

Modelování indukčního ohřevu pomocí COMSOL Multiphysics

Pracoviště: Katedra výkonové elektroniky a strojů
Číslo dokumentu: 22190–019–2024
Typ zprávy: Výzkumná zpráva
Řešitelé: Ing. Martin Kadlec
Hlavní řešitel: Ing. Martin Kadlec
Počet stran: 24
Datum vydání: 22.11.2024
Oborové zařazení: 2.2 Electrical engineering, Electronic engineering, Information engineering – Electrical and electronic engineering

Zadavatel / zákazník:

Zpracovatel / dodavatel:

Západočeská univerzita v Plzni
Regionální inovační centrum elektrotechniky
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

Kontaktní osoba:

Ing. Martin Kadlec
tel. 377634428
kadlec99@fel.zcu.cz

Tato zpráva vznikla v přímé souvislosti s řešením projektu SGS–2024–017.

Anotace

Tato výzkumná zpráva se zabývá modelováním indukčního ohřevu s využitím simulační platformy COMSOL Multiphysics. Indukční ohřev je efektivní metoda přenosu tepla, která nachází uplatnění v průmyslových procesech, jako je např. kalení nebo tavení kovů. Cílem této práce bylo vytvořit takový numerický model, jehož výstupy by co nejvíce odpovídaly hodnotám změřeným na reálném zařízení.

Při řešení této práce byl zkoumán vliv závislosti relativní permeability na teplotě a magnetické intenzitě. Tyto závislosti byly postupně implementovány do modelu a byl sledován jejich vliv na průběh teploty na povrchu vsázky a v jejím středu. Tyto průběhy byly následně porovnány s teplotami změřenými na experimentálním zařízení.

Výsledky ukazují, že model sestavený v prostředí COMSOL Multiphysics může v určitém rozsahu teplot poskytovat velmi přesnou predikci šíření tepelné energie ve vsázce. Zpráva diskutuje současná omezení modelu a možnosti jeho dalšího rozšíření za účelem odstranění těchto omezení.

Klíčová slova

Indukční ohřev, COMSOL Multiphysics, Currieova teplota

Název zprávy v anglické jazyce / Report title

Induction heating modeling with COMSOL Multiphysics

Anotace v anglickém jazyce / Abstract

This research report deals with the modeling of induction heating using the COMSOL Multiphysics simulation platform. Induction heating is an efficient heat transfer method that finds application in industrial processes such as hardening or melting of metals. The aim of this work was to create a numerical model whose outputs would match as closely as possible the values measured on real device.

In this work, the influence of the dependence of relative permeability on temperature and magnetic intensity was investigated. These dependencies were sequentially implemented in the

model and their influence on the temperature behaviour on the surface of the insert and in its centre was monitored. These waveforms were then compared with the temperatures measured on the experimental device.

The results show that the model built in the COMSOL Multiphysics environment can provide a very accurate prediction of the thermal energy propagation in the insert over a certain temperature range. The report discusses the current limitations of the model and the possibilities for further extensions to address these limitations.

Klíčová slova v anglickém jazyce / Keywords

Induction heating, COMSOL Multiphysics, Currie's temperature

Seznam symbolů a zkratek

B	(T)	Magnetická indukce.
C_p	$\left(\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right)$	Tepelná kapacita.
f	(Hz)	Frekvence.
h	$\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2\cdot\text{K}} \right)$	Koeficient přestupu tepla.
H	$\left(\frac{\text{A}}{\text{m}} \right)$	Magnetická intenzita.
I	(A)	Elektrický proud.
J	$\left(\frac{\text{A}}{\text{m}^2} \right)$	Hustota elektrického proudu.
N		Počet závitů induktoru.
T	(K)	Termodynamická teplota.
T_c	(K)	Currieova teplota.
γ	$\left(\frac{\text{S}}{\text{m}} \right)$	Elektrická vodivost.
δ	(m)	Hloubka vniku.
ε_r		Relativní permitivita.
λ	$\left(\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}} \right)$	Tepelná vodivost.
μ	$\left(\frac{\text{H}}{\text{m}} \right)$	Absolutní permeabilita. $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$.
μ_r		Relativní permeabilita.
μ_0	$\left(\frac{\text{H}}{\text{m}} \right)$	Permeabilita vakua.
ρ	$\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$	Hustota.
ω	$\left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)$	Úhlová rychlost.

Obsah

1 Úvod	5
2 Sestavení experimentu	5
2.1 Vytvoření geometrie modelu	6
2.2 Volba materiálů	6
2.3 Nastavení fyziky modelu	7
3 Konvergenční analýza, volba diskretizační sítě	8
3.1 Konvergence vzduchové obálky	8
3.2 Konvergence diskretizační sítě	10
3.2.1 Využití obdélníkové sítě	11
4 Provedení výpočtů	12
4.1 Výpočet při $\mu_T = 300$	12
4.2 Výpočet při $\mu_T = f(T)$	14
4.3 Výpočet při $\mu_T = f(T)$ filtrované pomocí Moving Average	15
4.4 Výpočet při $\mu_T = f(T, H)$	17
5 Závěr	21

1 Úvod

Indukční ohřev je jednou z klíčových technologií pro bezkontaktní přenos tepla, která nachází široké uplatnění v průmyslu díky své vysoké účinnosti, přesnosti a schopnosti selektivně ohřívat materiály. Tento proces je využíván například při kalení, tavení, či jiném tepelném zpracování kovů. Základem indukčního ohřevu je generování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, které indukuje vířivé proudy v materiálu. Tyto proudy způsobují Jouleovy ztráty v důsledku elektrického odporu materiálu.

Numerické modelování indukčního ohřevu umožňuje analyzovat a optimalizovat tento proces bez nutnosti nákladného experimentování. Systém COMSOL Multiphysics poskytuje nástroje pro simulaci multifyzikálních procesů, což z něj činí ideální platformu pro modelování elektromagnetických a tepelných jevů v indukčním ohřevu.

Tato výzkumná zpráva si klade za cíl vytvořit přesný numerický model indukčního ohřevu, který zohledňuje klíčové fyzikální vlastnosti materiálu vsázky, jako je teplotní a magnetická závislost permeability. Model byl testován a kalibrován na základě experimentálních dat, přičemž hlavní důraz byl kladen na predikci teplotních průběhů ve vsázce a jejich porovnání s hodnotami změřenými na reálném zařízení.

Ve zprávě je uveden postup vytvoření modelu pomocí simulačního softwaru. Nejprve je řešeno správné nastavení experimentu, aby do modelu nebyla zanesena chyba vlivem okrajových podmínek nebo nevhodnou volbou velikosti elementu diskretizační sítě. Následně jsou postupně do modelu implementovány závislosti materiálových parametrů vsázky a je sledován jejich vliv na přesnost modelu porovnáním s experimentálními daty.

2 Sestavení experimentu

K vytvoření nového projektu v COMSOL Multiphysics je možné použít Model Wizard. Nejprve je potřeba zvolit prostor, ve kterém budeme simulaci provádět. V případě indukčního ohřevu lze zvolit možnost „2D Axisymmetric“, díky které bude možné zmenšit velikost modelu na polovinu. Dále je potřeba nastavit příslušnou fyziku modelu. V průvodci lze zvolit přímo možnost „Induction Heating“, která se nachází v záložce „AC/DC \ Electromagnetic Heating“, popř. v „Heat Transfer \ Electromagnetic Heating“. Tím jsou do modelu přidány fyziky „Magnetic Fields (mf)“ a „Heat Transfer in Solids (ht)“ svázané pomocí multifyziky „Electromagnetic Heating (emh1)“. Posledním krokem je volba vhodné studie. Průvodce nabízí několik přednastavených studií pro vybranou multifyziku. Pro tuto úlohu byla zvolena možnost „Frequency-

Transient“, jež umožňuje výpočet změn teploty v čase spolu s rozložením elektromagnetického pole ve frekvenční oblasti.

2.1 Vytvoření geometrie modelu

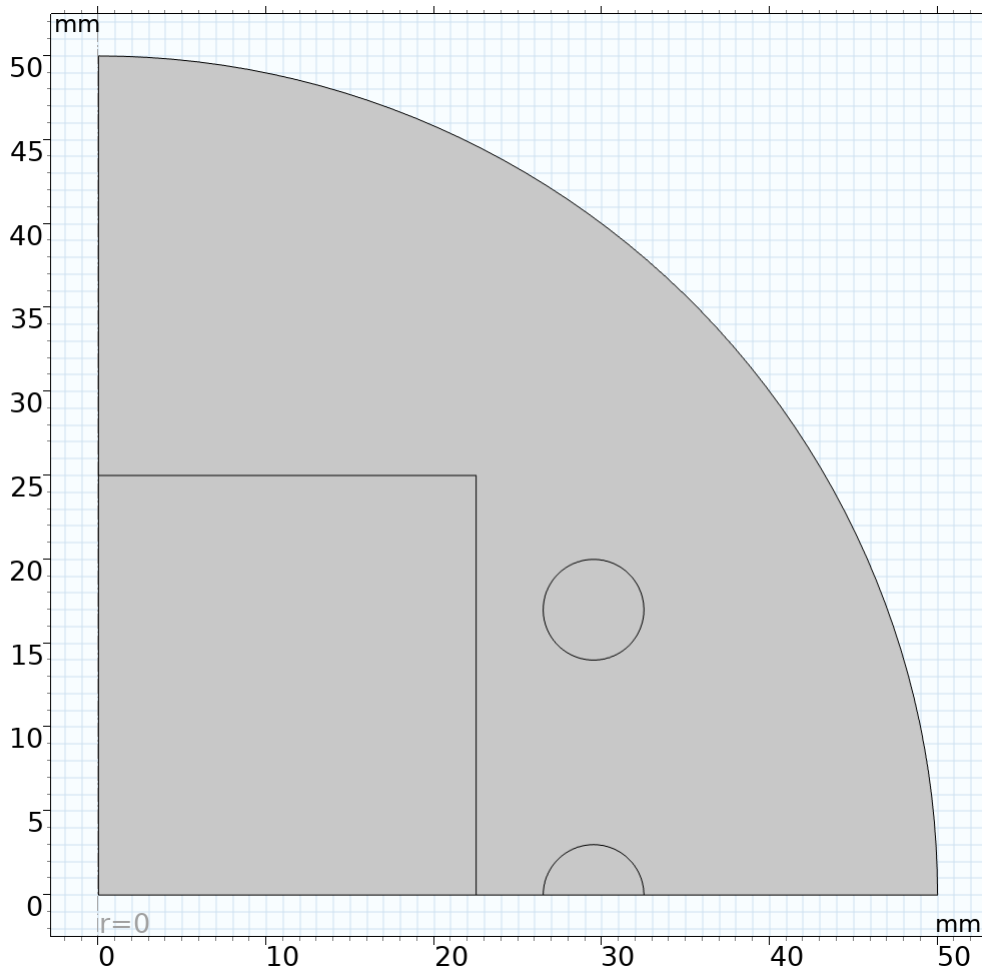
Geometrie modelu byla sestavena podle parametrů uvedených v tab. 2.1. Ty je možné zadávat přímo při definici dílčích geometrických obrazců, nebo je lze deklarovat jako globální parametry. Druhý způsob je vhodný např. pokud je potřeba ladit některé rozměry modelu pomocí parametrických studií. Vsázku představuje obdélník o rozměrech $50 \times 22,5$ mm. Závít induktoru byl namodelován jako kruh o průměru 6 mm. Ten byl následně pomocí pole nakopírován pro vytvoření induktoru o 3 závitěch s vnitřním průměrem 53 mm a s výškou 40 mm. V reálné úloze jsou závity induktoru duté a jsou chlazené vodou. Pro zjednodušení výpočtu byly zjednodušeny a nahrazeny plnými vodiči. Výběrem možnosti „2D Axisymmetric“ byl model zredukován na polovinu. Výpočetní náročnost lze však dále snížit, protože tento problém je symetrický také podle vodorovné osy. Pomocí průniku stávajícího modelu s 90° kruhovou výsečí je získán model, jehož výpočetní náročnost je snížena na čtvrtinu oproti zcela neredukovanému modelu, viz obr. 2.1.

Parametr	Název proměnné	Hodnota
Průměr vsázky	d_insert	45 mm
Výška vsázky	h_insert	50 mm
Průměr závitu induktoru	d_coil_turn	6 mm
Vnitřní průměr induktoru	d_coil	53 mm
Výška induktoru	h_coil	40 mm
Počet závitů induktoru	N	3
Proud induktorem	I	1 kA
Frekvence	f	25 kHz

Tab. 2.1: Parametry experimentu

2.2 Volba materiálů

Úloha sestává z měděného induktoru, vsázky z konstrukční oceli S355J2 a ze vzduchové obálky. Pro vzduchovou obálku a pro závity induktoru byl z důvodu jednoduchosti zvolen jako materiál vzduch s parametry $\mu_r, \varepsilon_r = 1$ a $\gamma = 0 \frac{\text{S}}{\text{m}}$. Jako materiál vsázky bylo z knihovny materiálů zvoleno železo, jehož parametry byly upraveny na hodnoty uvedené ve vztazích (1) až (6). Relativní permeabilita byla nejprve zvolena konstantní, následně byla nahrazena funkcí teploty



Obr. 2.1: Geometrie před provedením konvergenční analýzy

a magnetické intenzity, viz 4.4.

$$\mu_r = 300 , \quad (1)$$

$$\gamma = 7,7 \cdot 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} , \quad (2)$$

$$C_p = 450 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} , \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = 1 , \quad (4)$$

$$\rho = 7870 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} , \quad (5)$$

$$\lambda = 67 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} . \quad (6)$$

2.3 Nastavení fyziky modelu

Aby model co nejvěrněji popisoval reálný problém, bylo nutné doplnit některé vlastnosti domén a okrajové podmínky. Nejprve bylo nutné přidat do výpočtu magnetického pole možnost „Coil“ a vybrat v modelu odpovídající domény. Dále bylo nutné vybrat model vodiče cívky. Jelikož

nebylo podstatné uvažovat rozložení proudu v závitech induktoru, bylo vhodné nastavit model vodiče cívky jako „Homogenized multiturn“ s jedním závitěm, čímž došlo např. k zanedbání skinefektu v závitech induktoru. Nakonec bylo potřeba zvolit možnost buzení cívky proudem a jeho velikost I_{coil} nastavit na hodnotu

$$I_{coil} = \frac{I \cdot N}{2} . \quad (7)$$

Požadovaný proud induktoru bylo potřeba vynásobit počtem závitů, protože v tomto nastavení představuje I_{coil} proud všemi závity induktoru, a vydělit dvěma, protože kvůli snížení výpočetní náročnosti byla modelována jen polovina induktoru. Ze stejného důvodu bylo nutné ještě přidat okrajovou podmínku „Perfect Magnetic Conductor“ a vybrat všechny hranice ležící na ose r .

U výpočtu teplotního pole je vhodné uvažovat přenos tepla do okolí vlivem konvekce a vyzařováním. Pro zjednodušení výpočtu byl vliv radiace zohledněn ve velikosti koeficientu přestupu tepla h . Do modelu tedy byla přidána okrajová podmínka „Heat Flux“, jež byla aplikována na povrchové okraje vsázky. Typ toku byl nastaven na „Convective Heat Flux“ a koeficient přestupu tepla byl nastaven na hodnotu $h = 7 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

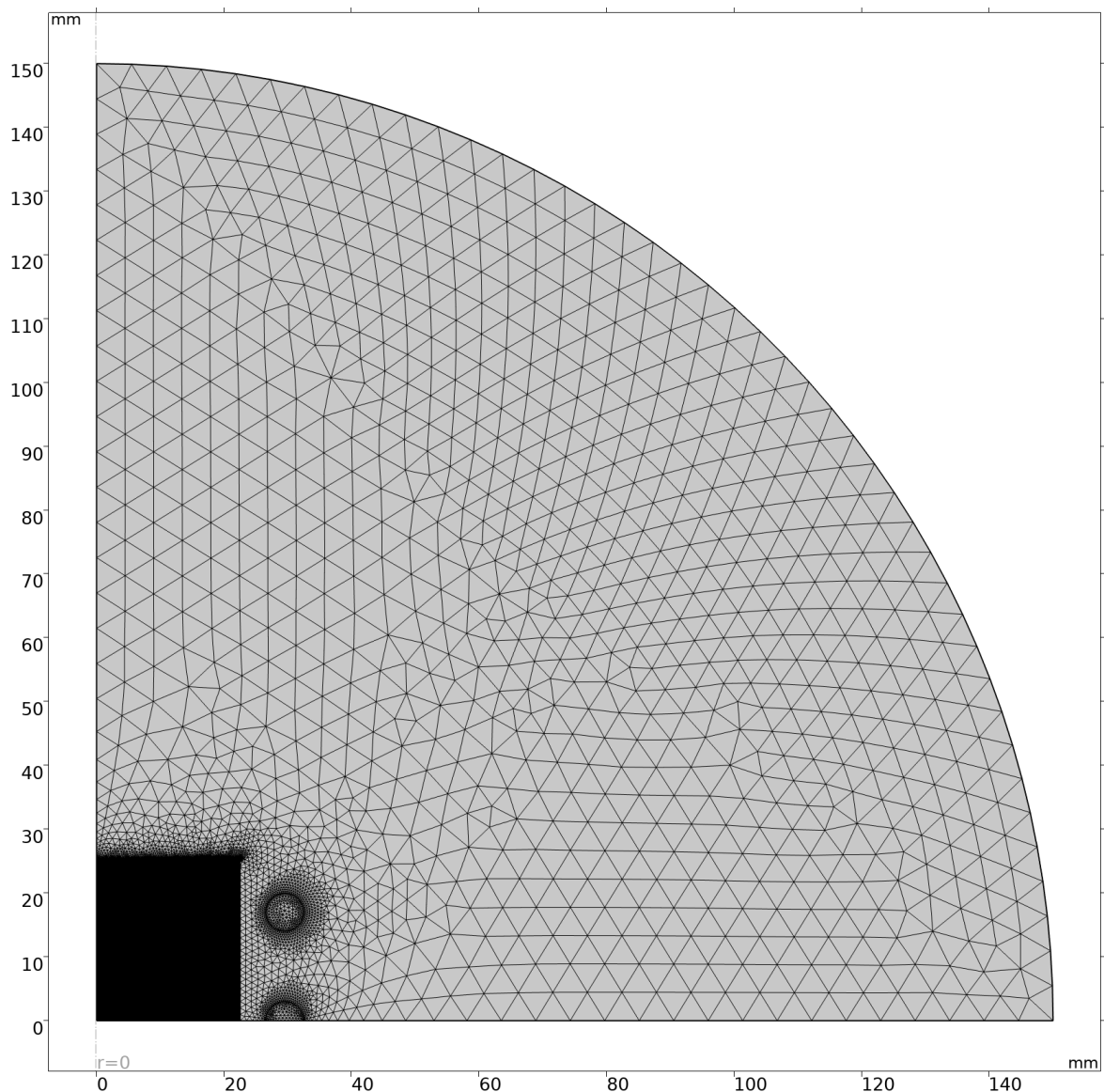
Poslední úprava nastavení modelu byla provedena ve volbě domén a okrajů u výpočtu elektromagnetického ohřevu, kde byla zvolena doména představující vsázku a její povrchové okraje.

3 Konvergenční analýza, volba diskretizační sítě

Při sestavování modelu je nutné dbát na to, aby nebyla do výpočtů zanesena chyba vlivem okrajových podmínek a nedostatečně jemné diskretizační sítě. Je proto potřeba zvolit dostatečně velkou vzduchovou obálku okolo modelovaného objektu a také dostatečně jemnou diskretizační síť. Identifikaci těchto parametrů můžeme provést pomocí parametrické studie, kdy je model vypočítán pro různé rozměry vzduchové obálky nebo velikosti elementu sítě. Dále je pak možné sledovat, jak se mění celková energie ve vypočítaném modelu. Pokud se hodnota celkové energie začne ustalovat na určité hodnotě, lze model prohlásit za zkonvergovaný.

3.1 Konvergence vzduchové obálky

Nejprve je vhodné určit velikost vzduchové obálky. Diskretizační síť je možné zatím ponechat výchozí popř. je možné ji zjemnit na okrajích vsázky. Je potřeba definovat parametr, podle kterého bude měněna velikost vzduchové obálky. V tomto případě byla zvolena kruhová obálka,

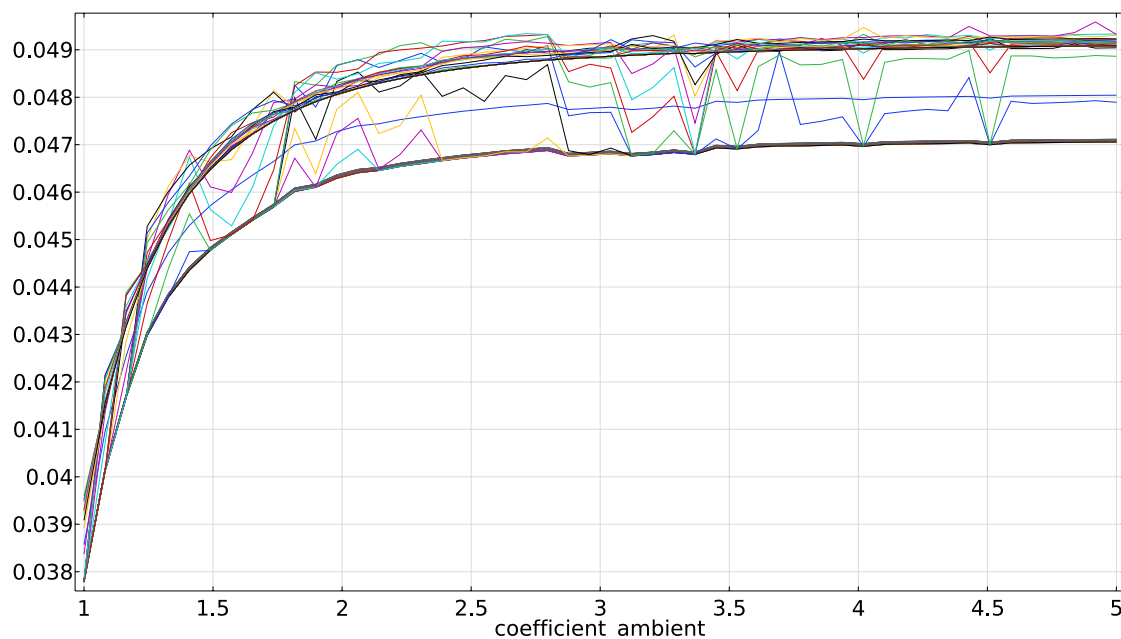


Obr. 3.1: Sestavený experiment po konvergenci vzduchové obálky a diskretizační síť

jejíž poloměr byl definován jako

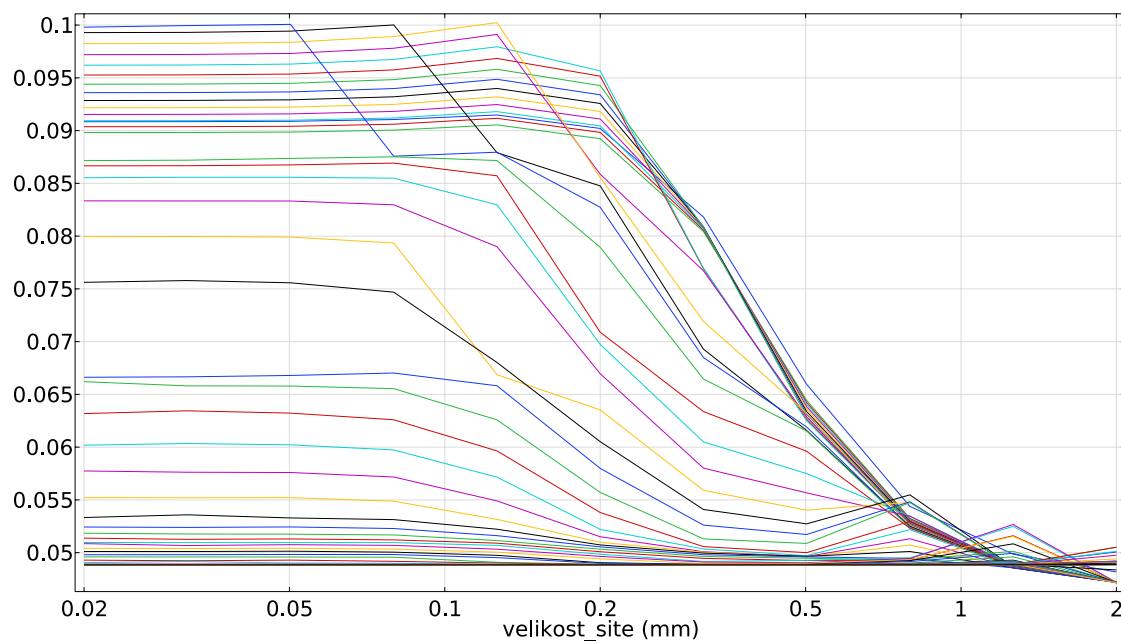
$$r_{\text{ambient}} = \text{coefficient_ambient} \cdot h_{\text{insert}}. \quad (8)$$

Parametrická studie byla nastavena pro parametr `coefficient_ambient` jako 50 hodnot rovnoměrně rozprostřených v intervalu $\langle 1; 5 \rangle$. Na obr. 3.2 je vykreslen průběh energie v závislosti na parametru `coefficient_ambient` v časech 0 až 90 s. Od hodnoty 3 lze průběh považovat za ustálený. Poloměr vzduchové obálky byl tedy nastaven na trojnásobek výšky vsázky. Větší poloměr by již nevedl k významnému zvýšení přesnosti modelu, ale došlo by ke zvýšení výpočetní náročnosti modelu.



Obr. 3.2: Konvergenční analýza vzduchové obálky

3.2 Konvergence diskretizační sítě



Obr. 3.3: Konvergenční analýza velikosti elementu sítě ve vsázce

Stejným způsobem je možné zjistit optimální velikost elementu diskretizační sítě. Zavedený parametr `mesh_element_size` byl použit jako maximální velikost elementu sítě na okraji vsázky. Maximální velikost elementu sítě ve zbytku vsázky byla nastavena na desetinásobek této hodnoty. Parametrickou studií byly následně spočteny modely pro 11 hodnot parametru

mesh_element_size v intervalu $\langle 0, 02; 2 \rangle$ s logaritmickým rozložením. Na obr. 3.2 je vykreslen průběh energie v závislosti na velikosti elementu sítě ve vsázce v časech 0 až 90 s. Pro některé časy dochází k ustálení hodnoty energie již od velikosti 0,2 mm. K úplnému ustálení dochází přibližně od velikosti 0,05 mm.

3.2.1 Využití obdélníkové sítě

Jelikož pracovní frekvence je 25 kHz, je nezbytné uvažovat vliv skin efektu. Hloubka vniku je dána vztahem

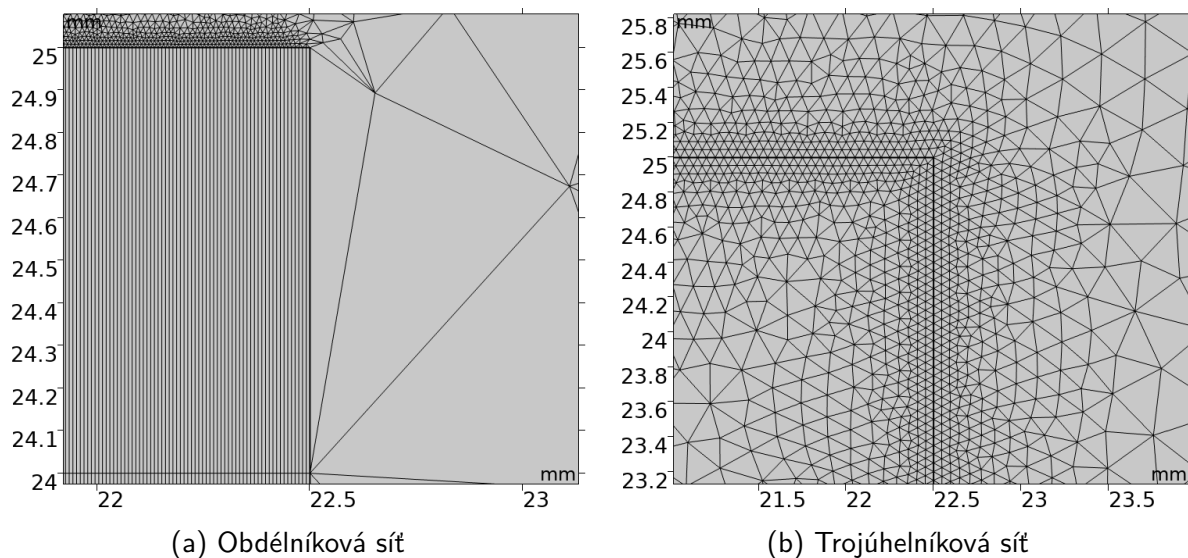
$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \gamma}}. \quad (9)$$

Vířivé proudy se tedy ve vsázce indukují pouze v tenké povrchové vrstvě. Ve směru osy r je proto vhodné volit velikost elementu sítě menší než je hloubka vniku. Ve směru osy z však takto jemná síť není potřeba. V tomto případě je tedy vhodné použít obdélníkovou síť, která může mít různou hustotu výpočetních bodů v různých směrech, zatímco trojúhelníková síť nikoliv, jak je ukázáno na obr. 3.4.

Dalším jevem, který ovlivňuje návrh diskretizační sítě, je vliv Currieovy teploty T_c . Po dosažení této teploty dochází u feromagnetických materiálů ke ztrátě jejich magnetických vlastností, což je způsobeno poklesem μ_r na hodnotu přibližně 1. To způsobí, že vnější magnetické pole začne pronikat hlouběji pod povrch vsázky. Na základě teplot změřených na reálném zařízení byl stanoven přibližný rozsah teplot při ohřevu na 20 – 1000 °C, v němž zřejmě došlo k překročení T_c . Z tohoto důvodu byla zvolena obdélníková síť pro celou oblast vsázky, nikoliv pouze na povrchu, kde jednotlivé výpočetní body byly od sebe vzdáleny $\frac{\delta}{6}$ ve směru osy r a 1 mm ve směru osy z , viz obr. 3.4a. S ohledem na měnící se permeabilitu vsázky v průběhu experimentu (viz obr. 4.12) bylo pro výpočet velikosti elementu sítě použito maximum funkce $\mu_r(T)$ vykreslené na obr. 4.3, jehož hodnota je 482. Potom hloubka vniku vychází

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot \mu_0 \cdot 482 \cdot 7,7 \cdot 10^6}} = 5,2249 \cdot 10^{-5} \text{ m}. \quad (10)$$

Velikost elementu sítě potom vychází $\frac{\delta}{6} = 8,7082 \text{ } \mu\text{m}$.

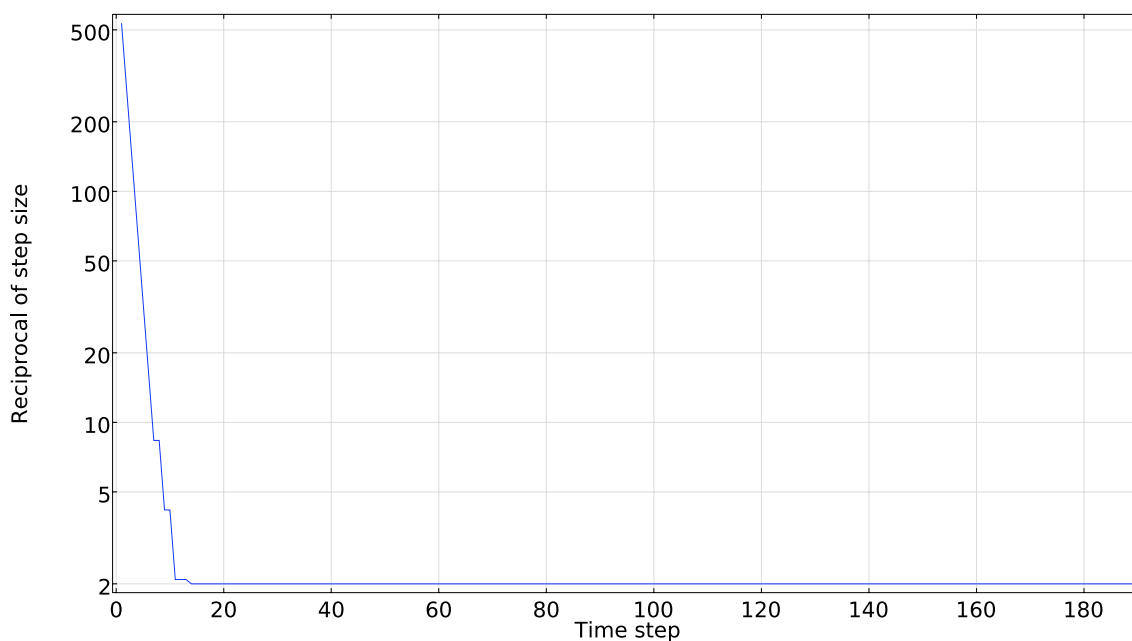


Obr. 3.4: Detail diskretizační sítě v oblasti vsázky

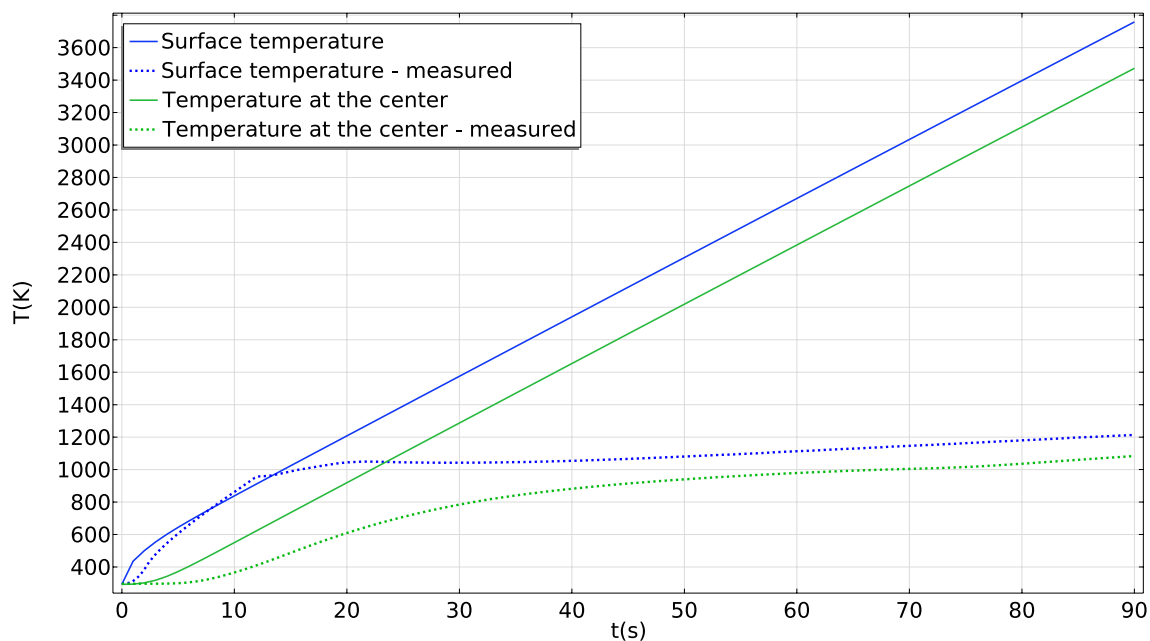
4 Provedení výpočtů

Po nastavení výpočtů a konvergenci modelu bylo přistoupeno k simulacím. Nejprve byl model vypočten při uvažování konstantní relativní permeability $\mu_r = 300$, následně byla konstanta nahrazena nejprve funkcí teploty a nakonec funkcí teploty a magnetické intenzity.

4.1 Výpočet při $\mu_r = 300$

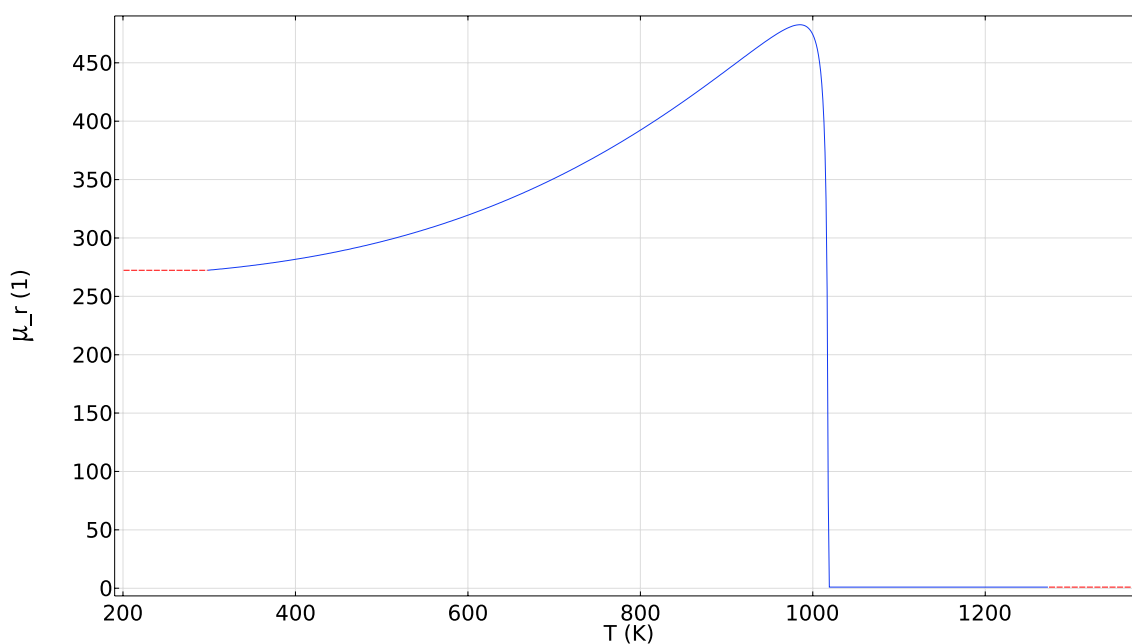


Obr. 4.1: Konvergence modelu při $\mu_r = 300$



Obr. 4.2: Průběh ohřevu při $\mu_r = 300$

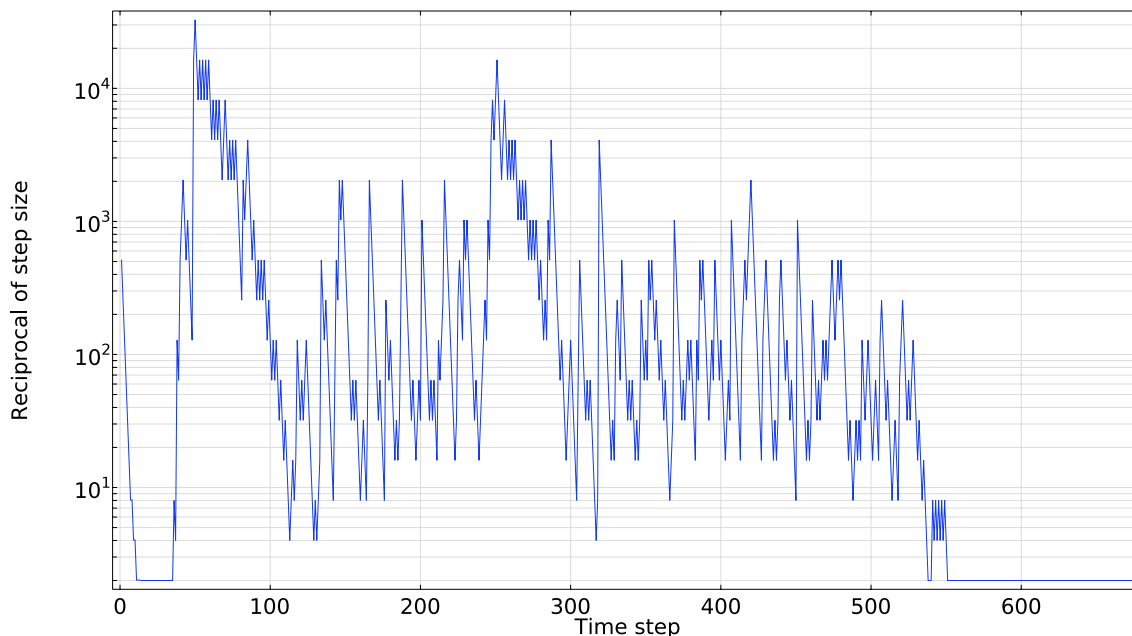
První výpočet byl proveden pro konstantní hodnoty parametrů experimentu uvedené ve vztazích (1) až (6). Konvergence modelu je velmi dobrá, jak je ukázáno na obr. 4.1, kdy na počátku simulace klesne na minimální hodnotu a v průběhu výpočtu již nedochází k jejímu zhoršení. Výsledky výpočtů ve sledovaných bodech ale ukazují, viz obr. 4.2, že tímto přístupem nelze správně postihnout reálný problém v celém rozsahu ohřevu. Model např. vůbec neuvažuje vliv Currieovy teploty.



Obr. 4.3: Průběh funkce $\mu_r(T)$

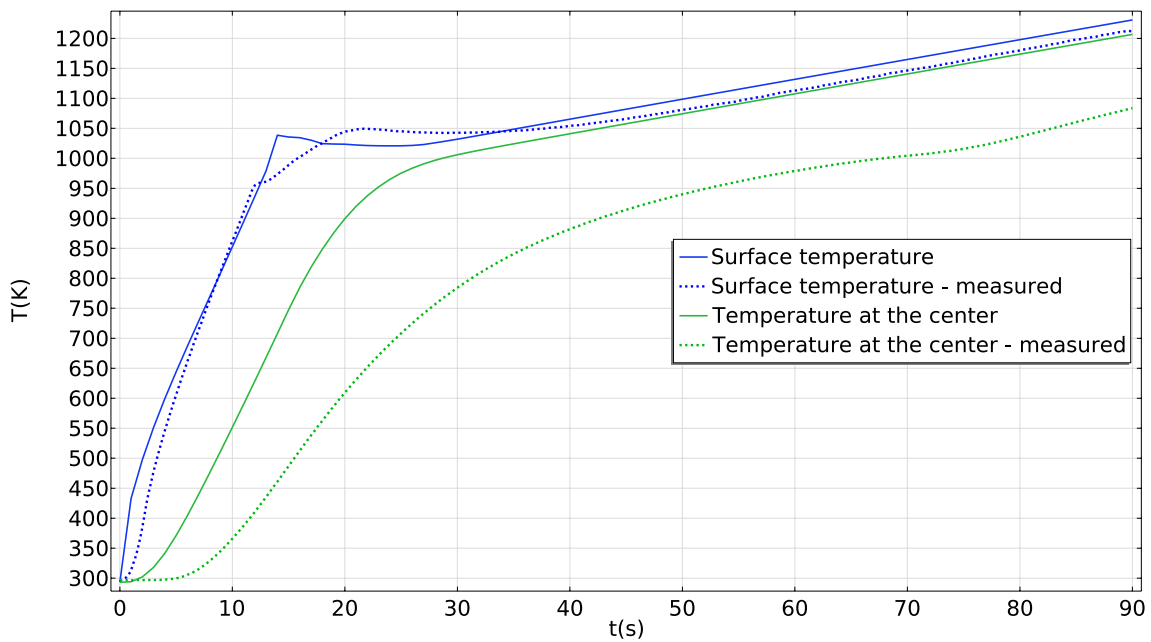
4.2 Výpočet při $\mu_r = f(T)$

Vzhledem k nepřesnosti výsledků simulace s konstantní relativní permeabilitou byla do modelu zahrnuta relativní permeabilita jako funkce teploty, jejíž průběh je uveden na obr. 4.3. Je zde patrný vliv Currieovy teploty, při níž dochází ke strmému poklesu relativní permeability.



Obr. 4.4: Konvergence modelu při $\mu_r = f(T)$

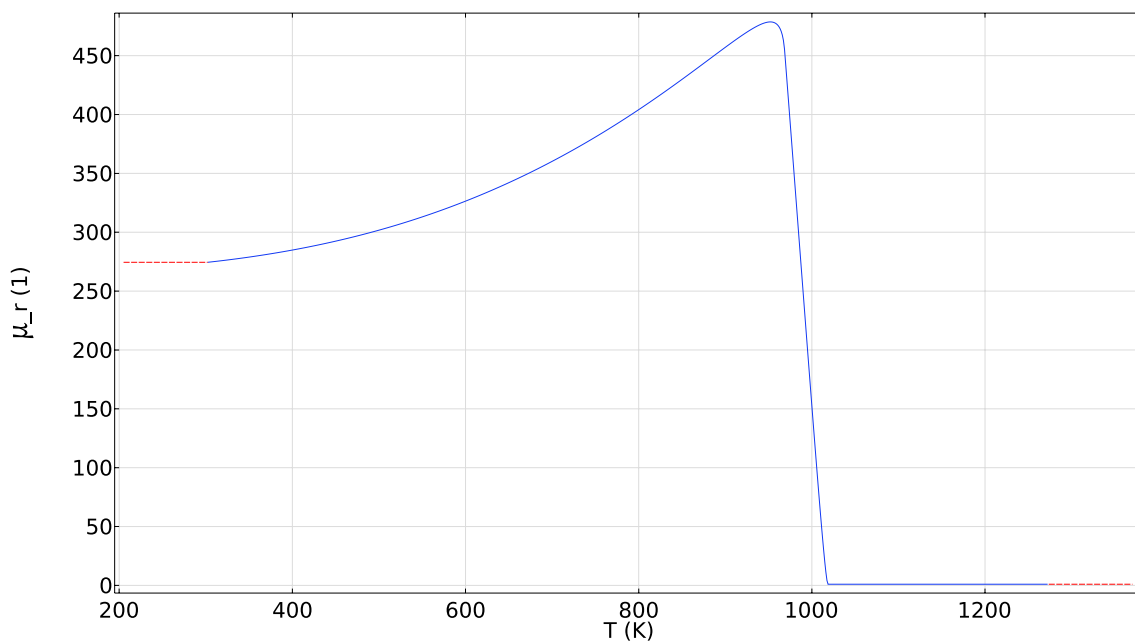
Z obr. 4.4 je patrné výrazné zhoršení konvergence modelu. Na začátku simulace sice model zkonvergoval, ale jakmile došlo ve vsázce k ohřevu nad T_c , konvergence modelu se výrazně zhoršila. K jejímu opětovnému zlepšení došlo po prohřátí vsázky nad T_c . Během simulace tedy bylo nutné provést výrazně více výpočetních kroků. Výsledné průběhy teploty uvnitř vsázky a na jejím povrchu jsou uvedeny na obr. 4.5. Je zřejmé, že záměnou konstantní permeability za funkci teploty došlo k významnému zlepšení výsledků. Průběh teplot na povrchu vsázky je velmi podobný změřenému průběhu. Vypočítaná teplota uvnitř vsázky je však od změřených hodnot relativně odlišná.



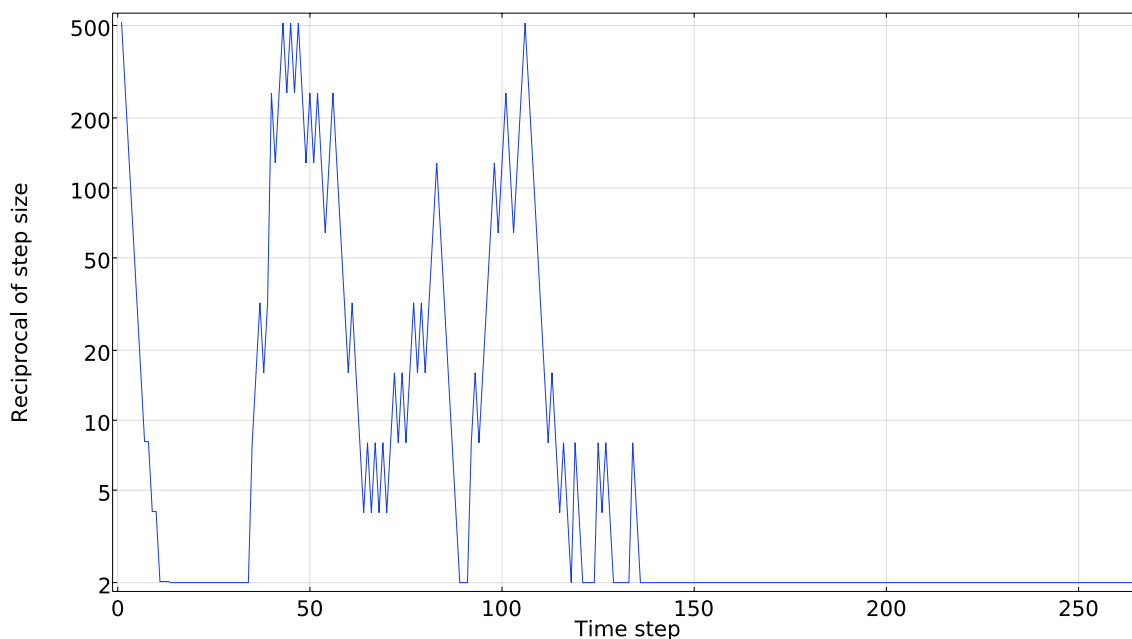
Obr. 4.5: Průběh ohřevu při $\mu_r = f(T)$

4.3 Výpočet při $\mu_r = f(T)$ filtrované pomocí Moving Average

Průběh relativní permeability uvedený na obr. 4.3 má při Currieovo teplotě velmi strmý pokles. To může mít negativní vliv na konvergenci modelu. Funkce tedy byla modifikována použitím metody Moving Average. Výsledný průběh uvedený na obr. 4.6 má po dosažení T_c pozvolnější pokles relativní permeability.

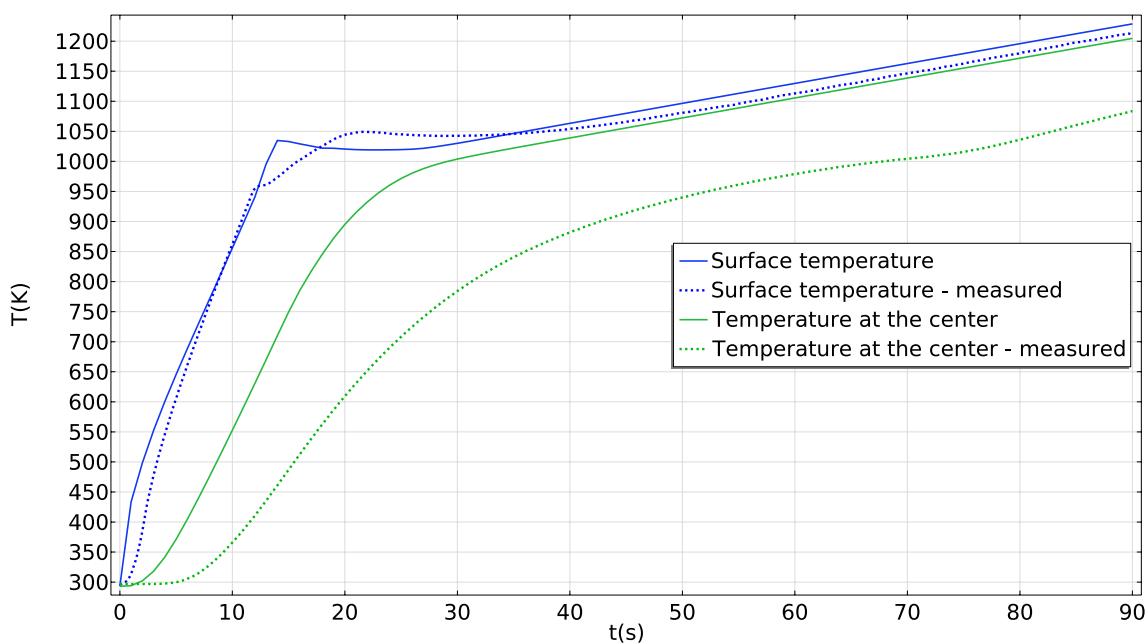


Obr. 4.6: Průběh funkce $\mu_r(T)$ po filtraci



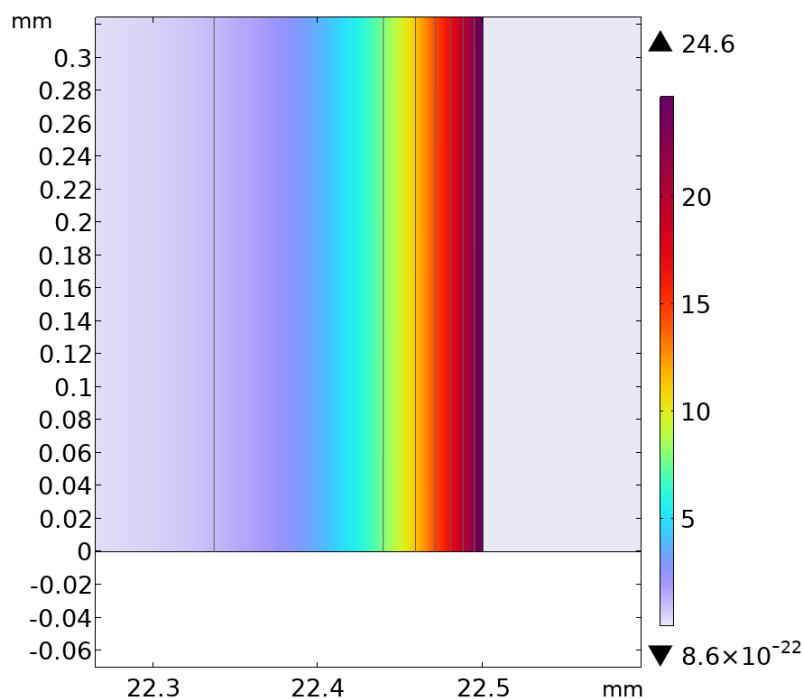
Obr. 4.7: Konvergence modelu při $\mu_r = f(T)$ filtrované pomocí Moving Average

Z průběhu na obr. 4.7 je patrné, že došlo k výraznému zlepšení konvergence modelu. Zatímco v předchozí simulaci bylo potřeba provést 674 výpočetních kroků, po filtraci funkce permeability došlo ke snížení na 264 kroků, čímž byl významně urychlen výpočet. Obr. 4.8 také ukazuje, že filtrací nedošlo k významné změně výsledků simulace.



Obr. 4.8: Průběh ohřevu při $\mu_r = f(T)$ filtrované pomocí Moving Average

Nezanedbatelným problémem, ke kterému docházelo v simulacích, bylo přesycování vsázky.



Obr. 4.9: Indukce na povrchu vsázky při $\mu_r = f(T)$

V této a předchozí simulaci docházelo k indukci na povrchu vsázky dosahující hodnoty až 24,6 T, viz obr. 4.9. Eliminaci tohoto problému je věnována následující sekce.

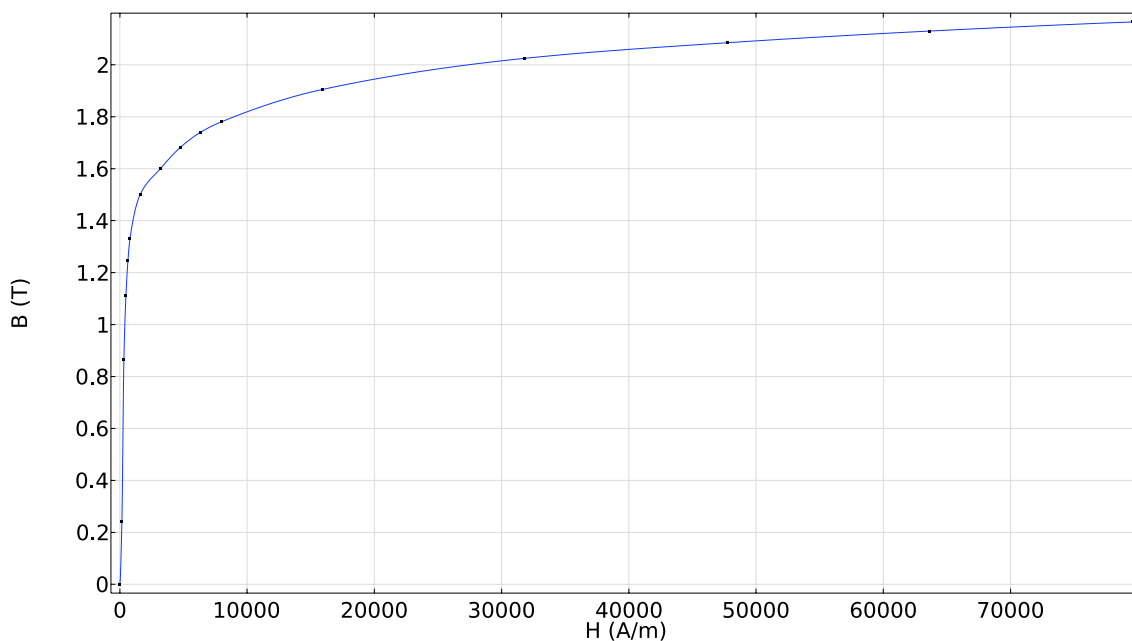
4.4 Výpočet při $\mu_r = f(T, H)$

Problém přesycování vsázky je pravděpodobně způsoben tím, že nebyl nijak uvažován vliv magnetizace materiálu vsázky. U feromagnetických materiálů není závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H lineární. Její hodnota nejprve s rostoucí intenzitou relativně strmě narůstá, dokud nedojde k nasycení materiálu a nárůst indukce se výrazně zmenší. Tento průběh se nazývá křivka prvotní magnetizace. Při působení střídavé magnetické intenzity ale nedochází vlivem tzv. remanentní indukce ke změnám hodnot indukce po této křivce. Její průběh bude mít určitou hysterzezi. Při simulacích se obvykle pracuje s křivkou prvotní magnetizace. Jelikož nebyla dostupná naměřená data magnetizační křivky pro materiál vsázky (konstrukční ocel S355J2), byla pro účely simulace použita data oceli ČSN EN 12040. Průběh této $B-H$ charakteristiky je uveden na obr. 4.10.

Pro magnetickou indukci platí vztah

$$B = \mu \cdot H . \quad (11)$$

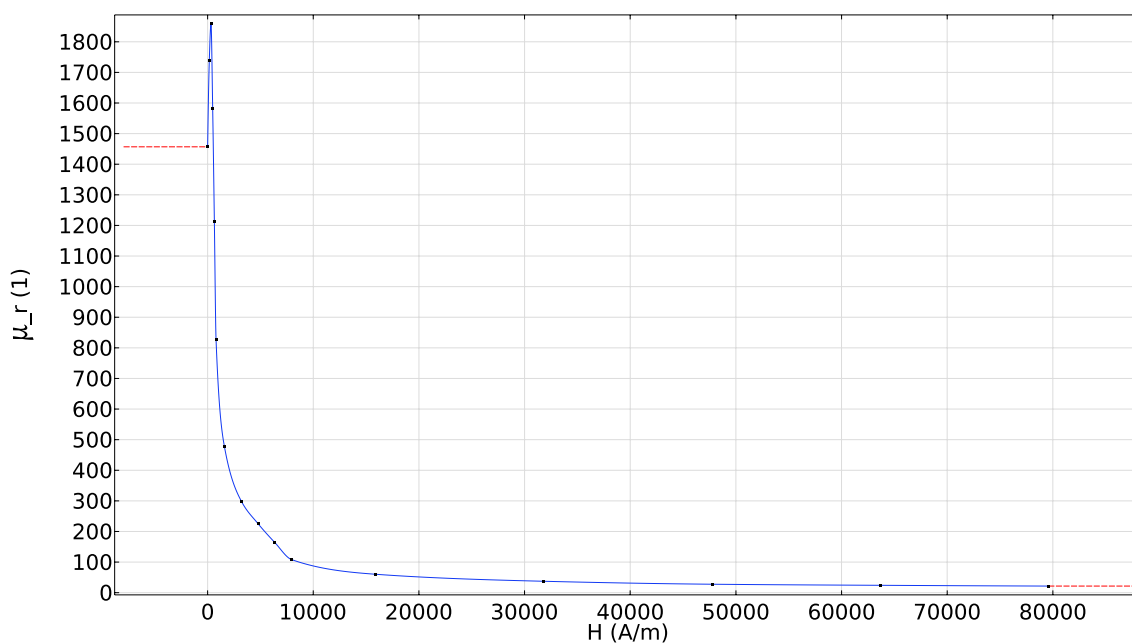
Hodnotu relativní permeability materiálu lze tedy z dat magnetizační křivky stanovit podle



Obr. 4.10: Křivka prvotní magnetizace oceli ČSN EN 12040

vztahu

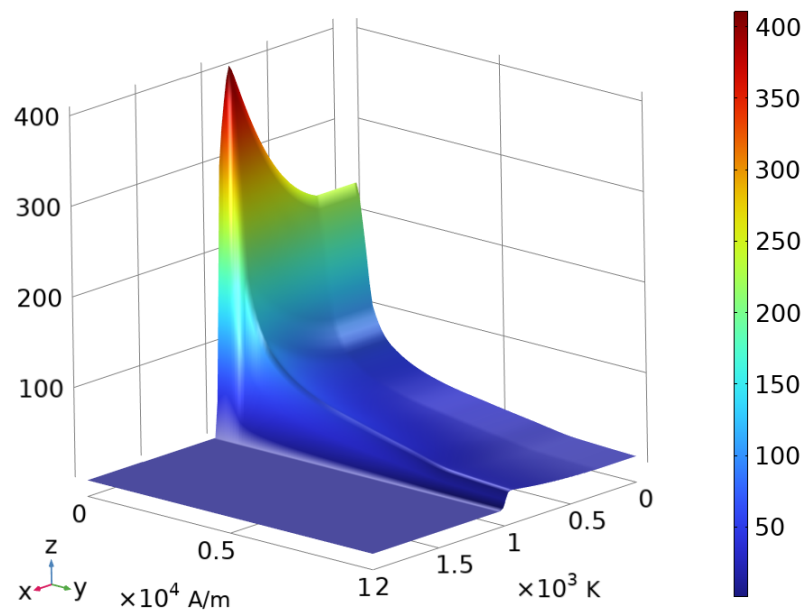
$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H} \quad (12)$$



Obr. 4.11: Průběh funkce $\mu_r(H)$

Výsledný průběh relativní permeability v závislosti na velikosti magnetické intenzity je uveden na obr. 4.11.

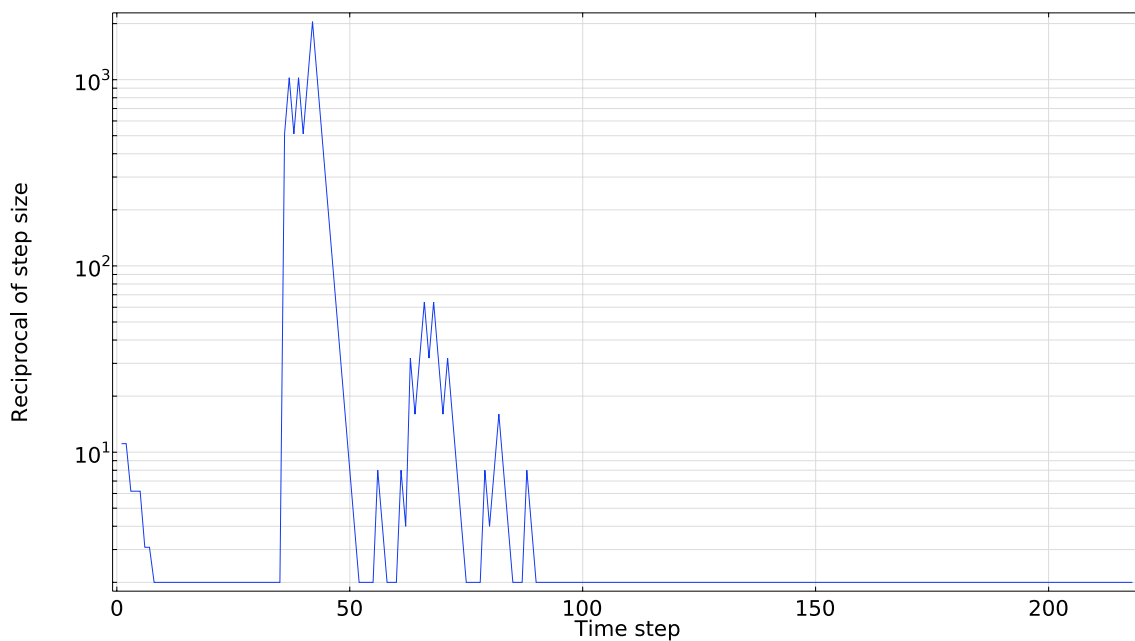
Pro implementaci do modelu bylo potřeba vytvořit funkci $\mu_r = f(T, H)$. Její matematický



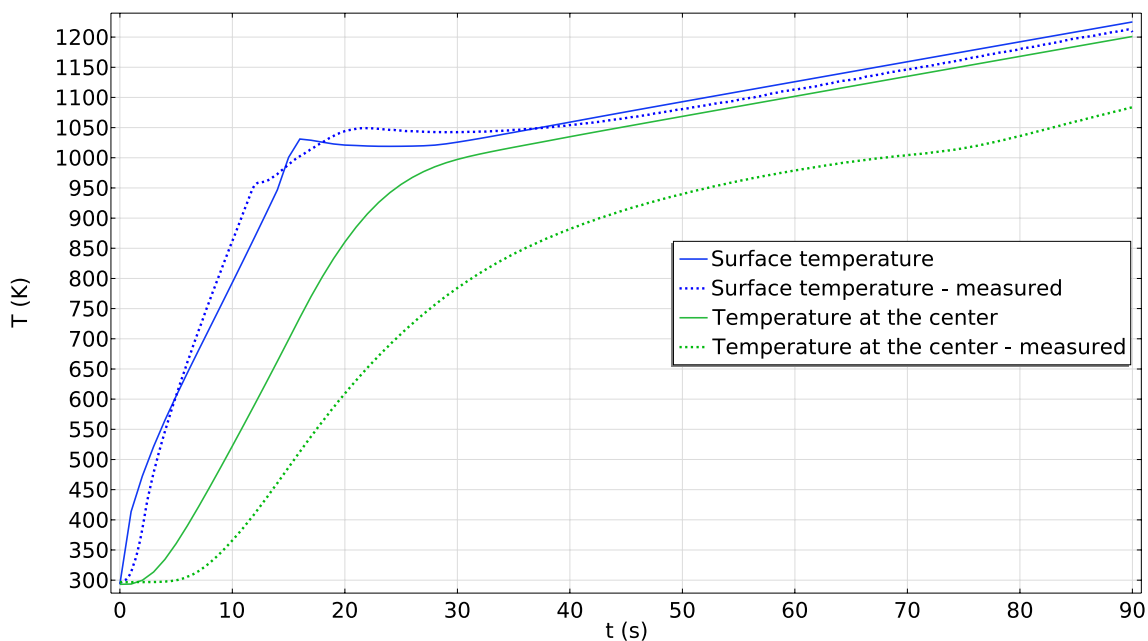
Obr. 4.12: Průběh funkce $\mu_r(T, H)$

předpis je uveden ve vztahu (13). Použití Moving Average nemělo významný vliv na výsledek předchozího výpočtu, proto byla i zde použita filtrovaná varianta funkce $\mu_r(T)$.

$$\mu_r(T, H) = \left(\mu_r(T) - \min(\mu_r(T)) \right) \cdot \frac{\mu_r(H)}{\max(\mu_r(H))} + \min(\mu_r(T)). \quad (13)$$

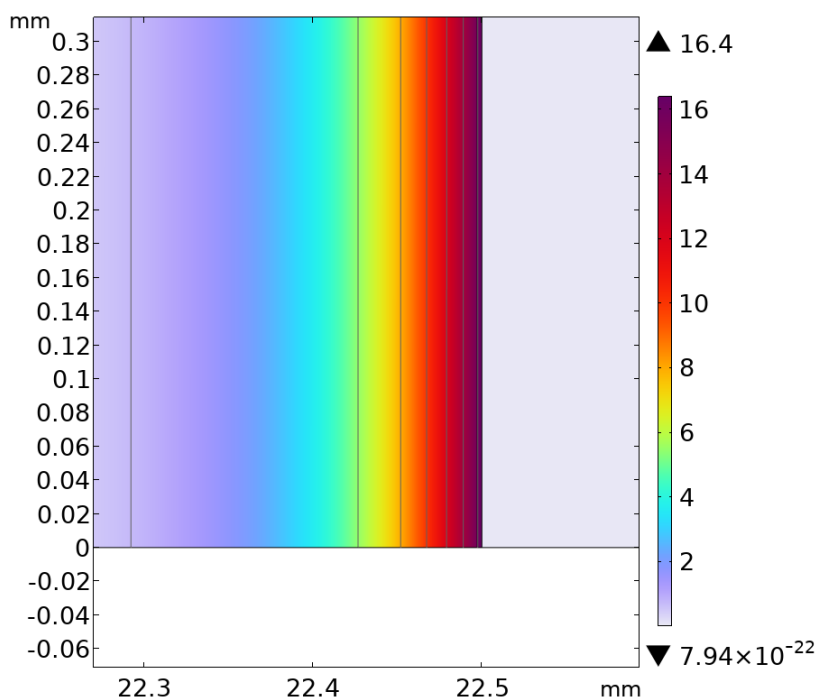


Obr. 4.13: Konvergence modelu při $\mu_r = f(T, H)$



Obr. 4.14: Průběh ohřevu při $\mu_r = f(T, H)$

Tento tvar byl zvolen na základě následujících požadavků. Hodnota relativní permeability musí být při teplotách vyšších než T_c rovna permeabilitě vzduchu. Jelikož pouze data funkce $\mu_r(T)$ odpovídají materiálu vsázky, byly funkční hodnoty funkce $\mu_r(H)$ normovány do rozsahu $\langle 0; 1 \rangle$. Graf výsledné funkce je uveden na obr. 4.12.

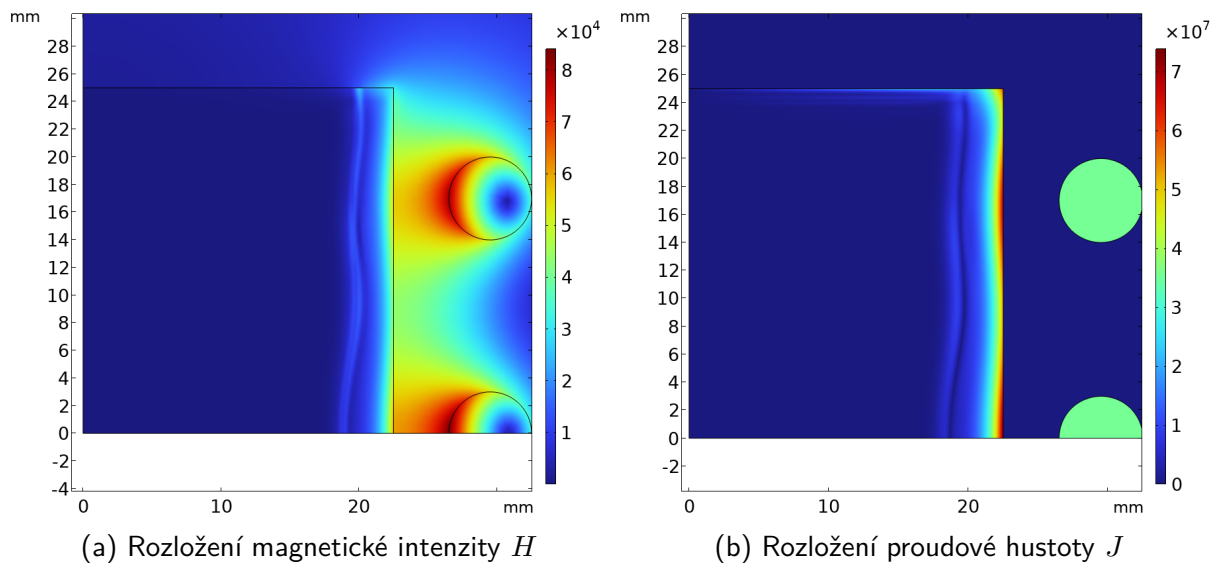


Obr. 4.15: Indukce na povrchu vsázky při $\mu_r = f(T, H)$

Z průběhu uvedeného na obr. 4.13 je patrné další mírné zlepšení konvergence modelu. Během

simulace bylo potřeba provést 218 výpočetních kroků a došlo tedy k dalšímu zkrácení celkového času pro výpočet. Graf na obr. 4.14 dále ukazuje, že výsledné průběhy teplot vsázky se výrazně neliší od výsledků předchozích výpočtů, ohřev povrchu vsázky probíhá velmi podobně, jako tomu je u naměřeného průběhu. Teplota uvnitř vsázky ale stále neodpovídá naměřeným datům. Z obr. 4.15 je dále zřejmé zlepšení problému s přesycováním povrchu vsázky, kde došlo k poklesu maximální hodnoty magnetické indukce v průběhu simulace na hodnotu přibližně 16,4 T.

V sekci 3.2.1 bylo řečeno, že po překročení T_c dochází vlivem poklesu relativní permeability ke zvětšení hloubky vniku. Magnetické pole a také jím indukované vířivé proudy tedy začnou pronikat hlouběji pod povrch vsázky. Tento jev je znázorněn na obr. 4.16.



Obr. 4.16: Rozložení magnetické intenzity H a proudové hustoty J ve vsázce v čase $t = 30$ s

5 Závěr

Tato práce se zabývala modelováním indukčního ohřevu s využitím COMSOL Multiphysics. Výsledky provedených výpočtů ukázaly, že při ohřevu v tomto rozsahu teplot není možné uvažovat konstantní hodnoty parametrů vsázky. Průběhy teplot uvnitř vsázky a na povrchu vypočítané pro konstantní parametry se významně liší od změřených průběhů, viz obr. 4.2. Model zcela zanedbává vliv Currieovo teploty, nad níž feromagnetický materiál ztrácí své magnetické vlastnosti. Tento přístup by tedy bylo možné použít pouze tehdy, pokud by ohřev probíhal pouze v úzkém intervalu teplot, aby linearizací problému nebyla do modelu zanesena příliš velká chyba.

Uvažováním závislosti relativní permeability na teplotě došlo k výraznému zmenšení odchylky mezi křivkami vypočítaných a změřených teplot uvnitř a na povrchu vsázky, jak ukazuje obr.

4.5. Tato změna ale měla negativní dopad na konvergenci modelu, viz obr. 4.4, což způsobilo výrazný nárůst doby výpočtu. Zároveň došlo k problémům s přesycováním vsázky, kdy hodnota magnetické indukce dosahovala hodnoty až 24,6 T.

Funkce $\mu_r(T)$ byla následně upravena pomocí Moving Average. Výsledné průběhy teplot touto úpravou nebyly výrazně ovlivněny (viz obr. 4.8), ale došlo k významnému zlepšení konvergence modelu (obr. 4.7) a také ke zkrácení doby výpočtu. Problém s vysokými hodnotami magnetické indukce na povrchu vsázky však touto modifikací vyřešen nebyl.

Do modelu byla následně zahrnuta závislost relativní permeability také na velikosti magnetické intenzity. Tímto krokem byla zohledněna nelinearita způsobená tvarem magnetizační charakteristiky. V důsledku toho došlo k dalšímu mírnému zlepšení konvergence modelu a zkrácení výpočetního času, jak je ukázáno na obr. 4.13. Průběhy teplot ve sledovaných bodech se výrazněji nezměnily, nedošlo tedy ke zmenšení chyby průběhu teploty uvnitř vsázky, viz obr. 4.14. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben tím, že při simulaci nebyla uvažována teplotní závislost tepelné kapacity C_p a tepelné vodivosti λ , které mají významný vliv na to, jakým způsobem se bude teplo šířit uvnitř vsázky. Z obr. 4.15 je také patrný pokles maximální hodnoty magnetické indukce na hodnotu přibližně 16,4 T. Tato hodnota je však stále příliš vysoká, což je pravděpodobně způsobeno tím, že pro výpočet hodnot permeability v závislosti na intenzitě magnetického pole nebyla použita $B-H$ charakteristika zkoumaného materiálu. V rámci dalších simulací tedy bude nutné zahrnout teplotní závislosti tepelné kapacity a tepelné vodivosti a také změřit $B-H$ charakteristiku materiálu použité vsázky.

Seznam obrázků

2.1	Geometrie před provedením konvergenční analýzy	7
3.1	Sestavený experiment po konvergenci vzduchové obálky a diskretizační sítě	9
3.2	Konvergenční analýza vzduchové obálky	10
3.3	Konvergenční analýza velikosti elementu sítě ve vsázce	10
3.4	Detail diskretizační sítě v oblasti vsázky	12
4.1	Konvergence modelu při $\mu_r = 300$	12
4.2	Průběh ohřevu při $\mu_r = 300$	13
4.3	Průběh funkce $\mu_r(T)$	13
4.4	Konvergence modelu při $\mu_r = f(T)$	14
4.5	Průběh ohřevu při $\mu_r = f(T)$	15
4.6	Průběh funkce $\mu_r(T)$ po filtraci	15
4.7	Konvergence modelu při $\mu_r = f(T)$ filtrované pomocí Moving Average	16
4.8	Průběh ohřevu při $\mu_r = f(T)$ filtrované pomocí Moving Average	16
4.9	Indukce na povrchu vsázky při $\mu_r = f(T)$	17
4.10	Křivka prvotní magnetizace oceli ČSN EN 12040	18
4.11	Průběh funkce $\mu_r(H)$	18
4.12	Průběh funkce $\mu_r(T, H)$	19
4.13	Konvergence modelu při $\mu_r = f(T, H)$	19
4.14	Průběh ohřevu při $\mu_r = f(T, H)$	20
4.15	Indukce na povrchu vsázky při $\mu_r = f(T, H)$	20
4.16	Rozložení magnetické intenzity H a proudové hustoty J ve vsázce v čase $t = 30$ s	21

Seznam tabulek

2.1	Parametry experimentu	6
-----	---------------------------------	---

Historie revizí

Rev.	Kapitola	Popis změny	Datum	Jméno
1	Všechny	První verze dokumentu	22.11.2024	Martin Kadlec