

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh a optimalizace induktoru pro povrchové kalení**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

**ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Roman KADLEC**  
Osobní číslo: **E14N0014P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Návrh a optimalizace induktoru pro povrchové kalení**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Proveďte podrobnou rešerši současných trendů v indukčním kalení a jeho numerického modelování.
  2. Formulujte matematický model indukčního kalení.
  3. Pro zadanou geometrii navrhnete induktor a vytvořte výrobní výkresovou dokumentaci.
  4. Navržený induktor vyrobte (zajistěte výrobu) a proveďte experiment.
  5. Srovnajte výsledky experimentu s výsledky vypočtenými na základě modelu.
-

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Lugi, S.; Forzan, N.; Aliferov, A.: Induction and Direct Resistance Heating, Springer International Publishing Switzerlan, 2015.
2. Rudnev, A; Loveless, D.; Cook, R. L., Black, M.: Handbook of Induction Heating (Manufacturing Engineering and Materials Processing Series), CRC Press, 2002

Vedoucí diplomové práce: Ing. David Pánek, Ph.D.


Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016

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



  
Doc. Ing. Vlastimil Skotil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

---

## **Abstrakt**

Diplomová práce je rozdělena do čtyř částí. Na úvod jsou uvedeny základní komponenty indukčního ohřevu, jejich popis a funkce. Součástí je také výčet a rozbor použitých vzorců potřebných pro výpočet elektromagnetického a tepelného pole. Stěžejním bodem práce je návrh samotného induktoru pro povrchové indukční kalení včetně technické dokumentace. V rámci návrhu jsou vytvořeny simulace ve dvou programech, konkrétně Comsol a Rillfem. Následně je realizován experiment s reálným modelem induktoru a jsou provedena příslušná měření na vsázce. Závěrem jsou poznatky získané na základě praktického experimentu diskutovány a porovnávány s teoretickými návrhy a programovou simulací.

## **Klíčová slova**

Indukce, povrchové kalení, elektromagnetické pole, teplotní pole, COMSOL, RillFEM

## **Abstract**

This diploma thesis is divided into four parts. In the introduction there are the basic components of induction heating, their descriptions and functions. There is also included an analysis of formulas used to calculate the electromagnetic and thermal fields. The main part of this work is the design of the inductor itself for surface induction hardening, including technical documentation. The designs and simulations were created in two programs, namely Comsol and RillFEM. Afterwards there is conducted an experiment with real inductor model and is implemented by appropriate measurements in the stock. At the end of this diploma thesis the knowledge gained from practical experiments are discussed and compared with the theoretical designs and simulations.

## **Keywords**

Induction, surface hardening, electromagnetic field, thermal field, COMSOL, RillFEM

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 11.5.2016

Roman Kadlec

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce panu Ing. Davidu Pánkovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále také děkuji Ing. Antonínu Podhrázkému Ph.D. za cenné informace z praxe, poskytnutí výrobních prostředků a pomoc při odzkoušení výrobku.

V neposlední řadě děkuji své rodině za trpělivost a podporu, kterou mě v průběhu mých studií zahrnovala.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 HLAVNÍ ČÁSTI INDUKČNÍHO OHŘEVU</b> .....	<b>12</b>
1.1 ZÁKLADNÍ ŘETĚZEC .....	12
1.2 USMĚRŇOVAČ .....	12
1.3 STŘÍDAČ .....	13
1.4 SPÍNACÍ PRVKY .....	15
1.5 TRANSFORMÁTOR .....	15
1.6 CHLAZENÍ .....	16
1.7 INDUKTOR .....	17
1.8 KOMPENZACE.....	20
<b>2 NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ</b> .....	<b>21</b>
2.1 PROGRAMOVÉ MOŽNOSTI MODELOVÁNÍ .....	21
2.2 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE .....	21
2.3 TEPLTNÍ POLE .....	23
<b>3 NÁVRH INDUKTORU</b> .....	<b>26</b>
3.1 DEFINICE VSÁZKY.....	26
3.2 POUŽITÁ TECHNOLOGIE KALENÍ .....	27
3.3 DEFINICE OHŘEVU .....	27
3.4 DEFINICE MODELU.....	28
3.5 ENERGETICKÝ ODHAD .....	32
3.6 SIMULACE V PROGRAMU COMSOL .....	33
3.7 SIMULACE V PROGRAMU RILLFEM .....	40
3.8 VÝROBA INDUKTORU.....	49
<b>4 EXPERIMENT S PROTOTYPEM A JINÝMI INDUKTORY</b> .....	<b>53</b>
4.1 POKUS S PROTOTYPEM .....	53
4.2 POKUS S DALŠÍMI INDUKTORY .....	55
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>58</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>60</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>61</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>62</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b> .....	<b>62</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>63</b>



## Seznam symbolů a zkratk

### Fyzikální veličiny:

$A$ .....	Magnetický vektorový potenciál	(Wb.m <sup>-1</sup> )
$B_r$ .....	Remanentní indukce	(T)
$C_p$ .....	Tepelná kapacita	(J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$E_0$ .....	Obecná intenzita elektrického pole	(V.m <sup>-1</sup> )
$f$ .....	Frekvence	(Hz)
$H$ .....	Intenzita magnetického pole	(A.m <sup>-1</sup> )
$I_1$ .....	Proud v induktoru	(A)
$I_2$ .....	Proud v sázce	(A)
$J$ .....	Intenzita elektrického proudu	(A.m <sup>-2</sup> )
$k_i$ .....	Činitel vazby induktoru	(-)
$k_{iv}$ .....	Tepelná vodivost vsázky	(W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )
$L_2$ .....	Indukčnost se vsázkou	(H)
$L_{i0}$ .....	Indukčnost bez vsázky	(H)
$m$ .....	Hmotnost	(kg)
$p$ .....	Měrné ztráty	(W.m <sup>-3</sup> )
$q$ .....	Tepelný tok	(W.m <sup>-2</sup> )
$S$ .....	Plocha	(m <sup>2</sup> )
$t$ .....	Čas	(s)
$T$ .....	Teplota	(°C)
$V$ .....	Objem	(m <sup>3</sup> )
$v$ .....	Rychlost	(m.s <sup>-1</sup> )
$W$ .....	Energie	(J)
$\alpha$ .....	Koeficient přestupu tepla	(W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )
$\rho_\Omega$ .....	Měrný odpor materiálu	( $\Omega$ .m <sup>-1</sup> )
$\mu$ .....	Permeabilita	(H.m <sup>-1</sup> )
$\mu_0$ .....	Permeabilita vakua	(H.m <sup>-1</sup> )
$\mu_r$ .....	Poměrná permeabilita vsázky	(-)
$\lambda$ .....	Tepelná vodivost	(W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> )
$\gamma$ .....	Měrná elektrická vodivost	(S.m <sup>-1</sup> )

$\delta$ .....	Hloubka vniku	(m)
$\rho$ .....	Měrná hmotnost	(kg.m <sup>-3</sup> )
$\omega$ .....	Úhlová frekvence	(rad.s <sup>-1</sup> )

**Ostatní znaky:**

C .....	Kondenzátor
D1-D6 .....	Diody 1 až 6
S1-S4 .....	Spínač 1 až 4
Tr. ....	Transformátor
U,V,W .....	Fázové vodiče napájecí soustavy
USM. ....	Usměrňovač
Z .....	Zátěž
$\Omega 1$ .....	Oblast vsázky
$\Omega 2$ .....	Oblast vzduchu
$\Omega 3$ .....	Oblast induktoru
$\Omega 4$ .....	Oblast feritu

**Použité konstanty:**

permeabilita vakua:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [H.m<sup>-1</sup>]

## Úvod

Indukční ohřev je bezkontaktní forma přenosu energie na principu elektromagnetické indukce. Na rozdíl od spádového systému, jako je například: plynový hořák přenáší energii pomocí plamene do vnějšího pláště a posléze dále do vnitřního materiálu, indukční ohřev vytváří teplo přímo v cílové oblasti „uvnitř pláště“. Toto teplo je vytvořeno dvojí formou - vlivem ztrát hysterezních a ztrát vířivými proudy. U feromagnetických materiálů jsou významné ztráty hysterezní a u ostatních převažují ztráty vířivými proudy.

V některých aplikacích je důležitá rychlost ohřevu, té lze docílit vysokým výkonem vstupujícím do induktoru. Při velkém výkonu protékají induktorem značné proudy, řádově stovky ampérů, a tyto proudy působí oteplení. Nelze opomenout, že tento systém je v podstatě řízený zkrat a jsou zde kladeny velké nároky na chlazení samotného induktoru, měniče a oddělovacího transformátoru.

V dnešní době je indukční ohřev použit ve větší míře v průmyslových aplikacích např.: kalení přetlakových lahví, rychlé kalení spojovacích materiálů, ohřev a následná tvarová úprava, indukční svařování, ohřev za účelem tepelné roztažnosti atd. Dále lze také nalézt indukční vařiče v domácnostech, ty dokáží přivést vodu k varu do 10 sekund.

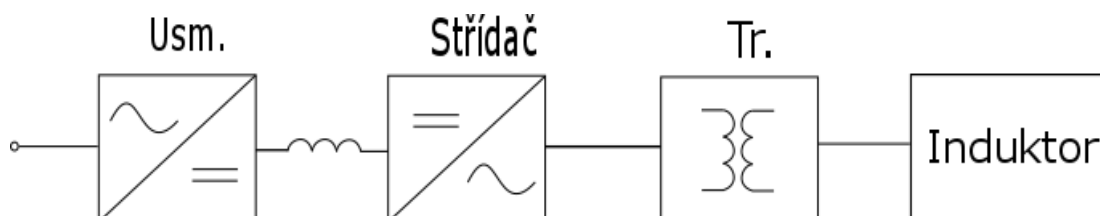
Obecně lze říci, že indukční ohřev vytlačuje ostatní ohřevy na principu spádového přenosu tepla z důvodů větší efektivity ohřevu, rychlosti ohřevu a přesnosti ohřivaného místa. Také zde hraje roli vliv použité energie. V případě indukčního ohřevu je zapotřebí jednofázového přívodu (v menších aplikacích), anebo třífázového přívodu (ve větších aplikacích), tedy obecně přívod elektřiny. Jelikož elektřina je hlavní zdroj energie ve všech oblastech, je dostupná všude, na rozdíl od propan butanu (nutno doplnit o přívod kyslíku pro větší výhřevnost plynu). Starší podniky přecházejí na ohřev pomocí indukce z důvodu bezpečnosti. Dříve se používaly plynové hořáky s rozsáhlým systémem distribuce, což vedlo k častým revizím vedení a zvýšeným nárokům na bezpečnost. Přechodem na indukční systémy podniky mohou eliminovat dodatečné náklady na údržbu a celkovou závislost na dodávce potřebných plynů.

## 1 Hlavní části indukčního ohřevu

V této kapitole jsou popsány jednotlivé části indukčního ohřevu včetně jejich rozboru a vlastností. Na konci kapitoly je uveden postup návrhu induktoru a energetický odhad.

### 1.1 Základní řetězec

Každý indukční ohřev se skládá z několika částí, viz Obr. 1. První je napájení jednofázové nebo třífázové. Další částí je usměrňovač, který převádí střídavé napětí na stejnosměrné. Mezi usměrňovačem a střídačem zpravidla bývá tlumivka, jejíž funkcí je ochrana a potlačení vyšších harmonických. Následuje střídač, který opět mění napětí ze stejnosměrného na střídavé o jiné (vyšší) frekvenci než je frekvence síťová (50Hz). Za střídačem je připojen transformátor, který poměrově převádí proud a napětí, jež vedou do induktoru. Často je potřeba způsobit rezonanci obvodu. Hlavním důvodem je dosažení požadovaného výkonu na výstupu indukční sestavy, čehož lze dosáhnout přidáním kapacity před transformátor. Samotný induktor je připojen na sekundární straně transformátoru. [5] [6] [8]

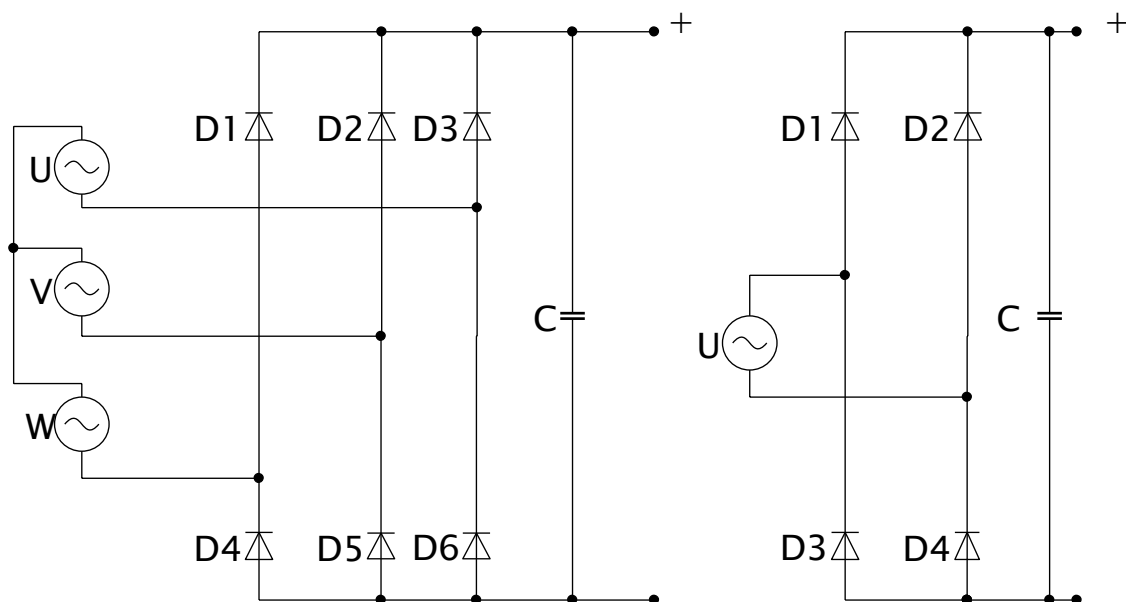


Obr. 1 Základní řetězec indukčního ohřevu

### 1.2 Usměrňovač

Aby bylo možné měnit výstupní frekvenci měniče, je potřeba nejdříve usměrnit vstupní síťové napětí. Následně je usměrněné napětí za pomoci střídače rozstřídáno na frekvenci pracovní. Tento typ nepřímého měniče se stejnosměrným meziobvodem patří mezi nejpoužívanější, a to nejen v oblasti indukce. V současné době se v praxi používají dvě schémata v závislosti na požadované energii. Pokud je v aplikaci dosahováno výkonu do 3 kW, lze použít jednofázové dvojpulzní můstkové zapojení (Obr. 2, pravá část). V takovém případě je střídavé napětí usměrněno na hodnotu 325 V. Pokud je v aplikaci dosahováno výkonu nad 3 kW, musí být využit třífázový šestipulzní usměrňovač

(Obr. 2, levá část), který usměrní napětí na hodnotu 565 V. Výstupní napětí v obou dvou případech je menší o úbytek na diodách, jež činí od 0,6 V až po 4 V u velkých výkonových diod. Tento úbytek je v praxi často zanedbáván, ale tepelné účinky procházejícího proudu nikoliv. Procházející proud má přímý vliv na oteplení usměrňovacích součástek, a proto je nutné, aby bylo zakomponováno dostatečné chlazení. Vzhledem k tomu, že síť má povolené poklesy napětí, je nutné s těmito jevy počítat a měnič osadit navíc o zařízení na kontrolu stejnosměrného napětí. V případě poklesu síťového napětí pod stanovenou mez, dojde k vypnutí nebo zablokování celého měniče, neboť stejnosměrné napětí má přímý vliv na výstupní výkon. Pokud by ochrany nezareagovaly, vsázka by nedosáhla požadované teploty a následná tvrdost vsázky by neodpovídala příslušným standardům. [3]



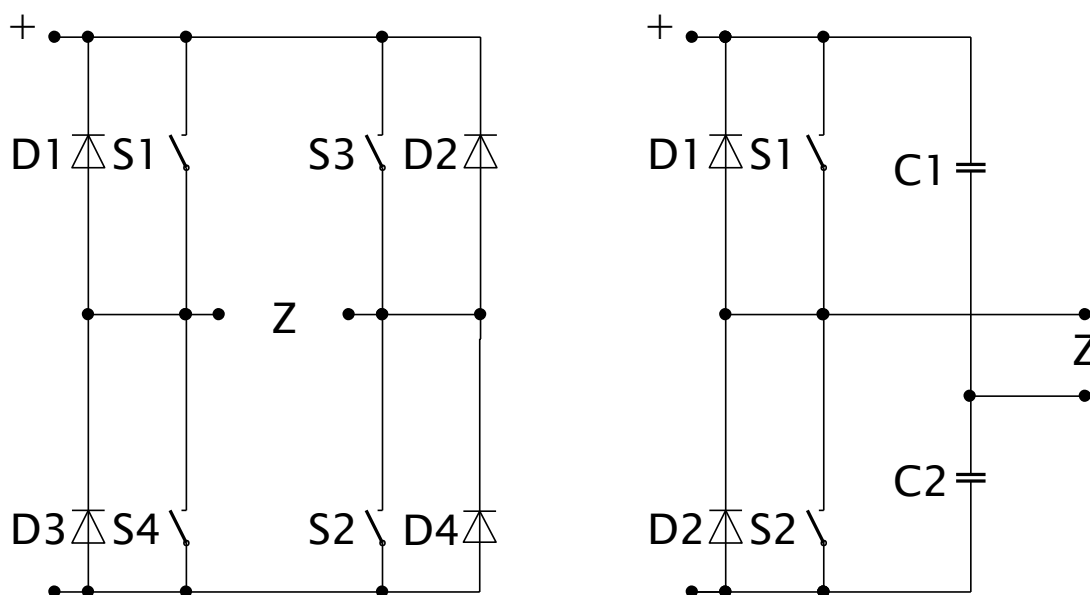
Obr. 2 Třífázový usměrňovač a jednofázový usměrňovač

### 1.3 Střídač

Výstupní frekvence z měniče je řízena střídačem. Ve spojení s indukčním ohřevem je nejčastěji využíván střídač jednofázový. Jednofázový střídač typu „plný můstek“ (Obr 3, levá část) pracuje v několika fázích. V první fázi dojde k sepnutí spínače S1 a S2, a tím začne přes zátěž jedním směrem procházet proud. Ve druhé fázi jsou všechny spínací prvky rozepnuté a proud je uzavřen zpětnými diodami. Následně dojde k sepnutí spínače S3 a S4 a tím je způsoben průchod proudu opačným směrem. V poslední fázi jsou opět všechny spínače znovu rozepnuty. Tento děj je neustále opakován, přičemž změna

čas mezi první a poslední fází určuje frekvenci výstupního signálu střídače. Mezi výhody tohoto typu zapojení patří menší zvlnění stejnosměrného obvodu a stabilnější chod. Nevýhodami jsou větší spínací ztráty a menší rozsah použitelné frekvence. Jednofázový střídač typu „půl můstek“ pracuje taktéž v několika fázích. Prvním krokem je sepnutí spínače S1, čímž do napěťového kapacitního děliče začne jedním směrem protékat nabíjecí proud. Poté jsou všechny spínací prvky vypnuty. Ve třetím kroku je sepnut spínač S2 a proud z kapacitního děliče napětí protéká přes zátěž opačným směrem. V posledním kroku jsou opět všechny spínače vypnuty. Výhodami tohoto typu střídače jsou lepší frekvenční vlastnosti a menší spínací ztráty. Nevýhodami je horší stabilita a fakt, že přídavné kapacity mají částečný vliv na kompenzaci indukčnosti (přispívá mnohem více k činnému výkonu).

V obou typech je mezi sepnutí z důvodu zajištění nečinnosti spínačů vkládán mrtvý čas neboli deadtime. Ten zajišťuje, že nedojede k sepnutí S1 a S4 u plného můstku nebo S1 a S2 u půl můstku. Sepnutí S1 a S4 by vedlo ke zkratu měniče, a to by způsobilo destrukci spínacích součástek. Dále je nutné zavést zpětnou vazbu proudu (popřípadě čidlo teploty) tak, aby měnič buď blokoval celkovou činnost, anebo omezoval délku sepnutí jednotlivých fází (omezí proudy, nikoliv frekvenci). V praxi se mnohem více používají plné můstky než půl můstky. [3] [5]



Obr. 3 Jednofázový střídač plný můstek a půl-můstek

## 1.4 Spínací prvky

V měniči lze použít obecně čtyři typy součástek: IGBT, MOS, tyristory a bipolární tranzistory ve výkonovém provedení. Protože všechny aplikace s indukčním ohřevem se chovají jako RL zátěž, jsou vždy spínací prvky doplněny o zpětné diody. Součástka typu IGBT je optimalizována na spínání cca do 50 kHz a proudy řádově desítky ampérů. V mnoha aplikacích se tedy využívá těchto tranzistorů v paralelním chodu tak, aby se proud rozdělil mezi jednotlivé spínače. Spínače MOS svojí konstrukcí dovolují spínat až 250 kHz, ale s menšími proudy než IGBT. Tyristory se využívají v měničích, kde je potřeba pracovat s velmi vysokými proudy a malou frekvencí spínání.

V souvislosti s indukčním kalením jsou v měniči použity IGBT součástky. Ty mají vhodné spínací vlastnosti a dovolují používat potřebnou pracovní frekvenci, která se pohybuje od 8 kHz až po 15 kHz. [3]

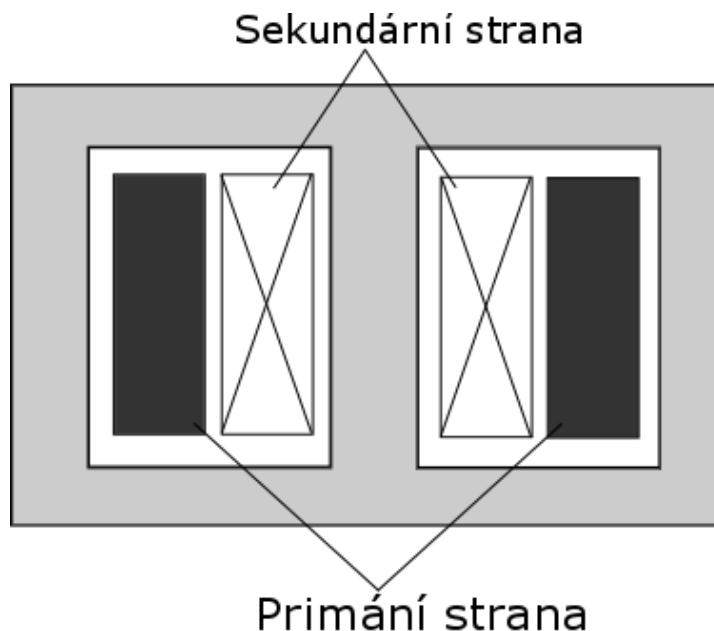
## 1.5 Transformátor

Transformátory postavené z plechových jader jsou určeny pro frekvenci 50 Hz. Pokud by frekvence byla vyšší, transformátorové plechy by byly ohřáty nad přípustnou mez a došlo by k jejich zničení. V oblasti indukčních ohřevů se používají transformátory s feritovými jádry. Feritová jádra mají mnohem menší hysterezní ztráty při přemagnetování než klasická jádra složená z plechů. Z toho důvodu je možné využívat je i při větších frekvencích, až do 200 kHz. Funkcí tohoto prvku v indukčním ohřevu je správný převod proudu na požadovanou hodnotu. Transformátor napomáhá při kompenzaci jalové složky energie (vzhledem k převodu transformátoru).

Například proud o velikosti 2000 A není možné provozovat rovnou z měniče, a proto se musí použít transformátor s převodem 1:10. Tento transformátor bude mít na vstupu 200 A, a převod zajistí, že na sekundární straně bude požadovaných 2000 A. U transformátorů je impedanční převod realizován s druhou mocninou. Taktéž nám tento převod umožňuje efektivně kompenzovat jalovou složku energie s mnohem menší kapacitou.

Kompenzace indukčního ohřevu je prováděna na primární straně. V těchto aplikacích je vyžadován tvrdý zdroj a tomu odpovídají plášťové transformátory a uspořádání jejich vinutí, viz Obr. 4. Sekundární strana kalícího transformátoru je umístěna blíže ke středu

a primární strana dále od středu. Toto uspořádání nelze vždy dodržet především z důvodu malého množství závitů. Proto se tedy sekundární strana může někdy nacházet v horní části blíže ke středu a strana primární pod a vedle ní. [4]



Obr. 4 Uspořádání transformátoru

K výrobě vinutí jsou používány duté měděné trubky. Především z důvodu, že při vysokých frekvencích se vyskytuje tzv. povrchový jev. To znamená, že proud protéká pouze slabou vrstvou vodiče (trubky), a proto nemá smysl používat plný profil. Výhodou použití trubek je dosažení nižší hmotnosti transformátoru. Další podstatnou výhodou je možnost využití dutin trubek k cirkulaci chladicího média. Vzhledem k vysokému výkonovému zatížení, je totiž nezbytné celé zařízení chladit speciální kapalinou, aby nedošlo k přehřátí a následné destrukci zařízení.

## 1.6 Chlazení

Indukční ohřevy v průmyslových aplikacích vyžadují stabilní a bezproblémový chod. Všechny použité komponenty v systému jsou teplotně závislé a se změnou teploty se mění i jejich parametry. Proto jsou prvky indukčního ohřevu chlazeny kapalinou, která protéká přes výměník a veškeré odpadní teplo je odváděno pryč ze systému. Ve skutečnosti je chladicí systém tvořen vnitřním okruhem a vnějším odvodem tepla.

Ve vnitřním okruhu dochází k odvádění přebytečného tepla z transformátoru a induktoru. Pro vnější odvod lze využít výměníky voda – vzduch neboli výparník anebo



voda - voda tzv. křížový výměník. Výparník s nuceným prouděním, kde vzduch proudí kolem chladícího žebrování, nepotřebuje žádné další připojení kapaliny ani nádrže. Naopak křížový výměník je nejefektivnější způsob pro odvádění tepla. Je však velmi náročné zajistit další přívod chladící kapaliny a dostatečnou kapacitou nádrže.

Druh chlazení, které bude použito, se odvíjí od plánovaného výkonu indukčního ohřevu a potřebnému odvodu tepla. [8]

## 1.7 Induktor

Posledním článkem v řetězci je samotný induktor. Nejčastějším materiálem pro výrobu induktoru je měď, protože svými materiálovými vlastnostmi vyhovuje těmto aplikacím nejvíce. Tento materiál nedeformuje elektromagnetické pole, neboť permeabilita je téměř 1 a má vysokou elektrickou vodivost. Měděné induktory jsou vyráběny v mnoha variantách. Podle potřeby lze využít kulaté nebo hranaté profily o různých rozměrech. Jelikož skoro všechny aplikace vyžadují chlazení, jsou tyto profily duté.

Tvar a umístění induktoru vzhledem k poloze vsázky má přímý vliv na účinnost ohřevu. Tento aspekt lze vyjádřit pomocí činitele vazby induktoru:

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} \sqrt{\frac{L_2}{L_{i0}}}, \quad (1.1)$$

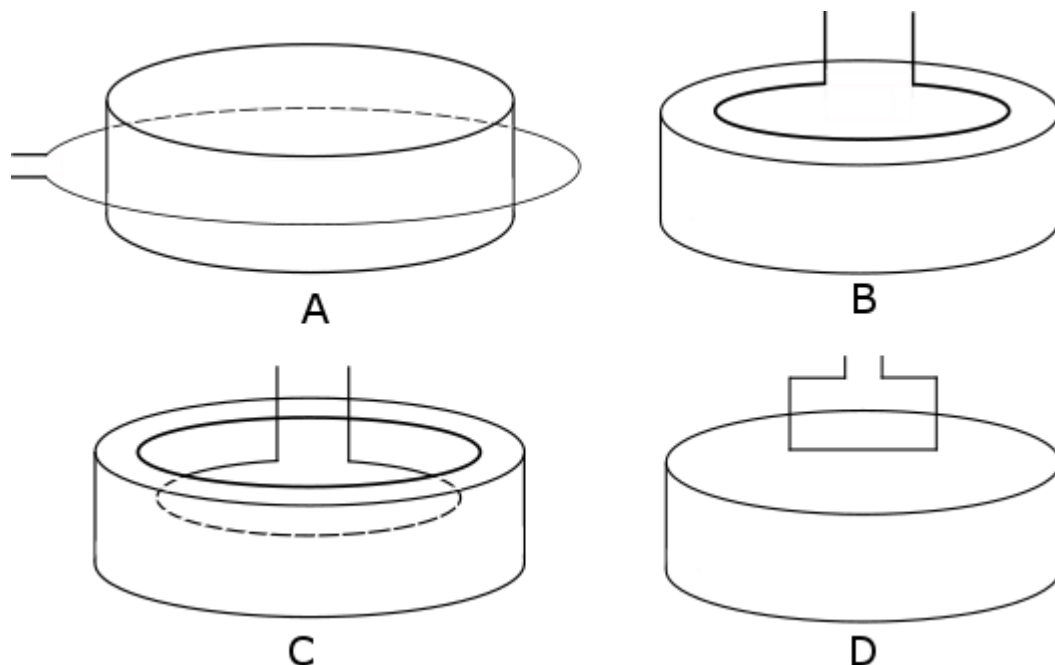
kde  $I_2$  je vířivý proud v sázce (A),  $I_1$  je proud pracovním induktorem (A),  $L_2$  je indukčnost s vloženou vsázkou (H) a  $L_{i0}$  indukčnost bez vložené vsázky.

Činitele lze rozdělit v zásadě na čtyři skupiny. V první skupině je induktor kolem vsázky a činitel vazby se pohybuje mezi 0,7 až 0,85. Tento stav je považován za vazbu těsnou.

Druhou skupinou je stav, kdy je induktor přiložen k ploše vsázky a má střední vazbu od 0,5 až 0,7.

Ve třetím případě je induktor umístěn do dutiny, kde je ohříváný materiál situován kolem induktoru. Zde se jedná o vazbu volnou až střední a její hodnota je od 0,4 po 0,6.

Poslední skupinou je přiložení jedné strany induktoru k ohřívanému materiálu. To znamená, že vazba je volná a nabývá hodnot od 0,3 až 0,5. Všechny čtyři skupiny jsou vyobrazeny níže na Obr. 5.



Obr. 5 Základní polohy jednozávitových induktorů [7, s. 89]

Aby byl ohřev efektivní, je potřeba dodržet polohu induktoru pro nejtěsnější vazbu. Pokud tuto podmínku dodržet nelze, musí být proveden ohřev s větší energetickou náročností. Možnou alternativou pro zlepšení ohřevu je přidání feritu k induktoru ze strany, kde není vsázka. Například pro kalení dutých materiálů je využíváno přidání feritu do vnitřního prostoru induktoru, neboť ohřev jinou variantou je energeticky náročný. Tím se zvětší vazba mezi induktorem a vsázkou. [7] [8]

Induktory lze vyrábět v mnoha variantách. Například přichycení induktoru bude záviset na provedení výstupu z transformátoru. Tento výstup bývá často řešen pomocí přírub, což jsou dvě měděné desky s otvory na šroubení. Protikus k těmto deskám jsou příruby induktoru. Tento způsob uchycení umožňuje snížit přechodový odpor na minimum. Dále je k tomuto uchycení napojen přívod chlazení pro induktor a chlazení sekundárního vynutí. Chlazení může být provedeno i s externím přívodem chladiwa pro vysoké výkony ohřevu tak, aby byl zajištěn dostatečný odvod odpadního tepla. Konstrukční řešení uchycení se bude vždy lišit v závislosti na výrobci. Na Obr. 6 je vidět příklad část rozlženého transformátoru a realizace uchycení pro induktor.



*Obr. 6 Příklad provedení transformátoru a uchycení induktoru*

Na Obr. 7 pod textem jsou vidět příklady induktorů pro kalení. Na levé straně je induktor s vestavěnou sprchou a externím přívodem chladicího media. Vpravo si lze prohlédnout induktor pro dvojité kalení jedním induktorem.



*Obr. 7 Příklad induktoru pro kalení se zabudovanou sprchou vlevo a pro dvojité kalení jedním induktorem vpravo*

## 1.8 Kompenzace

Přizpůsobovací transformátor a induktor tvoří dohromady induktivní zátěž, jejíž impedance je přímo úměrná frekvenci. To znamená, že při zvyšující se frekvenci, roste také impedance systému. U povrchového kalení, kde se využívá vysoká pracovní frekvence, může pracovní frekvence dle odhadů nabývat od 8 kHz až do 15 kHz. Z toho důvodu je nutné kompenzovat obvod tak, aby bylo možné protlačit potřebný proud. Provozované transformátory mají obvykle ve stavu naprázdno vlastní indukčnost kolem 1,3 mH. Při připojení induktoru k sekundární straně transformátoru, klesne vlastní indukčnost na hodnotu 0,3 mH až 0,08 mH. Tento stav se podobá tzv. zapojení nakrátko. I přes vysoký pokles indukčnosti má obvod značný odpor.

Kompenzace je prováděna pomocí zařazení kondenzátorové baterie na primární stranu. Lze použít dvojí provedení. První je paralelní rezonance, kdy je zvyšováno napětí na transformátoru a musí být počítáno s dostatečnou izolační vrstvou mezi jednotlivými závity. Druhé provedení je zařazení kondenzátorové baterie sériově, též na primární straně. V praxi se používá nejčastěji sériové řazení z důvodu snadnější aplikace v systému. Pro určení správné hodnoty kondenzátorové baterie lze využít Thomsonova vztahu, kde je známa pracovní frekvence a musí být určena indukčnost transformátoru s připojeným induktorem na sekundární straně.

Jelikož induktor je často vyráběn společně s indukční sestavou, lze celek proměřit RLC metrem. Takto určenou indukčnost lze použít pro výpočet potřebné kapacity pro kompenzaci. Pokud je potřeba vyrobit induktor do již hotové sestavy, je nutné znát veškeré parametry zdroje. Nejdůležitější parametry jsou celkový výkon zdroje a převod transformátoru, ze kterých vyloučíme použitelný proud pro návrh induktoru. [8]

## 2 Numerické modelování

Náplní této kapitoly je popis jednotlivých možností a přístupů k obecnému modelování fyzikálních problémů včetně řešených rovnic.

### 2.1 Programové možnosti modelování

Nejdůležitější část celé sestavy indukčního ohřevu je induktor. Pro samotný návrh induktoru lze využít několika programů a to například COMSOL, RillFEM, QuickField a nebo ANSYS. Za pomoci těchto programů lze vyzkoušet tvar induktoru a jeho vlastnosti při různých provozních podmínkách. V mnoha případech si lze vystačit s 2D modelem. Pro situace, kdy je vsázka nesymetrická, anebo tvarově složitá, je potřeba použít 3D modelování.

Všechny tyto programy řeší sdruženou úlohu elektromagnetického pole a teplotního pole s využitím výpočtu metodou konečných prvků. Pro praktický výpočet a simulaci v rámci empirické části budou použity programy COMSOL a RillFEM.

### 2.2 Elektromagnetické pole

Pro odvození rovnice, kterou řeší modelovací programy, bude vycházeno z první Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (2.1)$$

kde  $\mathbf{H}$  je intenzita magnetického pole ( $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ ) a  $\mathbf{J}$  proudová hustota ( $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Z materiálové definice pro magnetické vlastnosti  $\mu$  určené intenzitou magnetického pole  $\mathbf{H}$  a magnetickou indukcí  $\mathbf{B}$  a z rovnice pro vektorový potenciál je po dosazení do rovnice (2.1) získán tvar:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) = \mathbf{J}, \quad (2.2)$$

kde  $\mu$  je permeabilita ( $\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$ ),  $\mathbf{A}$  je magnetický vektorový potenciál ( $\text{Wb}\cdot\text{m}^{-1}$ ) a  $\mathbf{B}_r$  remanentní indukce (T).

Pro další úpravu bude použita druhá Maxwellova rovnice a rovnice zobecněné intenzity elektrického pole. Jejich kombinací vznikne:

$$\operatorname{rot}(\mathbf{E}_0 - \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t'} \quad (2.3)$$

kde  $\mathbf{E}_0$  je obecná intenzita elektrického pole ( $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ) a  $\mathbf{v}$  rychlost ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Pokud se do výše uvedené rovnice dosadí místo magnetické indukce rovnice obsahující vektorový potenciál, lze rovnici zapsat ve tvaru:

$$\operatorname{rot}(\mathbf{E}_0 - \mathbf{v} \times \operatorname{rot}\mathbf{A}) = -\operatorname{rot}\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (2.4)$$

Následující dosazení do výrazu pro proudovou hustotu je rovnice upravena na:

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}_0 = \gamma(\mathbf{v} \times \operatorname{rot}\mathbf{A}) - \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \gamma \operatorname{grad}\varphi + \mathbf{J}_{ext} \quad (2.5)$$

kde  $\gamma$  je měrná elektrická vodivost ( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

Takto upravenou rovnici převedeme do komplexního tvaru a znovu dosadíme do výchozí rovnice (2.2) a získáme obecnou parciální diferenciální rovnici, která popisuje rozložení elektromagnetického pole:

$$\operatorname{rot}\frac{1}{\mu}(\operatorname{rot}\vec{\mathbf{A}} - \vec{\mathbf{B}}_r) + \gamma j\omega\vec{\mathbf{A}} - \gamma(\mathbf{v} \times \operatorname{rot}\vec{\mathbf{A}}) = \vec{\mathbf{J}}_{ext} - \gamma \operatorname{grad}\varphi \quad (2.6)$$

Tyto rovnice se používají v obou programech pro řešení elektromagnetického pole v prostoru. Protože rovnice je uvedena v obecném tvaru, tak v dalším přiblížení jsou aplikovány zjednodušující podmínky. Podle předpokladů, které lze použít se provádí následující dělení na pole nestacionární, kvazistacionární a stacionární.

Pro indukční ohřev se nestacionární pole nevyužívá z důvodu, že nelze zanedbat posuvný proud. Při uvažování kvazistacionárního pole se zanedbává posuvný proud. Tato skutečnost lze uplatnit z důvodu velkých řádových rozdílů mezi vodivostním proudem a fázovým posuvným proudem až  $10^{12}$  v závislosti na použitém materiálu a frekvenci. Toto pole je použito ve všech oblastech, kde se uvažuje vodivý materiál. Pro zjednodušení výrazu se zde používá Coulombova kalibrační podmínka, která říká, že divergence vektorového magnetického potenciálu je nula. Po této aplikaci pak lze napsat řešenou rovnici ve tvaru:

$$\operatorname{rot}\frac{1}{\mu}\vec{\mathbf{A}} + \gamma j\omega\vec{\mathbf{A}} = \vec{\mathbf{J}}_{ext} \quad (2.7)$$

V tomto výrazu je zdroj energie v modelu udáván pomocí proudové hustoty  $\vec{\mathbf{J}}_{ext}$  a nebo jako protékající proud danou oblastí.

Dirichletova okrajová podmínka se používá pro zadání vektorového magnetického potenciálu a lze ji zapsat ve tvaru:

$$\vec{A} = k, \quad (2.8)$$

kde  $k$  je zadaná hodnota pro vektorový potenciál pro hraniční body.

Toho lze využít u symetrických modelů, anebo pro omezení modelu tak, aby se nepočítala zbytečně velká oblast. Při použití omezení okolní oblasti se musí brát v úvahu dostatečná vzdálenost hranice. Pokud není dodržena dostatečná vzdálenosti, dochází ke zkreslení výsledků. Tento problém lze řešit dvěma způsoby. V prvním případě se provede konvergence okolní hranice tím, že se postupně hranice posouvá směrem od modelované soustavy a počítá se změna energie pole. Při nulové změně energie pole je vzdálenost okraje dostatečná. Tento způsob je zapotřebí, pokud nemáme dostatečnou výpočetní kapacitu. Ve druhém případě se rovnou vzdálenost hranice od soustavy nastaví ve větší vzdálenosti. To lze použít při dostatečném výpočetním výkonu a také tento způsob urychluje dosažení výsledků.

Neumanova okrajová podmínka zadává derivaci vektorového magnetického potenciálu  $\vec{A}$  podle vnější normály hranice ve tvaru:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = f_n, \quad (2.9)$$

kde  $f_n$  je požadovaná hodnota derivace dle vnější normály.

Položíme-li Neumannovu podmínku nule, bude vektor magnetické indukce  $\vec{B}$  kolmý k hranici. Tento fakt lze využít při zjednodušování symetrického modelu, víme-li, že siločáry budou procházet hranicí v kolmém směru.

### 2.3 Teplotní pole

Vzhledem k tomu, že výpočetní programy řeší sdruženou úlohu, je nutné nejprve spočítat zdroj tepla (elektromagnetické pole). Poté je nutné v závislosti na čase spočítat teplotní rozložení v konkrétním materiálu. Koeficient  $\lambda$  značí teplotní vodivost, která je definována jako množství tepla přeneseného za jednotku času skrz jednotkovou tloušťku ve směru normály vyvolané jednotkovým teplotním gradientem  $\Delta T$ .

Pro odvození rovnice se začne u vztahu popisujícího hustotu tepelného toku v homogenním tělese v ustáleném stavu:

$$\mathbf{q} = -\lambda \text{grad } T, \quad (2.10)$$

kde  $\lambda$  je tepelná vodivost ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $\mathbf{q}$  tepelný tok ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) a  $T$  teplota ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Na základě Gauss-Ostrogradského věty bude předešlá rovnice upravena tak, aby popisovala tepelný tok přes uzavřenou plochu  $S$  a v objemu  $V$ .

$$\oint_S \mathbf{q} \, dS = \oint_V \text{div } \mathbf{q} \, dV = \oint_V \text{div } \lambda \text{grad } T \, dV, \quad (2.11)$$

kde  $V$  je objem ( $\text{m}^3$ ) a  $S$  plocha ( $\text{m}^2$ ).

Pro vyjádření vnitřní změny energie v objemu  $V$ , musí tepelný tok respektovat vnitřní změnu. Vztah lze tedy zapsat ve tvaru:

$$\frac{dW}{dt} = \int_V \rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} dV, \quad (2.12)$$

kde  $C_p$  je tepelná kapacita ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $\rho$  měrná hmotnost ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) a  $W$  energie (J).

Zjednodušením rovnice (2.11) a zahrnutím vztahu pro rozložení energie (2.12) je získána rovnice, která je řešena ve výpočetních programech.

$$-\text{div } \lambda \text{grad } T - \rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} = p, \quad (2.13)$$

kde  $p$  jsou měrné ztráty ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Podobně jako u elektromagnetického pole se i zde zadávají okrajové podmínky.

Opět se uplatňuje Dirichletova okrajová podmínka, která stanovuje teplotu na hranici.

Dále lze zadat Neumannovu okrajovou podmínku. Tou se stanoví velikost toku energie přes hranici. To se často využívá na osách symetrie, na kterých je nulový tok přes hranici.



Newtonova okrajová podmínka se uplatňuje k modelování konvekce. Používá se na rozhraní pevné fáze s kapalinou či plynem. Tuto podmínku lze vyjádřit následující rovnicí:

$$\lambda \frac{dT}{dn} = \alpha(T_{\text{gass}} - T), \quad (2.14)$$

kde  $\alpha$  je součinitel přestupu tepla mezi pevnou látkou a plynem/kapalinou. Tento jev je nejvýznamnější do teploty 500 °C a při dlouhém časovém trvání ohřevu.

Poslední okrajová podmínka je radiační, nebo také podmínka IV. druhu. Ta respektuje přestup tepla radiací a je určena vztahem:

$$\lambda \frac{dT}{dn} = \varepsilon c(T_{\text{ext}}^4 - T^4), \quad (2.15)$$

kde  $\varepsilon$  je Stefan-Boltzmanova konstanta ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ), v koeficientu  $c$  se zahrnuje vliv geometrie tělesa a provedení povrchu.

U indukčních kalení je ohříváno těleso z nízkých teplot na relativně vysoké teploty, a proto je nutné respektovat přestup tepla jak konvekcí, tak i radiací ve tvaru:

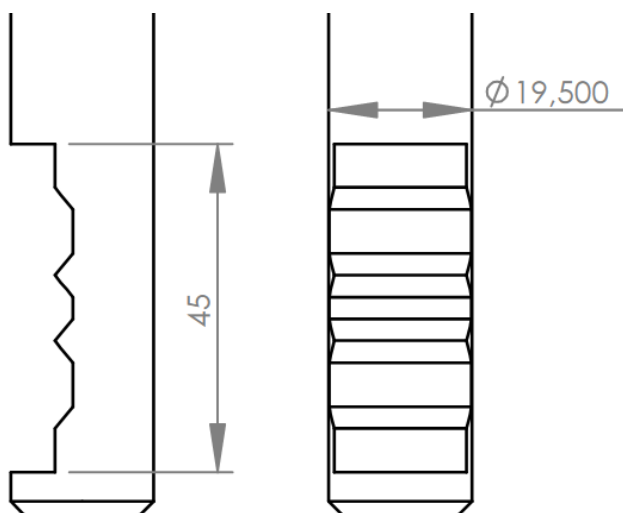
$$\lambda \frac{dT}{dn} = \alpha(T_{\text{gass}} - T) + \varepsilon c(T_{\text{ext}}^4 - T^4). \quad (2.16)$$

### 3 Návrh induktoru

Základem pro stanovení návrhu induktoru jsou kompletní informace. Jedná se například o vlastnosti a výkon použitého zdroje nebo materiál, který bude ohříván. Důležitou roli hrají i další parametry ohřevu, které jsou požadovány zadavatelem, jako je například hloubka prokalení, teplota kalení a čas procesu.

#### 3.1 Definice vsázky

Ohříváný materiál je kulatina o průměru 19,5 mm a délce 405 mm, která má na jedním z konců provedený výbrus. Detail tohoto výbrusu je zobrazen níže na Obr. 8. Kompletní a podrobnější výkresová dokumentace je uvedena v příloze A.



Obr. 8 Detail výbrusu nárys, bokorys

Modelovaný materiál je ocel a z dlouhodobých zkušeností firmy s touto ocelí, jsou stanoveny fyzikální vlastnosti viz Tab. 1.

Parametry	Značení	Hodnoty	Jednotky
Relativní permeabilita	$\mu_r$	16	-
Tepelná kapacita	$C_p$	430	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
Elektrická vodivost	$\gamma$	5e6	$S.m^{-1}$
Hustota	$\rho$	7750	$kg.m^{-3}$
Tepelná vodivost	$k_{iv}$	25.94	$W.m^{-1}.K^{-1}$

Tab. 1 Materiálové vlastnosti vsázky

### 3.2 Použitá technologie kalení

Pro proces kalení je využit ohřev induktorem a následné rychlé zchlazení vodní sprchou. Mezi vypnutí induktoru a vodní sprchou je malý časový rozestup. Časová prodleva se pohybuje od 0,3 s až po 2 s a je nutné počítat s dodatečným rozvedením tepla v materiálu. Během této prodlevy dojde také k rozšíření tepla v materiálu o dalších 0,5 až 2 mm a s tímto dodatečným rozvodem je nutné již v návrzích počítat. Teplota pro kalení bude uvažována v návrhu nad 800 °C.

### 3.3 Definice ohřevu

Zadavatelem je určeno, že vsázka musí být vykalena v malé hloubce, přibližně 1,5 až 2 mm pod povrchem materiálu. Z tohoto požadavku lze určit pracovní frekvenci zdroje za pomoci vztahu pro výpočet hloubky vniku. V praxi se používá upravený vztah, kde všechny číselné členy jsou vyjádřeny před odmocninou. Rovnice vypadá následovně:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_{\Omega}}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} = 503 \sqrt{\frac{\rho_{\Omega}}{f \cdot \mu_r}}, \quad (3.1)$$

kde  $\rho_{\Omega}$  je měrný odpor materiálu ( $\Omega \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $\mu_0$  permeabilita vakua ( $\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $\mu_r$  poměrná permeabilita vsázky (-),  $\omega$  úhlový kmitočet ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $f$  frekvence (Hz). [6]

V procesu kalení vsázky pomocí indukce, vzniká teplo směrem od povrchu ke středu v jednotlivých vrstvách, takzvaných hloubkách vniku. Tloušťka všech vrstev je stejná, ale závisí na frekvenci a materiálových vlastnostech, viz vzorec výše. V první hloubce vniku (nejblíže ke kraji) vznikne 86,5 % tepla. Ve dvou hloubkách vniku (dvakrát  $\delta$ ) je koncentrováno 98 % tepla a tři hloubky vniku obsahují 99,8 % veškerého tepla. Podle praktických zkušeností, se určuje pracovní frekvence na základě hloubky vniku v rozmezí od 2 až po 3  $\delta$ . V tabulce níže jsou uvedeny výsledky vypočtených hloubek vniku pro jednotlivé frekvence od 8,5 kHz až 13,5 kHz. Vzhledem k zadané hloubce prokalení z tabulky vyplývá, že přibližná pracovní frekvence je 12,5 kHz. Použitelné frekvence jsou vyznačeny tučně.

<b>f (Hz)</b>	<b><math>\delta</math> (m)</b>	<b><math>\delta</math> (mm)</b>	<b>2,5 <math>\delta</math> (mm)</b>
8500	0,00061	0,610	1,52
9000	0,00059	0,593	1,48
9500	0,00058	0,577	1,44
10000	0,00056	0,562	1,41
10500	0,00055	0,549	1,37
11000	0,00054	0,536	1,34
11500	0,00052	0,524	1,31
<b>12000</b>	<b>0,00051</b>	<b>0,513</b>	<b>1,28</b>
<b>12500</b>	<b>0,00050</b>	<b>0,503</b>	<b>1,26</b>
<b>13000</b>	<b>0,00049</b>	<b>0,493</b>	<b>1,23</b>
13500	0,00048	0,484	1,21

Tab. 2 Výpočet hloubky vniku pro různé pracovní frekvence

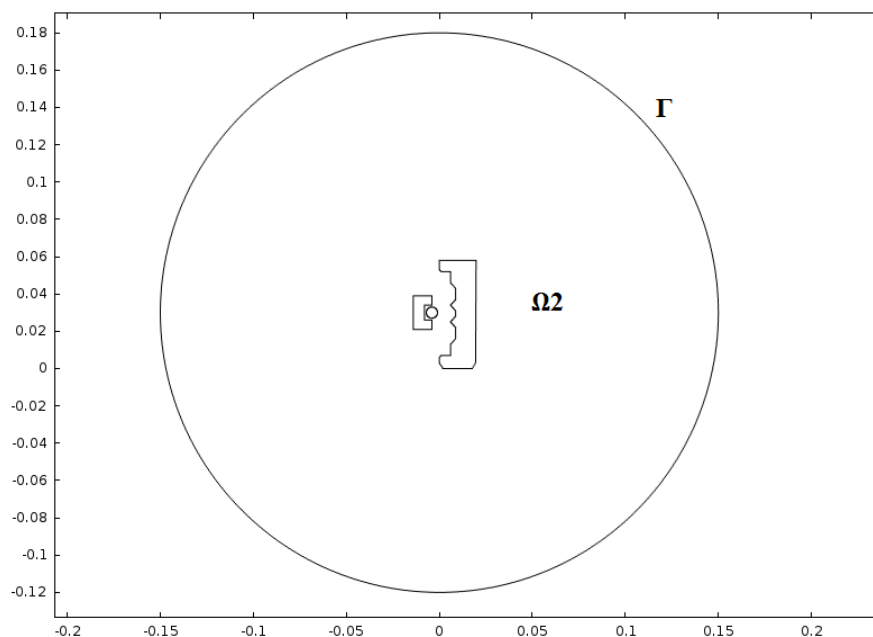
K vybrané frekvenci a z toho vyplývající hloubky vniku je přičtena hodnota 0,5 mm. Z toho vyplývá, že hloubka prokalení bude 1,76 mm a tím je splněna podmínka zadavatelem na 1,5 až 2 mm. Dále tato hodnota vytváří rezervu, aby nedošlo k nedostatečnému ohřevu, anebo k většímu rozvedení tepla k vnitřnímu průměru.

### 3.4 Definice modelu

Protože je nutné provést vykalení pomocí jednoho induktoru, je zapotřebí namodelovat proces v místě výbrusu. Z tohoto požadavku vyplývá, že proces bude rozdělen na dvě části. První část je prokalení výbrusu a posuv vsázky vertikálně. Druhá část se zabývá vykalením kulatiny, vertikálním posuvem a rotací vsázky tak, aby bylo dosaženo homogenního ohřevu povrchu.

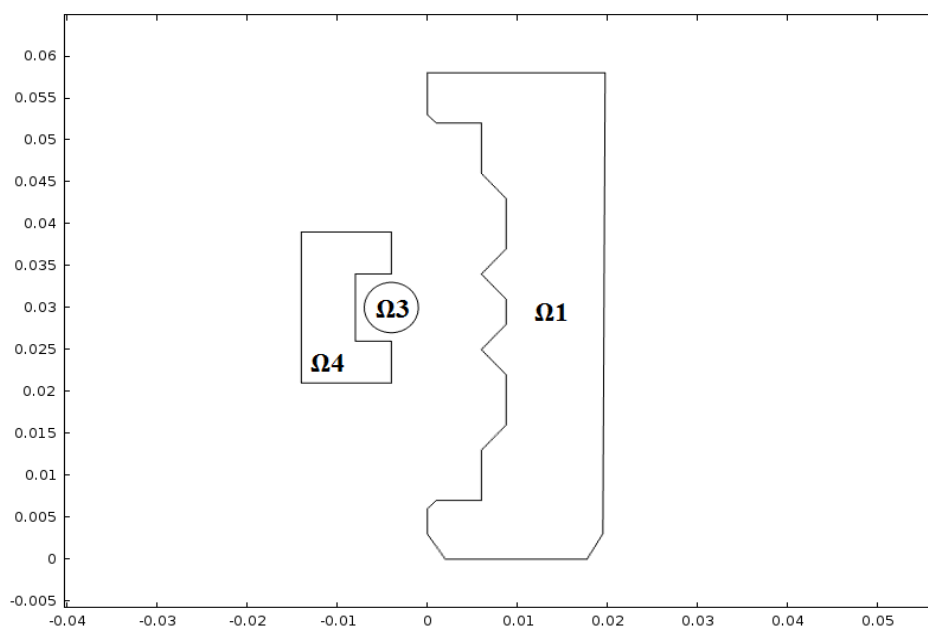
Model je definován ve dvou souřadnicových systémech. První pohled je v kartézském souřadnicovém systému (X;Y) a druhý potřebný pohled ve válcovém souřadnicovém systému (R;Z). Syntézou těchto dvou pohledů je získán tvar induktoru.

Modelování problému v kartézském souřadném systému je znázorněno na Obr. 9. Tento obrázek zachycuje celkový pohled na simulaci. Symbol  $\Omega_2$  v nákrese níže značí okolní vzduch modelovaného objektu. Okrajová podmínka nazvaná jako  $\Gamma$  říká, že magnetický potenciál je nulový. Hranice tohoto objektu je volena v dostatečné vzdálenosti od vsázky a induktoru tak, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. V tomto případě se jedná o poloměr 15 cm. Okolní stupnice je v jednotkách délky - metrech.



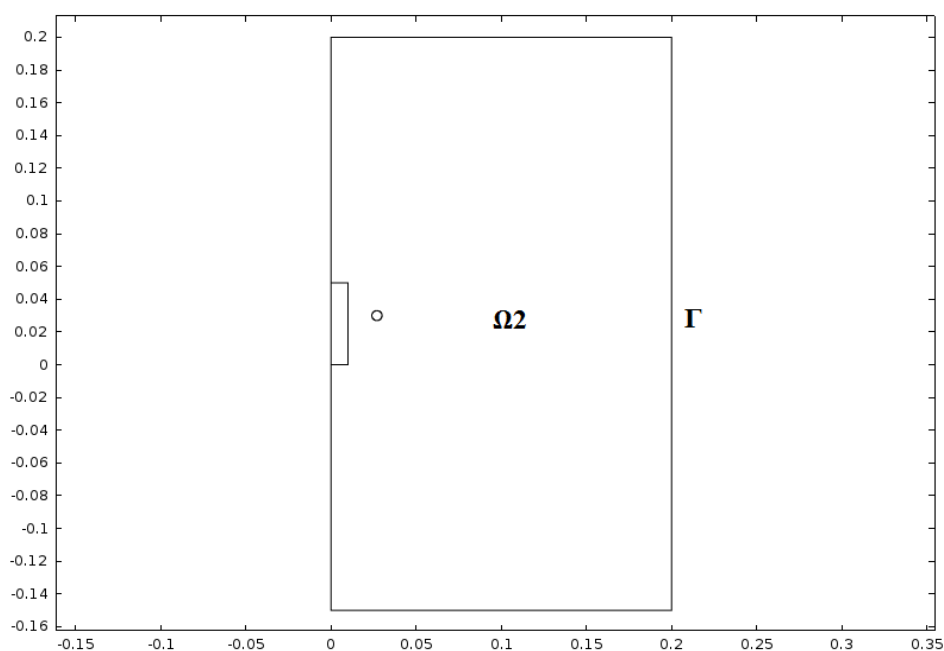
Obr. 9 Celkový pohled na model v kartézské soustavě souřadnic

Detailní pohled modelu je znázorněn níže na Obr. 10. Oblast  $\Omega_1$  reprezentuje vsázku, konkrétně detail přímo na výbrus. Hranice této oblasti jsou zároveň určeny jako okrajové podmínky pro konvekci se součinitelem přestupu tepla  $7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  a radiaci s koeficientem  $c = 0,7$ . Tyto okrajové podmínky jsou použity v obou pohledech v oblasti vsázky. Induktor je značen jako  $\Omega_3$  s poloměrem 3 mm. Objekt  $\Omega_4$  zastupuje ferit.



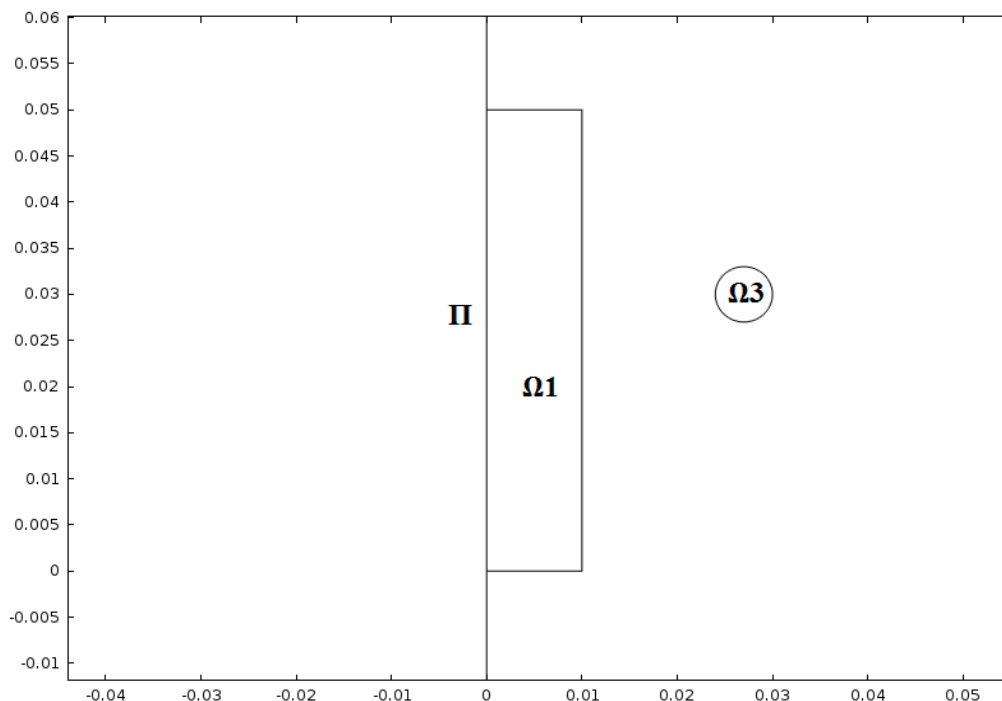
Obr. 10 Detailní pohled na výbrus

Druhý pohled ve válcově symetrickém souřadném systému je znázorněn na Obr. 11. Značení je provedeno stejně jako v předchozím případě. Okolní vzduch má značení  $\Omega 2$  a opět je zde okrajová podmínka pro nulový vektorový potenciál  $\Gamma$ . Detailnější pohled na situaci si lze prohlédnout na Obr. 12, kde jsou uvedeny zbývající oblasti. Okolní stupnice je opět v metrech.



Obr. 11 Model ve válcovém souřadnicovém (R;Z) systému

V detailním pohledu na model v Obr. 12. přibyla okrajová podmínka  $\Pi$  pro teplotní tok. Tato podmínka říká, že energetický přenos mezi osou symetrie a modelem není uskutečněn, tudíž je nulový. Symbol  $\Omega 1$  značí oblast pro samotnou vsázkou a  $\Omega 3$  oblast pro induktor. Z důvodu těsné vazby mezi vsázkou a induktorem je v tomto případě vynechán ferit. Osa válcově souřadnicového (R;Z) modelu má osu symetrie vlevo a zobrazená vsázka je určena svým poloměrem 9,75 mm. Induktor je namodelován jako plný měděný materiál o poloměru 3 mm.



Obr. 12 Model ve válcovém souřadnicovém (R;Z) systému - detail

Materiálové parametry pro vsázku a induktor jsou uvedeny v Tab. 3. Tyto hodnoty jsou použity v simulaci pro jednotlivé oblasti ( $\Omega 1$  až  $\Omega 4$ ). Protože simulace je tvořena ze dvou polí (elektromagnetické a teplotní pole), není nezbytné počítat všechny oblasti v obou polích. Pro elektromagnetické pole jsou důležité všechny uvedené oblasti, ale pro teplotní pole se využívá pouze oblast  $\Omega 1$ . Vzhledem k tomu, že je induktor chlazen kapalinou, bude mít, za normálních podmínek, vždy teplotu protékající kapaliny. Proto není nutné počítat s rozvojem tepla v induktoru  $\Omega 3$ . Feritové jádro je spřaženo s induktorem, tudíž je chlazen přes induktor nepřímou cestou, a proto nemusí být počítáno s rozvojem tepla ve feritu  $\Omega 4$ . V simulaci je zavedena lineární permeabilita z důvodu porovnání programů COMSOL a RillFEM. Program RillFEM neumí pracovat s nelineárním vyjádřením permeability.

	$\mu_r$	Cp	S	$\rho$	ki
$\Omega 1$	16	430	5e6	7750	25.94
$\Omega 2$	1	0	0	0	0
$\Omega 3$	1	385	1	8700	400
$\Omega 4$	120	430	1	8800	25.94

Tab. 3 Použité materiálové hodnoty v simulaci

### 3.5 Energetický odhad

Před samotnou simulací je nutné provést energetický odhad pro vývin tepla ve vsázce. V rámci tohoto výpočtu je uvažována pouze vrstva materiálu, do které je potřebné teplo dopravováno. Ze zadání je patrné, že vrstva určená ke kalení má být 1,5 až 2 mm silná a tento požadavek musí být respektován. Proto je při výpočtu vsázka uvažována jako dutý válec. Vnitřní poloměr tohoto válce je 7,75 mm, vnější poloměr 9,75 mm a výšku 20 mm. Celková výška vsázky je 405 mm, ale při kalení je z této délky zasaženo pouze zmiňovaných 20 mm, protože dochází ke kontinuálnímu posunu zdola nahoru. Pro simulaci je zvolena hraniční hodnota vrstvy ke kalení 2 mm, neboť je žádoucí zobrazit tu nejnáročnější variantu. Pokud by byla zvolena vrstva o tloušťce 1,5 mm, je logické, že pro její ohřátí není zapotřebí takové množství energie. Dle vztahu, který je uveden níže, lze vypočítat energetickou náročnost, potřebnou k ohřátí vsázky, pro jednotlivé časové intervaly.

Vzorec pro výpočet energetické náročnosti  $P$ :

$$P = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{t}, \quad (3.2)$$

kde  $m$  je hmotnost (kg) a  $t$  je čas (s).

V tabulce níže je uveden souhrn vypočtených hodnot energetické náročnosti pro jednotlivé časové intervaly. Je zřejmé, že čím kratší bude doba ohřevu, tím silnější zdroj je zapotřebí. Vzhledem k praktickému využití se nejčastěji využívá kompromis mezi dobou ohřevu a výkonem zdroje, tak aby náklady spojené s kalením byly úměrné a vynaložená energie efektivní.

t (s)	P (W)
0,5	18360
1,0	9180
1,5	6120
2,0	4590
2,5	3672
3,0	3060
3,5	2623
4,0	2295
4,5	2040
5,0	1836

Tab. 4 Energetická náročnost pro jednotlivé čas. intervaly



Hodnoty použité ve výpočtu energetické náročnosti jsou uvedeny v kapitole 3.1 Definice vsázky.

### 3.6 Simulace v programu COMSOL

Jak již bylo řečeno, návrh je rozdělen na dvě simulace. V první simulaci je stanovena vzdálenost induktoru od strany, kde je proveden výbrus. Protože vsázka při kalení pomalu sjíždí směrem dolů, jsou zvoleny dva referenční body simulace. První bod se nachází ve spodní části výbrusu, tedy 14 mm od počátku hřídele. Druhý bod se nachází uprostřed výbrusu, tedy 28 mm od počátku hřídele. Druhá simulace se zaměřuje na odstup induktoru od vsázky v oblasti s plným profilem.

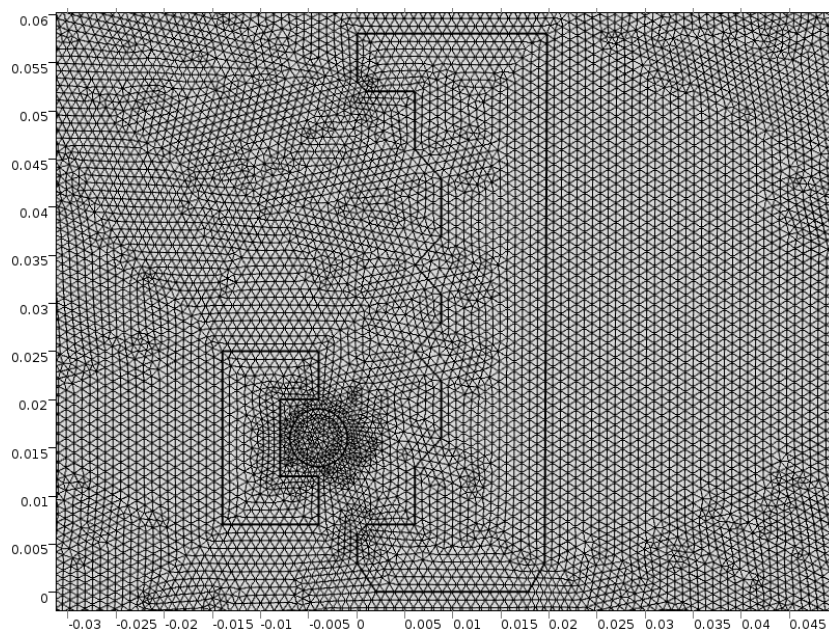
Předmětem zkoumání je odstup od vsázky, respektive od hrany kulatiny. Induktor musí být schopen vykalit vsázku jedním vertikálním pohybem, případně je umožněna rotace vsázky v ose. Parametry pro simulace byly stanoveny na základě požadavků na ohřev. Frekvence ohřevu byla zvolena 12,5 kHz (viz. kapitola 3.3) a protékající proud induktorem byl stanoven na 5 kA.

Postup pro stanovení polohy induktoru je následující:

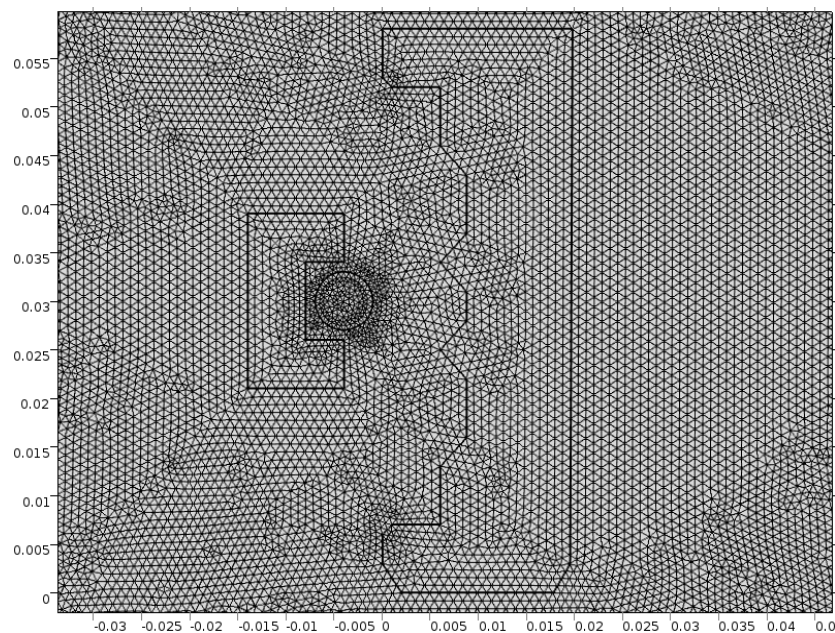
- zadání geometrických rozměrů do simulačního programu,
- vložení vstupních parametrů zdroje ( $f = 12,5$  kHz;  $I = 5$  kA),
- umístění induktoru do blízkosti vsázky,
- spuštění simulace a kontrola výsledků na požadovanou teplotu a dobu ohřevu,
- korekce - pokud výsledky nevyhovují, je nutné posunout induktor (směrem od nebo směrem k vsázce s ohledem na teplotu vsázky) a opakovat simulaci.

Před zahájením samotného výpočtu a optimalizací polohy induktoru vůči vsázce, je nutné vytvořit síť (mesh). Tato síť rozdělí oblast na elementy, kde jsou v jednotlivých vrcholech počítány hodnoty elektromagnetického a teplotního pole. Poté jsou hodnoty aproximovány polynomem  $n$ -tého stupně. Program COMSOL umožňuje využít nastavení velikosti jednotlivých elementů v předem definovaných úrovních, anebo je možné zadat velikosti ručně. Vzhledem k tomu, že předdefinované velikosti jsou pro potřeby této konkrétní simulace nedostačující, je využito vlastního rozměrového určení. Nejprve je nutné zadat největší element, v tomto případě  $10^{-4}$  m. Dále je zvolena nejmenší velikost

elementu, v tomto případě hodnota  $6 \cdot 10^{-6}$  m. Postup pro stanovení dostačující velikosti je obdobný jako postup pro zvolení vzdálenosti okrajové podmínky. Pro simulaci je zvolena velmi jemná síť a je počítáno s dostatečnou výpočetní kapacitou. Použitá síť (mesh) pro referenční bod jedna je vyobrazena na Obr. 13 a na Obr. 14 pro referenční bod dva.



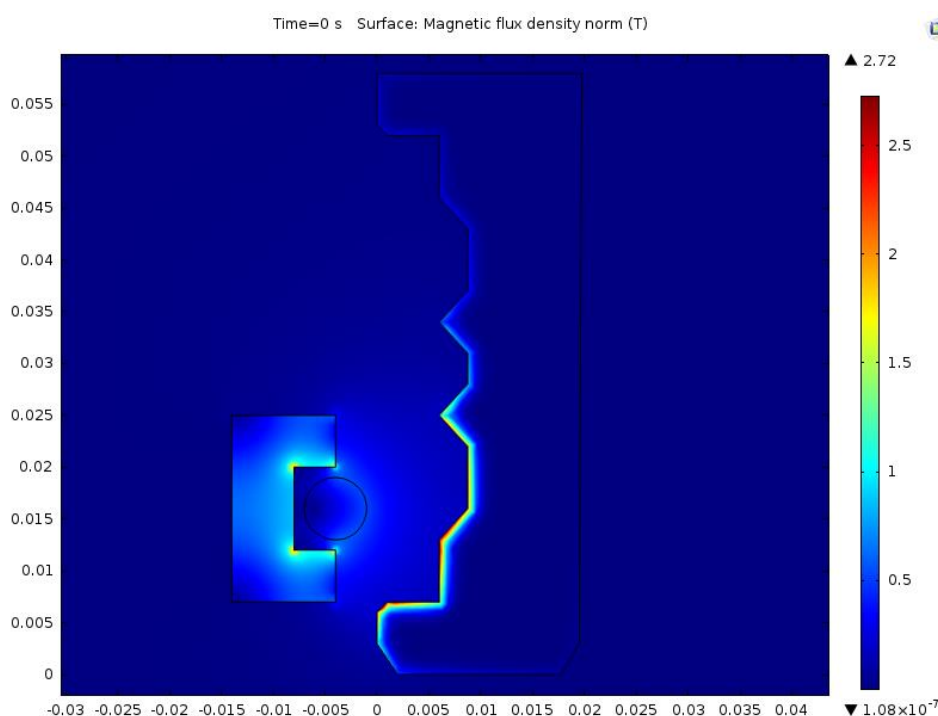
Obr. 13 Zobrazení sítě (mesh) v referenčním bodě jedna v kartézském souřadném systému



Obr. 14 Zobrazení sítě (mesh) v referenčním bodě dva v kartézském souřadném systému

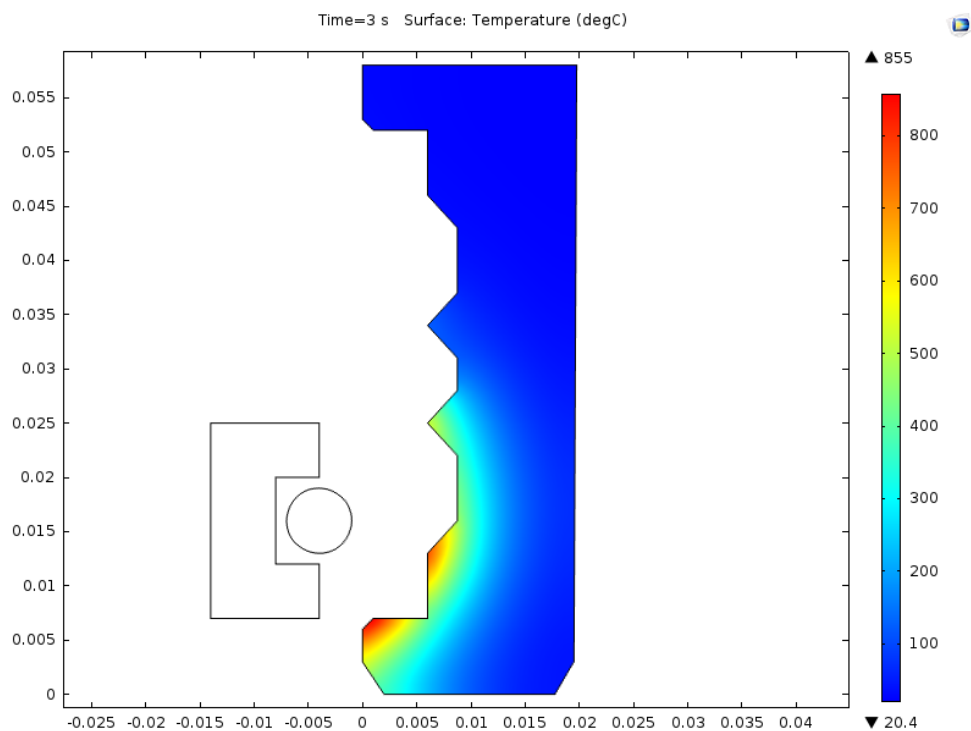
Z obou těchto obrázků je patrné, že zhuštěná síť se nachází vždy kolem tvarově náročnější oblasti (kulaté objekty v simulaci). V případě referenčního bodu jedna je vytvořeno 214 041 elementů. Ve druhém případě program vytvořil pro simulaci 214 269 elementů.

Za předpokladu, že se permeabilita s teplotou nemění, je možné výpočet zjednodušit. Program spočítá rozložení magnetického pole v prostoru v čase 0 s a dále už toto pole v dalších časech nepřepočítává. Na Obr. 15 je patrné rozložení magnetické indukce v prostoru pro referenční bod jedna. Také je zde patrná hloubka vniku, což je znázorněno barevným podáním od světlé modré až po červenou barvu v oblasti vsázky.



Obr. 15 Rozložení magnetické indukce pro polohu jedna v kartézském souřadném systému

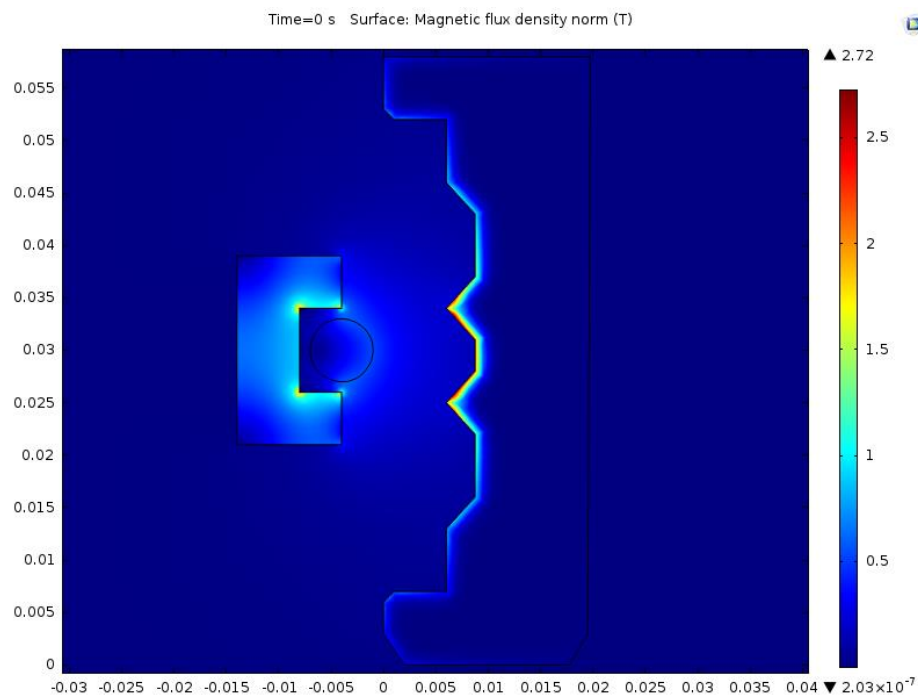
Z výsledku výpočtu magnetického pole program stanoví tepelné účinky pro jednotlivé časy simulace. Program je nastaven pro počítání až do času 4 sekund s krokem 1 sekunda. Z Obr. 16 je zřejmé, že ohřev v čase 3 sekund dosáhl požadovaných hodnot a pro polohu jedna je vzdálenost induktoru od vsázky 1 mm. Celý průběh ohřevu je vyobrazen v příloze B.



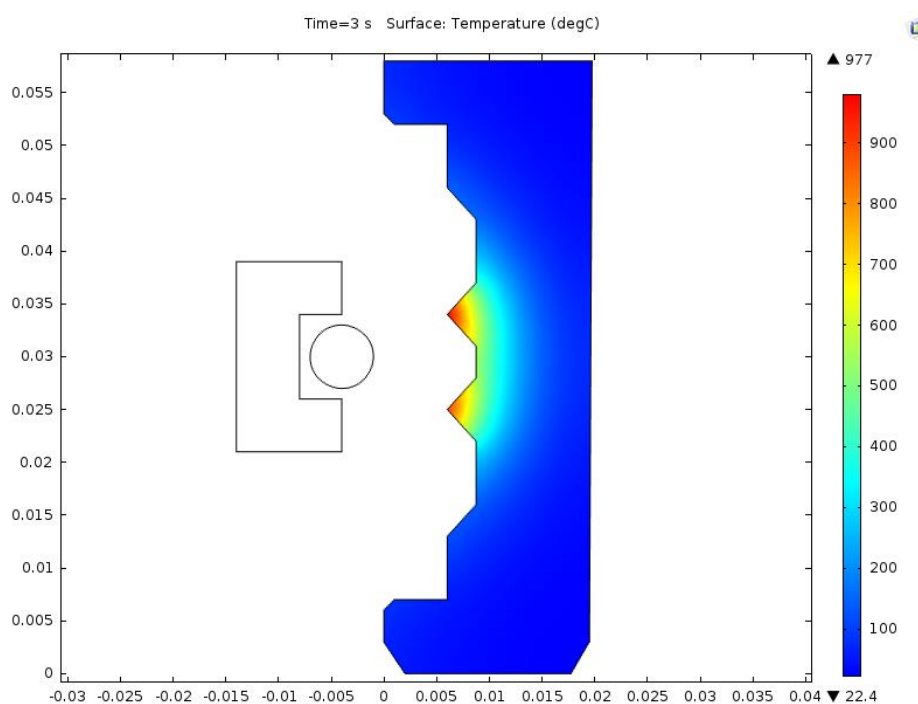
Obr. 16 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro polohu jedna v kartézském souřadném systému

Během navrhovací fáze bylo vygenerováno mnoho simulací s různými polohami induktoru vůči vsázce. Avšak v rámci této diplomové práce jsou uvedeny pouze výsledky, které vedly ke stanovení rozměrových parametrů.

V další simulaci musí být ověřena funkce v poloze dva, kde je induktor polohován do prostřední části výbrusu. Je nutné provést znovu výpočet magnetického a teplotního pole. Obr. 17 a 18 níže poukazují na podobné výsledky, jež byly dosaženy v poloze jedna. Dochází k opětovnému potvrzení polohy induktoru vůči vsázce ve vzdálenosti 1 mm.

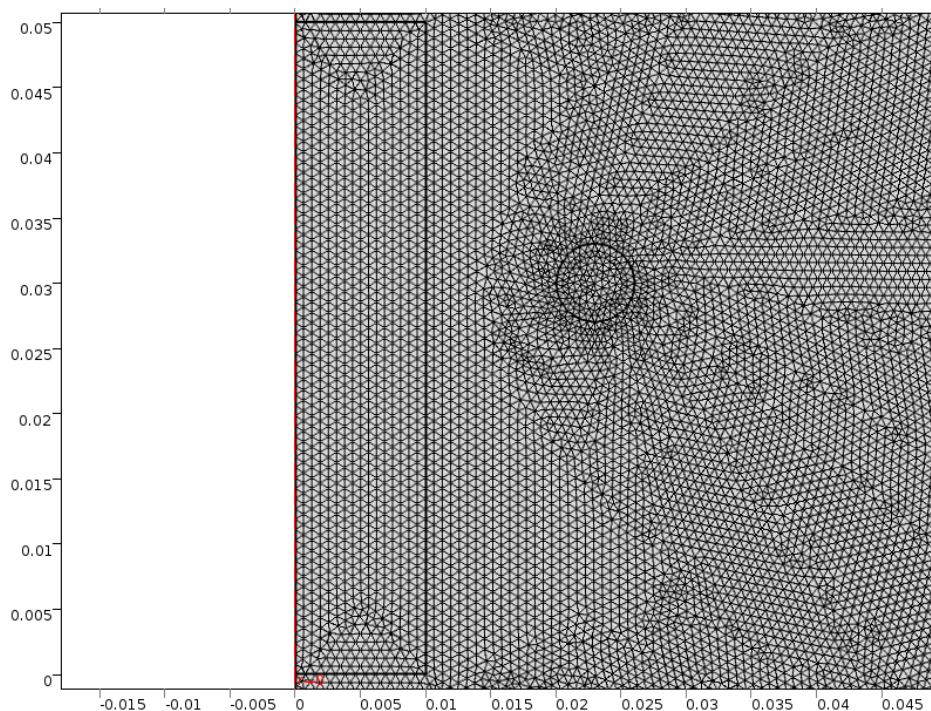


Obr. 17 Rozložení magnetické indukce pro polohu dva v kartézském souřadném systému



Obr. 18 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro polohu dva v kartézském souřadném systému

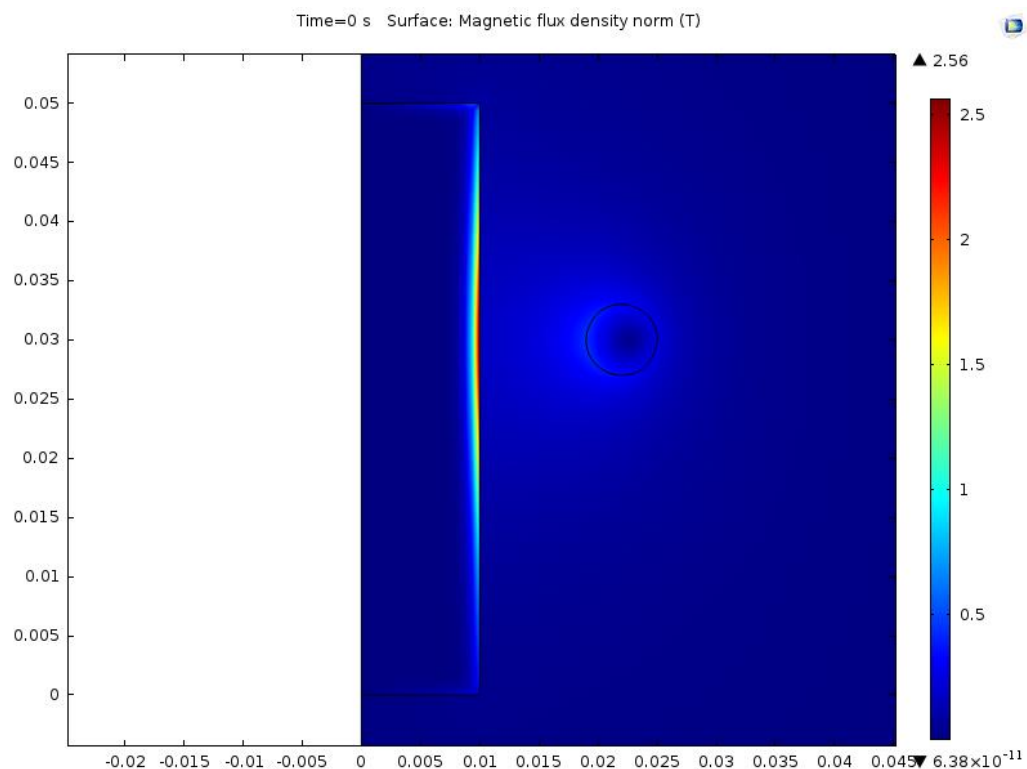
Dalším krokem je stanovení zadní strany induktoru (rádius). Proto to její určení stačí pouze vyzkoušet vzdálenost induktoru od vsázky. Vzdálenost musí být určena tak, aby ohřátí bylo dosaženo v čase 3 s nad 800 °C. Obr. 19 zobrazuje použitou síť s 252 265 elementy.



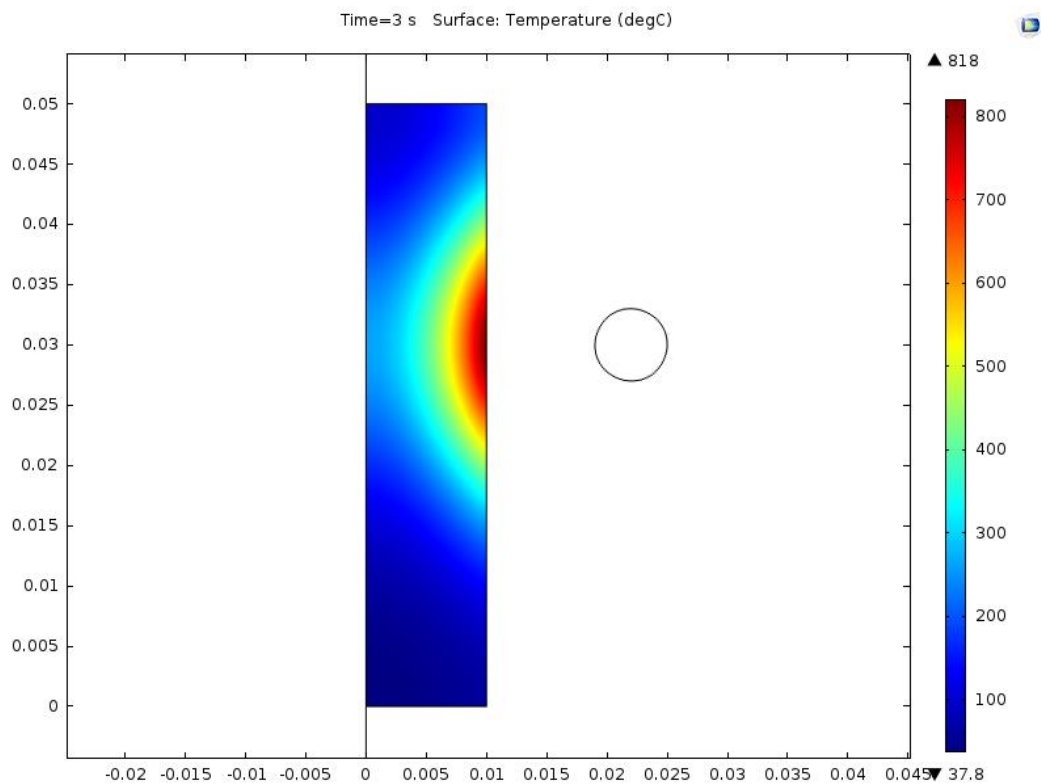
Obr. 19 Zobrazení sítě pro osově symetrický systém

Na následujícím obrázku (Obr. 20) je znázorněno rozložení magnetické indukce v prostoru a i zde je hloubka vniku reprezentována barvami od světle modré až po červenou.

Poloha induktoru je určena na základě Obr. 21. Tento obrázek rozložení tepla v materiálu jasně poukazuje na maximální teplotu vsázky 818 °C při odsazení induktoru do vzdálenosti 13 mm. Závěrem lze ze simulace vyvodit, že induktor bude mít ze zadní strany poloměr 23 mm. Všechny vygenerované simulace jsou uvedeny v příloze C.



Obr. 20 Magnetická indukce pro osově symetrický systém

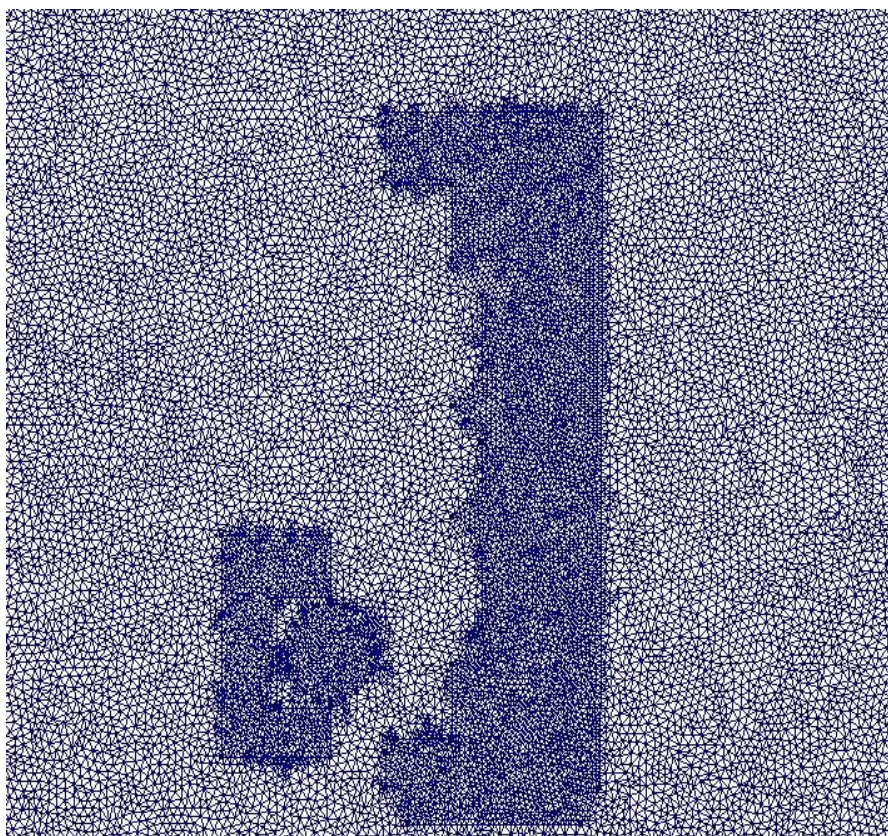


Obr. 21 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro osově symetrický systém

### 3.7 Simulace v programu RILLFEM

Průběh simulace, polohování induktoru a vsázky je totožné jako v předchozí kapitole. Také vstupní data zůstávají stejná. Simulace je zde opět rozdělená do dvou pohledů, a to do kartézského a osově symetrického.

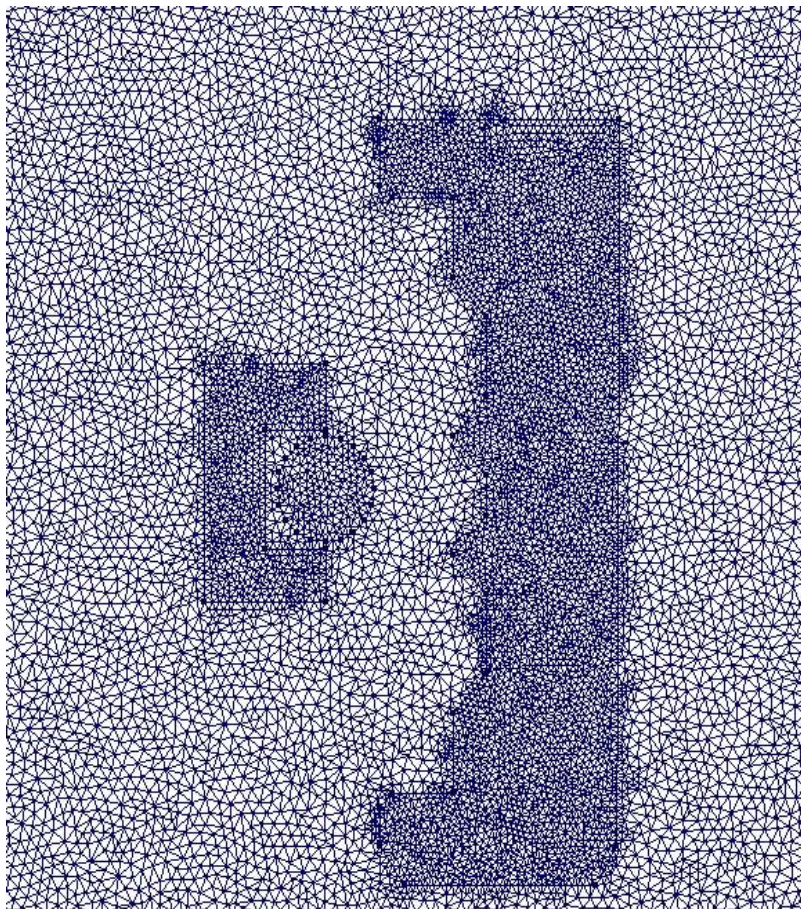
V kartézském systému jsou opět dva referenční body pro simulaci (spodní a střední). Na Obr. 22 je zobrazena vygenerovaná mřížka z programu RillFEM pro polohu jedna. Tato mřížka má 423 210 elementů.



Obr. 22 Zobrazení sítě (mesh) v referenčním bodě jedna v kartézském souřadném systému

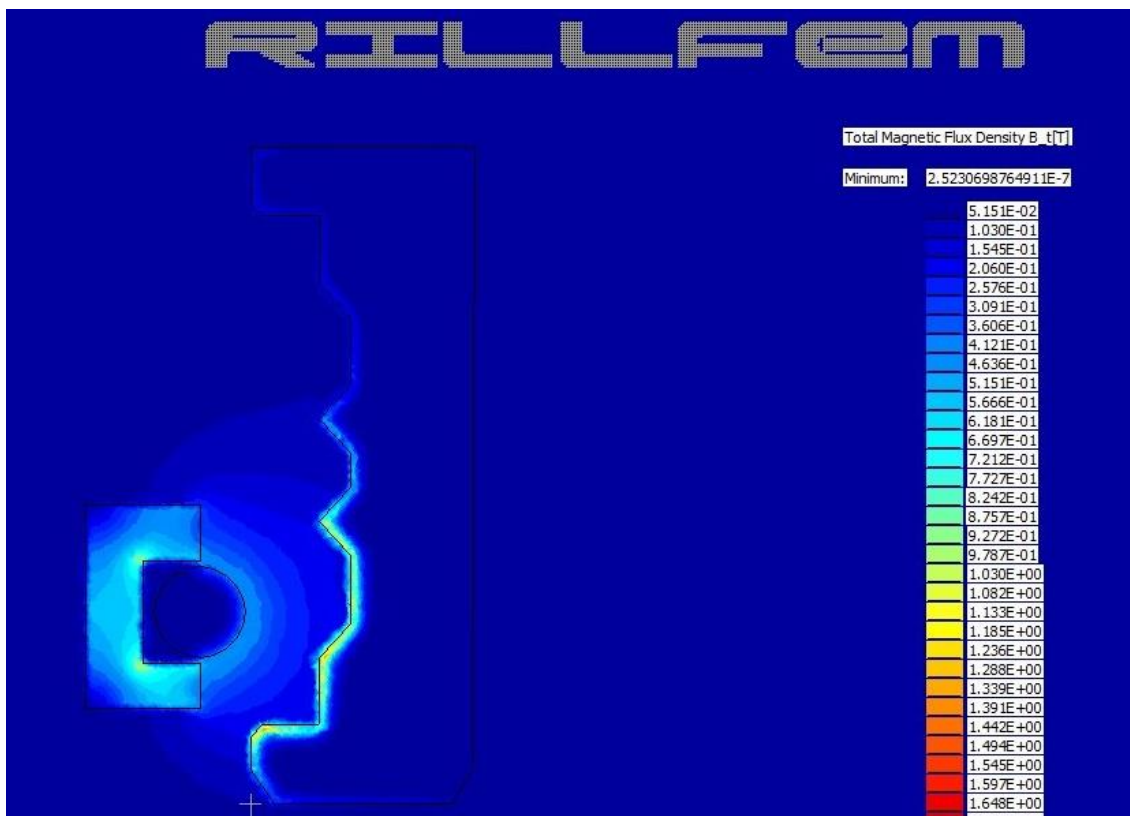


Na následujícím obrázku (Obr. 23) je zobrazena mřížka pro referenční polohu dva s 405 149 elementy.



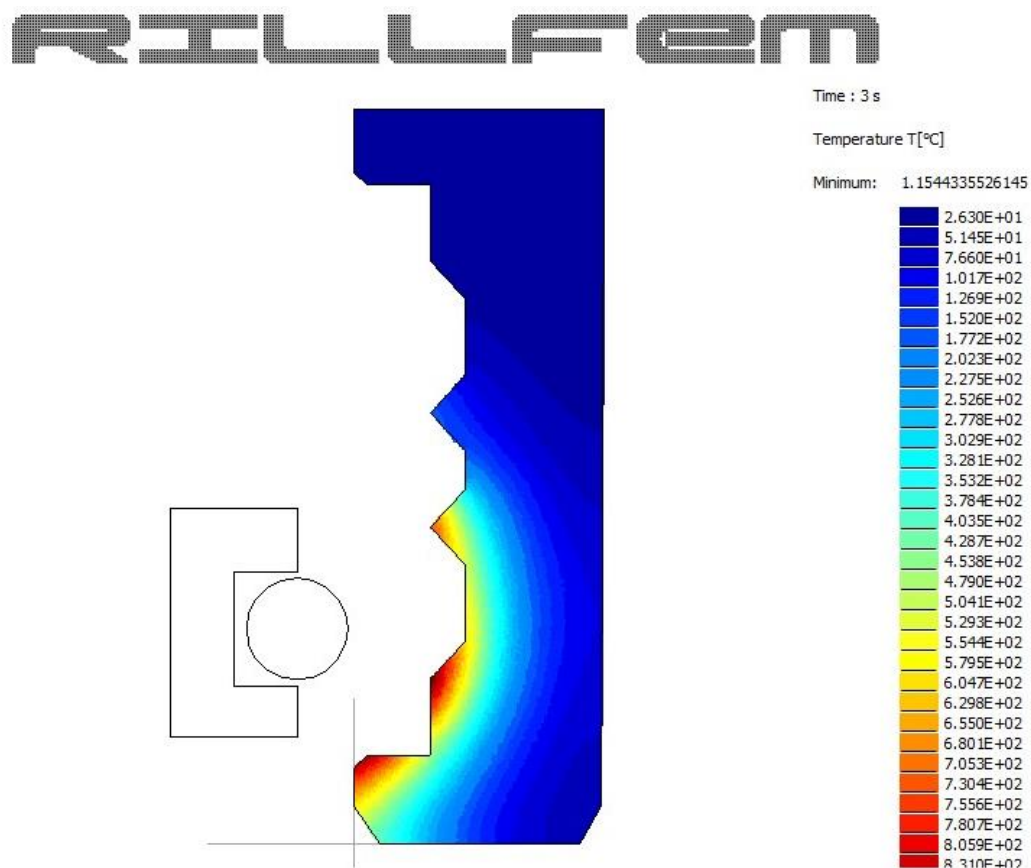
*Obr. 23 Zobrazení sítě (mesh) v referenčním bodě dva v kartézském souřadném systému*

Program spočítal a vyobrazil rozložení magnetického pole v prostoru. Toto rozložení je zobrazeno na obrázku níže (Obr. 24). Maximální hodnota magnetické indukce 1.9 T byla zjištěna odečtením ze simulace.



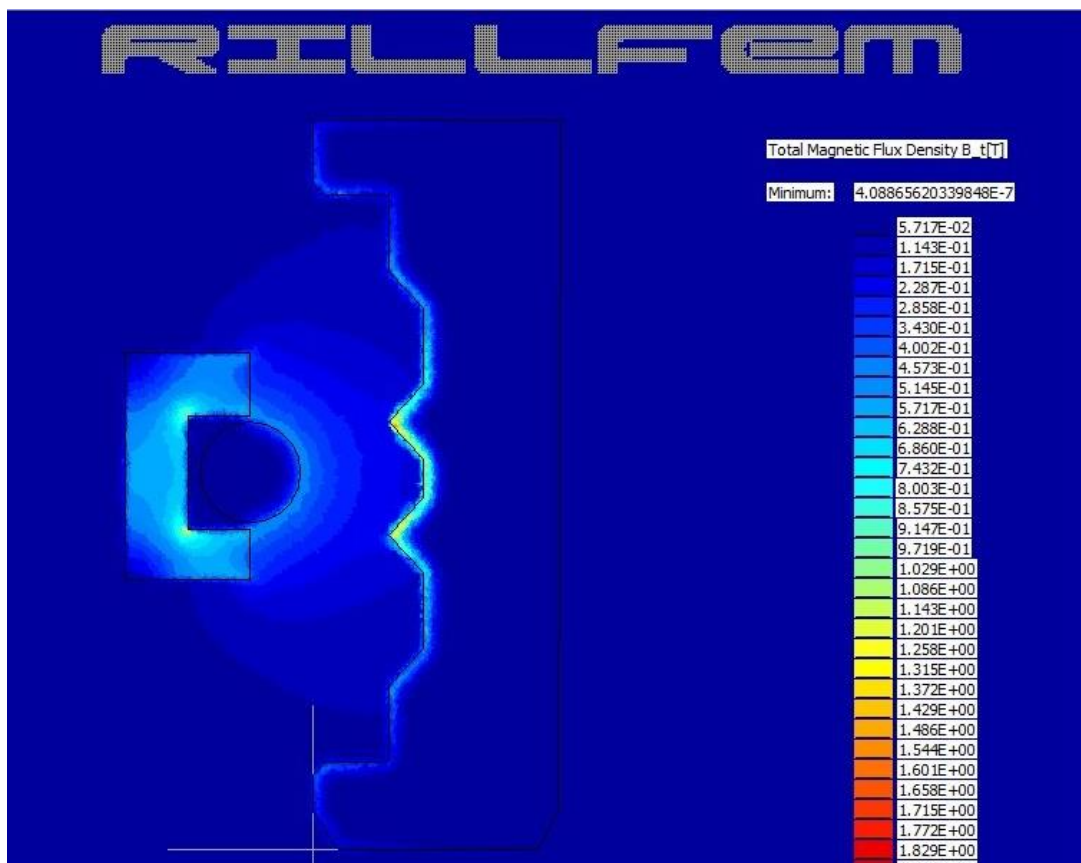
Obr. 24 Rozložení magnetické indukce pro polohu jedna v kartézském souřadném systému

Při zobrazení ohřevu v čase 3 s je maximální teplota 831 °C. Podobná hodnota (855 °C) byla zjištěna i v programu COMSOL. Maximální hodnoty se tedy liší o 24 °C.



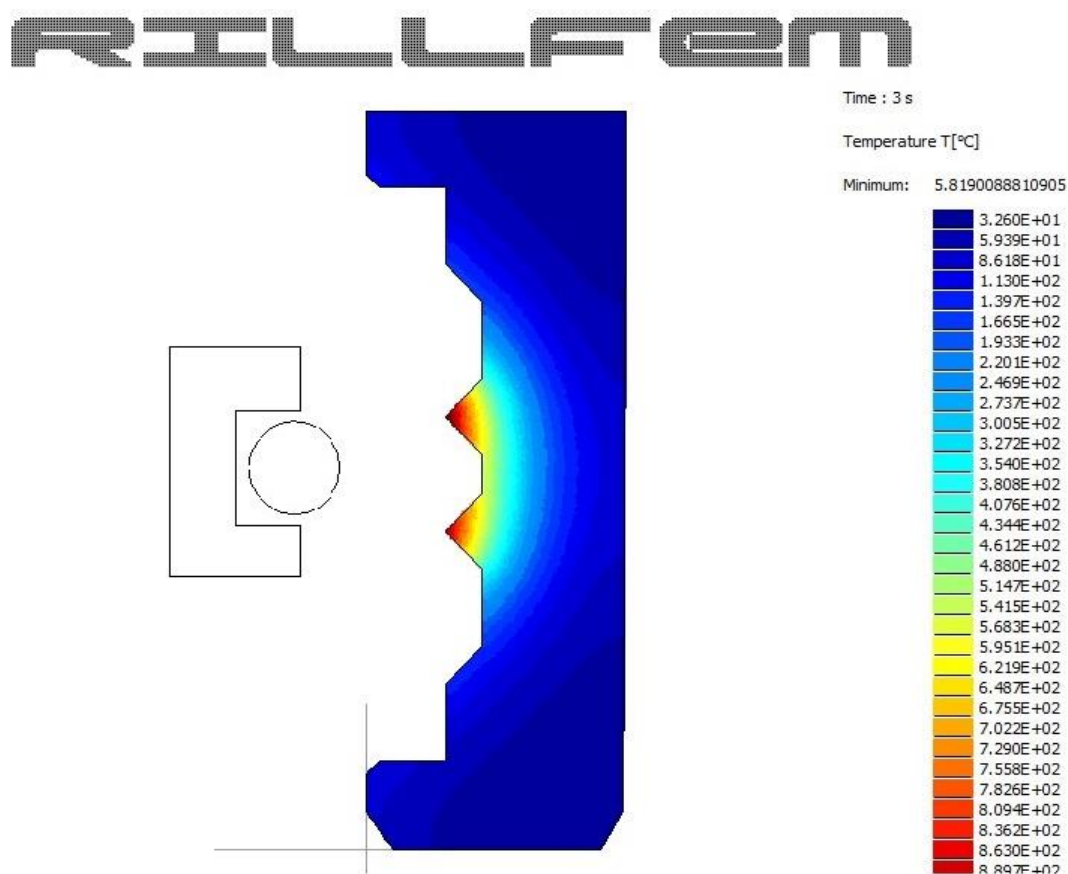
Obr. 25 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro polohu jedna v kartézském souřadném systému

Rozložení magnetické indukce pro referenční bod dva je znázorněn na Obr. 26. Zde lze odečíst maximální hodnotu 2 T. Při srovnání této hodnoty s programem COMSOL (2,4 T) je zřejmé, že dochází k rozdílu v zobrazení magnetické indukce o 0.4 T.



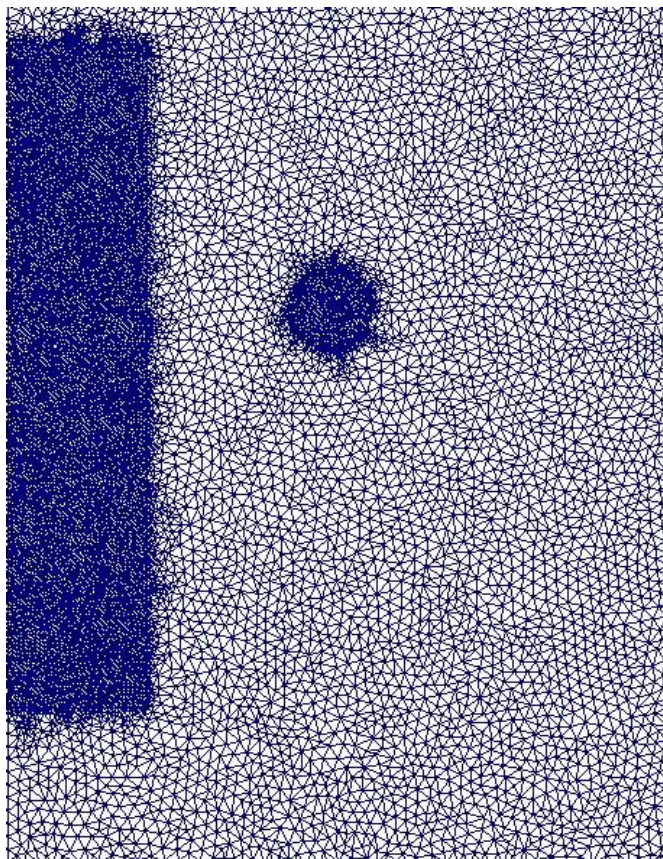
Obr. 26 Rozložení magnetické indukce pro polohu dva v kartézském souřadném systému

Odečtením z RillFEMu je zjištěna maximální teplota ve vsázce 907 °C. Porovnáním teplot mezi oběma programy byl stanoven rozdíl 70 °C.



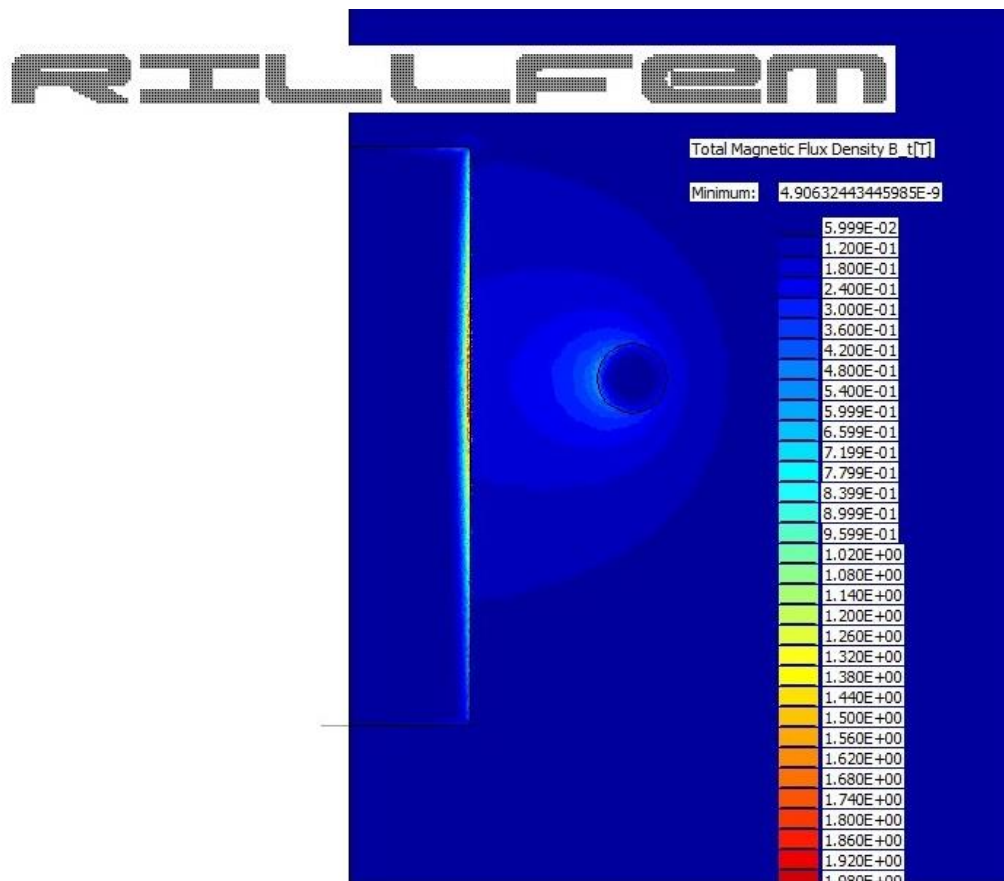
Obr. 27 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro polohu dva v kartézském souřadném systému

Poslední částí simulace je osově symetrické uspořádání. Na Obr. 28 je zobrazena vygenerovaná síť s 372 862 elementy. I zde jsou použita stejná vstupní data jako v programu COMSOL.



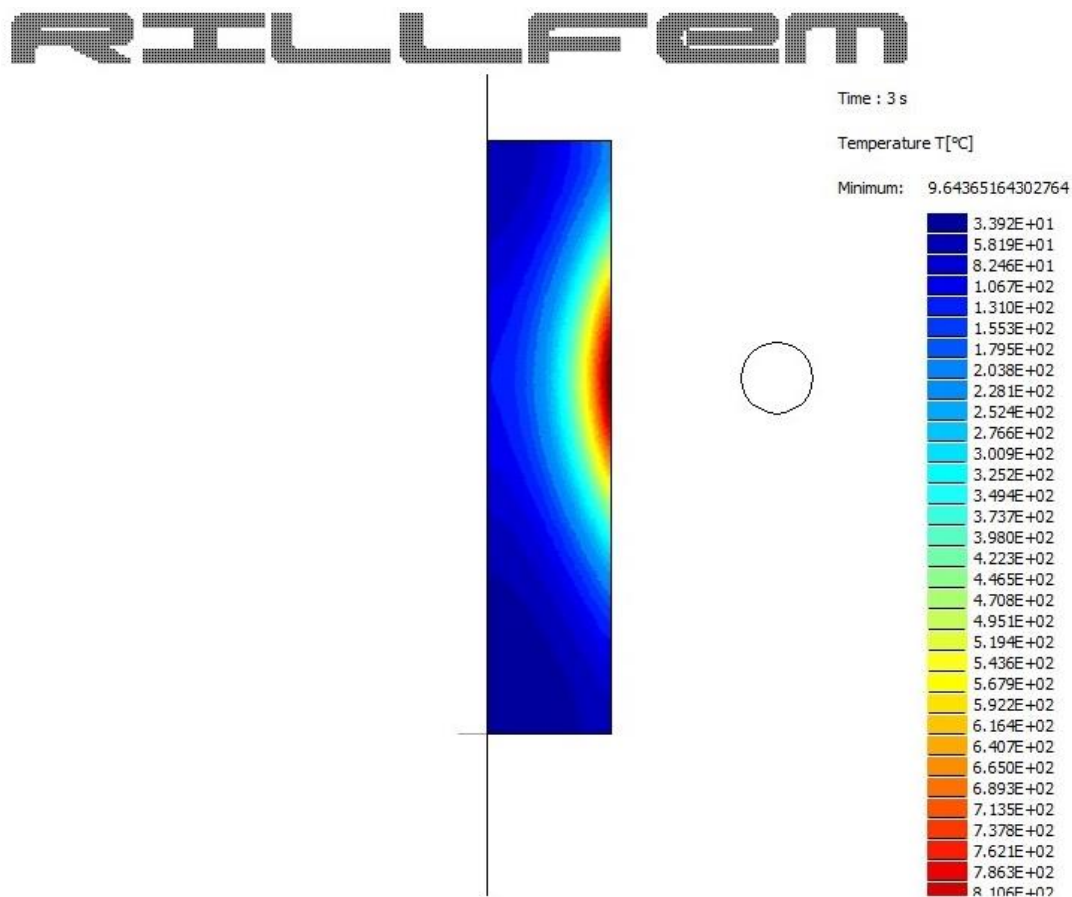
*Obr. 28 Zobrazení sítě pro osově symetrický systém*

Program jako první vypočítá rozložení magnetického pole a poté určí rozložení pole teplotního. Obr. 29 znázorňuje rozložení magnetické indukce v prostoru s maximální hodnotou 2.1 T. Při porovnání s programem COMSOL je zjištěn rozdíl 0.4 T.



Obr. 29 Magnetická indukce pro osově symetrický systém

Poslední Obr. 30 znázorňuje rozložení teplotního pole v čase 3 s. V tomto případě je odečtená maximální hodnota 810 °C. Po srovnání s programem COMSOL je rozdíl teplot 18 °C. Veškeré obrázky vývinu tepla jsou uvedeny v příloze E.

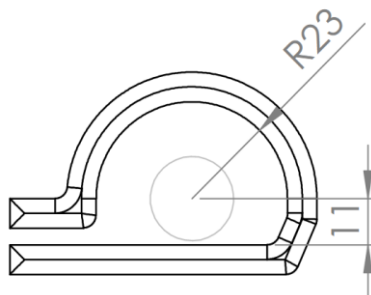


Obr. 30 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro osově symetrický systém



### 3.8 Výroba induktoru

Výstupem simulací je návrh induktoru s konkrétními rozměry: 1 mm od přední rovné strany vsázky a 13 mm od zadní strany. Na Obr. 31 je znázorněn tvar a základní rozměry.



Obr. 31 Základní rozměry induktoru

Pro výrobu je použit materiál měděná trubka o vnějším průměru 7 mm a tloušťkou stěny 1 mm. Délka materiálu je z praktických důvodů zvolena větší než je potřeba (v tomto případě cca 300 mm), neboť lze materiál velmi snadno zkracovat do potřebné délky i na konci procesu. Jelikož je možné vytisknout výkres v měřítku 1:1 a při každé úpravě kontrolovat rozměry induktoru přiložením k výkresové dokumentaci, není nutné předem složitě rozměřovat kóty na polotovar. Induktor byl vyroben následujícím postupem.

Postup výroby induktoru:

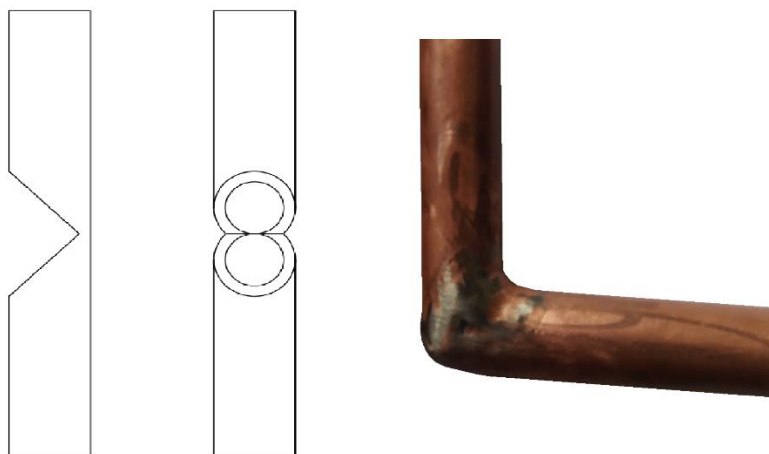
- ohnutí induktoru dle předem připraveného průměru 23 mm,
- přiložení k výkresu a kontrola poloměru,
- naznačení V drážek pro následné vyříznutí,
- vyříznutí V drážek, ohnutí induktoru a kontrola s výkresovou dokumentací,
- zapájení vzniklých mezer měděnou či stříbrnou pájkou.

Takto zvolený postup má výhodu v tom, že nedochází k chybám, jež vznikají vlivem přeměrování či podměrování. Dále odpadá složité dopočítávání rozměrů. V tomto případě lze zjednodušení použít, ale ve složitějších a prostorově náročnějších případech není vhodné tento způsob aplikovat.

Správné ohnutí měděného induktoru bude závislé na poloměru ohybu a průměru použité mědi. V případě tohoto induktoru není potřeba vyplňovat vnitřní dutiny tak, aby

nedošlo ke zborcení stěn. U menších poloměrů ohybu je nutné vyplnit dutiny pískem, anebo vložit naolejovaný drát přímo do dutiny. Při provedení ohybu se stěna opře do vloženého materiálu a tím zůstává průměr stejný. Pomocný materiál písek/drát je po dokončení vyjmut. Jestliže je použit drát, musí být ze stejného materiálu, jako je samotný induktor, aby nedošlo k protržení stěny výrobku při jeho vyjímání.

Pro vytvoření takzvaných V drážek pro pravoúhlé ohyby je potřebná pilka na železo, anebo pokosová pila s nastavitelným úhlem řezání. Při vytváření pravoúhlého tvaru je nutné počítat s tloušťkou stěny induktoru a neřezat skrz. Induktor zůstane v jednom celku a při ohybu drží požadovaný tvar, což usnadňuje následné pájení. Detail zapájeného ohybu tímto způsobem je zobrazen na Obr. 32.



*Obr. 32 Detailní pohled na V drážku a zapájený ohyb induktoru*

Poté je provedeno zapájení tvrdou pájkou za pomoci autogenu (svařování plamenem). Jako přídavný materiál je použita měděná pájka pro pájení mědi s mědí. Pro náročnější spoje (například měď s bronzem), je možné použít stříbrnou pájku. Veškeré zapájené spoje je nutné otestovat na těsnost spojů připojením na jakýkoliv oběh vody. Pro účely této diplomové práce byla těsnost kontrolována připojením vodovodního řádu rodinného domu.

Protože takto vyrobený induktor nelze připojit k žádnému zdroji, bylo zapotřebí přívodní trubky připájet. Přívodní trubka má průměr 12 mm a je nasazena na vývody induktoru. Toto překrytí je opět zapájeno. Celkový pohled na vyrobený induktor je na

Obr. 33. Tento první prototyp slouží k experimentálnímu použití a po ověření funkce se vyrobí verze finální.



*Obr. 33 Celkový pohled na induktor*

Tento typ induktoru s trubkovými nástavci je velmi snadné vyrobit a otestovat. Proto není vhodné při složitějších tvarech vyrábět rovnou finální výrobek, ale zhotovit experimentální kus, prototyp vyzkoušet a posléze zhotovit výrobek finální.

Výsledný induktor, který byl distribuován do zadávající firmy, je zobrazen na Obr. 34. Tento finální typ má specifické rozměry přírodních přírub a délky měděných nástavců. Tyto rozměry byly určeny zákazníkem. Induktor je opět vyroben a vsazen do nástavců, tentokrát s čtvercovým profilem, a konstrukce je zapájena tvrdou pájkou. Příruby jsou opatřeny jednostranným výbrusem, tak aby nedošlo k otočení při zasazování do pracovního stroje (metoda Poka-yoke). Společně s finálním produktem je vyrobena i sprcha pro kalení. Montáž sprchy a induktoru se provádí přímo u zákazníka.



*Obr. 34 Výsledný induktor na obrázku vpravo a vodní sprcha vlevo*

## 4 Experiment s prototypem a jinými induktory

Vyrobený induktor byl odzkoušen v reálných podmínkách u firmy Podhrázký v Jemnici. Použitý zdroj byl sestaven z frekvenčního měniče o výkonu 60 kW a transformátoru s převodem 1:15. Transformátor má zabudovanou kompenzaci pomocí kondenzátorových baterií, která je umístěna v jednom montážním celku. Celek je doplněn o vodní chlazení s průtokem kapaliny sedm litrů za minutu skrz induktor. Vzhledem k tomu, že v těchto podmínkách nelze odzkoušet vodní lázeň, bude závěrečné hodnocení provedeno z teploty dosažené na zkoušené vsázce.

Zda teplota dosáhla požadovaných hodnot, je určeno na základě vizuálního porovnání. Jelikož kovy při různých teplotách mají jinou barvu, lze vizuálním srovnáním celkem přesně určit teplotu vsázky. Barevné podání při různých teplotách je zobrazeno na Obr. 35.

Barva	Popis	Teplota
	bilá	1200°C
	světle žlutá	1100°C
	tmavě žlutá	1050°C
	světle oranžová	980°C
	oranžová	930°C
	světle červená	870°C
	světle třešňově červená	810°C
	třešňově červená	760°C
	tmavě třešňově červená	700°C
	krvavě červená	650°C
	hnědočervená	600°C
	černohnědá	550°C

Obr. 35 Barevné podání kovu při různých teplotách [9]

### 4.1 Pokus s prototypem

První pokus byl proveden s navrhovaným induktorem, který je osazen na přední straně feritem. Zkouška byla rozdělena do dvou fází. V první fázi byl polohován induktor tak, jak je provedena simulace a zároveň se vsázka pohybuje vertikálně rychlostí 4 mm/s. Po vyzkoušení ohřevu v oblasti výbrusu se induktor roztočil na otáčky 0.8 ot/s a tím byla

započata druhá fáze zkoušky v oblasti celého objemu hřídele. Znovu byl sepnut zdroj a vyzkoušen ohřev.

Na Obr. 36 je zobrazen ohřev v čase 3 s v první fázi po zapnutí zdroje. Dle barevného podání lze soudit, že vsázka má teplotu mezi 810 a 870 °C. Pokus s feritem ukázal, že se materiál lokálně přehřál (viz. příloha F, čas ohřevu 4 s). Toto přehřátí by vedlo k nesprávnému vykalení materiálu.



*Obr. 36 Zobrazení ohřevu v čase 3 s, první fáze*

Druhá fáze ohřevu je zobrazena na Obr. 37. Tento obrázek znázorňuje dosažení kalící teploty již v čase 2 s. Zrychlení ohřevu byl způsobeno bližší polohou induktoru vůči vsázce. Rotace hřídele zde homogenizuje ohřev v celém objemu. Celkový ohřev si lze prohlédnout v příloze F.



*Obr. 37 Zobrazení ohřevu v čase 2 s, první fáze*

Prototyp byl vyzkoušen i bez feritu a za stejných podmínek jako v předchozím případě. Na Obr. 38 lze vidět, že dosažení kalící teploty nastalo až v době 4 s, avšak provedený ohřev byl bez lokálních přehřátí. Druhá fáze ohřevu proběhla stejně jako v předchozím případě a celý vývin tepla je zobrazen v příloze G.



Obr. 38 Zobrazení ohřevu v čase 4 s, první fáze bez feritu

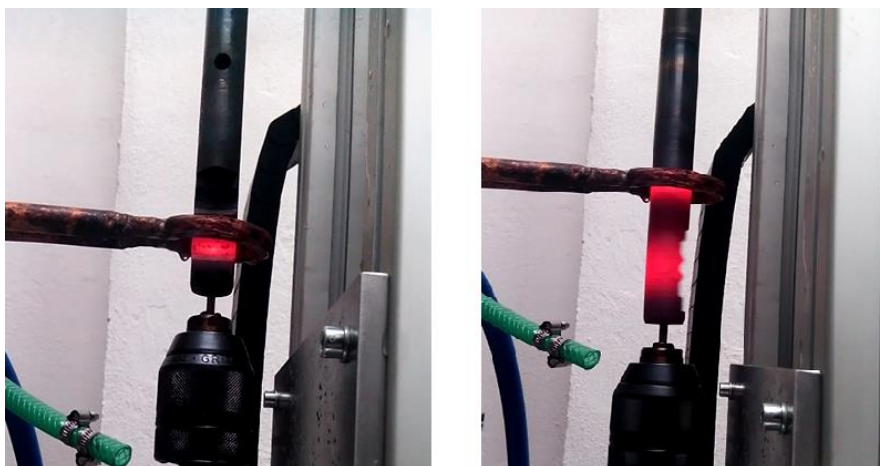
## 4.2 Pokus s dalšími induktory

Pro porovnání s navrženým induktorem byly vybrány další dva induktory. Jedná se o induktor s průměrem 18 mm a čtvercovým profilem 7 mm. Jako druhý je použit dvouzávitový induktor s kulatým profilem 8 mm a průměrem 34 mm. Oba tyto induktory si lze prohlédnout na Obr. 39.



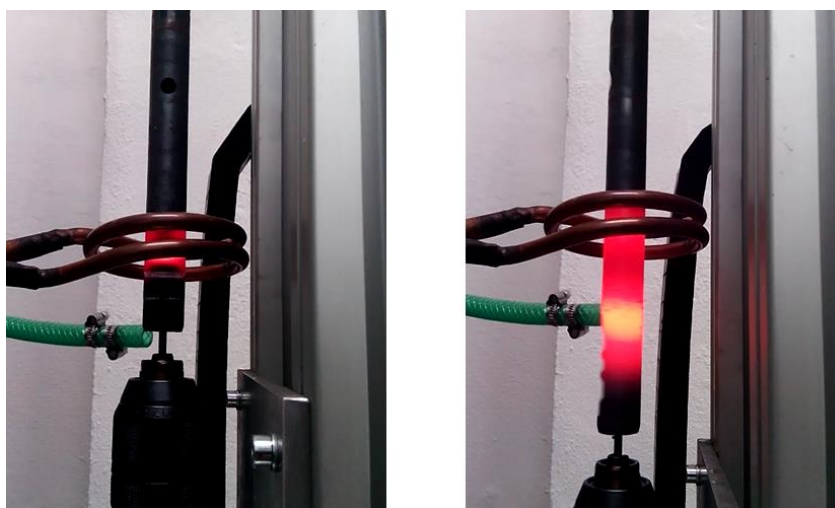
Obr. 39 Pokusné induktory s průměry 18 mm vlevo a 34 mm vpravo

U prvního induktoru se ohřev výbrusu vsázky prodloužil ze 3 s na 7 s, ale v oblasti, kde má vsázka plný profil, fungoval induktor v požadovaných časech. Na Obr. 40 vlevo je zobrazen ohřev výbrusu v čase 7 s a vpravo je zobrazen ohřev plného profilu v čase 3 s. Celkový vývoj tepla ve všech časech lze nalézt v příloze H.



Obr. 40 Ohřev výbrusu v čase 7 s vlevo a ohřev plného profilu v čase 3 s vpravo

Druhý - dvouzávitový induktor ohřál vsázku v čase 5 s. Během ohřevu došlo k lokálnímu přehřátí vsázky a vývinu tepla ve větší části hřídele než je žádoucí. Ohřátí plného profilu bylo dosaženo v čase 4 s. Oba tyto případy jsou zobrazeny na Obr. 41. Celkový vývoj tepla je uveden v příloze I.



Obr. 41 Ohřev výbrusu v čase 5 s vlevo a ohřev plného profilu v čase 4 s vpravo



Tyto dva pokusy dokázaly značnou závislost tvaru induktoru na čase ohřevu a jeho kvalitě. U prvního (jednozávitového) induktoru došlo ke značnému zhoršení ohřevu, ale v oblasti plného profilu zůstal stejný. Tento jev nastal vlivem zhoršení vazby v oblasti výbrusu a zlepšení vazby v oblasti plného profilu. Druhý pokus s dvouzávitovým induktorem potvrdil hypotézu, že ohřev bude v obou oblastech zhoršen. V závěru nedošlo ke zhoršení v takové míře, jak bylo očekáváno. Tento fakt lze vysvětlit tím, že induktor vytvořil dvojnásobně silné magnetické pole (dva závity induktoru) a ve vsázce byl naindukován dvojnásobný proud.

## Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh a optimalizace induktoru pro povrchové kalení hřídele.

Práce byla rozdělena celkem do čtyř kapitol. První kapitola byla věnována rešerši problematiky indukčního kalení. Byly zde popsány jednotlivé části řetězce, definována základní pravidla pro tvarové určení induktoru, způsoby chlazení a možnosti kompenzace jalové energie. Na obrázcích v jednotlivých podkapitolách byla demonstrována schématická funkční zapojení nebo přímo jedna součást ze sestavy.

Ve druhé části diplomové práce byly odvozeny vztahy pro výpočet elektromagnetického a teplotního pole v prostoru. Kapitola byla doplněna o definici okrajových podmínek v obou polích.

Náplní třetí kapitoly byl samotný návrh celého induktoru. Nejprve byla definována vsázka a požadavky na ohřev. Ze vzorce pro výpočet hloubky vniku byla stanovena pracovní frekvence 12,5 kHz, která byla použita v obou simulačních programech. Dále byly uvedeny modely v osově symetrickém a kartézském souřadném systému, stanoveny jejich okrajové podmínky a určeny materiálové parametry v jednotlivých oblastech. Všechny simulace byly realizovány ve dvou programech a to v programu COMSOL a RillFEM. Do obou návrhů byla zadána stejná geometrie a materiálové konstanty. Na základě simulací vyplynuly rozměry navrhovaného induktoru. Ze simulace v kartézském uspořádání byla určena vzdálenost přední rovné strany induktoru 1 mm a ze simulace v osově symetrickém uspořádání vyplynul rozměr zadního poloměru 23 mm. Nakonec byla stručně popsána samotná výroba induktoru a použitá technologie.

Poslední část byla zaměřena na experiment s vyrobeným prototypem a odzkoušení funkčnosti navrženého induktoru.

Ze simulovaných dat lze říci, že oba programy modelovaly teplotní pole s pouze malým rozdílem. Největší rozdíl byl zaznamenán v simulaci elektromagnetického pole, kdy rozdíl činil až 1 T. Velké hodnoty magnetické indukce jsou způsobeny zavedením lineární permeability, ale tato chyba se významně neprojevuje v teplotním poli. Zkoumání těchto rozdílů by mohlo být náplní další diplomové práce.

Aby bylo možné ověřit správnost návrhu, byl vyroben prototyp a realizovány celkem čtyři experimenty. Je důležité zmínit, že ověření funkčnosti induktoru bylo provedeno na základě nepřímého určení teploty vsázky. Tato teplota byla odečtena z tabulky 35, kde jednotlivé barvy kovu zastupují teplotní rozmezí.

V prvním experimentu byl induktor osazen feritem a ohřev výbrusu dosáhl teploty 810 až 870 °C v čase 3 s. Ohřev plného materiálu na stejnou teplotu nastal v čase 2 s. Při delším ohřevu by se projevilo lokální přehřátí materiálu a vykalení by nemuselo odpovídat zadaným požadavkům. Z toho důvodu byl pokus opakován i bez feritu. Při srovnání výstupu simulace a experimentu je zřejmé, že výsledky dosahují odchylky cca 40 °C. Druhý pokus (bez feritu) vykázal homogennější ohřev, avšak čas ohřevu se prodloužil o 2 s. Takto navržený induktor by byl vhodnější v kombinaci se silnějším zdrojem, anebo s vhodněji stanovenou kompenzací. Třetí a čtvrtý experiment byl realizován s nevhodnými induktory, aby bylo možné prezentovat špatnou vazbu mezi induktorem a vsázkou. Třetí pokus byl proveden s jednozávitovým induktorem o průměru 18 mm. V tomto případě došlo ke zhoršení výsledků v oblasti výbrusu z důvodu zhoršení vazby mezi induktorem a vsázkou. Ohřev plného profilu proběhl stejně jako v případě navrhovaného induktoru. Čtvrtý pokus s dvouzávitovým induktorem o průměru 34 mm vykazoval lokální přehřátí v oblasti výbrusu a pomalejší ohřátí v části s plným profilem. Tento jev nastal z důvodu velkého poloměru induktoru, ale i přes to celková doba ohřevu nebyla až tak dlouhá, jak bylo očekáváno (cca 30 – 40 sekund).

Závěrem lze říci, že na základě provedených experimentů, by bylo vhodnější v návrhu uvažovat s dvouzávitovým induktorem a to především z důvodu časové náročnosti ohřevu. Možnou komplikací tohoto návrhu by mohlo být zvýšení indukčnosti (reaktance) induktoru a tudíž komplikovanější kompenzace jalové energie.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KARBAN, P.: *Přednášky z předmětu aplikace teoretické elektrotechniky*. Plzeň, 2015
- [2] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd., přeprac. Plzeň: Západočeská univerzita, Elektrotechnická fakulta, 2001. ISBN 80-7082-826-9.
- [3] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 180 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [4] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [5] LANGER, Emil a KOŽENÝ, Jiří. *Elektrotepelná zařízení indukční: základy teorie, výpočty a konstrukce*. 1. vyd. Plzeň: VŠSE, 1982. skripta 185 s.
- [6] Co je indukční ohřev? In: ROBOTERM s.r.o. [online]. [cit. 2016-03-15]. Dostupné z: <http://www.roboterm.cz/home/co-je-indukcni-ohrev>
- [7] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [8] ZINN, S a S SEMIATIN. *Elements of induction heating: design, control, and applications*. Metals Park, OH: ASM International, c1988.
- [9] *Přibližné určení teploty oceli podle barvy* [online]. [cit. 2016-04-13]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008091502>
- [10] RUDNEV, Valery. *Handbook of induction heating*. New York: Marcel Dekker, c2003. ISBN 0824708482

## Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Základní řetězec indukčního ohřevu.....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2 Třífázový usměrňovač a jednofázový usměrňovač .....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 3 Jednofázový střídač plný můstek a půl-můstek .....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 4 Uspořádání transformátoru.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 5 Základní polohy jednozávitových induktorů [7, s. 89].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 6 Příklad provedení transformátoru a uchycení induktoru.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 7 Příklad induktoru pro kalení se zabudovanou sprchou vlevo a pro dvojité kalení jedním induktorem vpravo.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 8 Detail výbrusu nárys, bokorys .....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 9 Celkový pohled na model v kartézské soustavě souřadnic .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 10 Detailní pohled na výbrus .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 11 Model ve válcovém souřadnicovém (R;Z) systému .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 12 Model ve válcovém souřadnicovém (R;Z) systému - detail.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 13 Zobrazení sítě (mesh) v referenčním bodě jedna v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 14 Zobrazení sítě (mesh) v referenčním bodě dva v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 15 Rozložení magnetické indukce pro polohu jedna v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 16 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro polohu jedna v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 17 Rozložení magnetické indukce pro polohu dva v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 18 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro polohu dva v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 19 Zobrazení sítě pro osově symetrický systém .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 20 Magnetická indukce pro osově symetrický systém.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 21 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro osově symetrický systém.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 22 Zobrazení sítě (mesh) v referenčním bodě jedna v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 23 Zobrazení sítě (mesh) v referenčním bodě dva v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 24 Rozložení magnetické indukce pro polohu jedna v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 25 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro polohu jedna v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 26 Rozložení magnetické indukce pro polohu dva v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 27 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro polohu dva v kartézském souřadném systému .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 28 Zobrazení sítě pro osově symetrický systém .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 29 Magnetická indukce pro osově symetrický systém.....</i>	<i>47</i>

<i>Obr. 30 Zobrazení teploty v sázce v čase 3 s pro osově symetrický systém.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 31 Základní rozměry induktoru .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 32 Detailní pohled na V drážku a zapájený ohyb induktoru .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 33 Celkový pohled na induktor.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 34 Výsledný induktor na obrázku vpravo a vodní sprcha vlevo .....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 35 Barevné podání kovu při různých teplotách [9] .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 36 Zobrazení ohřevu v čase 3 s, první fáze.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 37 Zobrazení ohřevu v čase 2 s, první fáze.....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 38 Zobrazení ohřevu v čase 4 s, první fáze bez feritu .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 39 Pokusné induktory s průměry 18 mm vlevo a 34 mm vpravo.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 40 Ohřev výbrusu v čase 7 s vlevo a ohřev plného profilu v čase 3 s vpravo.....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 41 Ohřev výbrusu v čase 5 s vlevo a ohřev plného profilu v čase 4 s vpravo.....</i>	<i>56</i>

## Seznam tabulek

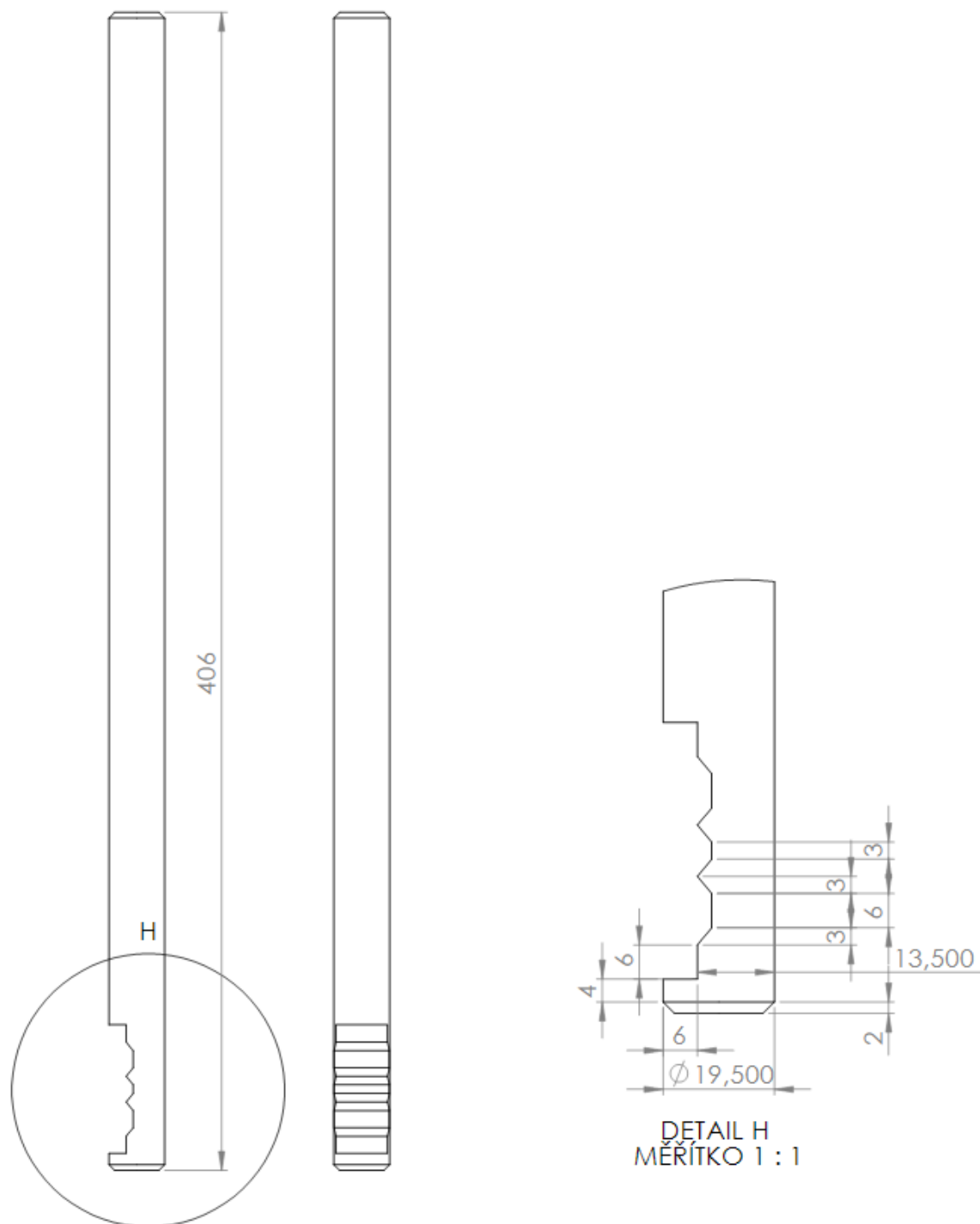
<i>Tab. 1 Materiálové vlastnosti vsázky.....</i>	<i>26</i>
<i>Tab. 2 Výpočet hloubky vniku pro různé pracovní frekvence.....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 3 Použité materiálové hodnoty v simulaci .....</i>	<i>31</i>
<i>Tab. 4 Energetická náročnost pro jednotlivé čas. intervaly.....</i>	<i>32</i>

## Seznam příloh

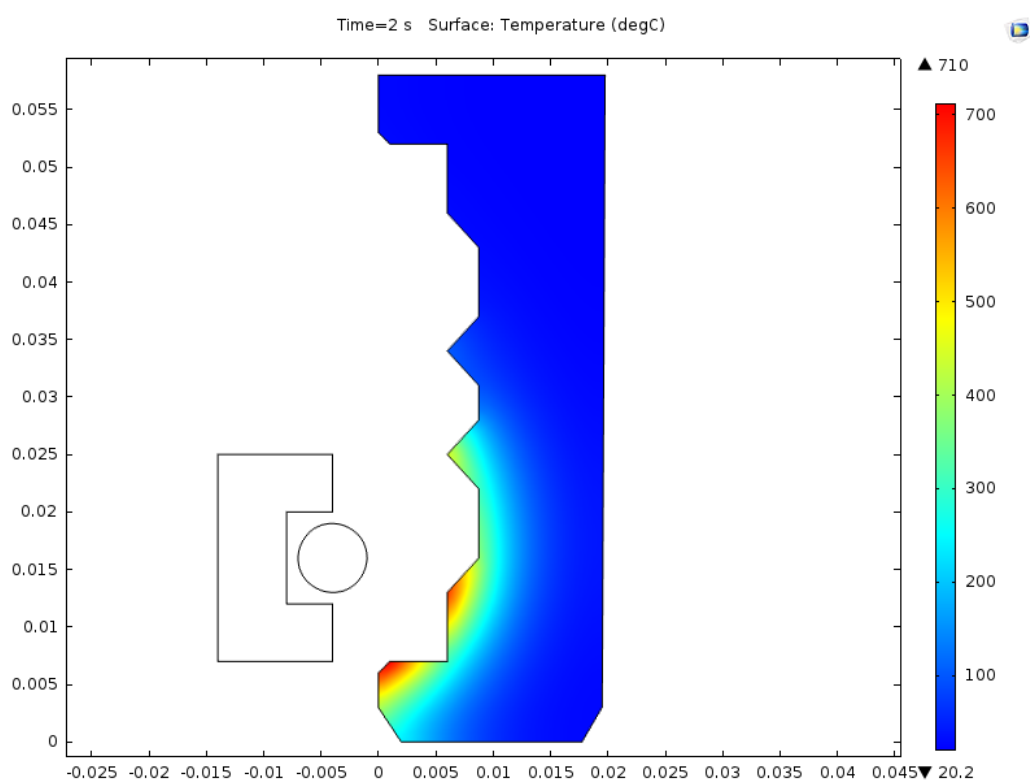
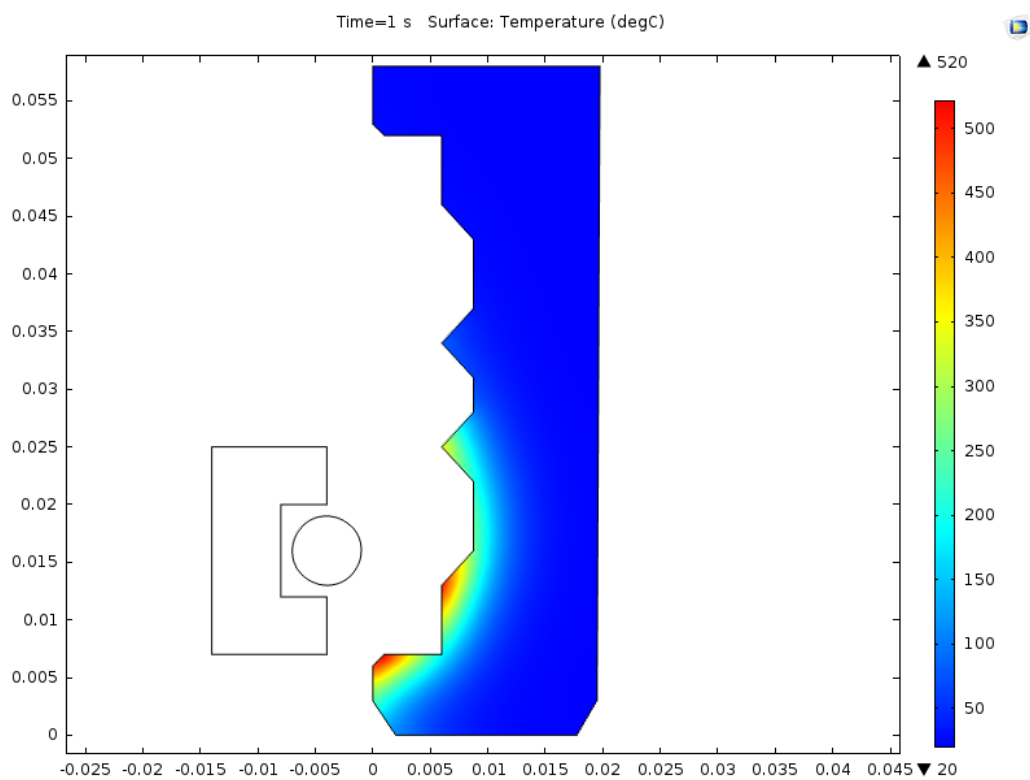
<i>Příloha A: výkresová dokumentace hřídele.....</i>	<i>63</i>
<i>Příloha B: simulace v programu COMSOL v kartézském uspořádání.....</i>	<i>64</i>
<i>Příloha C: simulace v programu COMSOL v osově symetrickém uspořádání .....</i>	<i>68</i>
<i>Příloha D: simulace v programu RillFEM v kartézském uspořádání .....</i>	<i>70</i>
<i>Příloha E: simulace v programu RillFEM v osově symetrickém uspořádání .....</i>	<i>74</i>
<i>Příloha F: vývin tepla ve vsázce induktorem s feritem .....</i>	<i>76</i>
<i>Příloha G: vývin tepla ve vsázce induktorem bez feritu .....</i>	<i>78</i>
<i>Příloha H: vývin tepla ve vsázce symetrickým induktorem .....</i>	<i>80</i>
<i>Příloha I: vývin tepla ve vsázce dvouzávitovým symetrickým induktorem .....</i>	<i>82</i>

## Přílohy

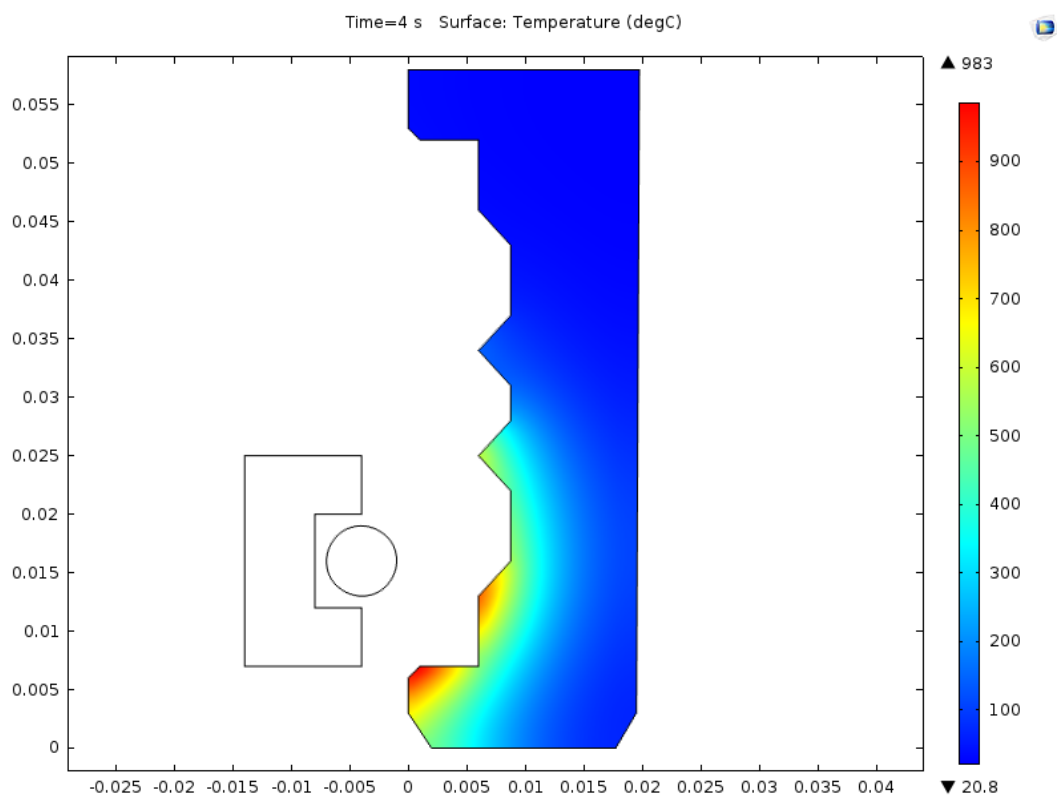
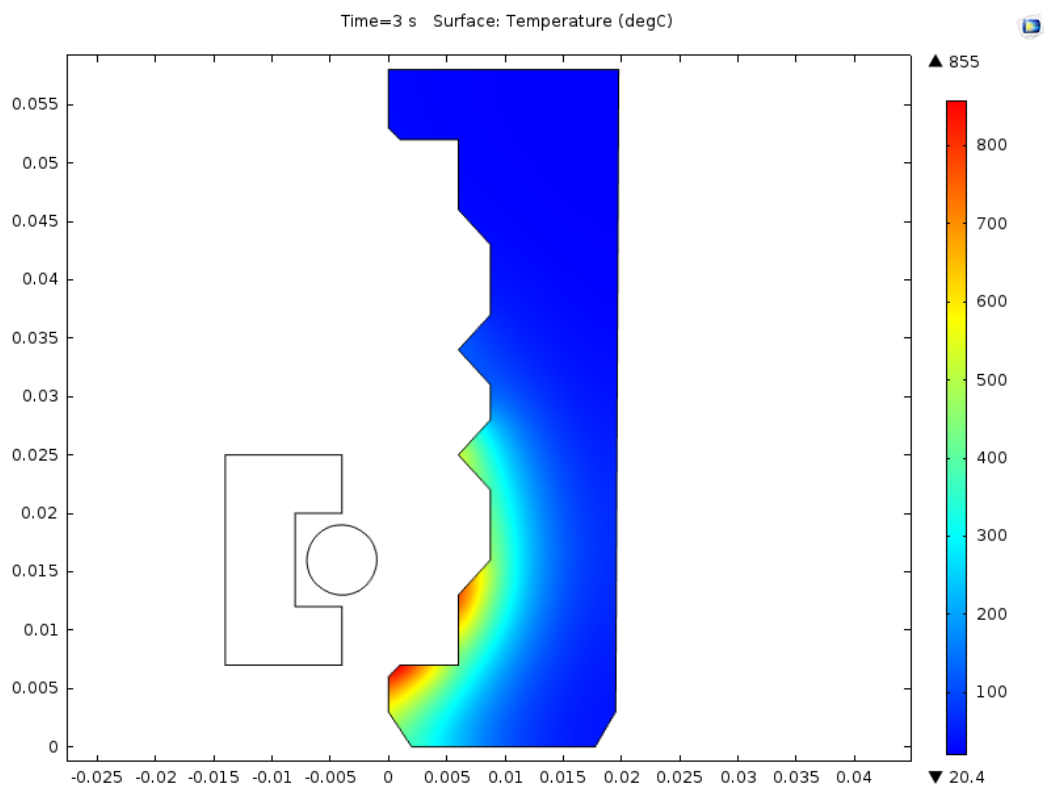
### Příloha A: výkresová dokumentace hřídele

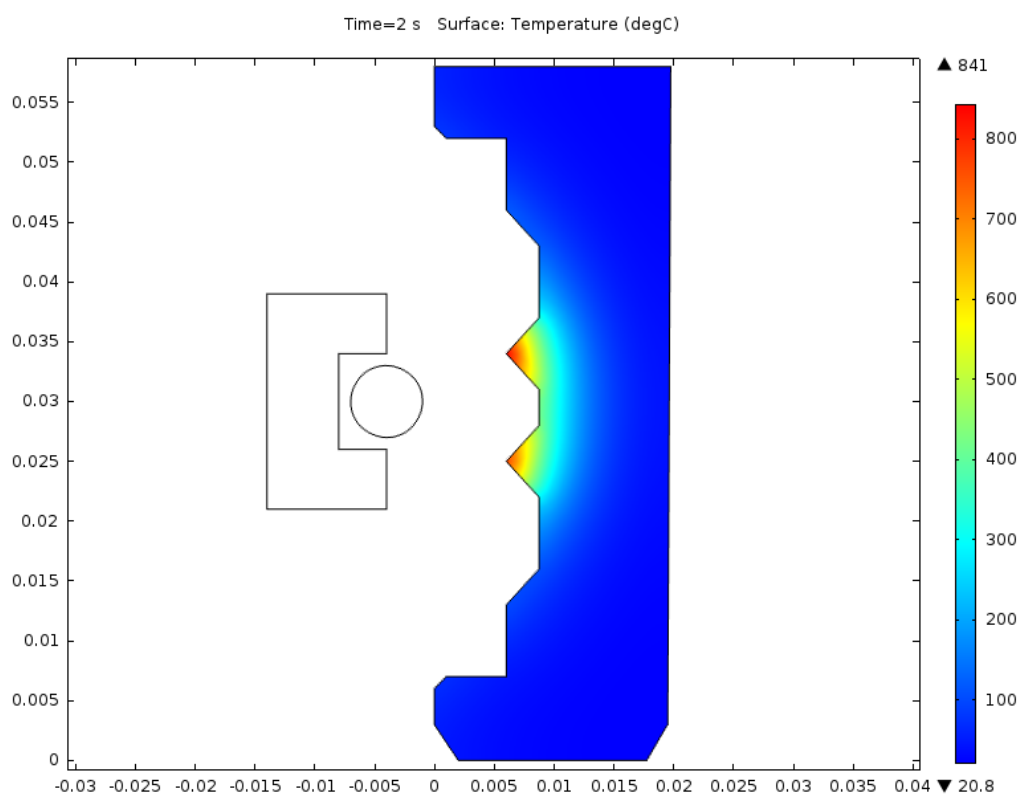
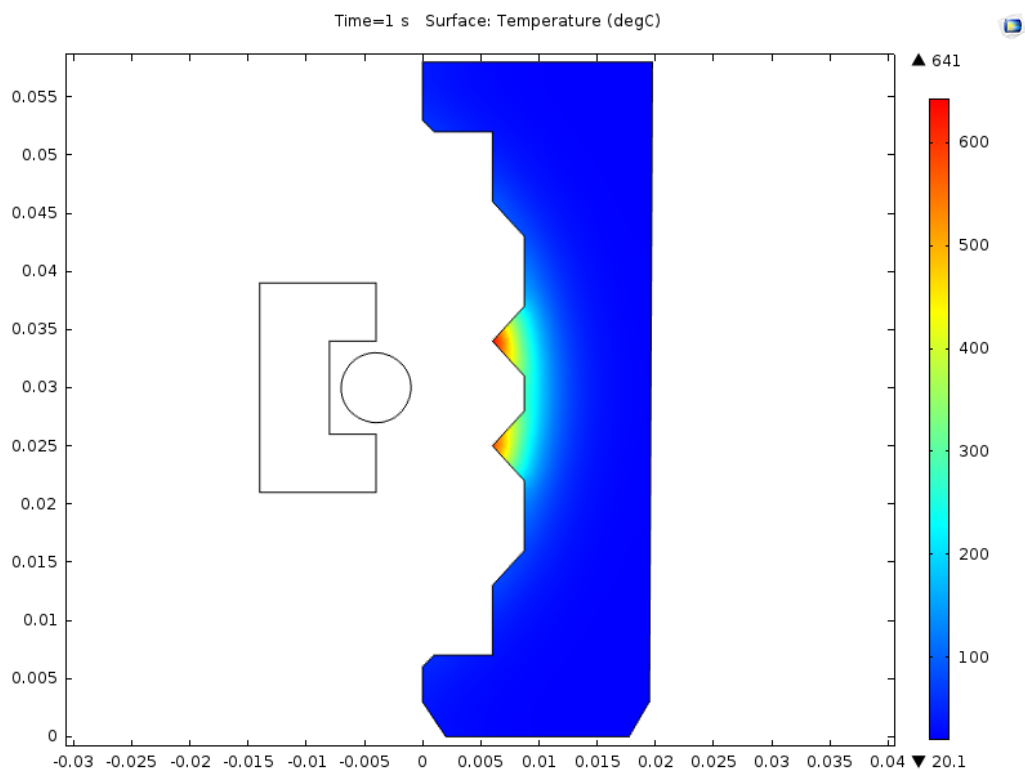


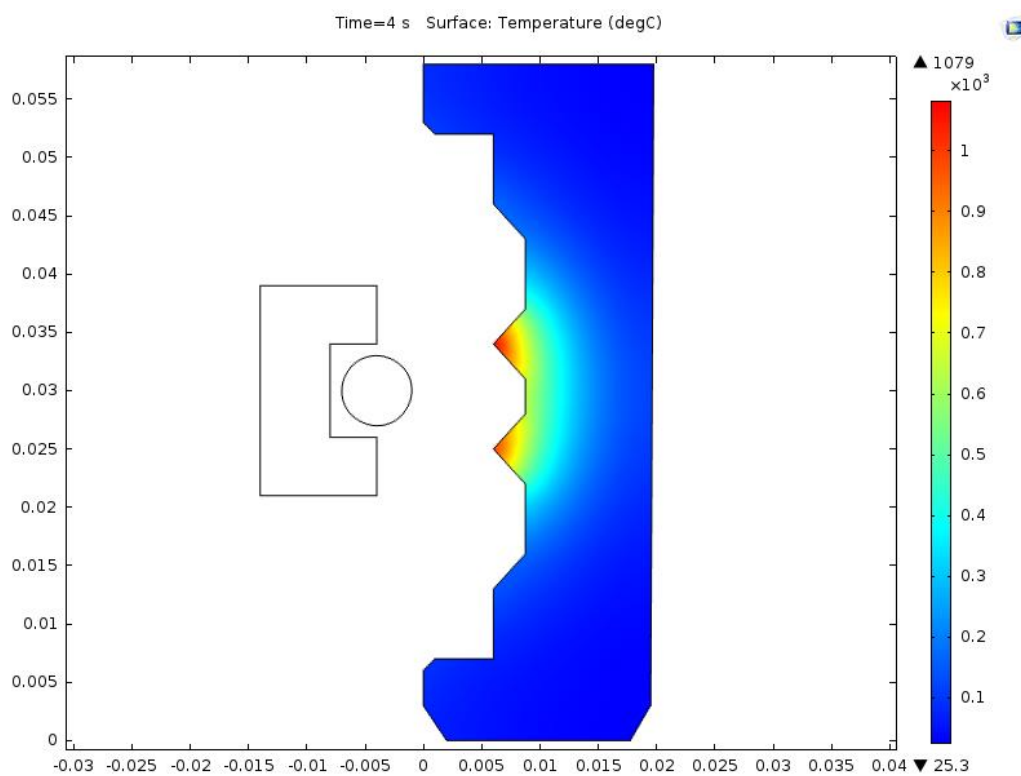
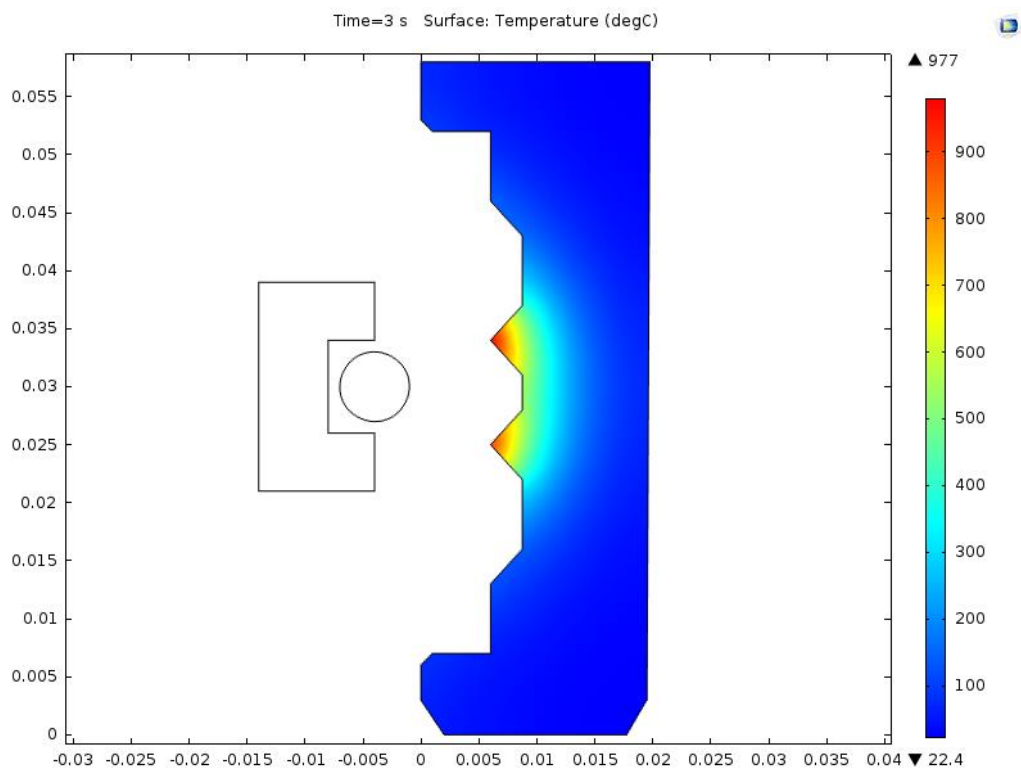
**Příloha B: simulace v programu COMSOL v kartézském uspořádání**



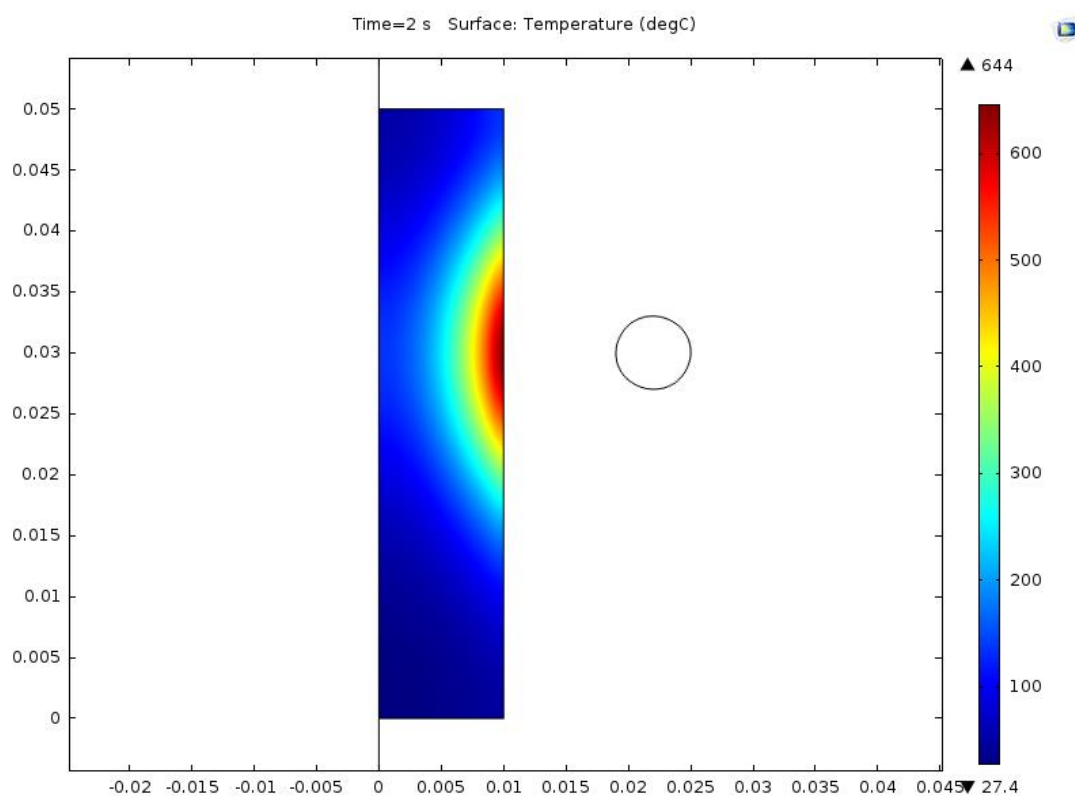
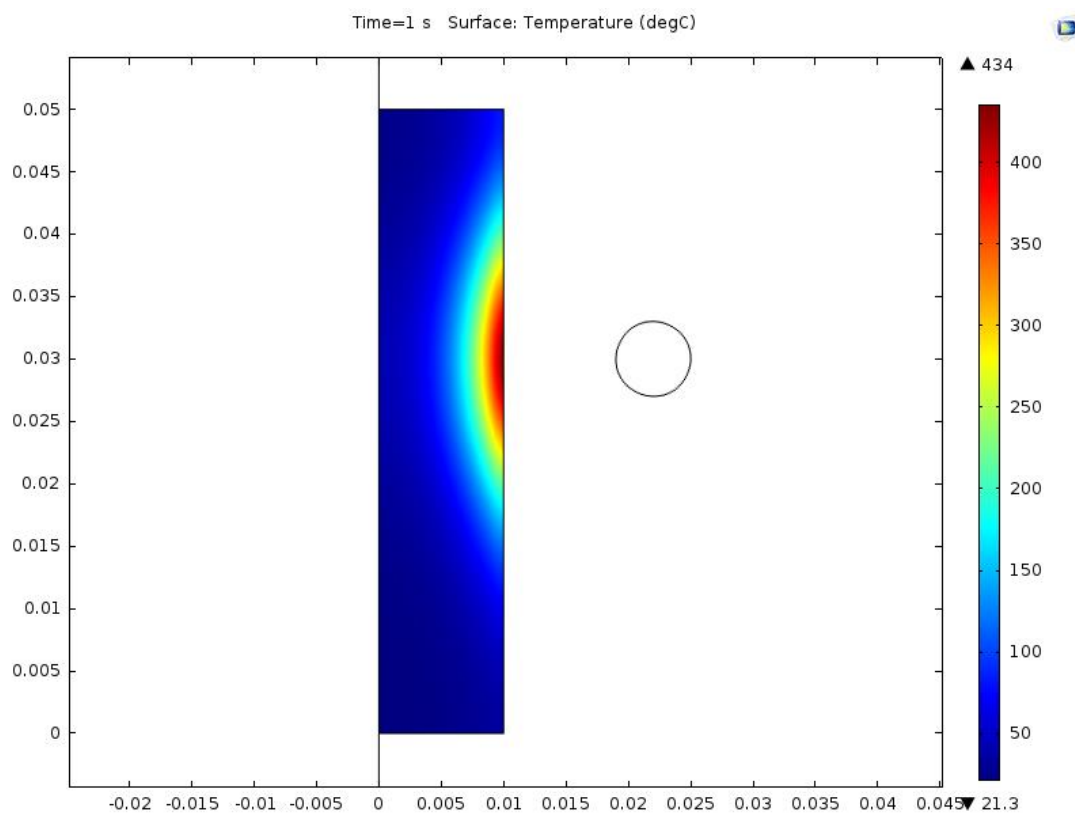


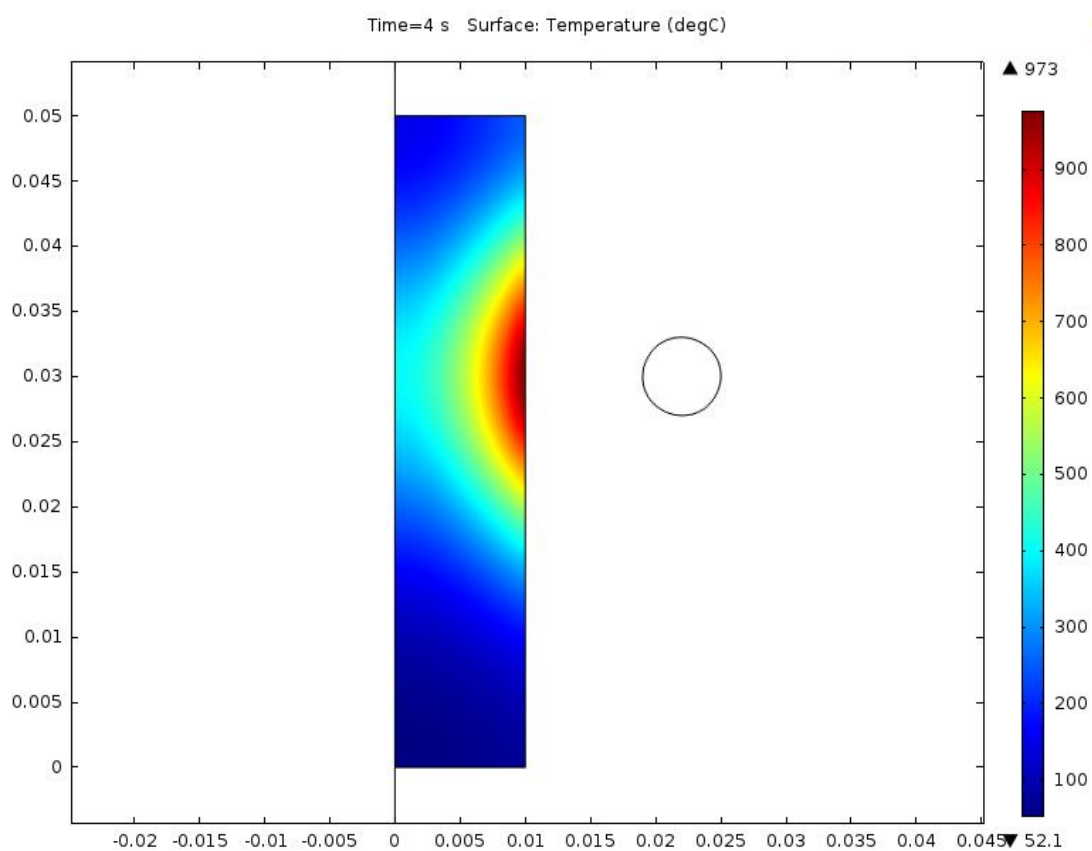
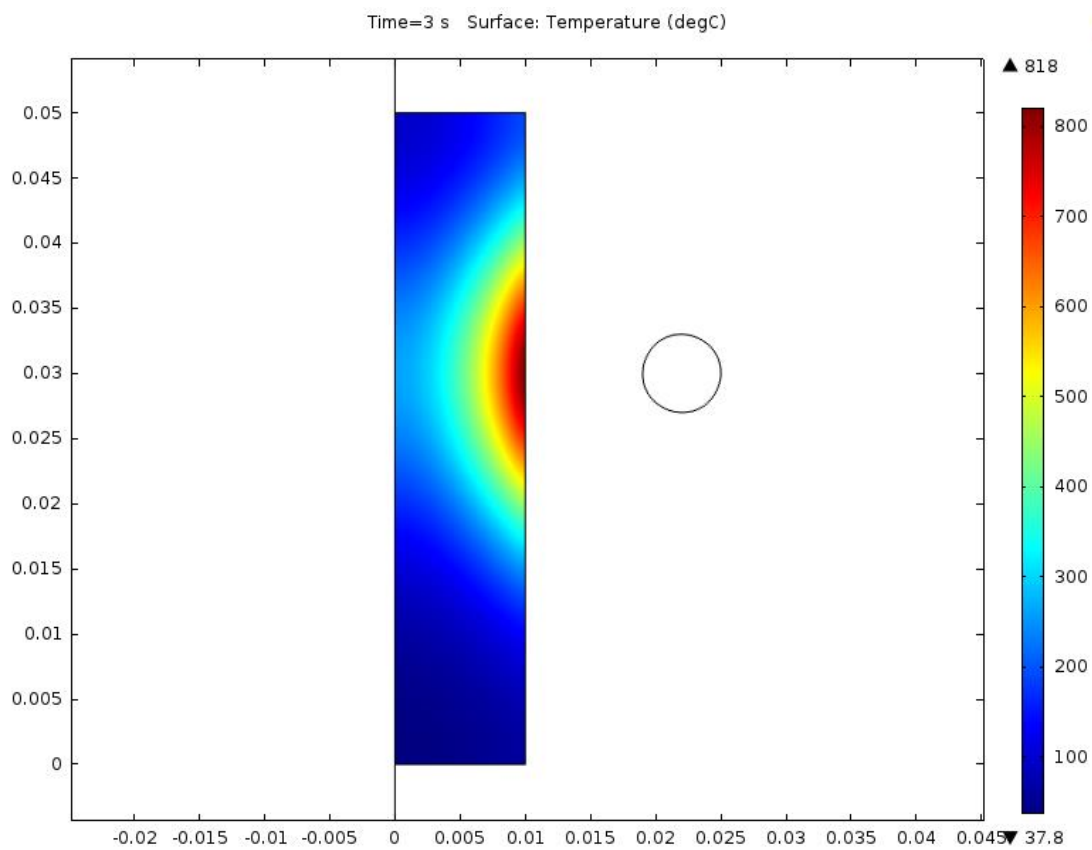






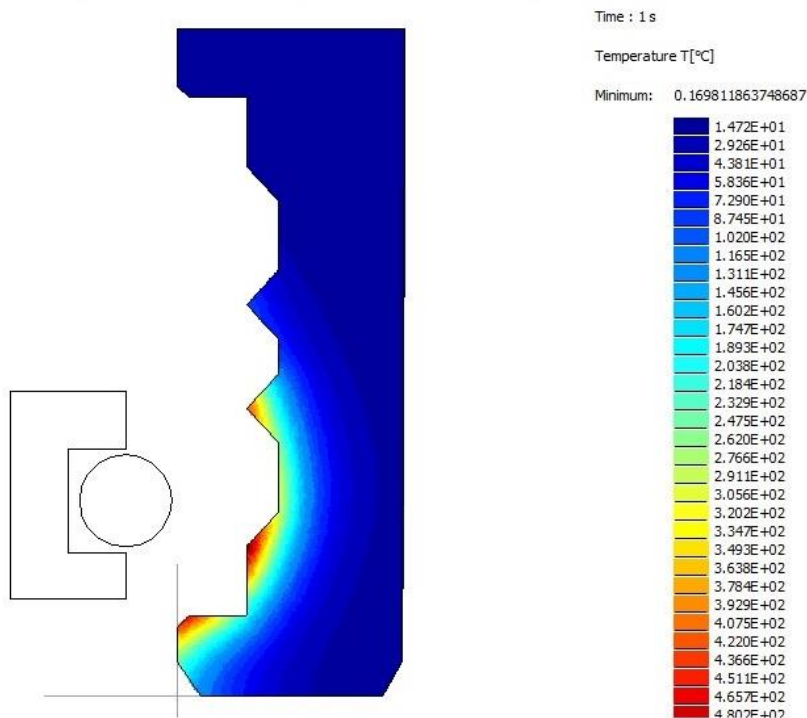
**Příloha C: simulace v programu COMSOL v osově symetrickém uspořádání**



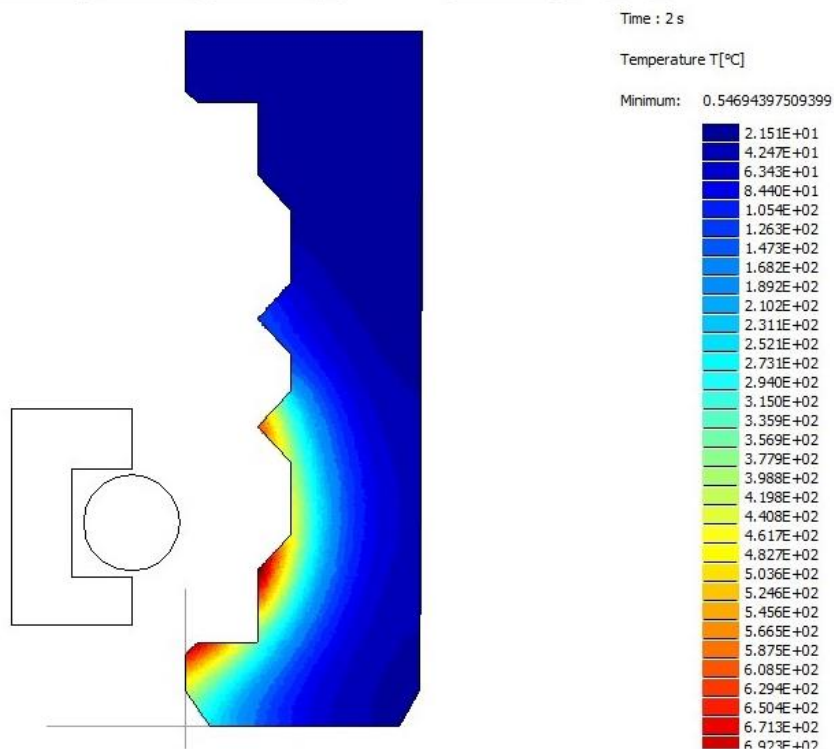


**Příloha D: simulace v programu RILLFEM v kartézském uspořádání**

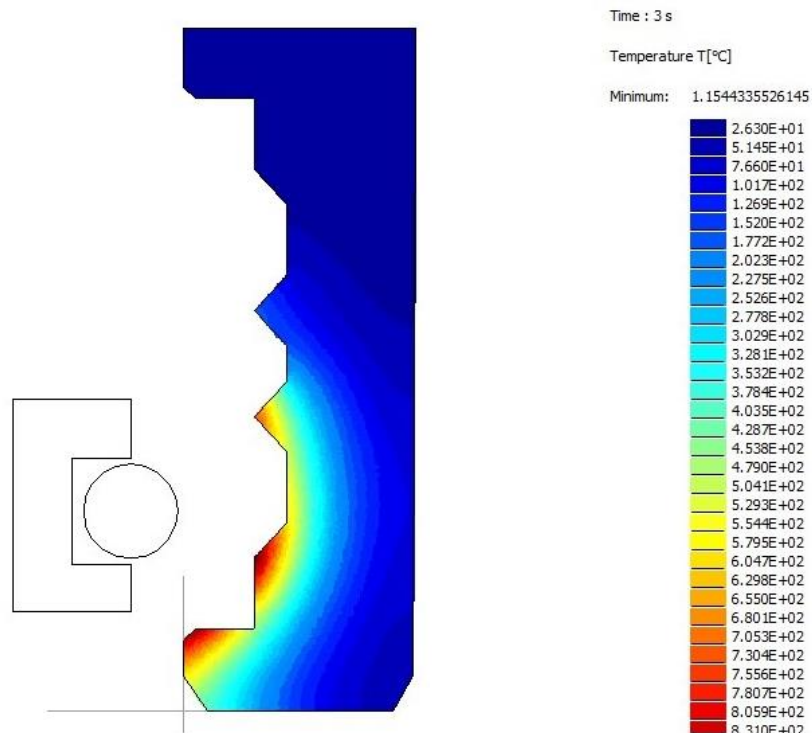
**RILLFEM**



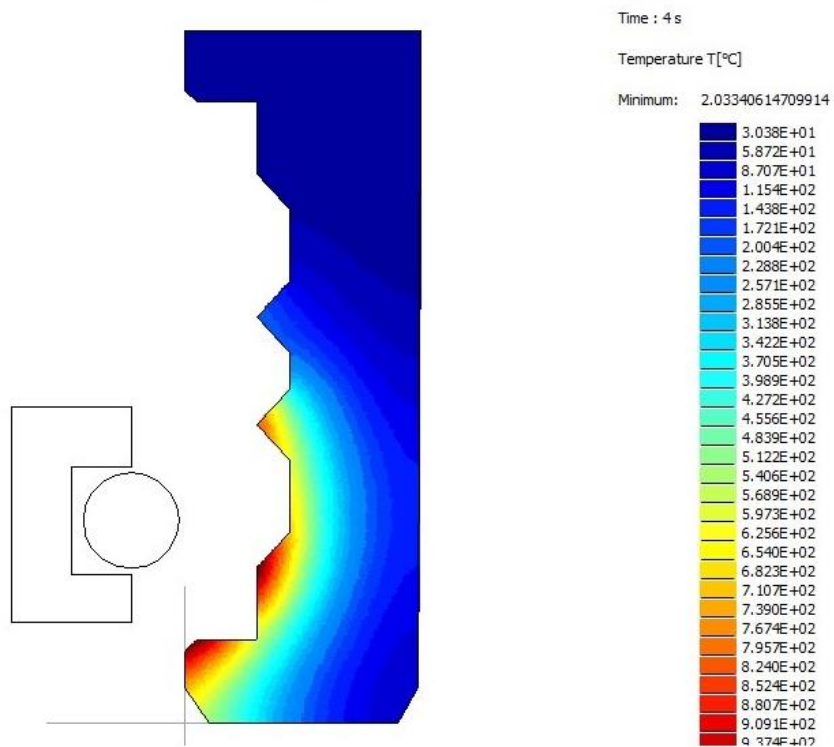
**RILLFEM**



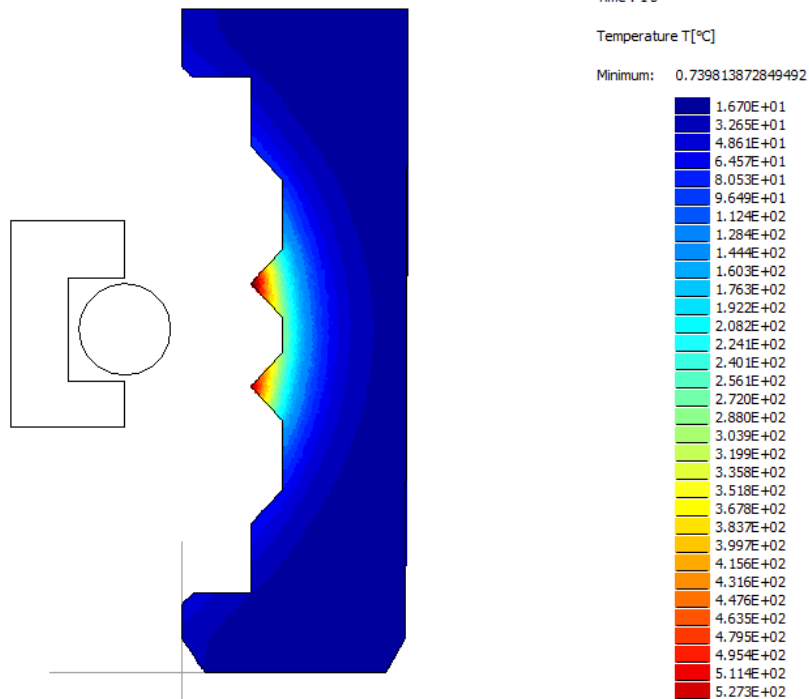
# RIILLFEM



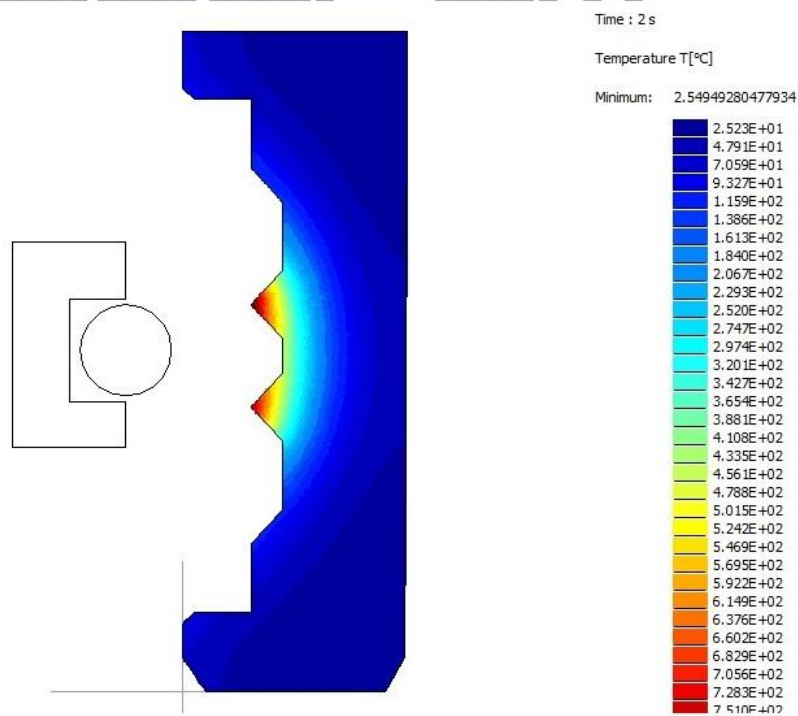
# RIILLFEM



# RIILLFEM

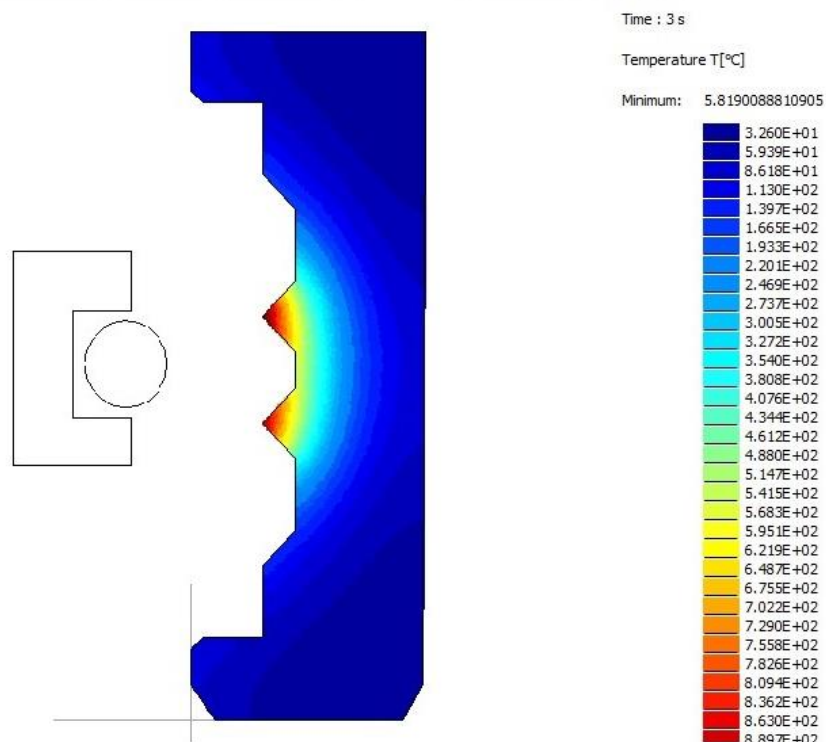


# RIILLFEM

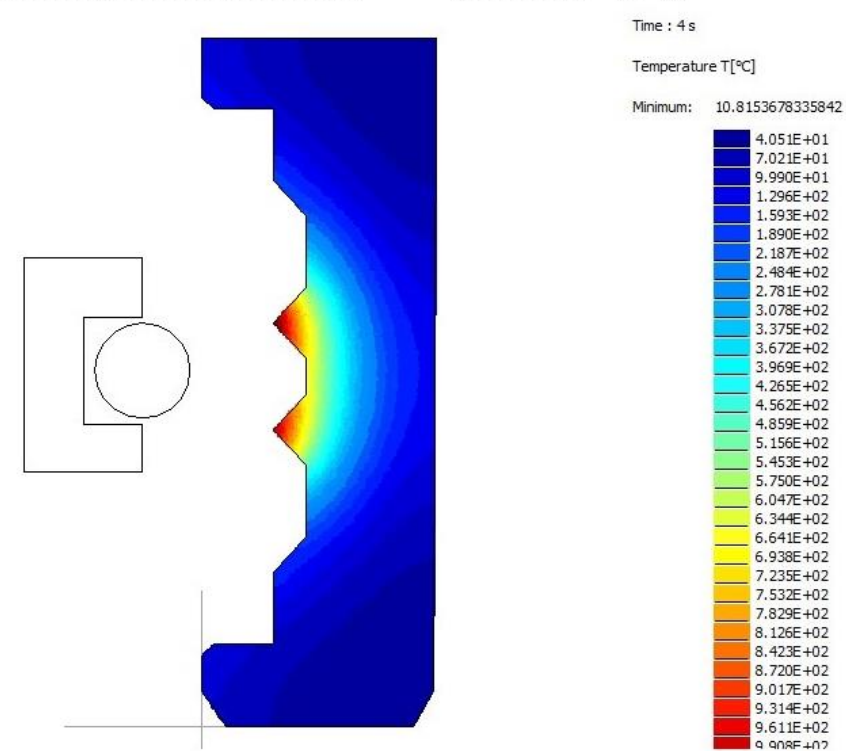




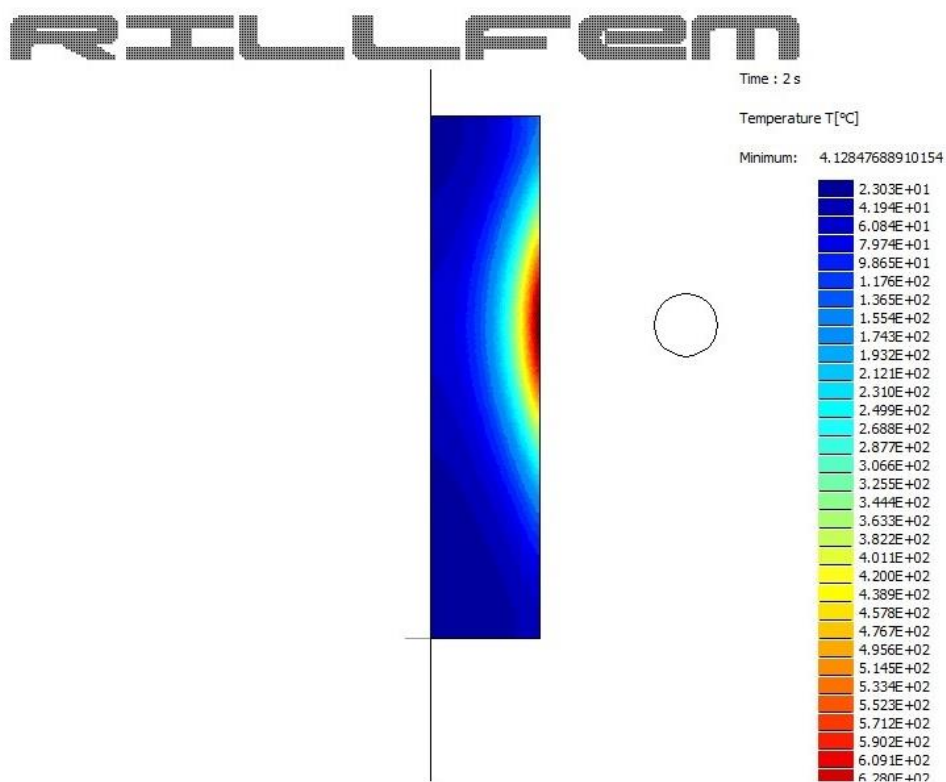
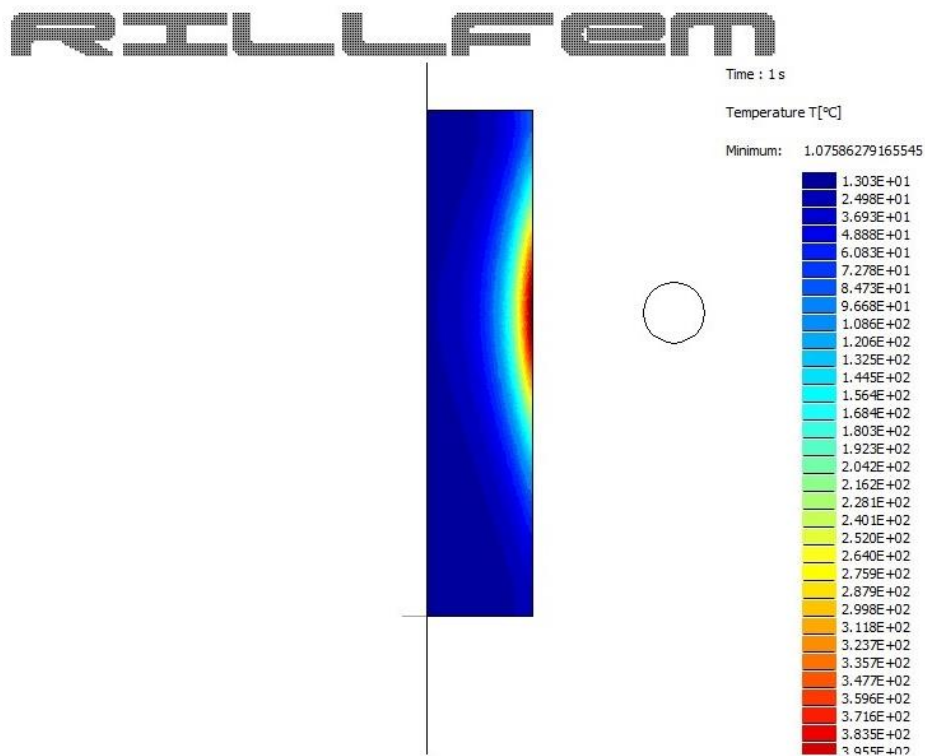
# RILLFEM



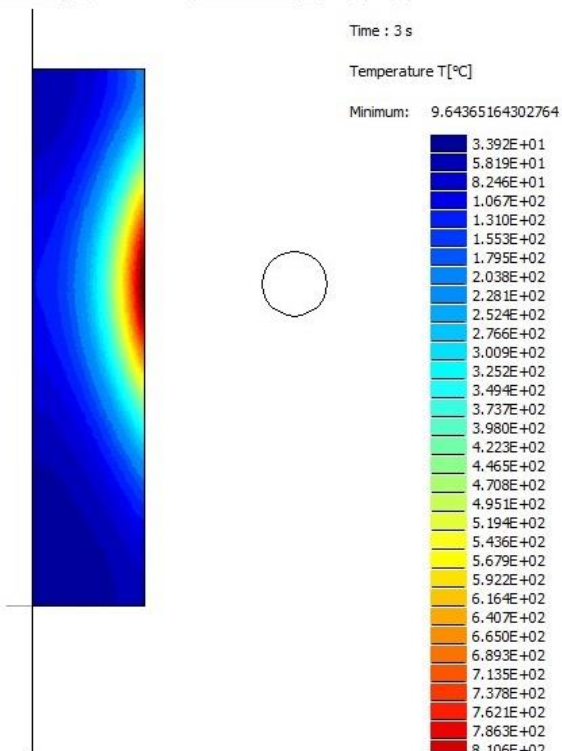
# RILLFEM



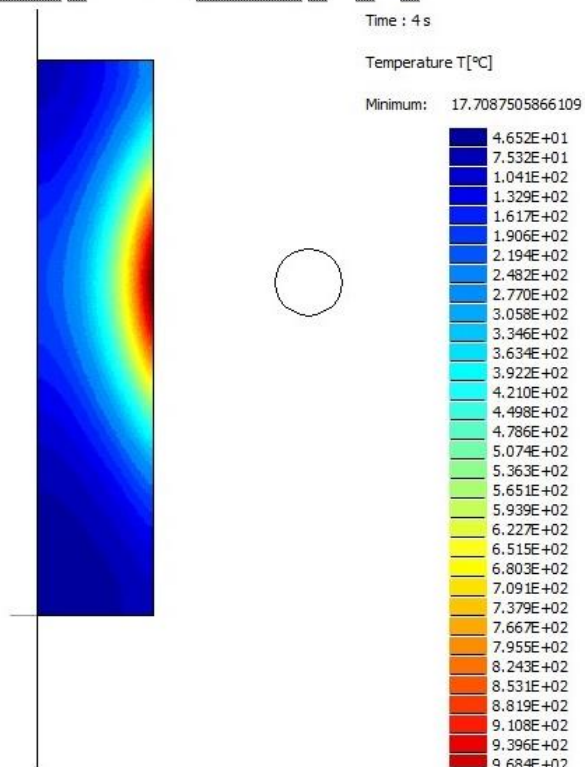
Příloha E: simulace v programu RillFEM v osově symetrickém uspořádání



# RILLFEM



# RILLFEM



**Příloha F: vývin tepla ve vsázce induktorem s feritem**

Ohřev v první fázi v čase 1 s až 4 s



Ohřev ve druhé fázi v čase 1 s až 4 s



**Příloha G: vývin tepla ve vsázce induktorem bez feritu**

Ohřev v první fázi v čase 1 s až 6 s



Ohřev ve druhé fázi v čase 1 s až 4 s



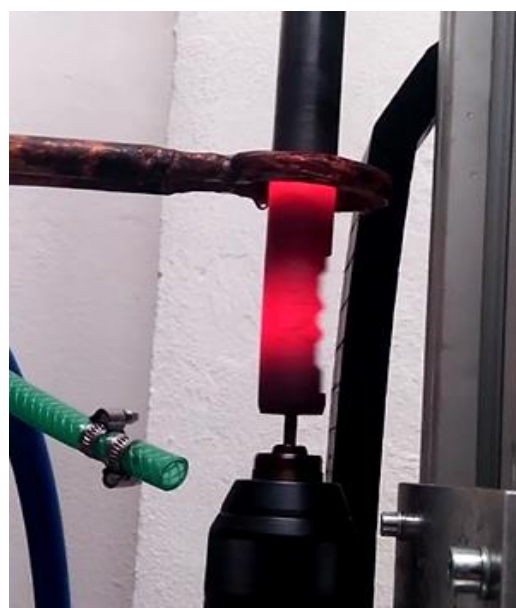
**Příloha H: vývin tepla ve vsázce symetrickým induktorem**

Ohřev v první fázi v čase 1 s, 3 s, 5 s a 7 s





Ohřev ve druhé fázi v čase 1 až 4 s



**Příloha I: vývin tepla ve vsázce dvouzávitovým symetrickým induktorem**

Ohřev v první fázi v čase 1 s, 4 s, 7 s a 9 s



Ohřev ve druhé fázi v čase 1 až 4 s

