6.5). Obecně mezi sebou porovnávám samostatně hodnoty plošných grafů (tj. Obrázek 6.4, Obrázek 6.5, Obrázek 6.9) a hodnoty 2D grafů (tj. Obrázek 6.6 - Obrázek 6.8). Hodnoty řady 9 potom srovnávám v obou typech grafů (Obrázek 6.4 - Obrázek 6.9).

Tabulka 6.5: Intenzita magnetického pole $H \text{ [A.m}^{-1}\text{]}$ - Minimální a maximální hodnoty a intervaly řady 9

Výstup	Hodnoty $H \text{ [A.m}^{-1}\text{]}$
Obr. 5 – simulace	(0, 750)
Obr. 6 – simulace	(0, 750)
Obr. 7 – simulace, 2D	$\langle 53,6;740,3 \rangle$
Obr. 8 – simulace, 2D	$\langle 53,7;748 \rangle$
Obr. 9 - měření	$\langle 49,2;735,6 \rangle$
Obr. 10 - měření	(0, 800)

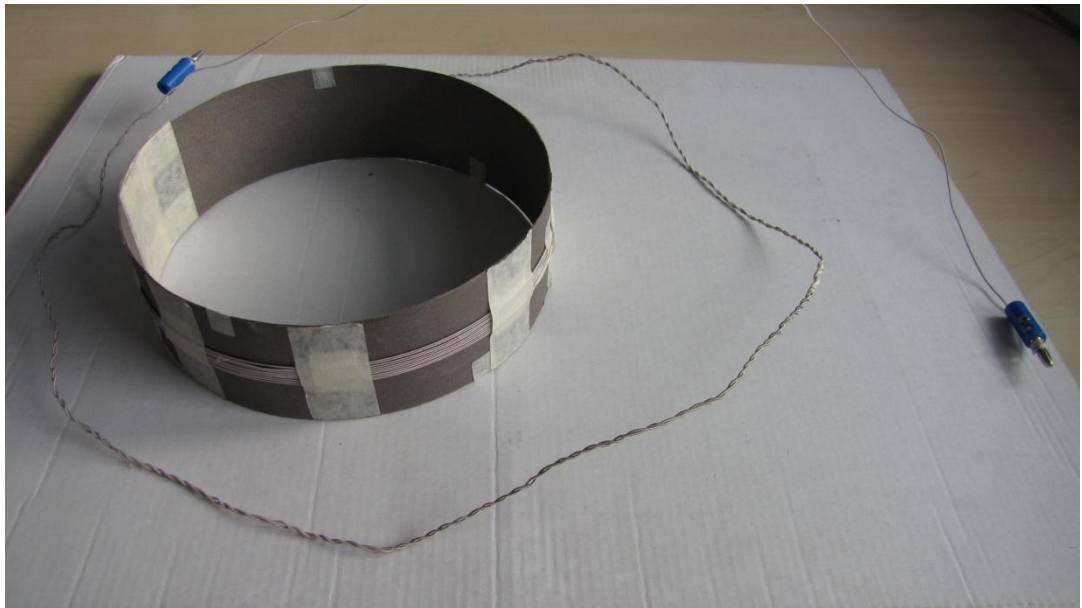
U plošných grafů představují mezní a hraniční hodnoty intervaly, zatímco u 2D grafů odečítám z grafu přímo hraniční hodnotu. Při srovnání je samozřejmě žádoucí porovnat hraniční hodnotu a mezní interval – hraniční hodnota z jednoho grafu leží nebo neleží v mezním intervalu jiného grafu, mezní intervaly u dvou grafů si přibližně odpovídají velikostí hraničních hodnot apod. Z Tabulka 6.5 vidím, že grafy v předchozí kapitole názorně demonstrují shodu výsledků získaných měření novou měřicí cívkou s výsledky numerické simulace. Měření jsem prováděl opakovaně s podobným výsledkem.



Obrázek 6.10: Měřicí cívka velkého průměru nasazená na vsázce

Pozn. Dalším typem měřicí cívky, který jsem sestrojil, byla Měřicí cívka velkého průměru (vnitřní průměr $d = 16$ cm) pro zjištění intenzity magnetického pole na povrchu modelu magnetické válcové vsázky (Obrázek 6.10). Měřicí cívka velkého průměru slouží ke zjištění intenzity magnetického pole H z indukovaného napětí do cívky na povrchu modelu magnetické válcové vsázky, která se umístí do dutiny nového fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení napájeného proudem se síťovým nebo vysokým kmitočtem. Intenzita magnetického pole se spočte pomocí elementárních vzorců z indukovaného napětí, které se indukuje do této měřicí cívky v průběhu měření, analogicky, jako v případě měřicí cívky malého průměru. Vzhledem k absenci dříve používaných Helmholtzových cívek jsem

však nebyl schopen cívku ocejchovat a stanovit tak konstantu cívky k nutnou k výpočtu, protože kalibrační solenoid použitý při cejchování měřicí cívky malého průměru má pro tento účel příliš malé rozměry. Měřicí cívku velkého průměru tvoří 10 závitů měděného vodiče navinutých na válcové armatuře z elektricky nevodivého materiálu (Obrázek 6.11), případně dle potřeby teplotně odolného. Celé zařízení je potom možno posouvat v axiálním směru po povrchu modelu válcové vsázky. Vývody měděného vodiče jsou potom prokrouceny s ohledem na uvažované vysokofrekvenční pole a umožňují připojení na měřicí přístroj.



Obrázek 6.11: Měřicí cívka velkého průměru – pohled z boku

7 Měření na novém fyzikálním modelu indukčního zařízení

7.1 Měření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem nového fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení pro síťový a vysoký kmitočet [4], [19], [20]

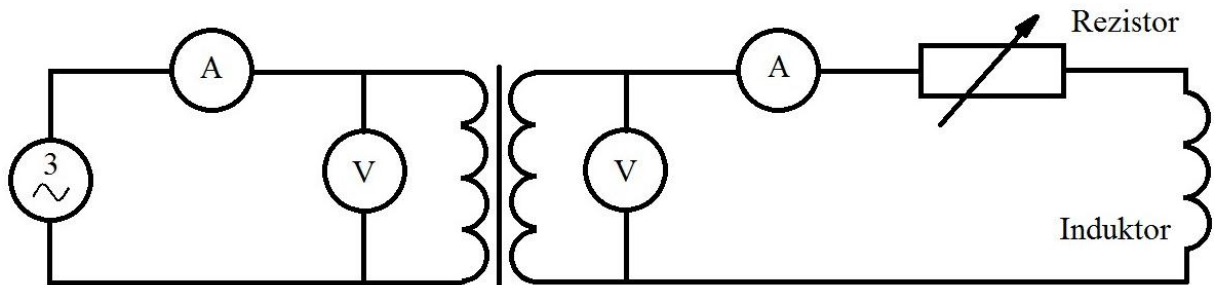
Rozložení elektromagnetického pole v okolí indukčního zařízení posuzují, obdobně jako často i v praxi, měřením intenzity magnetického pole H . Právě i v technické praxi je z důvodů rizika poškození zařízení vlivem příliš silného magnetického pole často nezbytně nutné takové měření provést. Pro měření lze s výhodou použít měřicí cívku nebo soustavu měřicích cívek ve formě indukční sondy, případně Hallovy sondu. Principem Hallovy sondy je tzv. Hallův jev, kdy polovodič protékáný elektrickým proudem vložíme do magnetického pole a na tomto polovodiči dojde ke vzniku elektrického napětí. Důležitý je fakt, že toto vybuzené elektrické napětí je přímo úměrné intenzitě okolního pole. Základním principem měřicích cívek je zákon elektromagnetické indukce. Velikost indukovaného napětí je v tomto případě opět úměrná velikosti okolní intenzity magnetického pole. Z naměřených hodnot elektrického napětí U se vypočítá velikost magnetické indukce B a z ní velikost intenzity magnetického pole H (viz Kapitola 6.2).

Cílem tohoto měření je určit vliv stínění svazky transformátorových plechů na rozložení elektromagnetického pole kolem nového zkoumaného fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení pro tři zvolené kmitočty – 50 Hz, 4100 Hz a 10 000 Hz. Efektivitu stínění, tj. vliv stínění na změnu rozložení rozptylového magnetického toku kolem tohoto modelu indukčního zařízení jsem se rozhodl porovnat v Kapitola 8.1. Pro každý kmitočet jsem kontrolně prováděl měření pro dvě různé proudové hodnoty – 15 A a 31 A (hodnoty nastavené na vysokofrekvenčním pulzním napájecím zdroji).

Měření pro ověření vlivu stínění ve vysokofrekvenčním a nízkofrekvenčním poli provádím na novém mnou zkonstruovaném fyzikálním laboratorním modelu indukčního zařízení (viz Kapitola 5). Toto indukční zařízení obsahuje pro toto konkrétní měření induktor a stínění svazky transformátorových plechů. Induktor je tvořen měděným vodičem obdélníkového plného průřezu, závity jsou vinuty na válec z izolačního tvrzeného papíru. Geometrické rozměry a situaci uvedeného zařízení stručně demonstruje (Kapitola 5).

Schéma zapojení při měření 50 Hz (nízkofrekvenční pole) vidíme na (Obrázek 7.1). Jako napájecí zdroj jsem použil laboratorní transformátor, který je zapojen do školní laboratorní sítě na napěťovou hladinu 400 V. Na sekundární straně je napětí transformováno na napěťovou hladinu 127 V do jedné fáze, na kterou je připojen zkoumaný indukční model.

Proud na sekundární straně je nutné dále dle potřeby (15 A nebo 31 A) omezit vřazeným proměnným elektrickým odporem. Vzhledem k průtoku velkého proudu a značného zahřívání bylo použito chlazení proudícím vzduchem. Vlastní schéma zapojení ještě doplňují potřebné měřicí přístroje vřazené do obvodu dle Obrázek 7.1.



Obrázek 7.1: Schéma zapojení měření při 50 Hz [20]

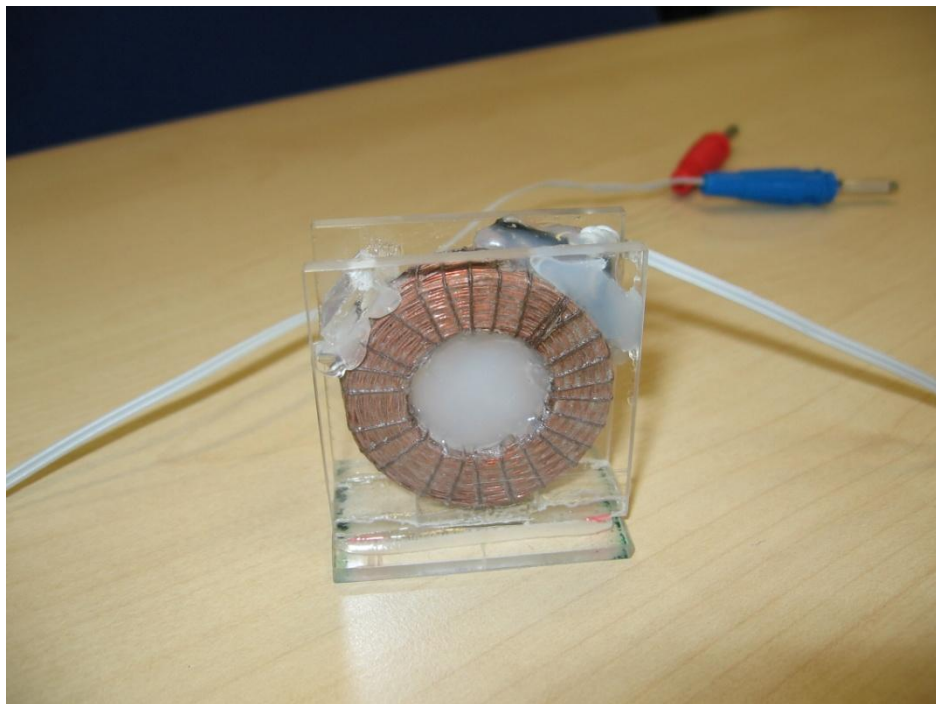
Pro kmitočty 4100 Hz a 10 000 Hz pro měření do mé disertační práce zakoupila katedra nový laboratorní vysokofrekvenční pulzní zdroj typ FRQET 5 (viz Obrázek 7.2). Základními parametry tohoto zdroje jsou jmenovitý výkon: $P_n = 0,1 - 10$ kW, a rozsah pracovních kmitočtů: $f = 4 - 25$ kHz.



Obrázek 7.2: vysokofrekvenční pulzní zdroj FRQET 5 – na zdroji jsou nastaveny tyto parametry: $f = 4,1$ kHz, $I = 16$ A, $t = 20,1$ s (f je frekvence napájecího proudu induktoru, I je napájecí proud induktoru na zdroji a t je doba spuštění zdroje (doba ohřevu))

Měřicí obvod při měření vysokofrekvenčního pole tedy obsahuje vysokofrekvenční pulzní zdroj FRQET 5, induktor (se svazky nebo bez svazků stínících transformátorových

plechů dle potřebné geometrie), osciloskop EZ DS-1080C (včetně proudových kleští a příslušné sondy – 1:10 nebo 1:100 v případě potřeby proměření vyšších napětí), multimetr FINEST 703 a měřicí cívku, jejíž frekvenční závislost impedance je přijatelná s ohledem na zvolenou frekvenční hladinu. S posledně uvedenými přístroji, tj. multimetrem a měřicí cívkou provádím vlastní měření hodnot napětí indukovaných do měřicí cívky v axiálním a radiálním směru. Při srovnávacím měření nově zkonstruované měřicí cívky malého průměru (cívka 1) Obrázek 6.2 a Tabulka 6.2 jsem objevil frekvenční závislost impedance této cívky pro kmitočty vyšší než 4 kHz. Poté jsem provedl měření cívky na speciálních přístrojích (RLC metry pro vysokou frekvenci), která tuto frekvenční závislost impedance potvrdila. Pro frekvenční hladinu 10 kHz jsem potom při měření použil nově zkonstruovanou měřicí cívku s křížovým vinutím (cívka 2) Obrázek 7.3 a Tabulka 7.1 a menším počtem závitů, jejíž impedance je i při 10 kHz prakticky frekvenčně nezávislá.



Obrázek 7.3: Nová měřicí cívka s křížovým vinutím (cívka 2) použitá k měření s frekvencí napájecího proudu induktoru 10 000 Hz

Tabulka 7.1: Základní geometrické rozměry měřicí cívky 2

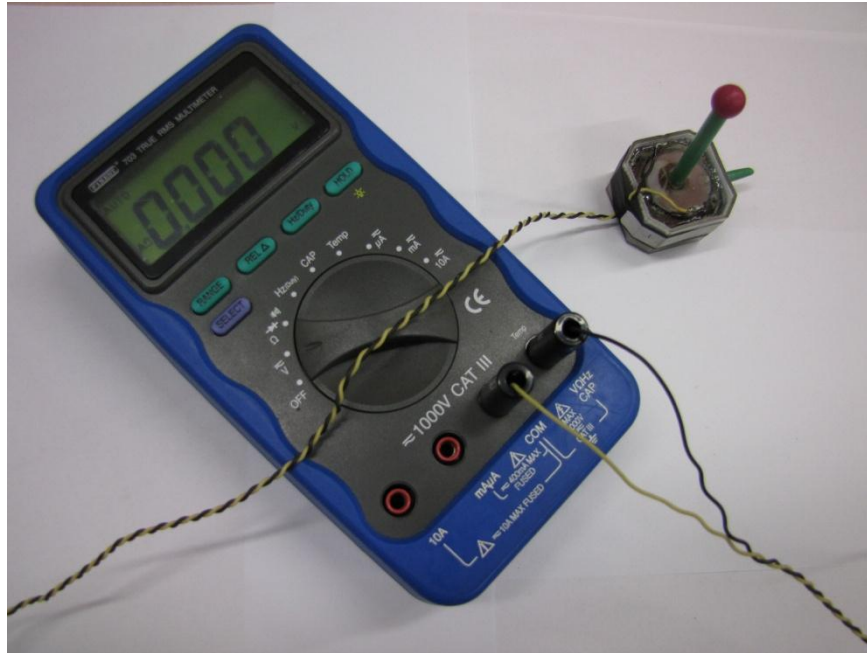
Vnější průměr	38 mm
Vnitřní průměr	20 mm
Výška	9,5 mm
Počet závitů	310

Měření naindukovaných napětí do měřicí cívky malého průměru

Sestavím-li měřicí obvod dle popisu v této kapitole, provádím potom měření podle standartního postupu. Na zkoumaný induktor nasadím zprvu měřicí desku, která představuje a fyzikálně interpretuje geometrickou síť s body, které je nutné proměřit (Obrázek 7.4). Jednotlivé měřicí body představují kruhové otvory v měřicí desce, které slouží k umístění a fixaci měřicí cívky bez nutnosti trvalé asistence obsluhy. Krok měřicí sítě resp. vzdálenost sousedních otvorů je konstantní a pro mou měřicí desku se rovná 4 cm. Po umístění měřicí cívky do měřeného bodu/otvoru nastavím cívku do požadovaného axiálního směru a odečtu hodnotu axiální složky indukovaného napětí: U_{ax} [V]. Poté otočím cívku o 90° doleva a odečtu hodnotu radiální složky indukovaného napětí: U_{rad} [V]. Hodnoty napětí odečítám z měřicího přístroje (multimetr FINEST 703), do kterého je měřicí cívka během měření trvale zapojena Obrázek 7.5. Postupně tedy proměřím všechny požadované body a hodnoty zaznamenávám do tabulky. Základním fyzikálním principem měřicí cívky je zákon elektromagnetické indukce. Z toho vyplývá, že intenzita magnetického pole H v daném bodě okolí zkoumaného indukčního zařízení je přímo úměrná napětí U_i indukovanému do této cívky v tomto bodě (viz Kapitola 6). Nyní již měním pouze vstupní parametry měření (f , I_{nap}) nebo geometrickou konfiguraci zkoumaného indukčního zařízení (stínění 10-ti svazky transformátorových plechů) podle potřeby.



Obrázek 7.4: Měřicí deska nasazená na induktoru stíněném svazky transformátorových plechů



Obrázek 7.5: měřicí cívka 1 zapojena do multimetru FINEST 703 e.č. 185820

Nyní sumarizuji a porovnám výsledky měření měřicí cívkou pro tři měřené frekvenční hladiny 50 Hz, 4 100 Hz, 10 000 Hz a pro každou frekvenci měřím při dvou proudových úrovních 15 A a 31 A (nastaveno na napájecím zdroji induktoru) v Kapitola 8.1 a Příloha A.1.

7.2 Měření vlivu přidavných konstrukčních prvků na rozložení elektromagnetického pole kolem nového fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení pro síťový a vysoký kmitočet [19]

Měřený obvod pro tento účel sestává z napájecího vysokofrekvenčního pulzního zdroje (Obrázek 7.2), induktoru s poměrem rozměrů odpovídajících při použité vysoké frekvenci napájecího proudu induktoru skutečnému průmyslovému zařízení, ze stínění svazky transformátorových plechů a zkoumaných přidavných konstrukčních prvků (viz Kapitola 5). Měřicí obvod pro tento účel potom sestává z měřicí desky, měřicí křížové cívky (cívka 2) a digitálního multimetru Finest 703 (viz Kapitola 7.1). Měření provádím při frekvenci napájecího proudu induktoru 4 100 Hz a 10 000 Hz.

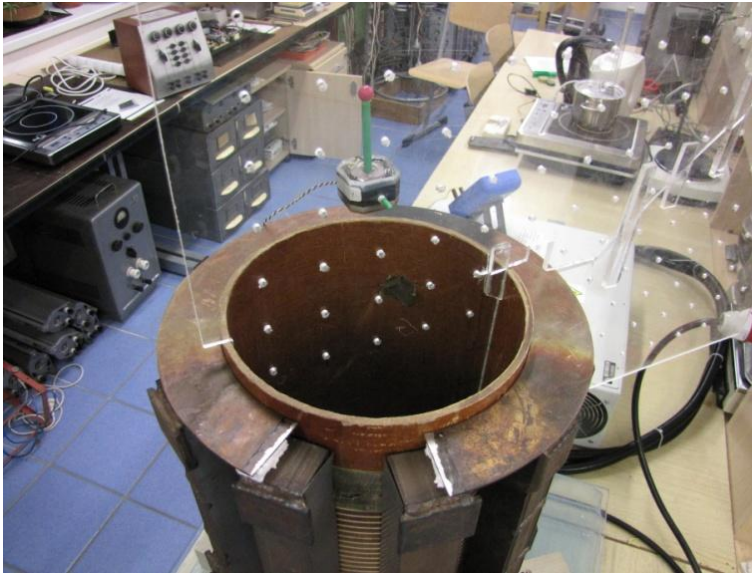
7.2.1 Popis měření a důležité poznatky

Měření vlivu přidavných prvků bylo provedeno pro vysokou frekvenci (Pro síťový kmitočet jsem toto měření prováděl již před 5-ti roky s neuspokojivými a nevýraznými výsledky, proto jsem potřeboval pro nové měření zdroj vysoké frekvence.) Jako napájecí zdroj jsem vybral vysokofrekvenční pulzní zdroj FRQET 5 od firmy RillFEM [12]. Skutečný proud omezený induktorem s příslušnou impedancí jsem kontroloval pomocí proudových

kleští připojených k osciloskopu EZ DS-1080C. Pro měření indukovaného proudu do cívky jsem zvolil křížovou měřicí cívku (cívka 2) především pro frekvenční nezávislost její impedance. Konstanta této cívky byla cejchováním i výpočtem stanovena na hodnotu 4,73. Hodnoty indukovaného napětí v měřicí cívce jsem odečítal pomocí multimetru FINEST 703 s evidenčním číslem 185 820, který byl použit pro všechna moje měření (byl ocejchován v laboratoři elektromagnetické kompatibility, funkční kritérium A). Výhodou tohoto multimetru je schopnost měřit i vysoký kmitočet měřeného proudu. Na přístroji jsem nastavil režim „automatický rozsah pro střídavé napětí“. Měření probíhá opět podle mnou ověřeného a zavedeného postupu, měřicí cívku zasouvám do otvorů v měřicí desce a nejprve odečítám hodnotu indukovaného napětí v axiálním směru (axiální osa měřicí cívky je rovnoběžná s axiální osou z induktoru). Potom otočím cívku pomocí natáčecí tyčinky o $+90^\circ$ a odečtu indukované napětí v radiálním směru (axiální osa měřicí cívky je rovnoběžná s radiální osou r induktoru). Zjištěné hodnoty zaznamenám a pokračuji v měření pro sousední bod. Zde je nutné zmínit, že přesnost mnou zvoleného způsobu měření je silně ovlivněna nemožností natočit měřicí cívku pokaždé o přesně tentýž úhel. Obtížná proveditelnost takového úkonu má za následek možnou velkou chybu měření způsobenou lidským faktorem. Pokud se pohybují při měření pro vysokou frekvenci v dutině induktoru, i malým natočením nastává rozdíl měřené hodnoty indukovaného napětí řádově až v jednotkách voltů.

Další měřenou veličinu představuje elektrický proud indukovaný v uzavřeném přídatném konstrukčním prvku. Problém nastal pouze u plochého prstence, kdy jsem indukovaný proud nedokázal změřit kvůli malému průměru kleští. Dále jsem řešil problematiku oteplení přídatného konstrukčního prvku. Na začátku měření jsem předpokládal, že působením střídavého vysokofrekvenčního elektromagnetického pole se v dobře elektricky vodivém měděném prvku indukují vířivé proudy, které průchodem materiálem s elektrickým odporem způsobí v tomto prvku vznik Jouleových ztrát. V průběhu měření jsem ovšem dospěl k závěru, že tuto zákonitost nelze v průběhu tohoto měření tímto způsobem věrohodně ověřit. Induktor se ohřívá na teplotu výrazně vyšší než prvek a prvek se proto od tohoto induktoru s největší pravděpodobností ohřívá přestupem tepla sáláním a prouděním. Nelze tedy jednoznačně vyhodnotit, do jaké míry se přídatný konstrukční prvek zahřívá vlivem procházejícího proudu. Přesto jsem pro případné další vyhodnocení zaznamenával pyrometrem teplotu přídatného konstrukčního prvku na začátku a na konci měření v jednom bodě, který byl pro získání emisivity absolutně černého tělesa nastříkán černou matnou barvou (viz Kapitola 8.2 a Příloha A.2). Dále jsem pyrometrem zaznamenával

stejným způsobem teplotu pro dva načerněné body protilehlých stínících svazků a u induktoru jsem měřil teplotu pro tři vertikálně rovnoměrně rozložené načerněné body.



Obrázek 7.6: Měření – plochý měděný prstenec otevřený

7.3 Měření vlivu válcové magnetické duté vsázky a ploché kruhové měděné desky

Měřený obvod pro tento účel sestává z laboratorního transformátoru (frekvence napájecího proudu induktoru 50 Hz) nebo vysokofrekvenčního pulzního zdroje (frekvence napájecího proudu induktoru 4 100 Hz a 10 000 Hz), induktoru a stínění svazky transformátorových plechů. Dále je součástí rovněž dutá válcová magnetická vsázka umístěná v dutině induktoru a přídatný konstrukční prvek v podobě měděné kruhové desky (viz Kapitola 5). Měřicí obvod pro tento účel potom sestává z měřicí desky, měřicí cívky malého průměru (cívka 1, pro frekvenci napájecího proudu induktoru 50 Hz a 4 100 Hz) nebo měřicí křížové cívky (cívka 2, pro frekvenci napájecího proudu induktoru 10 000 Hz) a digitálního multimetru Finest 703 (viz Kapitola 7.1). Měření provádím při frekvenci napájecího proudu induktoru 50Hz, 4 100 Hz a 10 000 Hz.

Vsázka je v dutině induktoru umístěna na podstavci o výšce 11 cm z důvodu vystředění vsázky v dutině induktoru a je indukčně ohřívána na teplotu do 250 °C. Zbývá ještě doplnit, že součástí měděné kruhové desky je druhá měřicí deska se stejnou měřicí sítí (viz. Obrázek 5.15) jako má měřicí deska používaná pro předchozí měření vlivu stínění a vlivu přídatných konstrukčních prvků (Obrázek 7.4). Druhá měřicí deska je ke kruhové měděné desce upevněna šroubovým spojem (viz. Obrázek 7.7). Dochází tak k fixaci této měřicí desky prostřednictvím přídatného konstrukčního prvku, protože zde není možnost fixovat měřicí desku pomocí zasunutí desky do dutiny induktoru.



Obrázek 7.7: Příprava na měření – měděná kruhová deska nasazená na induktoru je nastříkána černou matnou barvou za účelem měření teploty optickým pyrometrem



Obrázek 7.8: Příprava na měření – uspořádaná vsázka, induktor, stínění (od středu vně)

8 Výsledky a vyhodnocení měření měřicími cívkami na novém fyzikálním laboratorním modelu indukčního zařízení

8.1 Vliv stínění (viz Kapitola 7.1)

V této kapitole uvádím výsledky měření pro vyšší proudovou úroveň, tj. 31 A nastaveno na příslušném napájecím zdroji. Výsledky měření pro nižší proudovou úroveň, tj. 15 A nastaveno na příslušném napájecím zdroji, uvádím v Příloze A.1.

8.1.1 Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při síťovém kmitočtu (50Hz) napájecího proudu induktoru

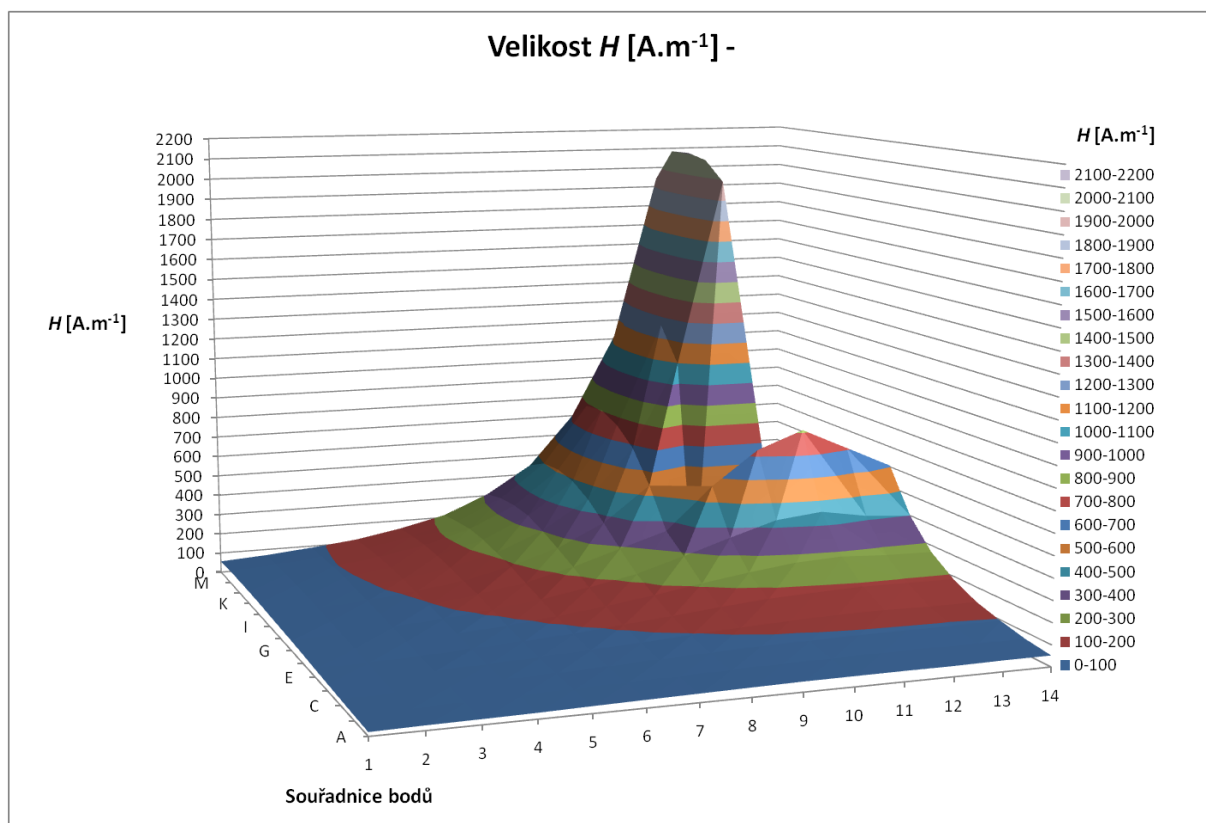
Napájecí proud induktoru byl proměnným odporem nastaven na 31,5 A (skutečný proud změřený ampérmetrem byl 31,5 A)

8.1.1.1 Induktor bez stínění - vypočítané hodnoty intenzity magnetického pole H

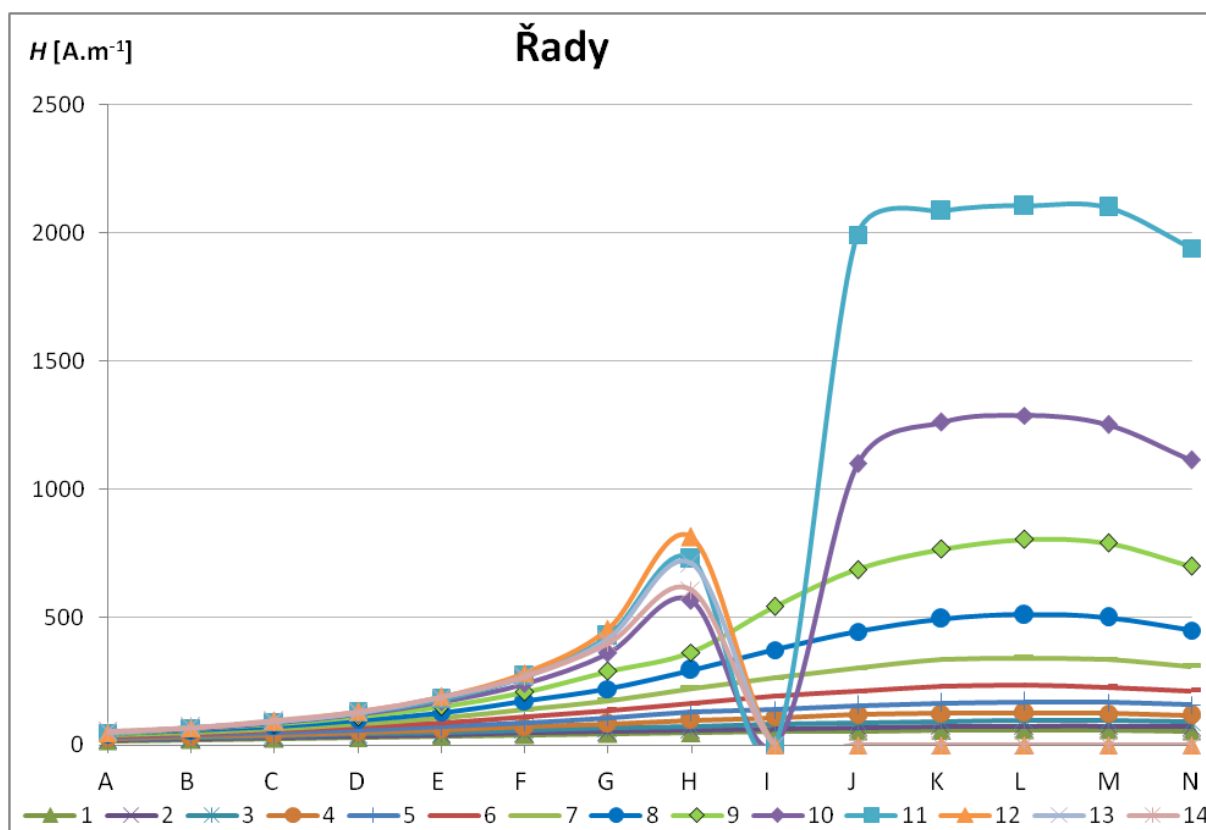
Tabulka 8.1: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 50 Hz; 31,5 A

Intenzita magnetického pole H [A/m]														
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	17,6	21,0	25,5	30,1	35,0	40,4	45,3	48,5	52,1	56,2	58,4	59,2	59,2	56,0
2	21,6	25,2	29,0	34,2	40,9	47,9	52,8	60,1	65,3	69,6	73,6	75,4	75,2	70,7
3	23,7	29,2	36,2	42,4	48,2	59,1	67,2	74,9	82,6	88,7	94,4	97,1	94,9	91,8
4	26,6	34,8	41,9	49,6	60,4	72,3	84,4	97,9	107,0	118,4	124,0	127,2	123,7	117,3
5	31,5	39,8	48,3	59,3	72,5	87,8	108,0	128,4	138,9	154,7	164,8	170,0	166,9	158,6
6	35,5	45,9	56,6	71,6	87,7	110,9	136,5	162,0	191,7	209,3	228,1	235,0	226,3	212,3
7	39,2	50,6	65,7	82,7	107,6	139,1	175,3	221,7	263,4	301,4	333,2	340,0	332,9	308,2
8	42,8	56,9	74,0	97,1	127,8	171,0	220,5	292,5	371,3	443,5	492,4	509,3	499,4	447,5
9	46,2	61,8	82,4	110,0	150,4	208,8	288,3	362,0	540,9	685,6	764,5	804,2	789,3	699,3
10	47,3	64,1	86,3	119,8	169,5	241,9	360,0	565,9	0,0	1098,5	1261,9	1287,2	1252,1	1113,2
11	48,4	67,3	90,7	127,7	179,7	270,2	427,9	728,6	0,0	1992,5	2084,0	2105,7	2100,0	1941,0
12	48,2	67,4	92,1	130,8	188,4	281,6	452,0	812,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	51,2	68,3	93,3	127,1	186,8	270,8	415,4	709,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	51,8	68,7	96,5	129,9	186,2	267,0	398,9	606,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Pozn. Tabulka 8.1 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf 8.1 a Graf 8.2) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf 8.1: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 50 Hz; 31,5 A



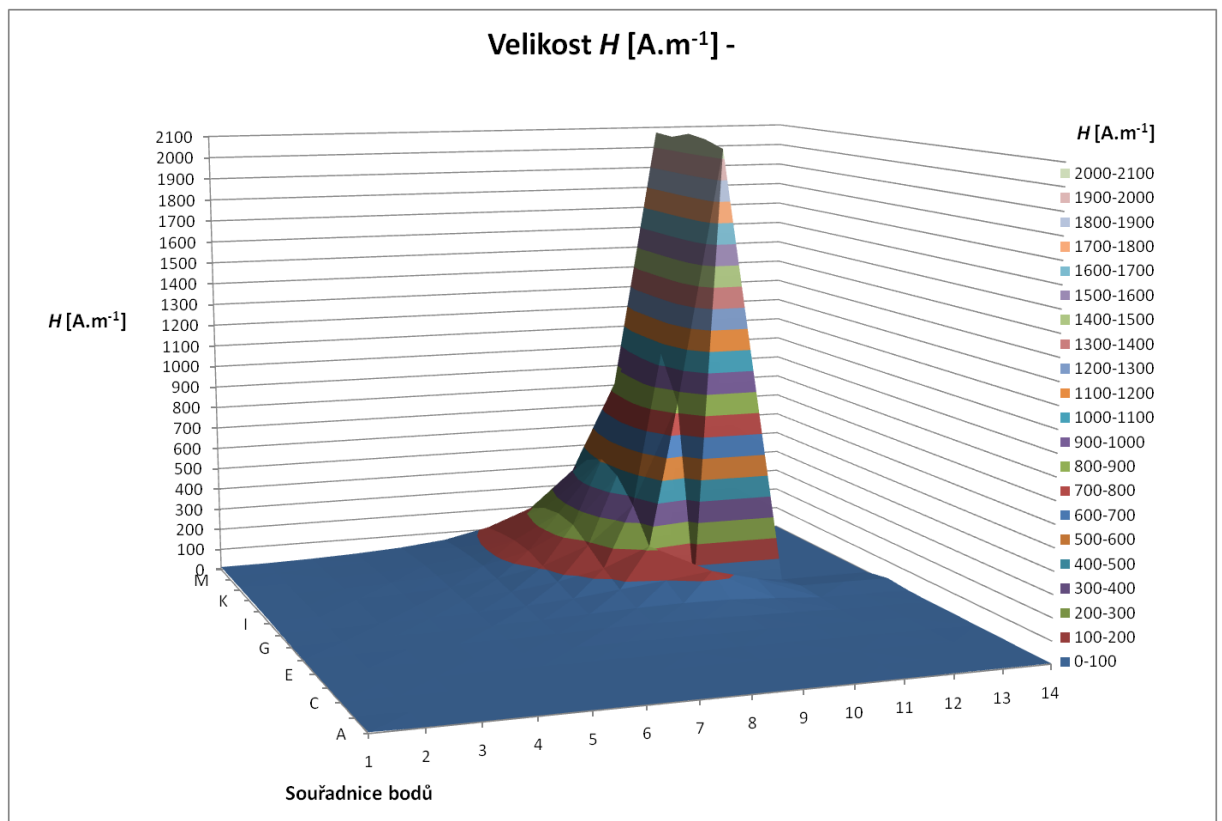
Graf 8.2: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 50 Hz; 31,5 A – řady

8.1.1.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

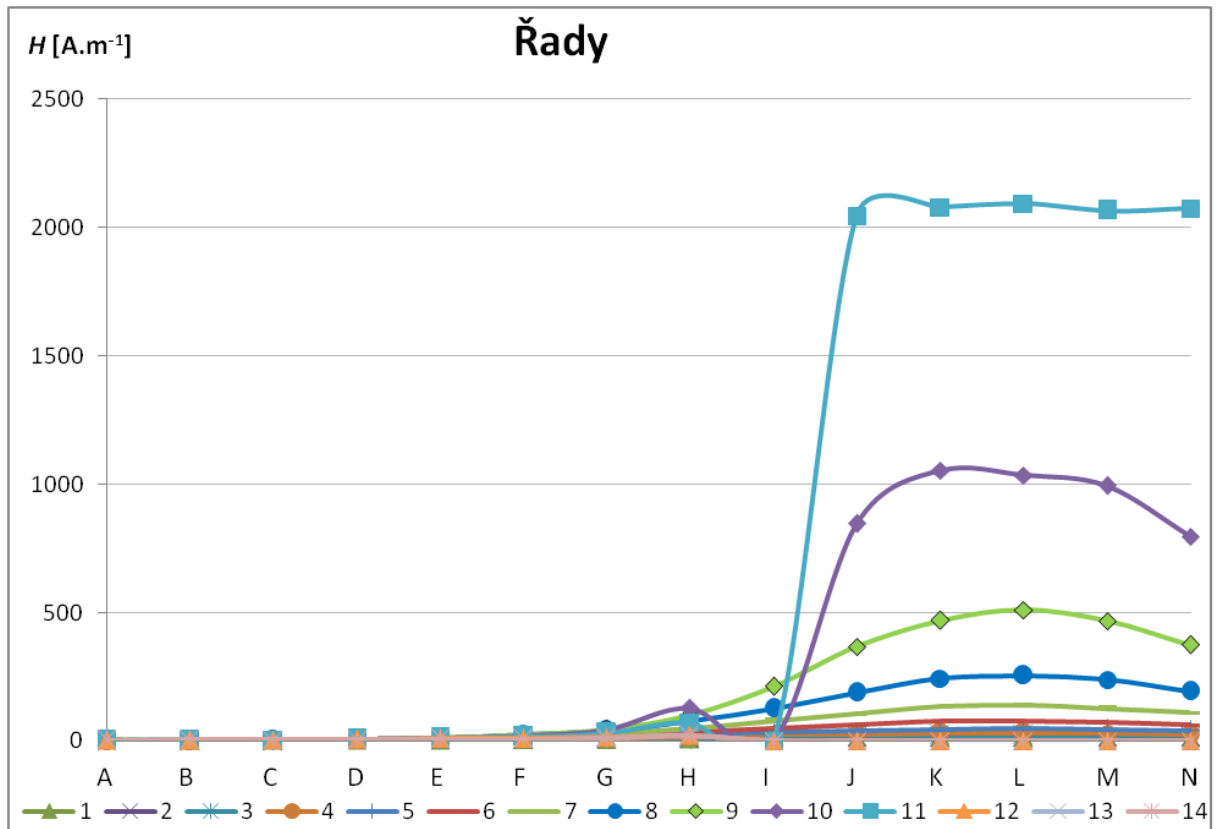
Tabulka 8.2: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním, 31,5 A

Řada/ Sloupec	Intenzita magnetického pole H [A/m]													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	5,1	2,1	2,1	3,4	4,0	4,7	4,7	7,4	10,6	11,4	11,7	12,3	12,0	12,0
2	1,3	1,3	1,3	2,7	4,0	4,7	6,7	8,0	11,6	12,3	12,7	14,1	13,8	13,2
3	1,3	1,3	1,3	3,4	4,7	7,4	9,4	12,7	15,8	18,6	20,9	20,7	19,5	18,6
4	1,3	0,9	2,1	3,4	6,8	9,5	12,1	18,1	23,9	26,0	31,0	31,7	29,9	27,2
5	1,3	1,3	2,7	3,4	7,2	10,2	17,6	24,1	33,1	38,7	45,7	49,0	46,1	40,3
6	2,1	2,1	3,4	4,7	10,2	14,4	22,9	35,8	50,2	62,6	77,2	77,1	72,8	62,6
7	3,0	2,7	4,0	5,5	11,7	21,4	32,3	51,2	79,7	106,1	133,1	137,5	127,2	109,7
8	2,1	2,7	4,0	6,8	12,9	23,2	40,6	75,5	126,1	188,0	243,7	255,7	238,8	192,6
9	2,7	4,0	5,4	7,4	12,3	24,1	44,9	100,0	213,3	367,5	470,5	511,1	467,6	373,4
10	2,7	3,4	4,7	7,4	12,7	20,1	42,3	126,6	0,0	845,1	1053,1	1035,4	994,1	797,1
11	2,1	4,0	5,5	6,8	11,6	16,2	30,5	72,5	0,0	2045,6	2077,7	2092,4	2065,4	2074,4
12	3,4	3,4	4,7	6,8	9,7	11,1	15,8	21,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	3,4	4,0	4,7	4,7	7,6	8,1	12,1	22,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	3,4	4,0	5,4	6,1	7,4	7,4	10,1	19,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Pozn. Tabulka 8.2 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf 8.3 a Graf 8.4) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf 8.3: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním, 31,5 A



Graf 8.4: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním, 50 Hz; 31,5 A – řady

8.1.1.3 Shrnutí

Na Graf 8.1 až Graf 8.4 opět názorně demonstrují vliv stínění na rozložení intenzity magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení, především potom vně induktoru, resp. v oblasti za stíněním. Polohu stínění geometricky definují úrovní sloupce H. Potom je z grafů zřejmé, že nalevo od svazků transformátorových plechů je rozptylový magnetický tok efektivně odstíněn.

Maximální hodnota intenzity magnetického pole H :

induktor $H_{\max} = 2105,7$ A/m, BOD L11,

induktor se stíněním $H_{\max} = 2092,4$ A/m, BOD L11.

Obě tyto hodnoty byly naměřeny v ose induktoru.

Vně induktoru v bodě **D11** byly naměřeny následující **hodnoty** intenzity magnetického pole H :

induktor $H = 127,7$ A/m,

induktor se stíněním $H = 6,8$ A/m.

8.1.2 Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při kmitočtu napájecího proudu induktoru 4100 Hz

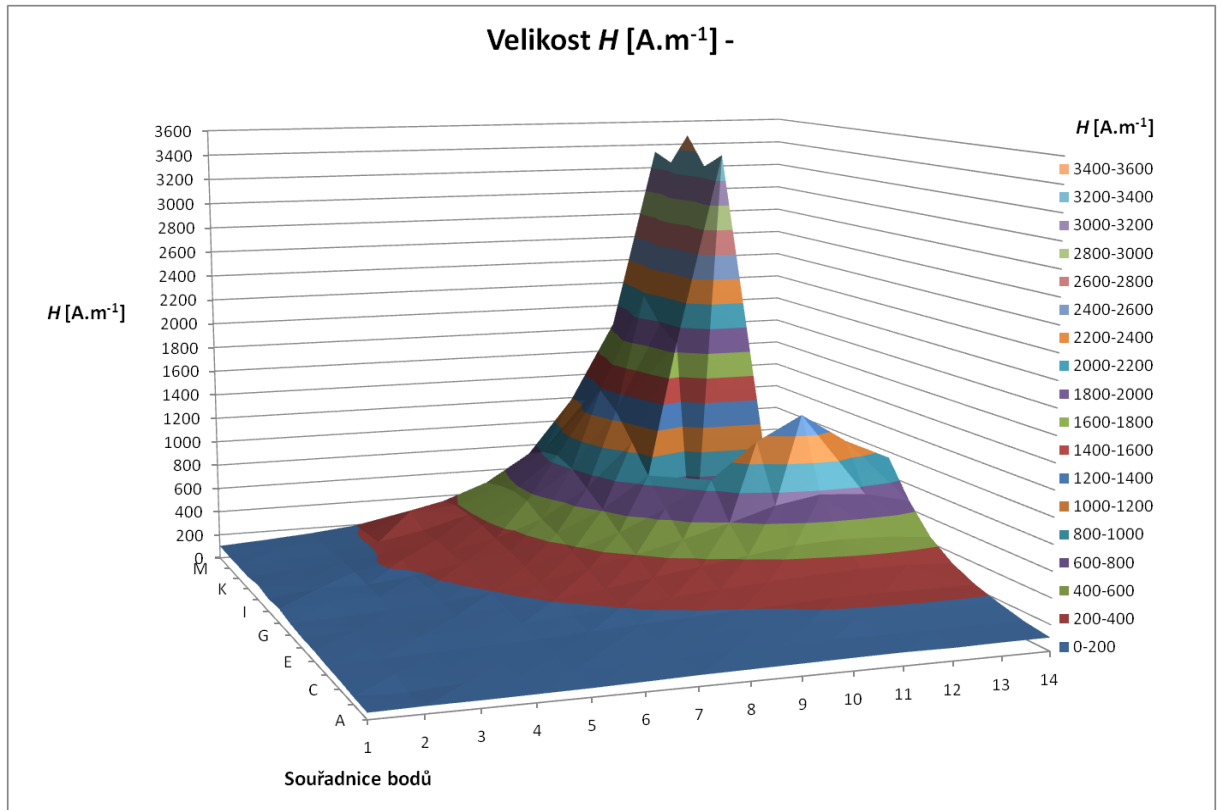
Skutečný proud měřený osciloskopem byl pro induktor 40 A a pro induktor se stíněním 37 A.

8.1.2.1 Induktor bez stínění - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

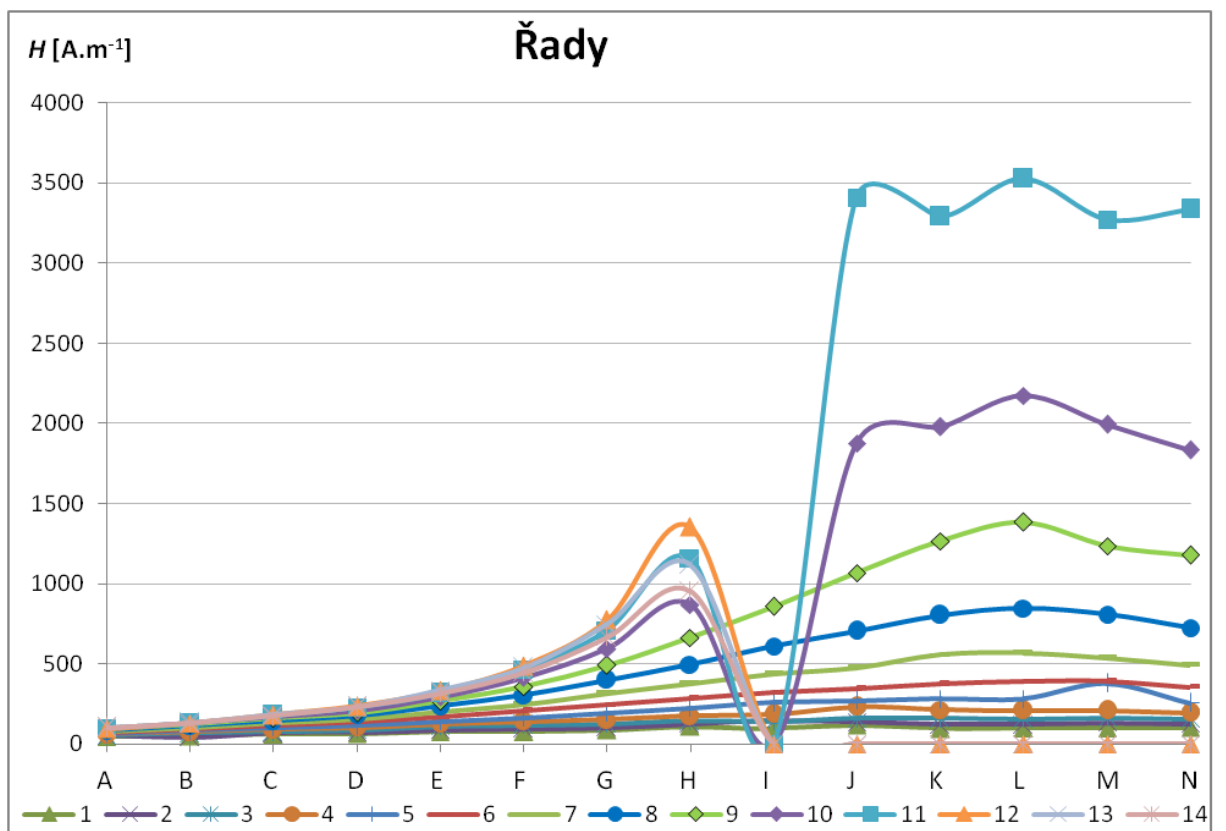
Tabulka 8.3: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 4 100 Hz; 40 A

Intenzita magnetického pole H [A/m]															
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	48,0	52,3	63,3	66,7	76,2	77,2	88,1	111,2	98,6	118,9	97,9	99,7	98,7	103,9	
2	54,4	43,9	69,9	74,2	88,9	96,2	101,7	127,6	144,5	138,0	123,5	124,4	133,1	127,1	
3	55,7	69,8	78,1	86,5	112,2	116,9	126,8	145,3	142,8	161,7	159,1	155,6	162,9	155,0	
4	59,9	77,6	90,6	103,1	126,6	141,0	151,8	174,4	185,6	231,6	215,3	211,3	209,0	195,0	
5	64,7	85,6	103,2	115,0	141,4	165,1	196,0	225,9	258,6	270,2	284,5	282,5	377,3	257,6	
6	72,3	94,5	120,6	137,2	167,8	210,6	246,1	287,2	322,4	346,0	377,4	390,1	392,5	354,1	
7	81,5	103,6	132,1	156,8	204,1	246,9	316,1	377,1	438,7	478,6	556,1	567,4	539,6	492,6	
8	86,2	116,3	146,7	178,1	235,9	305,0	400,2	497,4	610,2	707,6	804,3	846,6	808,6	724,5	
9	91,5	123,6	159,8	196,0	267,4	359,7	491,6	665,1	859,7	1068,4	1267,6	1383,1	1234,7	1180,1	
10	96,8	130,1	171,6	209,3	293,1	417,9	595,1	870,8	0,0	1877,6	1980,6	2175,4	1996,1	1835,7	
11	100,8	128,5	178,9	230,0	315,8	467,4	709,3	1159,4	0,0	3408,6	3290,4	3526,5	3271,2	3338,1	
12	97,4	130,4	182,2	235,2	331,8	486,8	773,6	1353,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	102,6	134,1	182,4	231,9	335,9	478,1	748,4	1117,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	104,1	131,2	177,5	232,9	316,9	447,8	666,0	952,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Pozn. Tabulka 8.3 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf 8.5 a Graf 8.6) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf 8.5: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 4 100 Hz; 40 A



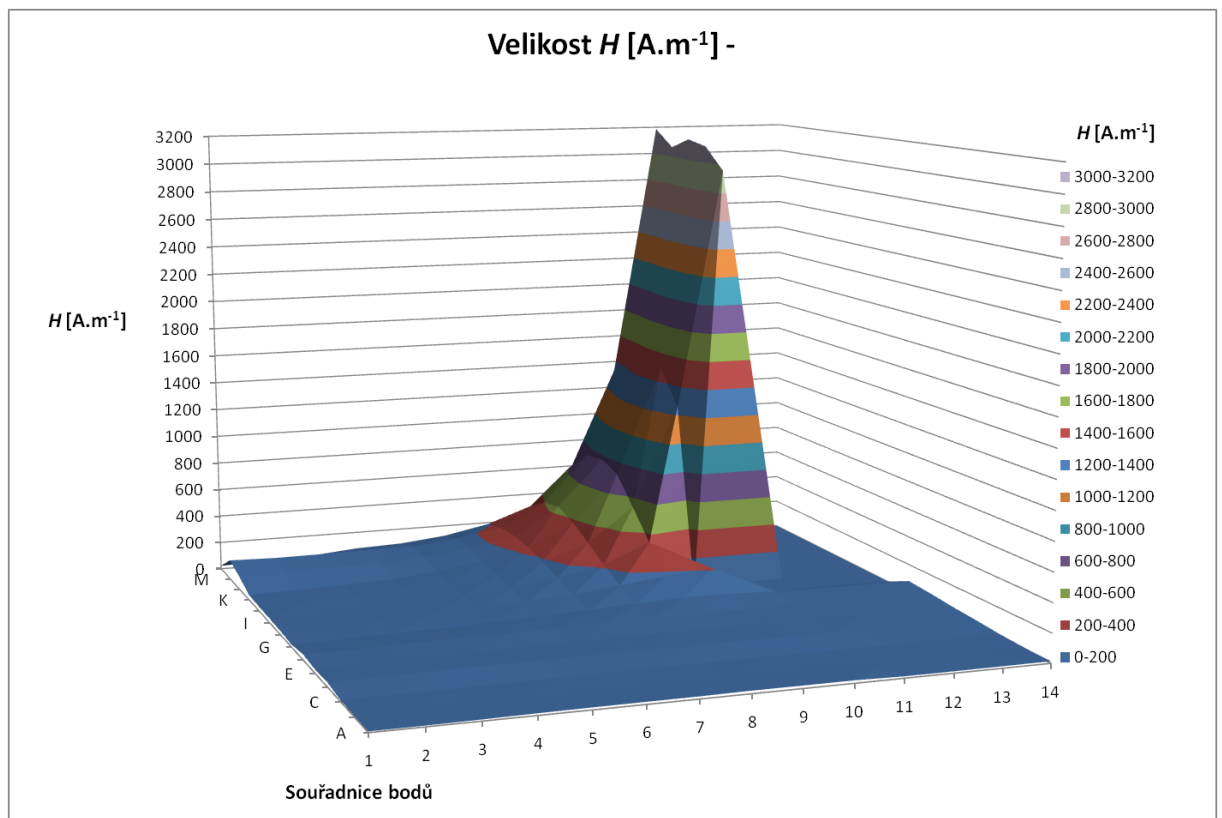
Graf 8.6: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 4 100 Hz; 40 A – řady

8.1.2.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

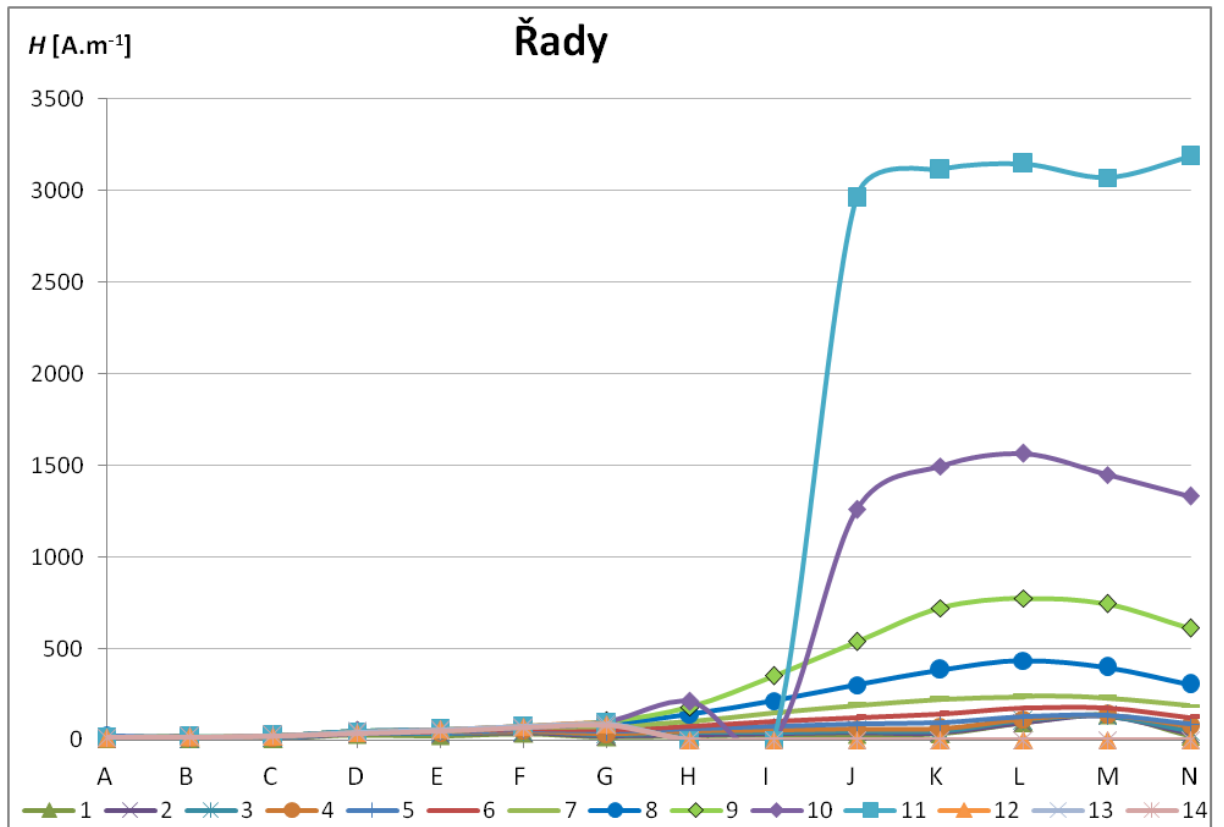
Tabulka 8.4: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 4 100 Hz, 37 A

Řada/ Sloupec	Intenzita magnetického pole H [A/m]													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	7,0	6,4	8,9	29,3	24,8	36,8	17,1	25,3	28,7	30,6	34,4	93,9	137,4	22,1
2	7,3	8,3	10,6	34,0	34,3	39,4	21,7	29,7	33,8	42,5	41,0	95,3	129,5	33,0
3	9,8	8,1	10,9	39,5	37,4	47,5	30,5	39,3	41,2	50,4	51,1	105,8	131,6	47,7
4	13,2	11,1	13,3	41,9	40,6	50,7	34,4	50,6	54,1	61,7	64,5	112,9	135,7	76,4
5	15,0	13,6	17,9	42,6	43,2	55,6	46,3	59,0	72,9	85,9	96,6	128,1	135,8	88,1
6	16,0	15,7	20,8	45,1	46,8	60,5	57,9	77,9	101,0	124,9	145,4	173,1	173,6	122,6
7	16,1	17,3	23,9	46,1	50,5	68,4	73,0	100,7	146,3	189,0	223,4	238,3	231,2	188,0
8	19,3	18,8	21,6	48,0	54,3	74,2	89,6	139,3	213,5	301,1	382,6	435,7	399,1	305,0
9	18,6	19,8	23,1	49,4	55,6	74,5	102,3	179,8	349,3	538,9	720,9	774,6	744,6	609,9
10	18,8	19,2	23,1	49,1	57,8	70,5	101,3	209,0	0,0	1258,0	1494,9	1564,9	1448,6	1331,7
11	11,9	18,3	23,0	47,0	56,2	71,4	89,5	0,0	0,0	2961,0	3114,6	3146,1	3068,4	3185,7
12	12,1	17,0	22,1	42,1	56,5	75,3	86,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	13,0	16,2	23,9	42,6	54,9	74,2	85,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	13,9	15,8	23,6	38,5	50,2	67,3	80,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Pozn. Tabulka 8.4 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf 8.7 a Graf 8.8) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf 8.7: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 4 100 Hz, 37 A



Graf 8.8: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 4 100 Hz, 37 A – řady

8.1.2.3 Shrnutí

Na Graf 8.5 až Graf 8.8 opět názorně demonstrují vliv stínění na rozložení intenzity magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení, především potom vně induktoru, resp. v oblasti za stíněním. Polohu stínění geometricky definují úrovní sloupce H. Potom je z grafů zřejmé, že nalevo od svazků transformátorových plechů je rozptylový magnetický tok efektivně odstíněn.

Maximální hodnota intenzity magnetického pole H :

induktor $H_{\max} = 3526,5$ A/m, BOD L11,

induktor se stíněním $H_{\max} = 3185,7$ A/m, BOD N11.

Obě tyto hodnoty byly naměřeny v dutině induktoru.

Vně induktoru v bodě D11 byly naměřeny následující **hodnoty** intenzity magnetického pole H :

induktor $H = 230,0$ A/m,

induktor se stíněním $H = 47,0$ A/m.

8.1.3 Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při kmitočtu napájecího proudu induktoru 10 000 Hz

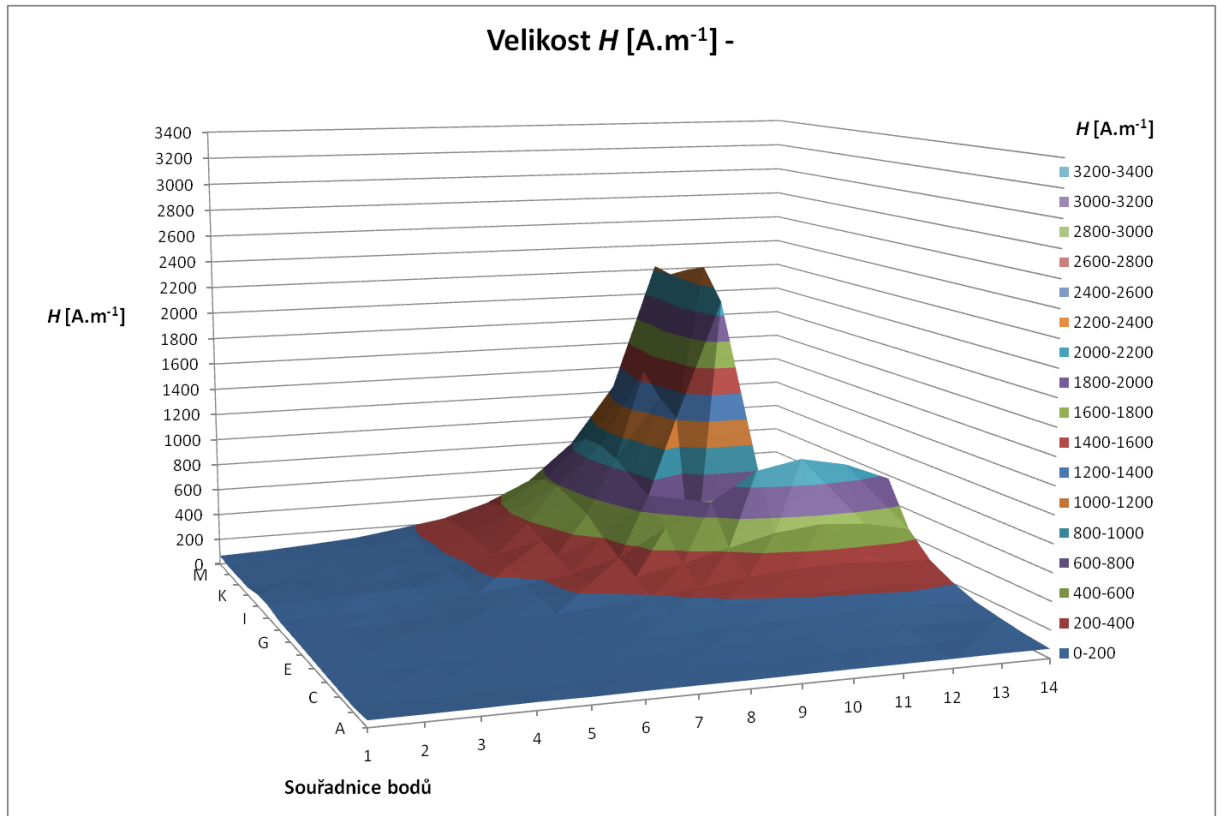
Skutečný proud měřený osciloskopem byl pro induktor 32 A a pro induktor se stíněním 31 A.

8.1.3.1 Induktor bez stínění - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

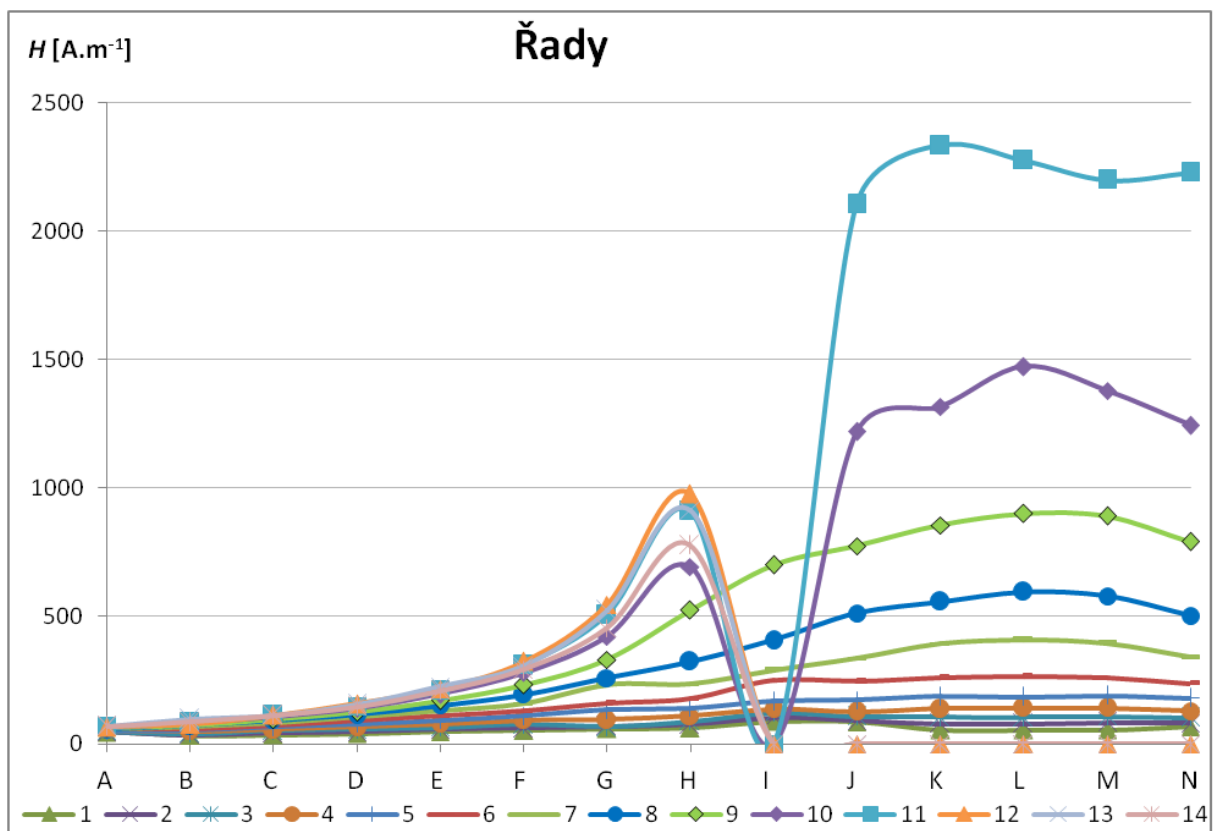
Tabulka 8.5: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 10 000 Hz, 32 A

Intenzita magnetického pole H [A/m]															
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	47,1	33,4	37,1	40,9	48,0	53,8	58,8	63,3	87,8	87,0	56,3	55,6	54,7	66,8	
2	48,5	37,1	44,4	47,5	58,0	62,9	68,7	77,3	103,2	90,4	79,6	78,7	84,4	80,7	
3	50,7	42,0	52,2	57,0	65,7	77,1	67,9	87,6	121,1	107,9	104,9	104,4	107,6	103,2	
4	55,4	49,3	58,3	67,5	79,4	92,7	94,8	110,9	135,9	126,2	137,5	140,5	140,1	129,4	
5	53,1	53,9	67,4	80,0	92,6	109,5	132,8	140,8	166,2	171,7	185,1	183,1	188,7	179,7	
6	56,6	60,4	74,6	92,5	109,2	128,6	160,1	177,0	248,5	245,9	259,1	265,1	257,0	235,2	
7	58,6	67,5	84,0	107,6	130,6	158,1	230,7	233,8	289,6	334,1	390,5	407,5	393,2	337,8	
8	58,6	72,0	94,4	113,6	150,3	193,4	257,0	321,5	404,5	509,6	555,2	594,8	577,2	500,4	
9	62,0	74,6	96,4	123,9	170,4	231,1	328,8	521,2	698,2	772,4	853,7	898,3	888,2	788,2	
10	64,3	80,7	106,8	138,1	194,8	278,6	419,3	691,3	0,0	1218,0	1316,1	1472,0	1378,3	1243,0	
11	64,5	84,4	111,4	149,1	208,8	308,9	504,6	907,4	0,0	2105,1	2334,3	2275,7	2198,9	2228,5	
12	65,9	76,0	111,3	156,4	215,1	322,7	544,1	975,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	68,9	98,4	112,2	155,4	223,9	305,0	521,8	910,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	68,4	85,2	112,8	144,6	207,4	292,1	453,7	775,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Pozn. Tabulka 8.5 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf 8.9 a Graf 8.10) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf 8.9: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 10 000 Hz, 32 A



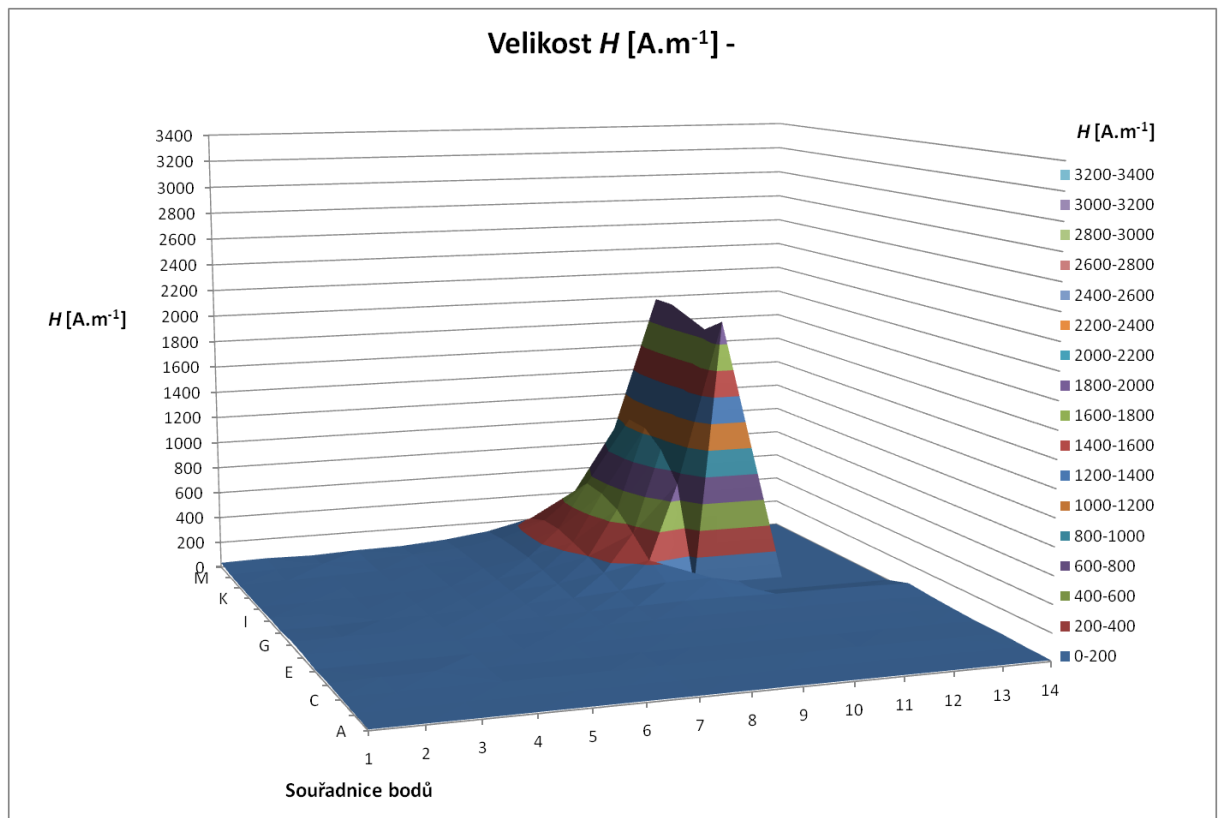
Graf 8.10: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 10 000 Hz, 32 A – řady

8.1.3.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

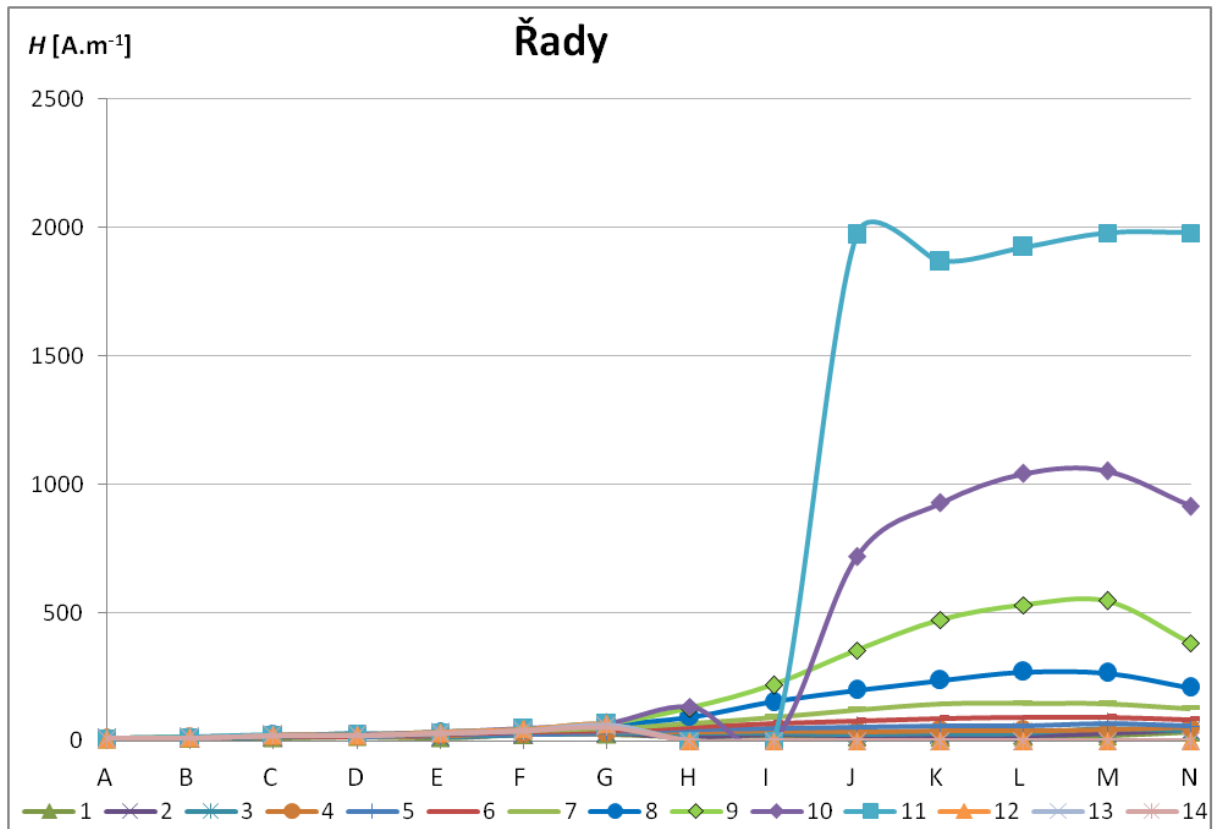
Tabulka 8.6: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 10 000 Hz, 31 A

		Intenzita magnetického pole H [A/m]													
Rada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	8,0	9,6	13,0	17,7	12,8	24,0	27,4	16,4	20,5	14,4	15,6	16,1	19,8	34,3	
2	8,4	10,0	15,5	23,9	15,0	24,2	29,6	17,2	24,0	20,4	22,4	22,1	28,4	43,2	
3	8,2	11,5	17,8	28,5	17,9	27,0	31,3	28,8	29,1	26,4	28,9	30,8	47,7	37,4	
4	9,1	12,1	19,3	16,7	21,0	28,8	33,2	34,0	37,7	37,3	41,0	40,9	44,0	52,4	
5	9,2	12,7	20,1	17,6	24,1	26,8	36,8	44,4	50,1	54,6	57,6	60,8	69,5	58,4	
6	9,6	13,0	21,0	18,7	26,3	33,9	41,3	55,8	68,6	78,6	88,4	91,2	92,6	83,4	
7	9,5	12,9	21,4	20,7	28,4	38,5	50,7	68,6	94,3	121,4	143,5	146,2	145,3	126,5	
8	10,0	14,0	22,0	22,4	30,6	43,7	61,4	93,6	152,0	197,5	236,3	268,8	264,9	207,8	
9	10,1	14,1	21,7	23,9	32,8	46,8	69,9	128,2	218,7	353,6	472,3	530,2	545,9	382,7	
10	9,9	13,4	22,7	24,3	34,1	46,9	69,3	133,6	0,0	718,1	927,7	1041,2	1051,4	914,1	
11	9,4	13,9	24,3	22,7	33,0	45,3	64,2	0,0	0,0	1971,4	1866,6	1922,5	1978,0	1979,0	
12	8,7	12,8	22,1	22,4	32,9	44,5	65,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	9,5	12,8	21,3	22,7	30,2	42,0	61,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	9,7	13,3	21,6	21,6	29,3	39,6	54,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Pozn. Tabulka 8.6 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf 8.11 a Graf 8.12) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf 8.11: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 10 000 Hz, 31 A



Graf 8.12: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 10 000 Hz, 31 A – řady

8.1.3.3 Shrnutí

Na Graf 8.9 až Graf 8.12 opět názorně demonstrují vliv stínění na rozložení intenzity magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení, především potom vně induktoru, resp. v oblasti za stíněním. Polohu stínění geometricky definují úrovní sloupce H. Potom je z grafů zřejmé, že nalevo od svazků transformátorových plechů je rozptylový magnetický tok efektivně odstíněn.

Maximální hodnota intenzity magnetického pole H :

induktor $H_{\max} = 2334,3$ A/m, BOD K11,

induktor se stíněním $H_{\max} = 1979,0$ A/m, BOD N11.

Obě tyto hodnoty byly naměřeny v dutině induktoru.

Vně induktoru v bodě D11 byly naměřeny následující **hodnoty** intenzity magnetického pole H :

induktor $H = 149,1$ A/m,

induktor se stíněním $H = 22,7$ A/m.

8.1.4 Vyhodnocení výsledků získaných měřeními vlivu stínění při rozdílném kmitočtu a vyvození praktických závěrů

Pro lepší a názornější vyhodnocení vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem indukčního zařízení jsem se rozhodl zavést pomocnou veličinu Zmenšení intenzity magnetického pole d [%]. Procentuální hodnoty v tabulkách vyjadřují, o kolik procent se sníží H přidáním stínění svazky transformátorových plechů v porovnání s nestíněným modelem. Rozdíl velikostí intenzit magnetického pole těchto dvou uspořádání představuje diferenci, podle které jsem veličinu pojmenoval. Výsledné hodnoty jsou vypočteny pomocí vzorce:

$$d [\%] = \frac{(H_{BezS} - H_{SeS})}{H_{BezS}} \cdot 100, \quad (8.1)$$

kdy hodnota uvedená v závorce představuje rozdíl obvykle vyšší nestíněné intenzity magnetického pole H_{BezS} a obvykle nižší stíněné intenzity magnetického pole H_{SeS} . Jedná se tedy o porovnání, o kolik jednotek A/m je stíněná hodnota nižší než nestíněná. Hodnota intenzity magnetického pole H uvedená ve jmenovateli představuje nestíněnou intenzitu magnetického pole H_{BezS} , vůči které je nutné rozdíl v čitateli poměrně vztáhnout pro získání poměrné veličiny. Tuto hodnotu jsem vybral záměrně, protože vypočítané Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] vlivem stínění transformátorovými plechy je nutné porovnat vůči původnímu stavu bez použití stínění. Hodnoty v uvedených tabulkách je tedy možné interpretovat takto: čím je hodnota v procentech větší, tím je vlivem přidání stínění intenzita magnetického pole v daném bodě menší o d procent původního uspořádání bez stínění.

Nyní provedu porovnání výsledků pro vyšší hodnotu proudu nastaveného na zdroji 31 A. Pro nižší hodnotu napájecího proudu induktoru 15 A nastavenou na zdroji jsou výsledky včetně porovnávacích grafů uvedeny v příloze A.1. Tabulky jsou původně vytvořeny pro porovnání vlivu přídavných konstrukčních prvků. Problematika zde funguje zcela analogicky a přídavný konstrukční prvek zde reprezentuje stínění svazky transformátorových plechů, které jsou zde tedy srovnávány se samotným induktorem.

Tabulka 8.7: Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] při kmitočtu 50 Hz a 31 A na zdroji

Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem d [%]														
Řada/ sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	71,0	89,9	91,7	88,7	88,5	88,3	89,6	84,8	79,7	79,7	79,9	79,2	79,8	78,6
2	93,8	94,7	95,4	92,2	90,2	90,1	87,3	86,7	82,3	82,3	82,8	81,3	81,7	81,4
3	94,4	95,4	96,3	92,0	90,2	87,5	86,1	83,0	80,9	79,0	77,8	78,7	79,5	79,7
4	95,0	97,3	95,0	93,1	88,7	86,9	85,6	81,5	77,7	78,0	75,0	75,1	75,9	76,8
5	95,7	96,6	94,5	94,2	90,1	88,3	83,7	81,2	76,2	75,0	72,3	71,2	72,4	74,6
6	94,0	95,4	94,0	93,4	88,4	87,0	83,2	77,9	73,8	70,1	66,1	67,2	67,8	70,5
7	92,4	94,7	93,9	93,3	89,1	84,7	81,6	76,9	69,7	64,8	60,0	59,6	61,8	64,4
8	95,1	95,3	94,6	93,0	89,9	86,4	81,6	74,2	66,0	57,6	50,5	49,8	52,2	57,0
9	94,2	93,5	93,5	93,3	91,8	88,4	84,4	72,4	60,6	46,4	38,5	36,4	40,8	46,6
10	94,3	94,7	94,5	93,8	92,5	91,7	88,3	77,6	0,0	23,1	16,5	19,6	20,6	28,4
11	95,6	94,0	93,9	94,7	93,6	94,0	92,9	90,0	0,0	-2,7	0,3	0,6	1,6	-6,9
12	92,9	94,9	94,9	94,8	94,8	96,1	96,5	97,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	93,3	94,1	94,9	96,3	95,9	97,0	97,1	96,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	93,4	94,2	94,5	95,3	96,0	97,2	97,5	96,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabulka 8.8: Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] při kmitočtu 4 100 Hz a 31 A

Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem d [%]														
Řada/ sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	85,4	87,8	86,0	56,1	67,5	52,4	80,6	77,3	70,9	74,3	64,8	5,8	-39,2	78,7
2	86,5	81,0	84,8	54,2	61,5	59,0	78,6	76,7	76,6	69,2	66,8	23,4	2,7	74,0
3	82,5	88,3	86,0	54,3	66,7	59,3	75,9	73,0	71,1	68,8	67,8	32,0	19,2	69,3
4	78,0	85,7	85,4	59,4	68,0	64,1	77,3	71,0	70,8	73,4	70,0	46,5	35,1	60,8
5	76,8	84,1	82,7	62,9	69,5	66,3	76,4	73,9	71,8	68,2	66,1	54,7	64,0	65,8
6	77,8	83,4	82,8	67,1	72,1	71,3	76,5	72,9	68,7	63,9	61,5	55,6	55,8	65,4
7	80,2	83,3	81,9	70,6	75,3	72,3	76,9	73,3	66,7	60,5	59,8	58,0	57,2	61,8
8	77,6	83,8	85,3	73,0	77,0	75,7	77,6	72,0	65,0	57,4	52,4	48,5	50,6	57,9
9	79,7	83,9	85,5	74,8	79,2	79,3	79,2	73,0	59,4	49,6	43,1	44,0	39,7	48,3
10	80,5	85,2	86,5	76,5	80,3	83,1	83,0	76,0	0,0	33,0	24,5	28,1	27,4	27,5
11	88,2	85,7	87,1	79,6	82,2	84,7	87,4	0,0	0,0	13,1	5,3	10,8	6,2	4,6
12	87,6	86,9	87,9	82,1	83,0	84,5	88,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	87,3	87,9	86,9	81,6	83,6	84,5	88,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	86,7	87,9	86,7	83,5	84,1	85,0	88,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabulka 8.9: Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] při kmitočtu 10 000 Hz a 31 A

Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem d [%]														
Řada/ sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	83,0	71,3	64,9	56,7	73,3	55,5	53,4	74,2	76,6	83,4	72,3	71,1	63,8	48,6
2	82,8	73,0	65,2	49,7	74,1	61,5	57,0	77,7	76,8	77,4	71,9	71,9	66,3	46,5
3	83,9	72,6	66,0	50,1	72,7	65,0	53,9	67,2	76,0	75,5	72,4	70,5	55,7	63,7
4	83,6	75,4	66,8	75,2	73,6	69,0	65,0	69,4	72,3	70,5	70,2	70,9	68,6	59,5
5	82,6	76,4	70,2	78,1	74,0	75,5	72,3	68,5	69,9	68,2	68,9	66,8	63,2	67,5
6	83,0	78,4	71,9	79,8	75,9	73,6	74,2	68,5	72,4	68,0	65,9	65,6	64,0	64,5
7	83,8	80,9	74,5	80,8	78,3	75,7	78,0	70,7	67,4	63,7	63,2	64,1	63,0	62,5
8	83,0	80,5	76,7	80,2	79,6	77,4	76,1	70,9	62,4	61,2	57,4	54,8	54,1	58,5
9	83,7	81,1	77,5	80,7	80,8	79,7	78,7	75,4	68,7	54,2	44,7	41,0	38,5	51,4
10	84,6	83,4	78,8	82,4	82,5	83,2	83,5	80,7	0,0	41,0	29,5	29,3	23,7	26,5
11	85,5	83,5	78,2	84,8	84,2	85,3	87,3	0,0	0,0	6,4	20,0	15,5	10,0	11,2
12	86,7	83,2	80,2	85,7	84,7	86,2	88,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	86,2	87,0	81,0	85,4	86,5	86,2	88,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	85,9	84,4	80,8	85,1	85,9	86,5	88,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Na základě uvedených vybraných tabulek (Tabulka 8.7, Tabulka 8.8 a Tabulka 8.9) pro napájecí proud induktoru nastavený na zdroji 31 A (skutečný proud změřený osciloskopem a pomocí proudových kleští je uveden v předchozí kapitole u jednotlivých výsledků měření) můžu vyvodit závěr, že použité stínění je neúčinnější při frekvenci 50 Hz.

Maximální hodnota Zmenšení intenzity magnetického pole d [%]:

50 Hz: $d_{max} = 97,5$ [%]

4,1 kHz: $d_{max} = 88,8$ [%]

10 kHz: $d_{max} = 88,2$ [%]

Průměrná hodnota Zmenšení intenzity magnetického pole d [%]:

50 Hz: $d_{prům} = 79,8$ [%]

Pozn. k 50 Hz: Respektive 79,5 % při stejném počtu hodnot jako při frekvenci 4 100 Hz a 10 000 Hz. V případě 50 Hz jsem proměřil i indukovaná napětí v bodech H11 až H14, která pro případ vysoké frekvence chybí.

4,1 kHz: $d_{prům} = 67,7$ [%]

10 kHz: $d_{prům} = 69,8$ [%]

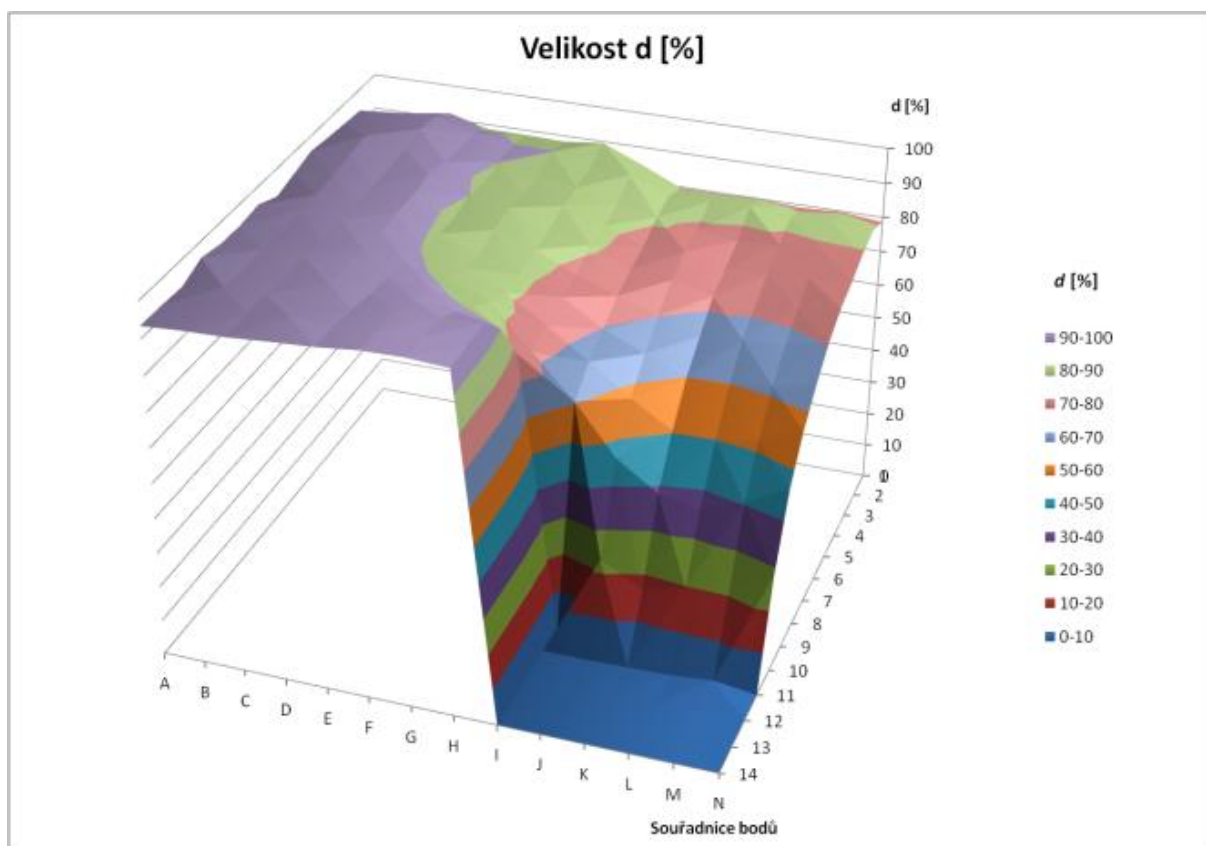
Účinnost stínění při užití vysoké frekvence je menší a rozdíl $d_{prům}$ oproti síťové frekvenci napájecího proudu je roven:

4,1 kHz: 12,1 % (resp. 11,8 %viz Pozn. k 50 Hz výše)

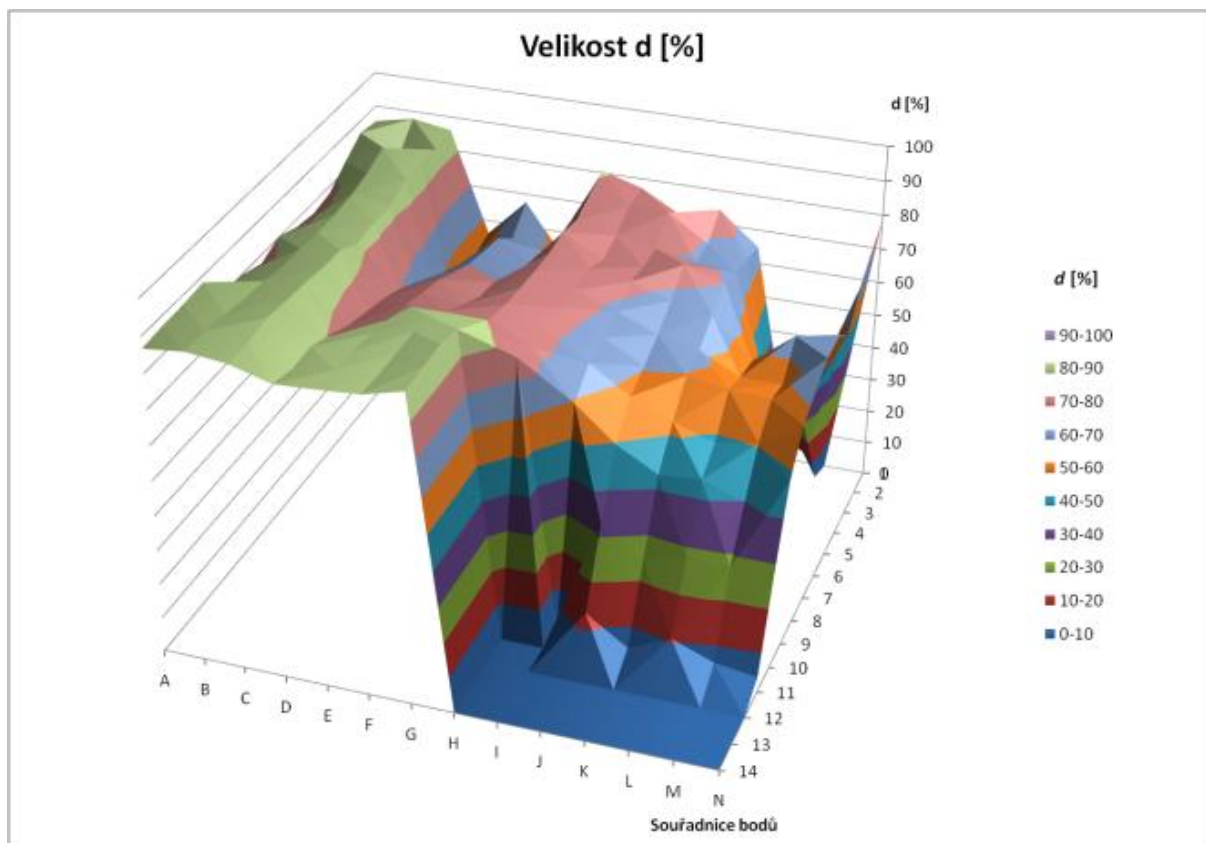
10 kHz: 10,0 % (resp. 9,7 %viz Pozn. k 50 Hz výše)

Rozdíl při použitých vysokých frekvencích 10 kHz a 4,1 kHz je roven pouze 2,1 %.

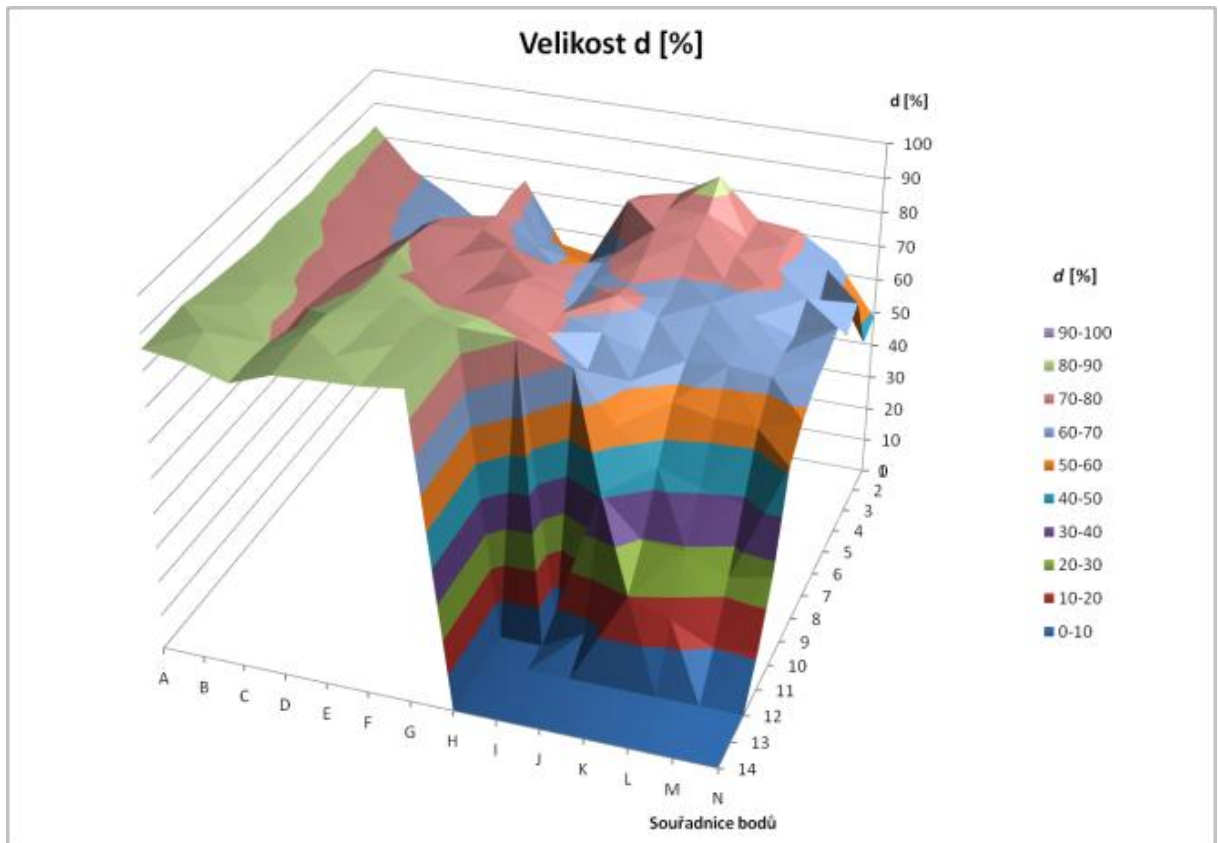
Veličinu Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] pro tři zvolené frekvence a velikost 31 A napájecího proudu induktoru nastavené na zdroji můžu ještě pro názorné vizuální porovnání zobrazit v 3D grafech (Graf 8.13 až Graf 8.15).



Graf 8.13: 50 Hz, 31 A nastaveno na zdroji



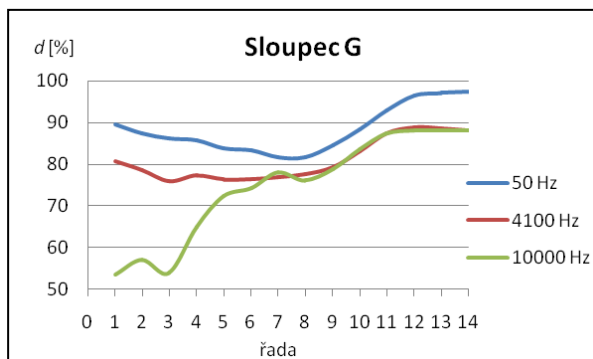
Graf 8.14: 4 100 Hz, 31 A nastaveno na zdroji



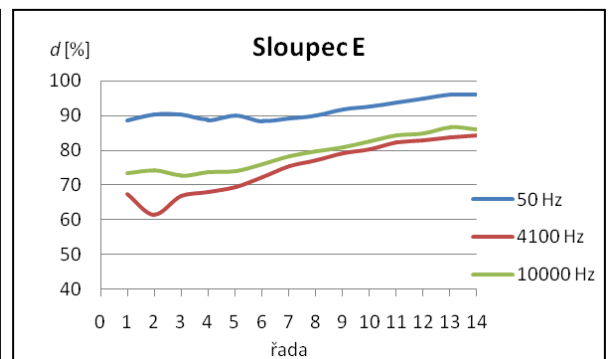
Graf 8.15: 10 000 Hz, 31 A nastaveno na zdroji

V uvedených grafech jsou názorně vidět předchozí závěry uvedené výše. Pro detailnější vyhodnocení lze také veličinu Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] vynést do grafu pro konkrétní řádek nebo sloupec a porovnat současně mezi sebou rozdílné použité frekvence napájecího proudu induktoru.

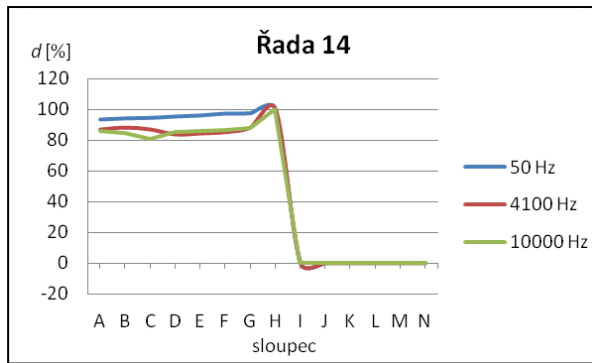
Srovnání vlivu stínění pomocí Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] pro vybrané sloupce a řádky viz Graf 8.16 až Graf 8.19.



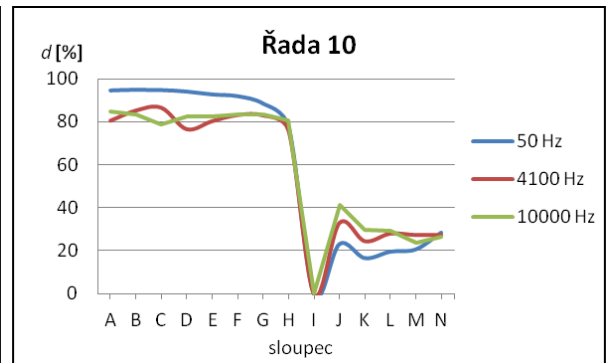
Graf 8.16: Sloupec G, 31 A



Graf 8.17: Sloupec E, 31 A

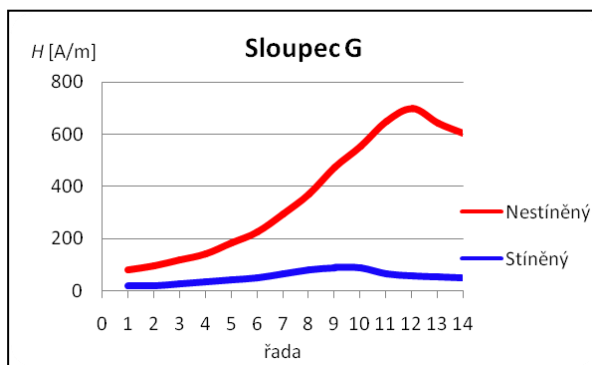


Graf 8.18: Řada 14, 31 A

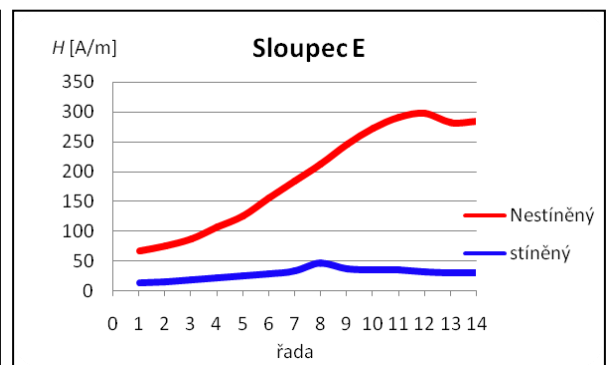


Graf 8.19: Řada 10, 31 A

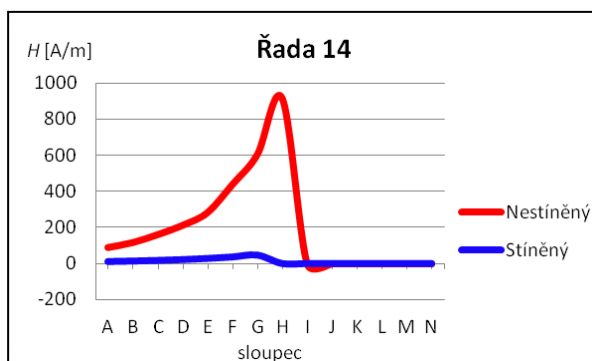
Osobně preferuji porovnání vlivu stínění pomocí procentuální hodnoty. Existuje zde samozřejmě ještě další možnost. Porovnání pro 4 100 Hz a napájecí proud induktoru 15 A nastavený na zdroji demonstrují nyní pro induktor a induktor se stíněním pro konkrétní dva řádky a sloupce přímo pomocí vynesené intenzity magnetického pole H do 2D grafů. Jedná se o druhou možnost porovnání hodnot pomocí vizualizace velikosti intenzity magnetického pole H , viz Graf 8.20 až Graf 8.23.



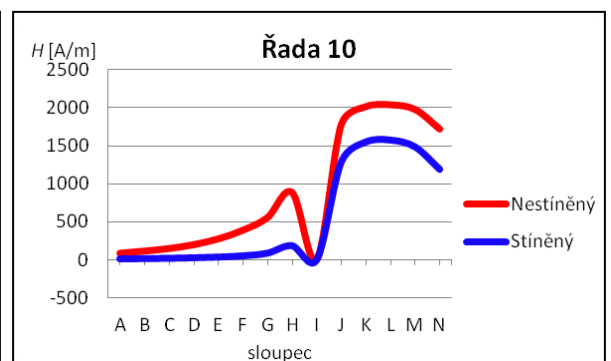
Graf 8.20: Sloupec G, 15 A



Graf 8.21: Sloupec E, 15 A



Graf 8.22: Řada 14, 15 A



Graf 8.23: Řada 10, 15 A

V těchto 2D grafech, které ukazují hodnoty intenzity magnetického pole H vždy pro stíněný a nestíněný model současně, je názorně zobrazen vliv stínění ve vnější oblasti kolem

zkoumaného fyzikálního modelu indukčního zařízení. Z uvedených 2D grafů rovněž vyvozují závěr, že největší odstínění nastalo v námi požadované oblasti za stíněním, to jest vně induktoru. V ose induktoru je potom stínící vliv paketů při srovnání obou konfigurací menší.

Při mnou zvolené měřicí metodě měření pomocí měřicí cívky malého průměru je nezbytně nutné brát v úvahu možné nepřesnosti měření. Tyto mohou být přirozeně způsobeny již samotným principem měření – tj. odečítáním hodnot z měřicího přístroje připojeného k měřicí cívce natáčené do požadovaného směru. Zde velmi záleží na umístění a natočení měřicí cívky především v oblasti blízké k induktoru, kdy natočením o malý úhel nastává poměrně velký rozdíl měřených hodnot. Přesnou fixaci měřicí cívky zde neprovádím z důvodu obtížné proveditelnosti.

Dalším aspektem, který je nutné při tomto měření brát v úvahu, je jistě samotná konstrukce měřicích cívek. Při tomto měření byly použity dvě nové z celkem 6-ti dostupných cívek. Cívky jsem sestrojil a poté vhodně zvolil ke konkrétnímu měření podle konstrukčního uspořádání tak, aby byly maximálně vhodné pro požadovanou frekvenční úroveň. Měření však prokázalo, že přívodní vodiče ke křížové měřicí cívce, kterou jsem jako jedinou osobně nenavrhoval, byly nevhodně zvoleny pro případy vysokého kmitočtu napájecího proudu induktoru. Tyto přívodní vodiče tvoří krátká nekroucená dvojlinka, která se z důvodu absence prokroucení vodičů nebo případně stínícího pláště umístěného kolem vodičů pro takové frekvence nehodí a může tedy vnášet nepřesnosti do měření.

I přes zmíněné aspekty lze bez problémů tímto způsobem vyhodnotit vliv stínících svazků transformátorových plechů na vnější oblasti induktoru. Zde se pomocná veličina Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] pohybuje kolem 90 %. Z uvedených tabulek a prezentovaných grafů lze rovněž zjistit pokles veličiny Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] v ose induktoru. Tento pokles je názorně viditelný například ve sloupcích K, L a M a jeho příčinou je vliv stínících svazků transformátorových plechů. Jeho příčinou je vliv dobře magneticky vodivých svazků transformátorových plechů.

V následující tabulce Tabulka 8.10 uvádím změřené hodnoty pro dva vybrané sloupce, které prochází dutinou zkoumaného induktoru, a poslední dvě řady. Zde je předchozí tvrzení měřením názorně ověřeno.

Tabulka 8.10: Intenzita magnetického pole H [A/m] a Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] uvnitř induktoru

f [Hz]	Sloupec L				Sloupec M			
	řada	H_{BezS} [A/m]	H_{SeS} [A/m]	d [%]	řada	H_{BezS} [A/m]	H_{SeS} [A/m]	d [%]
4 100 Hz	13	5293,1	5521,2	-4,3	13	5534,4	5692,5	-2,9
	14	5608,7	6350,8	-13,2	14	6023,1	6193,0	-2,8
10 000 Hz	13	3089,2	3720,1	-20,4	13	3211,3	4010,9	-24,9
	14	3282,9	4298,2	-31,0	14	3200,9	4303,8	-34,5

Uvnitř dutiny induktoru již prokazatelně vidíme záporné hodnoty zmenšení intenzity magnetického pole d do -35 %. Z tabulky je patrné že s vyšším kmitočtem jsem dosáhl nižšího zmenšení intenzity magnetického pole d uvnitř induktoru, intenzita magnetického pole H v konfiguraci se stíněním je tedy uvnitř induktoru výrazně vyšší než v konfiguraci bez stínění, což potvrzuje známý předpoklad vlivu stínění. Zvětšení magnetického toku uvnitř induktoru způsobí zejména vyšší účinnost pece a logicky zvyšuje efektivitu tavby. Jedná se tedy po energetické stránce o vítanou možnost snížení energetické náročnosti ohřevu elektromagnetickou indukcí. Po ekonomické stránce je přítomnost stínění také pozitivní, protože vyšší účinnost zlepšuje ekonomiku tavby. Na druhou stranu stínění představuje značné pořizovací náklady, protože orientované plechy válcované za studena představující silně magnetický materiál s vysokou magnetickou vodivostí jsou díky technologické úpravě stále velmi drahé.

8.2 Vliv přídavných konstrukčních prvků

Měření k posouzení vlivů přídavných konstrukčních prvků jsem prováděl pro dvě frekvence napájecího proudu induktoru 4 000 Hz a 10 000 Hz jako samostatné měření pro samotný induktor a induktor stíněný svazky transformátorových plechů a dále stíněný induktor s příslušným otevřeným nebo uzavřeným prvkem. Použil jsem zde tyto uzavřené a otevřené prvky:

1. plochý prstenec (plochý kruh),
2. dva závity,
3. dutý vodič (dutý kruh),
4. plný vodič (plný kruh).

Uvedu zde výsledky měření pro plochý prstenec otevřený a uzavřený. Výsledky měření pro další prvky kompletně uvádím v Příloha A.2.

8.2.1 Výsledky měření pro frekvenci 4 000 Hz

Napájecí proud induktoru byl pomocí osciloskopu a proudových kleští stanoven na 23 A (na zdroji nastavena hodnota 15 A).

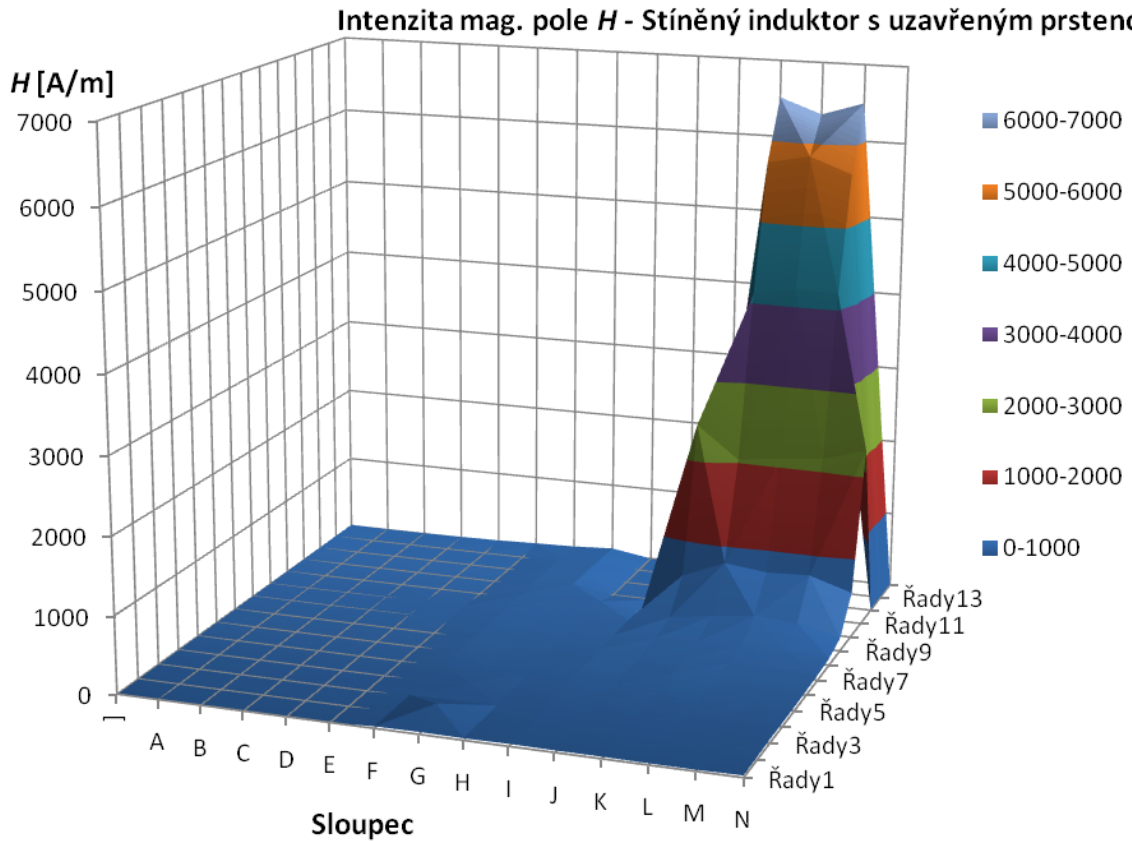
8.2.1.1 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřeným plochým prstencem nad stíněním

Tabulka 8.11: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s uzavřeným plochým prstencem nad stíněním

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	10,1					25,9	30,2	25,4	30,8	25,6	25,8	20,8	19,4	26,6
2						23,0	183,9	29,4	37,8	32,8	33,6	27,1	29,0	35,5
3						22,2	29,0	34,4	42,4	35,7	39,6	34,0	38,3	46,2
4						26,1	49,9	37,6	48,7	44,7	38,8	43,0	40,9	45,6
5						27,9	34,6	42,0	56,2	51,6	55,2	45,3	45,5	48,4
6						31,1	36,6	46,4	62,7	55,1	71,6	55,9	56,9	56,2
7						37,0	41,7	48,8	68,3	63,8	75,0	80,2	73,6	64,1
8	4,7	4,8	6,8	10,4	16,0	42,0	46,6	49,9	61,4	93,1	118,8	139,8	127,4	87,8
9	5,2	6,7	9,5	13,8	20,3	45,6	50,9	58,7	77,4	184,0	268,0	339,4	301,5	167,7
10						52,1	71,5	88,5		576,9	806,0	742,3	764,6	594,1
11						58,7	97,5			2453,0	2040,7	2111,6	2160,1	2327,3
12						64,8	100,2				4113,9	4215,7	4201,4	
13						58,9	95,6				5747,2	5859,7	5658,6	
14	8,6	9,9	13,7	22,4	39,4	53,4	85,8				6515,7	6320,9	6496,5	

Tabulka 8.12: Teploty přídavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, uzavřený plochý prstenc

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
21,8	24,1	22,2	23,3	22,1	23,9	Vrchní	21,8	29,4
						Střední	21,8	27,6
						Spodní	21,8	29,6



Graf 8.24: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s plochým uzavřeným prstencem nad stíněním

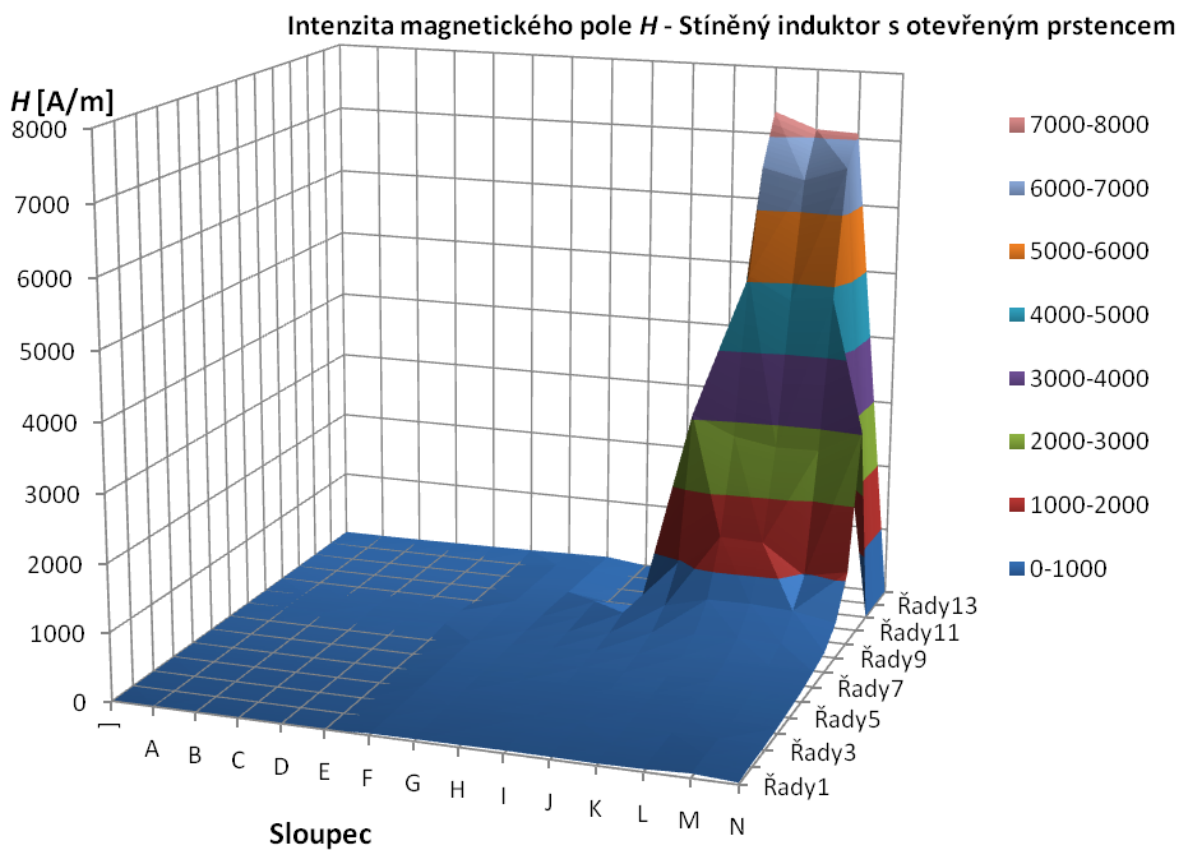
8.2.1.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřeným plochým prstencem nad stíněním

Tabulka 8.13: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s otevřeným plochým prstencem nad stíněním

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	9,0					28,1	33,5	35,5	42,0	36,6	32,0	40,2	66,8	28,4
2						33,2	38,9	47,8	52,0	46,5	50,5	51,1	77,9	51,4
3						37,9	47,6	55,7	64,5	70,1	65,7	71,4	78,5	55,7
4						46,9	53,3	62,6	76,1	86,0	88,1	97,3	92,7	82,9
5						49,0	60,7	78,6	89,0	102,5	106,5	121,3	120,6	112,8
6						55,0	71,2	95,1	116,1	131,2	143,5	160,3	157,6	152,8
7						63,9	79,3	115,8	150,2	182,4	214,0	225,5	221,1	217,4
8	13,3	19,5	24,7	34,7	48,1	67,3	96,5	149,2	214,0	292,3	350,8	375,0	352,1	293,4
9	13,2	19,4	27,4	37,3	50,7	71,8	106,1	182,2	315,2	500,2	668,6	674,6	640,2	533,1
10						74,6	105,3	216,7		963,7	1435,2	1412,6	976,1	1101,6
11						69,2	90,8			3073,6	2798,9	2690,5	2700,4	3045,2
12						64,5	85,1				5087,9	4760,5	4827,5	
13						63,0	82,4				6600,2	6445,4	6661,4	
14	14,7	18,9	27,9	35,1	46,9	60,8	73,8				7335,7	7106,7	7078,5	

Tabulka 8.14: Teploty přídavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, otevřený plochý prstavec

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
24,3	26,1	23,7	25	23,7	25,1	Vrchní	24	36,4
						Střední	23,8	33,9
						Spodní	23,7	39,8



Graf 8.25: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s plochým otevřeným prstencem nad stíněním

8.2.2 Výsledky měření pro frekvenci 10 000 Hz

Napájecí proud induktoru byl pomocí osciloskopu a proudových kleští stanoven na 23 A (na zdroji nastavena hodnota 15 A).

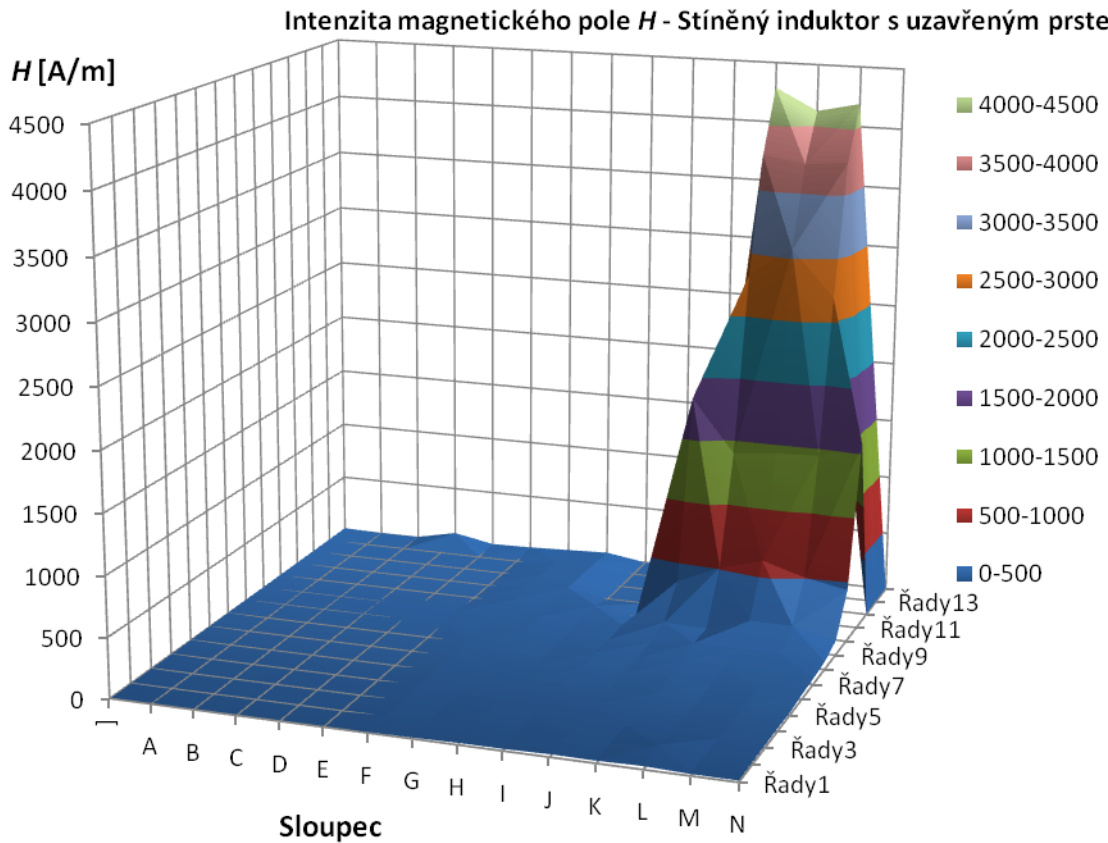
8.2.2.1 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřeným plochým prstencem nad stíněním

Tabulka 8.15: Intenzita H vypočtená z naměřených hodnot induktoru stíněného transformátorovými plechy s uzavřeným prstencem

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	2,8					8,4	10,5	16,3	16,3	23,3	20,8	27,5	15,0	14,1
2						9,7	12,6	19,9	19,0	29,4	28,9	59,6	23,2	16,7
3						11,7	14,6	24,6	24,7	32,3	31,0	28,5	29,0	19,2
4						15,2	17,7	25,3	32,5	35,1	33,7	26,5	30,5	22,9
5						15,4	19,4	25,6	30,5	31,1	41,8	28,8	35,7	19,2
6						15,8	21,7	27,0	37,5	37,5	41,0	36,5	46,0	37,8
7						17,9	26,4	29,7	47,3	44,8	58,5	53,1	50,9	46,6
8	3,6	3,5	5,2	7,6	11,0	20,1	30,7	29,5	36,6	58,8	92,9	88,9	85,6	64,1
9	4,5	4,5	6,5	10,1	13,6	24,0	34,6	33,3	44,7	111,7	99,1	209,9	206,4	120,6
10						29,9	40,5	57,0		353,5	512,6	613,7	508,3	439,5
11						36,0	62,1			1836,7	1396,8	1433,2	1446,8	1578,5
12						40,5	63,7				2831,8	3074,3	2692,5	
13						39,5	59,9				3777,9	3723,1	3756,7	
14	5,0	7,3	81,6	16,0	23,9	37,4	52,2				4289,9	4112,9	4190,5	

Tabulka 8.16: Teploty přídatného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, uzavřený plochý prstenec

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
23,8	26,3	23,3	25,4	23,8	26,8	Vrchní	28,1	25,9
						Střední	26,5	32,4
						Spodní	27,5	37,9



Graf 8.26: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s plochým uzavřeným prstencem nad stíněním

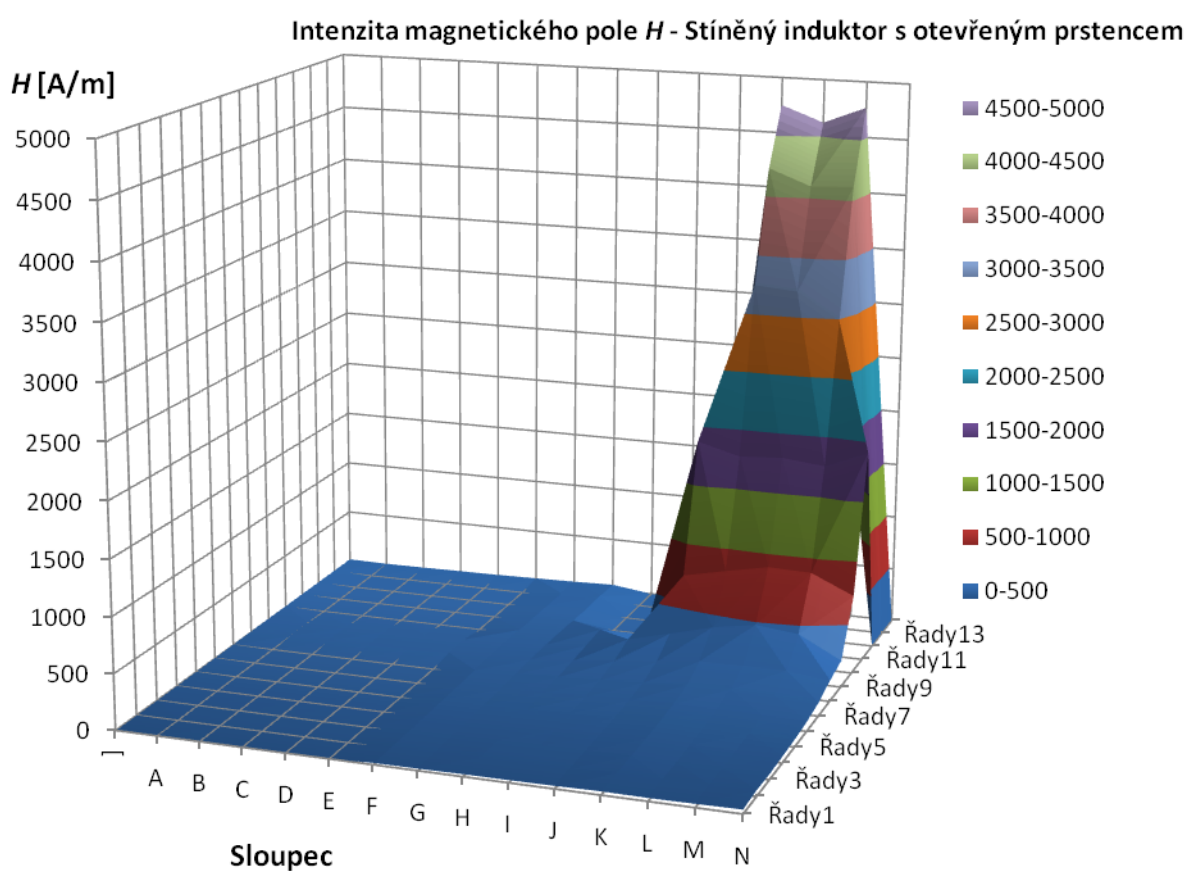
8.2.2.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřeným plochým prstencem nad stíněním

Tabulka 8.17: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s otevřeným plochým prstencem nad stíněním

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	4,2					16,2	17,7	21,9	23,3	25,9	32,2	28,8	32,4	37,7
2						18,0	21,0	27,6	28,4	32,3	43,9	38,9	43,9	53,4
3						20,9	23,3	32,7	35,4	40,7	52,5	43,6	46,7	47,7
4						26,1	27,4	35,3	43,5	49,5	63,5	55,7	51,0	55,7
5						29,1	33,4	44,4	52,0	60,6	76,7	70,3	68,7	65,3
6						33,9	41,1	55,6	68,1	81,5	98,9	93,6	93,2	84,9
7						39,1	49,6	68,8	88,5	112,2	140,7	147,3	137,4	120,8
8	8,3	11,1	15,1	20,3	28,7	41,4	59,4	88,1	136,2	176,0	227,3	234,8	234,4	190,2
9	8,2	12,4	16,4	22,3	31,1	44,9	65,7	111,9	212,7	312,4	414,3	481,4	441,1	241,6
10						44,2	63,9	135,8		734,3	817,1	894,7	884,1	712,8
11						42,2	56,5			1874,2	1771,3	1794,9	1756,0	1914,6
12						40,2	52,1				3250,5	3220,9	2985,1	
13						38,5	57,0				4240,5	4100,1	4120,7	
14	8,9	12,2	16,8	21,1	28,6	36,9	48,6				4751,5	4613,2	4767,0	

Tabulka 8.18: Teploty přídavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, otevřený plochý prstavec

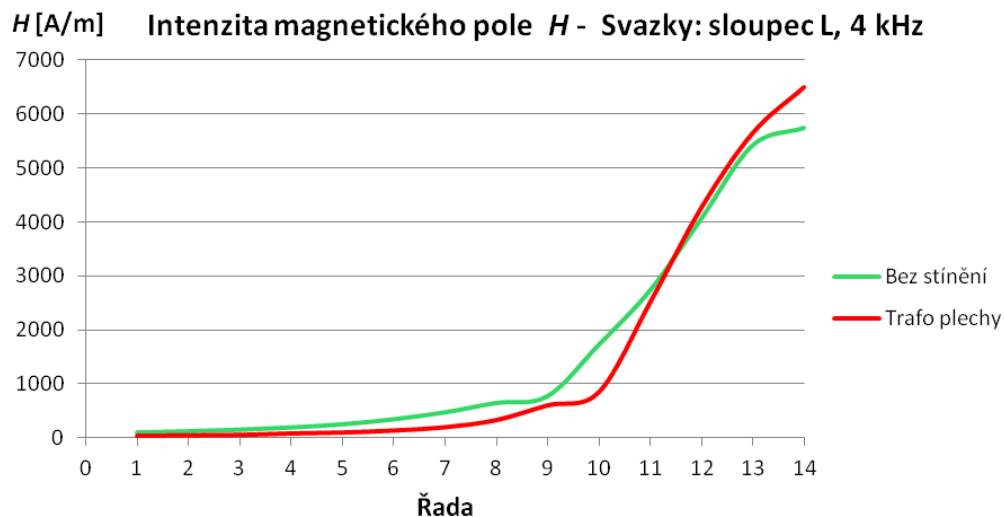
Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
26	29	25,2	27,8	25,6	29	Vrchní	32,2	42,3
						Střední	30,5	38,6
						Spodní	32,5	45,9



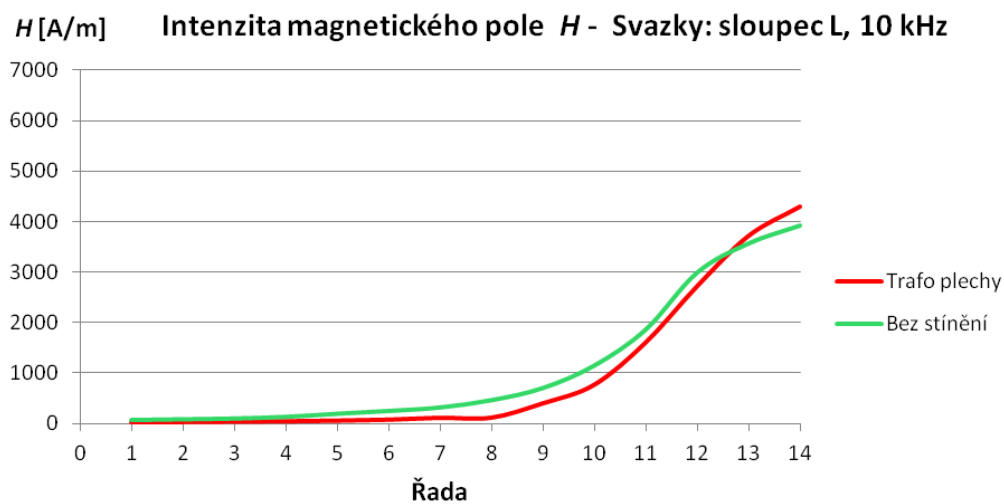
Graf 8.27: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s plochým otevřeným prstencem nad stíněním

8.2.3 Shrnutí a diskuze dosažených výsledků

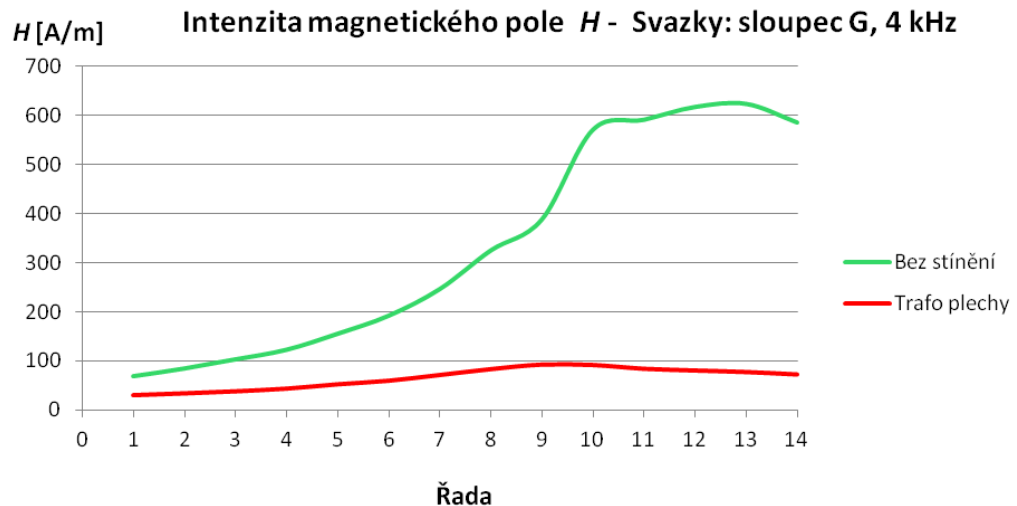
8.2.3.1 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a induktoru bez stínění



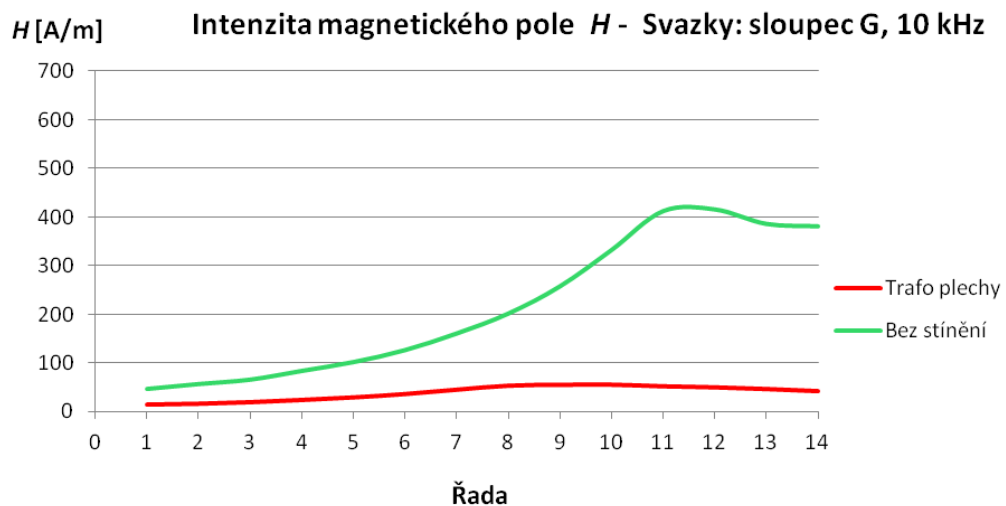
Graf 8.28: Intenzita magnetického pole H pro samotný induktor a induktor se stíněním svazky transformátorových plechů ve sloupci L při frekvenci 4 kHz



Graf 8.29: Intenzita magnetického pole H pro samotný induktor a induktor se stíněním svazky transformátorových plechů ve sloupci L při frekvenci 10 kHz



Graf 8.30: Intenzita magnetického pole H pro samotný induktor a induktor se stíněním svazky transformátorových plechů ve sloupci G při frekvenci 4 kHz



Graf 8.31: Intenzita magnetického pole H pro samotný induktor a induktor se stíněním svazky transformátorových plechů ve sloupci G při frekvenci 10 kHz

Protože součástí měření s přídatnými konstrukčními prvky bylo i proměření samotného induktoru a induktoru se stíněním, kterým se zabývala Kapitola 8.1, uvedu zde získané výsledky tohoto měření. První dva obrázky Graf 8.28 a Graf 8.29 představují grafy znázorňující porovnání průběhu intenzity magnetického pole H pro samotný induktor a induktor se stíněním svazky transformátorových plechů ve sloupci L při frekvenci 4 kHz a 10 kHz. Sloupec L zde opět reprezentuje axiální osu z induktoru. V grafu názorně vidíme zvýšení intenzity H v dutině induktoru v důsledku přítomnosti stínění svazky transformátorových plechů, a to pro obě zvolené vysoké frekvence.

Následující obrázky Graf 8.30 a Graf 8.31 představují grafy znázorňující intenzitu magnetického pole H pro samotný induktor a induktor se stíněním svazky transformátorových

plechů ve sloupci G při frekvenci 4 kHz a 10 kHz. Sloupec G nám v měřené síti představuje první úplný měřený sloupec v pozici vně stínění, induktoru a dutiny induktoru, ve směru k vnějšímu okraji měřicí desky (stručně v “poloze za stíněním”). U stíněného induktoru je hodnota intenzity magnetického pole H až přibližně 8 krát menší než v případě absence stínění svazky transformátorových plechů.

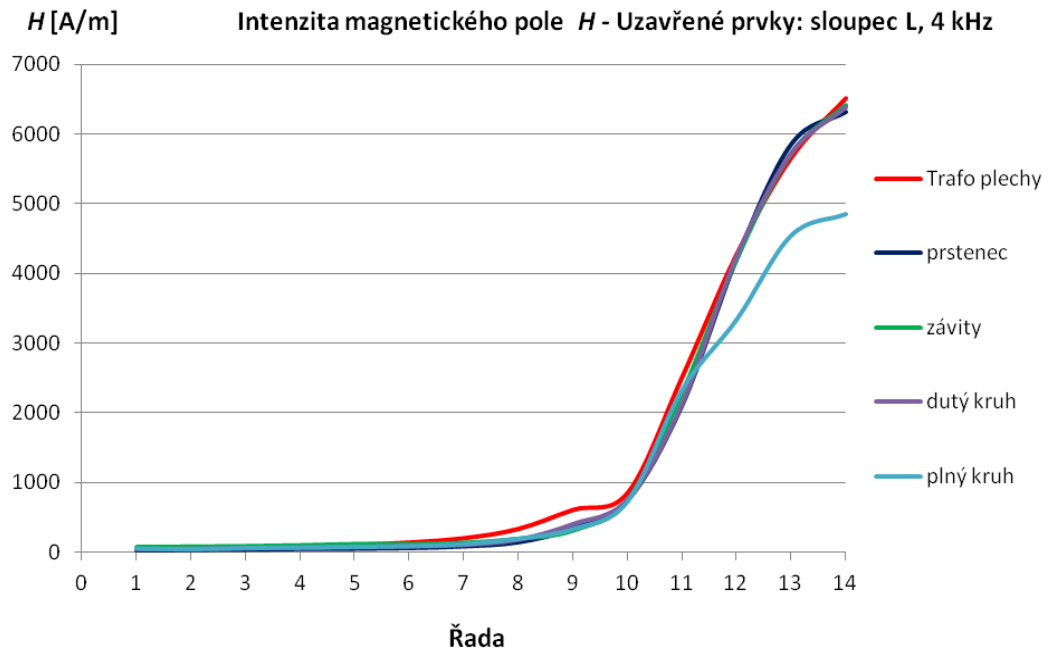
V uvedených grafech je názorně vidět utlumení intenzity magnetického pole na velmi malou hodnotu v oblasti vně induktoru v prostoru za stíněním. Všechny výše uvedené grafy potvrzují předpokládané působení stínění svazky transformátorových plechů na rozložení intenzity magnetického pole a to v dutině induktoru i vně kolem mnou zkoumaného indukčního zařízení.

Opět jsem dospěl k závěru, že v technické praxi je kromě velké ceny svazků transformátorových plechů velmi výhodné indukční zařízení stínit. Napájecí proud se u průmyslových zařízení pohybuje v jednotkách kiloampér ve srovnání s mým napájecím proudem 23 A. Zde je na první pohled jasné, že hodnota intenzity magnetického pole H bude u nestíněného induktoru mnohonásobně vyšší a omezení rozptylového magnetického toku v okolí indukčního zařízení je z důvodu velkých Jouleových ztrát v elektricky vodivých konstrukčních částech pece nezbytné. Výše jsem měřením rovněž ověřil zvýšení intenzity magnetického pole H použitím stínících svazků uvnitř induktoru. Jedná se tedy o další aspekt zvýšení účinnosti tavicího procesu. Nevýhodou svazků transformátorových plechů je jejich cena. To lze ekonomicky vyřešit použitím levného dobře vodivého stínícího pláště, samozřejmě za cenu snížení účinnosti tavicího procesu, které plyne z fyzikálního principu tohoto druhu stínění. V praxi je tedy zřejmé, že velmi záleží na zadavateli, výrobcu i provozovateli, kterou z variant si pro svoje elektrotepelné zařízení zvolí.

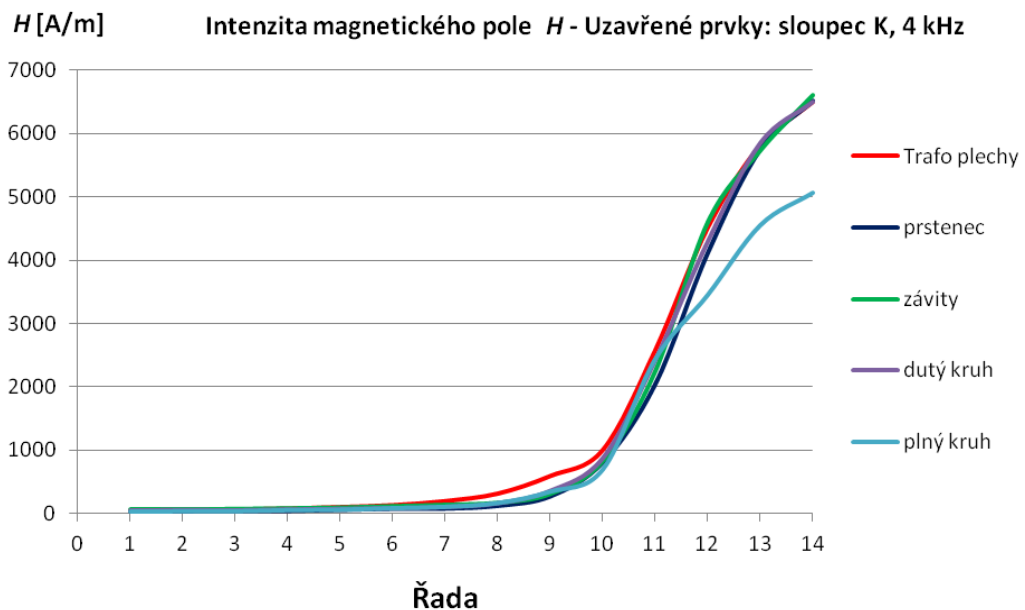
8.2.3.2 Uzavřené přídavné konstrukční prvky

Na základě provedených prvotních simulací jsem provedl předpoklad, že přídavné konstrukční prvky v uzavřené variantě sníží intenzitu magnetického pole H v oblasti nad induktorem v bezprostředním okolí zkoumaného přídavného prvku. To je možné díky dobré elektrické vodivosti těchto měděných prvků, kdy vlivem indukovaných vířivých proudů v těchto prvcích vzniká kolem nich vlastní elektromagnetické pole s opačnou orientací, než má budící pole induktoru. Odečtením obou polí vznikne pole výsledné se sníženou velikostí intenzity magnetického pole v měřeném bodě kolem zkoumaného prvku. Dále jsem provedl předpoklad, že na intenzitu magnetického pole uvnitř induktoru budou mít tyto měděné nebo

hliníkové prvky pouze malý vliv ve smyslu mírného snížení intenzity magnetického pole, nebo nepozorovatelný malý vliv.



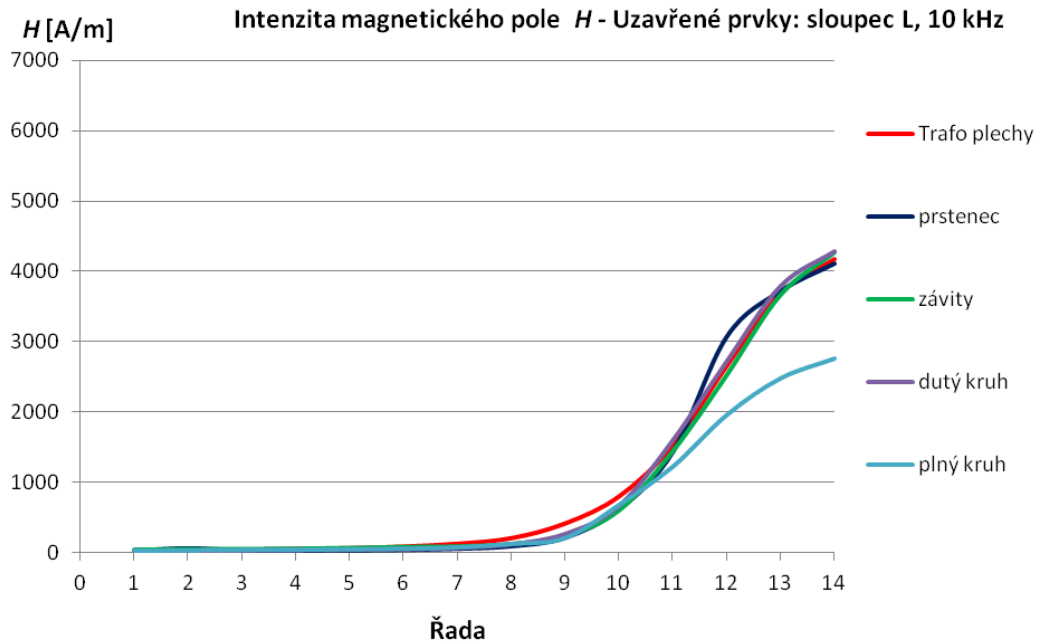
Graf 8.32: Intenzita magnetického pole H pro stínění svazky transformátorových plechů a různé varianty uzavřených přídavných konstrukčních prvků ve sloupci L při frekvenci 4 kHz



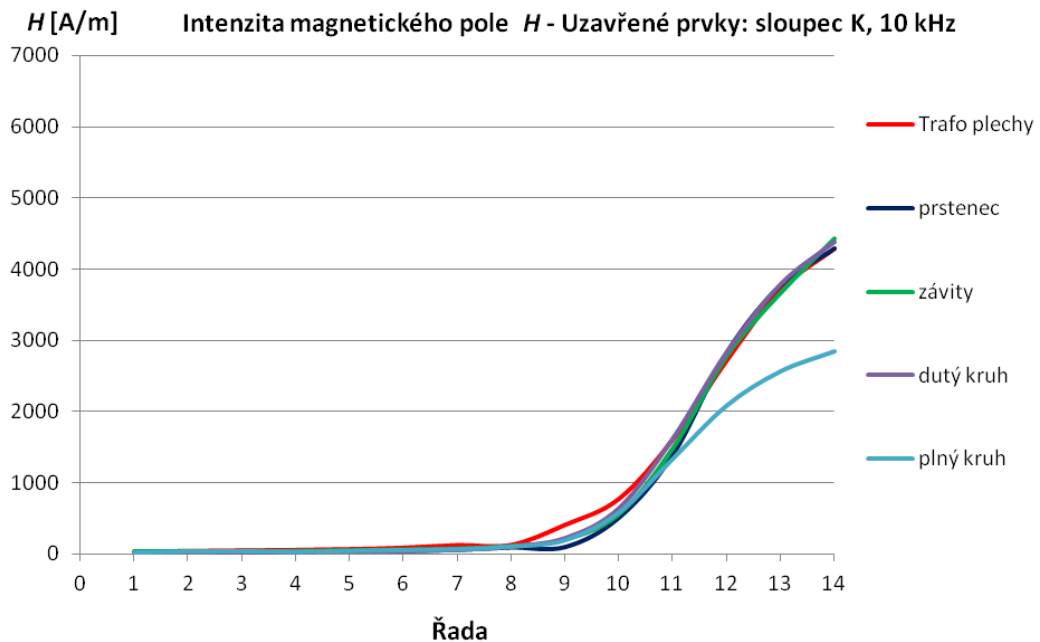
Graf 8.33: Intenzita magnetického pole H pro stínění svazky transformátorových plechů a různé varianty uzavřených přídavných konstrukčních prvků ve sloupci K při frekvenci 4 kHz

Předchozí obrázky Graf 8.32 a Graf 8.33 představují grafy znázorňující intenzitu magnetického pole H pro induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a induktor se stíněním svazky a vždy ještě navíc jednotlivými přídavnými konstrukčními prvky ve sloupci L a K při frekvenci 4 kHz. Následující obrázky Graf 8.34 a Graf 8.35 představují

grafy znázorňující intenzitu magnetického pole H pro induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a induktor se stíněním svazky a vždy ještě navíc jednotlivými přídatnými konstrukčními prvky ve sloupci L a K při frekvenci 10 kHz.



Graf 8.34: Intenzita magnetického pole H pro stínění svazky transformátorových plechů a různé varianty uzavřených přídatných konstrukčních prvků ve sloupci L při frekvenci 10 kHz



Graf 8.35: Intenzita magnetického pole H pro stínění svazky transformátorových plechů a různé varianty uzavřených přídatných konstrukčních prvků ve sloupci K při frekvenci 10 kHz

Ze zobrazených grafů výsledků měření měřicí cívkou jsem objevil ovlivnění elektromagnetického pole prvky v oblasti nad induktorem. Zde nastane mírný pokles intenzity

magnetického pole, proto vyvozují závěr, že ovlivnění elektromagnetického pole prvky je zde velmi malé. Výjimka nastala pro uzavřený plný vodič (plný kruh nakrátko) v grafech vyznačený světle modrou barvou. Zde vidím výrazný vliv plného kruhu ve smyslu výrazného omezení intenzity magnetického pole v oblasti nad induktorem i uvnitř jeho dutiny.

Pro další srovnání užiji opět zavedenou veličinu d [%] a pro momentální použití si zavedu veličinu $d' = -d$. Nazvu ji Procentuální zvětšení intenzity magnetického pole H vlivem přídavného konstrukčního prvku vůči uspořádání zařízení bez prvku. Definuji ji pomocí vzorce:

$$d' = \frac{(H_{prvek} - H_{plechy})}{H_{plechy}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8.2)$$

Tato malá úprava měnící znaménko původní veličiny je zde výhodná ve smyslu uživatele, kdy záporná výsledná hodnota přímo představuje zmenšení intenzity magnetického pole H v % vlivem přídavného konstrukčního prvku vůči konfiguraci indukčního zařízení bez prvku. Naopak kladná hodnota představuje zvětšení intenzity magnetického pole H v % vlivem přídavného konstrukčního prvku vůči konfiguraci indukčního zařízení bez prvku.

V následujících tabulkách provedu pomocí zavedené veličiny d' srovnání velikosti intenzity magnetického pole H pro induktor stíněný svazky transformátorových plechů a příslušným přídavným konstrukčním prvkem vůči induktoru stíněnému pouze svazky transformátorových plechů. Znázorněnou spočtenou síť jsem zobrazil pouze v blízkém okolí prvku tak, aby byl názorně a přehledně vidět jeho vliv. V blízkosti zkoumaného přídavného prvku je také přirozeně jeho vliv největší. Kladné zobrazené hodnoty představují vzrůst intenzity magnetického pole H vlivem přítomného přídavného konstrukčního prvku a záporné zobrazené hodnoty představují pokles intenzity magnetického pole H vlivem přítomného přídavného konstrukčního prvku.

Tabulka 8.19: Procentuální zvětšení d' vlivem uzavřeného prstence pro 4 kHz (vlevo) a 10 kHz (vpravo)

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	-44,69	-32,81	-69,48	-64,92	-62,30	-57,63
9	-45,64	-78,30	-75,05	-57,20	-54,81	-43,80
10	-22,88	-46,63		-34,24	-19,77	-12,43
11	14,66			-3,84	-20,93	-15,96
12	23,01				-8,89	-1,32
13	22,14				-1,12	3,58
14	17,16				0,30	-2,86

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	-42,65	-62,78	-69,49	-65,11	-25,84	-56,96
9	-37,42	-70,36	-76,70	-63,42	-75,76	-49,61
10	-27,23	-47,51		-45,82	-33,88	-23,39
11	18,70			7,34	-13,30	-6,06
12	27,21				4,00	15,68
13	28,81				1,59	0,96
14	23,64				-0,15	-1,46

Tabulka 8.20: Procentuální zvětšení d' vlivem uzavřených závitů pro 4 kHz (vlevo) a 10 kHz (vpravo)

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	-18,02	-7,72	-53,19	-57,10	-48,96	-41,41
9	-10,49	-72,28	-69,58	-53,00	-48,87	-48,26
10	-17,17	-39,18		-29,93	-18,18	-10,93
11	10,58			9,80	-12,90	-8,83
12	7,22				2,00	-1,53
13	21,32				-1,22	1,18
14	2,18				1,86	-1,44

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	-37,49	-35,96	-59,14	-55,54	-14,55	-41,97
9	-23,98	-54,76	-70,77	-58,98	-51,27	-43,31
10	-14,31	-40,42		-32,44	-28,04	-25,40
11	4,65			11,15	-7,66	-5,55
12	13,59				2,24	-5,12
13	18,92				-1,25	-0,68
14	21,68				3,26	2,13

Tabulka 8.21: Procentuální zvětšení d' vlivem uzavřeného dutého vodiče pro 4 kHz (vlevo) a 10 kHz (vpravo)

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	-51,21	-20,26	-67,28	-58,17	-51,34	-46,77
9	-47,15	-75,25	-71,18	-49,26	-40,79	-33,91
10	-23,97	-28,58		-20,30	-13,52	-11,00
11	-1,22			-8,28	-6,11	-15,09
12	13,27				-4,77	-0,48
13	10,19				0,79	1,30
14	7,25				0,20	-1,82

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	-56,38	-67,12	-65,66	-58,76	-18,54	-45,96
9	-46,74	-74,39	-70,07	-53,74	-46,26	-38,04
10	-19,62	-30,93		-24,41	-17,29	-18,04
11	14,60			5,31	0,76	4,52
12	16,69				4,18	2,24
13	18,33				1,98	2,80
14	13,63				2,11	2,66

Tabulka 8.22: Procentuální zvětšení d' vlivem uzavřeného plného vodiče pro 4 kHz (vlevo) a 10 kHz (vpravo)

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	-17,90	-6,84	-54,40	-50,73	-45,48	-42,06
9	-25,90	-73,08	-69,78	-42,67	-40,92	-45,34
10	-9,20	-19,43		-34,15	-30,18	-14,22
11	14,62			9,32	-5,26	-7,08
12	24,15				-23,49	-21,75
13	18,88				-21,67	-19,57
14	13,38				-22,05	-25,39

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	-39,18	-53,03	-53,27	-52,76	-15,26	-39,55
9	-26,90	-63,75	-70,10	-50,47	-51,90	-50,00
10	-11,28	-26,29		-51,59	-24,63	-15,15
11	11,26			-12,49	-17,00	-19,65
12	16,68				-23,54	-26,22
13	19,80				-31,14	-32,69
14	21,68				-33,92	-33,81

V Tabulka 8.19 až Tabulka 8.22 díky výběru hodnot pouze v okolí prvku názorně vidím značný útlum intenzity magnetického pole H v oblasti nad zkoumaným prvkem, kterou zde reprezentují úplné řady 8 a 9, a to u všech zkoumaných prvků. Pro všechny prvky jsem zde objevil na druhou stranu vzrůst intenzity magnetického pole H v geometrické oblasti vně induktoru za stíněním ve sloupci G od 11. do 14. řady (Body G11 až G14). Pro ostatní body jsem pozoroval odlišný nebo ne tak výrazný vliv zkoumaných prvků.

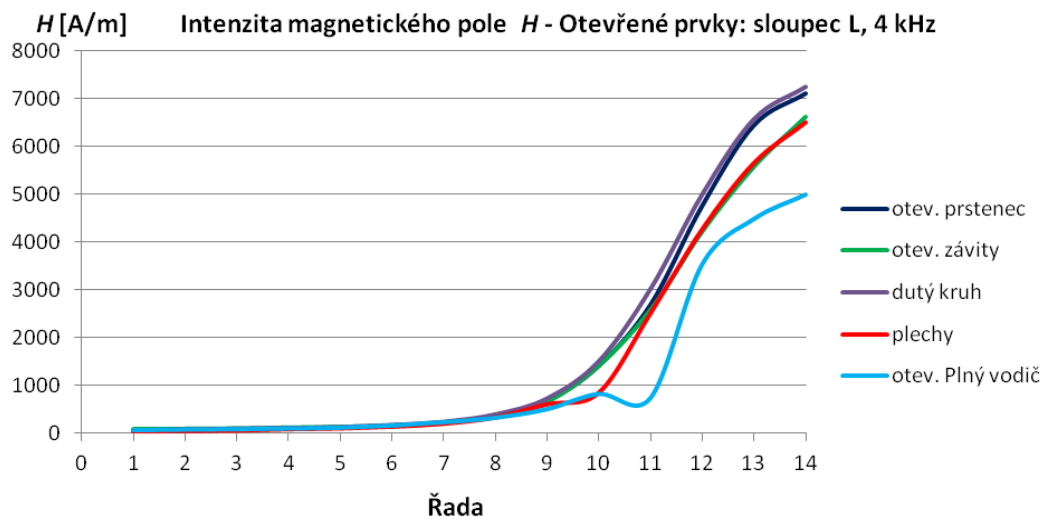
Z prezentovaných výsledků měření uzavřených přídavných konstrukčních prvků můžu konstatovat, že tyto prvky dokážou výrazně ovlivnit elektromagnetické pole kolem zkoumaného indukčního zařízení. Změna velikosti intenzity magnetického pole v měřených bodech zde nastane v závislosti na tvaru, uspořádání, geometrických rozměrech a materiálu konkrétního prvku. Rovněž právě i konkrétní uspořádání, tedy jestli je prvek tvořený jedním masivním plným nebo dutým vodičem, nebo jestli je stejný objem tvořen lanovým vodičem (ze vzájemně od sebe izolovaných částí), má podle mých výsledků měření velký vliv na velikost intenzity magnetického pole v měřeném bodě. Tento jev nastává díky uplatnění skin efektu pro mnou zvolené vysoké frekvence a tudíž plný vodič reprezentující zde lanový vodič má při měření na intenzitu magnetického pole přirozeně největší vliv. Dalším závěrem je závislost velikosti vlivu prvku na vzdálenosti tohoto prvku od induktoru, kdy s rostoucí vzdáleností míra ovlivnění intenzity magnetického pole H klesá. V průmyslové aplikaci přídavných prvků přidaných ke konstrukci indukční kelímkové pece, kde napájecí proud dosahuje řádově kiloampér, bude nezbytně nutné tento prvek chladit podle typu prvku (prvek s dutinou – chlazení např. vodou, dále vzduchem, atd.) z důvodu velkého oteplení vlivem velkých vířivých proudů v dobře vodivém materiálu prvku.

8.2.3.3 Otevřené přídavné konstrukční prvky

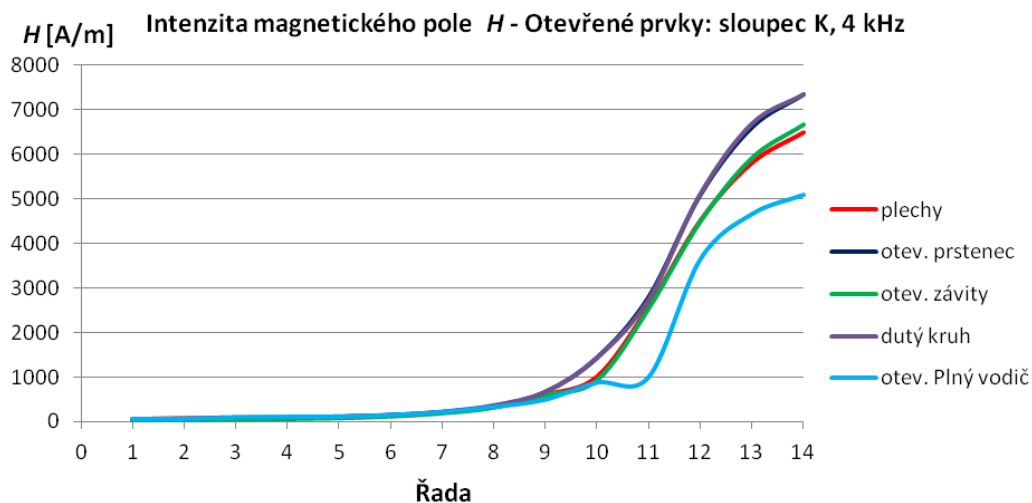
Na základě prvotních měření otevřených přídavných konstrukčních prvků se síťovým kmitočtem napájecího proudu induktoru, které jsem prováděl v předchozích letech, jsem provedl předpoklad, že otevřené přídavné konstrukční prvky nebudou mít žádný vliv na intenzitu magnetického pole H v okolí zkoumaného indukčního zařízení. I z teoretického hlediska předpokládám, že v otevřeném přídavném prvku se nemůže indukovaný proud uzavřít, protože je obvod rozpojený. Proto by se do otevřených prvků neměl naindukovat žádný proud a v jejich okolí nevznikne žádné vlastní magnetické pole s opačnou orientací. Předpoklad je ovšem nutno doplnit – pokud jsou hloubka vniku naindukovaných proudů do prvku a tloušťka materiálu příslušného prvku optimálně velké, může se indukovaný proud uzavřít a jaksi “ohnout” i v materiálu otevřeného přídavného prvku. Rovněž i následující měření potvrzují jistý vliv otevřených přídavných konstrukčních prvků.

Následující obrázky Graf 8.36 a Graf 8.37 představují grafy znázorňující intenzitu magnetického pole H pro induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a induktor se stíněním svazky a vždy ještě navíc jednotlivými otevřenými přídavnými konstrukčními prvky ve sloupci L a K při frekvenci 4 kHz. Dále obrázky Graf 8.38 a Graf 8.39 představují grafy znázorňující intenzitu magnetického pole H pro induktor se stíněním svazky

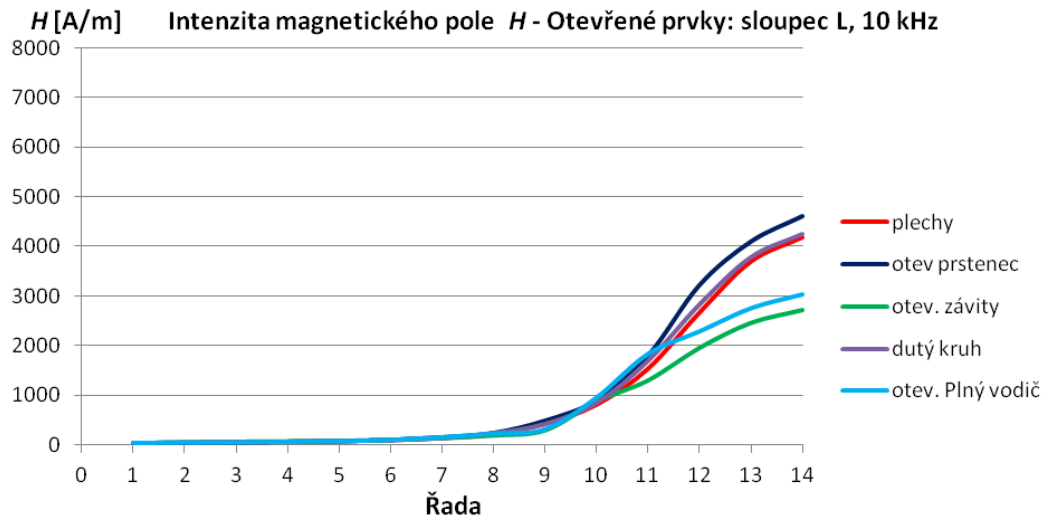
transformátorových plechů a induktor se stíněním svazky a vždy ještě navíc jednotlivými otevřenými přídatnými konstrukčními prvky ve sloupci L a K při frekvenci 10 kHz.



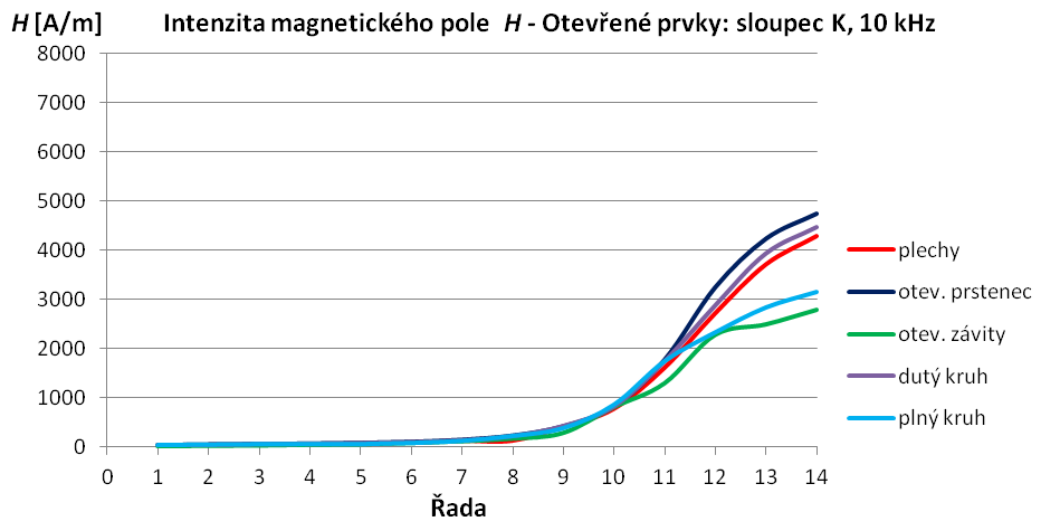
Graf 8.36: Intenzita magnetického pole H pro stínění svazky transformátorových plechů a různé varianty otevřených přídatných konstrukčních prvků ve sloupci L při frekvenci 4 kHz



Graf 8.37: Intenzita magnetického pole H pro stínění svazky transformátorových plechů a různé varianty otevřených přídatných konstrukčních prvků ve sloupci K při frekvenci 4 kHz



Graf 8.38: Intenzita magnetického pole H pro stínění svazky transformátorových plechů a různé varianty otevřených přídavných konstrukčních prvků ve sloupci L při frekvenci 10 kHz



Graf 8.39: Intenzita magnetického pole H pro stínění svazky transformátorových plechů a různé varianty otevřených přídavných konstrukčních prvků ve sloupci K při frekvenci 10 kHz

Měření prokázalo rozdílný vliv jednotlivých otevřených přídavných konstrukčních prvků. Pro frekvenci 4 kHz nepozorují téměř žádný vliv otevřených závitů. Z grafů je zde vidět, že u otevřeného prstence a otevřeného dutého vodiče při obou uvažovaných frekvencích nastává mírné zvýšení intenzity magnetického pole H v dutině uvnitř induktoru. Výrazné snížení intenzity magnetického pole H pro obě měřené frekvence jsem zřetelně vyzoroval u otevřeného plného vodiče. Tento stav nastal i v případě uzavřeného plného vodiče (viz. výše). Pro nejvyšší měřenou frekvenci 10 kHz nastává největší vliv u otevřených závitů. Tyto otevřené závity zde velmi snížili intenzitu magnetického pole H v dutině induktoru.

Pro další srovnání užijí opět zavedenou veličinu d' [%]. Tato veličina se nazývá Procentuální zvětšení intenzity magnetického pole H vlivem přídavného konstrukčního prvku vůči uspořádání zařízení bez prvku. Definuji ji pomocí vzorce:

$$d' = \frac{(H_{prvek} - H_{plechy})}{H_{plechy}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8.3)$$

Bližší vysvětlení provádím v diskusi výsledků pro uzavřené přídavné konstrukční prvky a pro úplnost doplním, že kladné zobrazené hodnoty představují vzrůst intenzity magnetického pole H vlivem přítomného otevřeného přídavného konstrukčního prvku a záporné zobrazené hodnoty představují pokles intenzity magnetického pole H vlivem přítomného otevřeného přídavného konstrukčního prvku.

Tabulka 8.23: Procentuální zvětšení d' vlivem otevřeného prstence pro 4 kHz (vlevo) a 10 kHz (vpravo)

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	14,46	101,00	6,38	10,18	11,30	13,62
9	13,30	-32,61	1,69	16,37	12,75	11,71
10	13,50	30,65		9,85	42,87	66,65
11	6,79			20,49	8,45	7,08
12	4,49				12,68	11,44
13	5,30				13,56	13,94
14	0,85				12,92	9,21

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	10,81	11,11	13,53	4,34	81,49	13,72
9	18,64	-0,54	10,97	2,33	1,33	15,57
10	14,86	25,02		12,56	5,39	11,71
11	8,10			9,53	9,95	17,65
12	3,97				19,37	21,20
13	22,61				14,03	11,18
14	15,10				10,59	10,53

Tabulka 8.24: Procentuální zvětšení d' vlivem otevřených závitů pro 4 kHz (vlevo) a 10 kHz (vpravo)

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	13,91	89,47	3,23	1,32	1,77	6,59
9	2,13	-35,10	-0,60	8,59	1,33	7,05
10	14,08	6,15		8,37	-7,05	65,71
11	1,25			8,52	-1,55	2,60
12	3,85				-0,67	-1,16
13	-1,38				1,67	-1,33
14	5,69				2,49	1,81

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	3,26	-1,95	10,47	-0,13	41,24	-13,17
9	18,58	-20,01	-13,83	-21,12	-28,31	-31,98
10	16,54	-1,83		-38,62	5,53	8,87
11	12,53			-12,60	-19,25	-14,98
12	16,14				-16,06	-26,32
13	15,11				-32,84	-33,15
14	25,25				-35,04	-34,68

Tabulka 8.25: Procentuální zvětšení d' vlivem otevřeného dutého vodiče pro 4 kHz (vlevo) a 10 kHz (vpravo)

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	11,88	84,94	4,66	12,73	17,12	17,08
9	10,11	-32,38	9,24	26,61	13,39	19,41
10	8,49	26,42		15,43	43,50	76,93
11	3,29			14,62	6,45	19,94
12	1,61				13,25	16,86
13	1,43				15,03	16,03
14	0,73				13,00	11,23

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	7,03	1,92	3,78	-2,16	68,06	10,68
9	12,20	-6,84	-3,70	2,32	1,90	-0,29
10	8,60	4,14		1,23	4,94	4,88
11	2,95			-2,11	7,60	10,58
12	1,34				5,40	6,18
13	4,82				5,62	2,31
14	6,75				3,85	1,59

Tabulka 8.26: Procentuální zvětšení d' vlivem otevřeného plného vodiče pro 4 kHz (vlevo) a 10 kHz (vpravo)

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	18,13	85,73	-1,66	6,50	2,55	-3,22
9	14,01	-35,87	-3,08	3,38	-17,48	-17,26
10	15,90	8,86		-14,45	-13,33	-3,32
11	11,73			-32,28	-61,40	-70,72
12	31,89				-19,19	-17,19
13	13,18				-19,68	-20,72
14	13,35				-21,51	-23,26

d' [%]	G	H	I	J	K	L
8	9,86	12,27	6,51	-0,02	83,44	6,87
9	14,51	-2,83	4,23	0,45	-4,74	-26,24
10	16,57	12,31		-4,82	10,94	18,18
11	15,04			6,70	8,13	19,89
12	14,39				-14,68	-14,09
13	17,95				-23,95	-25,39
14	21,86				-26,89	-27,39

V uvedených tabulkách (Tabulka 8.23 až Tabulka 8.26) jsem objevil zvýšení intenzity magnetického pole H pro sloupec G a oblast vně induktoru za stíněním. Tento jev jsem zjistil i u uzavřených přídavných prvků. Zvýšení intenzity magnetického pole H nastává u většiny zkoumaných prvků také v 8. řadě nad induktorem a stíněním.

Zjištěný vliv otevřených přídavných prvků lze teoreticky vysvětlit předpokladem v úvodu: Pokud jsou hloubka vniku naindukovaných proudů do prvku a tloušťka materiálu příslušného prvku optimálně velké, může se indukovaný proud uzavřít a jaksi “ohnout” i materiálu otevřeného přídavného prvku. Vliv vysoké frekvence je zde tedy na první pohled zřejmý a působení otevřených přídavných prvků můžeme zdůvodnit hloubkou vniku naindukovaných proudů do prvku závislou na frekvenci napájecího proudu do induktoru. Při dostatečně velké hloubce vniku se v prvku indukovaný proud teoreticky uzavře a tím dojde v jeho okolí k vytvoření vlastního magnetického pole. S přihlédnutím k rozměrům použitých přídavných konstrukčních prvků tento jev nastává jistě nejdříve u otevřeného prstence díky jeho velké šířce mezikruží. Závěrem tohoto měření je fakt, že nelze z měřených hodnot jednoznačně určit vliv konkrétních prvků na intenzitu magnetického pole H . Dospěl jsem tedy

k závěru, že podobně jako u uzavřených přídavných konstrukčních prvků zde pro jejich otevřené varianty hraje vliv především jejich tvar, uspořádání, materiál, vzdálenost od induktoru a dále kmitočet napájecího proudu induktoru. V potenciální průmyslové aplikaci jsou tyto prvky konstrukčně snadněji aplikovatelné. Lze je totiž bez problémů umístit i v horní části pece, protože jim díky přerušení zde nebrání v umístění vylévací hubice kelímku sloužící pro vylévání pece (odpich), tak jako prvkům uzavřeným. V této horní poloze prvku je obvykle induktor umístěn blíže k přídavnému prvků a lze zde tudíž pozorovat jeho větší vliv.

8.3 Vsázka a vodivá deska umístěná nad induktorem

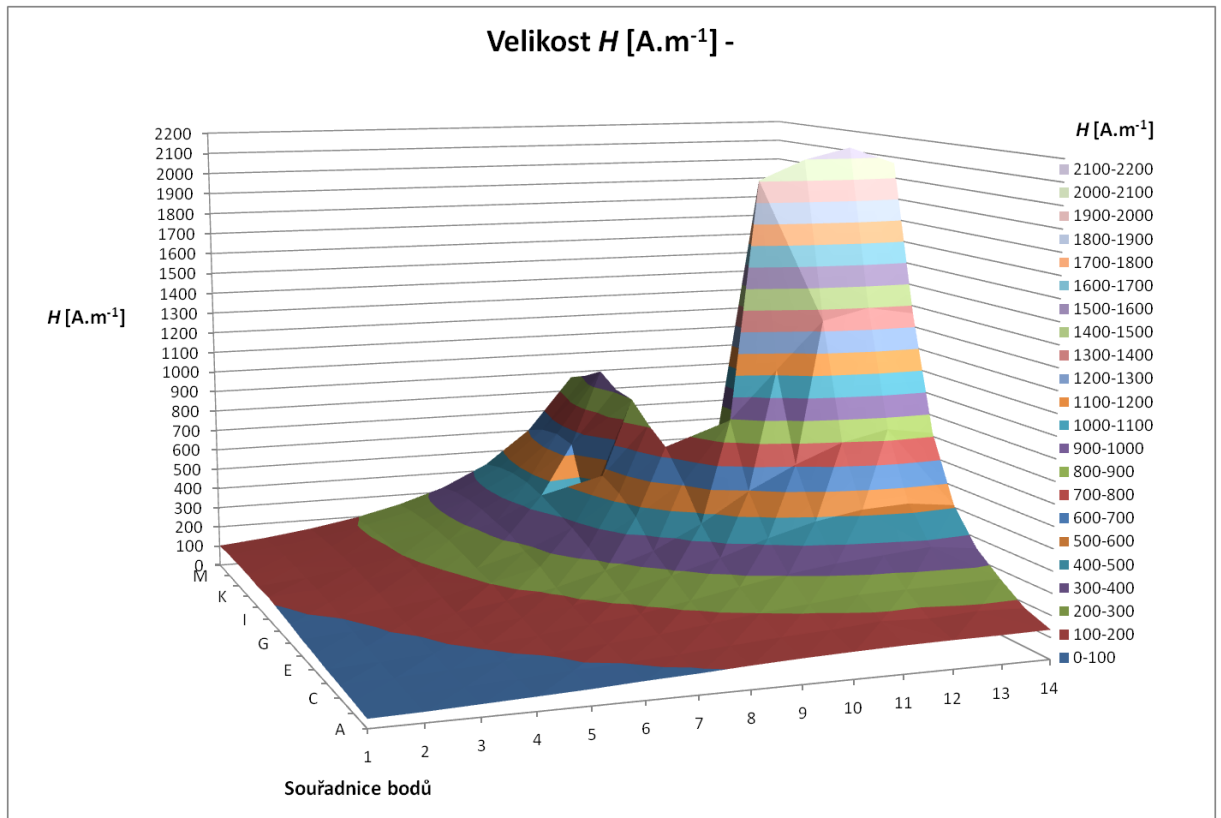
Nový fyzikální model v konfiguraci induktor se stíněním svazky transformátorových plechů jsem doplnil o plochou kruhovou měděnou desku (Obrázek 5.14 a Obrázek 7.7) ve formě nového přídavného prvku reprezentujícího stínící dobře elektricky vodivý plech umístěný u reálného zařízení v dolní části pece (Obrázek 2.1) a dále o dutou válcovou magnetickou vsázku (Obrázek 5.5 a Obrázek 5.6), která je umístěna v dutině induktoru. Úkolem je zde provést ohřev nové vsázky a opět porovnat a posoudit dosažené výsledky. Nyní prezentuji tyto výsledky získané měřením měřicí cívky a jejich porovnání formou grafů.

8.3.1 Vsázka a vodivá deska umístěná nad induktorem 50 Hz

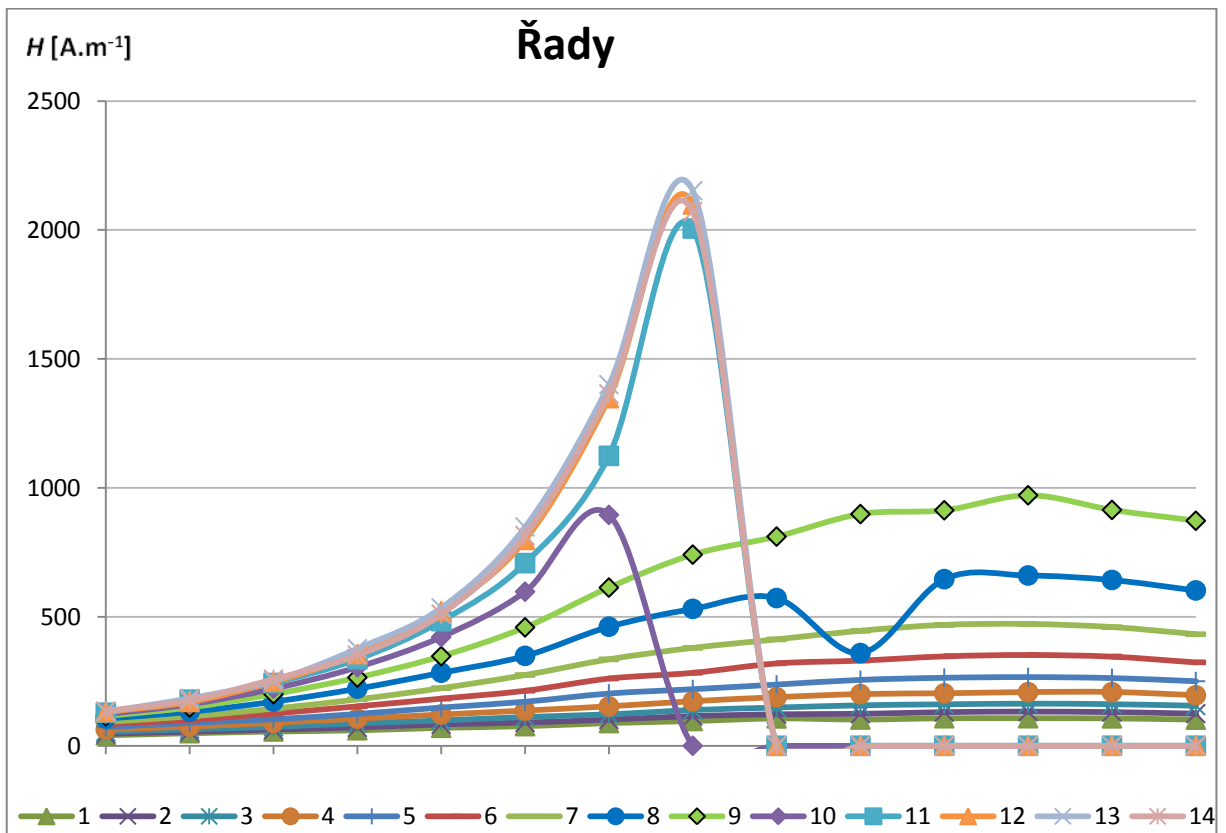
8.3.1.1 50 Hz; 31,5 A – konfigurace induktor, vsázka, deska

Tabulka 8.27: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, vodivá deska (50 Hz; 31,5 A)

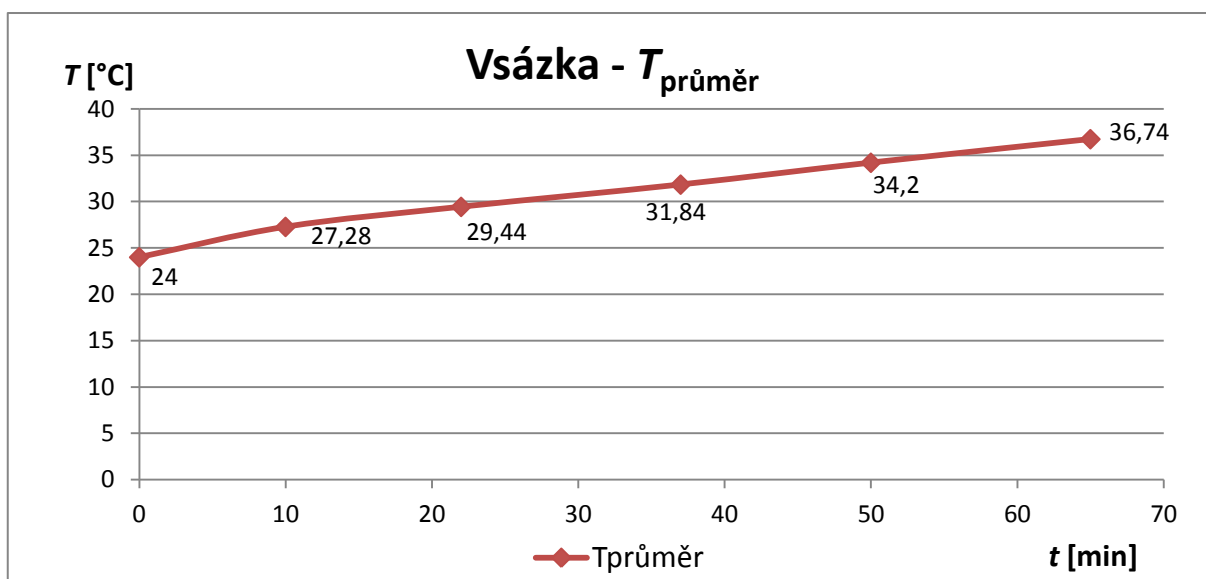
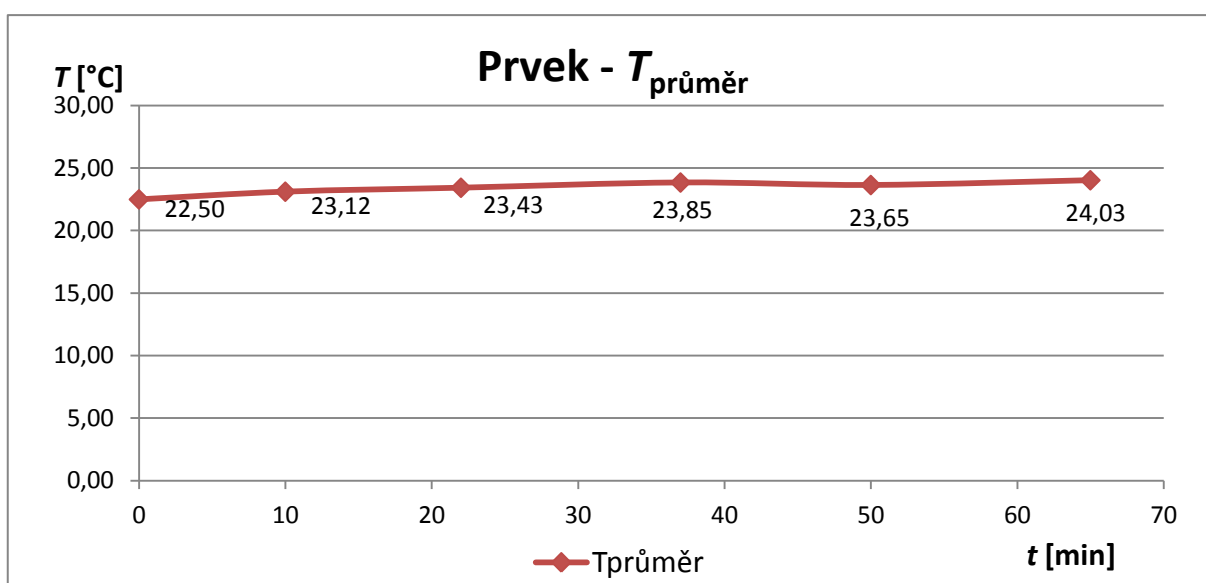
		Intenzita magnetického pole H [A/m]													
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	40,9	49,0	55,5	60,4	69,9	76,2	88,0	96,2	106,1	101,9	106,9	106,9	106,4	101,5	
2	46,3	54,1	62,3	70,9	82,6	90,1	101,7	115,2	122,3	124,0	130,6	132,6	130,7	124,6	
3	54,6	64,3	73,6	87,7	98,5	112,1	122,3	138,9	148,6	157,3	161,2	163,8	161,7	155,6	
4	63,1	74,5	89,0	105,3	121,2	136,5	152,8	172,7	188,2	200,2	203,2	207,9	208,2	195,9	
5	72,1	89,4	103,3	124,0	148,7	171,2	202,9	219,7	237,6	255,7	263,9	266,5	262,8	250,4	
6	84,2	100,6	125,4	153,2	183,0	213,6	261,0	283,3	319,9	330,8	347,3	352,5	346,1	323,7	
7	93,4	114,6	144,5	180,3	223,6	274,5	335,3	379,5	412,4	445,7	468,5	471,8	459,8	432,5	
8	105,8	132,2	171,5	221,9	283,6	348,7	461,8	530,8	572,8	359,4	646,2	660,4	642,9	602,4	
9	115,3	148,8	200,2	264,8	347,5	459,3	613,4	741,2	811,2	898,4	913,1	971,1	914,5	872,5	
10	122,4	160,9	221,6	304,8	421,7	597,4	895,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
11	128,3	178,7	243,3	335,4	483,2	708,2	1124,2	2005,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
12	131,0	170,0	248,2	355,7	522,4	798,3	1347,8	2098,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	132,0	184,1	252,5	376,5	534,5	848,1	1400,3	2151,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	135,4	176,7	258,8	351,2	510,1	815,2	1363,8	2071,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	



Graf 8.40: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, deska (50 Hz; 31,5 A)



Graf 8.41: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, deska (50 Hz; 31,5 A) – řady

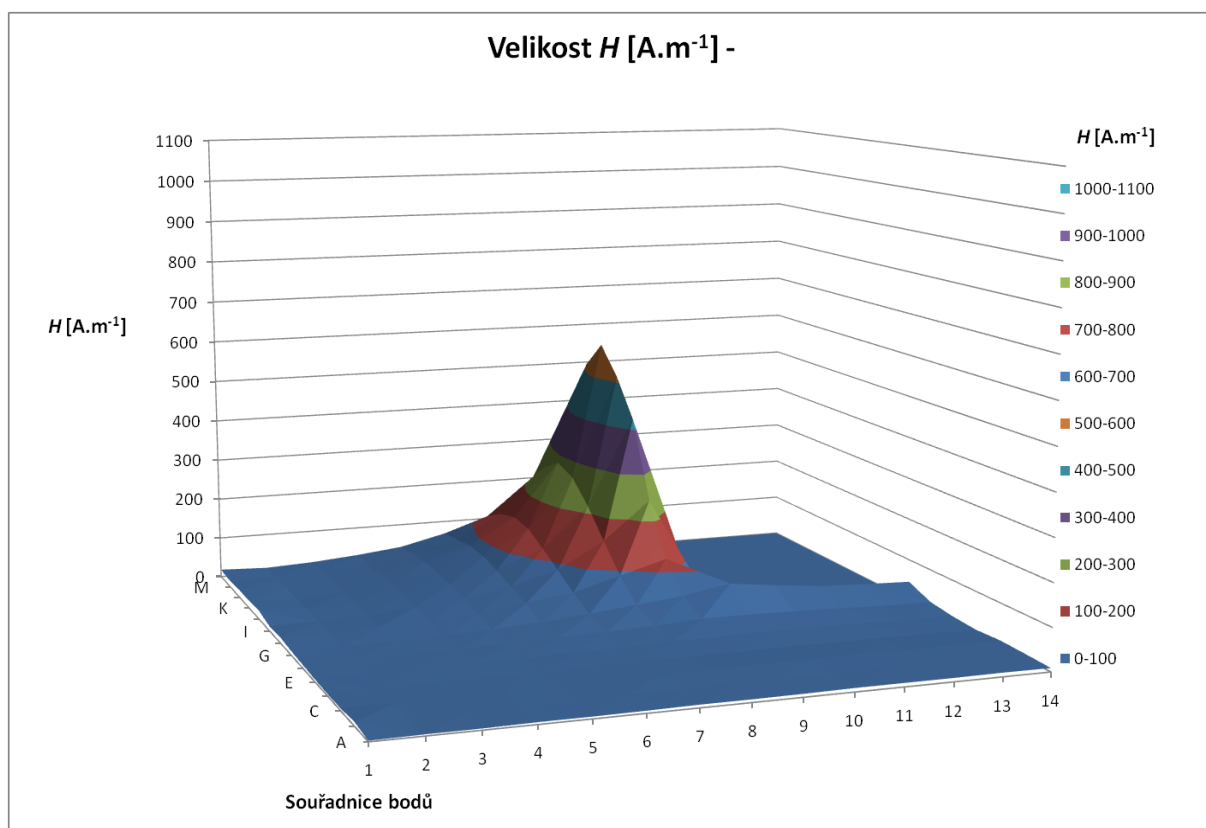
**Graf 8.42:** Průměrná teplota vsázky $T_{\text{průměr}} [^{\circ}\text{C}]$ **Graf 8.43:** Průměrná teplota prvku (desky) $T_{\text{průměr}} [^{\circ}\text{C}]$

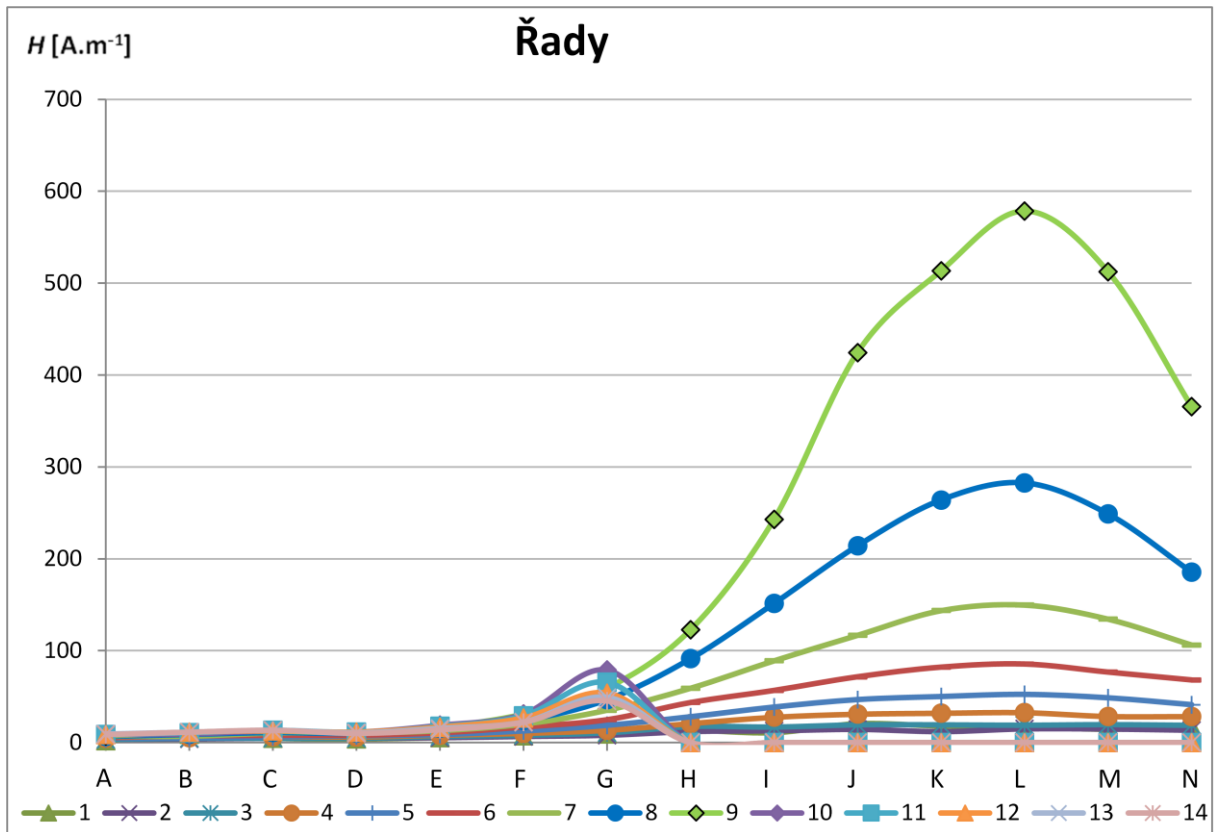
Pozn. Při měření pro frekvenci napájecího proudu induktoru 50 Hz nebyl povrch vsázky a prvku nastříkán černou matnou barvou, měřené teploty zde tudíž neodpovídají realitě a jsou uvedeny pouze orientačně.

8.3.1.2 50 Hz; 31,5 A – konfigurace induktor, stínění, vsázka, deska

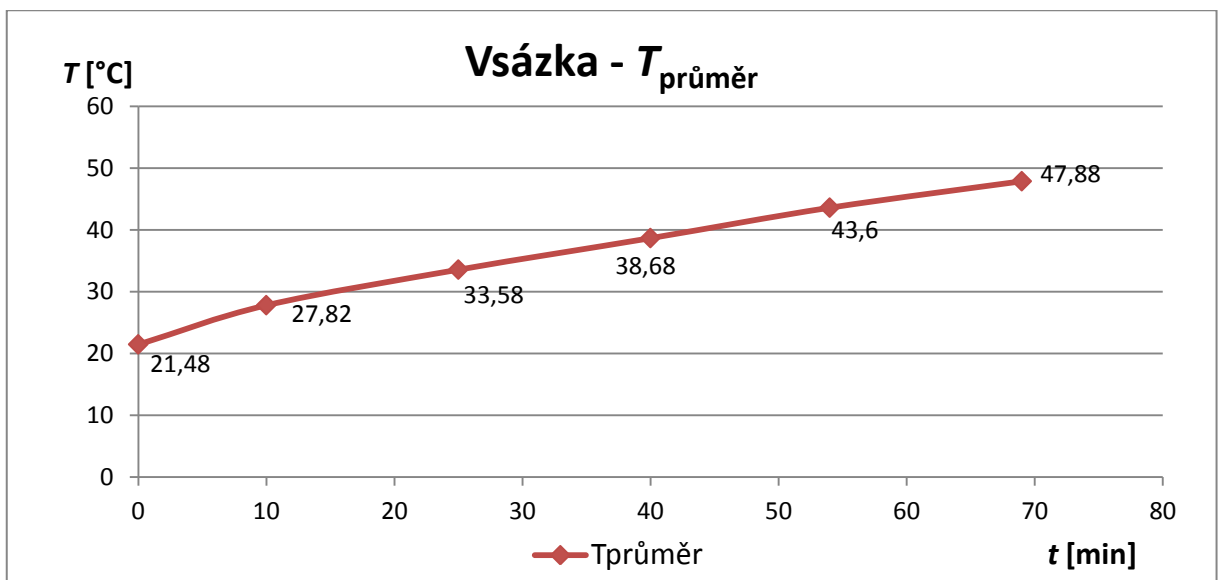
Tabulka 8.28: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, stínění, vsázka, vodivá deska (50 Hz)

		Intenzita magnetického pole H [A/m]													
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	2,1	8,9	4,7	4,0	5,4	7,4	9,5	13,1	10,8	20,4	18,0	17,4	14,4	17,8	
2	3,4	4,0	4,7	4,7	5,4	6,7	8,0	12,0	12,9	14,4	12,0	15,0	14,8	13,4	
3	3,4	4,7	4,7	4,7	6,7	8,0	10,7	17,6	17,1	19,5	19,5	19,0	19,7	18,9	
4	4,7	5,5	6,3	6,1	8,0	10,1	13,4	20,8	27,6	31,0	32,0	32,6	28,5	28,4	
5	4,7	5,1	6,3	7,4	8,7	12,7	18,8	28,1	38,6	46,7	50,0	52,4	48,7	41,2	
6	5,5	7,2	8,1	8,1	10,8	17,1	25,0	43,6	56,8	71,6	82,0	85,4	76,6	68,1	
7	6,8	6,8	10,2	10,2	12,9	20,0	35,1	59,1	89,0	116,8	143,7	149,8	134,5	106,3	
8	6,8	8,9	11,0	10,2	15,8	24,2	46,7	91,3	151,4	214,2	264,0	282,6	248,8	185,5	
9	7,4	10,2	12,3	11,0	17,1	31,0	59,3	122,8	242,9	424,4	513,4	578,4	512,3	365,6	
10	8,7	9,5	12,9	11,6	18,9	31,0	79,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
11	8,7	10,8	13,4	11,4	17,6	29,2	65,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
12	8,7	11,4	12,7	11,4	16,8	26,8	53,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	9,4	11,4	13,4	10,7	15,4	22,3	49,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	8,7	11,4	13,4	10,1	14,1	22,1	45,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

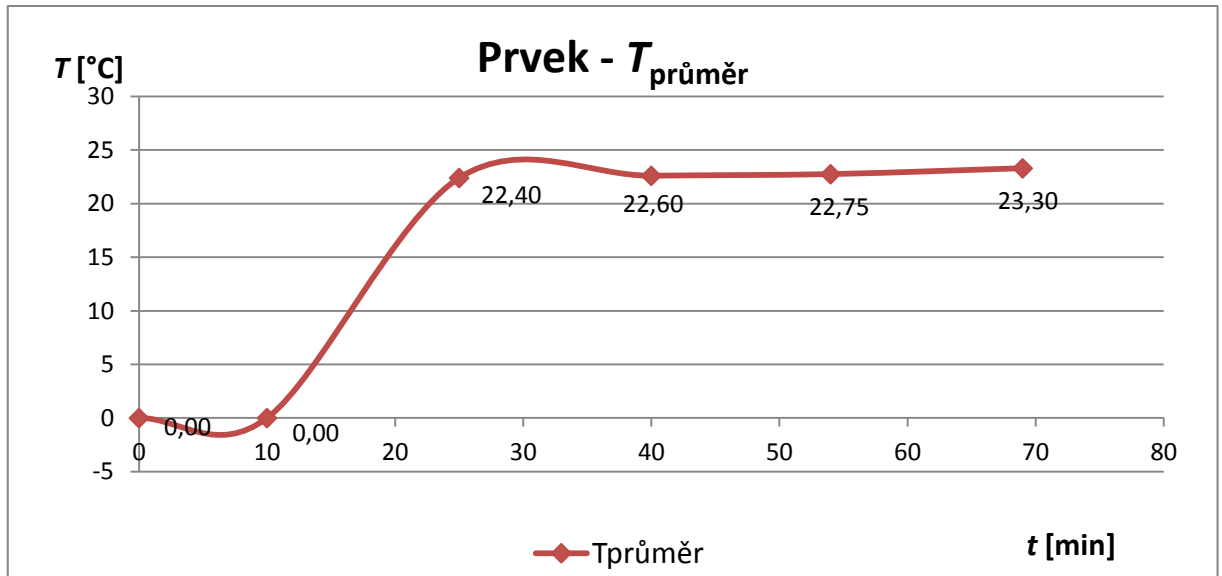
Graf 8.44: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, stínění, vsázka, deska (50 Hz; 31,5 A)



Graf 8.45: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, stínění, vsázka, deska (50 Hz; 31,5 A) – řady



Graf 8.46: Průměrná teplota vsázky $T_{průměr} [^{\circ}C]$



Graf 8.47: Průměrná teplota prvku $T_{\text{průměr}}$ [°C]

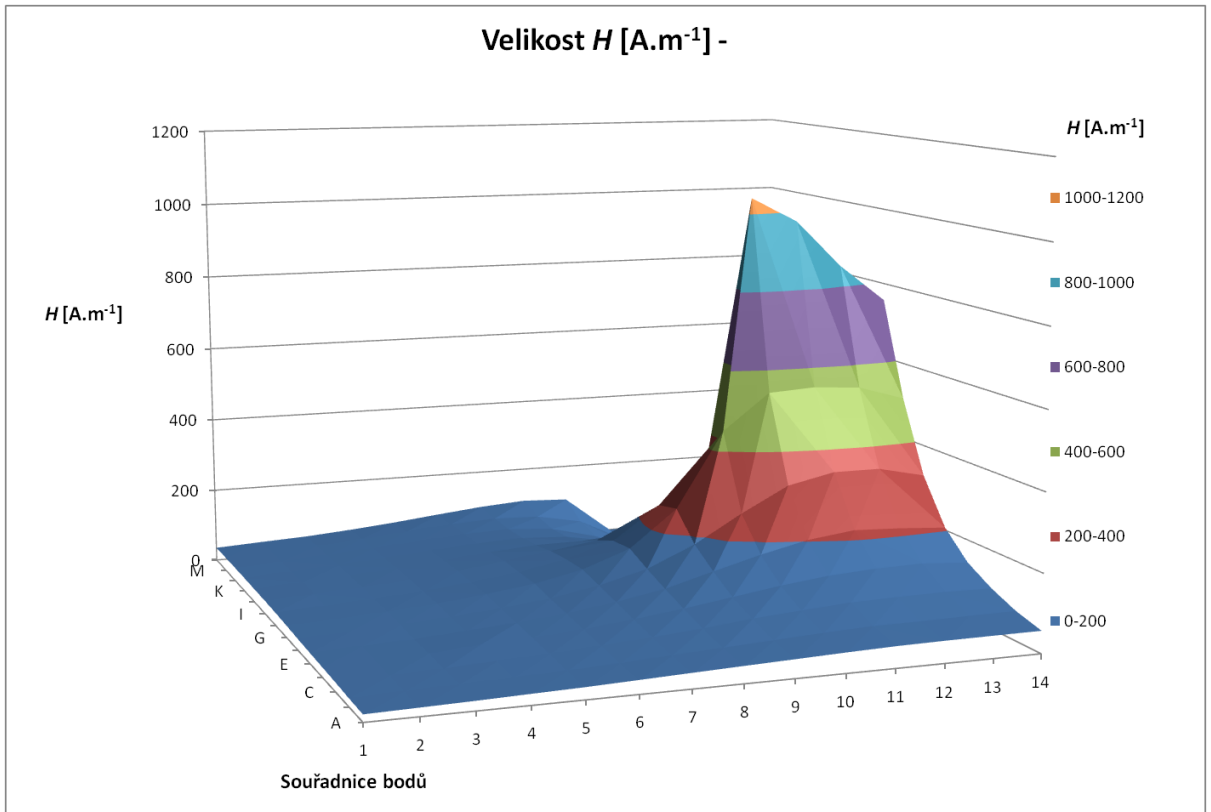
Pozn. Při měření pro frekvenci napájecího proudu induktoru 50 Hz nebyl povrch vsázky a prvku nastříkán černou matnou barvou, měřené teploty zde tudíž neodpovídají realitě a jsou uvedeny pouze orientačně.

8.3.2 Vsázka a vodivá deska umístěná nad induktorem 4100 Hz

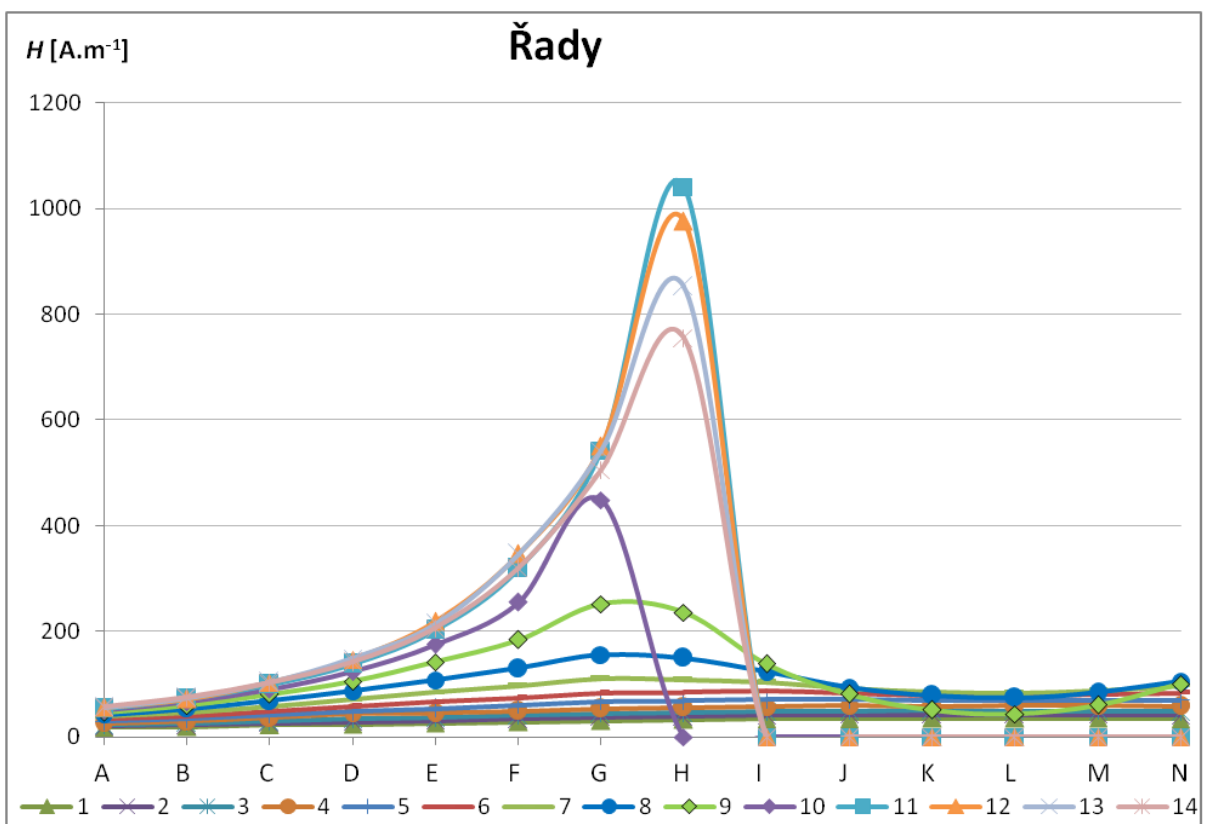
8.3.2.1 4 100 Hz; 24 A – konfigurace induktor, vsázka, deska

Tabulka 8.29: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, vodivá deska (4 100 Hz)

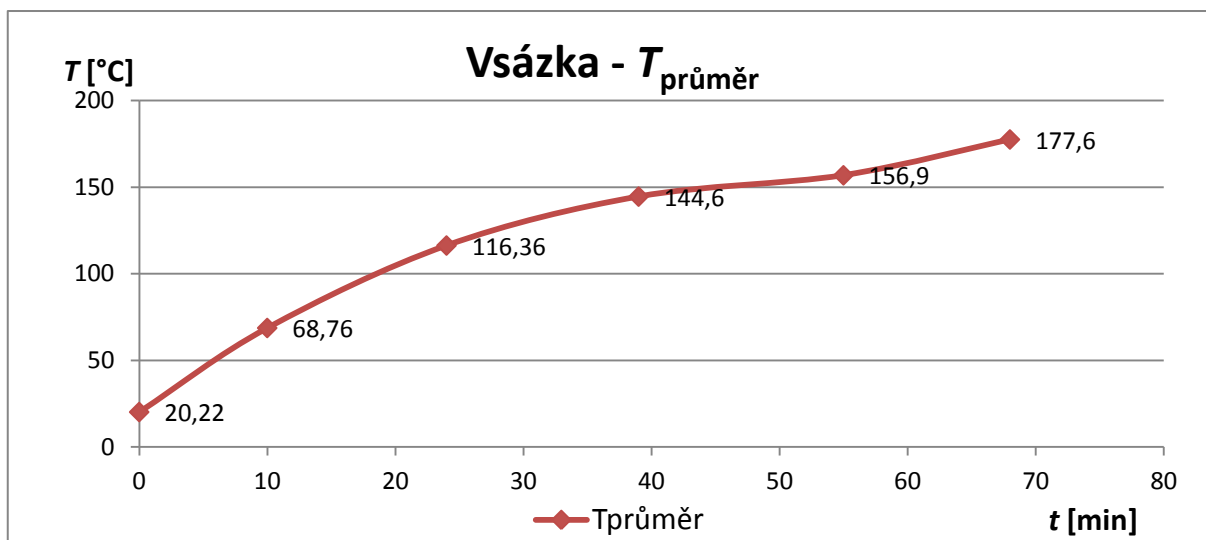
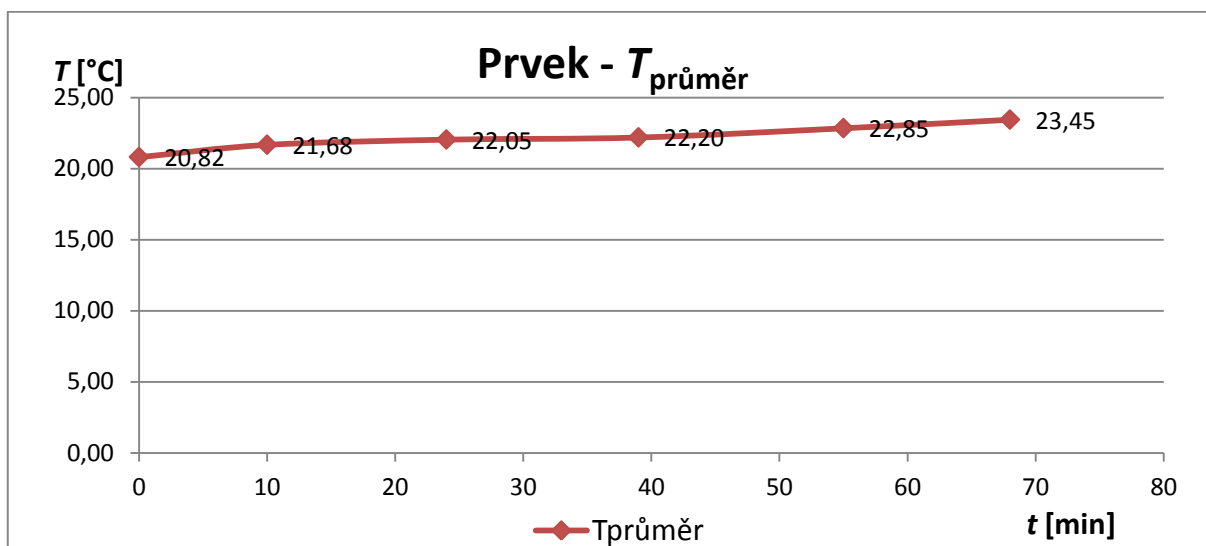
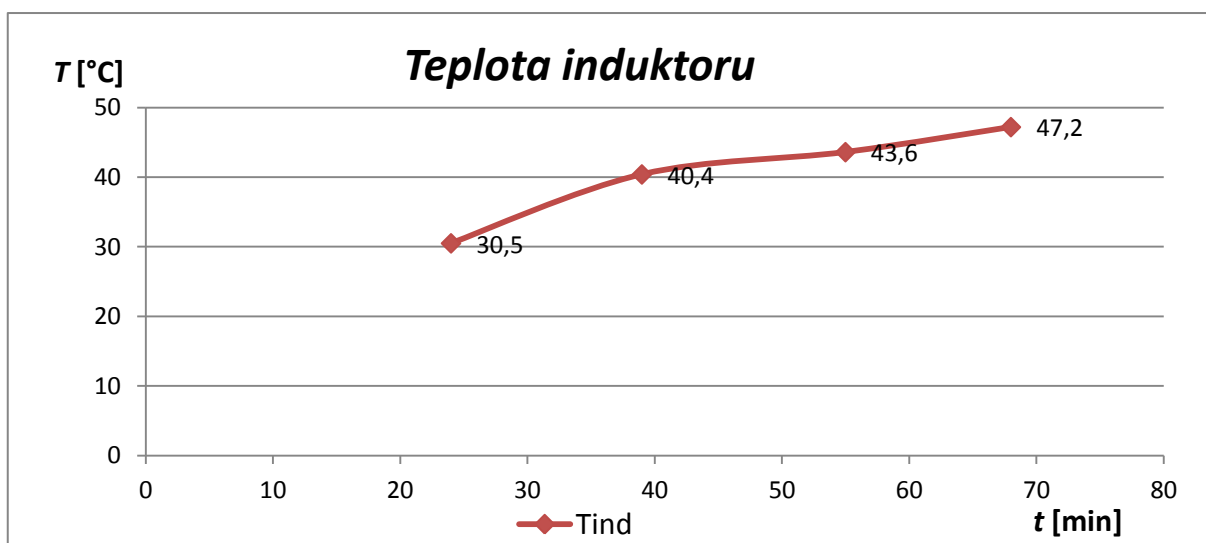
Řada/ Sloupec	Intenzita magnetického pole H [A/m]													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	18,3	20,0	22,7	24,5	26,4	28,3	31,0	32,8	34,3	34,7	35,4	35,5	35,4	34,9
2	20,8	23,4	26,2	28,7	31,4	34,9	38,0	38,7	41,7	42,2	42,2	42,4	42,2	41,9
3	23,5	27,0	30,2	34,7	36,2	41,1	45,2	46,1	48,2	49,0	49,9	49,6	49,5	48,3
4	26,8	30,5	36,7	45,2	45,4	49,3	54,1	55,7	57,9	59,4	58,9	59,1	59,6	58,1
5	29,9	34,7	41,9	48,2	54,4	60,4	67,8	68,4	71,3	70,7	69,7	68,9	70,1	70,0
6	34,1	40,0	49,6	58,2	66,5	74,1	84,2	84,9	87,3	83,2	79,3	78,6	80,6	83,9
7	38,6	47,3	58,5	71,6	84,6	97,4	110,9	109,0	103,8	92,6	85,1	83,5	87,9	96,9
8	42,8	53,5	68,6	87,1	107,4	130,1	155,8	149,6	123,2	93,8	78,8	74,9	84,3	105,8
9	46,8	60,1	81,7	105,4	141,7	184,0	251,8	235,8	138,8	81,0	51,4	44,1	60,9	100,6
10	51,0	66,4	91,0	123,9	174,7	255,4	448,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	54,4	71,7	99,7	138,4	203,1	319,6	542,7	1041,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	55,9	72,3	102,9	146,3	218,7	346,4	550,6	976,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	56,7	74,4	104,8	149,2	214,1	346,7	542,4	852,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	57,2	75,5	103,5	141,6	206,2	320,4	506,0	755,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



Graf 8.48: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, deska (4 100 Hz; 24 A)



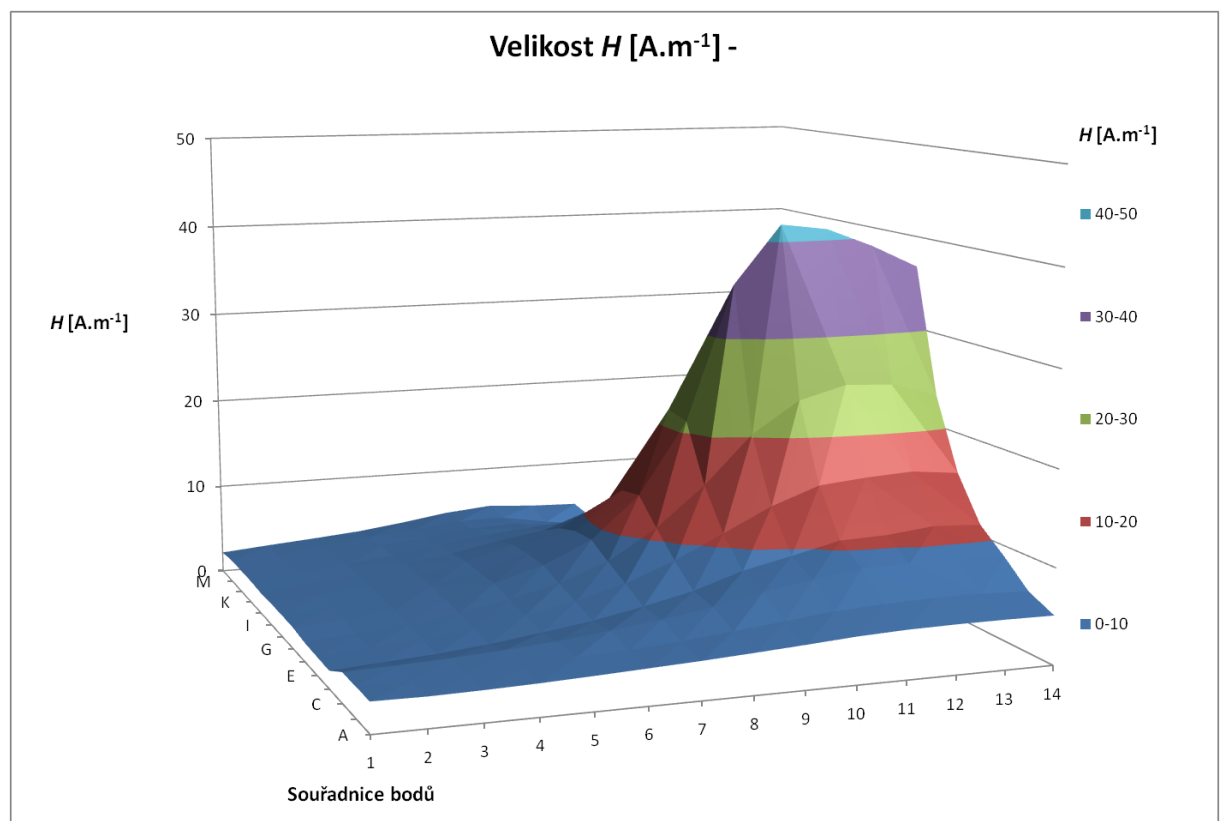
Graf 8.49: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, deska (4 100 Hz; 24 A) – řady

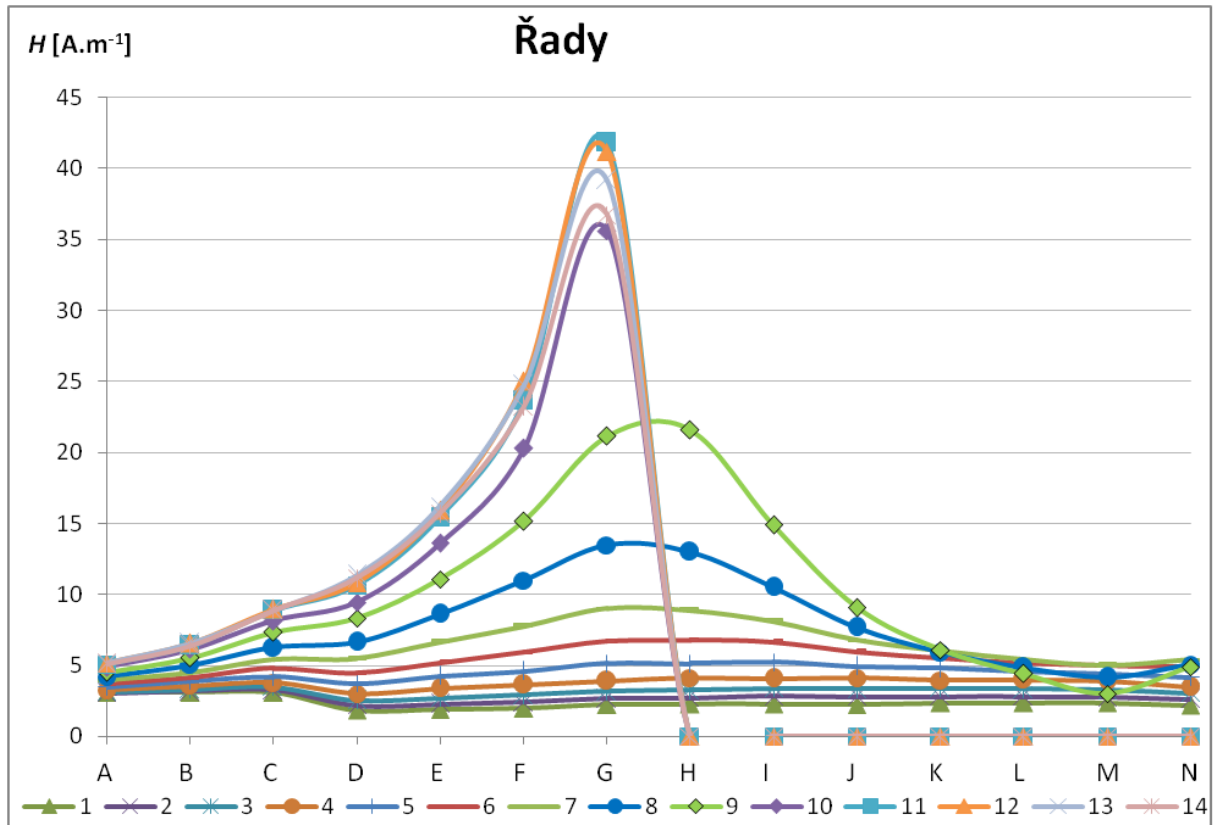
Graf 8.50: Průměrná teplota vsázky $T_{\text{průměr}}$ [°C]Graf 8.51: Průměrná teplota prvku (desky) $T_{\text{průměr}}$ [°C]Graf 8.52: Průměrná teplota induktoru T_{ind} [°C]

8.3.2.2 4100 Hz; 24 A – konfigurace induktor, stínění, vsázka, deska

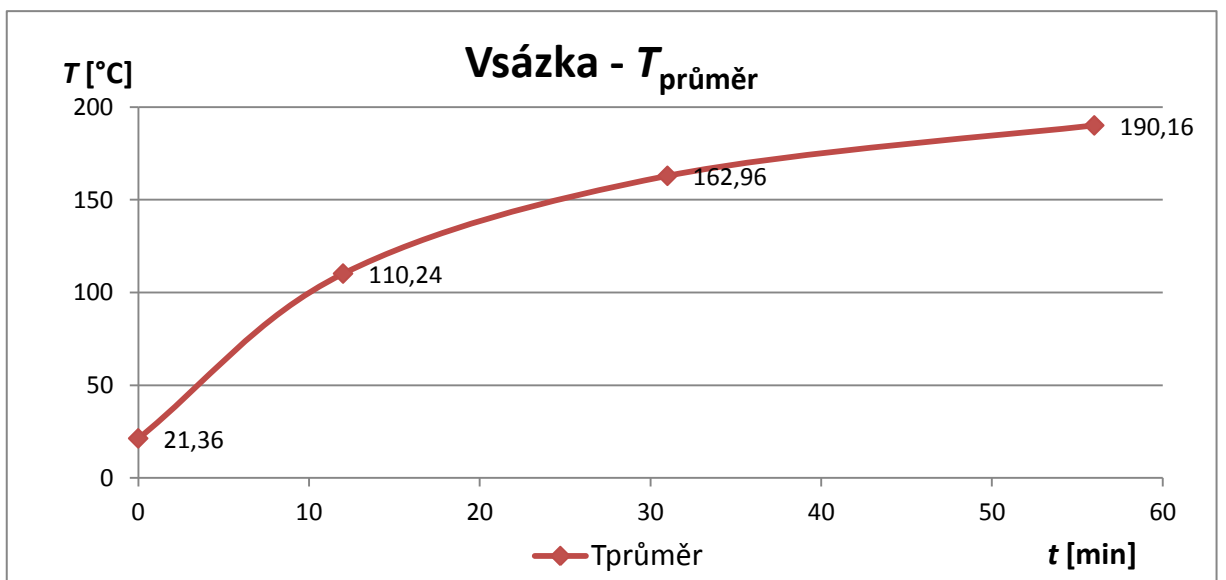
Tabulka 8.30: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, stínění, vsázka, vodivá deska (4 100 Hz)

		Intenzita magnetického pole H [A/m]													
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	3,1	3,1	3,1	1,8	1,9	2,0	2,2	2,3	2,3	2,2	2,4	2,4	2,4	2,2	
2	3,1	3,2	3,3	2,2	2,3	2,4	2,6	2,7	2,8	2,8	2,8	2,8	2,7	2,6	
3	3,1	3,3	3,5	2,5	2,7	2,9	3,2	3,3	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3	3,0	
4	3,3	3,6	3,8	3,0	3,4	3,6	3,9	4,1	4,1	4,1	4,0	4,0	3,9	3,5	
5	3,5	3,9	4,2	3,7	4,2	4,6	5,2	5,1	5,2	4,9	4,8	4,6	4,4	4,2	
6	3,7	4,1	4,8	4,5	5,2	5,9	6,7	6,8	6,6	6,0	5,5	5,2	5,0	5,0	
7	3,9	4,5	5,4	5,5	6,7	7,8	9,0	8,9	8,1	6,8	6,0	5,4	5,0	5,4	
8	4,2	5,0	6,3	6,6	8,6	11,0	13,5	13,0	10,5	7,7	5,9	4,9	4,2	5,1	
9	4,5	5,5	7,3	8,3	11,1	15,2	21,1	21,6	14,9	9,1	6,1	4,4	3,0	4,9	
10	4,9	6,1	8,1	9,4	13,6	20,3	35,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
11	5,1	6,4	8,9	10,6	15,4	23,6	41,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
12	5,2	6,6	9,0	10,8	15,9	25,0	41,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	5,2	6,6	8,9	11,4	16,2	24,8	39,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	5,1	6,4	8,9	11,1	15,7	23,2	36,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

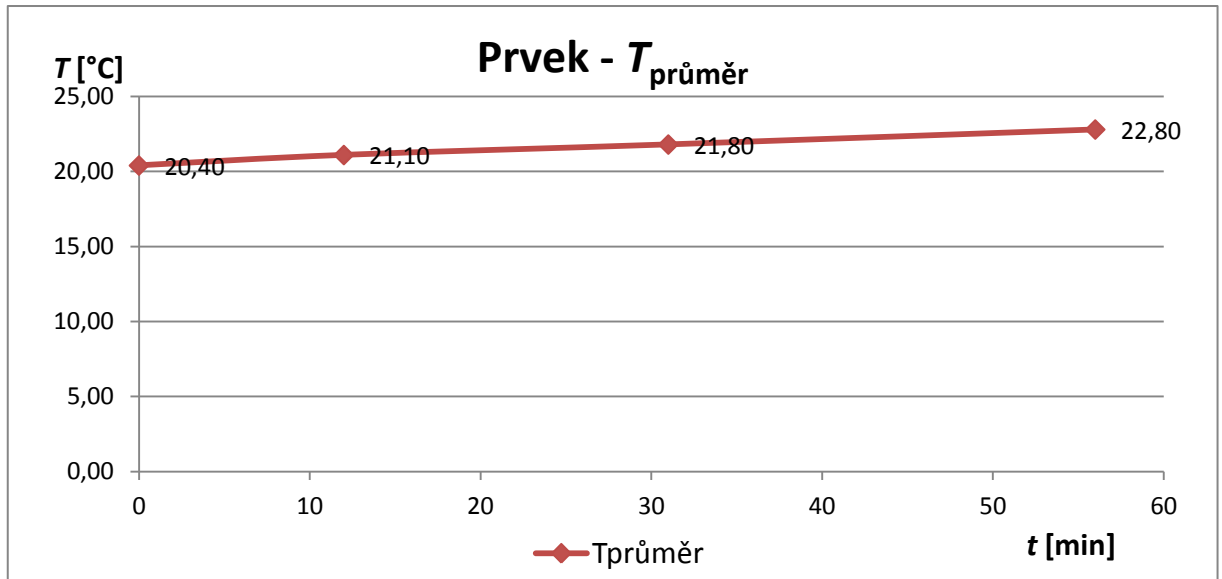
Graf 8.53: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, stínění, vsázka, deska (4 100 Hz)



Graf 8.54: Intenzita magnetického pole $H [A/m]$ – induktor, stínění, vsázka, deska (4 100 Hz) – řady



Graf 8.55: Průměrná teplota vsázky $T_{průměr} [^{\circ}C]$



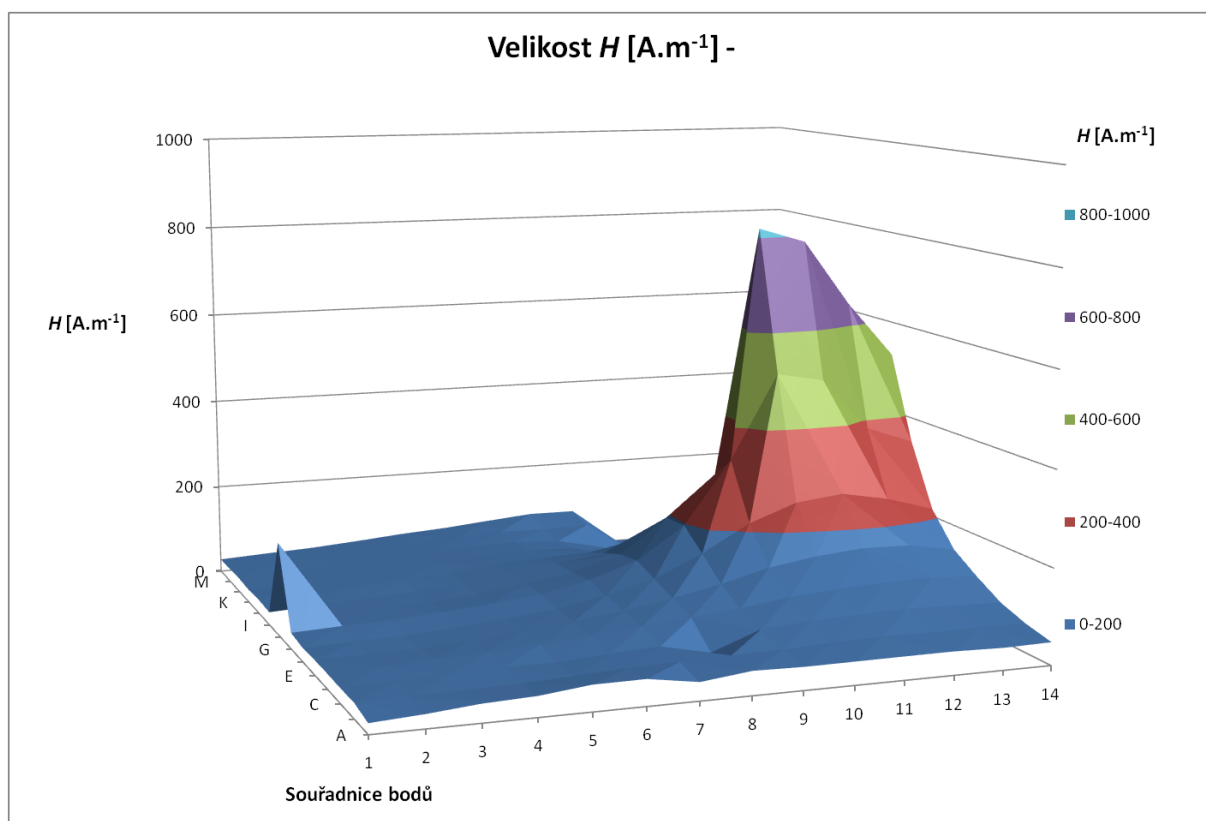
Graf 8.56: Průměrná teplota prvku $T_{\text{průměr}}$ [°C]

8.3.3 Vsázka a vodivá deska umístěná nad induktorem 10 000 Hz

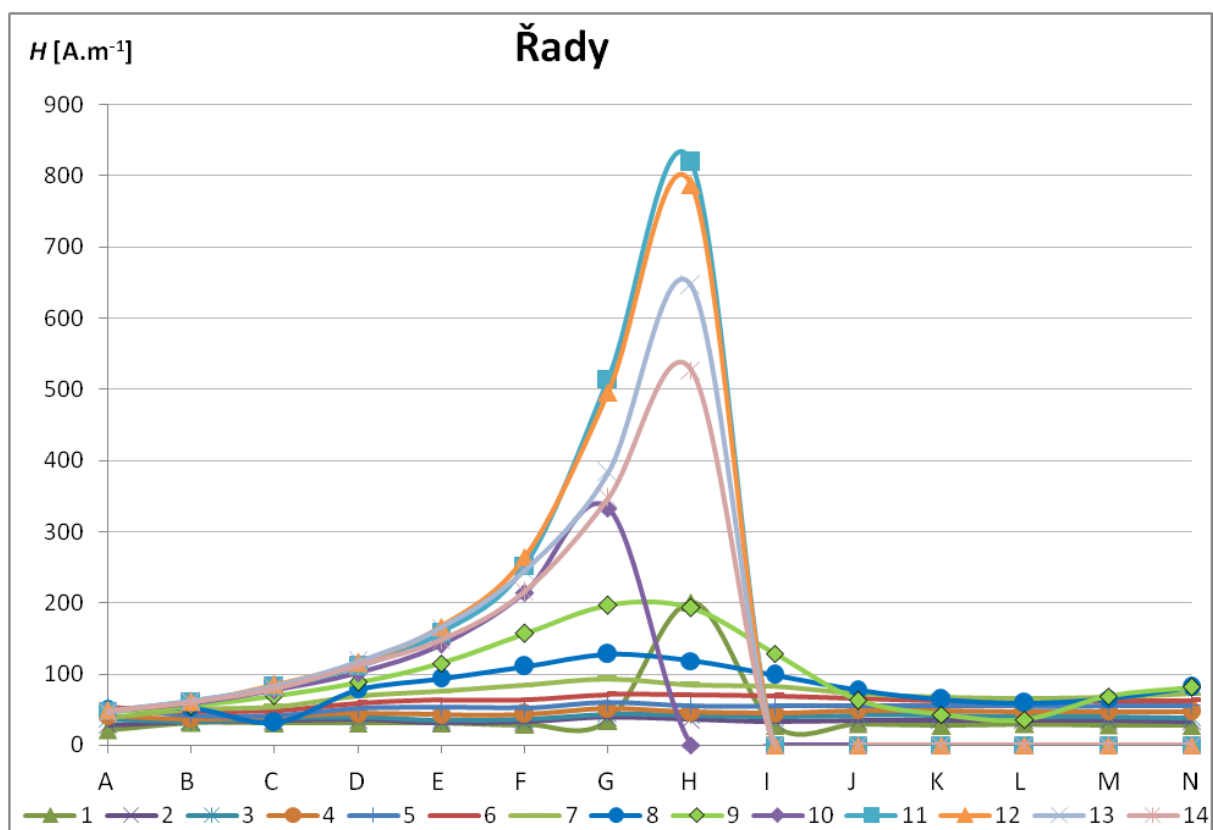
8.3.3.1 10 000 Hz; 18 A – konfigurace induktor, vsázka, deska

Tabulka 8.31: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, vodivá deska (10 000 Hz; 18 A)

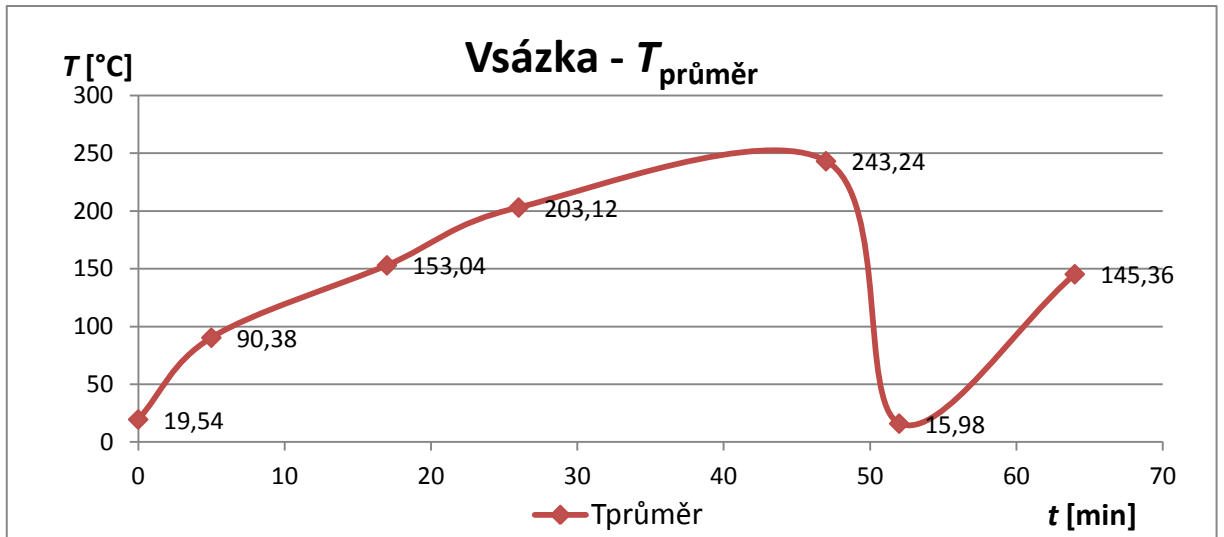
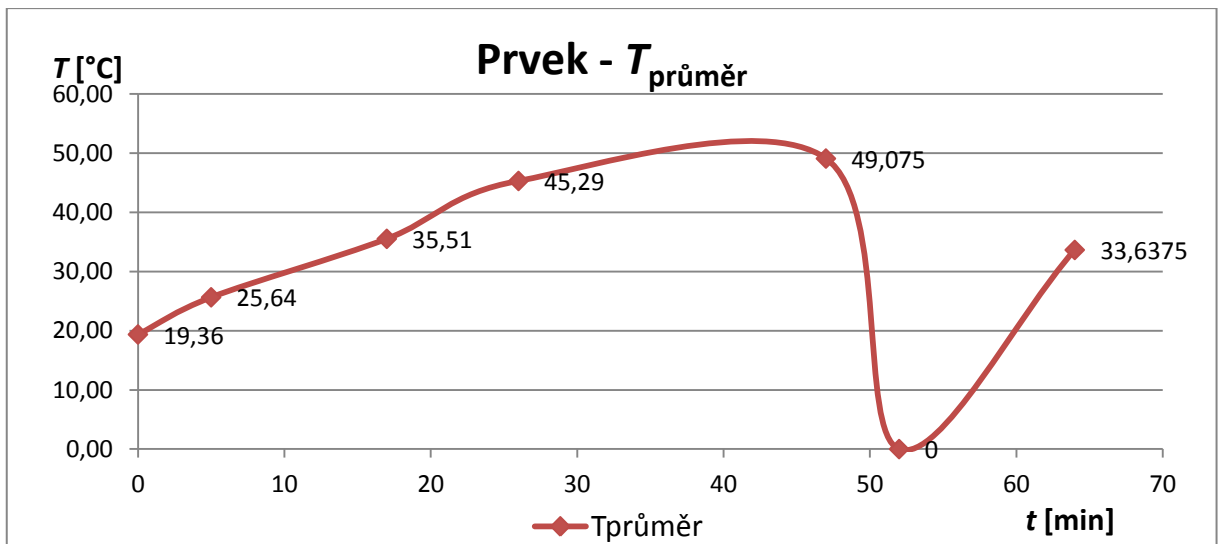
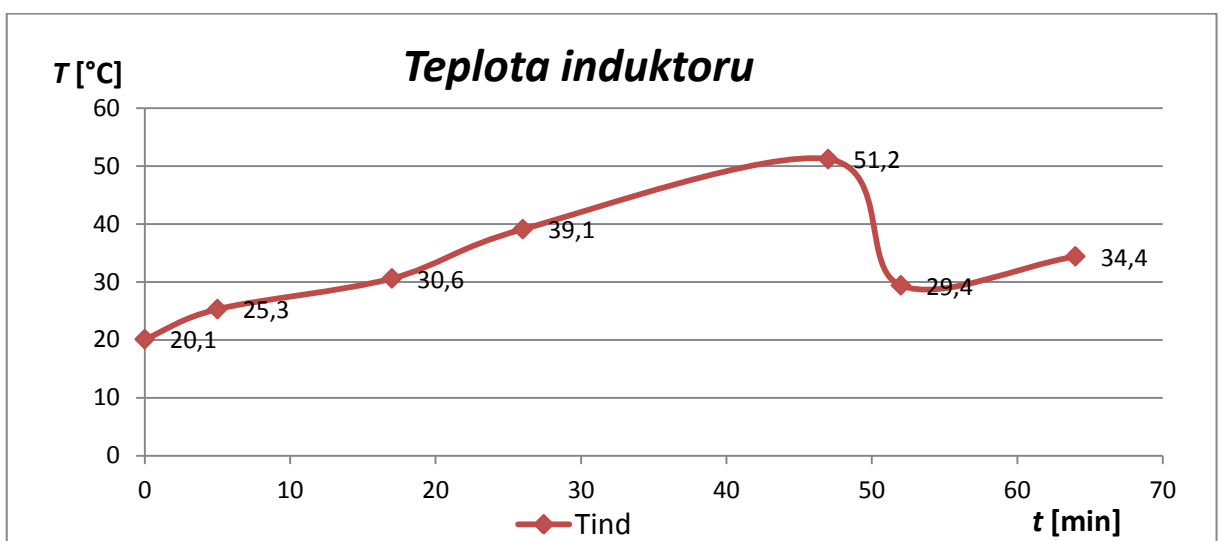
		Intenzita magnetického pole H [A/m]													
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	21,7	31,6	30,8	31,4	31,0	29,0	34,4	200,8	27,3	29,8	27,5	29,8	28,6	27,9	
2	28,1	33,7	34,6	36,4	31,8	32,6	39,5	36,4	33,3	34,8	35,6	35,1	34,9	33,7	
3	37,3	33,9	38,6	40,1	35,4	36,2	43,9	41,9	39,5	42,3	41,8	40,2	39,9	39,0	
4	41,4	36,9	40,7	44,8	43,1	43,5	51,6	46,6	45,0	48,7	48,7	47,7	47,0	46,9	
5	53,0	41,9	41,6	51,5	53,2	52,8	60,5	55,5	55,4	55,5	56,0	54,7	55,0	56,1	
6	53,6	47,2	48,6	59,4	63,4	63,9	71,6	70,3	69,4	66,1	63,1	61,5	62,6	62,9	
7	37,5	49,9	54,0	68,9	75,8	84,4	93,7	85,5	82,3	73,1	68,2	65,1	67,8	72,6	
8	49,3	52,8	31,6	77,9	93,7	110,5	127,6	118,6	99,0	76,9	64,3	59,5	65,4	81,8	
9	47,2	54,8	69,9	88,3	115,1	157,5	197,0	192,8	128,9	63,3	43,3	36,4	68,9	81,2	
10	47,8	58,5	77,3	101,7	141,3	214,9	332,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
11	48,4	62,3	81,6	110,5	157,6	252,1	514,6	819,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
12	48,8	60,8	85,3	116,2	166,7	264,1	496,1	787,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	46,2	61,7	82,2	118,0	164,7	245,7	383,4	645,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	48,2	60,8	79,8	111,3	147,5	215,9	347,2	527,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	



Graf 8.57: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, deska (10 000 Hz; 18 A)



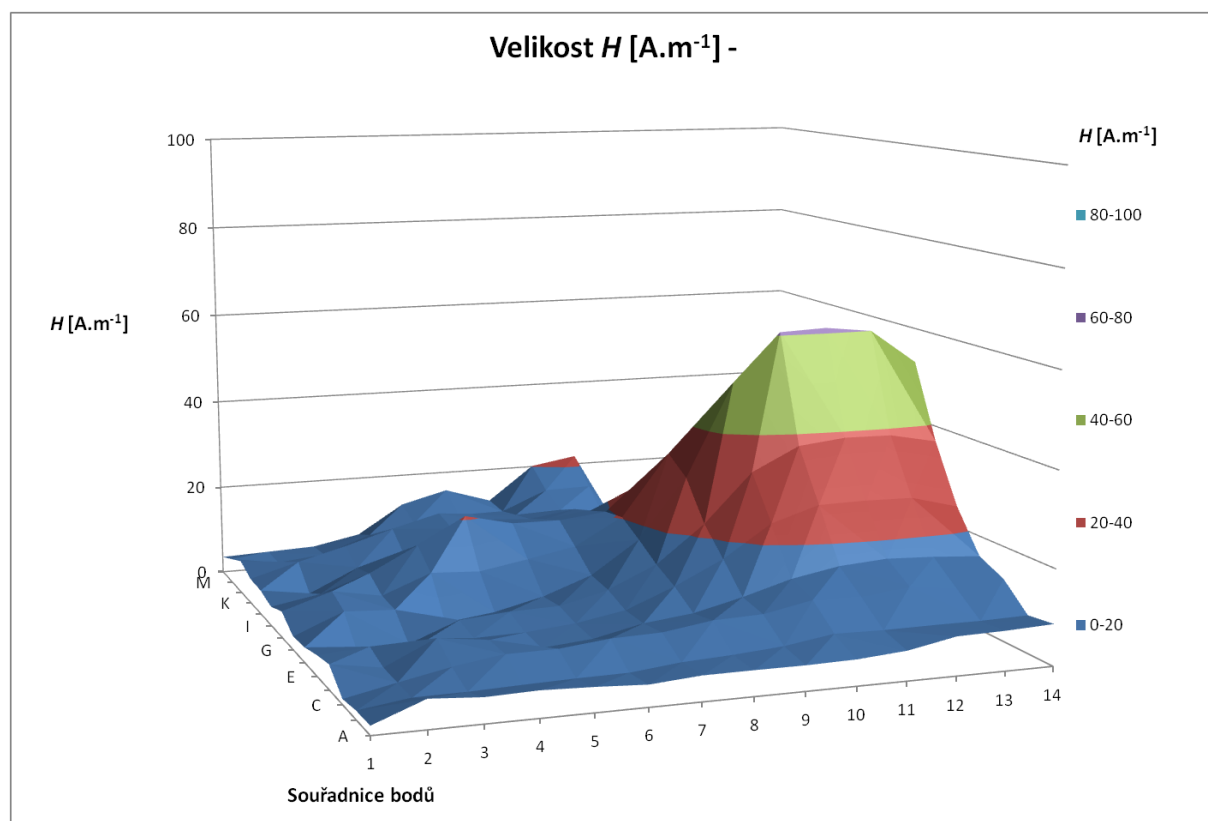
Graf 8.58: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, deska (10 000 Hz; 31,5 A) – řady

Graf 8.59: Průměrná teplota vsázky $T_{\text{průměr}}$ [°C]Graf 8.60: Průměrná teplota prvku (desky) $T_{\text{průměr}}$ [°C]Graf 8.61: Průměrná teplota induktoru T_{ind} [°C]

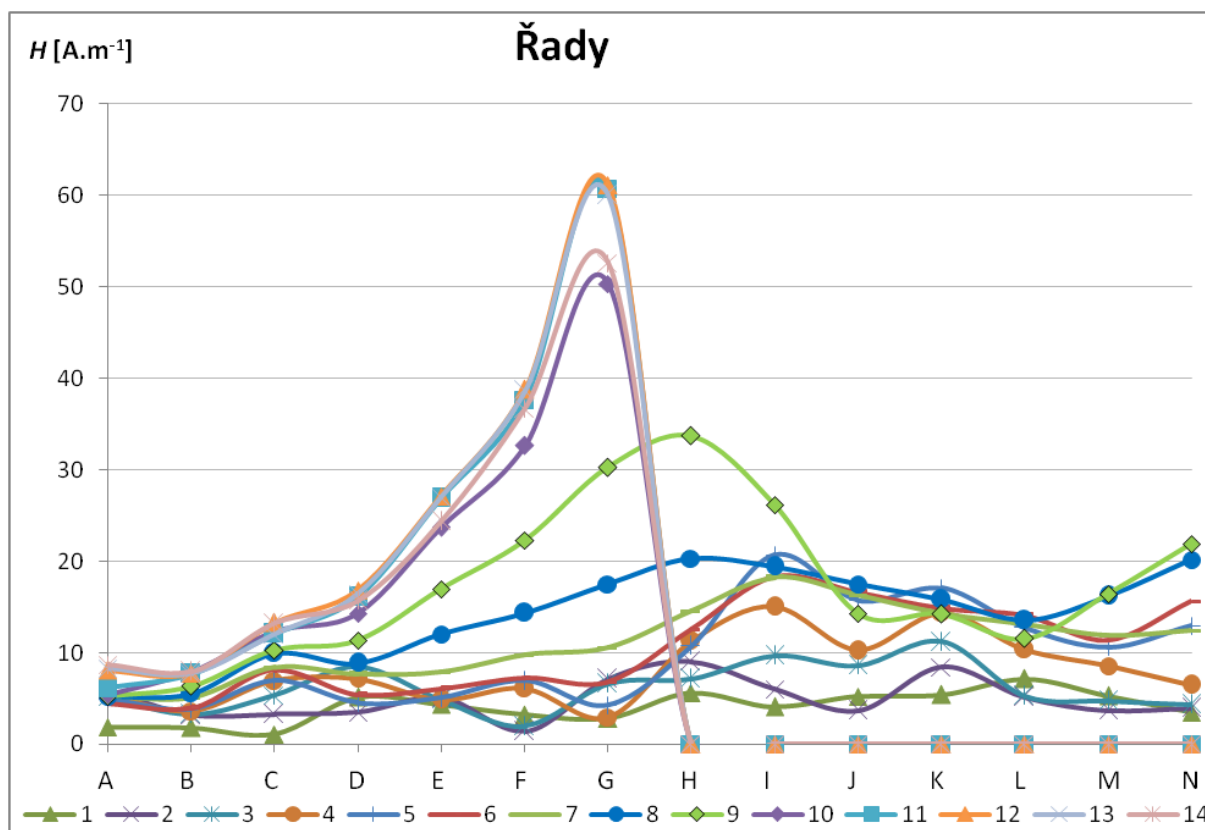
8.3.3.2 10 000 Hz; 18 A – konfigurace induktor, stínění, vsázka, deska

Tabulka 8.32: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, stínění, vsázka, vodivá deska (10 000 Hz)

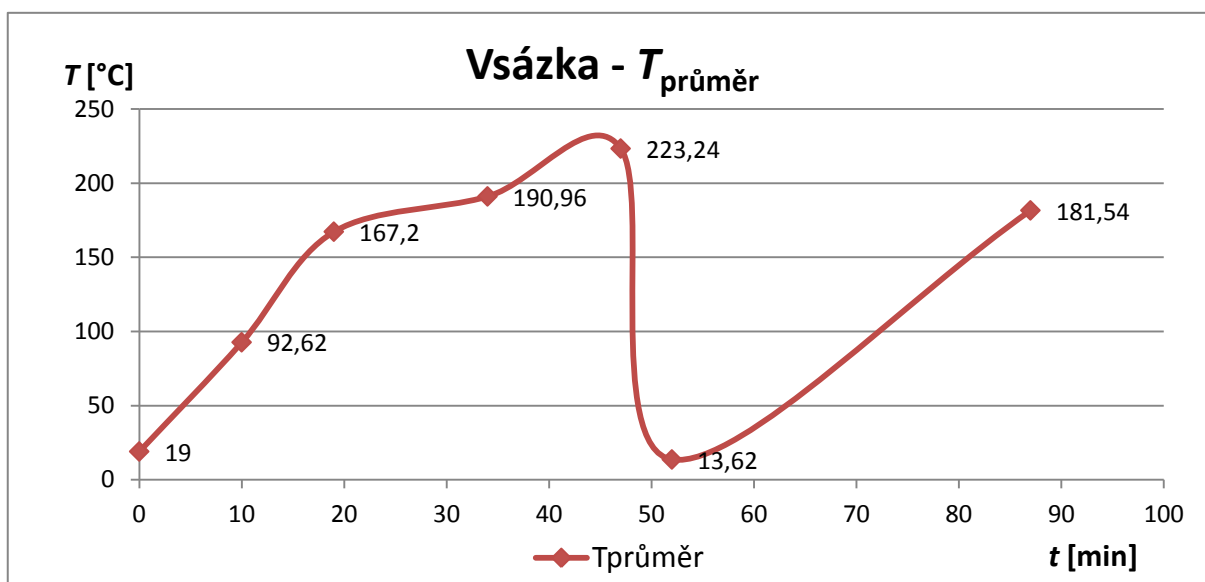
		Intenzita magnetického pole H [A/m]													
Řada/ Slopec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	1,9	1,8	1,1	5,2	4,3	3,2	2,8	5,6	4,1	5,2	5,4	7,1	5,3	3,5	
2	5,9	3,2	3,3	3,5	5,0	1,4	7,2	9,0	6,0	3,7	8,4	5,2	3,7	3,9	
3	5,1	3,3	5,4	8,4	4,9	2,0	6,6	7,2	9,7	8,6	11,2	5,3	4,7	4,4	
4	5,4	3,6	6,9	7,1	4,9	6,1	3,0	11,3	15,0	10,3	14,3	10,4	8,5	6,5	
5	5,0	3,9	7,0	4,5	5,1	6,9	4,3	10,7	20,7	15,8	17,1	12,8	10,6	13,0	
6	4,4	4,0	8,1	5,4	6,1	7,2	6,8	12,6	18,3	16,6	14,9	14,1	11,4	15,6	
7	5,2	5,1	8,4	7,7	7,9	9,8	10,5	14,5	18,2	16,3	14,3	13,1	11,9	12,4	
8	5,2	5,6	9,9	8,9	12,0	14,4	17,5	20,3	19,4	17,5	15,8	13,5	16,2	20,1	
9	5,2	6,3	10,3	11,3	17,0	22,3	30,3	33,7	26,2	14,3	14,2	11,5	16,5	21,9	
10	5,4	7,9	12,3	14,3	23,7	32,7	50,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
11	6,1	7,7	12,1	16,1	26,9	37,7	60,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
12	8,1	7,8	13,3	16,8	27,1	38,8	61,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	8,3	7,7	12,1	16,4	26,9	38,7	60,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	8,7	8,0	13,2	15,7	24,3	36,7	52,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	



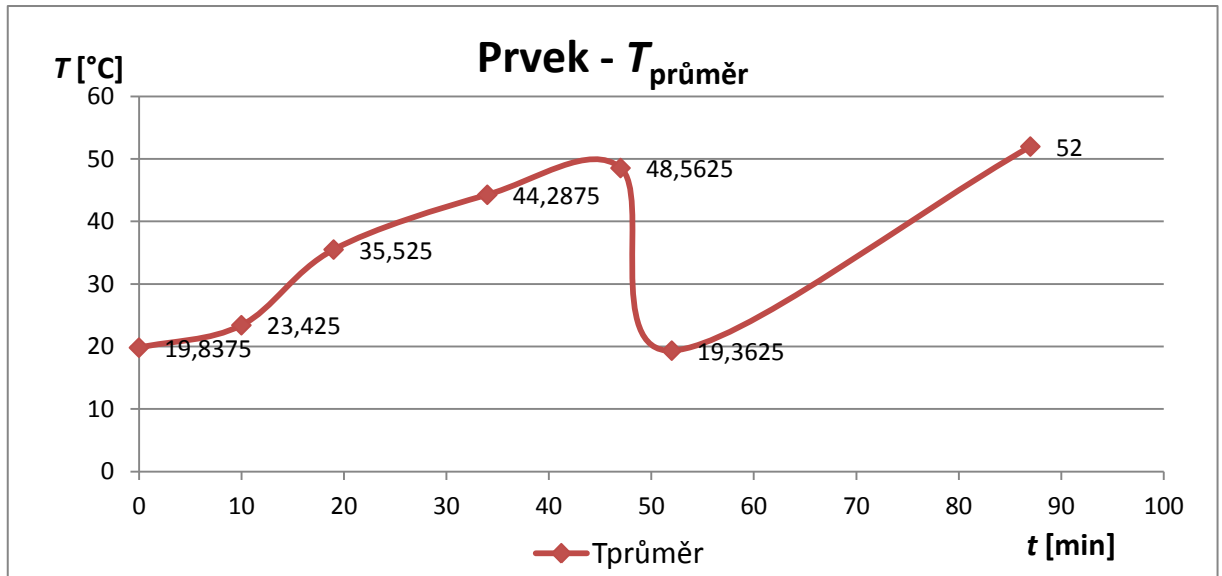
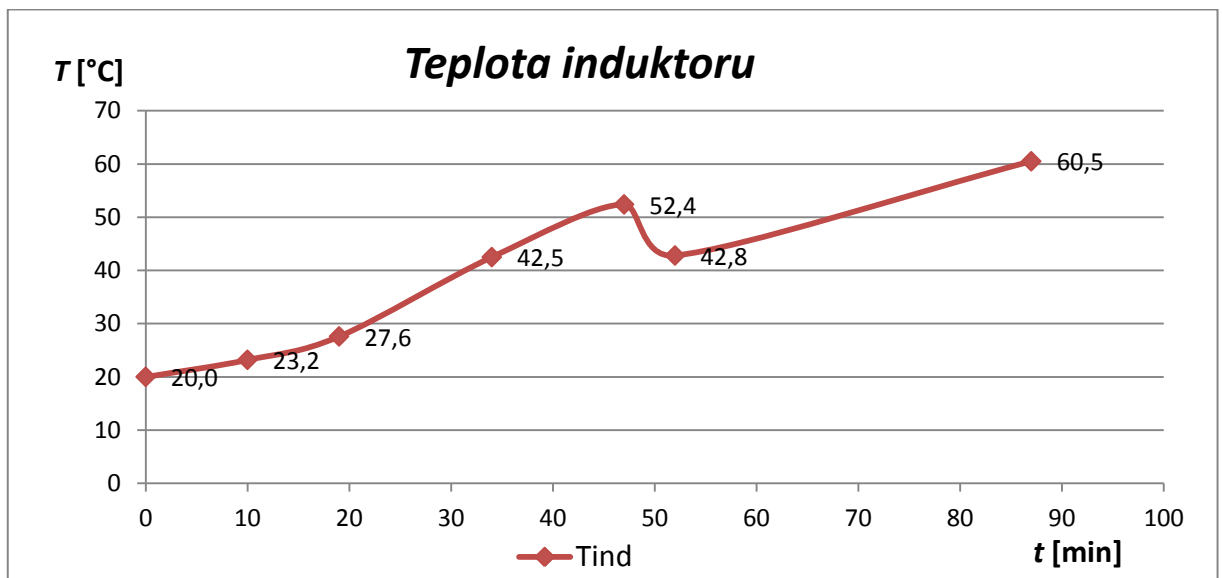
Graf 8.62: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, stínění, vsázka, deska (10 000 Hz)



Graf 8.63: Intenzita magnetického pole $H [A/m]$ – induktor, stínění, vsázka, deska (10 000 Hz) – řady



Graf 8.64: Průměrná teplota vsázky $T_{průměr} [^{\circ}C]$

Graf 8.65: Průměrná teplota prvku $T_{\text{průměr}}$ [°C]Graf 8.66: Průměrná teplota induktoru T_{ind} [°C]

8.3.4 Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] vlivem vsázky a vodivé desky pro induktor s frekvencí napájecího proudu 4 100 Hz

Analogicky jako pro předchozí měření provedu porovnání pomocí zavedené veličiny Zmenšení intenzity magnetického pole H přídatným konstrukčním prvkem (zde tedy vodivou deskou spolu se vsázkou) d [%] dle následujících vzorců:

$$d[\%] = \frac{H_{ST} - H_{D,VS,ST}}{H_{ST}} \cdot 100 [\%] \quad (8.4)$$

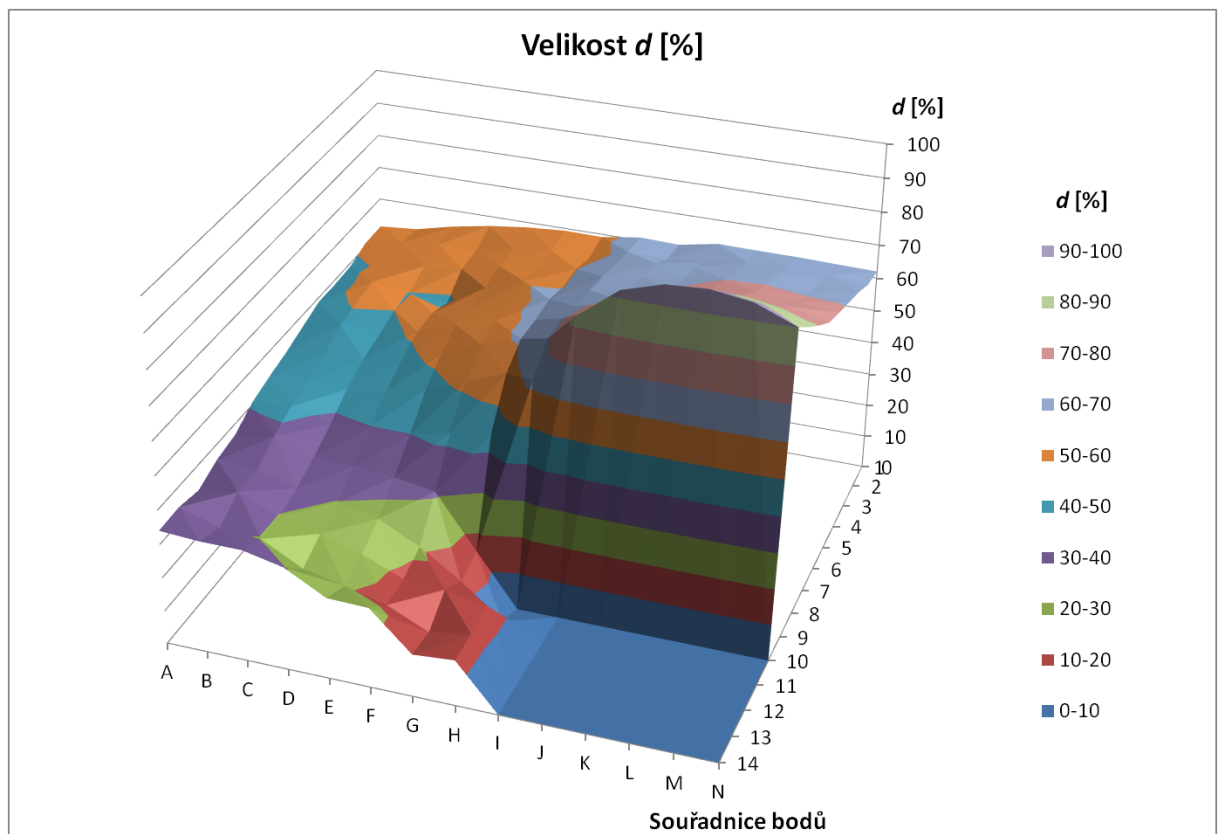
$$d[\%] = \frac{H_I - H_{D,VS}}{H_I} \cdot 100 [\%] \quad (8.5)$$

kde H [A/m] je intenzita magnetického pole, ST označuje induktor se stíněním svazky transformátorových plechů, D kruhovou deskou, VS vsázkou a I samotný induktor.

8.3.4.1 4 100 Hz, porovnání konfigurace induktor a induktor, vsázka, deska

Tabulka 8.33: Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem

Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem d [%]														
Řada/ sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	51,2	52,2	54,9	57,0	58,4	59,3	59,1	60,9	60,5	62,7	62,6	62,5	62,2	62,0
2	51,1	52,9	54,4	54,3	56,8	58,4	57,9	61,6	61,2	62,8	64,4	64,7	64,3	63,3
3	49,0	50,9	52,9	54,0	56,8	58,1	59,8	63,3	65,4	66,2	67,0	67,5	66,6	66,6
4	48,6	51,3	49,9	48,8	55,5	59,4	59,7	64,9	66,6	67,9	69,9	70,2	69,4	69,1
5	48,7	50,4	50,0	51,2	54,8	58,2	61,5	66,1	68,0	70,3	72,5	73,8	72,7	71,7
6	46,5	49,0	47,9	51,1	55,2	58,6	60,8	66,9	71,0	74,2	77,9	78,3	77,0	74,4
7	44,4	45,8	46,1	48,1	52,0	57,0	60,9	69,0	75,0	80,2	83,2	83,6	82,0	79,2
8	42,7	43,4	43,0	44,6	47,1	52,0	56,3	68,8	78,5	86,4	89,4	90,3	88,6	84,4
9	40,7	41,6	38,6	39,9	40,0	42,7	44,6	62,5	82,9	92,1	95,7	96,4	94,7	90,0
10	36,9	38,7	34,8	34,4	33,2	31,3	15,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	35,6	34,7	31,7	29,8	27,2	21,2	13,1	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	32,8	34,7	29,8	27,0	23,3	18,3	17,7	15,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	34,3	30,8	29,7	23,3	20,8	17,6	12,0	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	34,0	33,3	33,3	30,7	24,2	23,8	12,6	13,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

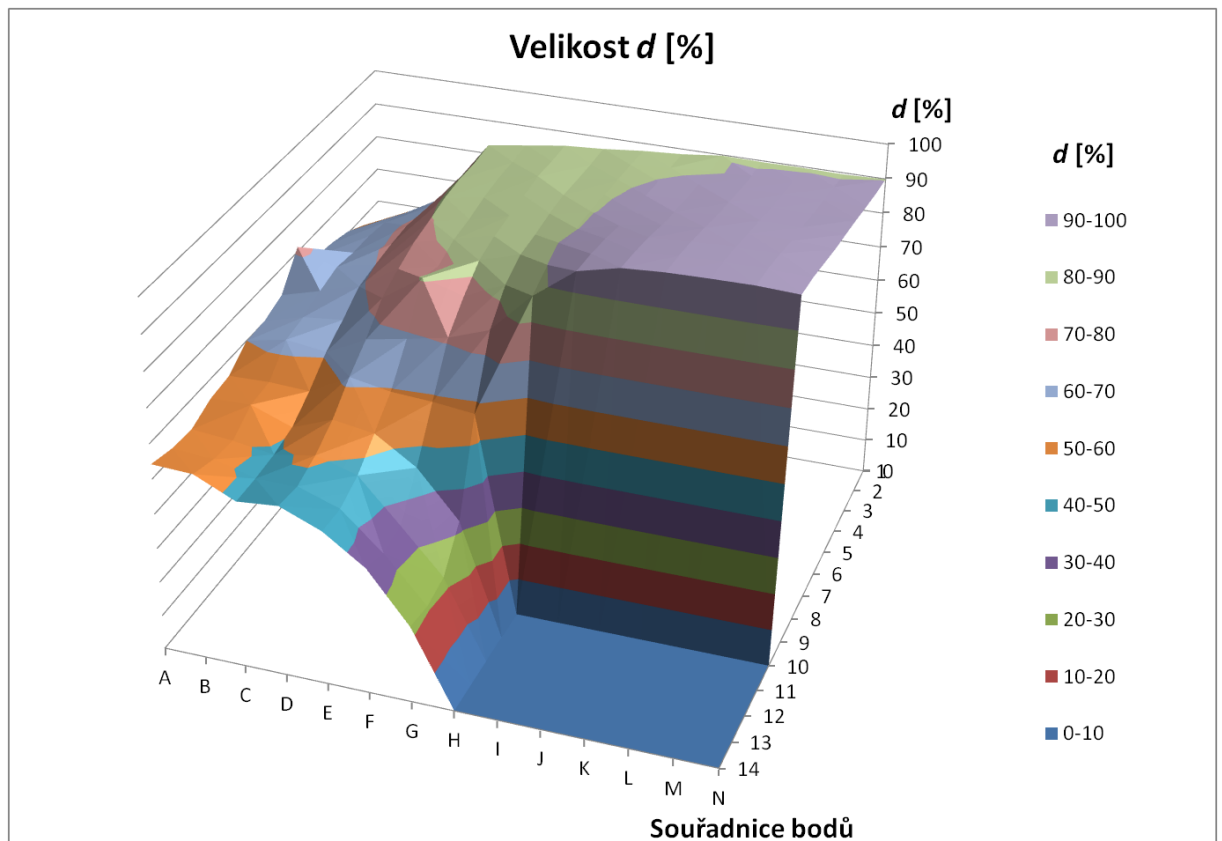


Graf 8.67: porovnání konfigurace induktor a induktor, vsázka, deska pomocí d [%]

8.3.4.2 4 100 Hz, porovnání konfigurace induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a induktor se stíněním svazky, vsázka, deska

Tabulka 8.34: Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem

Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem d [%]														
Řada/ sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	53,5	59,1	65,7	82,5	84,2	85,8	86,6	87,7	88,5	89,8	89,6	89,7	89,5	89,9
2	57,4	62,4	67,8	81,8	84,0	85,9	86,7	88,4	89,2	89,8	90,4	90,7	90,8	90,7
3	60,6	65,2	69,6	82,0	83,9	86,4	87,0	88,9	90,2	91,0	91,6	91,8	91,8	91,9
4	62,2	66,2	71,2	81,4	83,2	85,6	87,6	89,4	91,0	91,8	92,8	93,0	93,0	93,2
5	63,2	66,4	70,8	79,8	81,9	84,9	87,2	89,7	91,6	93,1	94,0	94,5	94,5	94,3
6	71,4	67,3	70,0	78,5	81,1	83,9	86,3	89,8	92,6	94,5	95,7	96,0	95,9	95,4
7	62,4	65,6	68,8	75,9	78,7	82,2	85,8	90,6	94,0	96,2	97,2	97,5	97,5	96,8
8	60,2	63,4	64,6	72,9	80,6	77,3	82,6	90,1	95,1	97,5	98,5	98,8	98,8	98,3
9	60,0	62,3	60,8	66,6	68,8	71,2	75,3	86,9	95,6	98,4	99,2	99,4	99,5	99,1
10	55,5	55,8	55,2	61,5	59,4	58,7	57,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	54,6	55,1	50,7	55,2	53,4	45,8	32,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	51,9	50,8	49,0	51,0	47,6	35,3	22,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	52,4	51,6	48,4	48,5	44,4	33,9	21,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	54,2	53,7	48,3	49,4	44,6	36,5	22,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



Graf 8.68: porovnání konfigurace induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a induktor se stíněním svazky, vsázka, deska pomocí d [%]

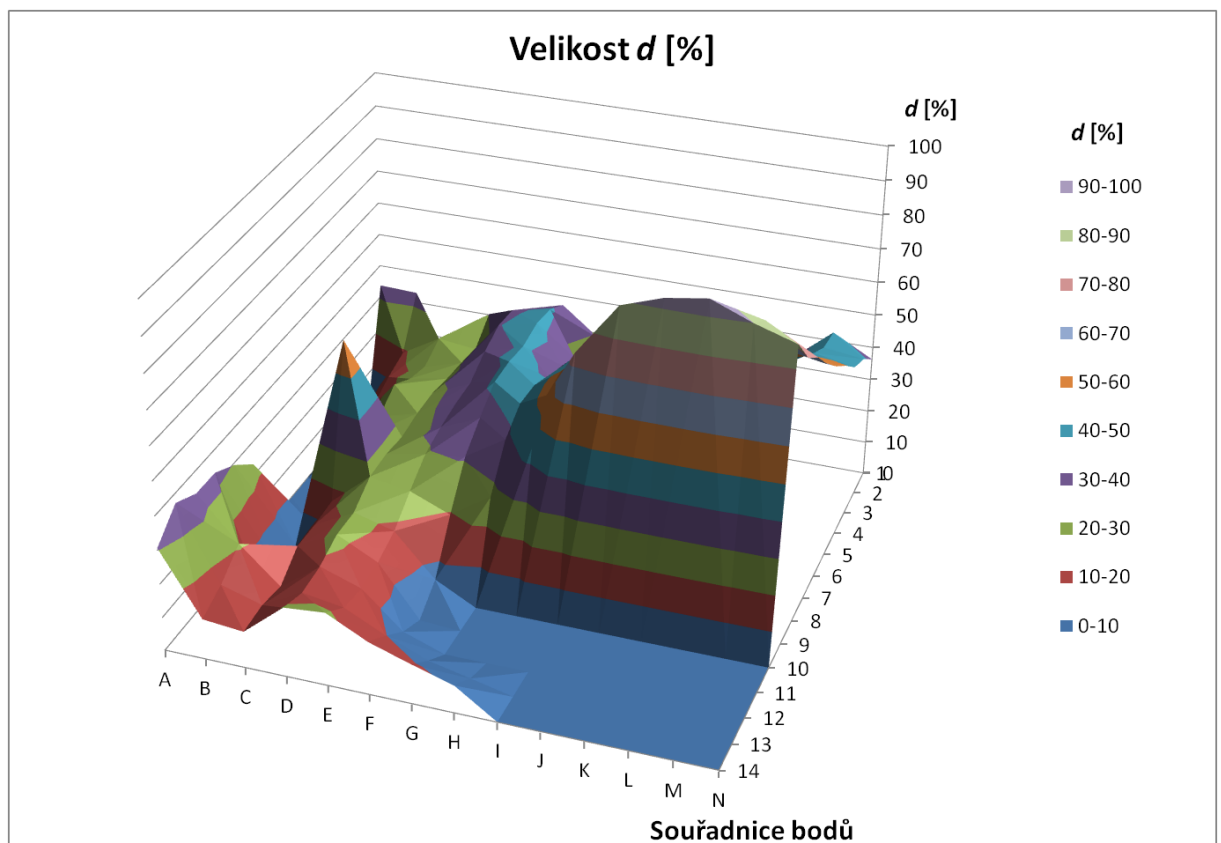
8.3.5 Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] vlivem vsázky a vodivé desky pro induktor s frekvencí napájecího proudu 10 000 Hz

Porovnání je zde provedeno na stejném principu jako v Kapitola 8.3.4.

8.3.5.1 10 kHz, porovnání konfigurace induktor a induktor, vsázka, deska

Tabulka 8.35: Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem

Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem d [%]														
Řada/ sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	33,6	33,1	-6,7	30,2	30,5	37,1	28,2	-303,1	45,0	35,7	41,4	31,4	42,6	36,3
2	-151,5	19,1	25,8	24,5	39,0	41,3	-15,0	36,5	48,7	39,4	38,5	36,4	43,6	42,1
3	-152,3	17,0	22,4	25,8	39,8	42,4	33,4	38,9	46,8	41,8	42,3	41,0	47,7	45,4
4	-112,7	13,9	24,4	26,6	37,2	40,9	36,9	47,0	50,8	50,1	50,3	49,4	52,3	51,6
5	-124,5	12,0	28,4	27,8	33,2	41,9	39,4	50,1	55,4	59,0	57,3	58,7	59,0	57,2
6	-90,8	-3,8	24,3	27,5	32,7	41,5	42,6	50,9	59,2	63,0	66,8	66,9	65,8	63,6
7	-12,3	-0,7	23,8	26,2	31,4	36,5	43,0	54,8	63,7	71,1	75,5	76,9	75,5	71,3
8	-27,9	0,3	59,3	27,0	29,4	30,8	38,2	53,6	69,6	79,0	83,5	85,3	85,3	76,9
9	23,3	-2,0	16,6	26,5	24,4	19,5	27,2	44,1	73,8	88,8	92,8	94,7	90,0	86,3
10	29,4	-1,1	15,9	22,0	18,7	6,3	-1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	33,4	-2,7	16,0	21,9	15,8	0,8	-13,6	-21,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	33,5	20,9	10,4	19,0	14,9	4,3	-3,8	-6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	37,3	15,3	11,7	18,0	16,2	10,3	5,4	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	30,6	12,0	10,8	20,6	21,7	15,7	11,8	8,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

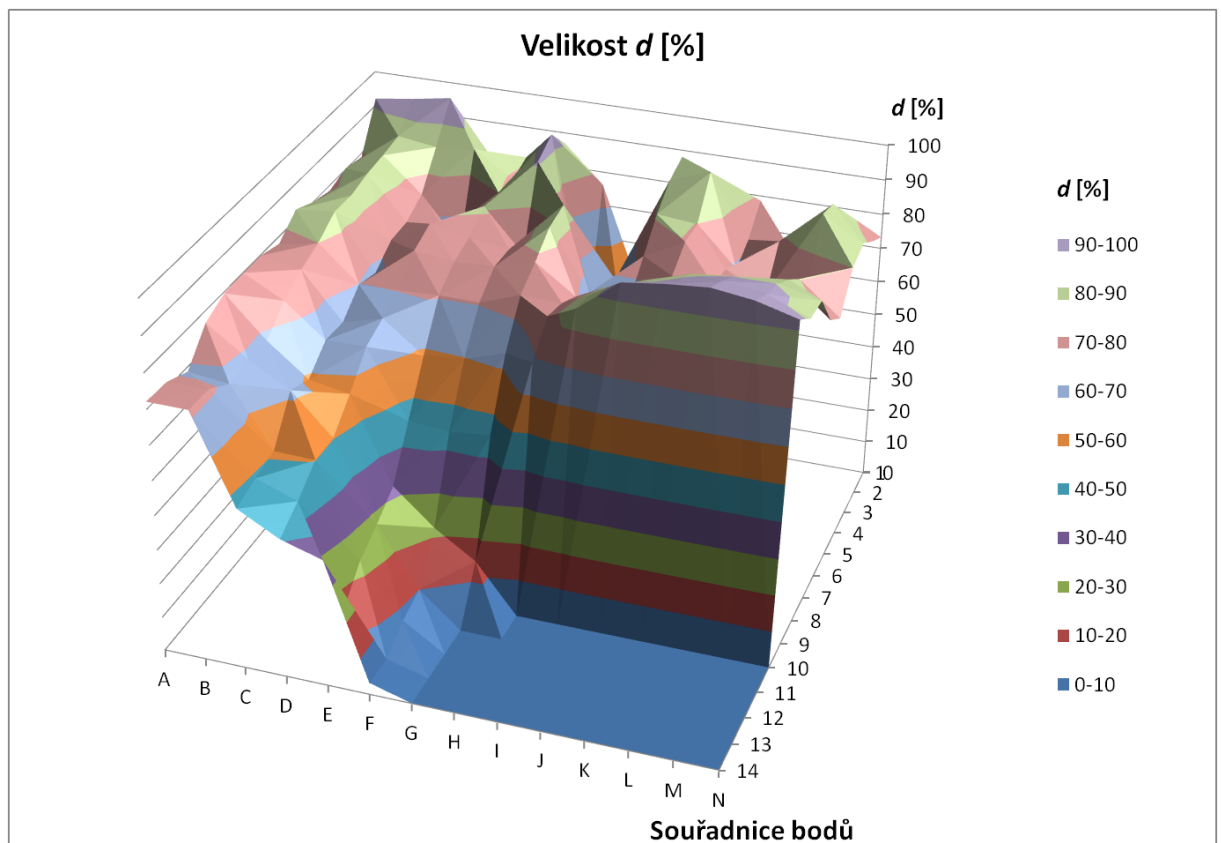


Graf 8.69: porovnání konfigurace induktor a induktor, vsázka, deska pomocí d [%]

8.3.5.2 10 kHz, porovnání konfigurace induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a induktor se stíněním svazky, vsázka, deska

Tabulka 8.36: Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem

Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem d [%]														
Řada/ sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	92,0	93,5	95,4	80,6	81,0	86,9	76,2	46,4	88,1	81,6	78,6	48,4	75,6	73,3
2	78,9	86,9	85,4	86,5	79,0	94,2	41,8	32,1	86,0	90,1	72,1	71,8	86,2	77,2
3	80,3	85,9	76,0	62,8	80,2	91,0	55,0	59,7	81,0	79,9	68,6	78,7	88,4	81,8
4	78,4	85,3	72,7	71,7	81,0	68,7	85,1	50,4	73,9	79,9	73,9	69,0	74,8	80,1
5	80,0	83,8	72,4	79,1	77,0	75,4	83,7	66,4	66,7	75,2	74,5	73,9	80,2	71,0
6	82,8	84,0	67,9	76,4	75,0	75,6	78,8	70,8	74,2	78,2	83,0	80,9	85,5	76,0
7	77,9	80,0	69,8	70,1	70,6	70,5	74,6	74,3	80,7	84,9	88,4	89,7	89,7	86,9
8	79,7	77,6	64,3	67,5	58,6	59,7	63,4	76,1	84,2	89,2	91,8	93,8	92,2	87,6
9	80,0	74,0	64,7	64,8	45,4	44,3	45,4	68,6	85,7	94,9	96,4	97,4	95,9	92,8
10	79,6	68,1	59,1	57,0	32,1	21,9	14,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	76,7	68,5	61,8	50,3	27,3	10,1	-13,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
12	68,7	67,4	50,5	50,1	23,2	7,6	-13,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	71,7	71,8	48,9	44,7	15,5	3,2	-20,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	72,1	72,0	46,7	40,4	36,9	3,4	-23,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



Graf 8.70: porovnání konfigurace induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a induktor se stíněním svazky, vsázka, deska pomocí d [%]

9 Simulace laboratorního modelu

9.1 Metoda numerického výpočtu [19]

Rozmanité fyzikální děje lze v dnešní době popsat diferenciálními a integrálními rovnicemi. Analytické řešení takovýchto rovnic je však možné pouze pro jednoduché děje. Pro složité děje je takové řešení téměř nemožné bez značných zjednodušení snižujících přesnost výsledku. Použitím numerické metody lze dojít k přesným výsledkům. Jednou z neznámějších numerických metod je metoda konečných prvků (MKP, FEM – Finite Element Method). Základním principem této metody je rozdělit nadefinovaný objekt na určitý počet částí - elementy. Aby byla zajištěna přesnost, je potřeba objekt rozdělit na co nejvíce elementů. Jedná se o takzvané zasítování – mesh, tedy vytvoření diskretizační sítě řešeného problému. Nejčastěji se oblast rozděluje na trojúhelníkové elementy. Elementy jsou vzájemně spojeny v tzv. uzlech, které mají známé souřadnice v prostoru. Zjednodušeně lze říci, že výpočet neznámých parametrů se provádí v těchto uzlech. Vlastnosti jednotlivých elementů se popíší matematickou funkcí a tím pro popis celého objektu potřebujeme soustavu rovnic. Řešení pomocí diferenciálních (integrálních) rovnic je tak převedeno na soustavu algebraických rovnic. Pro získání jednoznačného řešení je nutné znát okrajové podmínky. Pokud bychom je neznali, úloha by měla nekonečně řešení. Metodou konečných prvků je možné řešit pole ve 2D i ve 3D. Tato metoda je velmi náročná na výkon počítače. Potřebný výkon a paměť se zvyšuje s rostoucím počtem elementů. Obzvláště při řešení rozsáhlejších 3D úloh je vhodné použít superpočítač, aby doba výpočtu nebyla příliš dlouhá. Při řešení úloh používají metodu konečných prvků tyto programy: Agros 2D, ANSYS, RillFEM a QuickField.

9.2 Počítačová simulace indukčních zařízení

U průmyslových zařízení bývá častým důvodem potřeby použít počítačovou simulaci právě nutnost znát představu o rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení, nebo pole teplotního ohřivaného materiálu vsázky za účelem jeho dalšího technologického zpracování. Programy pracující s metodou konečných prvků při výpočtu elektromagnetických polí využívají zavedenou veličinu magnetický vektorový potenciál A [A/m]. Tato veličina nemá žádnou fyzikální podstatu. Jedná se pouze o pomocnou fyzikální veličinu, která výpočty polí usnadňuje díky svojí spojitosti na rozhraní prostředí. Pro vektorový potenciál platí rovnice:

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (9.1)$$

Mezi důležité základní veličiny výše uvedených vyšetřovaných polí patří E , H a J . Celkové teplo pak lze získat z průběhu proudové hustoty její integrací. S velkým počtem elementů stoupají nároky na výpočetní techniku, proto se používají různá zjednodušení. Největším zjednodušením je provedení simulace pouze ve 2D prostoru. U rotačně symetrických indukčních kelímkových pecí a jejich fyzikálních laboratorních modelů lze také simulace provádět jako 2D osově symetrické ve válcových souřadnicích. Induktor pece nahradím ekvivalentní vodivou vrstvou. Její rozměry odpovídají velikosti induktoru. Také stínění vodivým pláštěm se zakresluje v geometrii odpovídající skutečné velikosti. U stínění transformátorovými plechy není možné ve 2D modelu zobrazit jednotlivé svazky transformátorových plechů, je tedy potřeba jeho velikost přepočítat na náhradní stínící dutý válec o stejné výšce a vnitřním průměru odpovídajícímu průměru vnitřnímu obvodu okraje svazků. Odlišná však bude nově stanovená ekvivalentní tloušťka, kterou stanovím z rovnosti objemu původního stínění a náhradního stínícího pláště. Pro jednoznačnost řešení dané úlohy je potřeba zadat okrajové podmínky. Ty se zadávají pomocí vektorového potenciálu A . V ose symetrie a na půlkružnici hranice vyšetřované oblasti okolí jsem nastavil první Dirichletovu okrajovou podmínku $A = 0$.

9.3 Popis programu RillFEM

RillFEM je software pro řešení elektromagnetických, elektrostatických, teplotních a deformačních polí. Stejně jako jiné simulační programy se skládá z preprocesoru, solveru a postprocesoru.

Preprocesor zpracovává vstupní data řešeného problému, která se zadávají zpravidla interaktivně ale je možný i klasický přístup přes nabídku hlavního menu. Slouží tedy k zadávání:

1. geometrické konfigurace řešených oblastí a jejich rozměrů. Je možné importovat geometrii z jiných programů, např. CAD systémů.
2. hodnot materiálových charakteristik (tj. permitivit, permeabilit a konduktivit), které specifikují prostředí lineární, nelineární, izotropní nebo anizotropní. Součástí preprocesoru je interní databáze normalizovaných materiálů, kde práce s ní výrazně zrychluje práci s programem.
3. hodnot podmínek (podmínek na rozhraní, okrajových nebo počátečních).
4. veličin budícího pole (tj. proudů, napětí, nábojů a u permanentních magnetů magnetizací).

Rovněž se zde provádí diskretizace vyšetřovaných oblastí, můžeme tedy oblastmi proložit síť s námi nadefinovaným krokem. Síť je většinou generována automaticky, uživatel má však možnost okamžité korigace jemnosti sítě dle potřeby, což ocení především při výstupu ve formě grafů.

Solver provádí vlastní numerické řešení elektromagnetického pole v uzlech diskretizační sítě. Z elektromagnetických veličin se řeší skalární elektrický nebo magnetický potenciál, vektorový magnetický potenciál, případně přímo stavové vektory elektromagnetického pole. U sdružených úloh je to ještě například teplota, namáhání apod. V některých solverech se také ihned vypočítávají příslušné derivace těchto veličin, čímž se odlehčí postprocesoru při prezentaci dalších veličin elektromagnetického či jiného fyzikálního pole. Solvery pro jinou třídu úlohy se mohou mezi sebou odlišovat například druhem použité metody či její variantou nebo konkrétním algoritmem zpracování.

Postprocesor na základě hodnot veličin získaných v solveru provádí jejich vlastní prezentace, a to:

1. grafické zpracování a z něho následné dopočítání veličin na libovolných definičních oblastech (tj. v různých bodech, hranách, uzavřených 2D či 3D oblastech, a to jak vybráním již definovaných oblastí v preprocesoru nebo přímo zde definovaných), v libovolných časových hladinách a provádí se tzv. „mapování“ pole, tj. zobrazují se průběhy siločar, ekvipotenciál, příslušné zorientované vektory nebo histogramy. Samozřejmostí je i možnost zobrazování pouze některých složek příslušné veličiny a možnost též kontrolního zobrazování zadaných vstupních veličin.
2. dopočítávání a prezentování dalších veličin, a to jak lokálních, tak i integrálních charakteristik veličin, které nás zajímají. Například se určuje rozložení proudové hustoty vířivých proudů, energie elektrického či magnetického pole, elektrodynamické síly působící na určitou oblast, z elektrického pole se dále počítá kapacita a z pole magnetického se určuje indukčnost.
3. export výše uvedených veličin a to jak ve formě různých grafických formátů vhodných pro další editaci a tisk (soubory typu s příponou .ps, .cgm, .wmf, .jpg, .bmp, .tif), vhodných pro další prezentaci (např. animační soubory typu .avi nebo webové typu .html atd.). Lze rovněž přímo generovat celé technické zprávy nebo datové soubory pro další zpracování v jiných programech.

RillFEM je založen na metodě konečných prvků - MKP. Tato metoda je v současnosti jednou z nejvíce používaných metod pro technické výpočty. Je to univerzální výpočetní

metoda a jednotlivé úlohy řeší jako slabě sdružený problém. Obsahuje několik fyzikálních modulů, které lze vzájemně kombinovat. Jsou to:

1. Kvazistacionární magnetické pole
2. Statické magnetické pole
3. Elektrostatické pole
4. Nestacionární teplotní pole
5. Statické teplotní pole
6. Deformační pole
7. Vlastní vibrace

Řešení kvazistacionárního magnetického pole + nestacionárního pole + deformačního pole můžeme s výhodou zkombinovat a pomocí programu tedy potom vyřešíme řadu problémů, např. výpočet vířivých proudů, indukční ohřevy, elektrostatické namáhání, šíření tepla, speciální teplotní procesy, teplotní deformace a jiné).

9.4 Simulace vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem nového fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení

Nyní podrobněji popíšu numerický model.

Základní geometrie – induktor:

Tabulka 9.1: Geometrie induktoru a definice okolí

BOD	1	2	3	4	5	6
r [m]	0,1100	0,1125	0,1125	0,1100	0	0
z [m]	-0,1585	-0,1585	0,1585	0,1585	-3	3

Základní geometrie - induktor a svazky transformátorových plechů:

Tabulka 9.2: Geometrie induktoru, svazků transformátorových plechů a definice okolí

BOD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r [m]	0,1100	0,1125	0,1125	0,1100	0,1225	0,1399	0,1399	0,1225	0	0
z [m]	-0,1585	-0,1585	0,1585	0,1585	-0,2875	-0,2875	0,2005	0,2005	-3	3

Rozměry svazků transformátorových plechů viz Tabulka 5.3.

Simulovaný induktor jsem nahradil ekvivalentní vrstvou o stejné výšce a tloušťce jako reálný induktor. Pro případ svazků transformátorových plechů jsem provedl výpočet ekvivalentní tloušťky zde náhradního stínícího válce o stejné výšce, ale o jiné ekvivalentní

tloušťce. Tloušťku tohoto válce jsem určil z celkového objemu svazků transformátorových plechů. Určení jsem provedl takto:

$$\begin{aligned} V_{\text{válec}} &= V_{\text{svazky}} \\ \pi \cdot v \cdot (r_2^2 - r_1^2) &= 10 \cdot 35 \cdot 41 \cdot 488 \\ \pi \cdot 488 \cdot (r_2^2 - 122,5^2) &= 7002800 \\ r_2 &= 139,907 \end{aligned}$$

kde r_2 je vnější poloměr a r_1 je vnitřní poloměr náhradního stínícího válce, tloušťka náhradního válce je tedy $x = r_2 - r_1 = 139,907 - 122,5 = 17,407$ mm

Souřadnice bodů geometrie konstrukčních částí uvádím v tabulkách Tabulka 9.1 a Tabulka 9.2.

Okrajové podmínky pro hrany geometrie:

Na osu symetrie a na hranici oblasti tvořenou půlkružnicí jsem nastavil Dirichletovu okrajovou podmínku prvního druhu $A = 0$.

- Pro induktor jsem zvolil Cu_20grdC z globální knihovny a provedl úpravy.

mesh: 0.001 m

proud ekvivalentní vrstvy pro 15 A: $I_{NV} = \sqrt{2} \cdot N \cdot I = \sqrt{2} \cdot 42 \cdot 15 = 895,955$ A

proud ekvivalentní vrstvy pro 23 A: $I_{NV} = \sqrt{2} \cdot N \cdot I = \sqrt{2} \cdot 42 \cdot 23 = 1366,130$ A

proud ekvivalentní vrstvy pro 31 A: $I_{NV} = \sqrt{2} \cdot N \cdot I = \sqrt{2} \cdot 42 \cdot 31 = 1841,306$ A

- Pro stínění jsem zvolil Steel 1.2343; 150°C. Zde jsem nastavil relativní permeabilitou 30 000 a elektrickou vodivost 0 S/m

mesh: 0.001 m

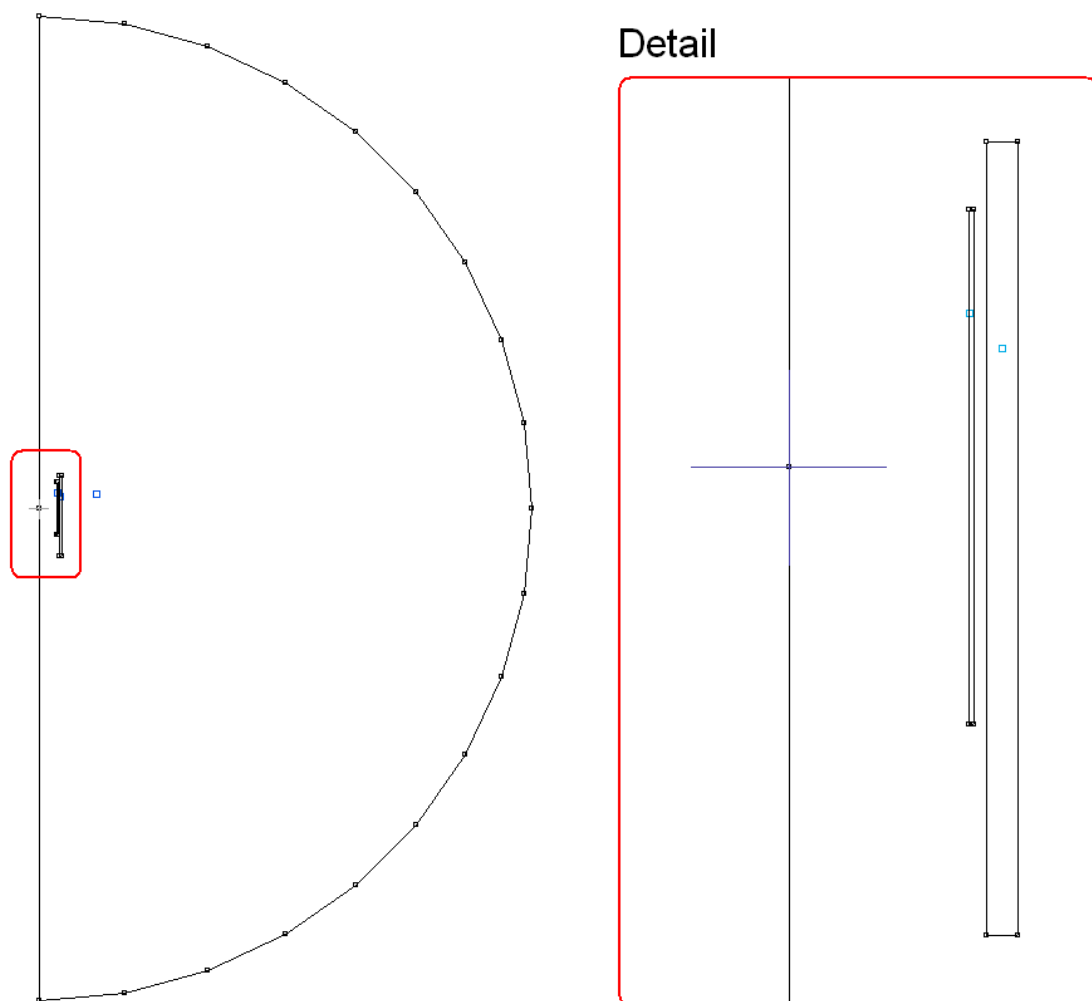
- Pro okolí jsem zvolil vzduch Air.

mesh: 0.010 m

Před vykreslením výsledků nastavuji zjemnění (refinement) na úroveň 3.

Pro osově symetrické konstrukce indukčních zařízení lze řešit problém jako osově symetrický. Na Obrázek 9.1 názorně zobrazuji geometrii řešeného problému v programu RillFEM 2D pro geometrickou situaci induktor se stíněním svazky transformátorových plechů.

Výsledky numerického modelu uvádím v Kapitola 10.1 pro napájecí proud induktoru o velikosti 23 A a frekvenci 4 000 Hz.



Obrázek 9.1: Geometrie řešeného problému v programu RILFEM 2D – induktor se stíněním

Induktor se stíněním vodivým pláštěm:

Materiál pláště: Cu

Změřený proud vtékající do induktoru: 23 A

Průřezem náhradní proudové vrstvy teče proud: $I_{NV} = \sqrt{2} \cdot N \cdot I = \sqrt{2} \cdot 42 \cdot 23 = 1366,130 \text{ A}$

Materiálové konstanty pro použité materiály jsou:

Induktor $\mu_r = 1$

Vzduch $\mu_r = 1$

Vodivý plášť $\mu_r = 1$

$\gamma = 56\,000\,000 \text{ S.m}^{-1}$

Výpočet optimální velikosti stínícího pláště:

a) výška stínícího pláště:

$$l_3 = 1,2 \cdot l_1 = 1,2 \cdot 317 = 380,4 \text{ mm}$$

b) poloměr:

$$r_3 = 2 \cdot r_1 = 2 \cdot 110 = 220 \text{ mm}$$

c) optimální tloušťka vodivého pláště pro frekvenci 4 kHz:

$$d_{opt} = \frac{\pi}{2} \cdot a = \frac{\pi}{2} \cdot 1,1 = 1,7 \text{ mm}$$

Hloubka vniku naindukovaných proudů ve stínícím plášti pro frekvenci 4 kHz:

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 4000 \cdot 56000000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 1,1 \text{ mm}$$

Tabulka 9.3 zobrazuje definovanou geometrii jednotlivých bodů vodivého pláště pro 4 kHz.

Tabulka 9.3: Geometrické souřadnice pro vodivý plášť při 4 kHz

BOD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r [m]	0,1100	0,1125	0,1125	0,1100	0,2210	0,2227	0,2227	0,2210	0	0
z [m]	-0,1585	-0,1585	0,1585	0,1585	-0,1901	-0,1901	0,1901	0,1901	-3	3

d) optimální tloušťka vodivého pláště pro frekvenci 10 kHz:

$$d_{opt} = \frac{\pi}{2} \cdot a = \frac{\pi}{2} \cdot 0,7 = 1,1 \text{ mm}$$

Hloubka vniku naindukovaných proudů ve stínícím plášti pro frekvenci 10 kHz:

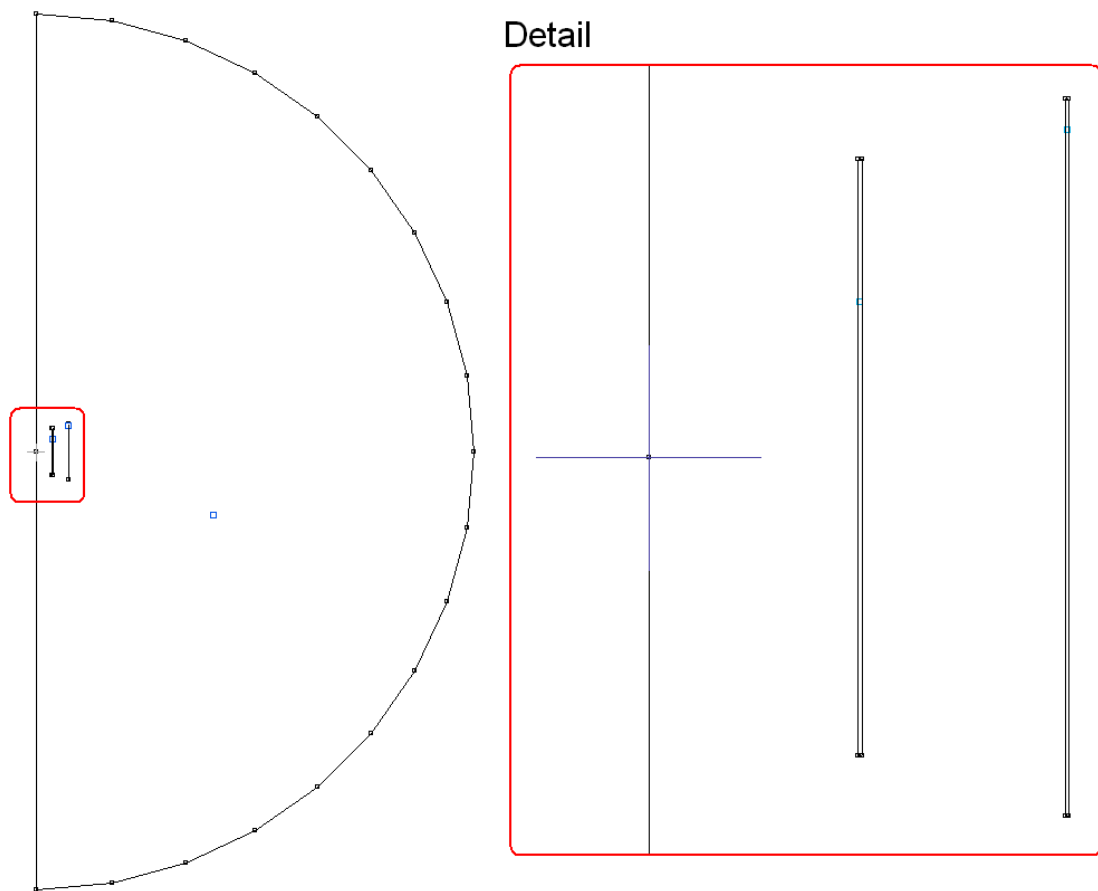
$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 10000 \cdot 56000000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} = 0,7 \text{ mm}$$

Tabulka 9.4 zobrazuje definovanou geometrii jednotlivých bodů vodivého pláště pro 10 kHz.

Tabulka 9.4: Geometrické souřadnice pro vodivý plášť při 10 kHz

BOD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
r [m]	0,1100	0,1125	0,1125	0,1100	0,2210	0,2221	0,2221	0,2210	0	0
z [m]	-0,1585	-0,1585	0,1585	0,1585	-0,1901	-0,1901	0,1901	0,1901	-3	3

Geometrická situace řešeného problému v preprocesoru programu RillFEM 2D s detailem je znázorněna na Obrázek 9.2.



Obrázek 9.2: Induktor se stíněním vodivým pláštěm – geometrie v programu RillFEM 2D

9.5 Simulace vlivu přidavných konstrukčních prvků na rozložení elektromagnetického pole kolem nového fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení

9.5.1 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a měděným prstencem

Geometrická poloha prstence je definována axiální osou symetrií induktoru, kdy tato osa je pro obě tyto dvě konstrukční části společná a dále vertikální poloha prstence je 10 mm nad vrchní stěnou svazků transformátorových plechů. Geometrická poloha prstence vůči induktoru je přirozeně stejně jako u ostatních přidavných konstrukčních prvků identická pro simulaci i pro případ měření na fyzikálním laboratorním modelu pro maximální podobnost počítačové simulace s fyzikální realitou.

Změřený proud pomocí proudových kleští a osciloskopu vtékající do induktoru je 23 A.

Průřezem náhradní proudové vrstvy teče proud: $I_{NV} = \sqrt{2} \cdot N \cdot I = \sqrt{2} \cdot 42 \cdot 23 = 1366,130 \text{ A}$

Materiálové konstanty pro použité materiály jsou:

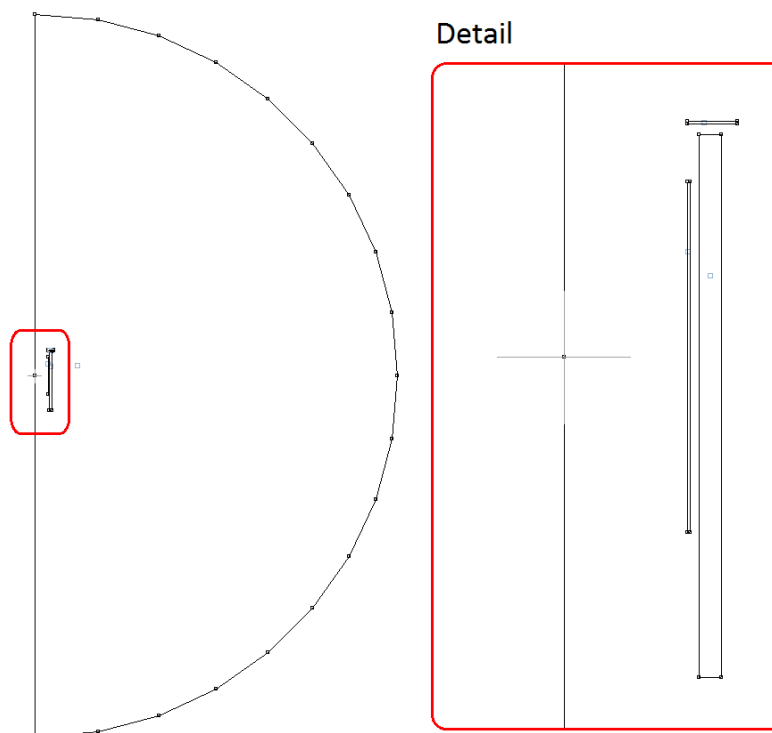
Induktor	$\mu_r = 1$
Vzduch	$\mu_r = 1$
Trafoplechy	$\mu_r = 30\,000$
	$\gamma = 0\text{ S.m}^{-1}$
Prstenec	$\mu_r = 1$
	$\gamma = 58\,400\,000\text{ S.m}^{-1}$

Geometrická situace pro induktor a stínění svazky transformátorových plechů je shodná s předchozími simulacemi. Tabulka 9.5 udává geometrii přídatného konstrukčního prvku – měděného prstence.

Tabulka 9.5: Geometrické souřadnice pro přídatný konstrukční prvek – měděný prstenec

Bod	A	B	C	D
r [m]	0,1105	0,1555	0,1555	0,1105
z [m]	0,2100	0,2100	0,2119	0,2119

Geometrická situace řešeného problému v preprocesoru programu RillFEM 2D s detailem pro induktor, stínění transformátorovými plechy a přídatný konstrukční prvek – měděný prstenec, který je umístěn 10 mm nad stíněním je znázorněna na Obrázek 9.3.



Obrázek 9.3: Induktor se stíněním transformátorovými plechy a přídatným konstrukčním prvkem měděným prstencem – geometrie v programu RillFEM 2D

9.5.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a dvěma uzavřenými závitů

Definice geometrické polohy prstence: axiální osa induktoru je shodná s axiální osou prstence a dále vertikální vzdálenost od horního okraje svazků transformátorových plechů je 68,5 mm. Geometrická situace dvou uzavřených měděných závitů je zde identická jako při měření stejného prvku.

Změřený proud pomocí proudových kleští a osciloskopu vtékající do induktoru je 23 A.

Průřezem náhradní proudové vrstvy teče proud: $I_{NV} = \sqrt{2} \cdot N \cdot I = \sqrt{2} \cdot 42 \cdot 23 = 1366,130 \text{ A}$

Jako parametry pro materiály byly nastaveny hodnoty:

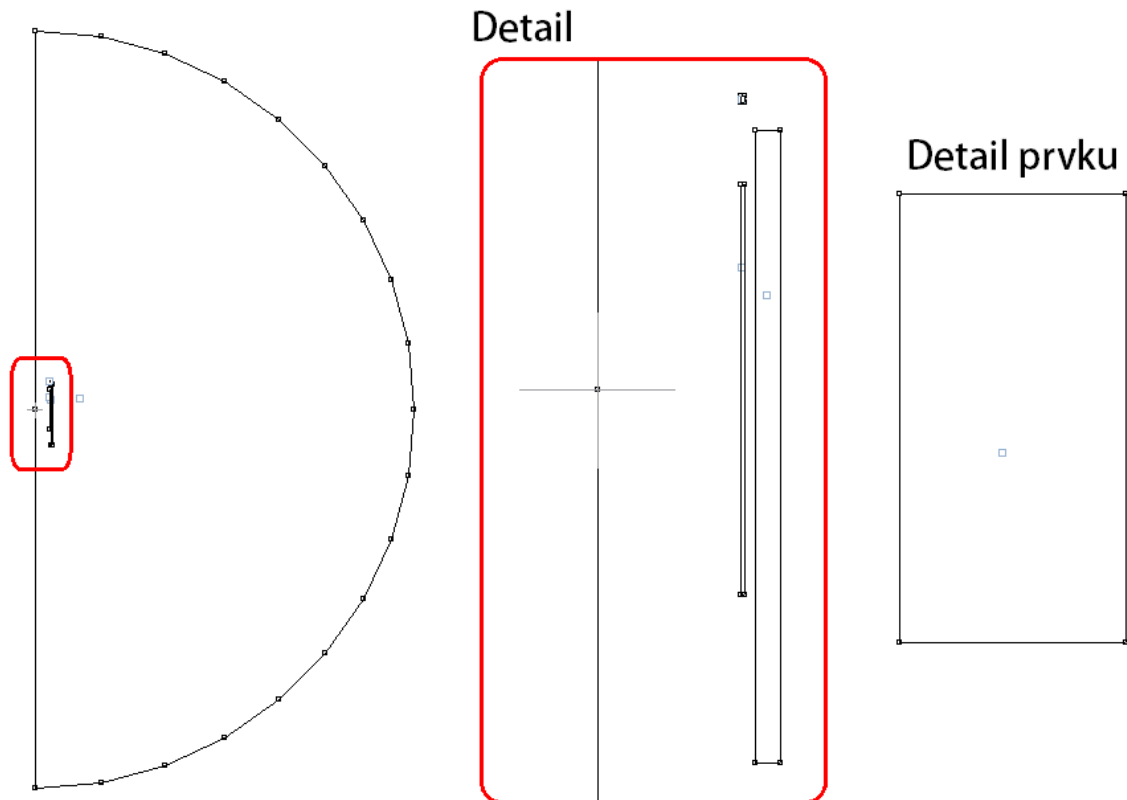
Induktor	$\mu_r = 1$
Vzduch	$\mu_r = 1$
Trafoplechy	$\mu_r = 30\,000$ $\gamma = 0 \text{ S.m}^{-1}$
Závity	$\mu_r = 1$ $\gamma = 58\,400\,000 \text{ S.m}^{-1}$

Geometrická situace pro induktor a stínění svazky transformátorových plechů je shodná s předchozími simulacemi. Tabulka 9.6 udává geometrii přídatného konstrukčního prvku – dvou uzavřených měděných závitů.

Tabulka 9.6: Geometrické souřadnice pro přídatný konstrukční prvek – dva uzavřené měděné závity

Bod	A	B	C	D
$r \text{ [m]}$	0,1105	0,1132	0,1132	0,1105
$z \text{ [m]}$	0,2211	0,2211	0,2265	0,2265

Geometrická situace řešeného problému v preprocesoru programu RillFEM 2D s detailem pro induktor, stínění transformátorovými plechy a přídatný konstrukční prvek – dva uzavřené měděné závity je znázorněna na Obrázek 9.4.



Obrázek 9.4: Induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem dvěma uzavřenými měděnými závity – geometrie v programu RillFEM 2D

9.5.3 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a dutým kruhovým vodičem

Definice geometrické polohy dutého kruhového vodiče: axiální osa induktoru je shodná s axiální osou dutého vodiče a dále vertikální vzdálenost od horního okraje svazků transformátorových plechů je 10 mm. Geometrická situace je zde identická jako při měření stejného prvku.

Změřený proud pomocí proudových kleští a osciloskopu vtékající do induktoru je 23 A.

Průřezem náhradní proudové vrstvy teče proud: $I_{NV} = \sqrt{2} \cdot N \cdot I = \sqrt{2} \cdot 42 \cdot 23 = 1366,130 \text{ A}$

Materiálové konstanty pro použité materiály jsou:

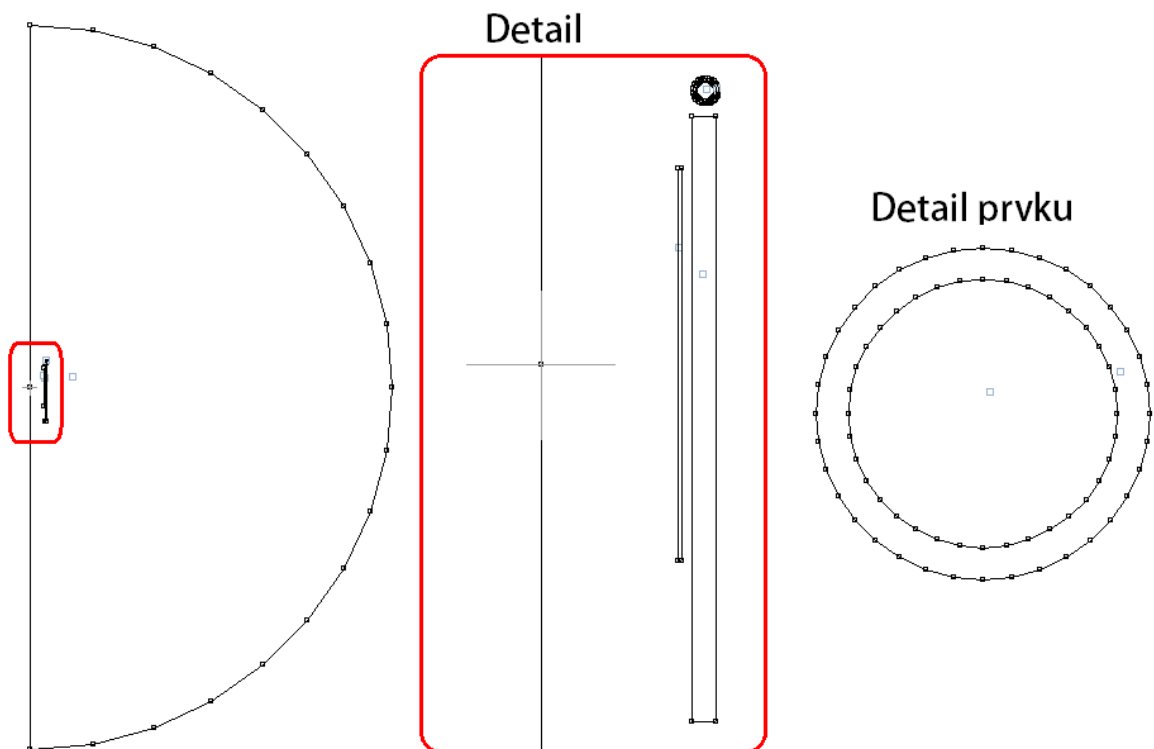
Induktor	$\mu_r = 1$
Vzduch	$\mu_r = 1$
Trafoplechy	$\mu_r = 30\,000$ $\gamma = 0 \text{ S.m}^{-1}$
dutý závit	$\mu_r = 1$ $\gamma = 58\,400\,000 \text{ S.m}^{-1}$

Geometrická situace pro induktor a stínění svazky transformátorových plechů je shodná s předchozími simulacemi. Tabulka 9.7 udává geometrii přídatného konstrukčního prvku – dutého kruhového vodiče.

Tabulka 9.7: Geometrické souřadnice pro přídatný konstrukční prvek – dutý kruhový vodič

Bod	A	B	C	D
r [m]	0,1225	0,1245	0,1414	0,1434
z [m]	0,2204	0,2204	0,2204	0,2204

Geometrická situace řešeného problému v preprocesoru programu RillFEM 2D s detailem pro induktor, stínění transformátorovými plechy a přídatný konstrukční prvek - uzavřený měděný dutý vodič, který je umístěn 10 mm nad stíněním je znázorněna na Obrázek 9.5.



Obrázek 9.5: Induktor se stíněním transformátorovými plechy a přídatným konstrukčním prvkem uzavřeným měděným dutým vodičem – geometrie v programu RillFEM 2D

9.5.4 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a hliníkový plným kruhovým vodičem

Definice geometrické polohy plného kruhového vodiče: axiální osa induktoru je shodná s axiální osou plného vodiče a dále vertikální vzdálenost od horního okraje svazků transformátorových plechů je 10 mm. Geometrická situace je zde identická jako při měření plného kruhového lanového vodiče.

Změřený proud pomocí proudových kleští a osciloskopu vtékající do induktoru je 23 A.

Průřezem náhradní proudové vrstvy teče proud: $I_{NV} = \sqrt{2} \cdot N \cdot I = \sqrt{2} \cdot 42 \cdot 23 = 1366,130 \text{ A}$

Materiálové konstanty pro použité materiály jsou:

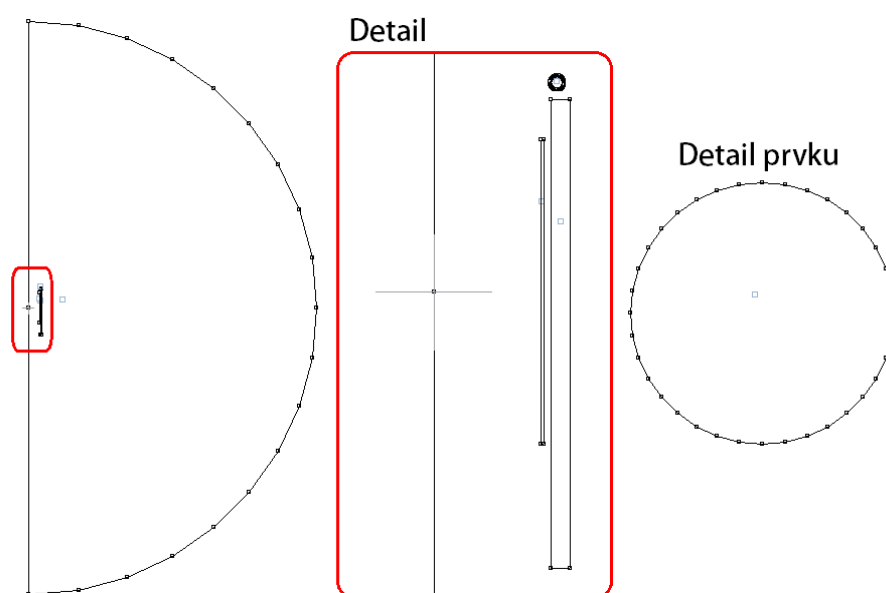
Induktor	$\mu_r = 1$
Vzduch	$\mu_r = 1$
Trafoplechy	$\mu_r = 30\,000$ $\gamma = 0 \text{ S.m}^{-1}$
Plný závit	$\mu_r = 1$ $\gamma = 58\,400\,000 \text{ S.m}^{-1}$

Geometrická situace pro induktor a stínění svazky transformátorových plechů je shodná s předchozími simulacemi. Tabulka 9.8 udává geometrii přídavného konstrukčního prvku – plného hliníkového kruhového vodiče.

Tabulka 9.8: Geometrické souřadnice pro přídavný konstrukční prvek – plný kruhový vodič

Bod	A	B
$r \text{ [m]}$	0,1200	0,1348
$z \text{ [m]}$	0,2174	0,2174

Geometrická situace řešeného problému v preprocesoru programu RillFEM 2D s detailem pro induktor, stínění transformátorovými plechy a přídavný konstrukční prvek – uzavřený hliníkový kruhový plný vodič, který je umístěn 10 mm nad stíněním je znázorněna na Obrázek 9.6.



Obrázek 9.6: Induktor se stíněním transformátorovými plechy a přídavným konstrukčním prvkem plným vodičem – geometrie v programu RillFEM 2D

9.6 Simulace vlivu válcové magnetické duté vsázky a ploché kruhové měděné desky

Nyní provedu simulaci válcové duté vsázky v kombinaci s měděnou kruhovou deskou za účelem indukčního ohřevu magnetické vsázky při zachování parametrů ohřevu shodných s měřením této konfigurace.

Materiálové konstanty pro použité materiály jsou:

Induktor	$\mu_r = 1$
Vzduch	$\mu_r = 1$
Trafoplechy	$\mu_r = 30\ 000$ $\gamma = 0\ \text{S.m}^{-1}$
Vsázka	$\mu_r = 1\ 000$ $\gamma = 5\ 000\ 000\ \text{S.m}^{-1}$
Deska	$\mu_r = 1$ $\gamma = 5\ 840\ 000\ 000\ \text{S.m}^{-1}$

Geometrická situace pro induktor a stínění svazky transformátorových plechů je shodná s předchozími simulacemi. Tabulka 9.9 a Tabulka 9.10 udávají geometrii válcové duté vsázky a měděné kruhové desky.

Tabulka 9.9: Geometrické souřadnice pro válcovou dutou vsázku

Bod	A	B	C	D
r [m]	0,07	0,08	0,08	0,07
z [m]	-0,11	-0,11	0,11	0,11

Tabulka 9.10: Geometrické souřadnice pro měděnou kruhovou desku

Bod	A	B	C	D
r [m]	0,0000	0,1550	0,1550	0,0000
z [m]	0,2055	0,2055	0,2075	0,2075

Při numerickém výpočtu jsem uvažoval ztráty prouděním a sáláním, neuvažoval jsem podstavec pro vsázku, kdy jsem v prostoru pod vsázkou uvažoval volný prostor identicky jako nad vsázkou.

9.7 Simulace indukční kelímkové pece

9.7.1 Uvedení do problému

V této kapitole se zabývám příkladem počítačové simulace, který vychází z potřeby průmyslové praxe. Je zde řešeno rozložení elektromagnetického pole kolem indukční kelímkové pece a dále změny v rozložení tohoto pole při použití přídatného konstrukčního prvku - plochého závitu nakrátko, a to při změně geometrických rozměrů tohoto prvku. Počítačová simulace byla vytvořena v komerčním simulačním programu RillFEM 2D [12], který je založen na principu metody konečných prvků (FEM). Indukční ohřev se často běžně používá v řadě průmyslových aplikací díky jeho pozitivním vlastnostem – vysoká hustota přenášené elektromagnetické energie, vysoká spolehlivost, nízká energetická spotřeba (ve srovnání s jinými metodami), ekologický ohřev (ohřev nezpůsobuje žádné zplodiny), vysoká rychlost a snadná říditelnost ohřevu. Pro většinu aplikací je indukční ohřev nejvíce vhodným a často také jediným možným způsobem ohřevu.

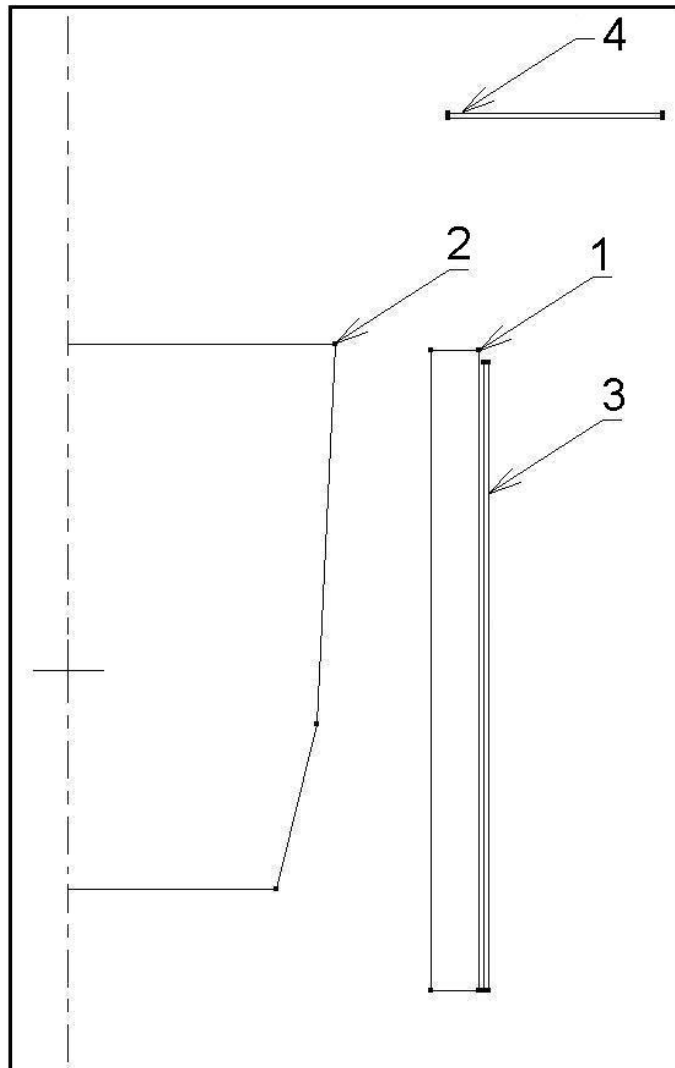
9.7.2 Řešený problém

Můj cíl byl zjistit geometrické rozložení elektromagnetického pole kolem indukční kelímkové pece, ve které je ohřívána válcová vsázka se surovým železem (Obrázek 9.7, Tabulka 9.11). Mým úkolem bylo potom nadále porovnat simulované výsledky geometrické situace samotné pece stíněné svazky transformátorových plechů a této pece se stíněním doplněné přídatným konstrukčním prvkem v podobě plochého závitu nakrátko (Obrázek 9.7, Obrázek 9.8) Dále jsem srovnal několik variant plochého závitu nakrátko o různé šířce umístěného ve spodní části pece pod induktorem, který představuje případ stínící ploché desky vyšetřované v části “Měření ploché desky“ v příslušné kapitole této práce.

V prvním případě tedy provádím numerický výpočet pro zařízení s jednovrstvým jednoduchým měděným induktorem s kelímkem a válcovou vsázkou. Toto indukční zařízení je stíněno třiceti dvěma svazky transformátorových plechů, které jsou umístěny na vnějším obvodu cívky. Ve druhém případě doplním indukční zařízení o přídatný konstrukční prvek - plochý závit nakrátko, umístěný v horní části pece nad cívkou. Prvotní simulace měla za cíl ověřit vliv přídatného konstrukčního prvku na rozložení elektromagnetického pole kolem sledovaného zařízení.

Pozn.: Uvedený numerický model indukčního ohřevu zde slouží pouze jako ukázka ohřevu elektromagnetickou indukcí u reálného zařízení, neuvažoval jsem zde ztráty prouděním a sáláním a je zřejmé, že v reálné situaci by nedošlo k ohřevu na tak vysokou teplotu z důvodu

uvažování ztrát a technologického postupu, kdy by snížením výkonu došlo k žádanému rozdělení tepla ve vsázce a dosažená teplota by se pohybovala kolem 1 450 °C.



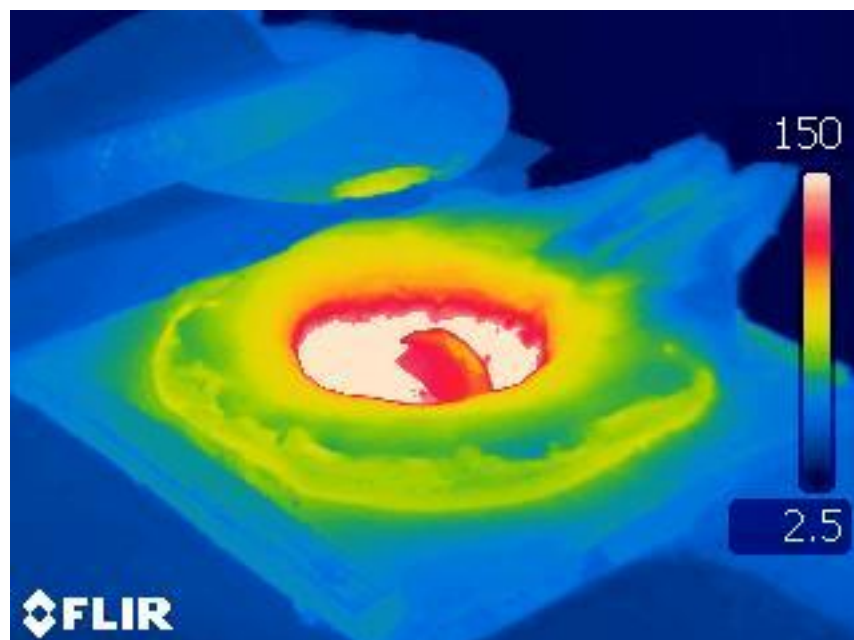
Obrázek 9.7: Geometrická situace řešeného problému v řezu rovinou rz, zakreslená v preprocesoru programu RillFEM 2D, s popisem konstrukčních částí: 1 – inductor (náhradní vrstva), 2 – válcová vsázka, 3 – svazky transformátorových plechů (náhradní vrstva), 4 – přídavný konstrukční prvek – plochý závit nakrátko

Tabulka 9.11: Parametry pece ISTOL 700 Kg

Název pece	ISTOL 700 Kg
Kapacita kelímku	700 Kg
Příkon	500 kW
Frekvence	900 – 1200 Hz
Počet závitů induktoru	11
Napětí na vstupu	1300V
Proud jedním závitěm	4500A
Počet svazků transformátorových plechů	32
Proud náhradní proudové vrstvy induktoru	70004 Az
Typ induktoru	jednovrstvý vodou chlazený inductor



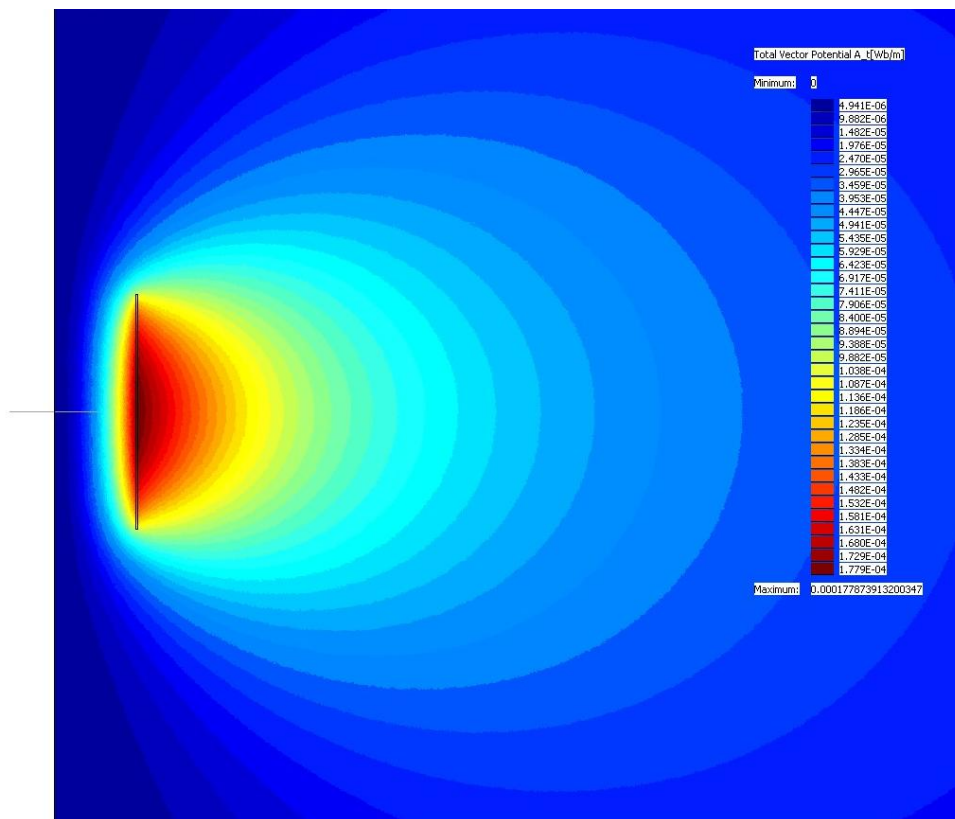
Obrázek 9.8: Příklad induktoru vyjmutého z vakuové kelímkové indukční pece (1000 Hz, 1000 kg) s dobře viditelnými svislými svazky transformátorových plechů



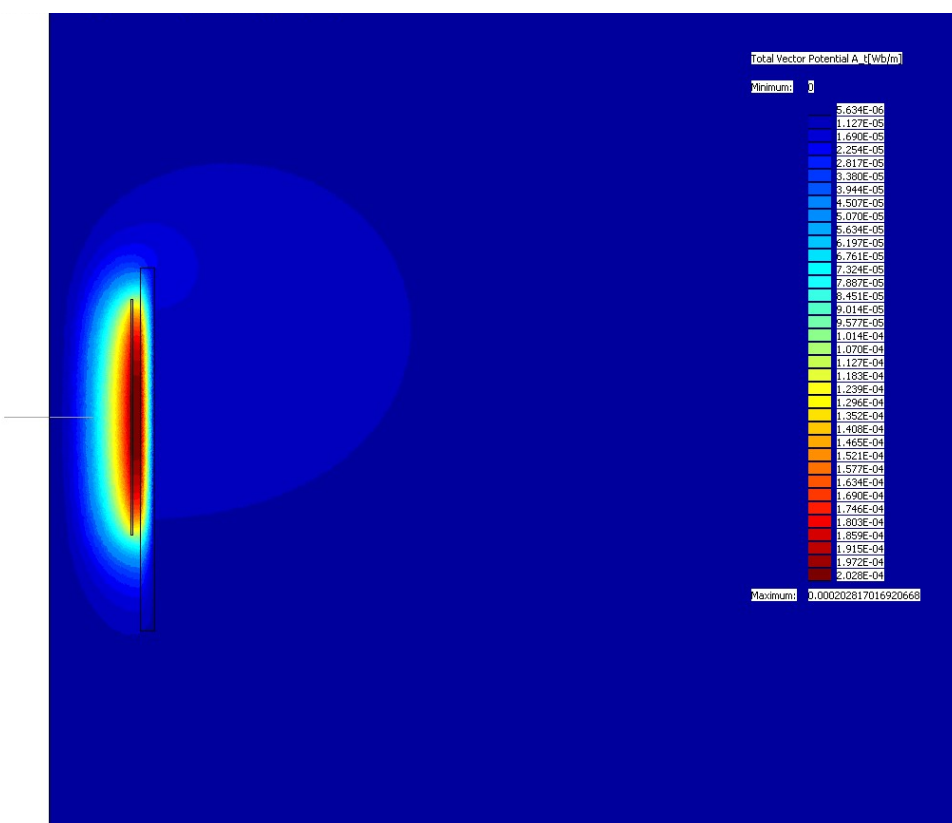
Obrázek 9.9: Ohřev válcové vsázky v průmyslové indukční peci bez stínění

10 Výsledky simulace laboratorního modelu

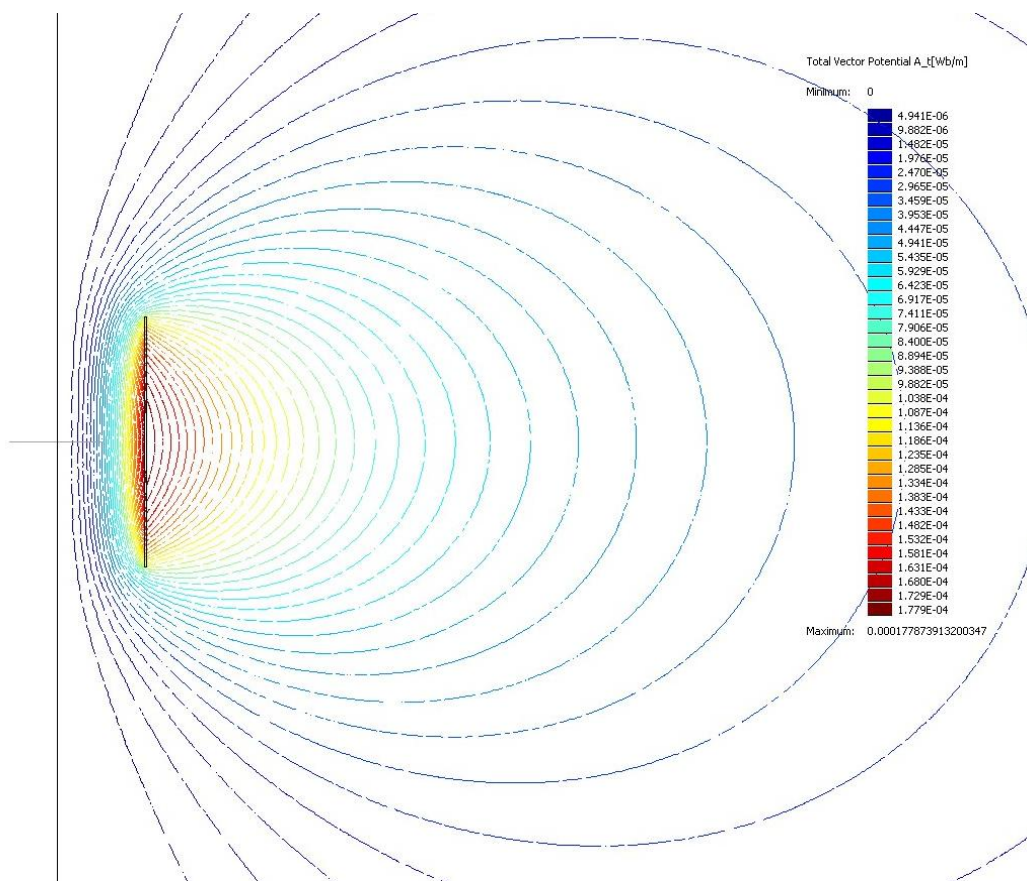
10.1 Induktor a induktor se stíněním svazky transformátorových plechů



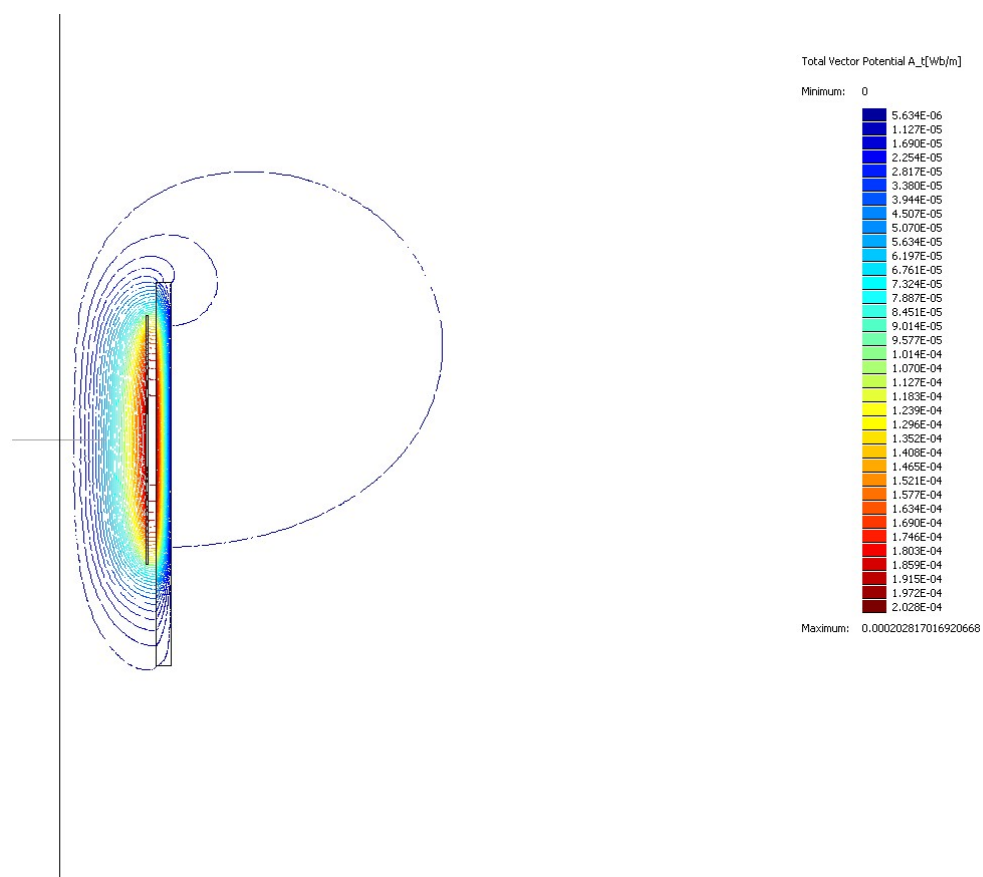
Obrázek 10.1: Magnetický vektorový potenciál A [Wb/m] - induktor



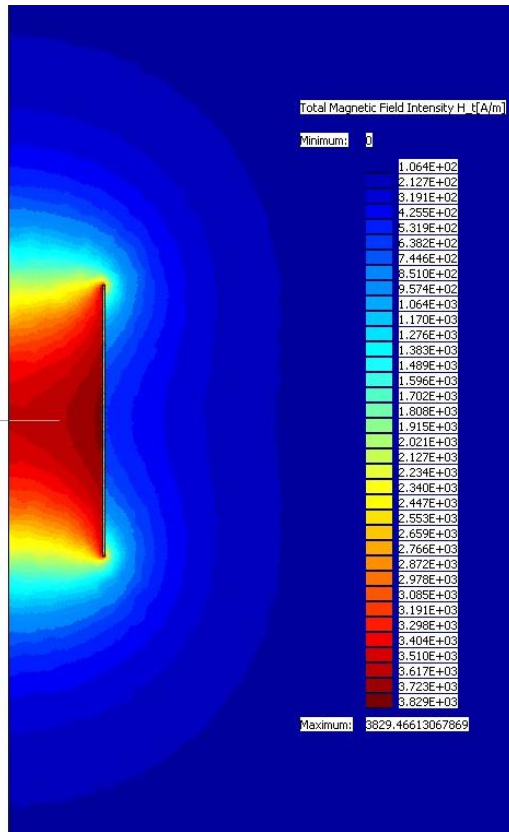
Obrázek 10.2: Magnetický vektorový potenciál A [Wb/m] – induktor se stíněním



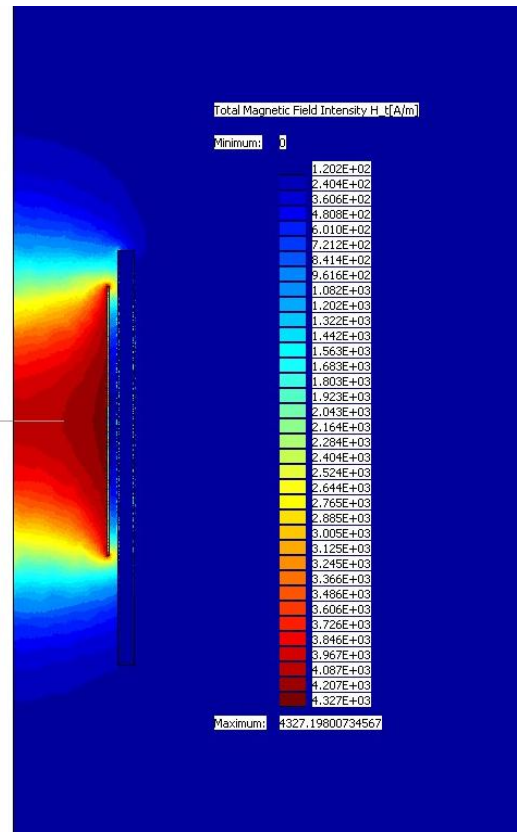
Obrázek 10.3: Magnetický vektorový potenciál A [Wb/m] – induktor, izolínie



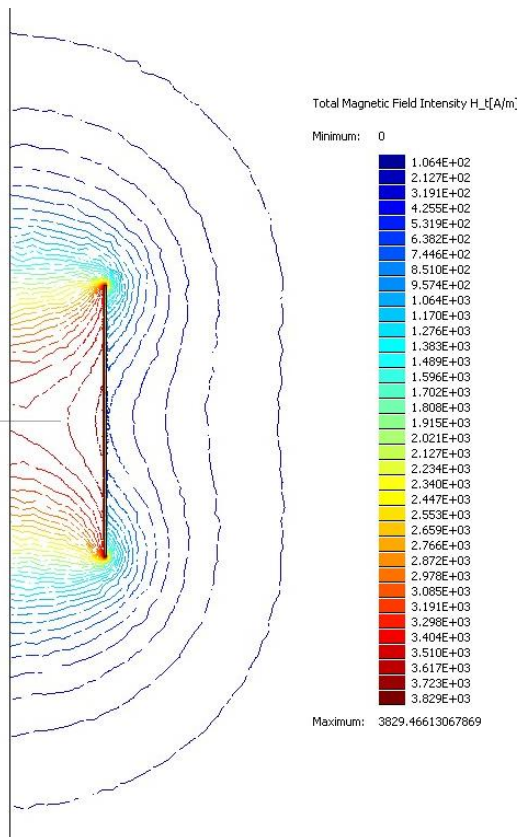
Obrázek 10.4: Magnetický vektorový potenciál A [Wb/m] – induktor se stíněním, izolínie



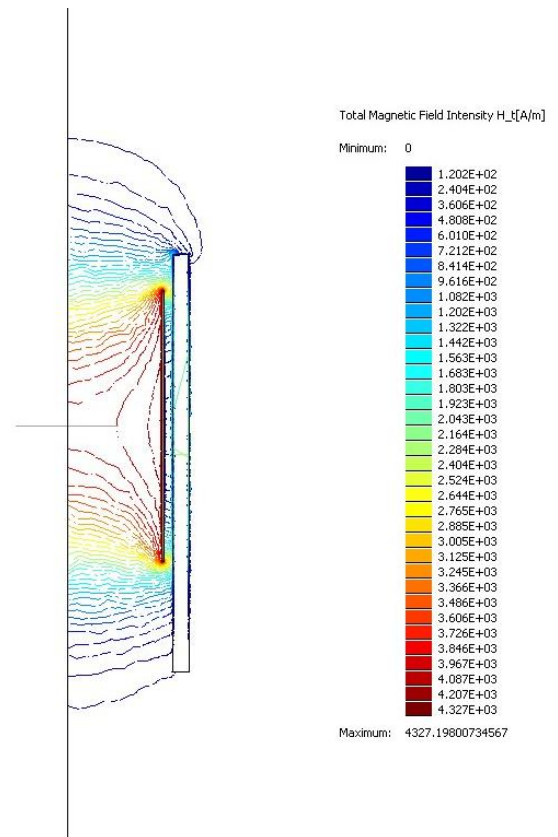
Obrázek 10.5: Intenzita magnetického pole H [A/m] - induktor



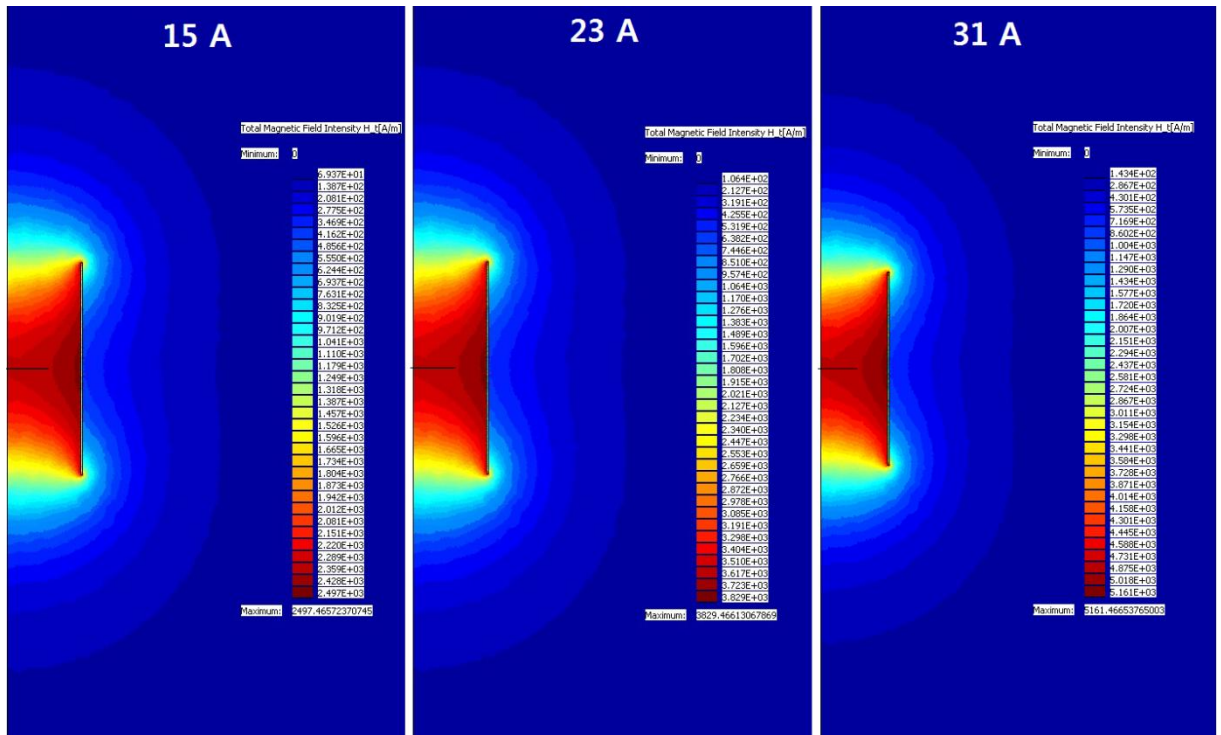
Obrázek 10.6: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor se stíněním



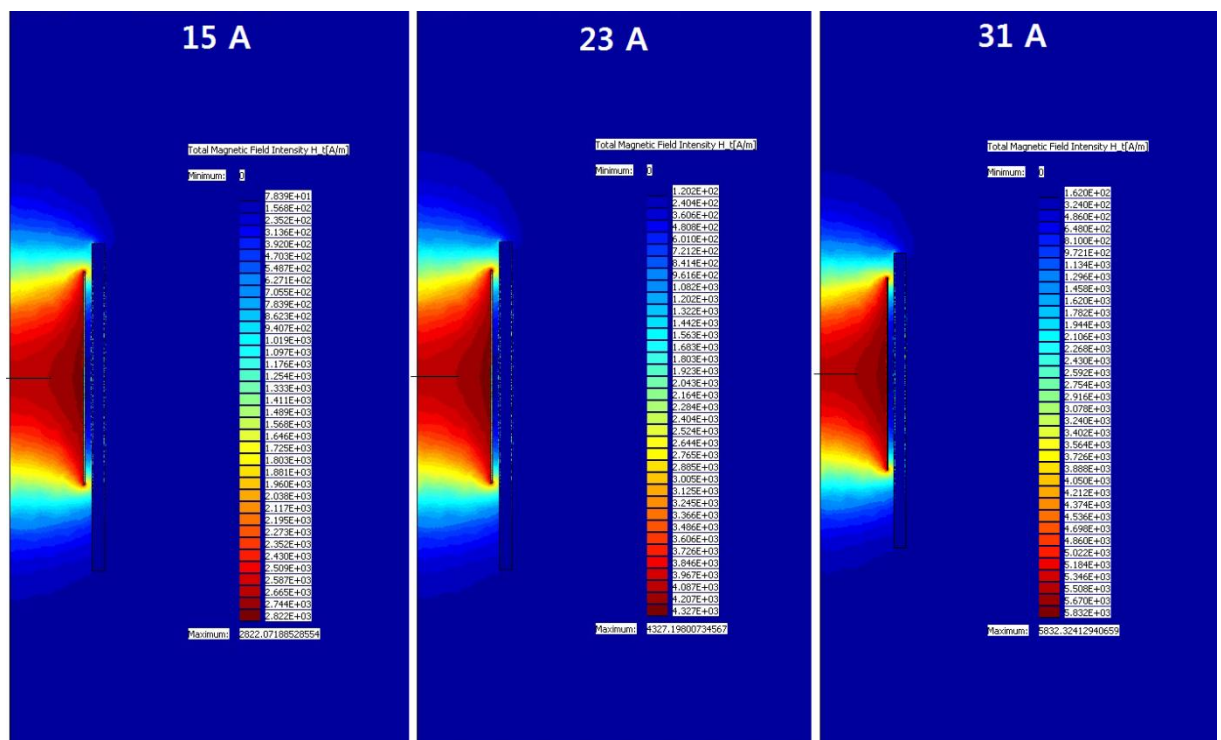
Obrázek 10.7: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, izolinie



Obrázek 10.8: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor se stíněním, izolinie



Obrázek 10.9: Intenzita magnetického pole H [A/m] pro tři zvolené proudové úrovně 15 A, 23 A a 31 A – induktor

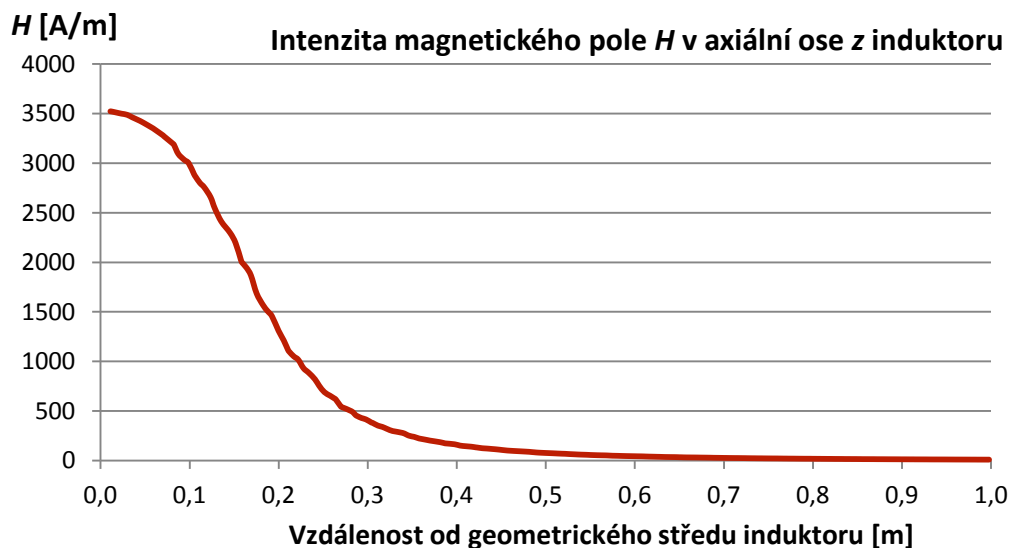


Obrázek 10.10: Intenzita magnetického pole H [A/m] pro tři zvolené proudové úrovně 15 A, 23 A a 31 A – induktor se stíněním

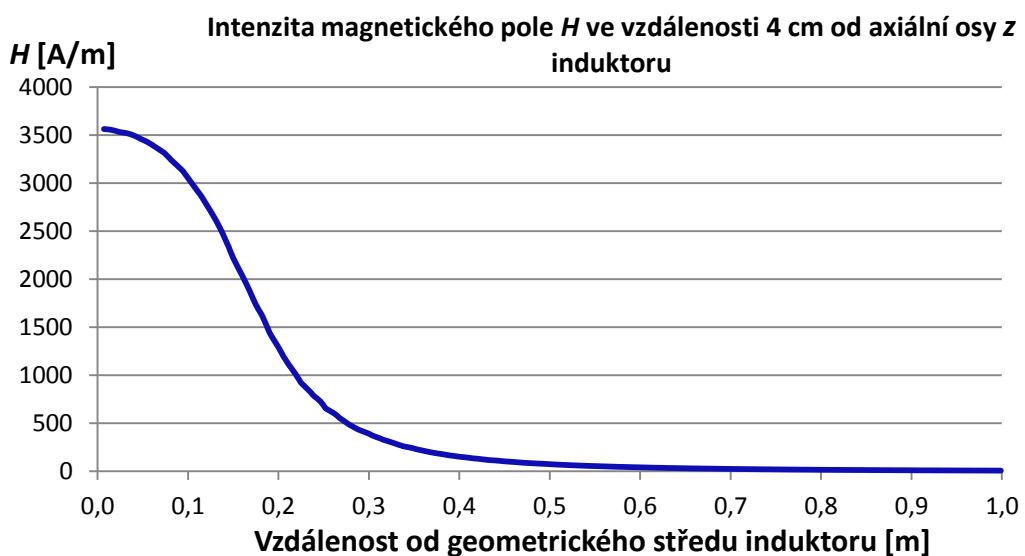
10.1.1 Vyhodnocení simulace pro induktor napájený proudem 23 A

Dva níže uvedené 2D grafy (Graf 10.1 a Graf 10.2) vykreslují velikost intenzity magnetického pole H [A/m] v axiální ose z induktoru zkoumaného indukčního zařízení a dále

v přímce rovnoběžné s osou z vzdálené 0,04 m od osy induktoru. Přehledně tedy znázorňují změnu intenzity magnetického pole H v závislosti na vzdálenosti od geometrického středu induktoru se souřadnicemi $[0,0]$ v kladném smyslu osy z , tedy změnu H v horní polovině dutiny induktoru a nad induktorem. Poslední typ grafu (Graf 10.3) znázorňuje intenzitu magnetického pole H ve směru radiální osy induktoru r v polovině výšky induktoru. Tyto grafy jsem zhotovil pro názornost srovnání měřených a simulovaných hodnot. První dva grafy odpovídají geometricky měřeným průběhům intenzity magnetického pole H pro sloupce L a K a třetímu se podobá měřený průběh intenzity H pro řadu 14 měřicí desky. Z důvodu špatné čitelnosti byly přímo generované grafy vytvořeny z identických dat znovu pomocí aplikace Excel.



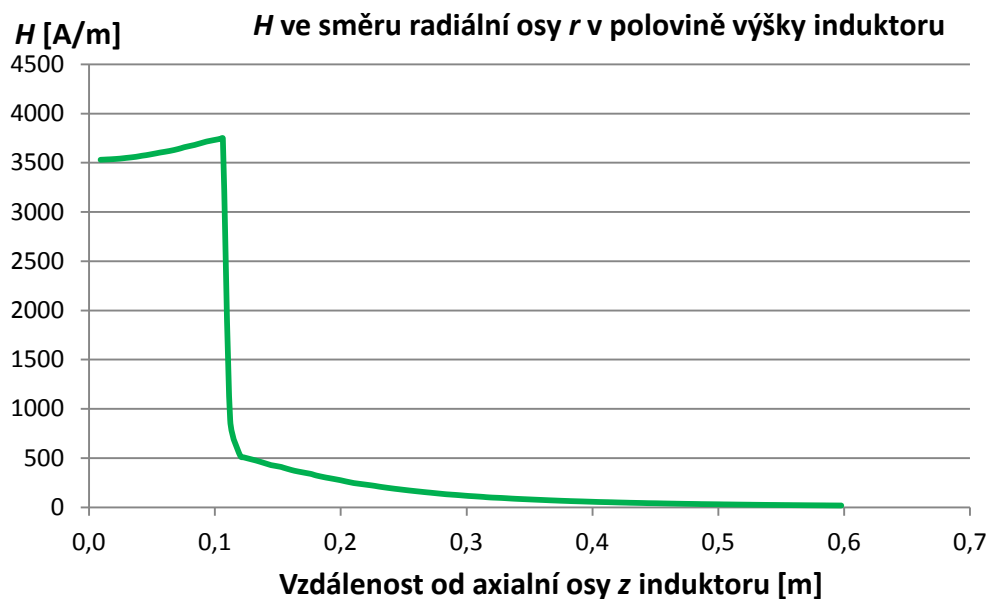
Graf 10.1: Intenzita magnetického pole H v axiální ose z induktoru pro samotný induktor



Graf 10.2: Intenzita magnetického pole H ve vzdálenosti 4 cm od axiální osy z induktoru pro samotný induktor

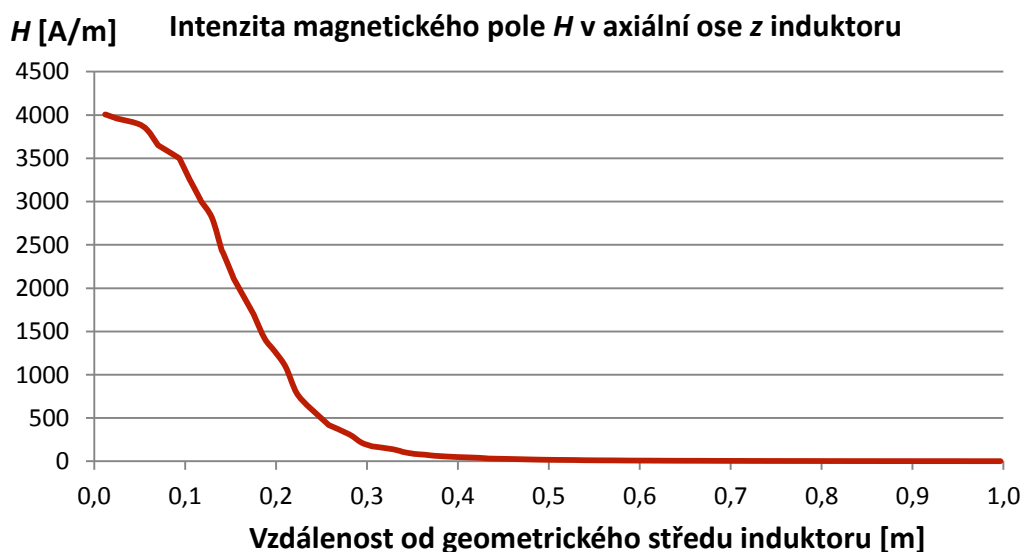
Z grafů (Graf 10.1 a Graf 10.2) je zřejmé, že se zvětšující se vzdáleností od středu induktoru intenzita magnetického pole H klesá a utlumí se přibližně ve vzdálenosti 80 cm od středu.

Z grafu (Graf 10.3) je zřejmé, že intenzita magnetického pole H v poloviční výšce induktoru od středu induktoru až k jeho vnitřní stěně mírně roste. Ve vnější oblasti za induktorem je oproti vnitřku intenzita výrazně nižší a postupně se utlumí na nulu přibližně ve vzdálenosti 60 cm od středu.

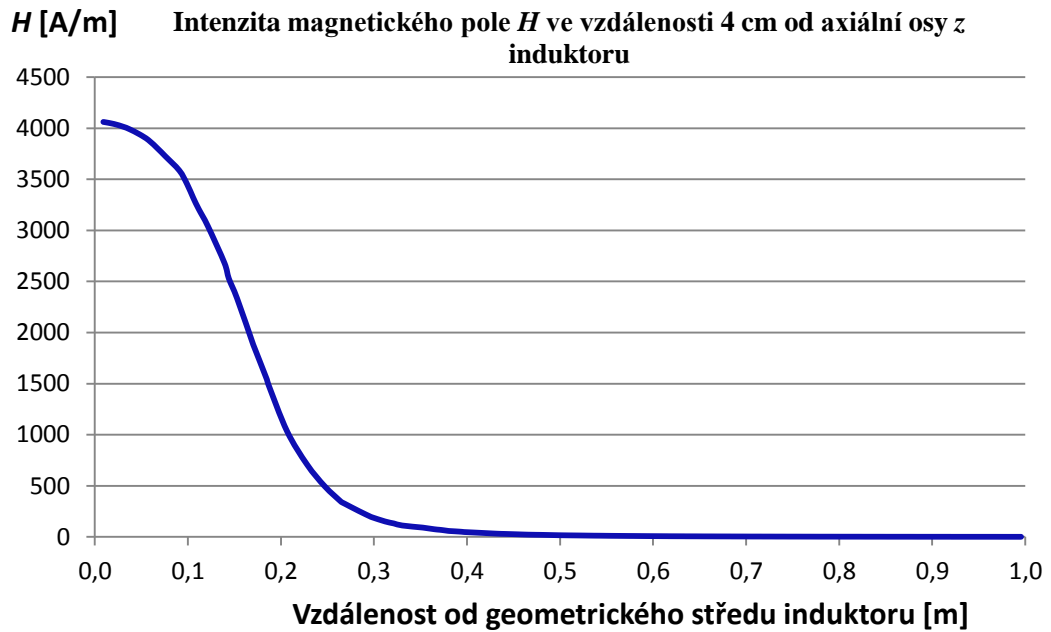


Graf 10.3: Intenzita magnetického pole H ve směru radiální osy r v polovině výšky induktoru

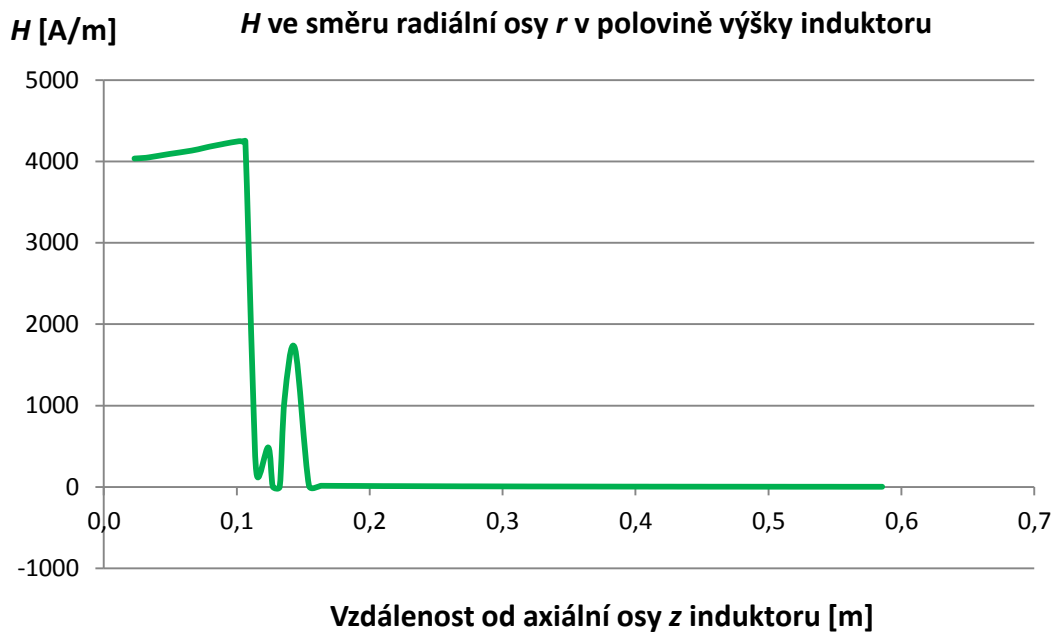
10.1.2 Vyhodnocení simulace vlivu stínění svazky transformátorových plechů pro napájecí proud induktoru 23 A



Graf 10.4: Intenzita magnetického pole H v axiální ose z induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy



Graf 10.5: Intenzita magnetického pole H ve vzdálenosti 4 cm od axiální osy z induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy

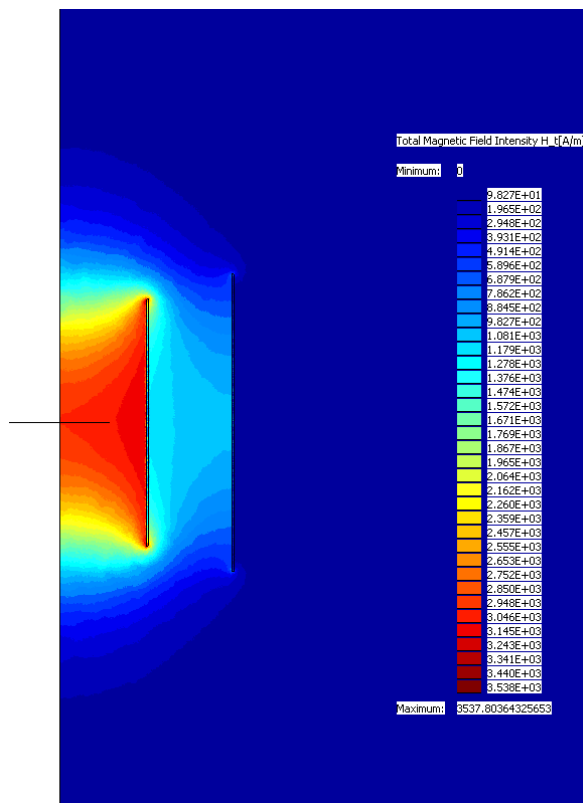


Graf 10.6: Intenzita magnetického pole H ve směru radiální osy r v polovině výšky induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy

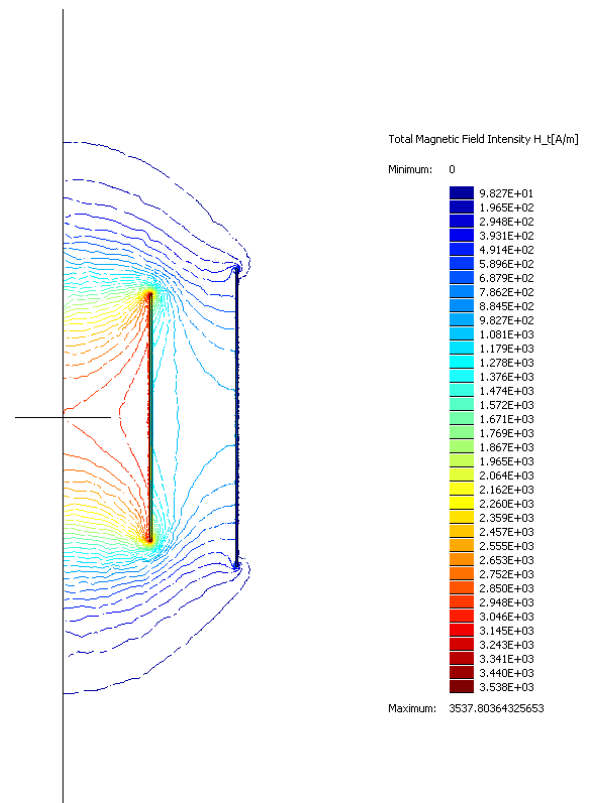
Z grafů (Graf 10.4 a Graf 10.5) je zřejmé, že se zvětšující se vzdáleností od středu induktoru intenzita magnetického pole H klesá a utlumí se přibližně ve vzdálenosti 65 cm od středu induktoru. Z grafu (Graf 10.6) je zřejmé, že intenzita magnetického pole H v poloviční výšce induktoru od středu induktoru až k jeho vnitřní stěně mírně roste. Ve vnější oblasti za

induktorem je oproti vnitřku intenzita výrazně nižší a v prostoru za stíněním se již zcela utlumí. Zajímavý a podstatný je zde skok ve vzdálenosti 0,13 m od induktoru, který názorně demonstruje zvýšení intenzity magnetického pole H ve stínění svazky transformátorových plechů. Simulace je zde tedy rovněž ve shodě s teoretickými předpoklady uvedenými v teoretickém úvodu v souvislosti s dobře magneticky vodivým materiálem svazků transformátorových plechů, které zde geometricky fungují jako koncentrátor magnetického toku.

10.2 Induktor se stíněním vodivým pláštěm

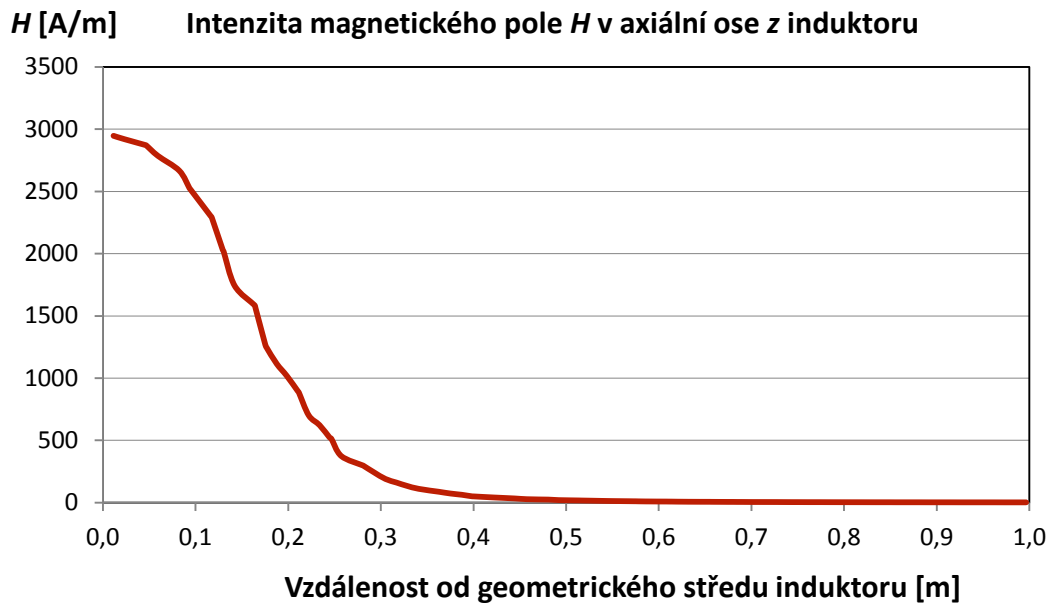


Obrázek 10.11: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor stíněný vodivým pláštěm

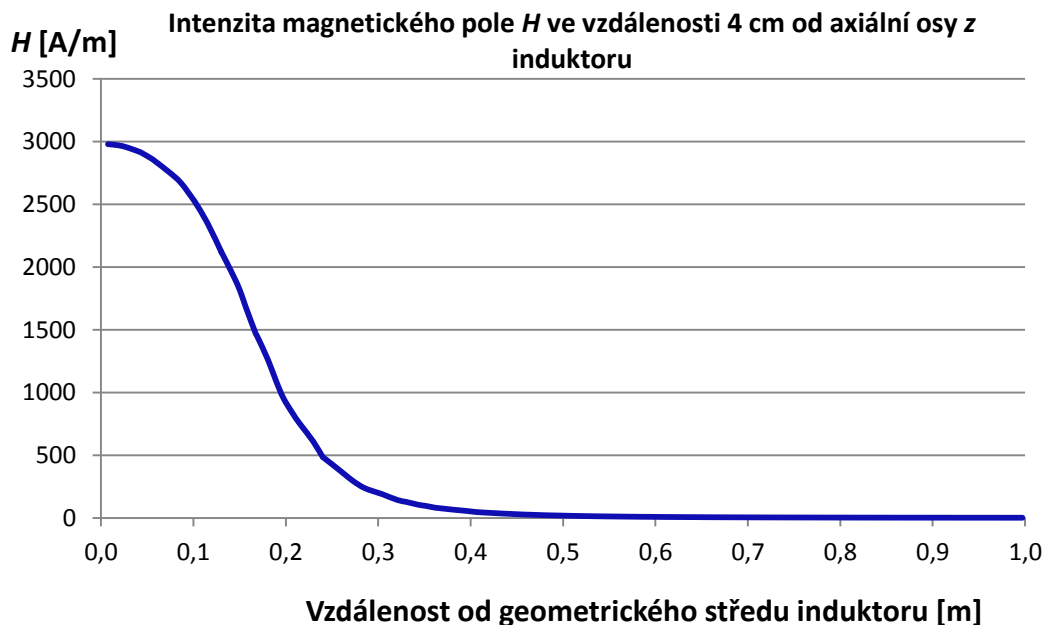


Obrázek 10.12: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor stíněný vodivým pláštěm, izolínie

10.2.1 Vyhodnocení simulace vlivu stínění vodivým pláštěm pro napájecí proud induktoru 23 A



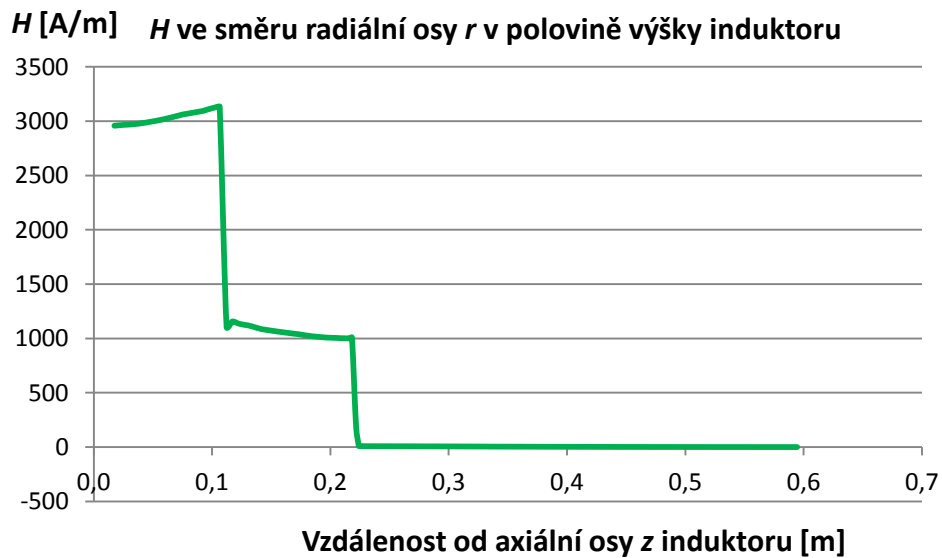
Graf 10.7: Intenzita magnetického pole H v axiální ose z induktoru pro induktor se stíněním vodivým pláštěm



Graf 10.8: Intenzita magnetického pole H ve vzdálenosti 4 cm od axiální osy z induktoru pro induktor se stíněním vodivým pláštěm

Z grafů (Graf 10.7 a Graf 10.8) je zřejmé, že se zvětšující se vzdáleností od středu induktoru intenzita magnetického pole H klesá a utlumí se přibližně ve vzdálenosti 65 cm od středu. Z grafu (Graf 10.9) je zřejmé, že intenzita magnetického pole H v poloviční výšce induktoru od středu induktoru až k jeho vnitřní stěně mírně roste. Ve vnější oblasti za

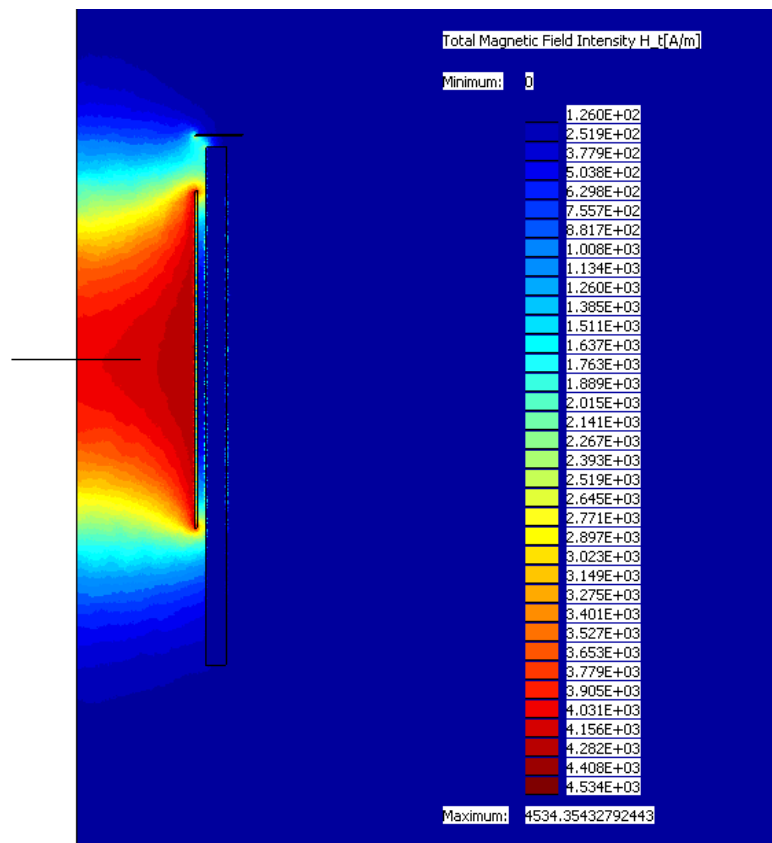
induktorem je oproti vnitřku intenzita výrazně nižší a v prostoru za stíněním se již zcela utlumí.



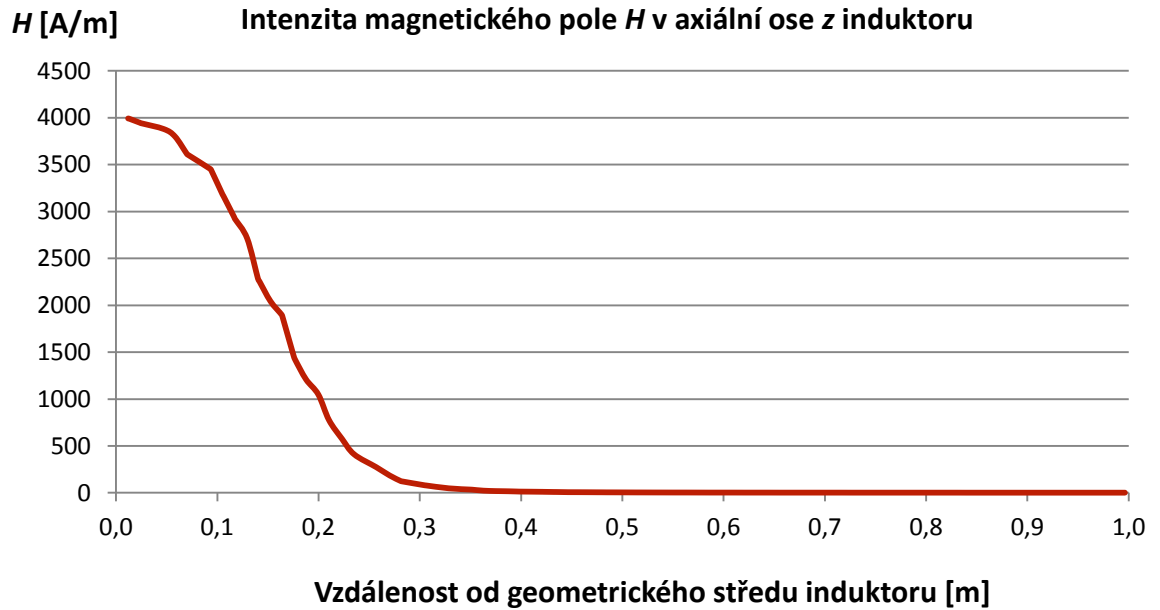
Graf 10.9: Intenzita magnetického pole H ve směru radiální osy r v polovině výšky induktoru pro induktor se stíněním vodivým pláštěm

10.3 Přídavné konstrukční prvky

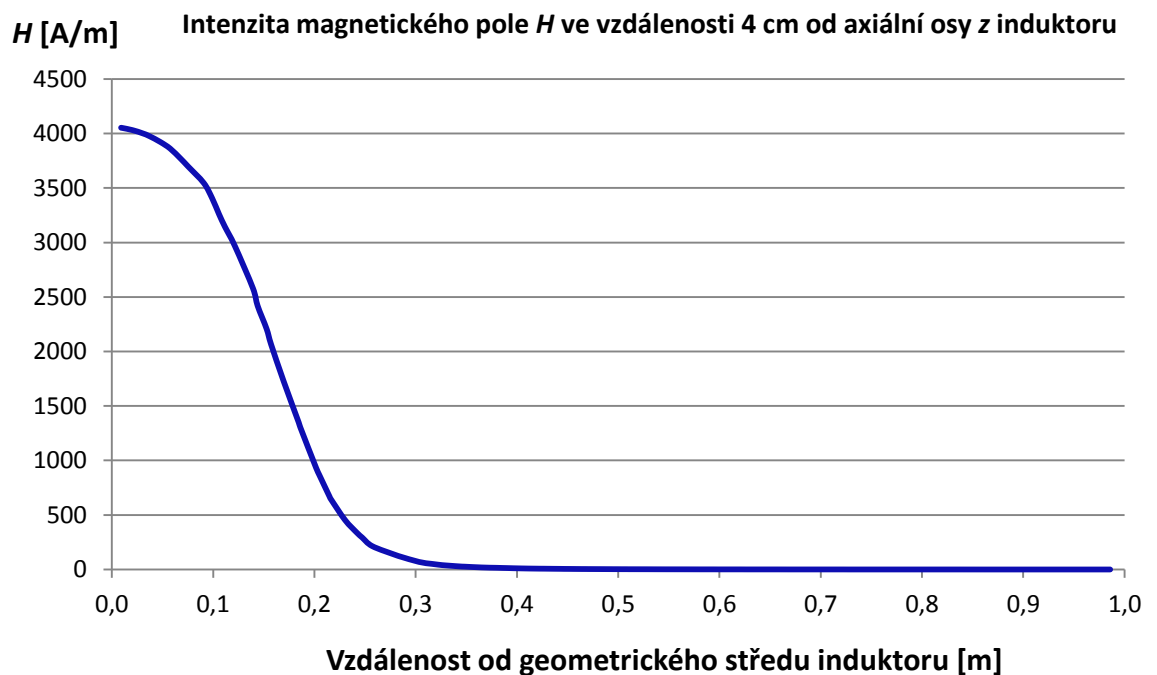
10.3.1 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a měděným prstencem



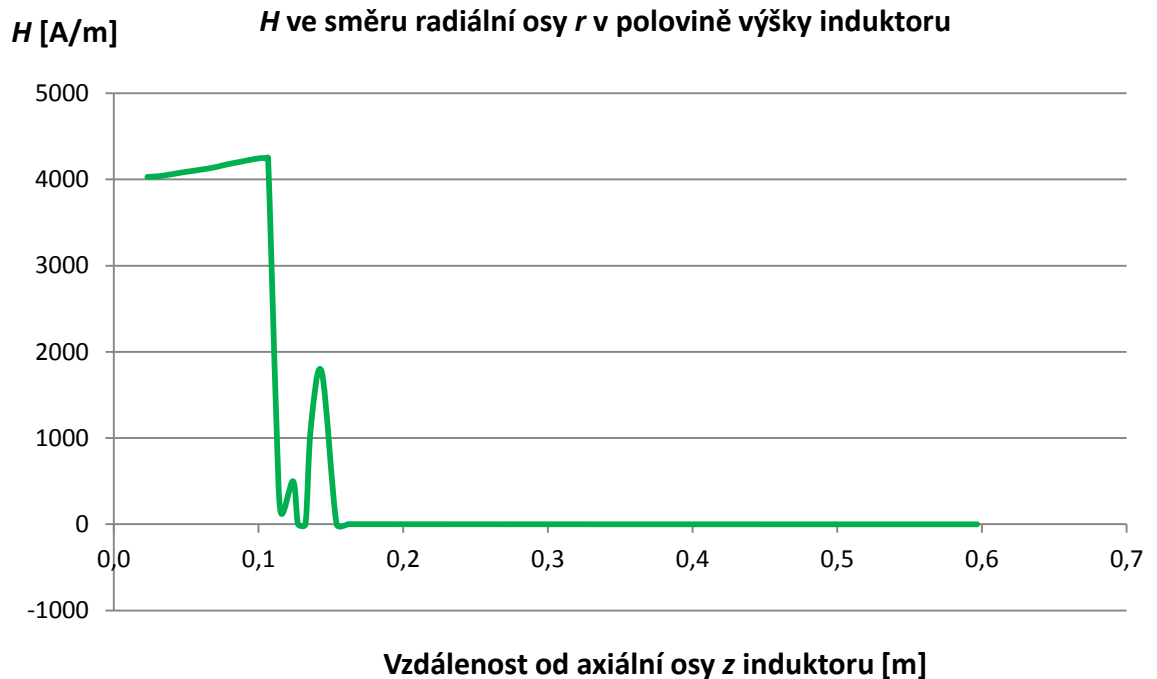
Obrázek 10.13: Intenzita magnetického pole H [A/m] v okolí induktoru se stíněním transformátorovými plechy a přídavným konstrukčním prvkem – měděným prstencem



Graf 10.10: Intenzita magnetického pole H v axiální ose z induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – měděným prstencem



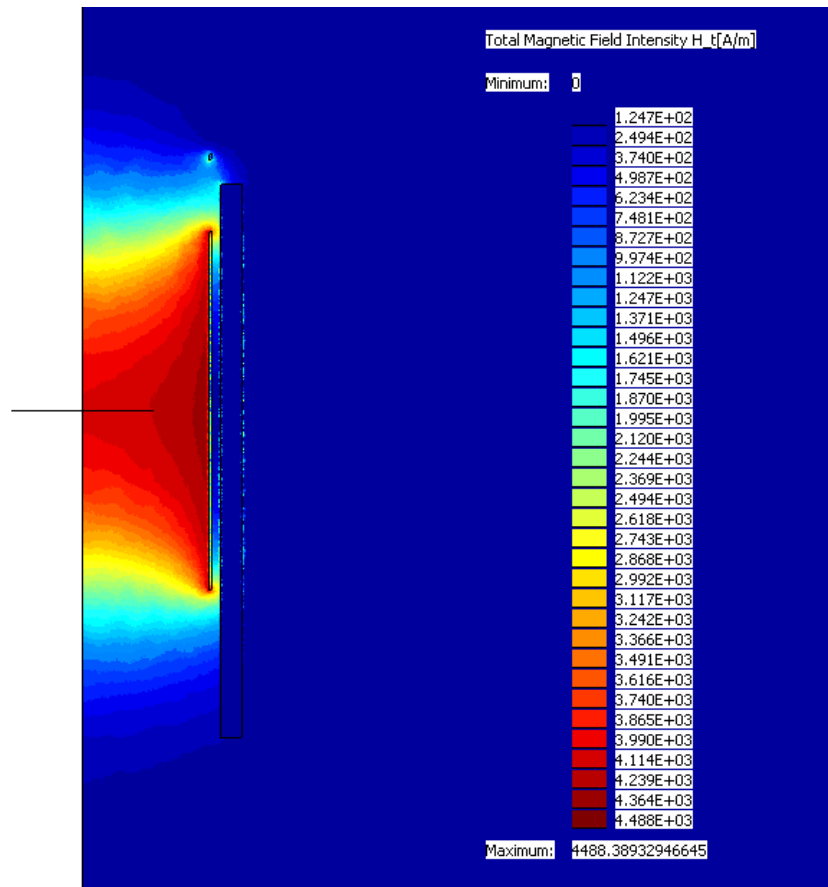
Graf 10.11: Intenzita magnetického pole H ve vzdálenosti 4 cm od axiální osy z induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – měděným prstencem



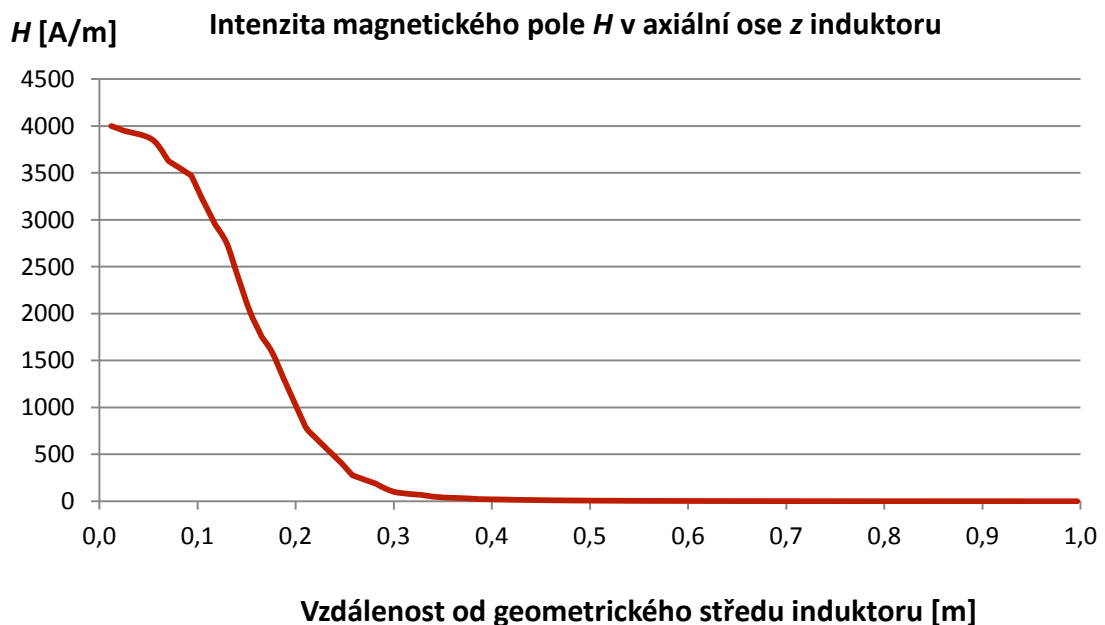
Graf 10.12: Intenzita magnetického pole H ve směru radiální osy r v polovině výšky induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – měděným prstencem

Z grafů (Graf 10.10 a Graf 10.11) je zřejmé, že se zvětšující se vzdáleností od středu induktoru intenzita magnetického pole H klesá a utlumí se přibližně ve vzdálenosti 50 cm od středu induktoru. Z grafu (Graf 10.12) je zřejmé, že intenzita magnetického pole H v poloviční výšce induktoru od středu induktoru až k jeho vnitřní stěně mírně roste. Ve vnější oblasti za induktorem je oproti vnitřku intenzita výrazně nižší a v prostoru za stíněním se již zcela utlumí. Zajímavý a podstatný je zde skok ve vzdálenosti 0,13 m od induktoru, který názorně demonstruje zvýšení intenzity magnetického pole H ve stínění svazky transformátorových plechů.

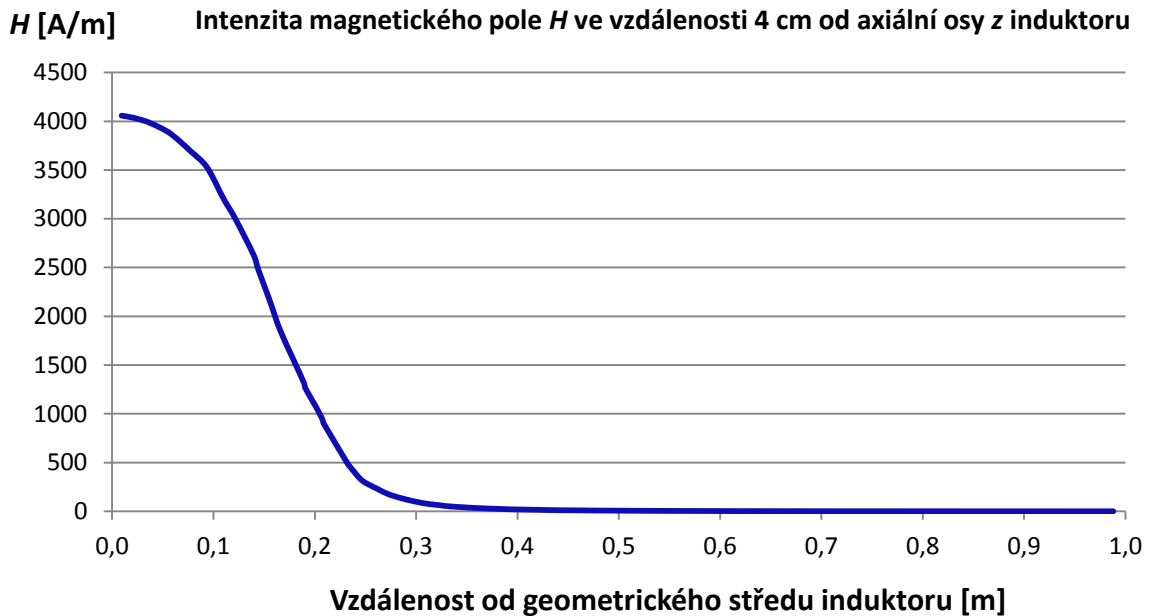
10.3.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a dvěma uzavřenými závity



Obrázek 10.14: Intenzita magnetického pole H [A/m] v okolí induktoru se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – dvěma závity nakrátko

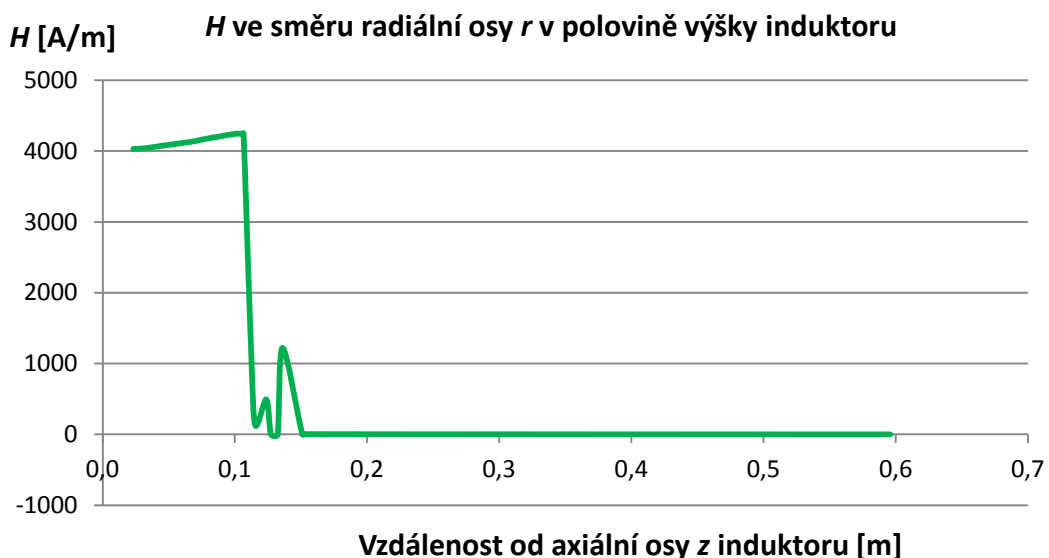


Graf 10.13: Intenzita magnetického pole H v axiální ose z induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – dvěma závity nakrátko



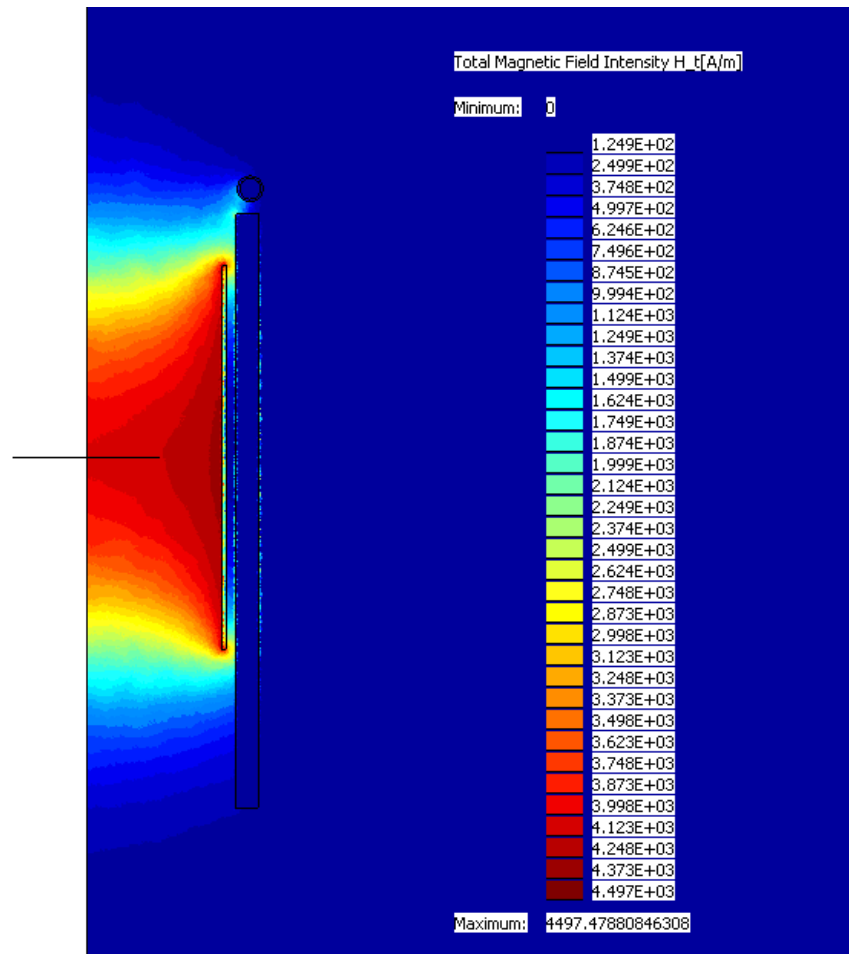
Graf 10.14: Intenzita magnetického pole H ve vzdálenosti 4 cm od axiální osy z induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přídatným konstrukčním prvkem – dvěma závitů nakrátko

Z grafů (Graf 10.13 a Graf 10.14) je zřejmé, že se zvětšující se vzdáleností od středu induktoru intenzita magnetického pole H klesá a utlumí se přibližně ve vzdálenosti 50 cm od středu induktoru. Vyhodnocení k Graf 10.15 je shodné s vyhodnocením Graf 10.12 v Kapitola 10.3.1.

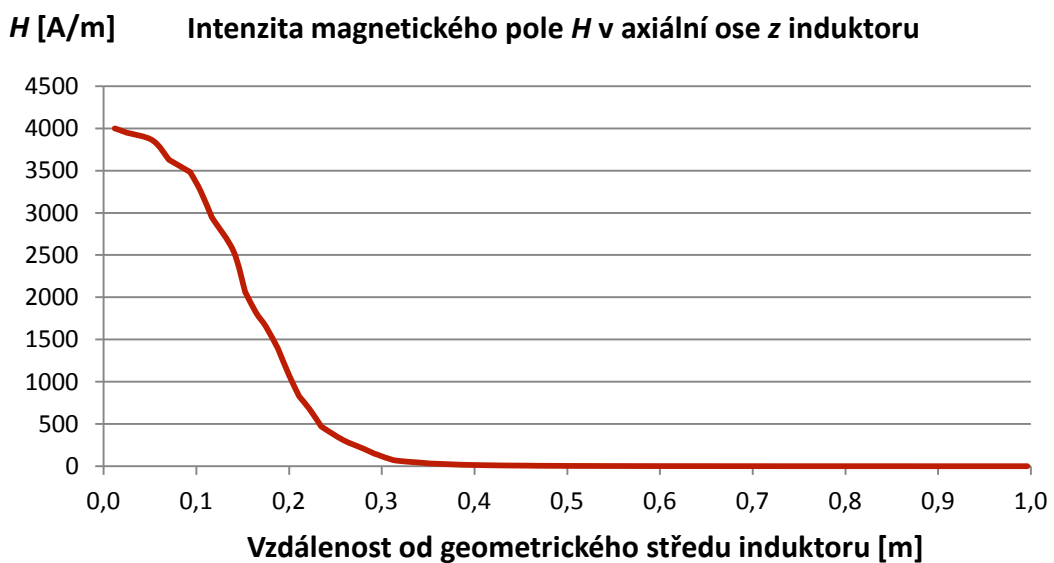


Graf 10.15: Intenzita magnetického pole H ve směru radiální osy r v polovině výšky induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přídatným konstrukčním prvkem – dvěma závitů nakrátko

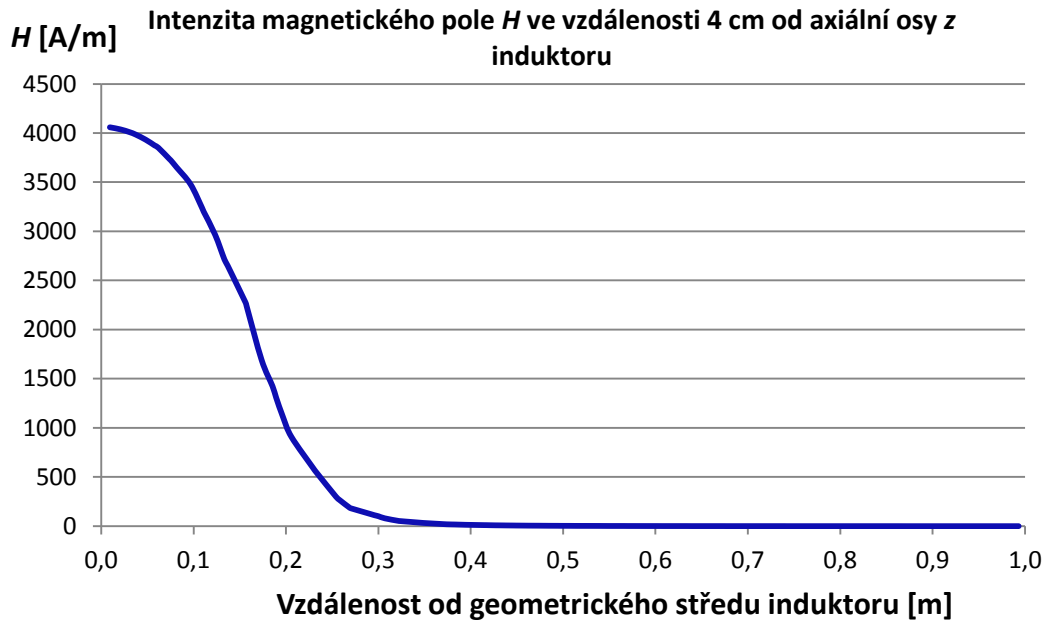
10.3.3 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a dutým kruhovým vodičem



Obrázek 10.15: Intenzita magnetického pole H [A/m] v okolí induktoru se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – dutým vodičem

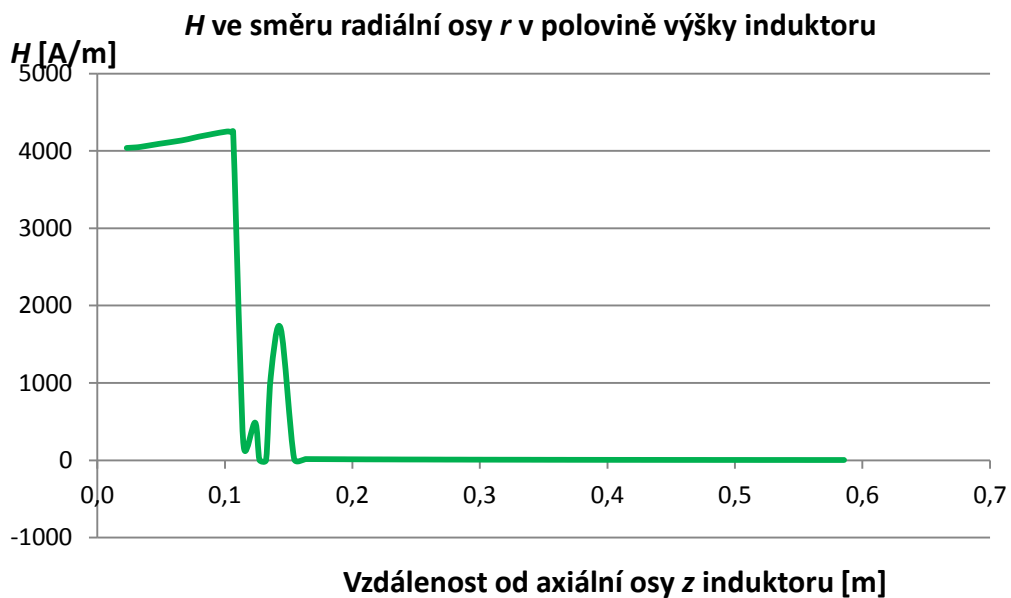


Graf 10.16: Intenzita magnetického pole H v axiální ose z induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – dutým vodičem



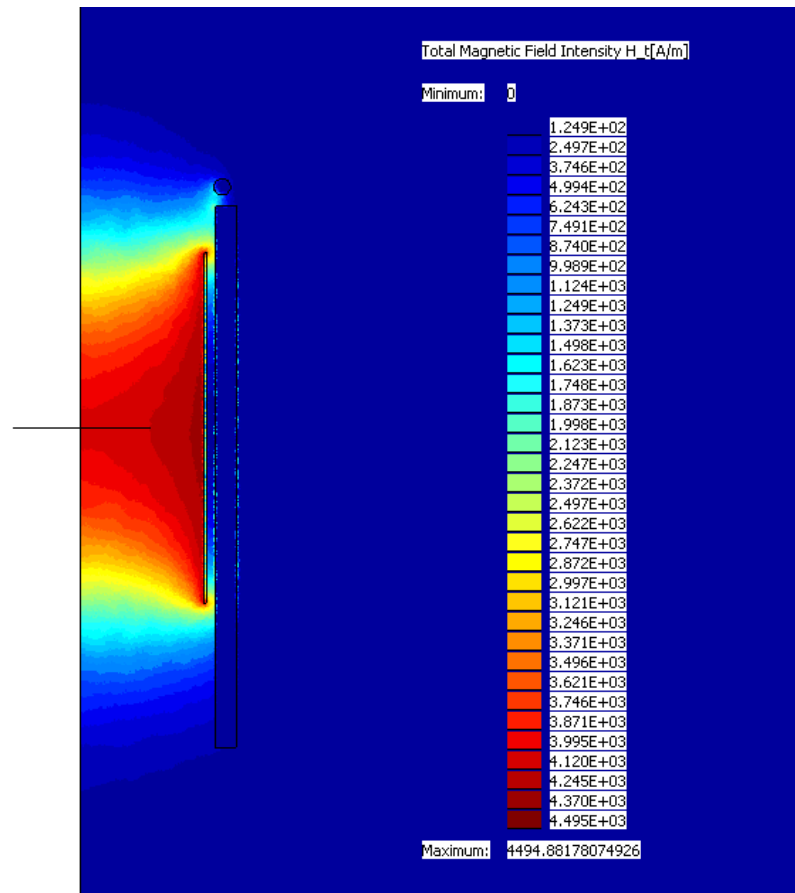
Graf 10.17: Intenzita magnetického pole H ve vzdálenosti 4 cm od axiální osy z induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – dutým vodičem

Z grafů (Graf 10.16 a Graf 10.17) je zřejmé, že se zvětšující se vzdáleností od středu induktoru intenzita magnetického pole H klesá a utlumí se přibližně ve vzdálenosti 55 cm od středu induktoru. Vyhodnocení k Graf 10.18 je shodné s vyhodnocením Graf 10.12 v Kapitola 10.3.1.

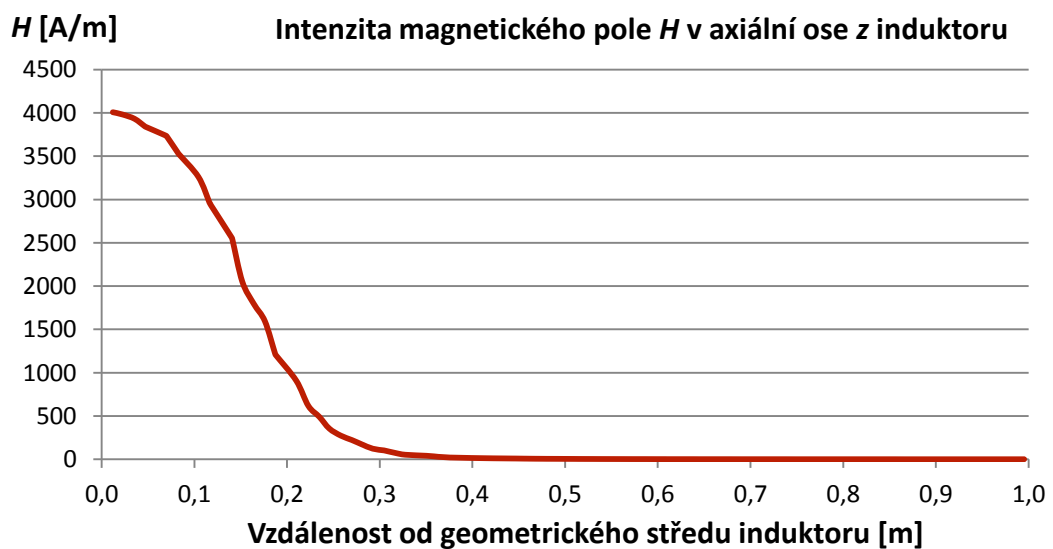


Graf 10.18: Intenzita magnetického pole H ve směru radiální osy r v polovině výšky induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – dutým vodičem

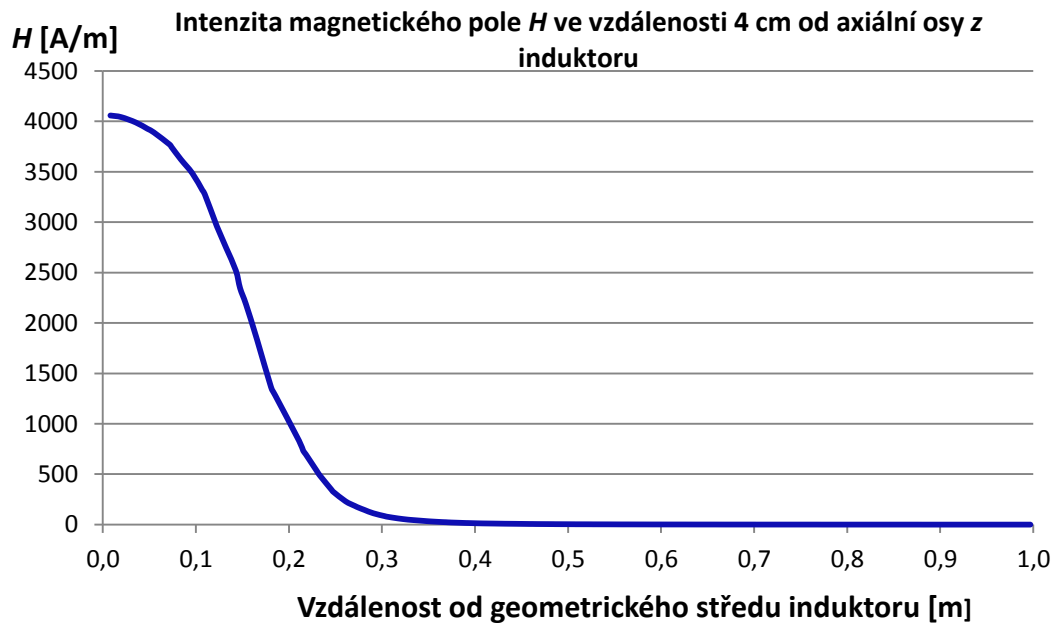
10.3.4 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a hliníkovým plným kruhovým vodičem



Obrázek 10.16: Intenzita magnetického pole H [A/m] v okolí induktoru se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – plným vodičem

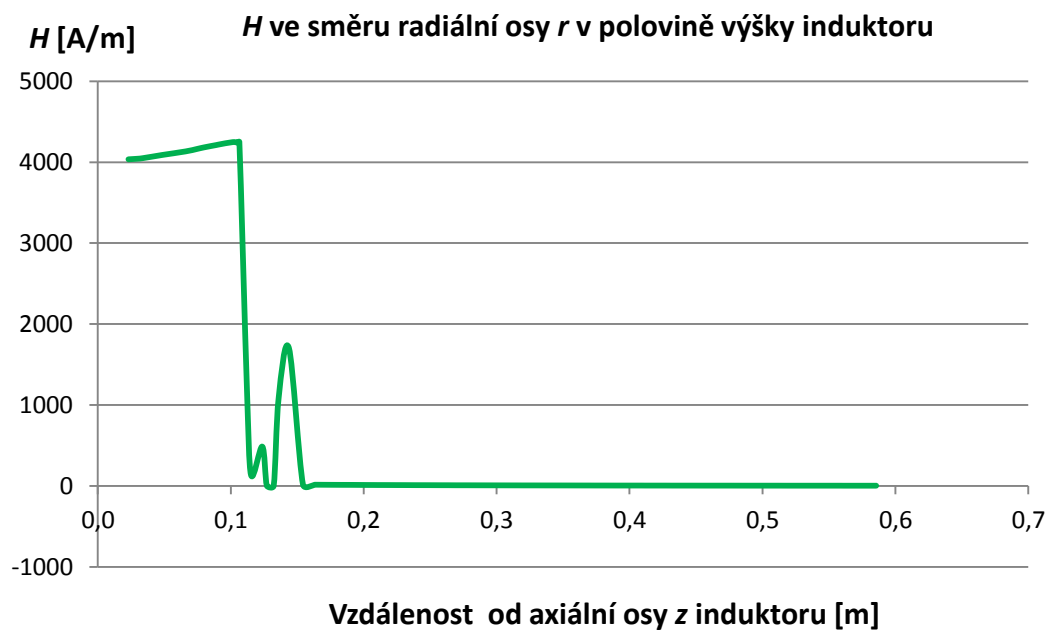


Graf 10.19: Intenzita magnetického pole H v axiální ose z induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – plným vodičem



Graf 10.20: Intenzita magnetického pole H ve vzdálenosti 4 cm od axiální osy z induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – plným vodičem

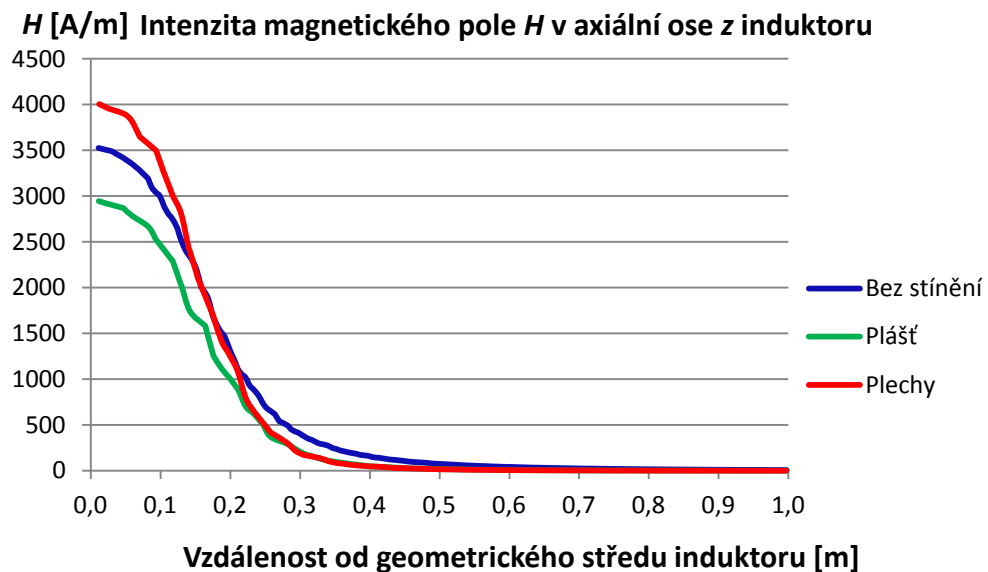
Z grafů (Graf 10.19 a Graf 10.20) je zřejmé, že se zvětšující se vzdáleností od středu induktoru intenzita magnetického pole H klesá a utlumí se přibližně ve vzdálenosti 55 cm od středu induktoru. Vyhodnocení k Graf 10.21 je shodné s vyhodnocením Graf 10.12 v Kapitola 10.3.1.



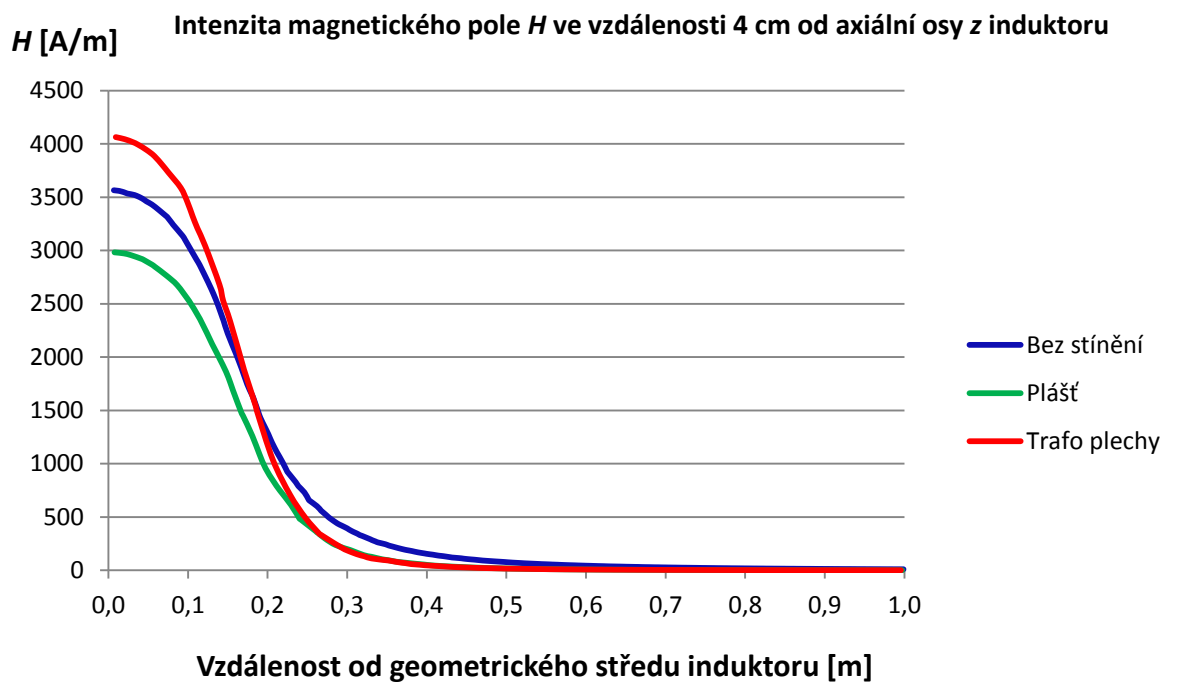
Graf 10.21: Intenzita magnetického pole H ve směru radiální osy r v polovině výšky induktoru pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a přidavným konstrukčním prvkem – plným vodičem

10.3.5 Zhodnocení a porovnání výsledků získaných simulací induktoru se stíněním transformátorovými plechy a přidavnými konstrukčními prvky

Graf 10.22 a Graf 10.23 znázorňují porovnání výše uvedených grafů pro intenzitu magnetického pole H v axiální ose induktoru a ve vzdálenosti 4 cm od ní pro samotný induktor, induktor se stíněním transformátorovými plechy a induktor se stíněním dobře elektricky vodivým měděným stínícím pláštěm, které představují základní stínění fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení.



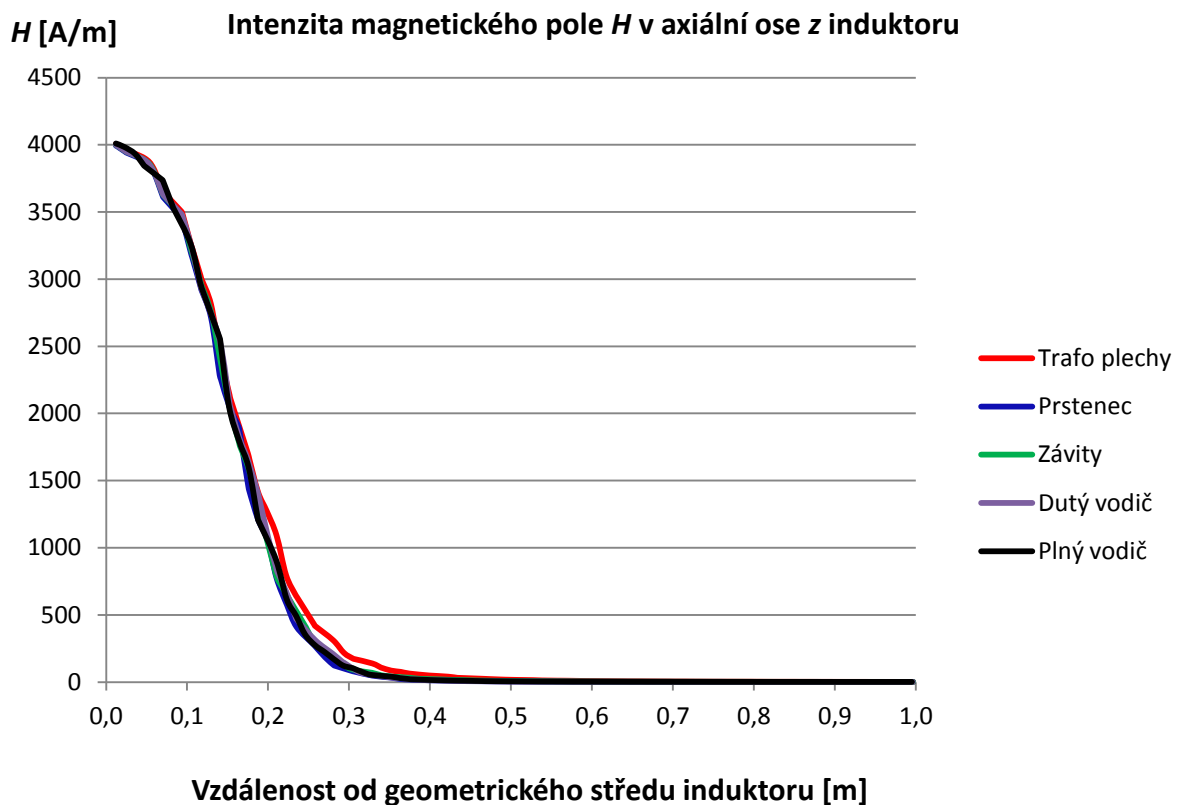
Graf 10.22: Intenzita magnetického pole H v axiální ose z induktoru pro samotný induktor a dva druhy základního stínění



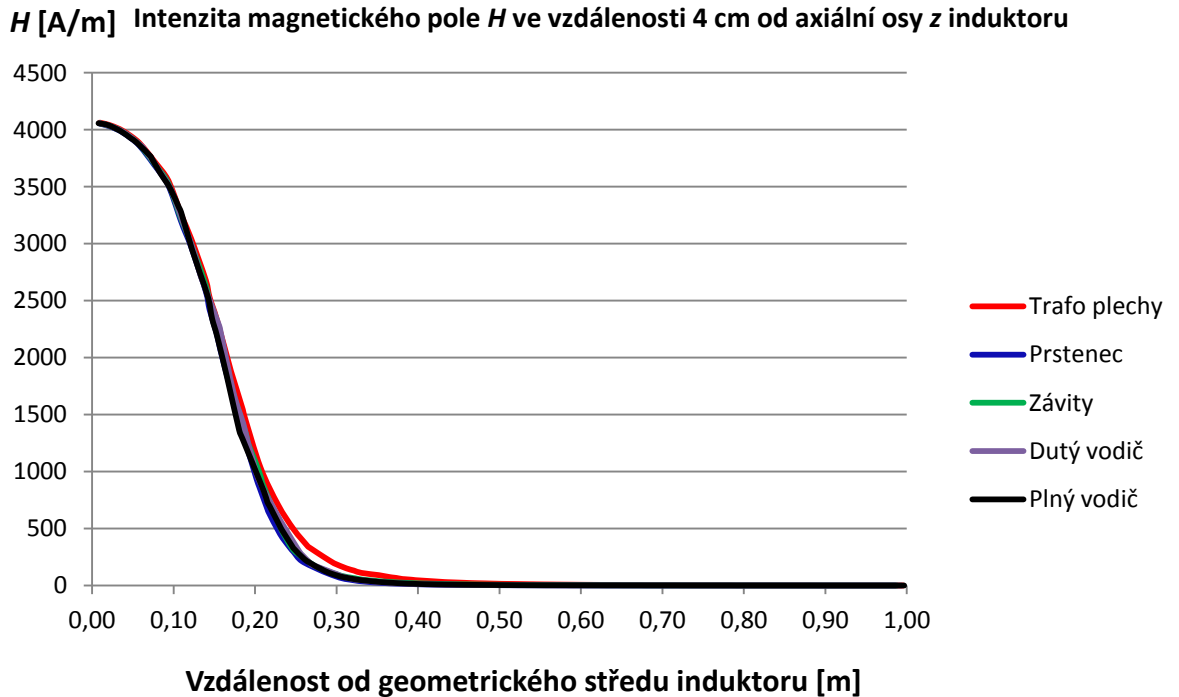
Graf 10.23: Intenzita magnetického pole H ve vzdálenosti 4 cm od axiální osy z induktoru pro samotný induktor a dva druhy základního stínění

Výše uvedené grafy mi potvrdily předpoklady platné pro vliv základních druhů stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem indukčního zařízení. Transformátorové plechy zvýšily intenzitu magnetického pole v dutině induktoru, vodivý plášť snížil intenzitu magnetického pole v dutině induktoru a v prostoru nad induktorem došlo k rychlejšímu utlumení intenzity magnetického pole při srovnání stavu pro případ nestíněného induktoru.

Graf 10.24 a Graf 10.25 znázorňují porovnání výše uvedených grafů pro intenzitu magnetického pole H v axiální ose induktoru a ve vzdálenosti 4 cm od ní pro induktor se stíněním transformátorovými plechy a induktor se stíněním transformátorovými plechy a jednotlivými přídatnými konstrukčními prvky.

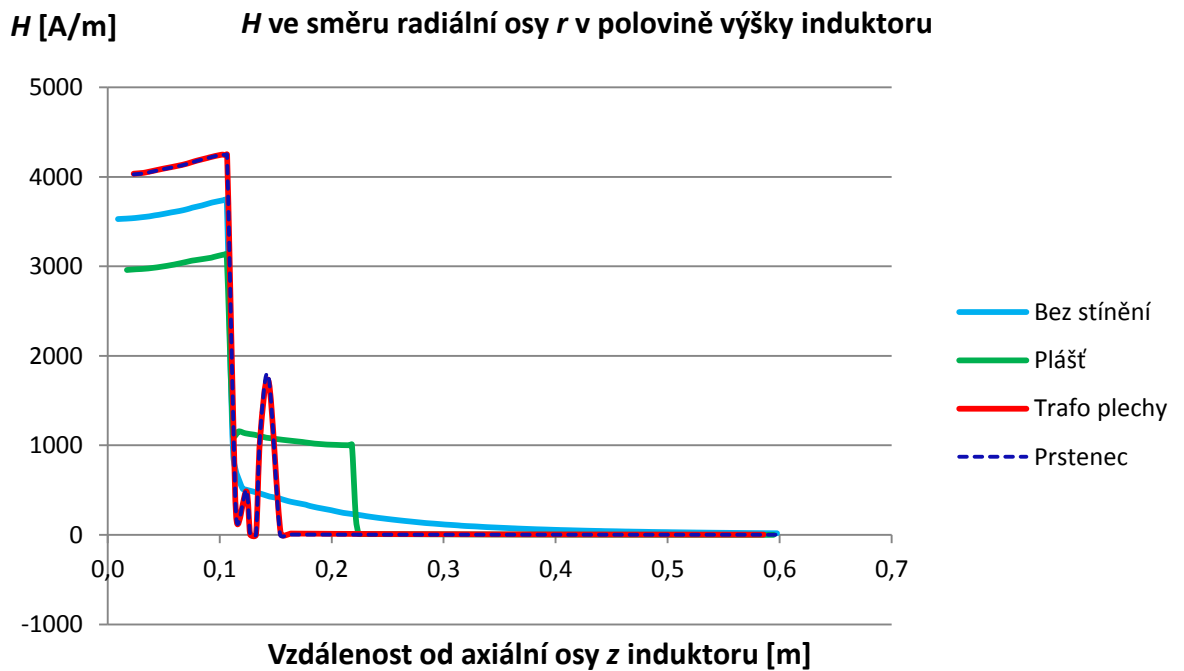


Graf 10.24: Intenzita magnetického pole H v axiální ose z induktoru pro induktor se základním stíněním transformátorovými plechy a induktor se základním stíněním a doplňkovým stíněním přídatnými konstrukčními prvky



Graf 10.25: Intenzita magnetického pole H ve vzdálenosti 4 cm od axiální osy z induktoru pro induktor se základním stíněním transformátorovými plechy a induktor se základním stíněním a doplňkovým stíněním přidavnými konstrukčními prvky

Na základě grafů získaných metodou numerického výpočtu v programu RillFEM 2D jsem učinil závěr, že přidavné konstrukční prvky nezpůsobují v dutině uvnitř induktoru žádnou viditelnou změnu intenzity magnetického pole H . Z grafů dále vidím, že v oblasti nad vrchní hranou induktoru (hodnota $x = 0,158$ m) nastává větší útlum intenzity magnetického pole H . Nastalý jev v oblasti geometrické polohy přidavného konstrukčního prvku je způsoben vlastním elektromagnetickým polem přidavného konstrukčního prvku s opačnou polaritou, než je budící pole induktoru. Toto pole se vytvoří v oblasti kolem prvku a díky jeho opačné polaritě je výsledné pole získané součtem obou polí slabší, jak dokladují výsledky grafů. Popisovaný vliv prvku je též dobře vidět na hladinových grafech v okolí uvažovaného prvku uvedených výše.



Graf 10.26: Intenzita magnetického pole H ve směru radiální osy r v polovině výšky induktoru pro induktor se základním stíněním transformátorovými plechy a induktor se základním stíněním a doplňkovým stíněním přídatnými konstrukčními prvky

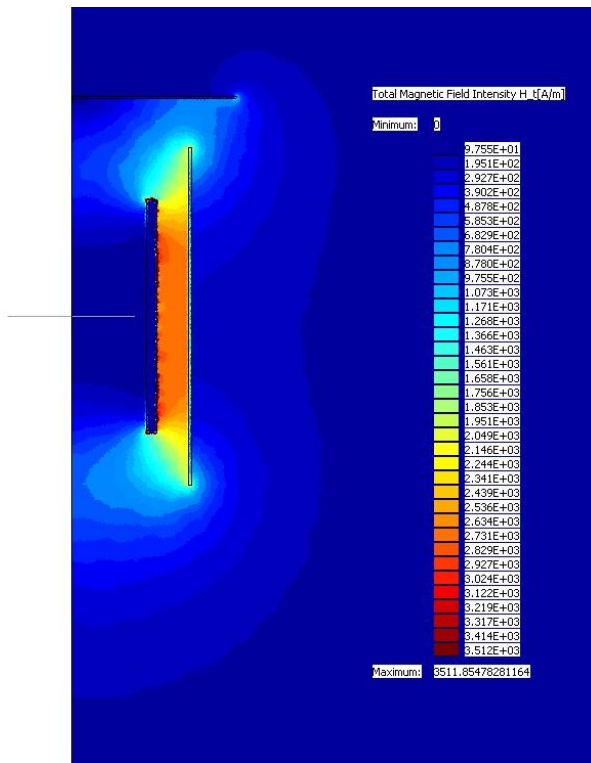
V grafu na Graf 10.26 názorně vidím, že intenzita magnetického pole H ve směru radiální osy r v poloviční výšce induktoru se pro uvažovaný přídatný konstrukční prvek shoduje s průběhem intenzity magnetického pole pro induktor stíněný transformátorovými plechy. Opět pozoruji výše popsany vliv stínění na intenzitu magnetického pole v dutině induktoru. Stejně tak prostor za základními stínícími prvky – transformátorovými plechy nebo měděným stínícím pláštěm – je účinně stíněný.

10.4 Výsledky simulace duté válcové vsázky a měděné kruhové desky

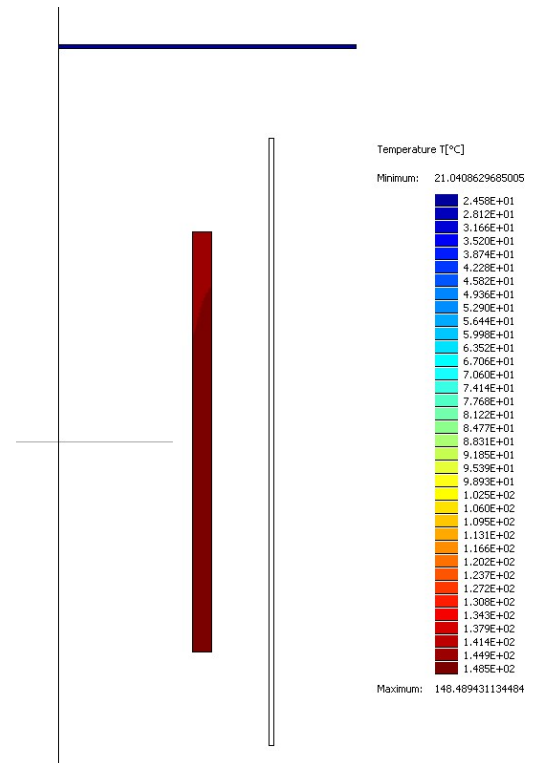
Nyní uvedu výsledky numerického modelu duté válcové vsázky a měděné kruhové desky pro dva zvolené vysoké kmitočty 4kHz a 10 kHz. Dále prezentuji teplotu po 60-ti minutách indukčního ohřevu této vsázky.

Na uvedených výsledcích numerického modelu (Obrázek 10.17 až Obrázek 10.24) je názorně vidět návaznost nárůstu maximální dosažené teploty vsázky v souvislosti s přítomností stínění ve formě svazků transformátorových plechů při stejné velikosti a frekvenci napájecího proudu induktoru a dále je zde vidět nárůst maximální dosažené teploty při použití více než dvojnásobné frekvence napájecího proudu induktoru.

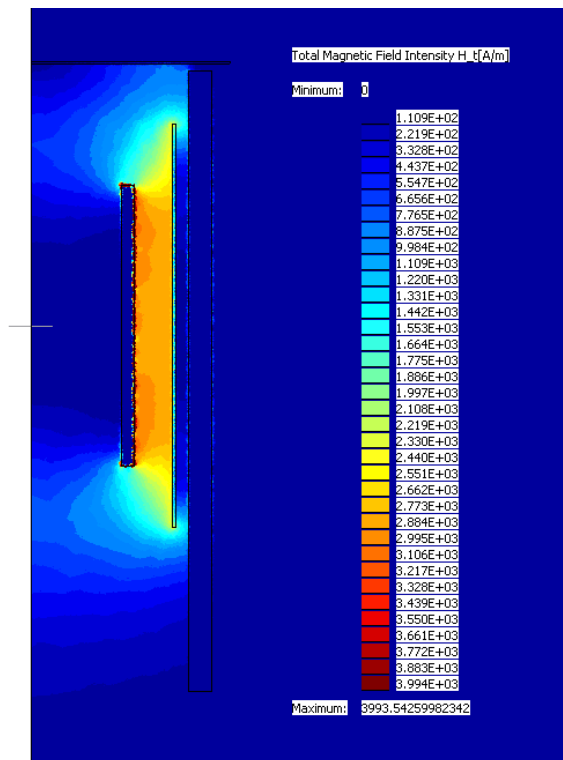
10.4.1 4 kHz a 15 A



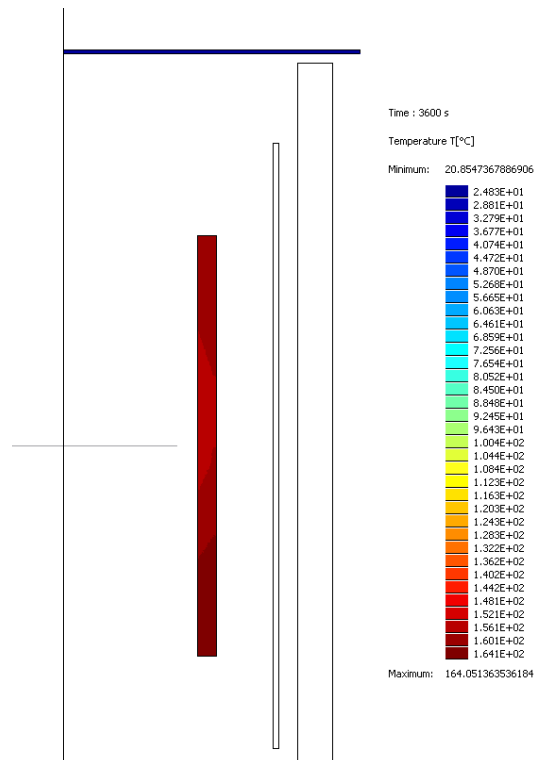
Obrázek 10.17: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, deska



Obrázek 10.18: Dosažená teplota T [°C] po 60 minutách indukčního ohřevu – induktor, vsázka, deska

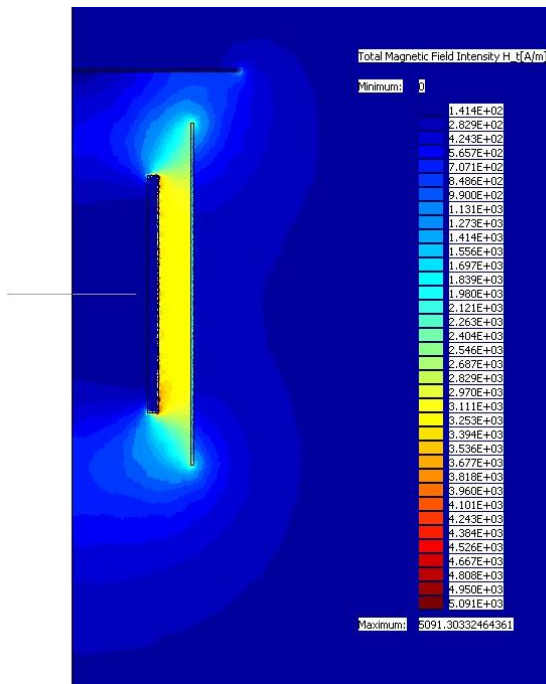


Obrázek 10.19: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, stínění, vsázka, deska

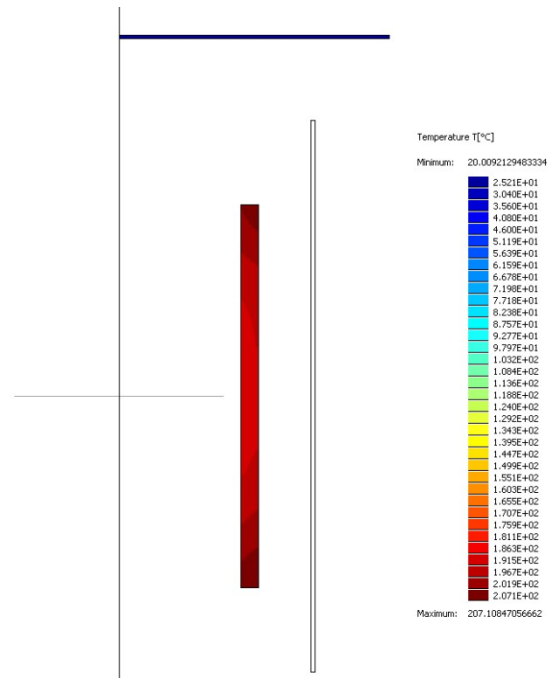


Obrázek 10.20: Dosažená teplota T [°C] po 60 minutách indukčního ohřevu – induktor, stínění vsázka, deska

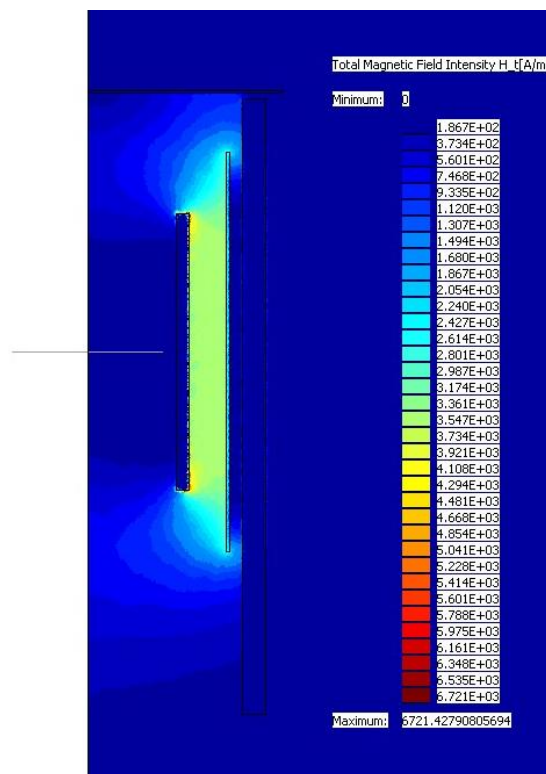
10.4.2 10 kHz a 18 A



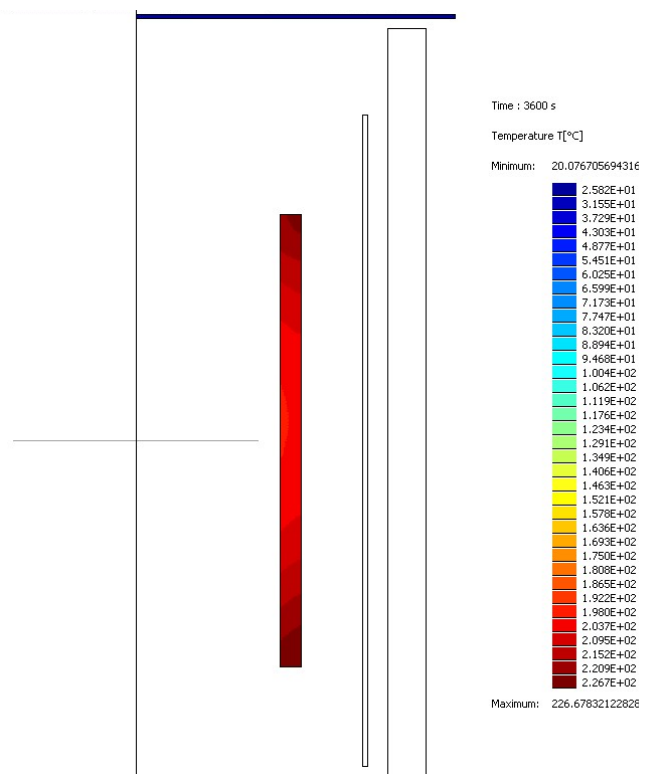
Obrázek 10.21: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, vsázka, deska



Obrázek 10.22: Dosažená teplota T [°C] po 60 minutách indukčního ohřevu – induktor, vsázka, deska

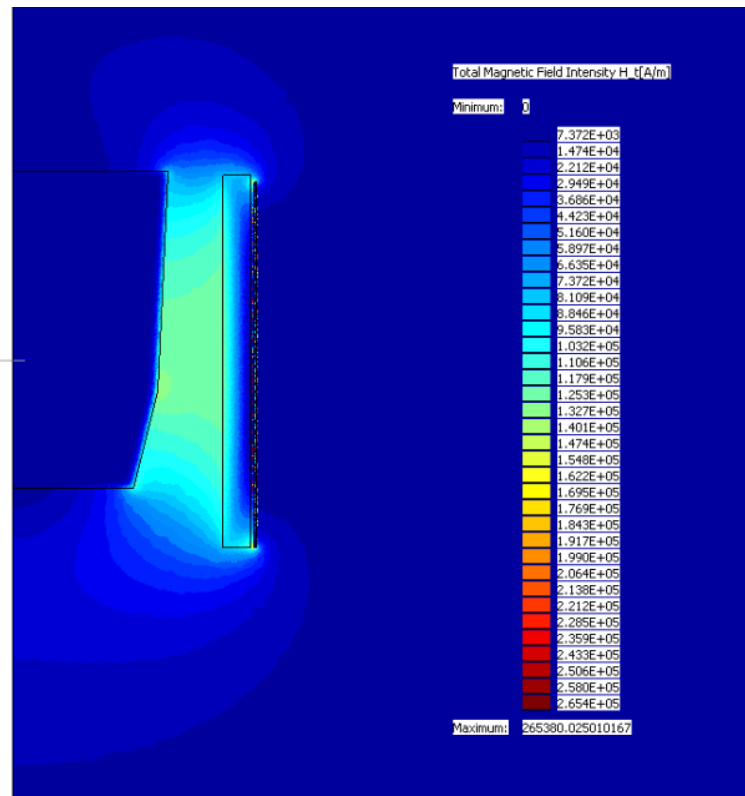


Obrázek 10.23: Intenzita magnetického pole H [A/m] – induktor, stínění, vsázka, deska

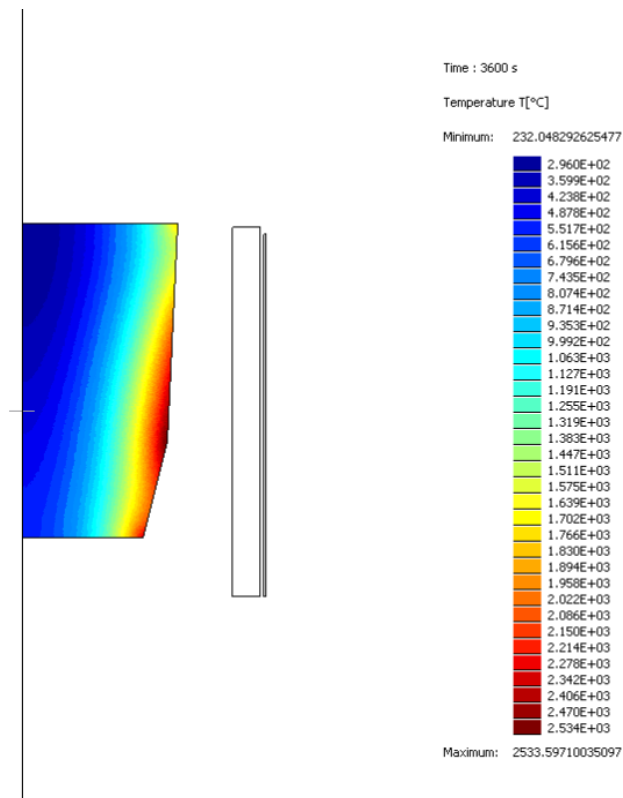


Obrázek 10.24: Dosažená teplota T [°C] po 60 minutách indukčního ohřevu – induktor, stínění vsázka, deska

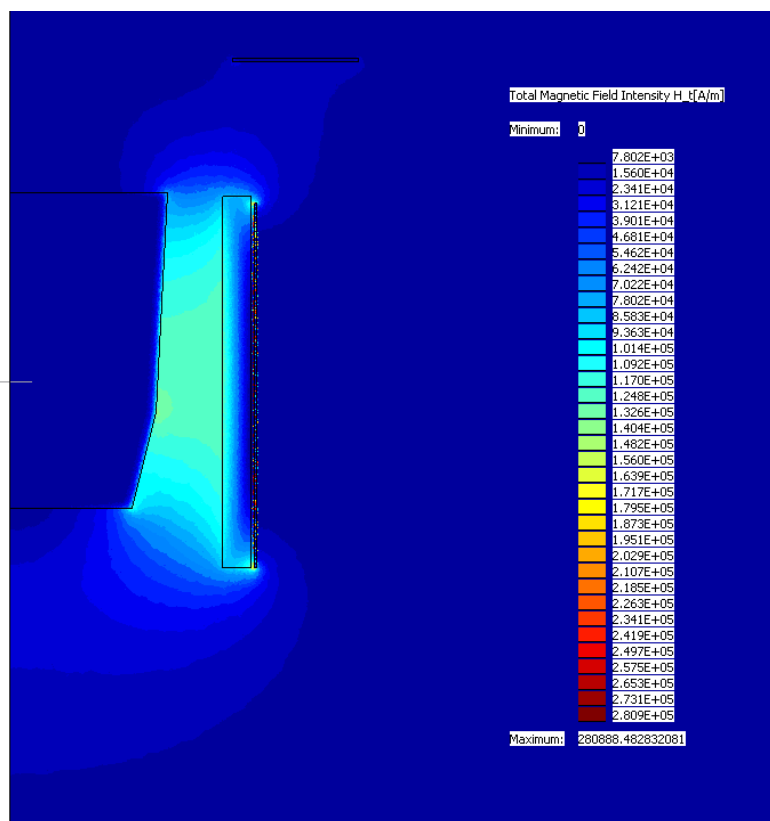
10.5 Výsledky numerického modelu indukční kelímkové pece



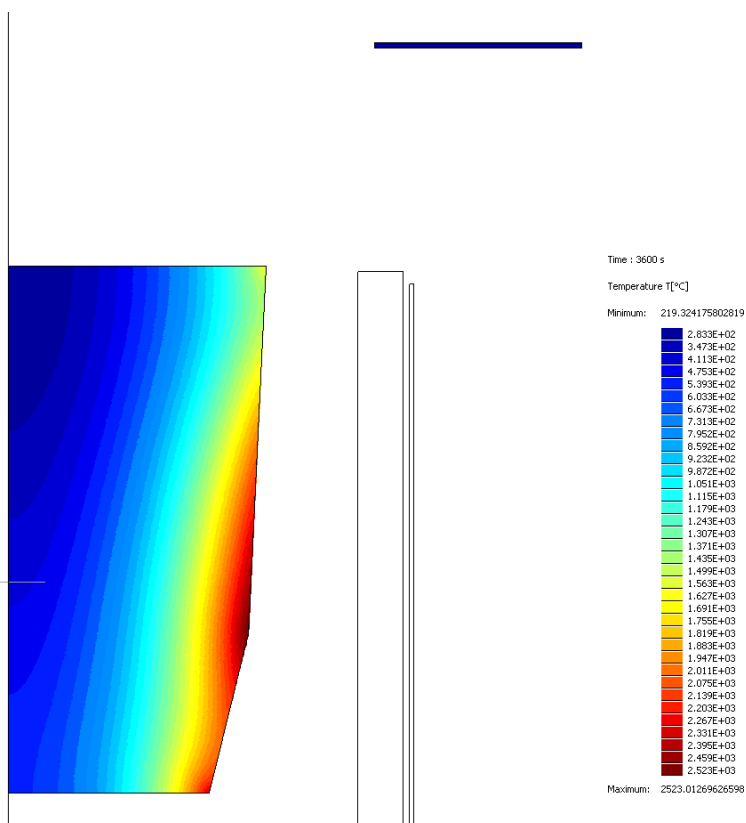
Obrázek 10.25: Intenzita magnetického pole H [A/m] pro pec bez přidavných konstrukčních prvků, $H_{\max} = 265\,380$ A/m



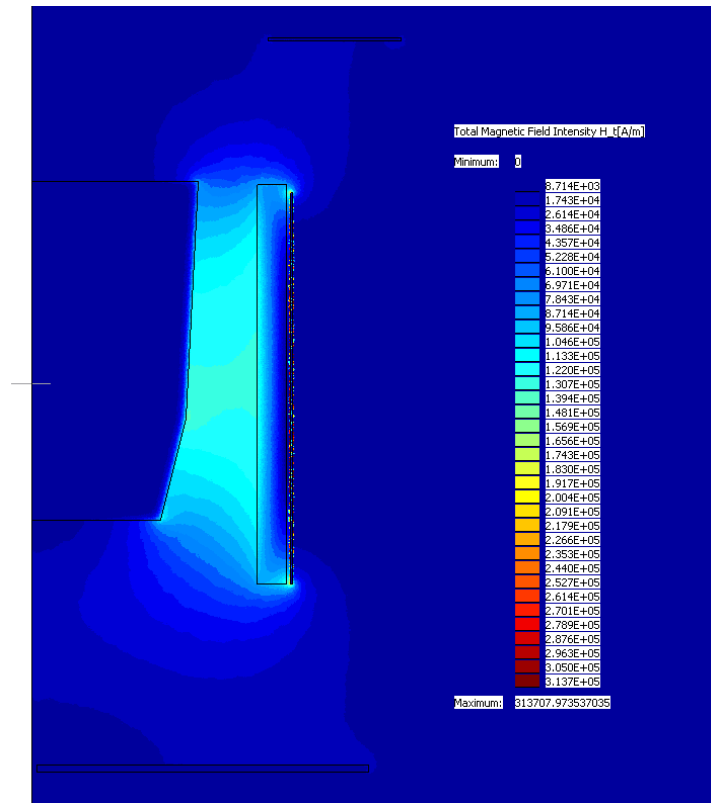
Obrázek 10.26: Teplota válcové vsázky indukční kelímkové pece T [°C] po 60-ti minutách indukčního ohřevu, $T_{\max \text{ VS}} = 2534$ °C



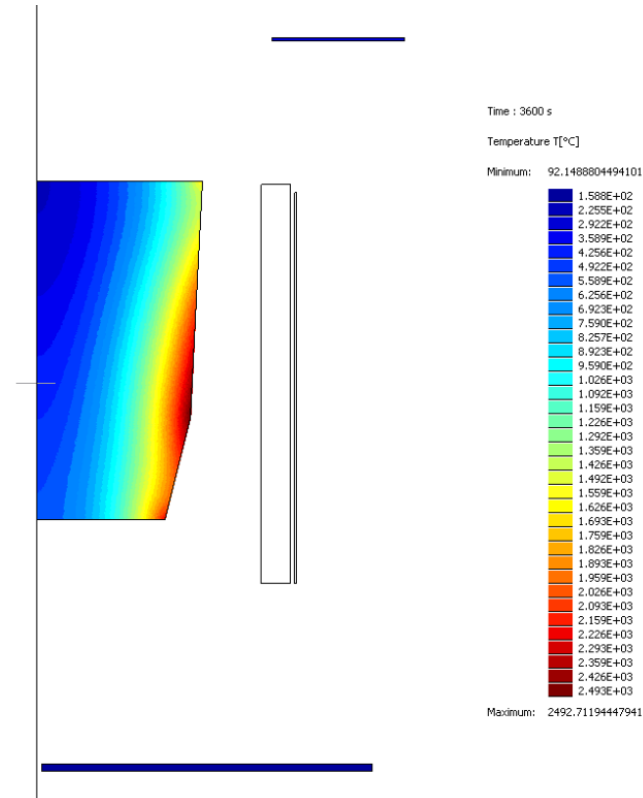
Obrázek 10.27: Intenzita magnetického pole H [A/m] pro pec s plochým kruhem nakrátko, $H_{\max} = 280\,888$ A/m



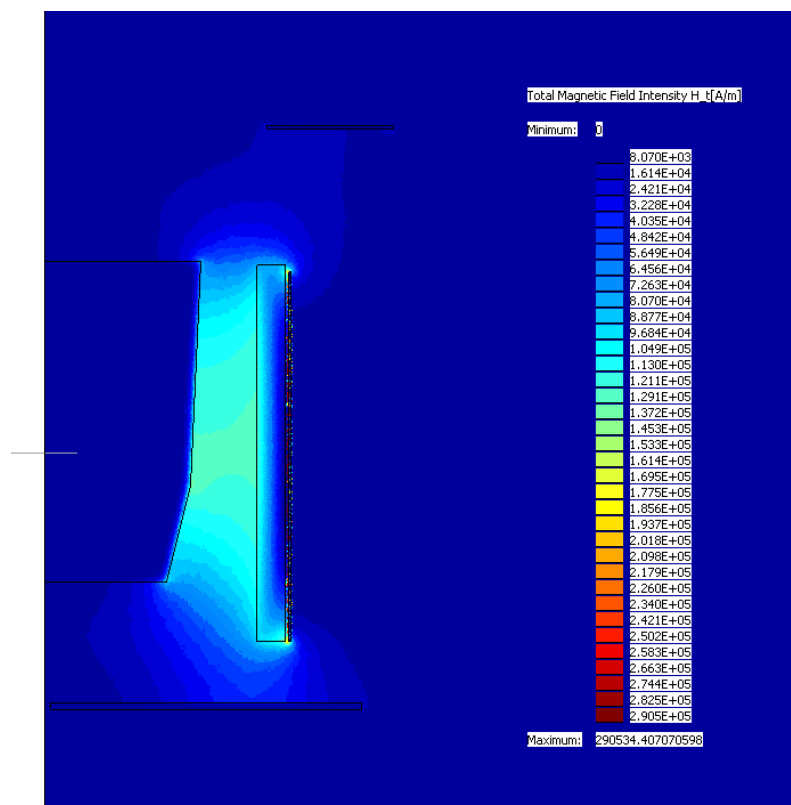
Obrázek 10.28: Teplota válcové vsázky indukční kelímkové pece T [°C] pro pec s plochým kruhem nakrátko po 60-ti minutách indukčního ohřevu, T_{\max} vs = 2523 °C



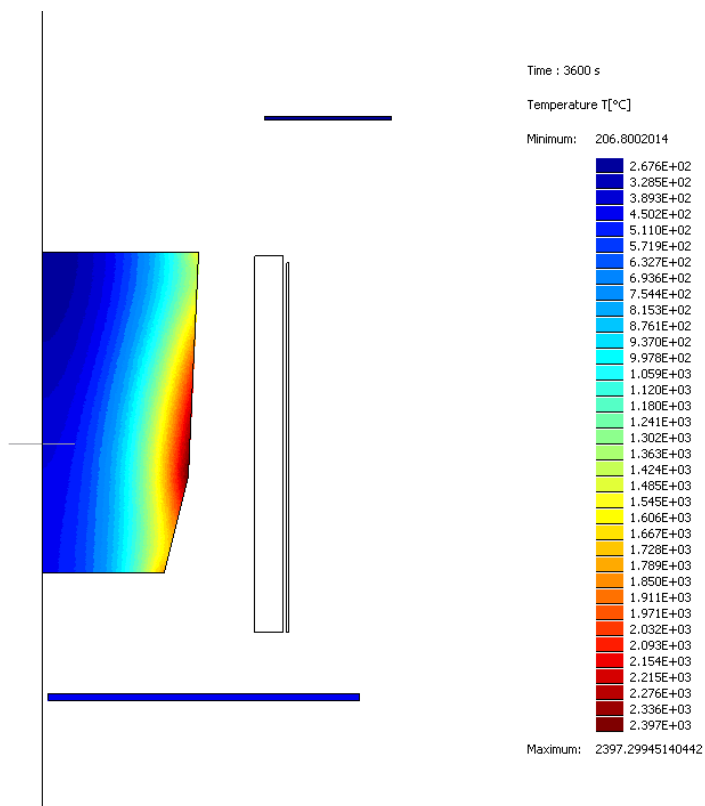
Obrázek 10.29: Intenzita magnetického pole H [A/m] pro pec s plochým kruhem nakrátko a vzdálenou vodivou deskou, $H_{\max} = 313\,708$ A/m



Obrázek 10.30: Teplota válcové vsázky indukční kelímkové pece T [°C] pro pec s plochým kruhem nakrátko a vzdálenou vodivou deskou po 60-ti minutách indukčního ohřevu, $T_{\max} \text{ vs} = 2493$ °C



Obrázek 10.31: Intenzita magnetického pole H [A/m] pro pec s plochým kruhem nakrátko a blízkou vodivou deskou, $H_{\max} = 290\,534$ A/m



Obrázek 10.32: Teplota válcové vsázky indukční kelímkové pece T [°C] pro pec s plochým kruhem nakrátko a blízkou vodivou deskou po 60-ti minutách indukčního ohřevu, $T_{\max} \text{ vs} = 2397$ °C

Uvedené výstupy numerického modelu názorně demonstrují problematiku přidavných konstrukčních prvků spolu se stíněním svazky transformátorových plechů a válcovou vsázkou, kdy největší teplotu dosáhnou v konfiguraci zařízení bez měděných přidavných prvků. Se zmenšující se vzdáleností prvku od induktoru nebo zvětšujícím se rozměrem přidavného konstrukčního prvku (zde ploché měděné desky) klesá i maximální dosažená teplotka povrchu vsázky. To je způsobené odečtením polí induktoru a měděného přidavného prvku, která mají opačnou polaritu, jak je blíže naznačeno v Kapitola 2.5. Výsledná intenzita magnetického pole H ve vyšetřovaném bodě má tedy po odečtení obou polí nižší velikost než při absenci přidavného konstrukčního prvku. Zajímavý je zde vliv stínění svazky transformátorových plechů, které díky velké magnetické vodivosti způsobují zvětšující se maximální hodnotu intenzity magnetického pole v oblasti svazku se zvětšujícími se rozměry použitých přidavných konstrukčních prvků.

11 Závěr

Pro objasnění zkoumané problematiky ohřevů elektromagnetickou indukcí jsem se rozhodl ke konstrukci vlastního fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení, který bude v maximální možné míře odpovídat reálnému indukčnímu zařízení, přičemž důraz jsem kladl především na zachování poměru rozměrů induktoru (průměr k výšce) s ohledem na nově použitou vysokou frekvenci napájecího proudu induktoru, na přítomnost stínění ve formě svazků transformátorových plechů a na volbu magnetické válcové duté vsázky. Dále jsem zkonstruoval nové přídavné konstrukční prvky vhodných rozměrů. Nově jsem tedy vytvořil nejen kompletní laboratorní model kelímkové indukční pece se stíněním, vsázkou a přídavnými konstrukčními prvky, ale rovněž i část měřicího zařízení pro měření rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení ve formě nové měřicí cívky s pomocnými prvky a konstrukcí. Navíc jsem vyvinul software pro zpracování a zobrazení hodnot naměřených měřicí cívkou s názvem LittleCoil, který ke své činnosti nepotřebuje dosud používané programy Excel nebo Matlab a k vizualizaci vektorů dosud užívané nástroje. Tato aplikace umožňuje rovněž mnohonásobně rychlejší zpracování a následně i porovnávání dat získaných měřeními na fyzikálním laboratorním modelu indukčního zařízení.

Z výsledků měření jsem dospěl k závěru, že použité stínění je nejvíce účinné při použití síťového kmitočtu 50 Hz, jak demonstrují následující tabulky (Tabulka 11.1 a Tabulka 11.2) ukazující hodnoty pomocné procentuální veličiny Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] pro obě proudové hodnoty v řadě 14 a sloupcích A až G měřicí desky:

Tabulka 11.1: Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] pro 15 A - řada 14

d [%]	A	B	C	D	E	F	G
50 Hz	94,9	96,1	97,2	96,9	97,2	97,7	98,2
4 100 Hz	87,1	87,8	88,9	89,2	89,6	91,3	91,9
10 000 Hz	55,0	58,8	72,3	81,2	79,5	85,2	89,2

Tabulka 11.2: Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] pro 31 A - řada 14

d [%]	A	B	C	D	E	F	G
50 Hz	93,4	94,2	94,5	95,3	96,0	97,2	97,5
4 100 Hz	86,7	87,9	86,7	83,5	84,1	85,0	88,0
10 000 Hz	85,9	84,4	80,8	85,1	85,9	86,5	88,0

Pro dvě hodnoty vysoké frekvence napájecího proudu induktoru je účinnost stínění přibližně stejná (účinnost stínění je pro frekvenci 4,1 kHz mírně vyšší než pro 10 kHz (viz Tabulka 11.1 a Tabulka 11.2)). V průběhu měření jsem zjistil vyšší maximální hodnoty H při frekvenci 4,1 kHz než při frekvenci 10 kHz, jak ukazuje Tabulka 11.3.

Tabulka 11.3: Dosahovaná změřená maxima intenzity magnetického pole H [A/m]

f [Hz]	Proud 15 A		Proud 31 A	
	H_{BezS} [A/m]	H_{SeS} [A/m]	H_{BezS} [A/m]	H_{SeS} [A/m]
50 Hz	1160,7	1058,2	2105,7	2092,4
4 100 Hz	3258,7	3063,1	3526,5	3185,7
10 000 Hz	1779,1	1693,4	2334,3	1979,0

Při srovnání těchto dvou kmitočtů nastává tedy pokles intenzity H se vzrůstajícím kmitočtem. Tuto závislost intenzity magnetického pole H na kmitočtu u naměřených hodnot nelze jednoznačně zdůvodnit. Kontrolní měření opět potvrdilo měření předchozí. Příčinu můžu hledat v použití dvou odlišných zdrojů, respektive v užití nového vysokofrekvenčního napájecího zdroje. Pro měření 50 Hz jsem použil harmonický zdroj proudu a pro měření vyšších kmitočtů potom pulzní zdroj, kde průběhem výstupního proudu jsou obdélníkové pulzy. S největší pravděpodobností tento jev souvisí s frekvenční závislostí impedance induktoru, kdy s rostoucí frekvencí napájecího proudu induktoru impedance induktoru roste a omezuje tím proud protékající induktorem. Poklesem proudu protékajícího induktorem nastane výsledný pokles intenzity magnetického pole H . Frekvenci 10 kHz měříme s jinou (křížovou měřicí cívkou 2) než frekvenci 4,1 kHz. Tato cívka má pouze 300 závitů oproti 21 000 závitů u cívky 1 užití při měření frekvence 4,1 kHz. Křížová měřicí cívka č. 2 je ale frekvenčně impedančně nezávislá na rozdíl od cívky č. 1. Rozdílný počet závitů, frekvenční impedanční závislost a odlišná konstrukce mohou být rovněž příčinou vzniklého jevu.

V průběhu měření se prakticky nemůžu vyvarovat chyb, které s danou měřicí metodou přirozeně souvisí. Samotné umístění v bezprostřední blízkosti induktoru a způsob měření, při kterém je cívka natáčena do požadovaného směru, má značný dopad na hodnoty intenzity magnetického pole H . To platí především ve výše zmíněné bezprostřední blízkosti induktoru, kdy i malý úhel natočení má za následek indukovaný rozdíl například několik milivoltů až voltů v závislosti na použité frekvenci napájecího proudu induktoru. Na další vzniklou nepřesnost při měření nejvyššího kmitočtu (10 kHz) jsem přišel již vizuální kontrolou změny měřených hodnot indukovaného napětí do cívky při přiblížení použitého multimetru

s přívodním vodičem měřicí cívky k induktoru, protože zde mnou užitá křížová měřicí cívka č. 2 má od svého autora nekroucené nestíněné a ještě navíc krátké přívodní vodiče. Digitální multimeter byl pro účely tohoto měření testován v laboratoři Elektromagnetické kompatibility na katedře KEE - funkční kritérium A.

Závěrem je důležité zdůraznit, že je nezbytně nutné se zabývat problematikou stínění indukčních kelímkových pecí, protože jen tak je možné dosáhnout optimální účinnosti a efektivity těchto indukčních zařízení.

Kapitola týkající se vlivu přídavných konstrukčních prvků objasňuje vliv stínění a uzavřených nebo otevřených přídavných konstrukčních prvků umístěných v horní části nového fyzikálního modelu indukčního zařízení na velikost intenzity magnetického pole H v dutině a okolí tohoto indukčního zařízení. Měření jsem prováděl pro dvě frekvenční úrovně napájecího proudu indukčního zařízení 4 a 10 kHz. Měření jsem provedl pro uvedené frekvence vždy pro samotný induktor, induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a dále pro stíněný induktor s uzavřenými a otevřenými přídavnými prvky. Měření jsem prováděl bez vsázky, aby bylo možné proměřit i dutinu induktoru. To by při vložené vsázce nebylo technicky proveditelné z důvodu nedostatku místa pro umístění měřicí cívky, vysoké teploty magnetické vsázky s rizikem popálení, a i proto, že k proměření přídavných konstrukčních prvků je příslušnou měřicí desku nutné fixovat nasazením na induktor, kdy její část je v této dutině příčně umístěna. Druhá měřicí deska, která umožňuje provést měření se vsázkou je fixována na induktoru pomocí měděné kruhové desky a neumožňuje kruhovou desku vyměnit za jiný přídavný konstrukční prvek v podobě závitů nakrátko při současně splněné fixaci desky na induktoru. I při tomto měření jsem objevil, že pro frekvenci napájecího proudu induktoru 10 kHz jsou vypočtené hodnoty intenzity magnetického pole H obecně menší než pro 4 kHz. Příčinou tohoto jevu je zřejmě frekvenční závislostí imaginární části impedance cívky. Zvětšení velikosti impedance může rovněž nastat vlivem skin efektu, který nastane ve vodiči induktoru vlivem vysoké frekvence napájecího proudu. Je zřejmé, že s rostoucí frekvencí dojde ke zmenšení hloubky vniku a tím zmenšení aktivního průřezu vodiče protékaného proudem s vysokým kmitočtem. Tím dochází k zvětšení impedance cívky, ke snížení protékaného proudu a následně logicky ke snížení intenzity magnetického pole H . Metoda měření měřicí cívkou je spojena s rizikem chyby způsobenou lidským faktorem. Pro přesné změření žádaných hodnot indukovaného elektrického napětí do cívky je nezbytně nutné umístit měřicí cívku do měřicí desky vždy se stejným úhlem natočení do správného směru. K výchylce v řádu jednotek voltů v dutině induktoru nebo v jeho

bezprostřední blízkosti postačuje i velmi malé natočení měřicí cívky. Další chyba měření je způsobena krátkým nekrouceným kabelem měřicí cívky s křížovým vinutím. Bohužel nevhodný kabel měřicí cívky s křížovým vinutím nelze nahradit kroucenou dvojlínkou z konstrukčních důvodů, aniž by bylo nutné cívku rozebrat. I k tomuto faktu jsem přihlédl při konstrukci své měřicí cívky s malým průměrem (cívka 1), kde jsou vývody cívky umístěny vně konstrukce zařízení. Dále jsem kontrolně provedl měření vlastní indukčnosti RLC-metrem na laboratorním fyzikálním modelu indukčního zařízení malých rozměrů, kde jsem ověřil vliv stínění svazky transformátorových plechů a stínění elektricky vodivým stínícím pláštěm na vlastní indukčnost induktoru. Přídavné konstrukční prvky však neměly na vlastní indukčnost induktoru téměř žádný vliv. Poté jsem provedl toto měření s přídavnými prvky na novém modelu indukčního zařízení stejným měřicím přístrojem. Dospěl jsem opět k závěru, že ani zde nemají přídavné konstrukční prvky výraznější vliv na vlastní indukčnost induktoru.

12 Resume

To clarify the examined problem of electromagnetic induction heatings, I decided to design my own physical laboratory model of the induction device that will most closely matches the real inductive devices. The emphasis was placed on preserving the aspect ratio of the inductor (diameter to height) with regard to the new use of a high frequency power supply current of the inductor, the presence of the shielding in the form of bundles of transformer sheets and the choice of magnetic cylindrical hollow charge. I also designed a new additional structural elements suitable dimensions. Newly So I created not only a complete laboratory model of crucible induction furnace with shielding, charge and additional structural elements, but also part of the measuring device for measuring the electromagnetic field distribution around the investigated induction device in the form of new measuring coil with auxiliary elements and structure. In addition, I have developed software for processing and display of the measured values of the measuring coil called LittleCoil. This application does not need for action programs still use like Excel or Matlab and it also does not need used tools for visualization of vectors yet. This application also enables much faster processing and subsequently comparing the data obtained by measuring the physical laboratory model of the induction device.

Literatura

- [1] LANGER E., KOŽENÝ J.: *Elektrotepelná zařízení indukční*. Plzeň, VŠSE 1982.
- [2] LANGER E.: *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha, ČSAV 1979.
- [3] RADA J., a kolektiv: *Elektrotepelná technika*. Praha, SNTL, ALFA 1985.
- [4] KROUPA O.: *Návrh a konstrukce zařízení pro měření parametrů elektromagnetického pole*. Diplomová práce, 150 s., Plzeň, ZČU v Plzni 2007.
- [5] ROT D.: *Indukční ohřev pro montáž a demontáž obruče turborotoru*. Diplomová práce, Plzeň, ZČU v Plzni 2003.
- [6] DOLEŽEL I.: *Teorie elektromagnetického pole*. Učební texty, Plzeň, ZČU v Plzni 2001
- [7] *Technická výrobní dokumentace k řešenému problému*.
- [8] KROUPA, O., Indukční ohřevy v praxi. *Elektrotechnika a informatika 2008. Část 3., Elektroenergetika*, Plzeň: Západočeské univerzita, 2008. str. 51-54. ISBN: 978-80-7043-703-2.
- [9] KROUPA, O., HASSAN M. Příklad počítačové simulace indukčního ohřevu. *Elektrotechnika a informatika 2009. Část 3., Elektroenergetika*, Plzeň: Západočeské univerzita, 2009. str. 41-44. ISBN: 978-80-7043-811-4.
- [10] KROUPA, O., BUBLÍK, J., KOŽENÝ, J. Computer Simulations of Induction Heating in Practise. *In Proceedings of the 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials (EPM 2009)*, Dresden: Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, 2009. str. 157-160, ISBN: 978-3-936104-65-3.
- [11] KOŽENÝ J., RADA P., ULRYCH B.: 43. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, 1998, BAND 4, TU Ilmenau Thüringen, 737 – 742.
- [12] www.rillfem.com internetové stránky firmy RillFEM
- [13] PSUTKA P., *Určování rozptylových magnetických polí induktoru*, diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, FEL, Plzeň 2006.

- [14] KROUPA, O., Example of Induction Heating Computer Simulation. *In Electric Power Engineering and Ecology - Selected Parts I.*, BEN - technická literatura, Praha 2011, str. 37-44. ISBN: 978-80-7300-417-0.
- [15] KROUPA, O. Návrh a konstrukce zařízení pro měření parametrů elektromagnetického pole. *Elektrotechnika a informatika 2007. Část 3., Elektroenergetika*, Plzeň: Západočeské univerzita, 2007. str. 65-68.: ISBN 978-80-7043-573-1.
- [16] TŮMOVÁ O., ČTVRTNÍK V., GIRG J., ŠVARNÝ J. *Elektrická měření - měřicí metody*. ZČU v Plzni, Plzeň 2005.
- [17] ČTVRTNÍK V., GIRG J., TŮMOVÁ O., VOBORNÍK A. *Elektrická měření - cvičení*. ZČU v Plzni, Plzeň 1997.
- [18] TUMANSKI S. *Handbook of magnetic measurements*. CRC Press, 2011. ISBN: 978-1-4398-2951-6.
- [19] TAJER M., *Analýza vlivu přídavných konstrukčních prvků na činnost indukční kelímkové pece*, diplomová práce, 156 stran, Západočeská univerzita v Plzni, FEL, Plzeň 2013.
- [20] KOŠTÁL J., *Stínění vysokofrekvenčního pole u indukčních ohřevů*, diplomová práce, 121 stran, Západočeská univerzita v Plzni, FEL, Plzeň 2013.

Vlastní publikace

- [1] KROUPA, O. Návrh a konstrukce zařízení pro měření parametrů elektromagnetického pole. *Elektrotechnika a informatika 2007. Část 3., Elektroenergetika*, Plzeň: Západočeské univerzita, 2007. str. 65-68.: ISBN 978-80-7043-573-1.
- [2] KROUPA, O., Indukční ohřevy v praxi. *Elektrotechnika a informatika 2008. Část 3., Elektroenergetika*, Plzeň: Západočeské univerzita, 2008. str. 51-54. ISBN: 978-80-7043-703-2.
- [3] KROUPA, O., HASSAN M. Příklad počítačové simulace indukčního ohřevu. *Elektrotechnika a informatika 2009. Část 3., Elektroenergetika*, Plzeň: Západočeské univerzita, 2009. str. 41-44. ISBN: 978-80-7043-811-4.
- [4] KROUPA, O., BUBLÍK, J., KOŽENÝ, J. Computer Simulations of Induction Heating in Practise. *In Proceedings of the 6th International Conference on Electromagnetic Processing of Materials (EPM 2009)*, Dresden: Forschungszentrum Dresden-Rossendorf, 2009. str. 157-160, ISBN: 978-3-936104-65-3.
- [5] KROUPA, O. Počítačová simulace průmyslového indukčního ohřevu. *Elektrotechnika a informatika 2011. Část třetí. Elektroenergetika*, Plzeň: Západočeské univerzita, 2011. str. 23-26. ISBN 978-80-261-0017-1.
- [6] KROUPA, O. Example of induction heating computer simulation. *Renewable Energy Sources 2011*, Plzeň: Západočeské univerzita, 2011. str. 108-113. ISBN: 978-80-261-0010-2.
- [7] KROUPA, O., Example of Induction Heating Computer Simulation. *In Electric Power Engineering and Ecology - Selected Parts I.*, BEN - technická literatura, Praha 2011, str. 37-44. ISBN: 978-80-7300-417-0.
- [8] KROUPA, O. *Možnosti snížení energetické náročnosti ohřevů elektromagnetickou indukcí.*, Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň 2011
- [9] KROUPA, O. Computer Simulation of Induction Crucible Furnace with Supplementary Construction Element. *Renewable Energy Sources 2012*, Plzeň: Západočeské univerzita, 2012. str. 125-130. ISBN: 978-80-261-0130-7.

- [10] KROUPA, O. Induction Crucible Furnace with Supplementary Construction Element – Simulation In RillFEM 2D Software. In *Electric Power Engineering and Ecology - Selected Parts III.*, BEN - technická literatura, Praha 2012, str. 63-68. ISBN: 978-80-7300-460-6.
- [11] KROUPA, O. Konstrukce měřicí cívečky pro identifikaci elektromagnetického pole kolem indukčního zařízení. *Elektrotechnika a informatika 2012. Část třetí. Elektroenergetika*, Plzeň: Západočeské univerzita, 2012. str. 15-18. ISBN: 978-80-261-0121-5

Funkční vzorky a autorizovaný software

- [12] KROUPA, O., Speciální induktor pro měření rozložení elektromagnetického pole, Funkční vzorek, Západočeská univerzita v Plzni, CZ, 22150, JE, FEL Katedra elektroenergetiky a ekologie, <http://partnerstvi.fel.zcu.cz/vysledky>, Plzeň 2009
- [13] KROUPA, O., Speciální měřicí cívka pro identifikaci elektromagnetického pole se síťovým a vysokým kmitočtem, Funkční vzorek, FEL, Katedra elektroenergetiky a ekologie, Západočeská univerzita v Plzni, CZ, 22150, JE, <http://partnerstvi.fel.zcu.cz/vysledky>, Plzeň 2012, 22150-FV001-2012,
- [14] KROUPA, O., Měřicí cívka velkého průměru pro zjištění intenzity magnetického pole na povrchu modelu magnetické válcové vsázky, Funkční vzorek, FEL, Katedra elektroenergetiky a ekologie, Západočeská univerzita v Plzni, CZ, 22150, JE, <http://partnerstvi.fel.zcu.cz/vysledky>, Plzeň 2012, 22150 – FV001 – 2013
- [15] KROUPA, O., KRATOCHVÍL, P., LittleCoil LCKraKro-31 - aplikace pro vizualizaci rozložení elektromagnetického pole kolem indukčního zařízení, Software, FEL, Katedra elektroenergetiky a ekologie, Západočeská univerzita v Plzni, CZ, 22150, JE, <http://partnerstvi.fel.zcu.cz/vysledky>, Plzeň 2013, 22150-SW001-2013

A Další výsledky měření

A.1 Vliv stínění

V této příloze uvádím výsledky měření pro nižší proudovou úroveň, tj. 15 A nastaveno na příslušném napájecím zdroji.

A.1.1 Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při síťovém kmitočtu (50Hz) napájecího proudu induktoru

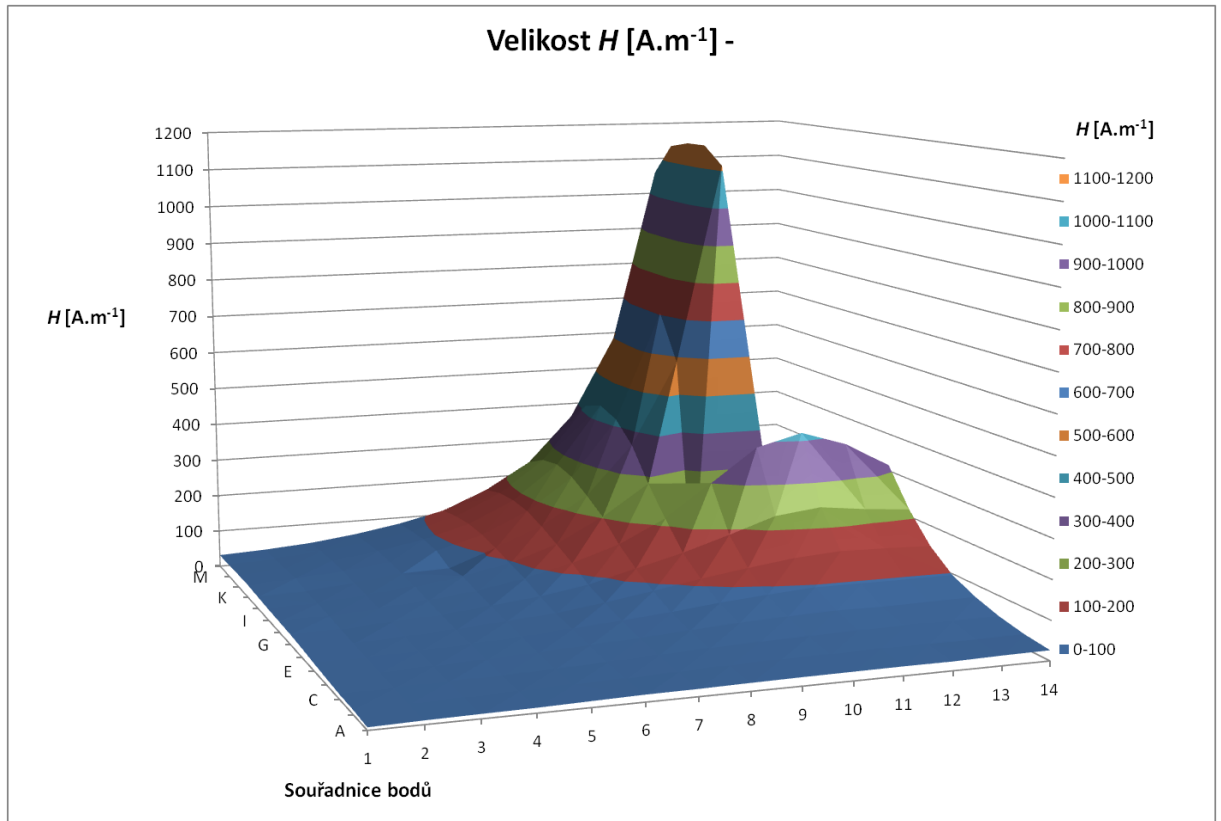
Napájecí proud induktoru byl proměnným odporem nastaven na 17 A (skutečný proud změřený ampérmetrem byl 17 A).

A.1.1.1 Induktor bez stínění - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

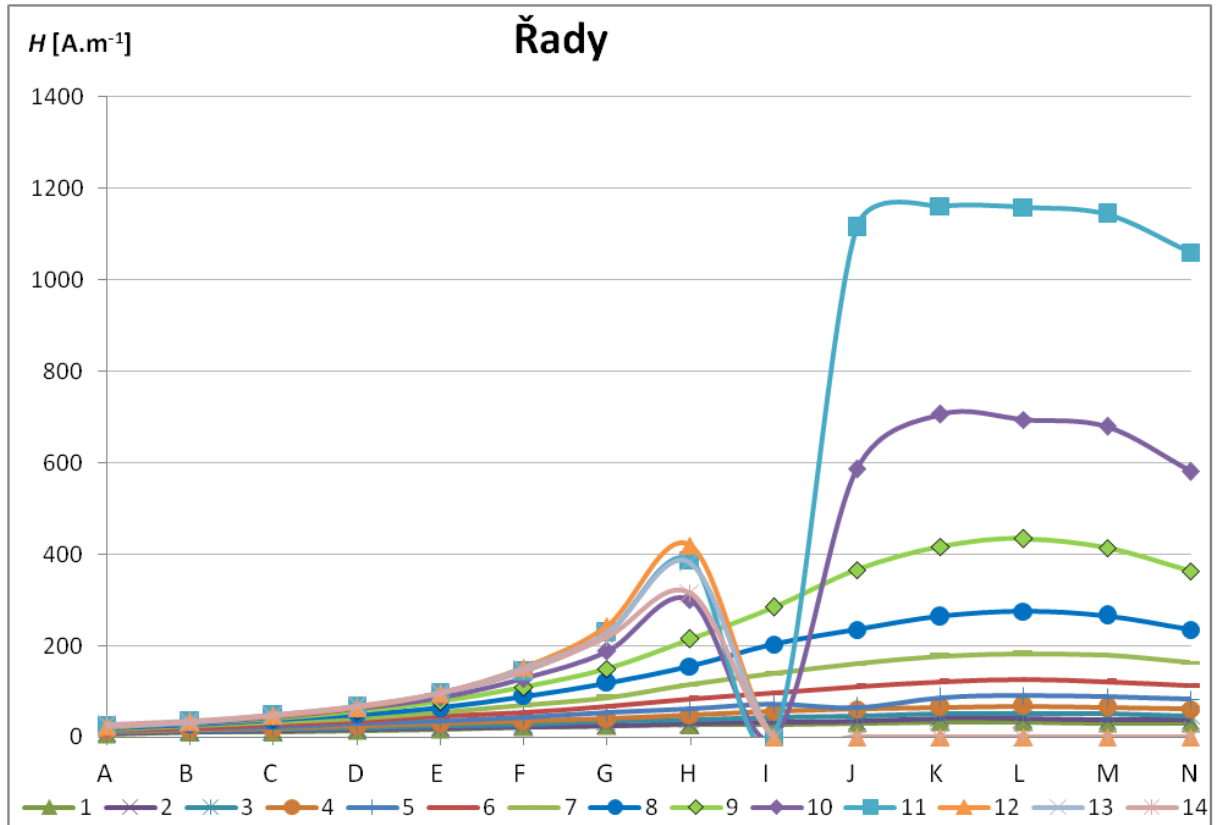
Tabulka A.1: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 50 Hz, 17 A

		Intenzita magnetického pole H [A/m]													
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	6,8	10,7	11,4	14,7	18,2	22,6	25,5	27,1	28,4	30,6	33,2	32,9	31,2	31,2	
2	9,5	11,6	14,2	16,7	20,1	22,8	25,6	30,2	33,4	35,0	41,9	40,4	37,9	37,2	
3	11,0	13,1	17,1	20,3	24,1	28,1	34,7	39,4	43,2	46,7	51,0	52,2	50,9	46,4	
4	12,3	15,7	18,7	24,4	29,6	34,8	40,5	48,4	56,3	62,0	65,9	68,8	66,0	62,0	
5	15,0	19,2	22,9	29,2	36,0	44,3	53,7	61,9	72,8	65,7	87,1	91,3	88,5	83,1	
6	17,4	20,7	26,9	36,0	45,3	53,6	66,9	84,4	96,6	111,1	121,6	125,4	121,4	111,8	
7	18,2	24,3	32,4	41,6	54,7	70,0	86,9	115,4	138,3	160,6	177,5	182,9	178,7	163,4	
8	20,1	27,8	37,3	49,9	64,7	89,0	118,6	155,0	202,7	235,4	263,8	275,6	265,4	235,7	
9	21,4	30,6	41,0	57,1	77,8	110,1	150,3	215,0	284,0	366,0	416,1	434,5	413,7	362,8	
10	22,2	31,2	43,8	62,1	87,4	127,9	188,0	300,7	0,0	586,6	705,6	694,7	679,3	581,3	
11	22,9	33,1	46,4	65,8	95,8	143,8	228,5	387,6	0,0	1113,9	1160,7	1158,8	1143,3	1060,2	
12	22,8	33,1	47,5	64,6	95,7	152,0	242,7	419,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	25,2	32,6	48,5	66,4	95,7	149,8	228,6	381,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	26,4	34,4	48,0	68,1	96,5	145,6	218,4	314,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Pozn. Tabulka A.1 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf A.1 a Graf A.2) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf A.1: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 50 Hz, 17 A



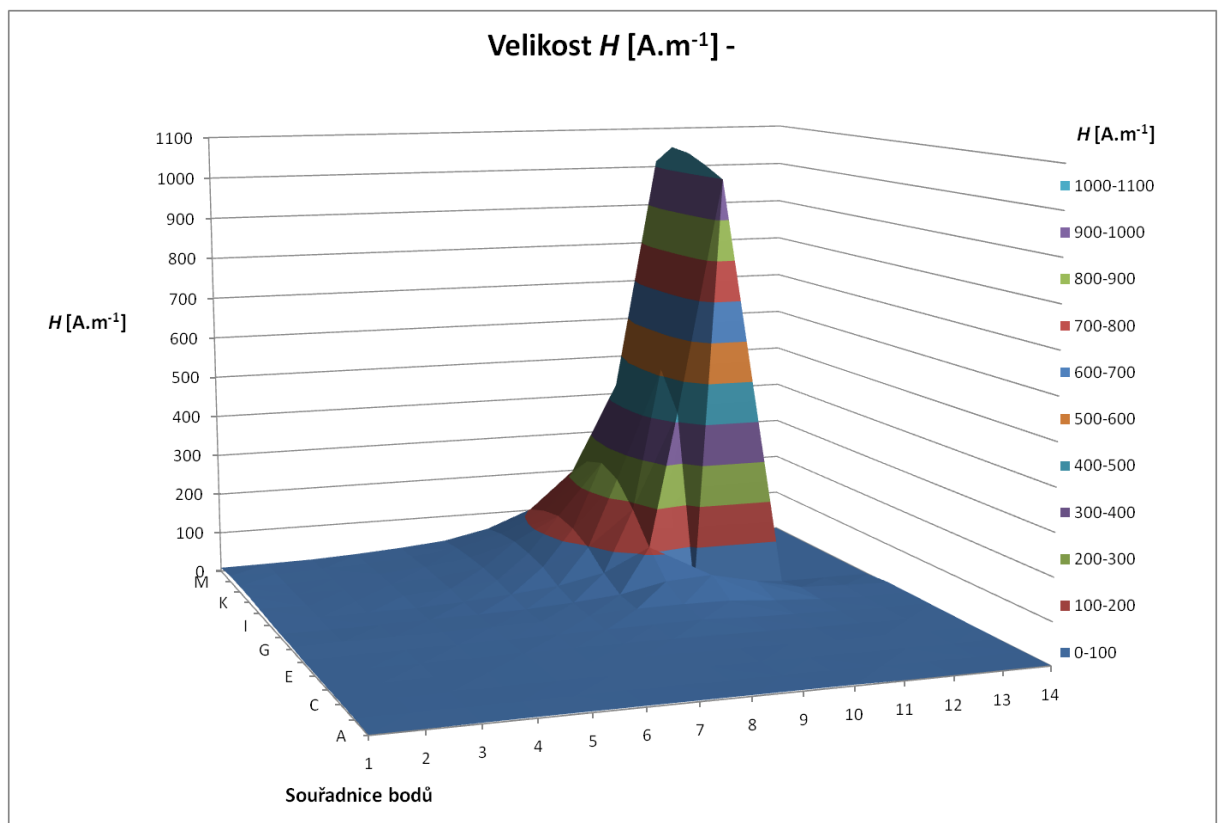
Graf A.2: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 50 Hz, 17 A – řady

A.1.1.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

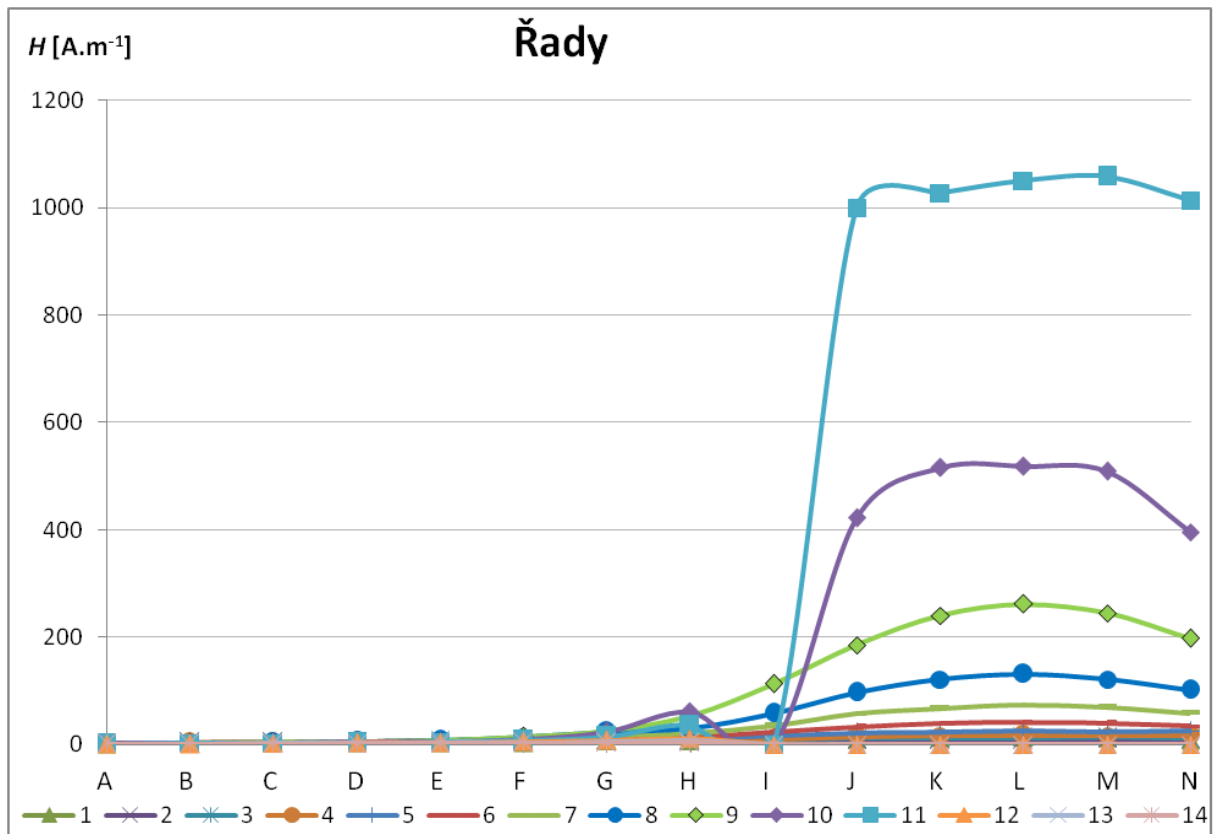
Tabulka A.2: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 50 Hz, 17 A

		Intenzita magnetického pole H [A/m]													
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	1,3	2,7	3,4	3,4	4,0	4,0	6,7	6,8	8,7	11,0	13,5	14,0	13,1	8,7	
2	1,3	3,4	4,0	4,0	4,7	5,4	8,0	6,1	8,0	8,7	8,7	8,7	10,1	10,1	
3	2,1	3,4	4,0	4,0	5,4	6,7	8,7	8,0	9,4	11,4	12,1	12,7	13,4	12,0	
4	2,7	4,0	4,0	5,4	6,1	8,0	10,1	10,1	10,2	14,8	16,6	17,6	16,6	17,4	
5	2,7	4,0	4,7	6,1	7,4	8,7	12,1	12,1	15,8	22,2	23,3	25,8	24,7	24,8	
6	2,7	3,4	4,7	6,1	7,4	10,2	14,2	14,7	24,4	33,9	39,4	40,9	40,3	34,9	
7	2,7	3,4	4,7	6,1	8,1	11,9	17,6	21,6	35,6	57,5	67,9	73,1	69,4	58,4	
8	2,7	2,7	4,0	5,5	8,1	13,5	23,7	31,3	58,7	97,7	121,8	131,3	121,6	102,4	
9	2,7	3,4	4,0	4,7	7,4	15,3	25,1	54,2	113,5	185,4	240,4	261,9	244,6	197,8	
10	2,7	2,7	3,4	4,7	6,1	10,8	23,9	60,8	0,0	422,7	515,9	518,9	509,6	396,2	
11	1,3	2,7	2,7	4,0	4,7	8,7	15,0	36,0	0,0	999,4	1027,2	1050,0	1058,2	1013,7	
12	1,3	1,3	2,7	4,0	4,0	6,1	8,1	11,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	1,3	1,3	2,1	2,7	4,0	4,0	4,7	7,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	1,3	1,3	1,3	2,1	2,7	3,4	4,0	4,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Pozn. Tabulka A.2 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf A.3 a Graf A.4) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf A.3: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 50 Hz, 17 A



Graf A.4: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 50 Hz, 17 A – řady

A.1.1.3 Shrnutí

Na Graf A.1 až Graf A.4 názorně demonstrují vliv stínění na rozložení intenzity magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení, především potom vně induktoru, resp. v oblasti za stíněním. Polohu stínění geometricky definují úrovní sloupce H. Potom je z grafů zřejmé, že nalevo od svazků transformátorových plechů je rozptylový magnetický tok efektivně odstíněn.

Maximální hodnota intenzity magnetického pole H :

induktor $H_{\max} = 1160,7$ A/m, BOD K11,

induktor se stíněním $H_{\max} = 1058,2$ A/m, BOD M11.

Obě tyto hodnoty byly naměřeny v dutině induktoru.

Vně induktoru v bodě **D11** byly naměřeny následující **hodnoty** intenzity magnetického pole H :

induktor $H = 65,8$ A/m

induktor se stíněním $H = 4,0$ A/m

A.1.2 Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při síťovém kmitočtu napájecího proudu induktoru 4 100 Hz

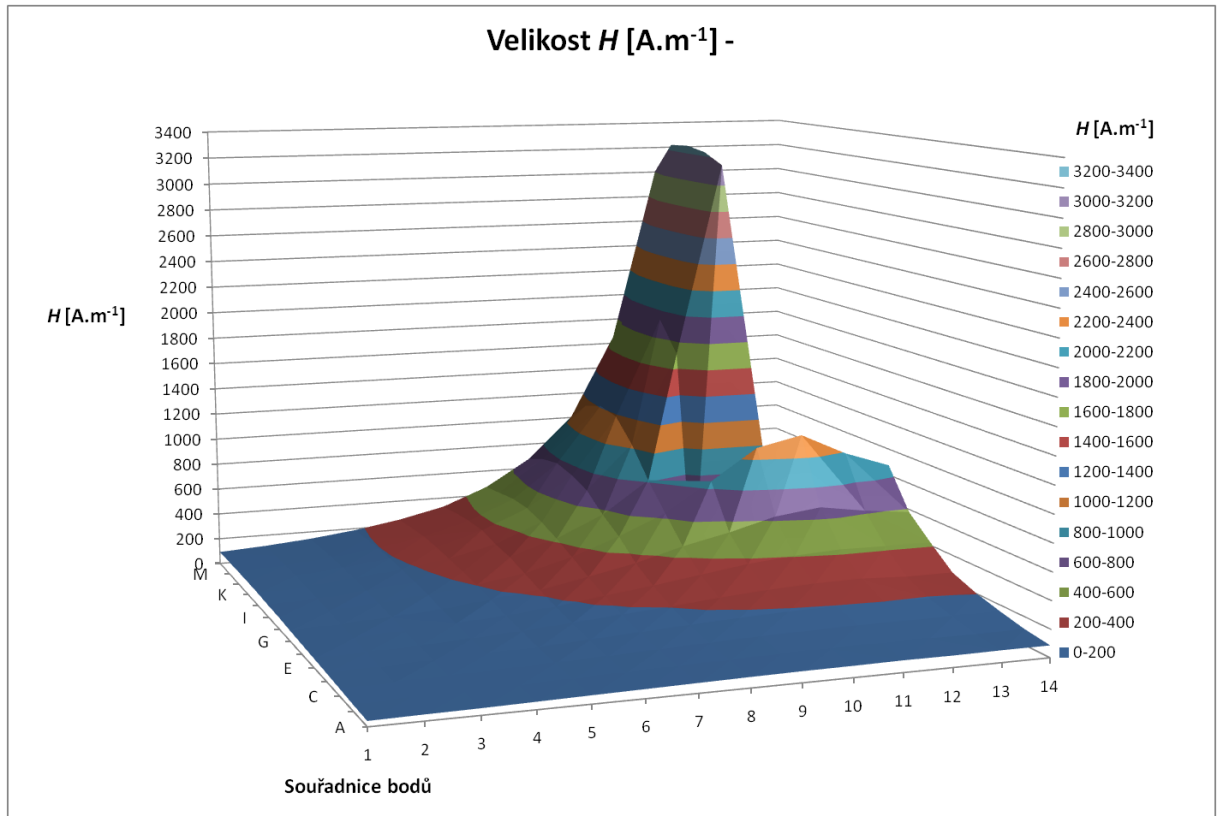
Skutečný proud měřený osciloskopem byl pro induktor 24 A a pro induktor se stíněním 23 A.

A.1.2.1 Induktor bez stínění - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

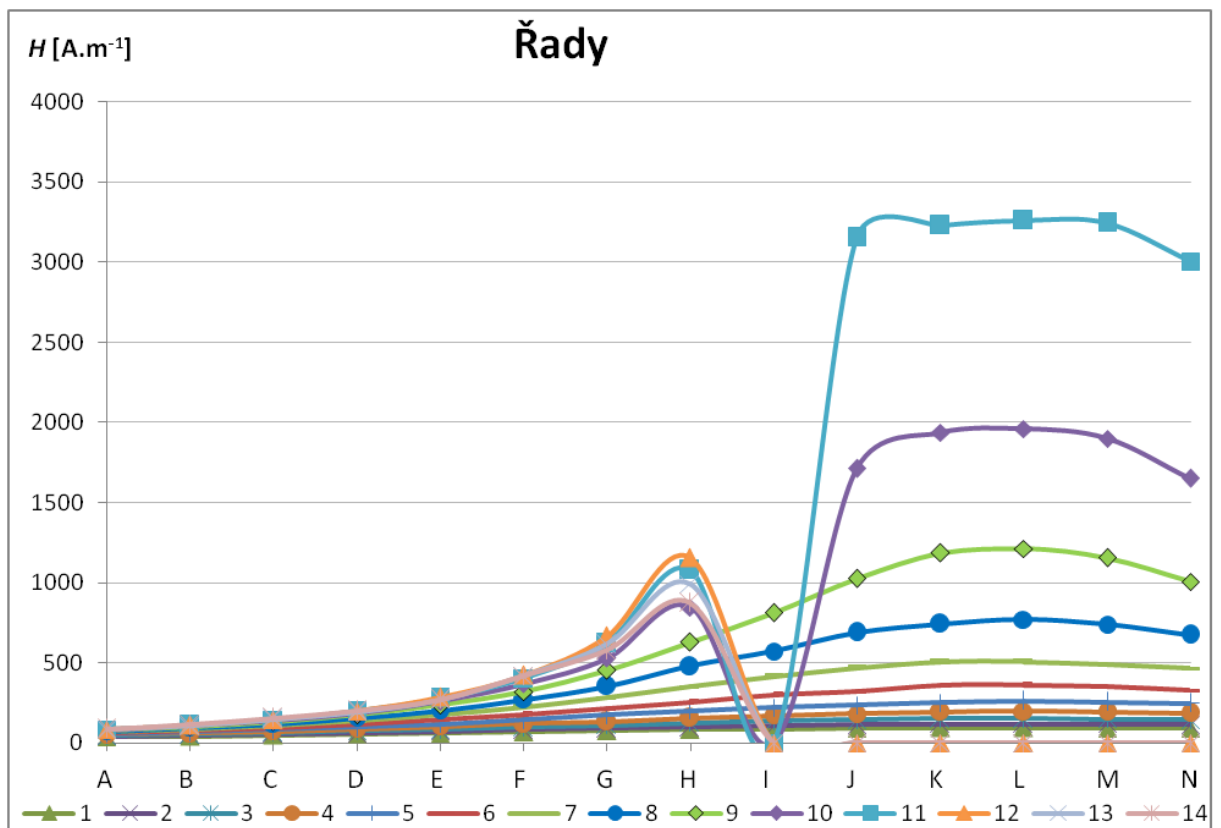
Tabulka A.3: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 4100 Hz, 24 A

Intenzita magnetického pole H [A/m]														
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	37,5	41,9	50,3	57,0	63,5	69,4	75,8	84,0	86,8	93,0	94,6	94,8	93,6	91,9
2	42,6	49,6	57,6	62,9	72,8	83,8	90,3	100,9	107,5	113,4	118,4	120,1	118,0	114,1
3	46,1	54,9	64,2	75,3	83,9	98,1	112,3	125,4	139,4	144,9	151,6	152,7	148,4	144,6
4	52,2	62,6	73,3	88,3	101,9	121,5	134,4	158,6	173,3	185,2	195,7	198,2	194,9	187,9
5	58,2	70,0	83,9	98,9	120,4	144,7	176,1	201,7	222,7	238,3	253,6	262,4	256,9	247,4
6	63,8	78,5	95,3	118,9	148,7	178,9	214,8	256,4	300,8	322,2	359,0	361,8	350,4	327,9
7	69,4	87,3	108,7	138,0	176,3	226,7	283,8	351,3	415,6	468,3	505,8	509,4	487,8	466,0
8	74,7	94,4	120,4	157,3	203,2	270,9	356,3	479,4	572,7	689,0	742,5	772,3	740,1	676,9
9	78,9	102,9	133,0	175,4	236,0	321,3	454,7	629,3	813,1	1025,4	1185,2	1211,9	1155,8	1006,5
10	80,8	108,3	139,6	188,9	261,7	371,6	531,1	848,2	0,0	1712,6	1936,4	1959,5	1900,8	1653,0
11	84,4	109,9	146,0	197,3	279,0	405,6	624,4	1079,0	0,0	3154,3	3231,0	3258,7	3243,2	3005,4
12	83,3	110,7	146,6	200,3	285,2	424,1	668,8	1154,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	86,3	107,4	149,1	194,5	270,2	420,5	616,5	991,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	86,7	113,2	155,1	204,2	271,9	420,7	579,2	874,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Pozn. Tabulka A.3 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf A.5 a Graf A.6) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf A.5: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 4 100 Hz, 24 A



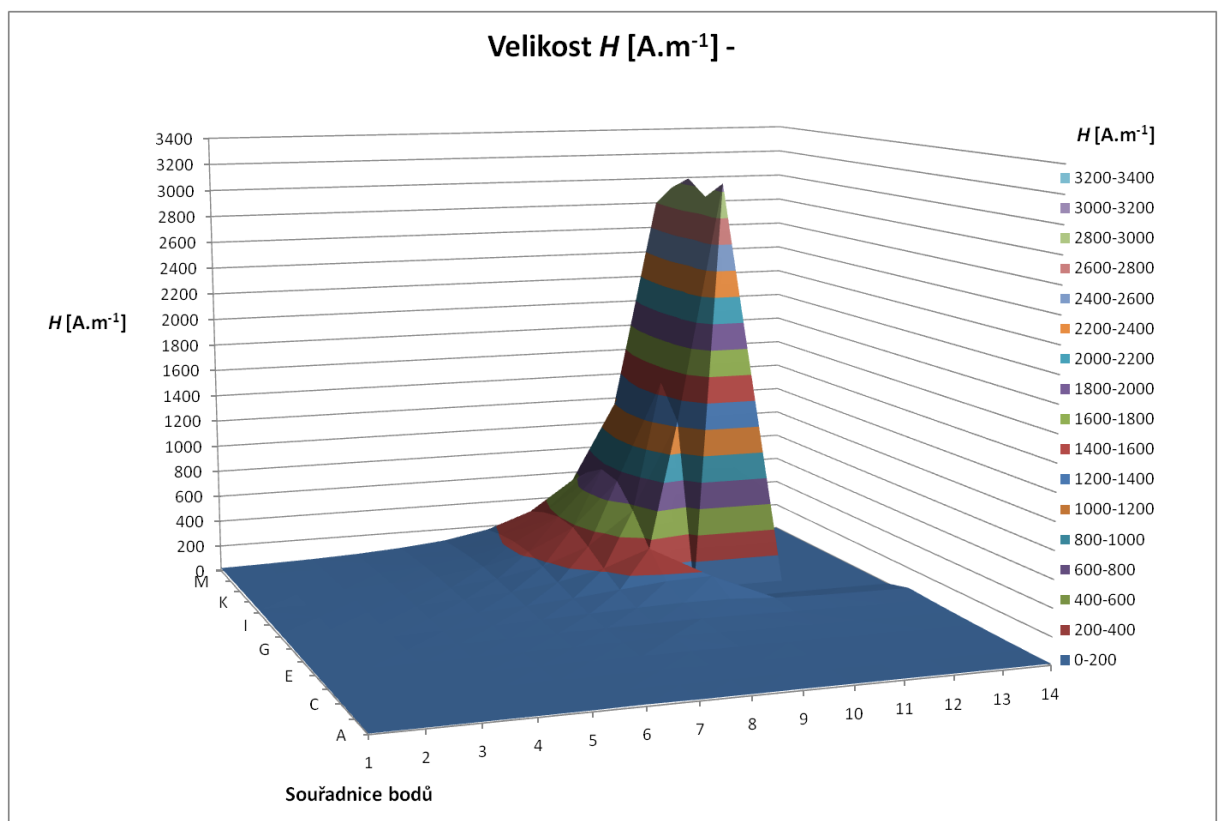
Graf A.6: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 4 100 Hz, 24 A – řady

A.1.2.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

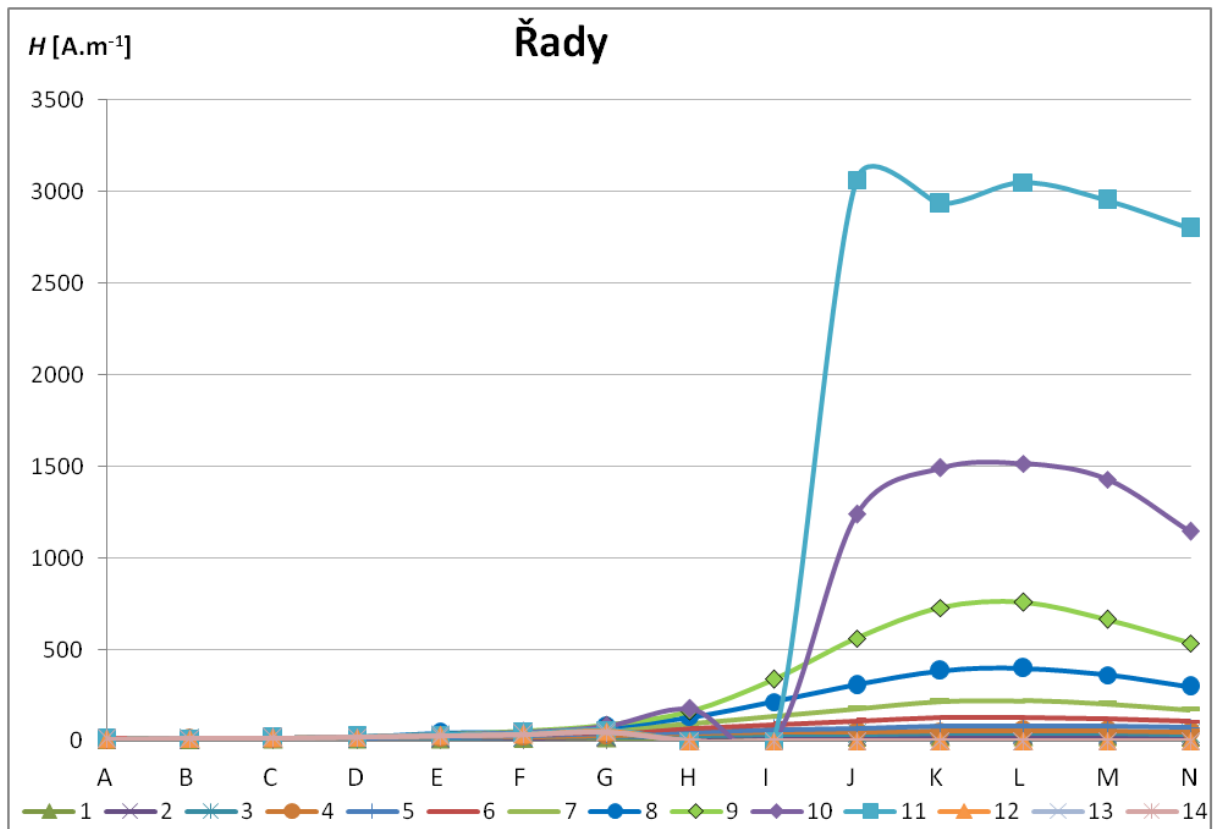
Tabulka A.4: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 4,1kHz, 23A

		Intenzita magnetického pole H [A/m]													
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	6,7	7,6	9,0	10,5	12,1	14,0	16,7	18,7	19,9	21,9	22,7	23,0	22,6	21,5	
2	7,2	8,5	10,1	12,0	14,2	17,1	19,9	23,5	26,3	27,3	29,4	30,1	29,7	28,2	
3	7,9	9,6	11,5	14,1	16,9	21,6	24,5	29,4	34,4	37,3	40,2	40,7	39,8	37,4	
4	8,7	10,6	13,2	16,3	20,1	25,3	31,6	39,0	45,6	50,3	55,1	56,6	55,7	51,5	
5	9,4	11,7	14,4	18,4	23,3	30,4	40,3	49,8	62,2	71,9	80,3	82,8	80,1	73,7	
6	12,9	12,6	16,0	20,8	27,5	36,8	48,7	66,6	89,4	109,4	128,3	128,2	120,4	107,7	
7	10,5	13,1	17,4	22,8	31,2	43,7	63,7	95,0	135,5	178,3	217,1	220,5	203,9	172,1	
8	10,6	13,8	17,7	24,5	44,4	48,5	77,3	131,0	213,0	306,2	385,5	397,4	361,4	297,0	
9	11,3	14,7	18,7	24,9	35,5	52,6	85,7	164,7	338,5	562,5	728,9	757,8	665,9	535,5	
10	11,0	13,8	18,2	24,5	33,5	49,1	83,6	177,0	0,0	1238,7	1491,3	1514,6	1427,7	1145,1	
11	11,2	14,2	18,0	23,8	33,1	43,6	62,0	0,0	0,0	3063,1	2934,1	3050,8	2952,8	2798,5	
12	10,7	13,4	17,6	22,1	30,4	38,6	53,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	10,9	13,6	17,2	22,1	29,2	37,5	49,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	11,2	13,8	17,2	22,0	28,4	36,6	47,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Pozn. Tabulka A.4 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf A.7 a Graf A.8) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf A.7: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 4,1 kHz, 23 A



Graf A.8: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 4,1 kHz, 23 A – řady

A.1.2.3 Shrnutí

Na Graf A.5 až Graf A.8 názorně demonstrují vliv stínění na rozložení intenzity magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení, především potom vně induktoru, resp. v oblasti za stíněním. Polohu stínění geometricky definují úrovně sloupce H. Potom je z grafů zřejmé, že nalevo od svazků transformátorových plechů je rozptylový magnetický tok efektivně odstíněn.

Maximální hodnota intenzity magnetického pole H :

induktor $H_{\max} = 3258,7$ A/m, BOD L11,

induktor se stíněním $H_{\max} = 3063,1$ A/m, BOD J11.

Obě tyto hodnoty byly naměřeny v dutině induktoru.

Vně induktoru v bodě D11 byly naměřeny následující **hodnoty** intenzity magnetického pole H :

induktor $H = 197,3$ A/m,

induktor se stíněním $H = 23,8$ A/m.

A.1.3 Výsledky měření pro ověření vlivu stínění na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení při síťovém kmitočtu napájecího proudu induktoru 10 000 Hz

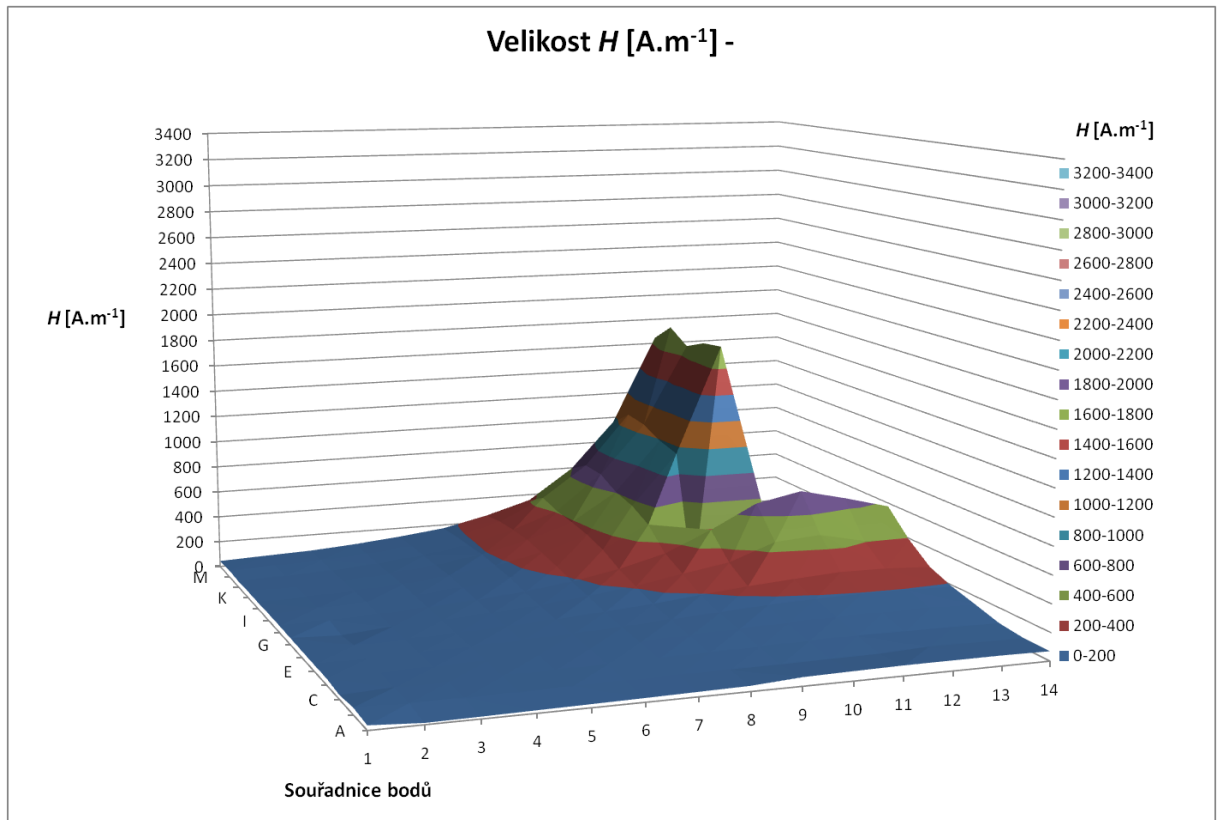
Skutečný proud měřený osciloskopem byl pro induktor 24 A a pro induktor se stíněním 23 A.

A.1.3.1 Induktor bez stínění - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

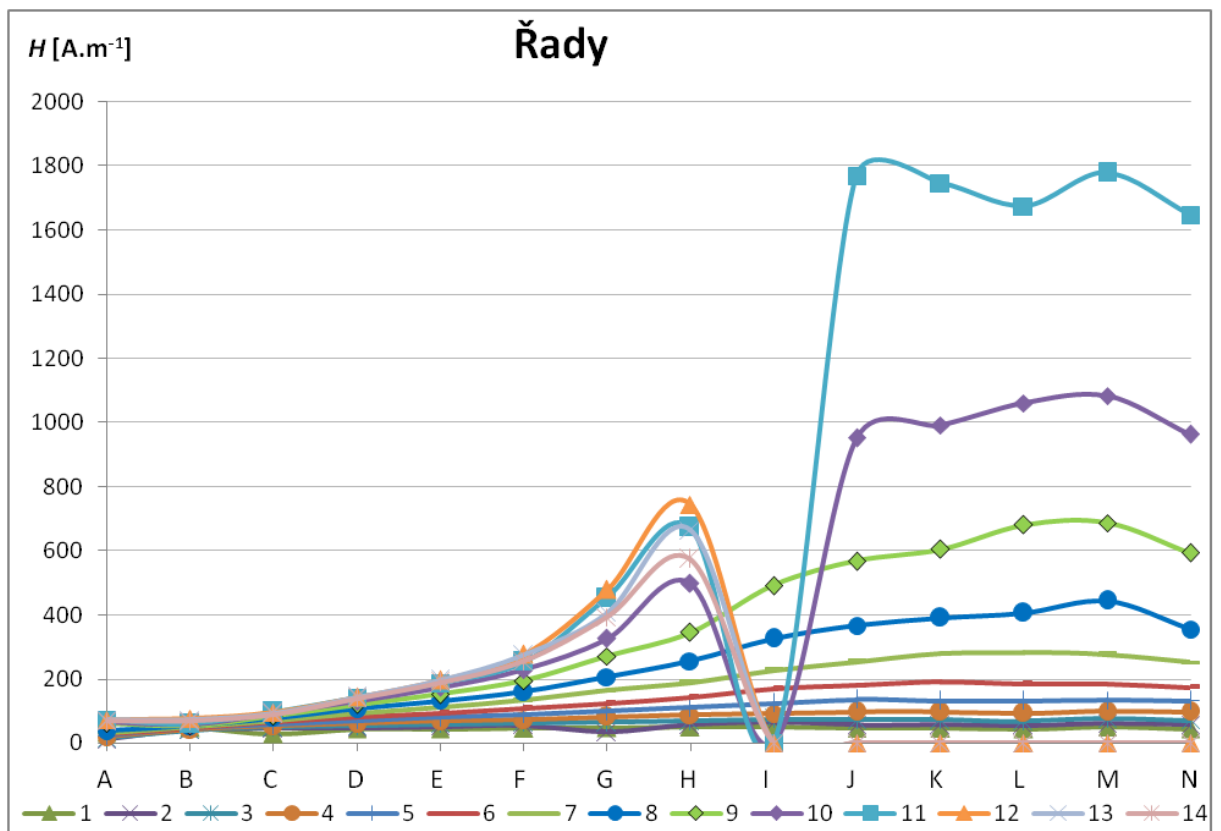
Tabulka A.5: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 10 000 Hz, 24 A

Intenzita magnetického pole H [A/m]														
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	32,7	47,2	28,8	44,9	44,7	46,2	47,9	49,8	49,7	46,3	46,9	43,4	49,9	43,8
2	11,2	41,6	46,7	48,3	52,1	55,5	34,3	57,3	64,9	57,5	57,8	55,2	61,8	58,2
3	14,8	40,9	49,7	54,1	58,8	62,8	65,9	68,6	74,2	72,7	72,4	68,2	76,3	71,4
4	19,5	42,8	53,9	61,0	68,6	73,6	81,7	87,9	91,5	97,6	97,9	94,2	98,5	97,1
5	23,6	47,6	58,1	71,3	79,7	90,8	99,9	111,2	124,3	135,6	131,2	132,6	134,1	131,1
6	28,1	45,4	64,2	82,0	94,1	109,2	124,8	143,3	170,0	178,8	190,3	185,6	182,9	172,8
7	33,4	49,6	70,8	93,3	110,5	133,0	164,3	189,0	226,6	253,3	278,9	282,1	276,8	252,7
8	38,6	52,9	77,6	106,8	132,7	159,7	206,6	255,5	325,8	366,2	390,1	406,1	443,9	355,0
9	61,6	53,7	83,8	120,1	152,1	195,7	270,5	345,1	491,4	567,7	605,0	680,4	687,4	594,0
10	67,7	57,9	92,0	130,4	173,8	229,2	327,0	498,1	0,0	951,6	991,6	1060,8	1082,4	962,9
11	72,7	60,6	97,2	141,4	187,3	254,0	453,0	673,6	0,0	1768,8	1746,2	1674,7	1779,1	1646,9
12	73,3	76,9	95,3	143,4	195,8	276,0	478,2	743,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	73,6	72,9	93,2	143,9	196,4	273,9	405,4	664,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	69,4	69,0	89,5	140,3	188,3	256,1	393,4	574,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Pozn. Tabulka A.5 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf A.9 a Graf A.10) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf A.9: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 10 000 Hz, 24 A



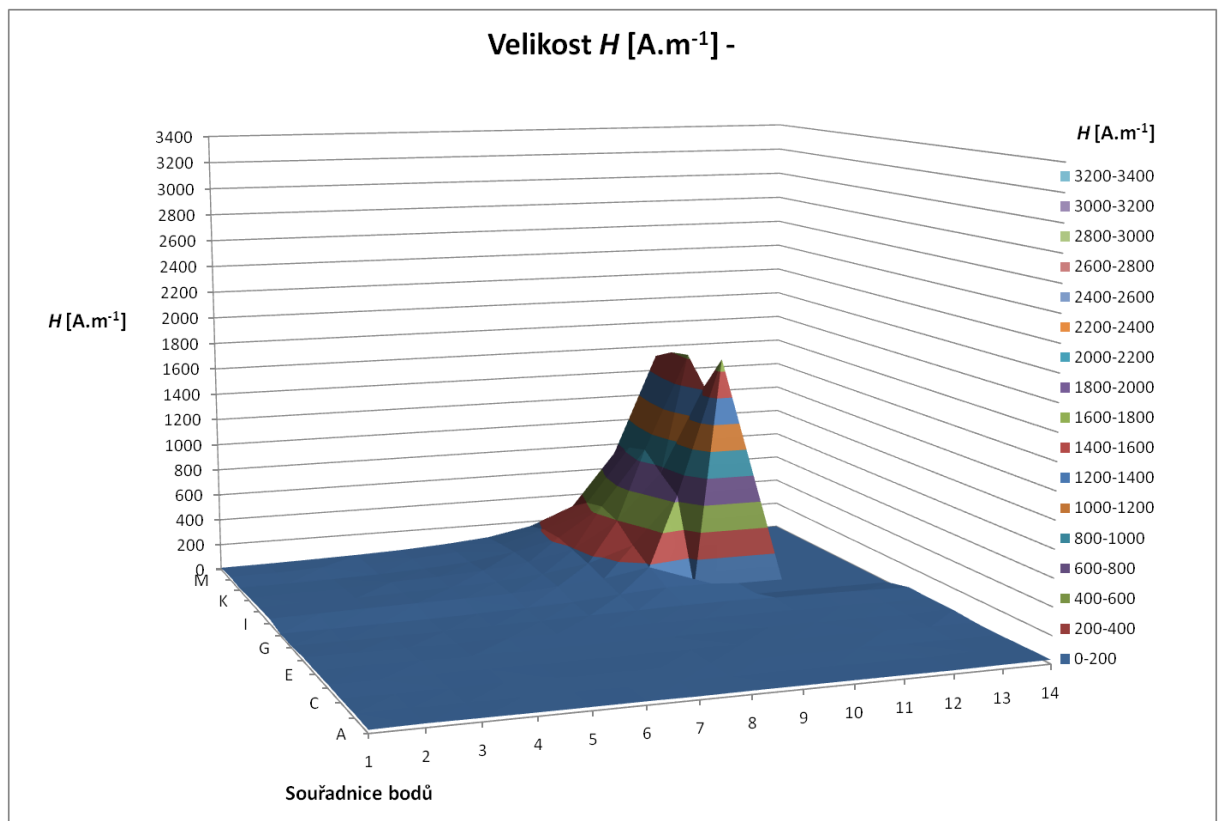
Graf A.10: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor 10 000 Hz, 24 A - řady

A.1.3.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů - hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U

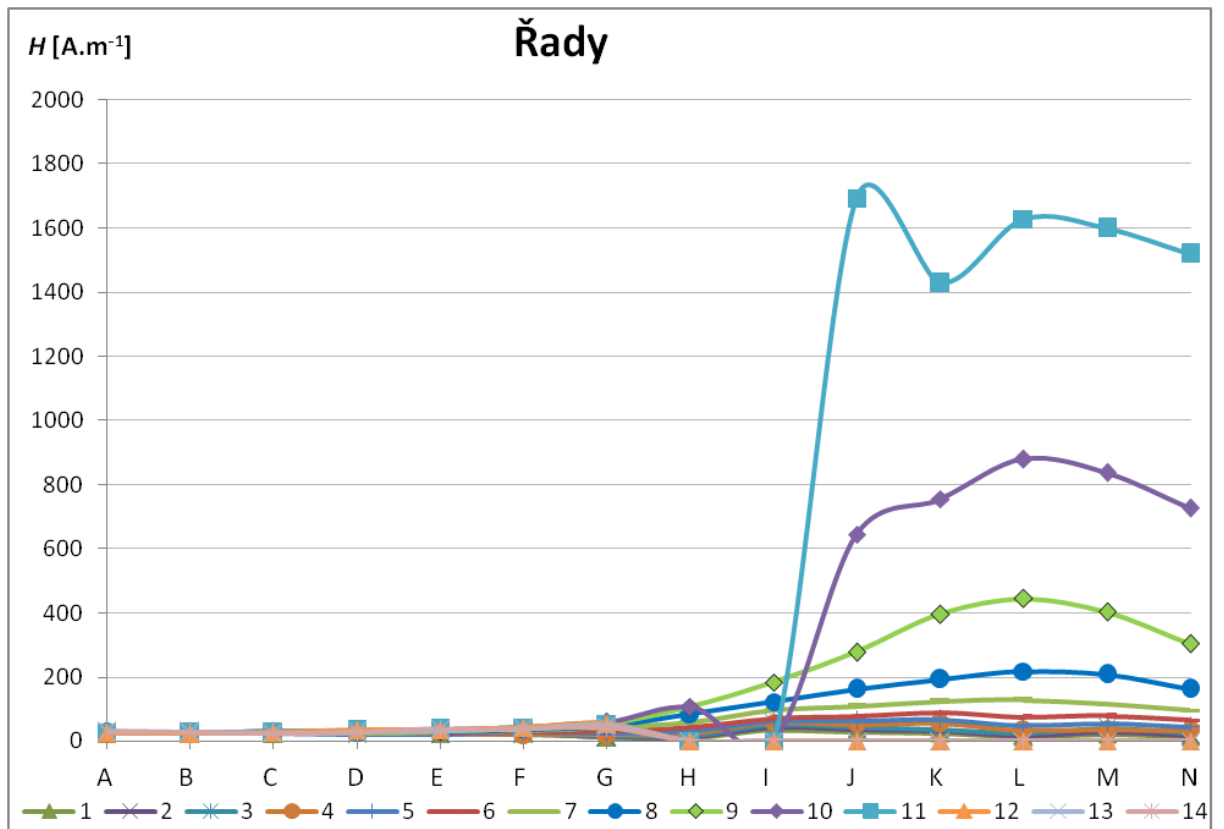
Tabulka A.6: Hodnoty intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 10 kHz, 23 A

		Intenzita magnetického pole H [A/m]													
Řada/ Sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	
1	23,2	27,4	23,9	26,6	22,8	24,3	11,9	10,5	34,4	28,4	25,3	13,8	21,8	13,1	
2	27,8	24,7	22,5	25,8	24,0	24,2	12,3	13,3	42,9	37,3	30,1	18,3	26,6	17,3	
3	26,0	23,4	22,4	22,7	24,5	22,0	14,8	17,8	50,9	42,8	35,7	24,7	41,0	24,1	
4	25,0	24,5	25,4	25,1	25,8	19,4	19,8	22,7	57,5	50,9	54,9	33,4	33,8	32,5	
5	25,0	23,8	25,4	21,7	22,2	28,1	26,4	32,0	62,2	63,6	67,0	48,9	53,7	44,7	
6	25,8	24,9	25,4	23,0	24,2	29,6	32,0	43,0	70,9	76,3	87,5	73,8	78,3	65,1	
7	23,6	25,3	27,9	25,8	26,8	33,1	41,5	56,6	94,7	108,1	123,3	128,0	115,3	95,0	
8	25,8	24,8	27,8	27,2	29,1	35,6	47,7	84,8	123,0	162,0	192,8	217,0	207,4	162,0	
9	26,0	24,4	29,1	32,2	31,1	40,0	55,5	107,4	183,3	277,8	396,1	443,6	402,2	303,7	
10	26,4	24,7	30,0	33,2	34,9	41,8	58,7	107,4	0,0	644,4	754,9	880,2	836,6	726,0	
11	26,4	24,5	31,6	32,4	37,0	41,9	53,5	0,0	0,0	1693,4	1428,5	1628,7	1600,0	1520,3	
12	25,8	23,8	26,8	33,8	35,3	42,0	53,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
13	29,3	27,4	23,6	29,7	31,9	39,9	49,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
14	31,2	28,4	24,8	26,4	38,5	38,0	42,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Pozn. Tabulka A.6 představuje hodnoty intenzity magnetického pole H vypočítané z naměřených hodnot indukovaného napětí U pomocí vzorců (6.1) uvedených výše. V následujících obrázcích (Graf A.11 a Graf A.12) tyto hodnoty názorně zobrazím pomocí grafů a získám tím představu o rozložení magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení.



Graf A.11: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 10 kHz, 23 A



Graf A.12: Velikost intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním 10 kHz, 23 A – řady

A.1.3.3 Shrnutí

Na Graf A.9 až Graf A.12 názorně demonstrují vliv stínění na rozložení intenzity magnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení, především potom vně induktoru, resp. v oblasti za stíněním. Polohu stínění geometricky definují úrovně sloupce H. Potom je z grafů zřejmé, že nalevo od svazků transformátorových plechů je rozptylový magnetický tok efektivně odstíněn.

Maximální hodnota intenzity magnetického pole H :

induktor $H_{\max} = 1779,1$ A/m, BOD M11,

induktor se stíněním $H_{\max} = 1693,4$ A/m, BOD J11.

Obě tyto hodnoty byly naměřeny v dutině induktoru.

Vně induktoru v bodě D11 byly naměřeny následující **hodnoty** intenzity magnetického pole H :

induktor $H = 141,4$ A/m,

induktor se stíněním $H = 32,4$ A/m.

A.1.4 Porovnávací tabulky zhodnocení vlivu stínění transformátorovými plechy

V této kapitole provedu analogicky jako v Kapitola 8.1.4 vyhodnocení vlivu stínění nejprve pomocí tabulek (Tabulka A.7, Tabulka A.8 a Tabulka A.9) s vypočítanou pomocnou veličinou Zmenšení intenzity magnetického pole d [%].

Tabulka A.7: Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] při kmitočtu 50 Hz a 15 A na zdroji

Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem d [%]														
Řada/ sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	80,4	75,0	70,1	76,8	77,9	82,2	73,7	74,8	69,2	63,9	59,2	57,6	57,9	72,0
2	85,9	70,5	71,7	76,0	76,4	76,5	68,6	79,9	76,0	75,1	79,2	78,4	73,4	72,9
3	80,8	74,0	76,5	80,2	77,8	76,2	74,8	79,6	78,3	75,6	76,2	75,6	73,6	74,0
4	78,2	74,4	78,5	78,1	79,5	76,9	75,2	79,2	81,8	76,2	74,9	74,4	74,9	71,9
5	82,1	79,0	79,3	79,3	79,5	80,3	77,4	80,4	78,4	66,3	73,3	71,7	72,1	70,1
6	84,7	83,5	82,4	83,2	83,7	80,9	78,8	82,6	74,7	69,5	67,6	67,4	66,8	68,8
7	85,3	86,0	85,4	85,4	85,1	83,1	79,7	81,3	74,2	64,2	61,7	60,0	61,1	64,3
8	86,7	90,4	89,2	89,0	87,4	84,8	80,0	79,8	71,1	58,5	53,8	52,4	54,2	56,6
9	87,5	88,9	90,2	91,7	90,5	86,1	83,3	74,8	60,0	49,3	42,2	39,7	40,9	45,5
10	87,9	91,4	92,2	92,4	93,1	91,6	87,3	79,8	0,0	27,9	26,9	25,3	25,0	31,9
11	94,2	91,9	94,2	93,9	95,1	93,9	93,5	90,7	0,0	10,3	11,5	9,4	7,4	4,4
12	94,1	96,0	94,4	93,8	95,8	96,0	96,6	97,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	94,7	95,9	95,6	96,0	95,8	97,3	97,9	98,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	94,9	96,1	97,2	96,9	97,2	97,7	98,2	98,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

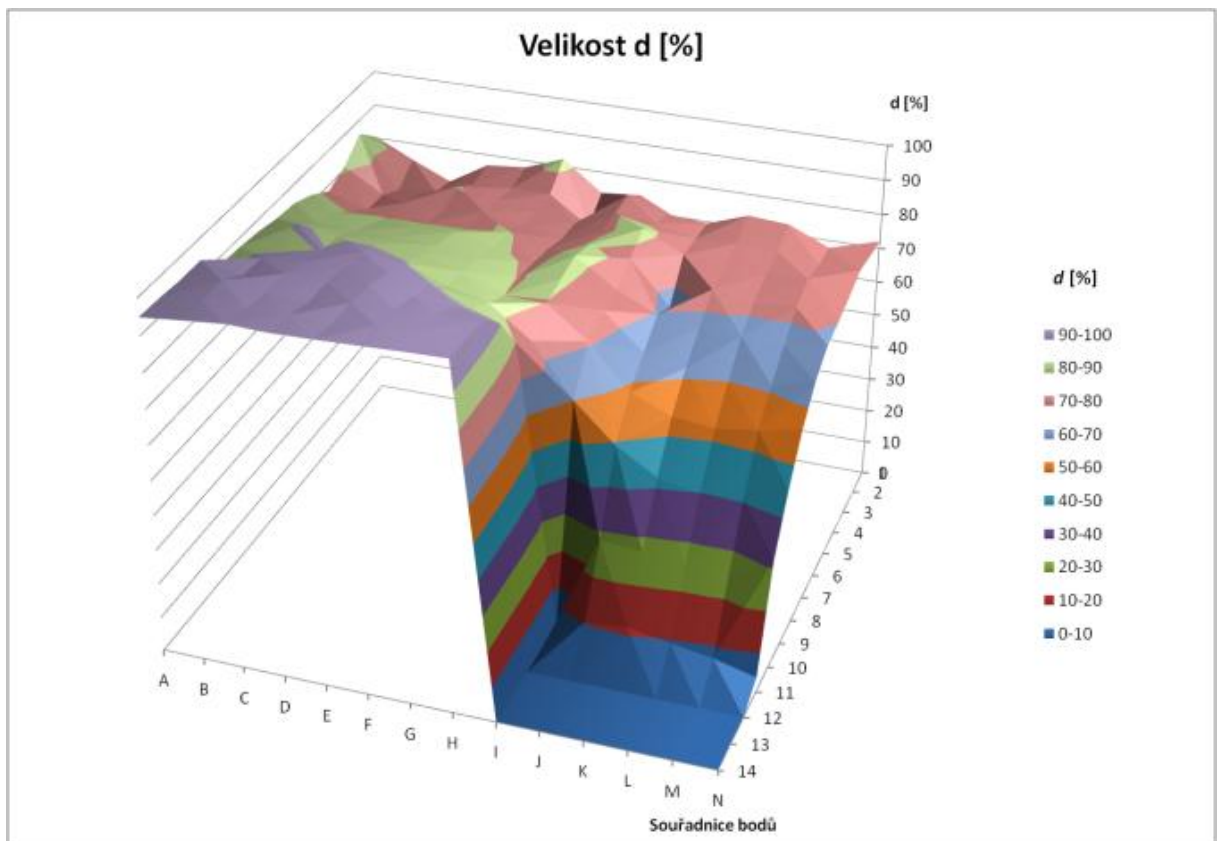
Tabulka A.8: Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] při kmitočtu 4 100 Hz a 15 A na zdroji

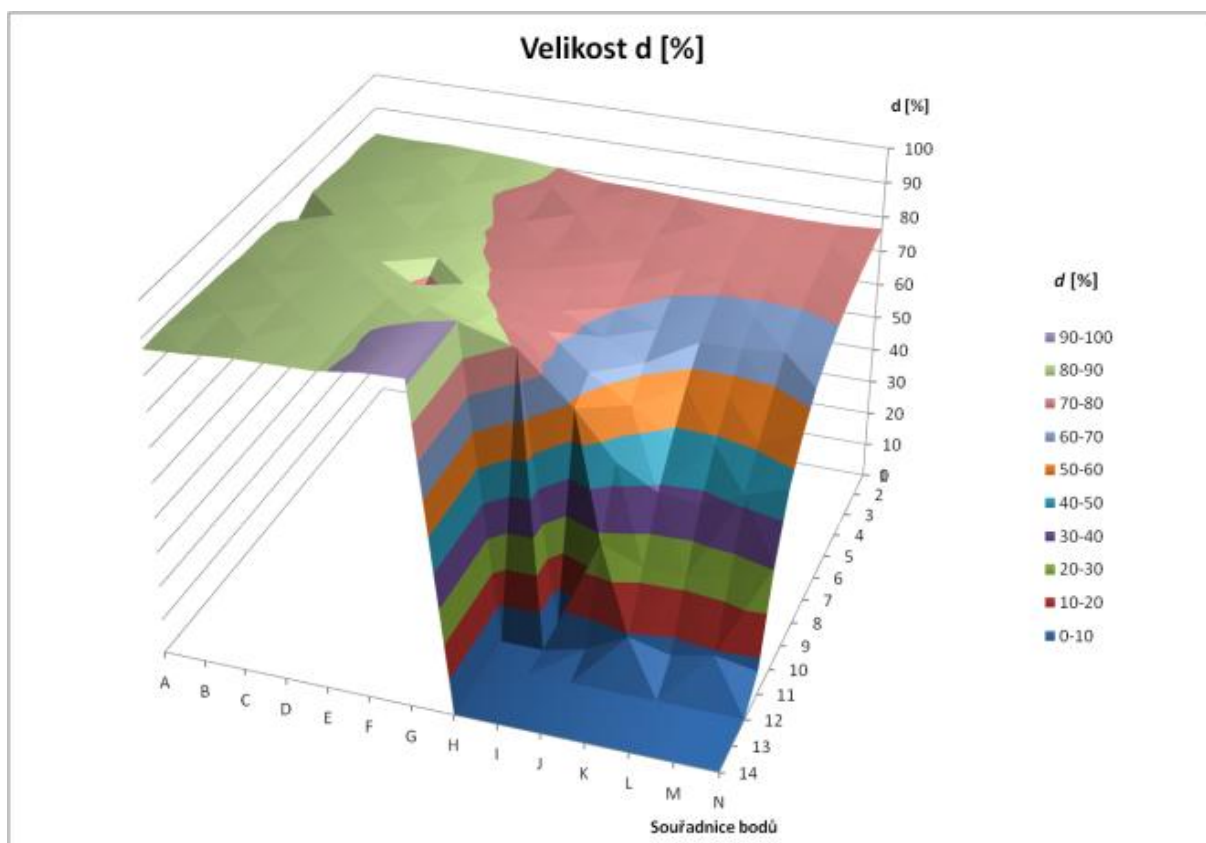
Zmenšení intenzity magnetického pole H přidavným konstrukčním prvkem d [%]														
Řada/ sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	82,2	81,8	82,1	81,5	81,0	79,8	77,9	77,7	77,1	76,4	76,0	75,7	75,8	76,6
2	83,2	82,9	82,5	80,9	80,5	79,6	78,0	76,8	75,5	76,0	75,2	74,9	74,8	75,3
3	82,8	82,6	82,1	81,3	79,8	78,0	78,2	76,5	75,3	74,3	73,5	73,4	73,2	74,2
4	83,4	83,1	82,0	81,6	80,3	79,2	76,5	75,4	73,7	72,8	71,9	71,4	71,4	72,6
5	83,8	83,3	82,9	81,4	80,6	79,0	77,1	75,3	72,0	69,9	68,4	68,5	68,8	70,2
6	79,7	83,9	83,2	82,5	81,5	79,4	77,3	74,0	70,3	66,0	64,3	64,6	65,6	67,1
7	84,9	85,0	84,0	83,5	82,3	80,7	77,6	73,0	67,4	61,9	57,1	56,7	58,2	63,1
8	85,8	85,4	85,3	84,4	78,1	82,1	78,3	72,7	62,8	55,6	48,1	48,5	51,2	56,1
9	85,7	85,7	85,9	85,8	85,0	83,6	81,1	73,8	58,4	45,1	38,5	37,5	42,4	46,8
10	86,4	87,2	87,0	87,0	87,2	86,8	84,3	79,1	0,0	27,7	23,0	22,7	24,9	30,7
11	86,7	87,0	87,7	88,0	88,1	89,2	90,1	0,0	0,0	2,9	9,2	6,4	9,0	6,9
12	87,1	87,9	88,0	89,0	89,4	90,9	92,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	87,4	87,4	88,5	88,6	89,2	91,1	92,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	87,1	87,8	88,9	89,2	89,6	91,3	91,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabulka A.9: Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] při kmitočtu 10 000 Hz a 15 A na zdroji

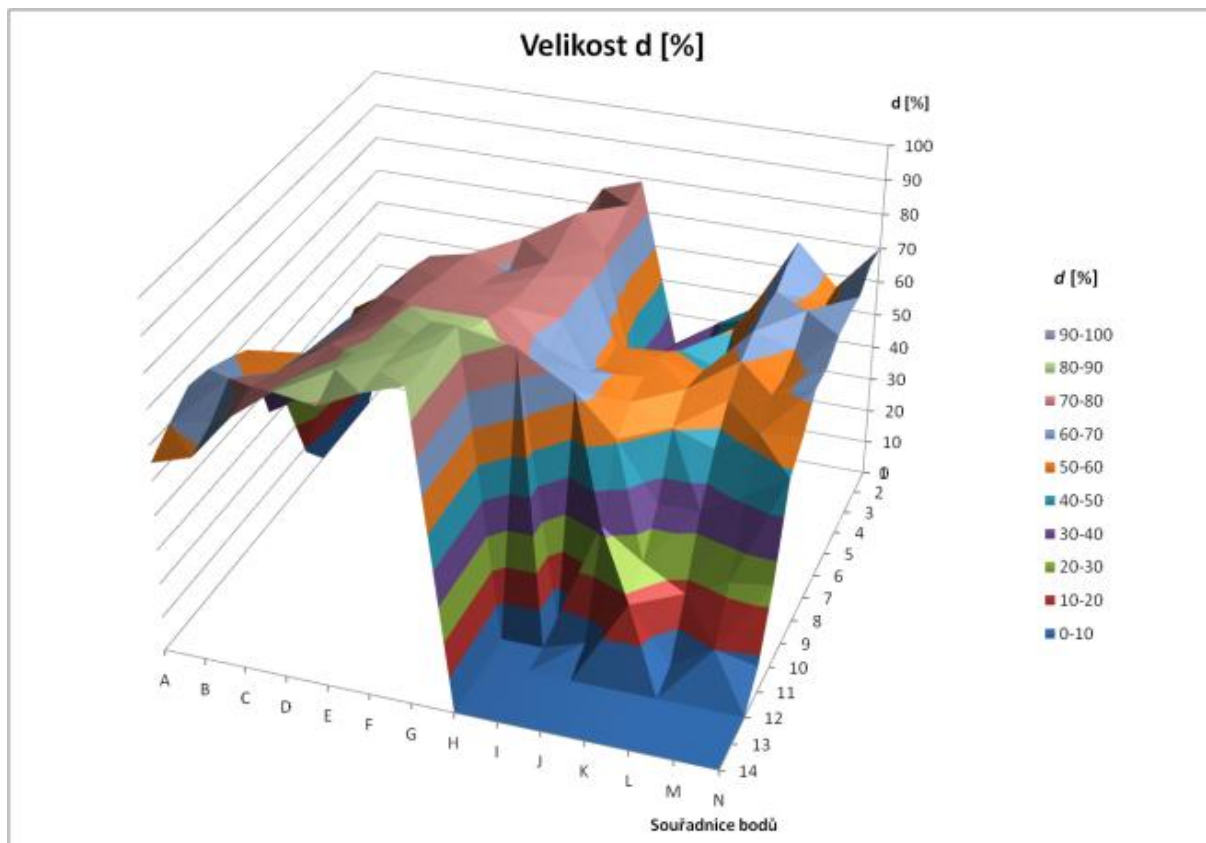
Zmenšení intenzity magnetického pole H <i>přídavným konstrukčním prvkem</i> d [%]														
Řada/ sloupec	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	29,1	42,0	17,1	40,9	49,0	47,3	75,1	79,0	30,7	38,7	46,1	68,2	56,3	70,0
2	-148,7	40,7	51,8	46,6	53,9	56,4	64,1	76,9	33,9	35,0	47,9	66,8	56,9	70,3
3	-75,5	42,8	55,0	58,1	58,3	64,9	77,6	74,1	31,4	41,1	50,7	63,8	46,3	66,3
4	-28,5	42,6	52,9	58,7	62,5	73,6	75,8	74,2	37,1	47,8	44,0	64,5	65,6	66,5
5	-6,0	50,0	56,2	69,6	72,1	69,0	73,5	71,3	50,0	53,1	48,9	63,1	59,9	65,9
6	8,3	45,2	60,5	71,9	74,2	72,9	74,3	70,0	58,3	57,3	54,0	60,2	57,2	62,3
7	29,4	48,9	60,6	72,4	75,7	75,1	74,8	70,0	58,2	57,3	55,8	54,6	58,3	62,4
8	33,1	53,1	64,1	74,5	78,1	77,7	76,9	66,8	62,2	55,7	50,6	46,6	53,3	54,4
9	57,7	54,6	65,2	73,2	79,6	79,5	79,5	68,9	62,7	51,1	34,5	34,8	41,5	48,9
10	61,0	57,3	67,4	74,5	79,9	81,7	82,0	78,4	0,0	32,3	23,9	17,0	22,7	24,6
11	63,7	59,6	67,4	77,1	80,3	83,5	88,2	0,0	0,0	4,3	18,2	2,7	10,1	7,7
12	64,8	69,0	71,8	76,4	82,0	84,8	88,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	60,3	62,4	74,7	79,4	83,8	85,4	87,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	55,0	58,8	72,3	81,2	79,5	85,2	89,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Hodnoty pomocné veličiny Zmenšení intenzity magnetického pole d [%] znázorním analogicky jako v Kapitola 8.1.4 pomocí 3D grafů (Graf A.13, Graf A.14 a Graf A.15).

**Graf A.13:** 50 Hz, 15 A nastaveno na zdroji

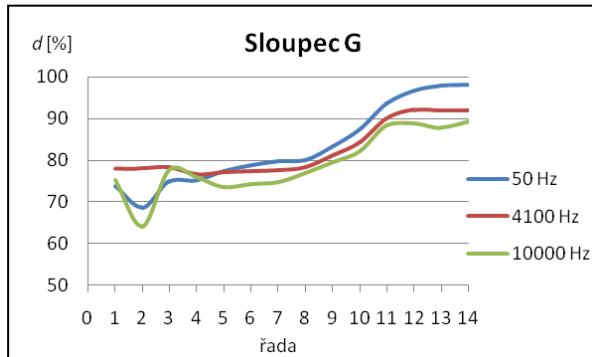


Graf A.14: 4 100 Hz, 15 A nastaveno na zdroji

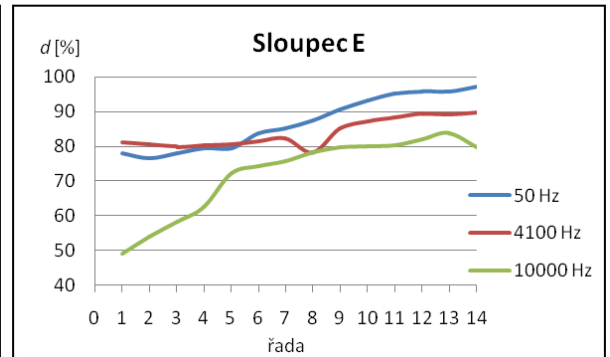


Graf A.15: 10 000 Hz, 15 A nastaveno na zdroji

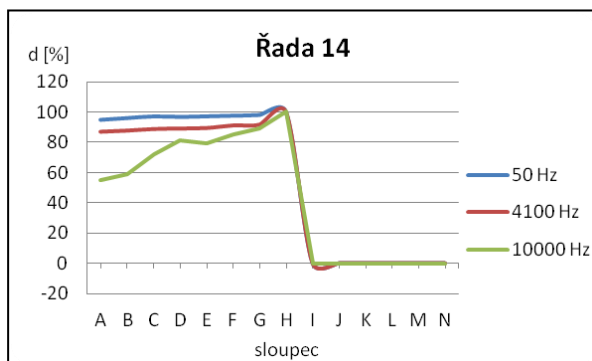
Dále provedu porovnání geometrického uspořádání se stíněním a bez stínění pro vybrané sloupce (Graf A.16 a Graf A.17) a řádky (Graf A.18 a Graf A.19) obdobně jako v Kapitola 8.1.4.



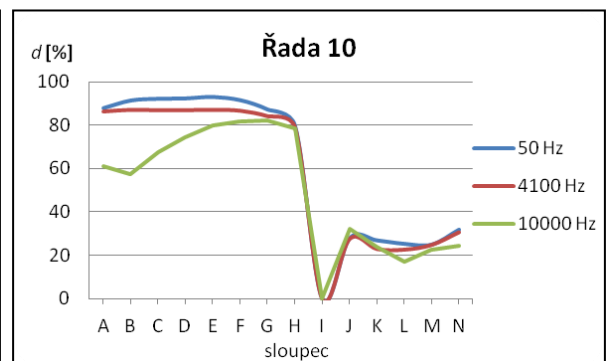
Graf A.16: Sloupec G, 15 A



Graf A.17: Sloupec E, 15 A



Graf A.18: Řada 14, 15 A



Graf A.19: Řada 10, 15 A

Z porovnávacích grafů je zřejmé, že účinnost stínění pomocí svazků transformátorových plechů je největší pro frekvenci napájecího proudu induktoru 50 Hz. Účinnost stínění pro frekvenci napájecího proudu induktoru 4 100 Hz je větší než pro 10 000 Hz.

A.2 Vliv přidavných konstrukčních prvků

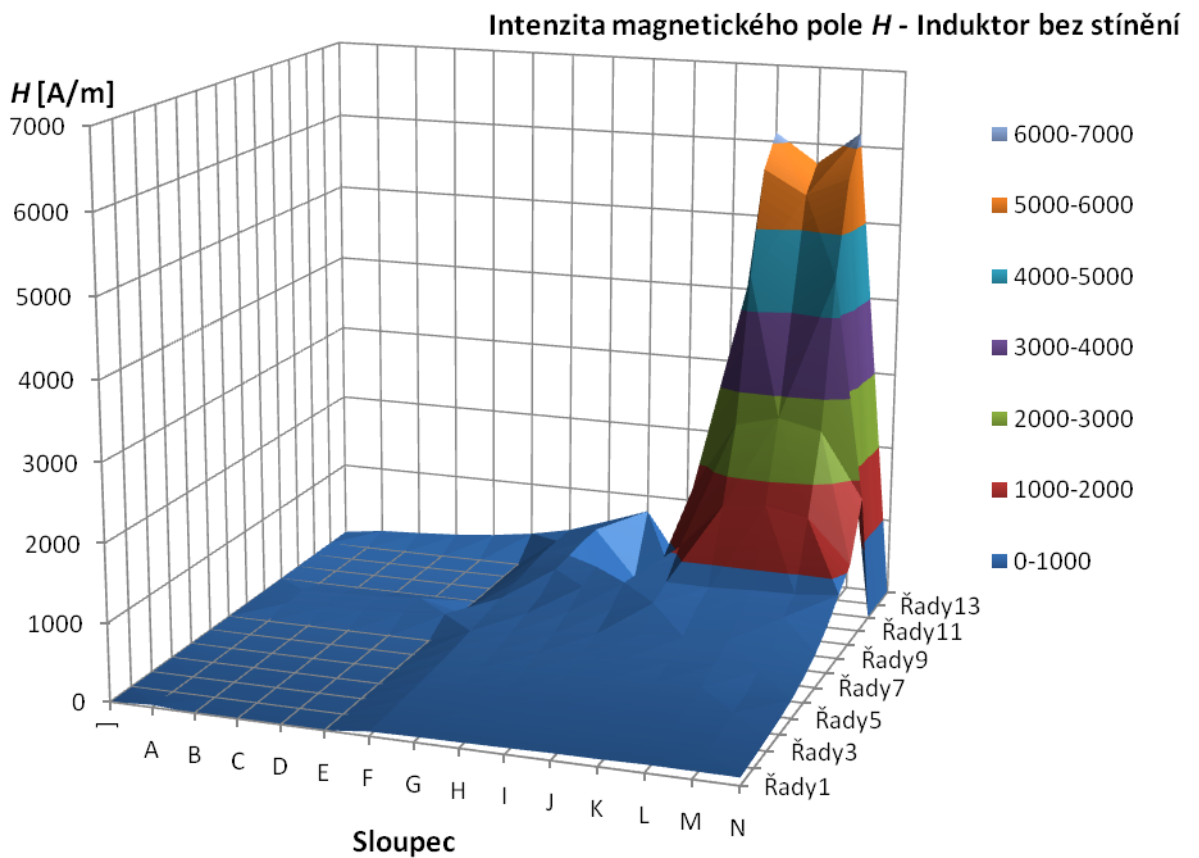
A.2.1 Výsledky měření pro frekvenci 4 000 Hz

Napájecí proud induktoru byl pomocí osciloskopu a proudových kleští stanoven na 23 A (na zdroji nastavena hodnota 15 A).

A.2.1.1 Induktor bez stínění

Tabulka A.10: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro induktor bez stínění

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	32,6					60,3	70,0	74,6	81,7	91,5	94,0	103,9	101,3	99,4
2						74,5	85,7	93,2	101,1	108,8	115,7	125,4	130,6	121,9
3						90,9	104,2	115,6	125,9	137,0	146,2	155,5	161,5	154,6
4						111,2	123,7	141,9	154,0	171,7	183,9	197,3	203,3	186,8
5						133,5	156,3	179,2	206,1	230,9	243,0	255,9	224,9	237,4
6						162,4	193,1	234,8	270,3	305,0	326,9	348,6	339,3	324,3
7						203,1	247,1	297,5	361,7	414,7	454,6	476,9	465,0	439,9
8	69,0	89,7	108,5	138,3	182,5	232,5	325,8	409,4	502,5	655,9	626,3	650,0	661,4	605,7
9	77,7	96,2	123,4	157,2	23,1	286,2	388,8	566,9	689,5	756,7	750,0	775,7	784,7	839,6
10						334,6	571,5	668,0		1057,6	1658,2	1729,9	1621,3	1057,8
11						364,2	592,0			1681,6	2600,4	2736,8	2615,5	1770,1
12						408,9	618,0				4444,4	4066,2	4490,4	
13						405,6	624,2				5729,6	5423,3	5670,6	
14	86,7	115,8	150,6	204,6	283,4	397,9	586,3				6120,4	5746,7	6171,3	



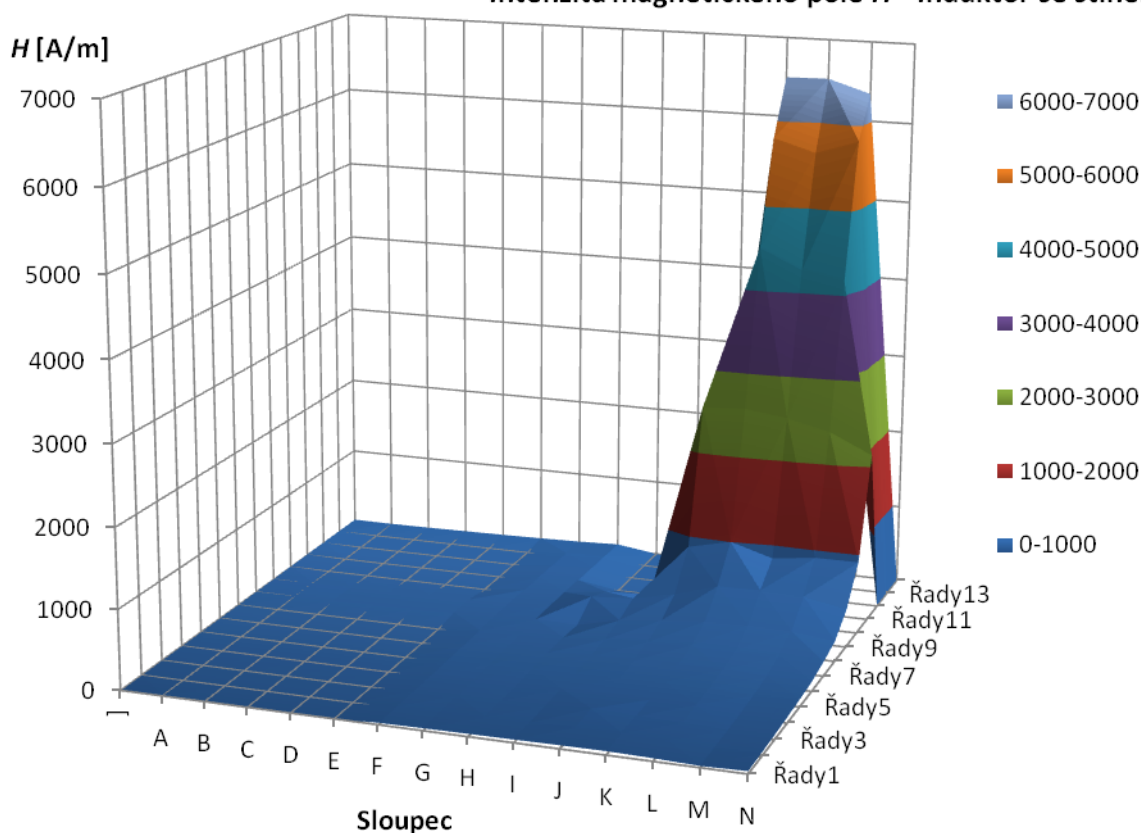
Graf A.20: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor bez stínění

A.2.1.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů

Tabulka A.11: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro induktor se stíněním svazky transformátorových plechů

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	6,8					24,0	30,2	35,0	39,1	44,3	47,5	37,8	20,1	34,4
2						28,9	34,0	40,5	43,6	61,9	63,5	47,3	27,0	42,4
3						31,2	38,3	42,4	52,9	88,5	62,7	55,1	39,7	54,9
4						36,5	43,9	45,5	66,2	72,6	76,5	83,1	55,6	71,5
5						40,8	52,8	64,4	81,5	94,0	100,9	100,0	78,4	91,3
6						47,3	60,3	81,0	100,5	120,2	131,4	136,2	117,3	119,5
7						51,8	72,2	89,7	135,1	170,5	196,9	197,5	187,2	178,8
8	10,6	15,6	21,8	30,8	40,6	55,2	84,3	74,2	201,1	265,3	315,1	330,1	321,0	259,1
9	11,0	15,5	23,6	32,8	43,7	59,9	93,7	270,4	310,0	429,8	593,0	603,9	583,1	484,2
10						60,8	92,8	165,9		877,3	1004,6	847,7	914,5	917,5
11						62,3	85,0			2550,9	2580,8	2512,6	2385,4	2135,9
12						60,2	81,4				4515,2	4272,0	4168,6	
13						57,7	78,3				5812,0	5657,1	5832,6	
14	12,0	16,7	22,9	30,8	40,0	52,9	73,2				6496,2	6507,1	6345,3	

Intenzita magnetického pole H - Induktor se stíněním



Graf A.21: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů

A.2.1.3 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřenými závity nad stíněním

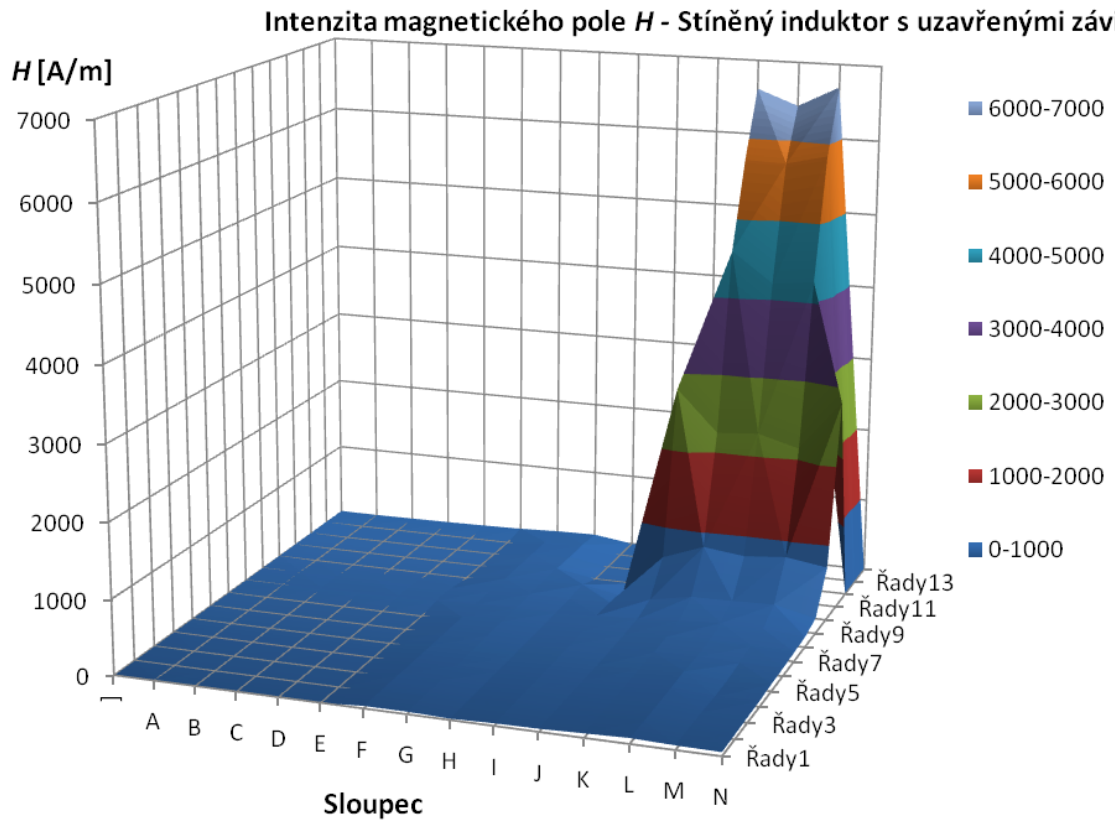
Proud protékající prvkem byl pomocí proudových kleští stanoven na $I = 18,92$ A.

Tabulka A.12: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s uzavřenými závity nad stíněním

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	8,5					33,0	33,5	17,9	33,7	39,3	57,3	74,7	58,8	51,5
2						36,4	33,9	19,4	39,6	38,4	56,3	80,5	59,0	59,2
3						39,8	36,9	24,5	44,1	45,5	61,7	87,7	64,7	68,0
4						41,2	41,3	30,7	47,7	51,1	71,1	99,2	58,2	75,1
5						43,4	45,5	36,9	53,2	59,0	83,7	117,0	67,1	93,9
6						48,6	59,2	45,3	62,9	70,1	106,6	117,1	103,1	103,0
7						54,1	66,5	51,6	75,3	87,6	127,8	135,5	133,6	119,9
8	9,7	16,0	22,0	28,8	39,5	53,7	69,1	68,5	94,2	113,8	160,8	193,4	183,9	137,3
9	11,8	16,1	23,5	26,4	34,3	57,9	83,8	75,0	94,3	202,0	303,2	312,4	329,8	207,7
10						59,4	76,8	100,9		614,7	821,9	755,0	804,9	723,5
11						63,4	94,0			2801,0	2247,8	2290,6	2138,2	2808,6
12						69,2	87,3				4605,6	4206,8	4269,0	
13						69,0	94,9				5741,3	5724,0	5856,6	
14	10,9	15,9	22,0	30,1	41,7	64,6	74,8				6617,2	6413,2	6693,3	

Tabulka A.13: Teploty přidavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, uzavřené závity nad stíněním

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
22,9	27,7	23,5	25,2	23,6	25,6	Vrchní	23,3	34,6
Proud						Střední	23,1	31,6
18,92 [A]						Spodní	23	34,7



Graf A.22: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřenými závity

A.2.1.4 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřeným dutým vodičem nad stíněním

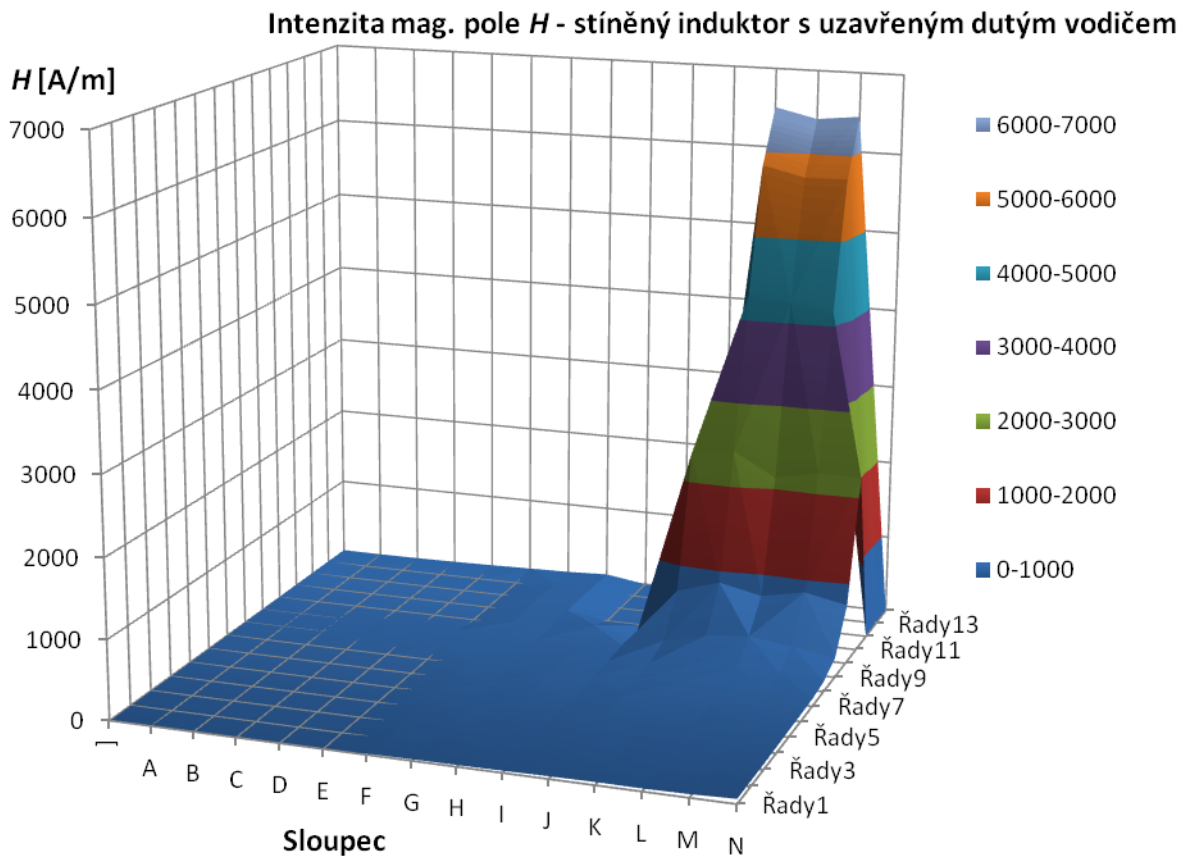
Proud protékající prvkem změřený pomocí proudových kleští: $I = 31,5$ A.

Tabulka A.14: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s uzavřeným dutým vodičem

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	9,0					14,8	19,6	22,6	26,9	34,1	38,7	36,2	43,7	61,6
2						17,4	19,9	30,6	28,9	42,4	46,8	42,8	49,8	64,9
3						18,1	27,8	31,8	35,6	45,8	42,0	50,6	56,8	64,5
4						21,4	28,2	30,5	38,2	51,5	54,3	61,3	63,8	72,4
5						24,6	30,7	40,4	43,8	60,2	63,0	68,3	79,7	80,5
6						28,8	39,3	46,9	52,1	70,0	76,4	80,1	83,5	84,9
7						26,8	39,1	54,6	60,5	74,3	95,8	99,0	97,8	94,2
8	8,7	10,1	13,8	18,7	29,6	32,0	41,1	59,2	65,8	110,9	153,3	175,7	160,8	126,4
9	8,3	10,6	14,4	20,2	28,5	39,5	49,5	66,9	89,3	218,1	351,1	399,1	335,6	249,8
10						49,6	70,5	118,5		699,2	868,8	754,4	861,6	754,0
11						55,8	84,0			2339,8	2423,0	2133,4	2240,8	2230,8
12						62,6	92,3				4299,7	4251,5	4168,4	
13						58,0	86,2				5857,9	5730,4	5743,9	
14	9,5	14,6	21,1	30,2	43,1	54,5	78,5				6509,1	6388,4	6445,7	

Tabulka A.15: Teploty přídavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, uzavřený dutý vodič

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
23	26,7	22,4	24,5	22,4	24,5	Vrchní	23,2	32,7
Proud						Střední	22,9	30,1
31,5 [A]						Spodní	23,1	33,2

**Graf A.23:** Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřeným dutým vodičem

A.2.1.5 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřeným plným vodičem nad stíněním

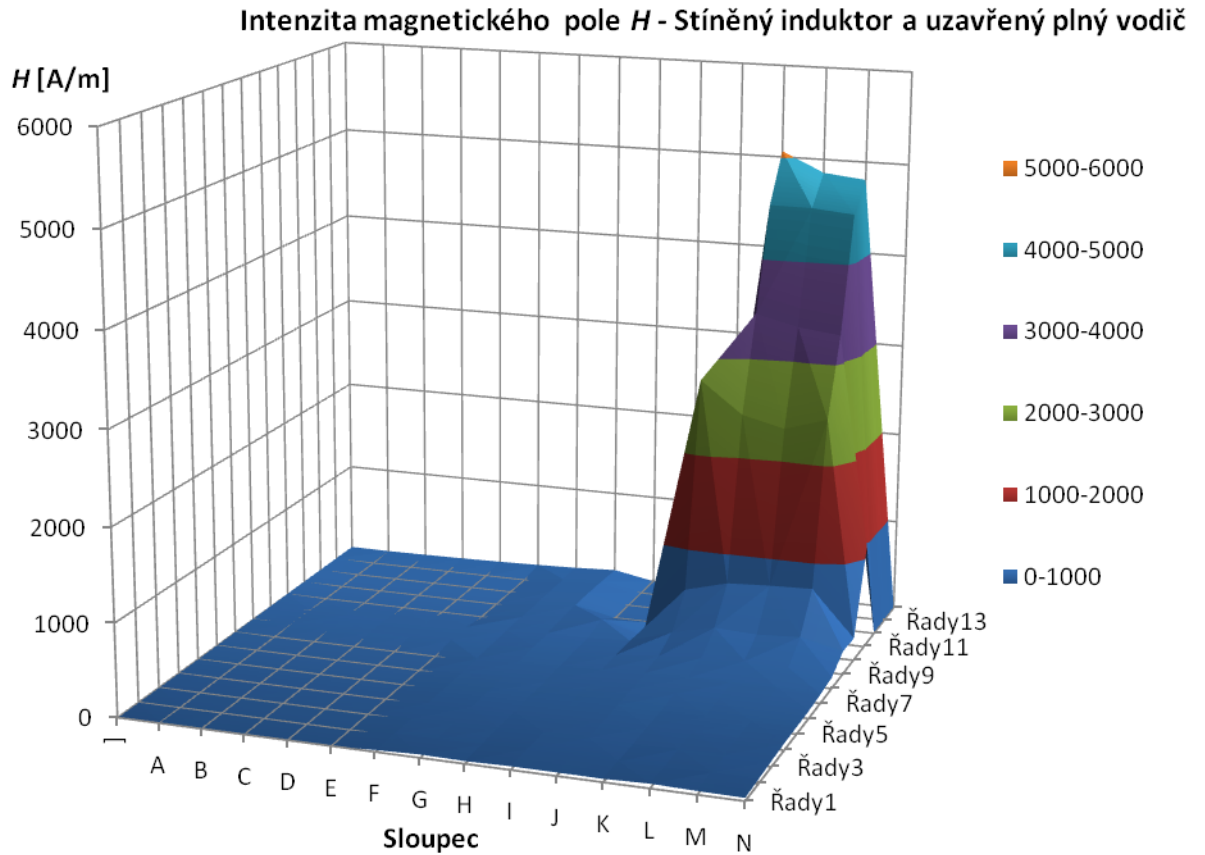
Změřený proud protékající prvkem: $I = 36$ A.

Tabulka A.16: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s uzavřeným plným vodičem

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	7,1					20,1	35,0	28,6	37,4	37,2	35,0	48,8	38,3	33,4
2						23,0	26,8	30,1	50,0	47,0	40,9	40,8	51,8	45,4
3						19,0	28,7	36,6	51,7	54,3	42,0	57,5	65,0	60,1
4						26,7	40,7	40,3	50,7	61,4	58,8	63,9	62,6	72,1
5						30,4	43,7	48,7	61,2	74,6	66,1	73,0	78,0	76,5
6						26,8	41,0	51,5	67,1	83,9	89,3	84,4	83,0	78,7
7						34,3	53,2	59,9	80,6	100,5	110,3	113,8	115,3	95,4
8	10,1	13,8	18,1	23,8	35,1	38,3	69,2	69,1	91,7	130,7	171,8	191,2	173,4	122,2
9	8,8	15,1	18,2	25,9	34,6	45,5	69,4	72,8	93,7	246,4	350,3	330,1	356,4	255,5
10						53,9	84,2	133,7		577,7	701,3	727,1	741,8	245,1
11						59,5	97,5			2788,7	2445,1	2334,8	2477,7	1119,9
12						64,4	101,1				3454,5	3342,9	3289,5	
13						62,3	93,0				4552,3	4550,2	4510,2	
14	12,1	16,5	22,6	31,4	43,8	58,9	83,0				5063,5	4854,9	4806,0	

Tabulka A.17: Teploty přidavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, uzavřený plný vodič

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
26,9	28	28	28,1	29,2	29,6	Vrchní	34,9	38,8
Proud						Střední	32,6	36,1
36 [A]						Spodní	34	39,9



Graf A.24: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřeným plným vodičem

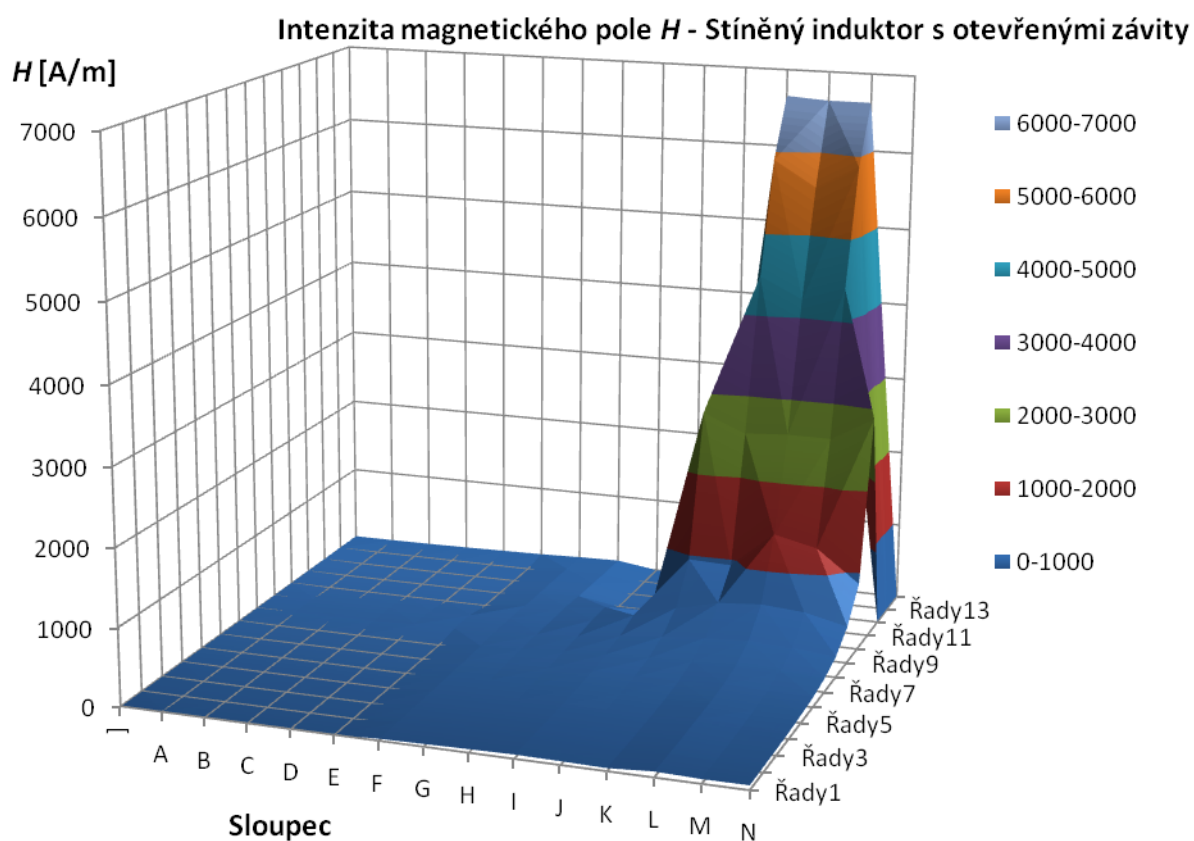
A.2.1.6 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřenými závití nad stíněním

Tabulka A.18: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s otevřenými závití nad stíněním

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	8,8					25,1	34,8	44,8	53,1	46,9	37,5	73,1	57,5	59,2
2						30,9	40,7	50,6	58,7	49,9	42,5	79,0	58,7	64,2
3						35,0	45,0	57,3	66,1	58,6	52,1	87,1	67,7	70,8
4						39,1	51,1	64,3	75,7	67,9	66,5	105,8	79,9	80,7
5						44,4	58,9	72,4	91,6	87,6	85,1	119,9	101,2	98,0
6						51,5	67,5	94,2	117,6	117,0	121,8	150,6	130,0	123,3
7						58,2	82,9	114,8	152,6	169,8	192,8	214,0	202,8	172,7
8	12,0	19,6	25,7	40,1	45,7	61,4	96,0	140,6	207,6	268,8	320,7	351,8	326,1	272,4
9	13,6	19,2	27,3	35,1	48,1	66,8	95,7	175,5	308,1	466,7	600,9	646,4	605,5	478,9
10						67,7	105,8	176,1		950,7	933,7	1404,7	1281,0	868,2
11						66,9	86,1			2768,3	2540,7	2577,9	2573,3	2885,8
12						68,1	84,6				4485,1	4222,4	4406,2	
13						66,6	77,2				5909,3	5581,7	5882,6	
14	15,5	20,6	27,4	38,4	47,9	65,8	77,4				6657,9	6624,8	6626,7	

Tabulka A.19: Teploty přidavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, otevřené závitky nad stíněním

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
25,6	27,3	27,4	27,2	28,4	28,3	Vrchní	32,6	37,2
						Střední	30,2	33,4
						Spodní	30,5	36



Graf A.25: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřenými závitky

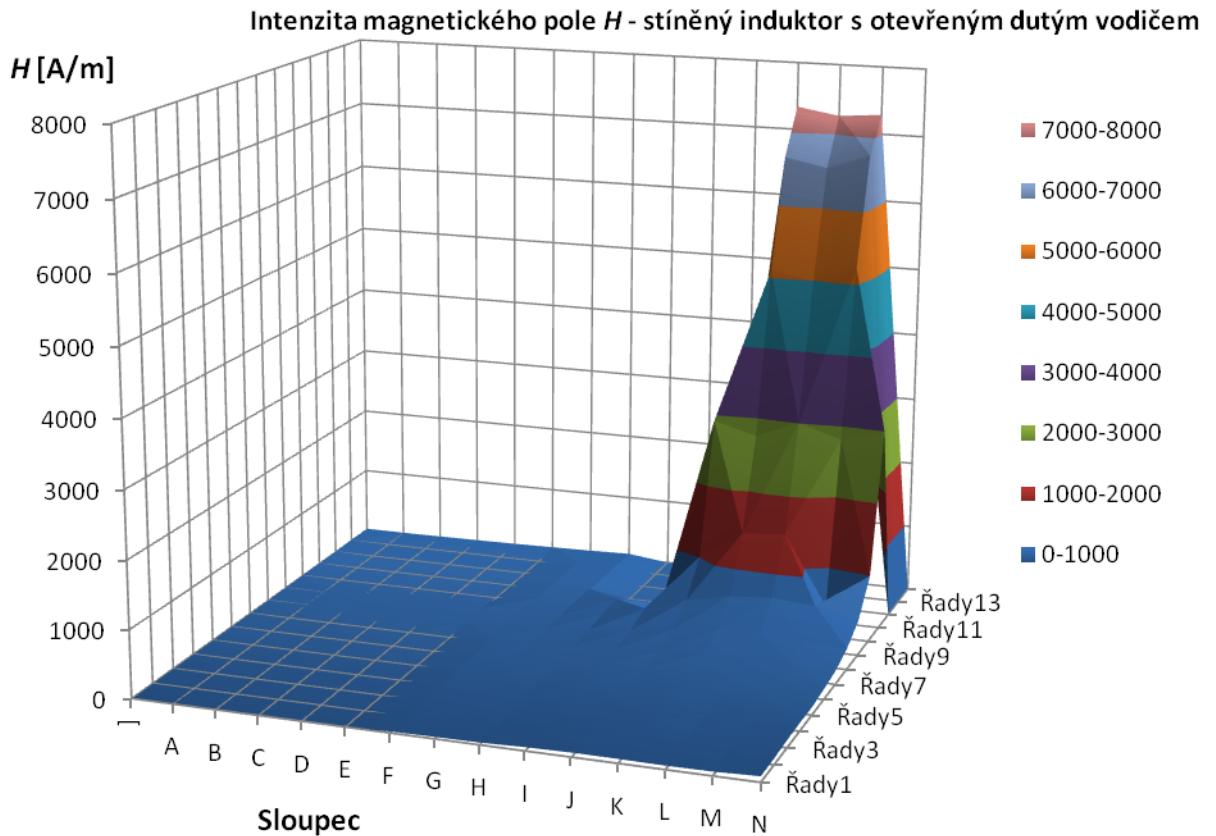
A.2.1.7 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřeným dutým vodičem nad stíněním

Tabulka A.20: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s otevřeným dutým vodičem

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	8,0					21,9	28,6	33,4	53,1	63,8	61,8	55,9	60,5	82,7
2						26,2	32,6	41,8	61,7	76,8	73,9	72,8	70,4	87,4
3						33,1	41,7	48,5	68,3	86,9	102,2	87,7	89,1	107,0
4						40,4	46,7	57,2	81,9	98,7	106,3	102,7	113,8	116,7
5						45,6	57,3	67,0	97,2	105,2	120,4	119,9	124,2	111,5
6						51,0	67,5	84,2	113,8	131,8	152,7	164,0	159,6	148,3
7						59,8	78,0	109,8	148,4	187,5	227,5	232,9	233,4	196,8
8	12,3	17,1	24,2	31,8	46,0	64,3	94,3	137,3	210,5	299,0	369,1	386,4	360,4	313,5
9	11,8	18,2	24,9	34,9	48,4	68,8	103,1	182,9	338,6	544,2	672,4	721,0	671,9	522,3
10						68,2	100,6	209,7		1012,7	1441,5	1499,8	461,9	994,8
11						65,4	87,8			2923,9	2747,2	3013,5	2812,7	2994,9
12						63,8	82,8				5113,7	4992,1	5230,7	
13						61,0	79,4				6685,8	6564,0	6785,9	
14	12,7	18,7	24,6	33,4	43,7	57,1	73,8				7340,7	7238,1	7288,3	

Tabulka A.21: Teploty stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, otevřený dutý vodič

Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
27,8	28,7	28,7	29,8	Vrchní	32,1	41,5
				Střední	30,5	38,4
				Spodní	30,3	43,2



Graf A.26: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřeným dutým vodičem

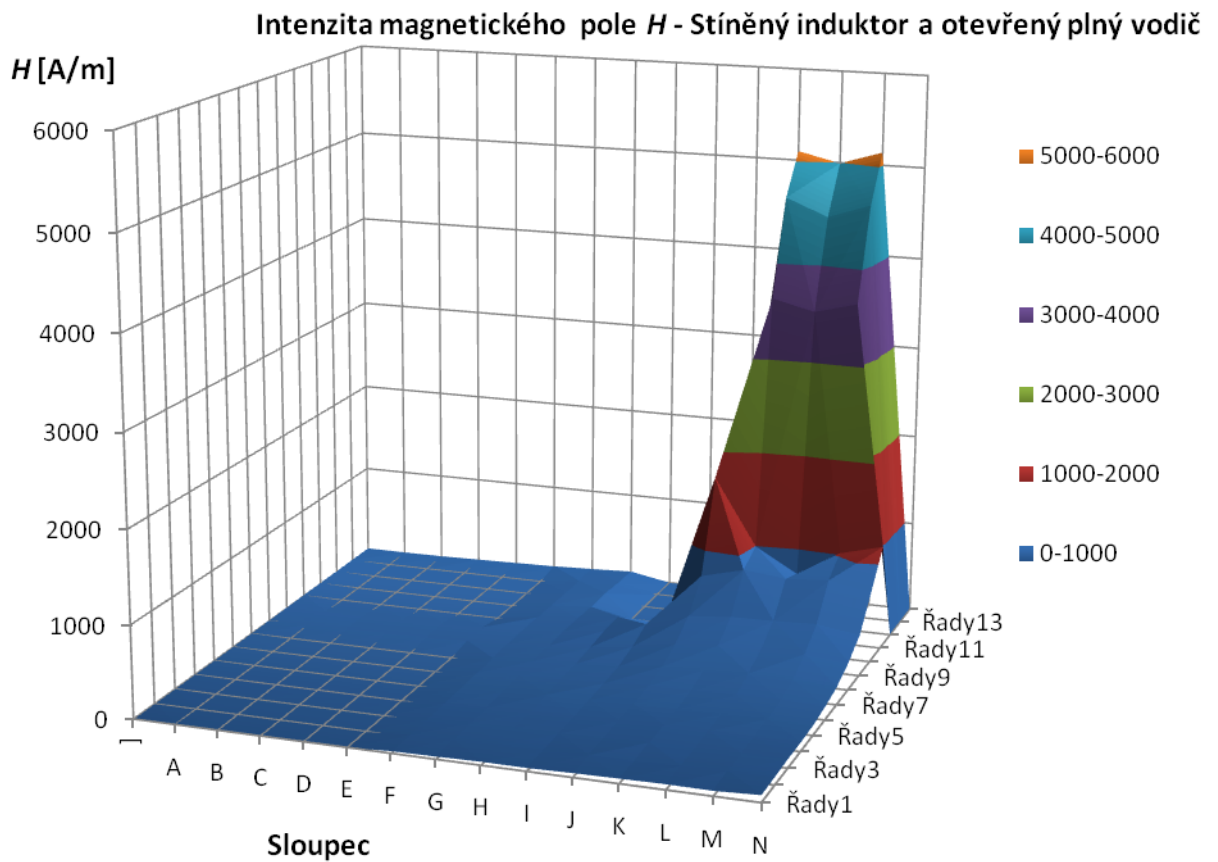
A.2.1.8 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřeným plným vodičem nad stíněním

Tabulka A.22: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s otevřeným plným vodičem

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	7,2					23,0	28,2	36,9	35,3	45,7	51,9	57,9	54,5	75,2
2						25,7	36,3	41,7	41,1	59,0	53,7	71,3	84,1	83,7
3						31,2	45,6	50,6	53,3	61,7	82,3	78,6	88,9	94,0
4						35,7	48,3	58,8	66,9	83,2	100,3	95,5	91,3	93,8
5						41,7	57,8	83,2	84,6	99,8	102,5	110,5	118,9	105,0
6						49,8	68,7	85,1	104,5	132,5	138,3	153,9	154,1	138,8
7						56,5	86,4	106,2	131,6	186,7	207,3	225,4	217,0	189,4
8	11,7	16,2	24,5	31,1	44,6	62,0	99,5	137,8	197,8	282,5	323,2	319,4	340,7	299,0
9	13,3	17,6	26,7	36,2	49,6	65,6	106,8	173,4	300,5	444,3	489,4	499,6	515,8	452,1
10						68,0	107,5	180,6		750,5	870,6	819,6	855,2	789,4
11						65,6	95,0			1727,4	996,1	735,7	1020,1	1140,5
12						65,2	107,4				3648,9	3537,6	3657,3	
13						62,5	88,6				4668,1	4484,9	4642,6	
14	14,0	16,4	25,1	34,5	44,9	62,5	83,0				5099,0	4993,5	5139,7	

Tabulka A.23: Teploty přidavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, otevřený plný vodič

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
24,1	26,3	25,2	26,7	26,5	28,3	Vrchní	26,9	35,9
						Střední	26,4	34,8
						Spodní	26,7	38,8

**Graf A.27:** Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřeným plným vodičem

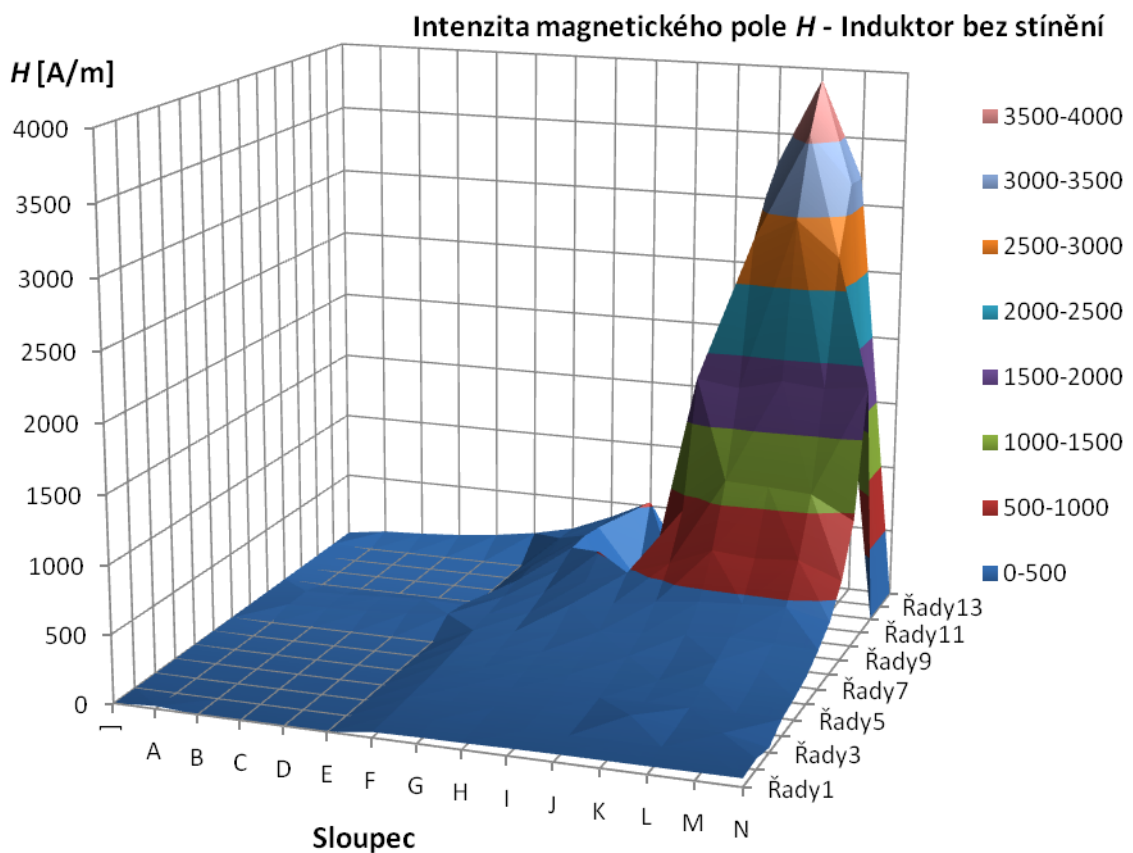
A.2.2 Výsledky měření pro frekvenci 10 000 Hz

Napájecí proud induktoru byl pomocí osciloskopu a proudových kleští stanoven na 23 A (na zdroji nastavena hodnota 15 A).

A.2.2.1 Induktor bez stínění

Tabulka A.24: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro induktor bez stínění

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	21,1					40,8	46,5	48,3	53,4	56,1	57,0	57,5	59,5	61,7
2						48,9	56,7	58,5	65,9	68,9	71,9	72,3	74,9	75,3
3						58,8	65,8	74,1	82,4	85,5	138,8	87,5	95,1	32,6
4						70,0	83,7	92,5	104,0	110,6	116,0	119,9	121,6	121,2
5						84,2	101,8	118,0	135,3	144,7	164,3	182,3	159,5	155,7
6						105,3	126,4	150,3	173,1	196,6	203,0	238,6	215,0	200,1
7						131,8	160,6	192,6	237,3	260,2	290,8	307,2	300,0	285,7
8	45,3	55,9	68,8	87,6	115,8	154,6	201,6	304,5	343,8	395,1	431,9	452,0	465,9	390,9
9	47,6	60,0	78,1	95,2	89,0	187,5	257,6	378,6	479,5	586,2	720,1	692,7	714,7	595,2
10						217,1	332,3	508,5		896,9	1153,1	1138,6	1116,0	947,1
11						234,3	412,3			1816,5	1771,8	1852,7	1824,5	1861,4
12						211,4	415,8				2816,7	2983,7	2726,2	
13						265,4	386,0				3088,0	3563,4	3210,1	
14	56,9	72,1	94,4	130,5	178,8	250,7	381,0				3280,8	3917,1	3199,7	

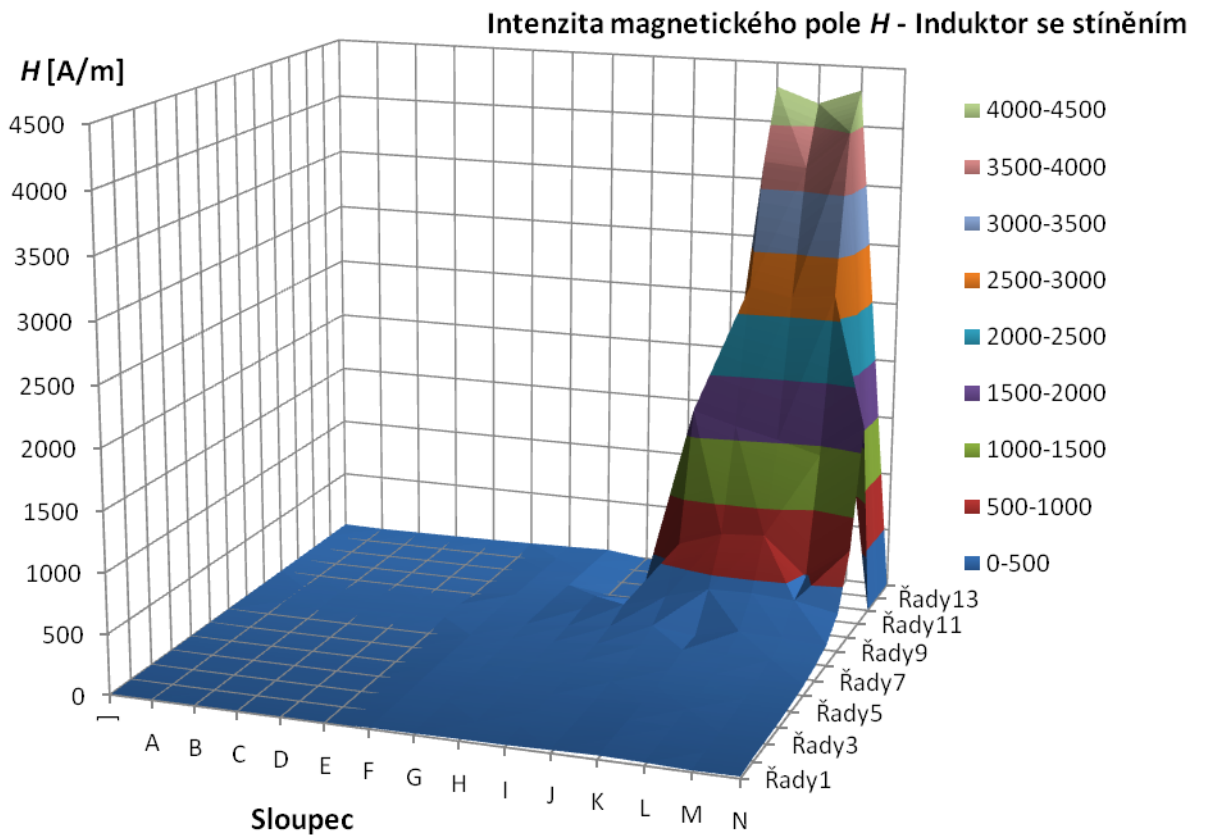


Graf A.28: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor bez stínění

A.2.2.2 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů

Tabulka A.25: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro induktor se stíněním svazky transformátorových plechů

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	4,3					12,3	14,1	17,6	18,7	26,5	33,7	26,6	14,1	16,9
2						13,4	16,0	21,1	24,3	27,5	39,5	29,2	27,8	32,7
3						16,4	19,2	22,3	30,7	32,0	46,6	41,3	37,4	36,8
4						23,6	23,8	28,8	38,0	40,3	53,8	56,0	46,1	43,7
5						28,7	29,3	37,2	47,9	60,1	65,9	64,6	61,3	61,5
6						29,2	36,2	48,9	64,5	72,9	85,3	86,3	82,0	80,7
7						32,1	45,3	61,4	82,9	106,9	122,6	127,8	131,7	116,5
8	7,0	9,7	13,6	18,9	25,1	34,6	53,6	79,3	120,0	168,6	125,3	206,4	195,2	176,3
9	7,5	10,1	14,9	20,5	27,6	37,6	55,4	112,5	191,6	305,3	408,9	416,6	392,1	323,6
10						39,5	55,6	108,6		652,4	775,2	801,0	485,0	751,9
11						39,1	52,3			1711,1	1611,1	1525,7	1425,9	1700,7
12						36,2	50,1				2723,0	2657,5	2700,8	
13						34,0	46,5				3718,7	3687,8	4009,3	
14	7,4	10,3	14,3	18,5	25,2	32,5	42,2				4296,5	4173,7	4302,1	



Graf A.29: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů

A.2.2.3 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřenými závity nad stíněním

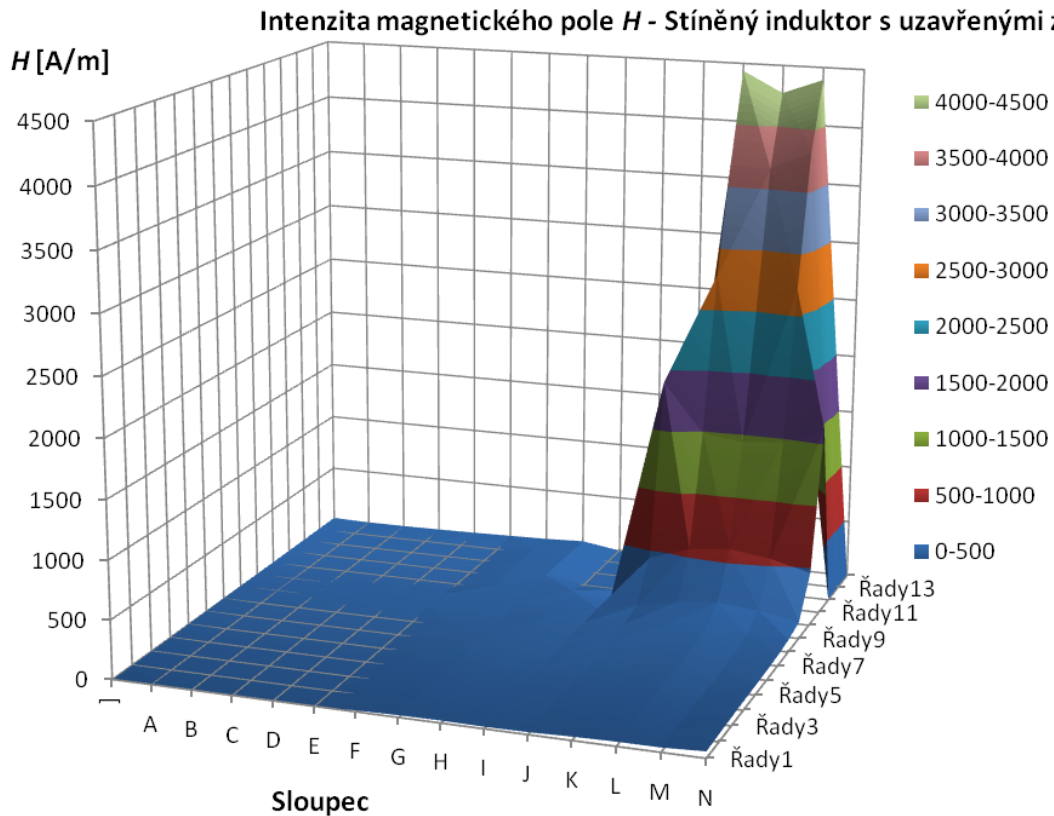
Proud protékající prvkem byl pomocí proudových kleští stanoven na $I = 18,07$ A.

Tabulka A.26: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s uzavřenými závity nad stíněním

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	5,5					11,1	18,5	20,8	17,0	20,6	31,3	37,9	38,7	55,6
2						12,4	22,3	20,2	19,8	22,6	33,9	45,2	45,3	63,4
3						13,5	26,0	24,2	22,5	25,2	36,0	48,8	44,0	68,5
4						14,4	28,1	27,4	25,8	28,6	39,8	53,6	48,2	73,8
5						16,8	30,7	33,2	29,9	31,6	46,0	62,1	53,4	76,2
6						19,4	35,3	37,8	34,8	42,7	57,1	76,9	65,2	79,6
7						23,4	37,4	42,9	42,4	57,2	69,8	84,2	71,7	87,7
8	5,3	7,7	10,5	15,0	20,7	26,4	33,5	50,8	49,0	75,0	107,0	119,8	103,9	103,8
9	4,6	7,2	10,2	15,9	21,6	29,7	42,1	50,9	56,0	125,2	199,2	236,2	204,0	144,2
10						33,6	47,6	64,7		440,7	557,9	597,5	549,1	463,5
11						36,3	54,7			1901,9	1487,6	1441,0	1471,6	1620,2
12						39,6	56,9				2784,0	2521,5	2717,0	
13						38,7	55,3				3672,3	3662,7	3822,9	
14	5,7	8,7	12,6	19,2	27,1	35,7	51,4				4436,7	4262,5	4394,9	

Tabulka A.27: Teploty přidavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, uzavřené závity nad stíněním

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
27,2	31	25,8	28	26	28,8	Vrchní	32,9	42,7
Proud						Střední	30,1	36,3
18,07 [A]						Spodní	31,3	41,2



Graf A.30: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřenými závit

A.2.2.4 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřeným dutým vodičem nad stíněním

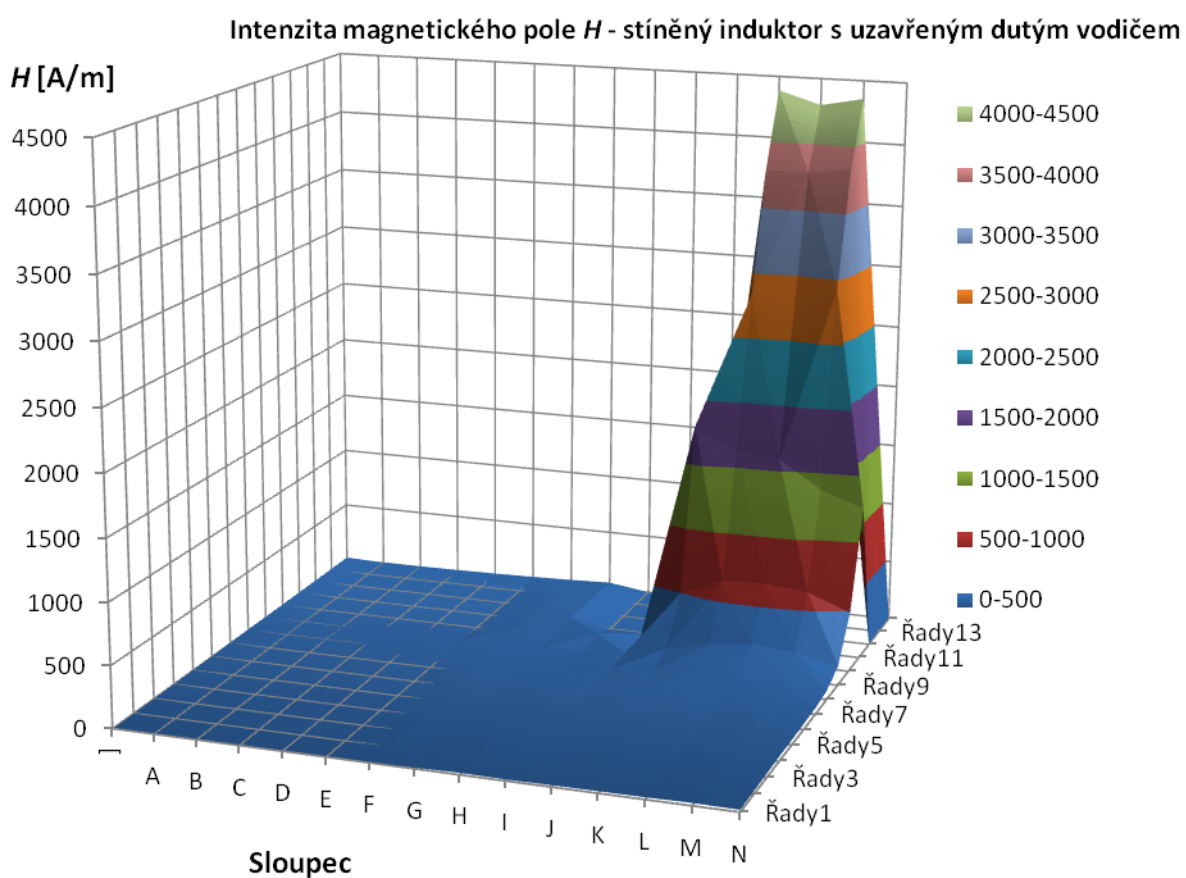
Proud protékající prvkem změřený pomocí proudových kleští: $I = 29,1$ A.

Tabulka A.28: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s uzavřeným dutým vodičem

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	2,0					7,0	9,1	15,8	11,3	14,4	16,1	17,2	22,2	17,6
2						8,4	10,2	18,5	13,5	17,2	17,7	21,1	26,9	24,1
3						9,4	11,5	18,3	16,0	19,4	23,7	24,6	34,6	29,7
4						11,2	13,3	18,2	19,6	22,8	28,1	28,7	38,2	36,3
5						12,2	14,2	20,4	25,4	26,0	30,7	34,2	40,2	38,4
6						13,5	16,5	23,4	24,7	34,2	37,3	40,0	49,8	44,0
7						16,0	19,0	24,0	31,4	46,5	54,1	61,2	61,6	49,7
8	4,0	5,4	6,8	9,8	12,3	19,4	23,4	26,1	41,2	69,5	102,0	111,6	103,0	70,0
9	4,0	6,0	8,9	12,0	17,4	24,9	29,5	28,8	57,4	141,2	219,7	258,1	236,8	158,4
10						31,4	44,7	75,0		493,1	641,2	656,5	621,3	489,7
11						35,6	60,0			1802,0	1623,3	1594,6	1370,6	1248,6
12						39,9	58,4				2836,8	2717,0	2929,7	
13						36,7	55,0				3792,4	3791,0	3842,5	
14	4,9	7,3	11,2	16,7	24,6	34,6	48,0				4387,1	4284,8	4353,4	

Tabulka A.29: Teploty přídavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, uzavřený dutý vodič

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
24,7	25,5	24,6	26,7	24,5	27,6	Vrchní	28,7	36,4
Proud						Střední	27,6	33
29,1 [A]						Spodní	28,3	37



Graf A.31: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřeným dutým vodičem

A.2.2.5 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřeným plným vodičem nad stíněním

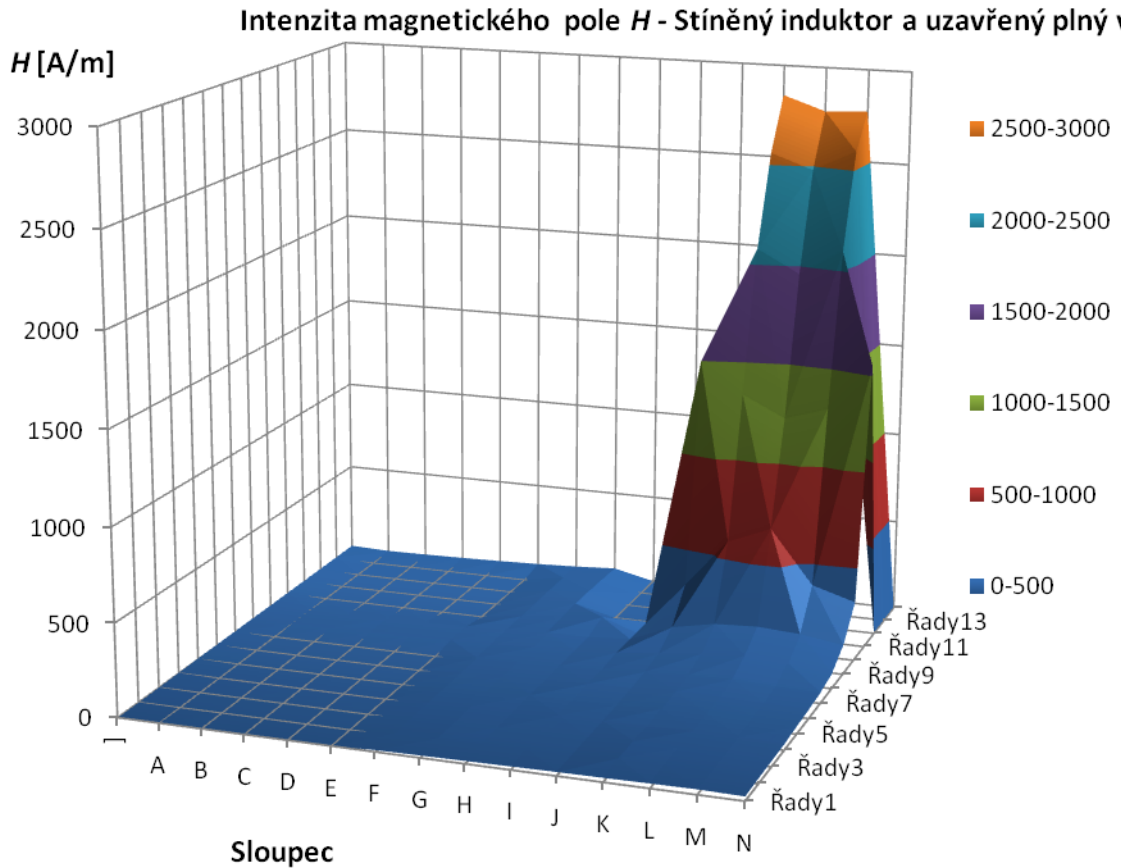
Změřený proud protékající prvkem: $I = 31,6 \text{ A}$.

Tabulka A.30: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s uzavřeným plným vodičem

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	3,1					9,7	12,5	15,4	17,9	20,8	22,5	25,4	27,4	23,5
2						11,6	19,1	18,7	20,5	22,7	36,7	32,9	31,7	27,3
3						12,5	20,3	22,5	25,4	27,0	40,9	37,6	35,0	29,4
4						14,1	23,3	25,2	34,3	31,8	32,8	40,6	38,3	31,3
5						16,1	22,6	30,5	31,4	35,5	45,8	48,4	42,1	40,9
6						17,0	25,8	29,2	42,6	44,3	57,0	55,5	49,0	46,8
7						21,7	28,4	33,9	42,7	57,7	68,7	74,9	62,7	57,7
8	4,8	7,6	9,3	12,8	17,9	22,6	32,6	37,2	56,1	79,7	106,1	124,8	110,2	81,2
9	4,9	7,2	11,6	15,0	20,4	29,0	40,5	40,8	57,3	151,2	196,7	208,3	194,5	160,7
10						32,1	49,3	80,0		315,8	584,3	679,6	391,2	323,6
11						37,6	58,2			1497,4	1337,2	1225,8	1297,9	1550,4
12						40,6	58,4				2082,0	1960,7	2100,4	
13						40,9	55,7				2560,5	2482,1	2595,3	
14	7,2	9,9	14,1	20,0	27,1	37,2	51,4				2839,0	2762,6	2775,0	

Tabulka A.31: Teploty přidavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [$^{\circ}\text{C}$] – induktor, stínění, uzavřený plný vodič

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
24,7	27,6	25,7	28,1	26,4	29,3	Vrchní	29,9	40,3
Proud						Střední	28,8	36,9
31,6 [A]						Spodní	28,8	43,1



Graf A.32: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s uzavřeným plným vodičem

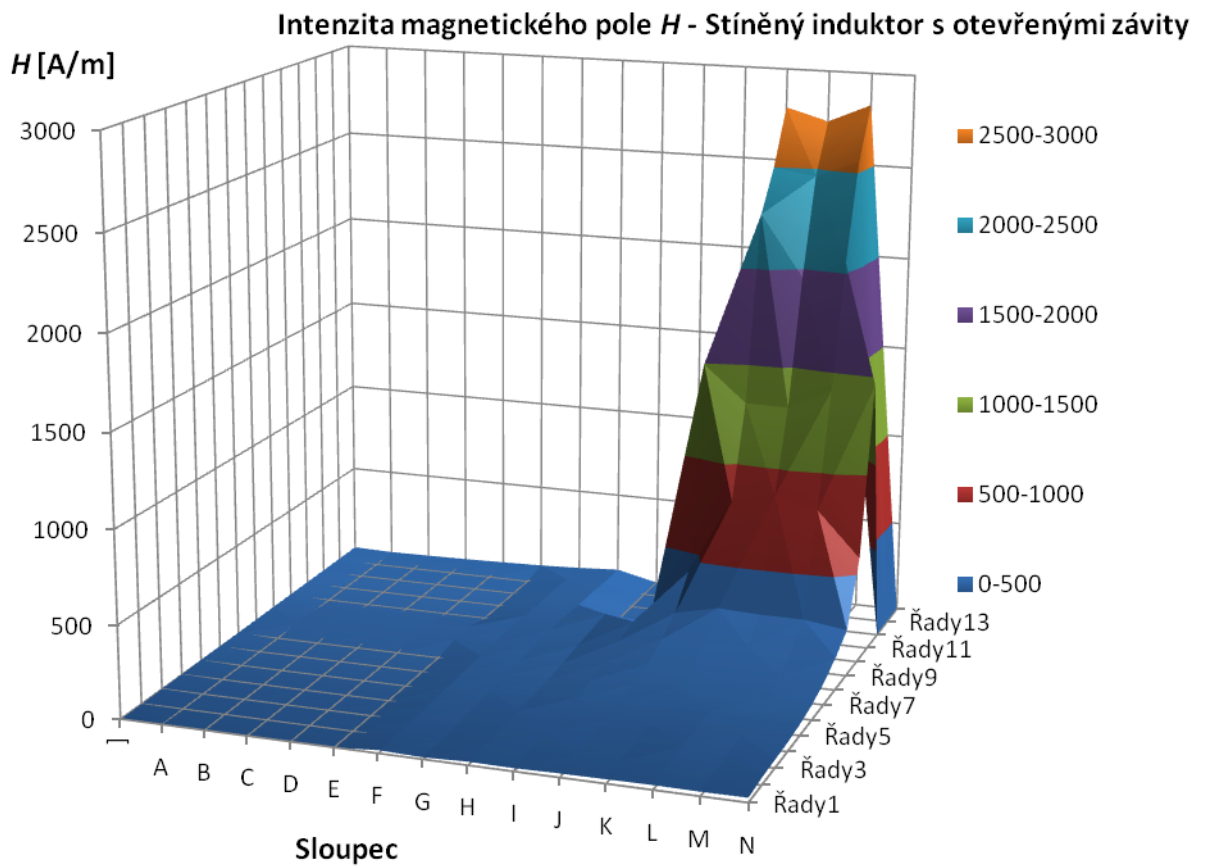
A.2.2.6 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřenými závití nad stíněním

Tabulka A.32: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s otevřenými závití nad stíněním

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	3,8					16,6	10,0	18,6	16,6	20,9	22,7	24,5	22,7	24,7
2						13,4	11,6	23,5	22,3	30,4	32,3	37,7	31,9	37,7
3						18,6	14,7	29,3	33,2	32,1	38,1	52,7	45,0	42,8
4						23,3	21,5	35,6	38,2	44,5	52,8	59,8	55,1	47,0
5						28,9	31,8	33,7	55,2	58,5	62,8	68,6	65,2	60,5
6						33,6	39,1	44,2	67,9	79,5	88,2	90,6	89,1	80,7
7						38,5	47,1	58,4	90,5	115,1	123,4	124,9	125,4	120,2
8	7,5	10,7	14,7	19,5	27,3	37,0	55,3	77,7	132,6	168,4	176,9	179,3	173,6	175,4
9	6,3	11,9	16,4	20,5	29,4	41,5	65,6	90,0	165,1	240,8	293,1	283,4	283,1	252,0
10						43,0	64,8	106,6		400,4	818,1	872,0	817,0	575,3
11						41,8	58,9			1495,6	1301,0	1297,1	1412,1	1460,9
12						40,8	58,1				2285,8	1958,1	2054,4	
13						40,3	53,5				2497,5	2465,2	2557,1	
14	9,0	11,8	15,8	21,5	27,7	38,3	52,9				2791,1	2726,3	2827,8	

Tabulka A.33: Teploty přidavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, otevřené závity nad stíněním

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
22,8	27,1	22,9	26,3	22,8	27	Vrchní	22,7	38,4
						Střední	22,7	34,8
						Spodní	22,8	41,6



Graf A.33: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřenými závity

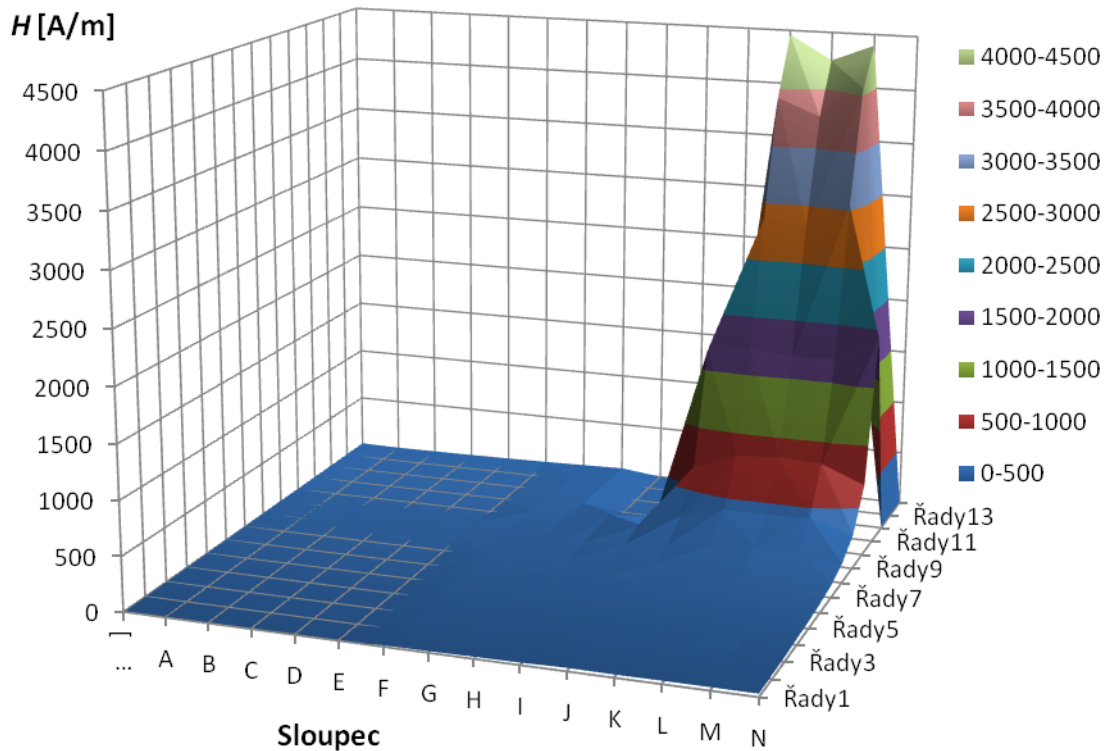
A.2.2.7 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřeným dutým vodičem nad stíněním

Tabulka A.34: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s otevřeným dutým vodičem

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	4,4					13,2	14,9	19,4	22,4	31,6	28,3	30,1	30,4	30,1
2						14,7	19,1	21,9	29,5	32,3	33,4	37,4	41,0	36,9
3						18,5	21,0	26,7	35,6	44,1	47,1	49,7	38,1	42,1
4						20,9	26,1	32,7	38,7	47,6	53,4	57,8	55,0	52,4
5						25,6	32,4	40,1	51,5	60,2	67,8	70,5	69,5	63,9
6						27,5	37,9	49,1	66,3	75,2	88,0	90,6	90,5	83,2
7						32,4	47,5	61,3	82,1	111,7	124,7	136,4	128,5	112,0
8	7,2	10,0	13,7	18,5	26,4	37,3	57,3	80,8	124,5	165,0	210,5	228,5	220,0	179,5
9	7,2	10,9	14,9	20,6	28,0	38,2	62,1	104,8	184,6	312,4	416,7	415,4	433,3	312,2
10						40,6	60,4	113,1		660,4	813,5	840,1	819,9	660,3
11						37,9	53,9			1675,0	1733,4	1687,1	1698,7	1931,9
12						38,2	50,7				2869,9	2821,7	3044,5	
13						36,8	48,7				3927,6	3773,0	4057,7	
14	8,3	11,3	14,9	20,0	26,7	35,2	45,1				4462,1	4240,2	4396,4	

Tabulka A.35: Teploty stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, otevřený dutý vodič

Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
28,6	29,8	29,7	31,7	Vrchní	38,3	42,2
				Střední	36	40,3
				Spodní	39	43,3

Intenzita magnetického pole H - stíněný induktor s otevřeným dutým vodičem

Graf A.34: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřeným dutým vodičem

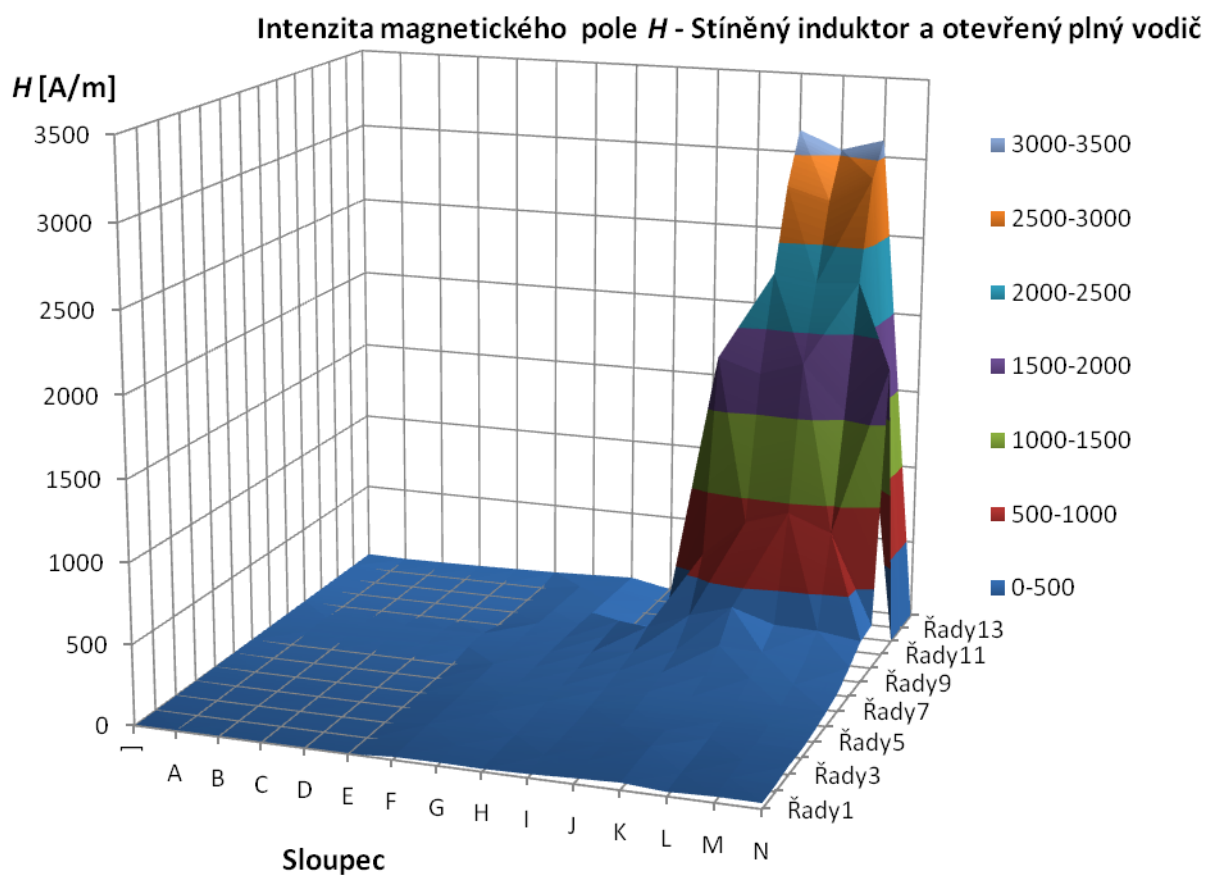
A.2.2.8 Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřeným plným vodičem nad stíněním

Tabulka A.36: Intenzita magnetického pole H vypočtená ze změřených hodnot indukovaného napětí u pro stíněný induktor s otevřeným plným vodičem

H [A/m]	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	4,8					19,2	21,1	17,9	23,5	35,2	45,1	27,1	37,2	35,5
2						20,1	26,0	21,4	35,0	44,7	56,1	40,8	46,5	38,9
3						26,7	27,6	28,3	30,9	45,7	63,8	41,9	53,5	52,4
4						28,5	37,0	31,9	36,3	55,8	62,8	52,8	55,8	49,1
5						26,8	41,0	47,9	50,0	64,4	65,4	66,0	69,2	63,8
6						33,2	44,8	56,3	68,2	86,0	88,7	91,1	89,8	85,2
7						39,1	50,5	69,0	93,9	114,7	131,1	145,0	133,9	115,1
8	8,1	11,2	15,4	20,9	28,0	43,0	58,9	89,0	127,8	168,6	229,8	220,6	195,1	186,0
9	8,5	11,6	16,2	22,3	31,2	44,8	63,4	109,3	199,7	306,7	389,5	307,2	299,5	263,4
10						45,5	64,8	122,0		620,9	860,0	946,6	844,8	278,5
11						43,8	60,2			1825,8	1742,0	1829,1	1552,7	1837,0
12						42,5	57,3				2323,2	2283,1	2304,0	
13						41,5	54,8				2828,0	2751,5	2906,4	
14	8,8	11,9	16,6	23,1	30,0	40,5	51,5				3141,0	3030,7	3105,5	

Tabulka A.37: Teploty přidavného konstrukčního prvku, stínění a induktoru na začátku a na konci měření [°C] – induktor, stínění, otevřený plný vodič

Prvek		Svazek č. 1		Svazek č. 2		Induktor		
Začátek	Konec	Začátek	Konec	Začátek	Konec	Bod	Začátek	Konec
25,9	27,3	26,6	28,6	27,8	30,5	Vrchní	32,8	41,9
						Střední	31	38,7
						Spodní	32,3	44,7



Graf A.35: Rozložení intenzity magnetického pole H [A/m] – Induktor se stíněním svazky transformátorových plechů a s otevřeným plným vodičem

B LittleCoil LC-31 - aplikace pro vizualizaci rozložení elektromagnetického pole kolem indukčního zařízení

B.1 Úvod

Pro potřebu rychlého zpracování a znázornění hodnot naměřených měřicími cívkami malého průměru jsem vyvinul speciální program LittleCoil LC-31. Tento program primárně používám k výpočtu a zobrazení hodnot intenzity magnetického pole H a jejich maximální hodnoty a dále ke grafickému zobrazení rozložení intenzity magnetického pole H formou 3D povrchových grafů. Hodnoty intenzity magnetického pole program počítá ze změřených hodnot indukovaného napětí U pomocí měřicích cívek malého průměru. Software rychle a přehledně znázorňuje vliv změny konfigurace indukčního zařízení na rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného zařízení. V mém případě mně především rychle a přehledně demonstruje vliv přídavných konstrukčních prvků na rozložení intenzity magnetického pole kolem mnou vytvořeného nového fyzikálního laboratorního modelu indukčního zařízení, které jsem zkonstruoval speciálně pro tyto účely s důrazem na měření při vysokém kmitočtu. Program tedy umožňuje rychle vyhodnotit efektivitu konstrukčních změn vedoucích ke zvýšení účinnosti indukčních ohřevů a tím šetří čas, energii a zvyšuje efektivitu výroby a produktivitu. Tuto aplikaci lze použít pro laboratorní i průmyslové využití, přičemž nyní primárně slouží pro laboratorní měření na FEL ZČU a k zpracování výsledků měření do doktorské disertační práce.

B.2 Základní popis

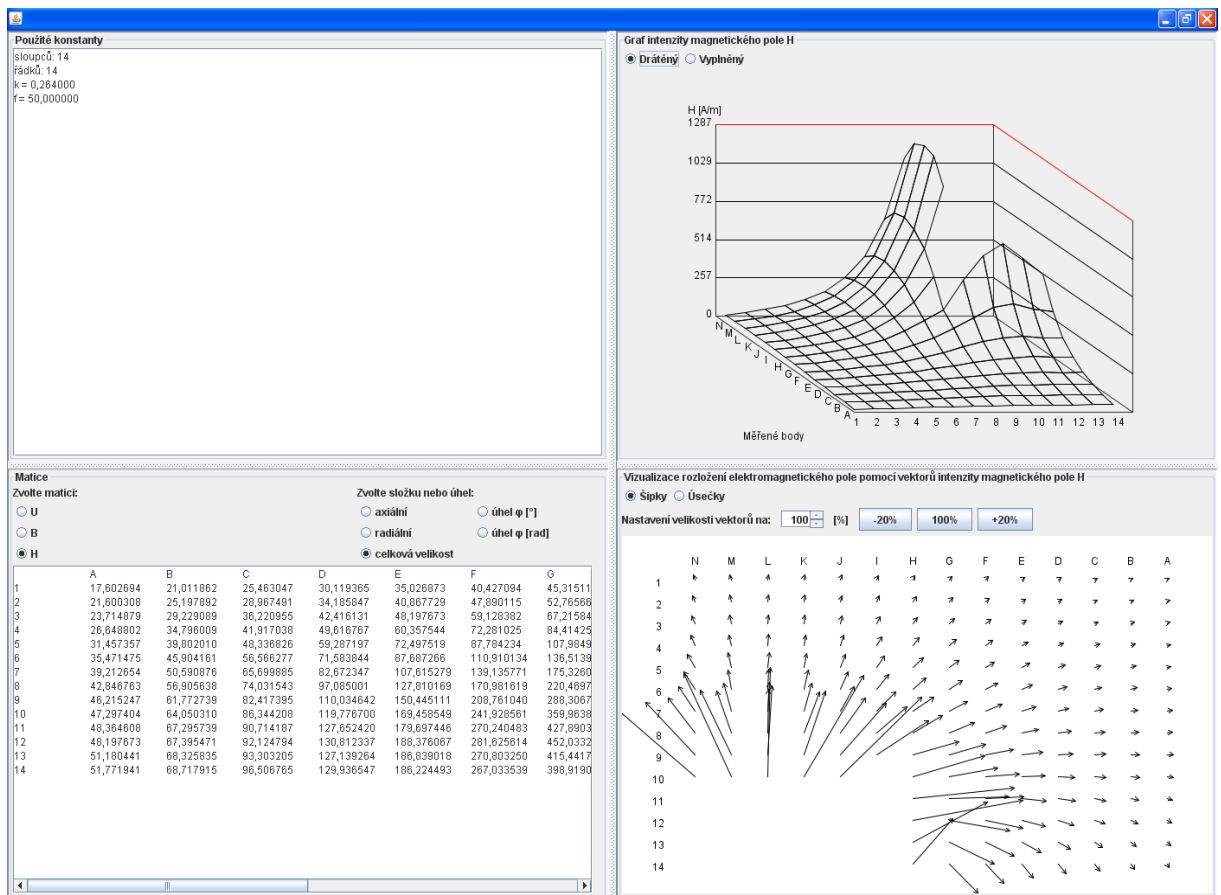
Vytvořená aplikace slouží pro interpretaci výsledků měření měřicími cívkami, které jsou používány ke zjištění rozložení elektromagnetického pole kolem indukčních zařízení. V aplikaci LittleCoil je možné zadat vstupní změřené hodnoty indukovaného napětí U do cívky prostřednictvím tabulky s axiálními a radiálními složkami pro konkrétní měřený bod ve formě souboru formátu CSV. Tabulku běžně kopíruji například ze sešitu aplikace Excel do souboru ve formátu CSV, případně mohou změřené hodnoty elektrického napětí rovnou do požadovaného souboru při měření zapisovat. Dále si uživatel může v mé aplikaci spočítat a zobrazit v tabulce hodnoty veličin U , B a H . U těchto veličin je možné zobrazit velikost

jednotlivých složek, úhel, který spolu svírají, nebo přímo výslednou hodnotu veličiny. Grafickým výstupem je potom barevný povrchový 3D graf nebo černobílý drátěný 3D graf pro intenzitu magnetického pole H s barevně vyznačenou maximální hodnotou intenzity magnetického pole. Další grafický výstup je 2D vizualizace vektorů intenzity magnetického pole, která demonstruje velikost a směr vektorů intenzity H v měřeném bodě v řezu rovinou rz . Dosud se tato vizualizace prováděla ručně kresbou příslušných vektorů v určitém vhodném měřítku na papír s velkou časovou náročností, přičemž můj program tyto vektory ihned automaticky vykreslí v samostatném okně pod 3D grafem po zadání úvodního vstupního souboru. Konstantu měřicí cívky k , nutnou k výpočtu intenzity magnetického pole H z naměřených hodnot indukovaného napětí U , je možné zadat nebo dvěma způsoby spočítat z parametrů měřicí cívky zadaných uživatelem v úvodním okně programu. Software LittleCoil je implementován v programovacím jazyce Java. K jeho spuštění je nutné mít nainstalován SW Java Runtime Environment ve verzi 6 nebo novější a spouštěcí soubor má příponu jar. Obrázky s komentáři uvedené níže znázorňují úvodní dialogové okno se vstupními parametry (Obrázek B.1) a hlavní okno s vypočtenými výstupními daty (Obrázek B.2, Obrázek B.3).

Obrázek B.1: Úvodní dialogové okno se vstupními parametry

Obrázek B.1 jsem koncipoval jako okno určené k zadání tabulky vstupních hodnot indukovaného napětí změřeného měřicí cívkou ve formě souboru ve formátu CSV. Níže je

nutné zvolit jednotky pro elektrické napětí, ve kterých je zadána vstupní tabulka. Pro frekvenci 50 Hz je výhodné mít vstupní hodnoty U v milivoltech, zatímco pro vysokou frekvenci je vzhledem k vyšší změřené napět'ové hladině výhodnější použít jednotku základní. Další volba se týká konstanty měřicí cívky k , přičemž já pro svou potřebu vždy přímo zadávám konstantu k určenou pomocí měření cejchováním měřicí cívky. Pro případ, kdy uživatel měřicí cívku dříve necejchoval, jsem uvedl do nabídky možnost si tuto konstantu dvěma způsoby spočítat s omezenou přesností dle vzorců, uvedených v teorii předchozí kapitoly o nové měřicí cívce, na základě rozměrů měřicí cívky, které lze jednoduše přímo na místě změřit. Poslední nutnou volbou je frekvence napájecího proudu induktoru, při které došlo k měření vstupních hodnot indukovaného napětí do měřicí cívky.

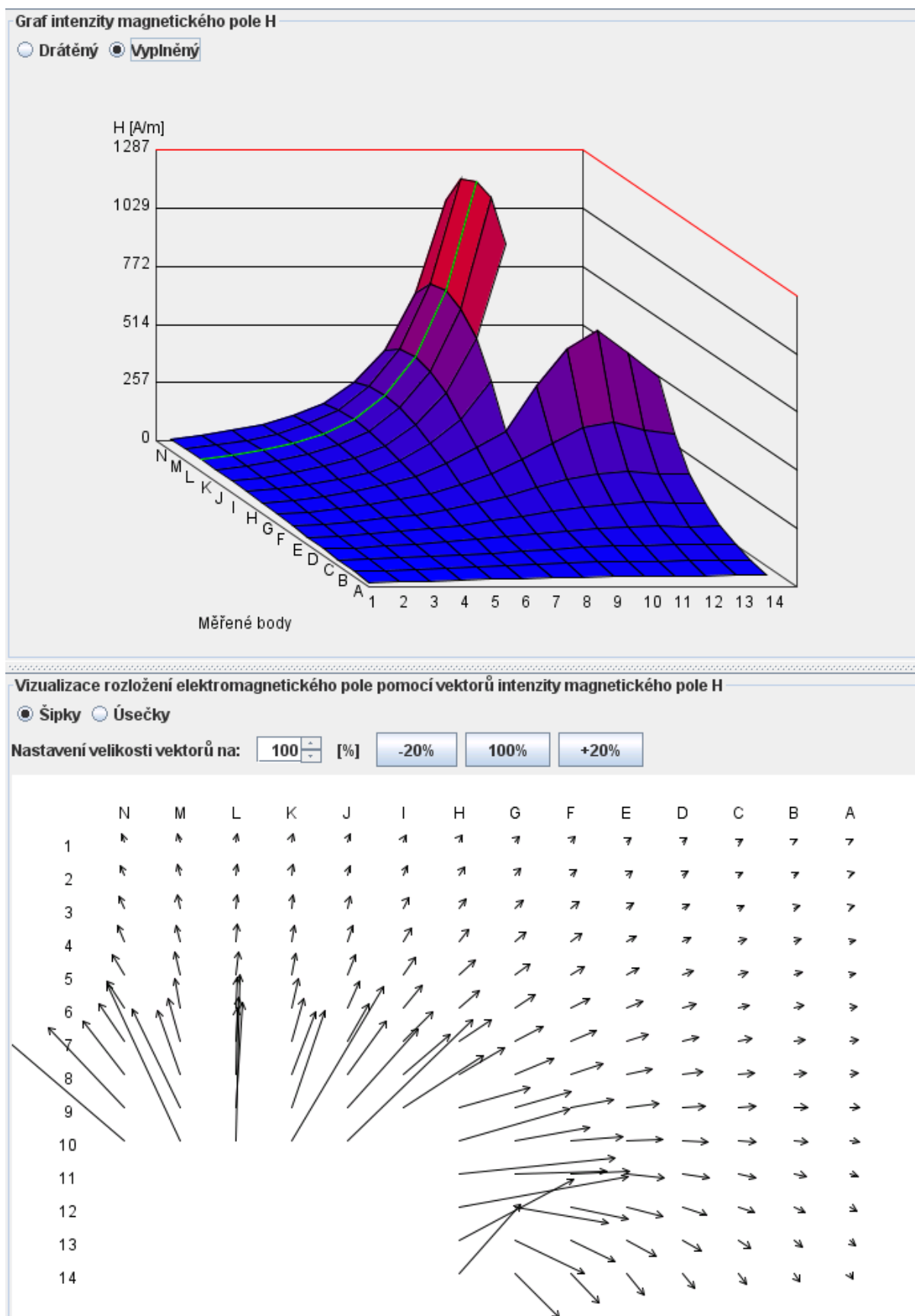


Obrázek B.2: Výstupní dialogové okno s vypočtenými parametry, 3D drátěným černobílým grafem a 2D vizualizací vektorů

Obrázek B.2 zobrazuje výstupní dialogové okno rozdělené na čtyři základní podokna. Levé horní podokno ukazuje základní čtyři použité konstanty pro výpočty, a to počet sloupců vstupní tabulky změřených indukovaných napětí, dále počet řádků vstupní tabulky změřených indukovaných napětí, aktuální konstantu k zvolené měřicí cívky a zvolenou frekvenci. Levé dolní okno ukazuje matici, resp. tabulku hodnot intenzity magnetického pole H vypočtené ze

změřených hodnot indukovaného napětí U prostřednictvím známých vzorců, uvedených v předchozí kapitole týkající se nově zkonstruované měřicí cívky, s použitím k a f , uvedených v levém horním podokně. Uživatel si zde dále může zobrazit zadané hodnoty indukovaného elektrického napětí U ze vstupního souboru s příponou CSV, vypočtené hodnoty magnetické indukce B a intenzity magnetického pole H , přičemž pro všechny tyto tři veličiny U , B , H je možné zobrazit jak celkovou velikost vektoru, tak velikost axiální nebo radiální složky. Dále je možné zobrazit úhel, který tyto složky svírají, a to ve stupních nebo v radiánech dle přání uživatele. Pravé horní podokno ukazuje jeden z možných grafů – drátěný černobílý 3D graf intenzity magnetického pole H s vyznačenou maximální hodnotou. Dále je zde možné zobrazit barevný povrchový 3D graf s vyznačenou maximální hodnotou, viz Obrázek B.3 (horní podokno). Pravé dolní podokno znázorňuje vizualizaci rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného indukčního zařízení pomocí vektorů intenzity magnetického pole H . Uživatel si zde může znázornit vektory jako samotné úsečky nebo jako úsečky s šipkou představující směr vektoru. Dále má možnost si velikost úseček při zachování jejich vzájemného poměru velikostí zvětšovat nebo zmenšovat pomocí přímého zadání hodnoty klávesnicí do kolonky “Nastavení velikosti vektorů na: [%]” nebo zvýšením eventuelně snížením procentuální hodnoty zvětšení tlačítkem pomocí klinutí myši po 20-ti procentech, a to proto, aby bylo možné si vektory dle potřeby názorně prohlédnout přiblížením v každém vyšetřovaném bodě měřené oblasti. Pomocí klávesnice a kolonky nebo jedním kliknutím myši na prostřední tlačítko lze potom velikost vektorů nebo úseček vrátit na původní rozměry.

Právě poslední vizualizace představuje programově náročný úkol, kdy díky relativně řídké síti měřených bodů měřicí desky a malým rozměrům stínících prvků nebo stínících svazků transformátorových plechů je někdy obtížné stanovit správné natočení vektorů. Při složité geometrické konfiguraci je kontrolně výhodné vycházet z předpokladu znalosti rozložení elektromagnetického pole kolem zkoumaného zařízení. Funkce vizualizace pomocí vektorů je v programu LittleCoil neustále testována a zdokonalována a do budoucna je v plánu vytvoření kontrolní chytré předpovědní mapy, která by například bez přímého zásahu uživatele byla schopná chyby měření odhalit a tím způsobený chybný směr vektorů opravit na správný. Jinak by spolehlivost této vizualizace vektorů mohla být zlepšena menší vzdáleností měřených bodů při současném několikanásobném opakovaném měření.



Obrázek B.3: Výstupní dialogové okno - detail s 3D povrchoým barevným grafem a 2D vizualizací vektorů