



Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

NÁVRH A OPTIMALIZACE INDUKTORU PRO INDUKČNÍ PÁJENÍ

Autor práce: Jan Kaska

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

Plzeň 2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan KASKA**

Osobní číslo: **E14B0023P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Návrh a optimalizace induktoru pro indukční pájení**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Vytvořte podrobnou rešerši metod tvrdého pájení mědi.
2. Navrhněte pro zadanou geometrii a parametry napájecího zdroje induktor. Vytvořte a vyřešte numerický model indukčního pájení. Optimalizujte navržený induktor tak, aby se zvýšila účinnost procesu.
3. Vytvořte výrobní dokumentaci navrženého induktoru.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **Lugi, S.; Forzan, N.; Aliferov, A.: Induction and Direct Resistance Heating, Springer International Publishing Switzerland, 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 bakalářské práce:

Ing. David Pánek, Ph.D.

Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problémem optimalizace induktoru pro indukční pájení měděné vsázky. Nejprve je provedena důkladná rešerše technologií využívaných pro indukční tvrdé pájení mědi, jež reflektuje poznatky z praxe i aktuální trendy a výzkumy. V další části je definován konkrétní problém, kterým se tato práce zabývá, a jsou zde upřesněny parametry jednotlivých komponent. Dále je popsán matematický model využívaný simulačním softwarem, kde jsou rozebírána jednotlivá fyzikální pole. Následně je přistoupeno k samotné optimalizaci, je zde popsáno pět navrhovaných prototypů, úvahy vedoucí k jejich vzniku a výsledné vlastnosti. Tyto vlastnosti jsou nakonec diskutovány a na jejich základě je zvolen optimální prototyp induktoru. Pro tento prototyp je na závěr vytvořena výrobní dokumentace.

Klíčová slova

indukční ohřev, indukční pájení, tvrdé pájení mědi, simulace

Abstract

The goal of this bachelor thesis is to optimize inductor for induction brazing of copper tubes. The first objective is to create thorough research of technologies used for induction brazing of copper, including practice knowledge, current trends and science research. The next chapter defines the specific problem that this work deals with and the parameters of each component are specified here. In the following section of this thesis is described a mathematical model used by the simulation software and each individual physical field is analyzed. The final step is the optimization itself. In this part are described five possible prototypes, considerations leading to their final form and resulting properties. These properties are discussed and based on this discussion is chosen the optimal inductor prototype. For this prototype is finally created production drawing.

Keywords

induction heating, induction brazing, copper brazing, simulation

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 5. června 2017

Jan Kaska

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Davidu Pánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a podporu po celou dobu tvorby práce.

Obsah

Úvod	10
1 Technologie pro tvrdé pájení	11
1.1 Induktory	12
1.2 Koncentrátory a stínění	14
1.3 Susceptory	15
1.4 Pájky	15
1.5 Napájecí zdroje	16
1.6 Chlazení	19
2 Definice problému	21
3 Matematický model	23
3.1 Elektromagnetické pole	24
3.2 Teplotní pole	26
3.3 Diskretizace	27
4 Optimalizace induktoru	28
4.1 První prototyp	30
4.2 Druhý prototyp	34
4.3 Třetí prototyp	37
4.4 Čtvrtý prototyp	40
4.5 Pátý prototyp	43
4.6 Vyhodnocení optimalizace	47
5 Závěr	50
Seznam použité literatury	51
Seznam obrázků	54
Přílohy	56

Seznam použitých symbolů a zkratek

<i>A</i>	[Wb m ⁻¹]	vektorový magnetický potenciál
<i>B</i>	[T]	magnetická indukce
<i>c_p</i>	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
<i>D</i>	[C m ⁻²]	elektrická indukce
<i>E</i>	[V m ⁻¹]	intenzita elektrického pole
<i>f</i>	[Hz]	frekvence
<i>H</i>	[A m ⁻¹]	intenzita magnetického pole
<i>I</i>	[A]	elektrický proud
<i>J</i>	[A m ⁻²]	hustota elektrického proudu
<i>L</i>	[H]	vlastní indukčnost
<i>p</i>	[W m ⁻³]	měrný výkon
<i>q</i>	[W m ⁻²]	hustota tepelného toku
<i>R</i>	[Ω]	elektrický odpor
<i>S</i>	[Pa]	druhý Piola-Kirchhoffův tenzor napětí
<i>t</i>	[s]	čas
<i>T</i>	[K]	termodynamická teplota
<i>U</i>	[V]	elektrické napětí
<u>Z</u>	[Ω]	komplexní impedance
<i>α</i>	[W m ⁻² K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla
<i>β</i>	[K ⁻¹]	teplotní součinitel objemové roztažnosti
<i>γ</i>	[S m ⁻¹]	měrná elektrická vodivost
<i>ε</i>	[F m ⁻¹]	permitivita
<i>λ</i>	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	součinitel tepelné vodivosti
<i>μ</i>	[H m ⁻¹]	permeabilita
<i>ρ</i>	[kg m ⁻³]	objemová hustota
<i>σ</i>	[m]	hloubka vniku
<i>v</i>	[m s ⁻¹]	rychlost
<i>φ</i>	[V]	elektrický potenciál
<i>ω</i>	[rad s ⁻¹]	úhlová rychlost

Úvod

Hlavní cíle této práce jsou provést rešerši technologií pro tvrdé pájení mědi a za pomoci takto získaných znalostí navrhnout a optimalizovat induktor pro zadanou geometrii. První kapitola této práce obsahuje důkladnou rešerši technologií využívaných pro indukční tvrdé pájení mědi. Uvedeny jsou zde jak obecné přínosy indukčního pájení, tak i technologie a postupy využívané v praxi. V této kapitole jsou rozebrány jednotlivé komponenty systému indukčního pájení, tedy induktory, koncentrátory a stínění, susceptory, pájky, napájecí zdroje a chladicí systémy. Ačkoliv je indukční ohřev, resp. indukční pájení, už poměrně dlouho využívanou technologií, stále na toto téma vznikají nové články a publikace. Některé nové postupy či materiály jsou v rešerši zmíněny.

V další kapitole je už definován konkrétní problém, kterým se tato práce zabývá. Je zde uveden tvar a rozměry vsázky, materiál ze kterého je vyrobena a jeho vlastnosti. Dalším bodem je použitá pájka a její vlastnosti, především doporučený rozsah teploty tavení. Velmi důležitým bodem je potom automatizace celého procesu pájení, ze které vychází požadavek na tvar induktorů. Okrajově jsou zmíněny i parametry použitého napájecího zdroje a problematika hloubky vniku.

Třetí kapitola se zabývá matematickým modelem využívaným v simulačním softwaru. Jsou zde uvedena jednotlivá řešená fyzikální pole, k nim příslušící rovnice a vztahy a oblasti, ve kterých jsou tato pole následně řešena. Zmíněna jsou i zjednodušení příslušných vztahů a význam jejich členů. Nakonec je stručně popsána i metoda diskretizace dané geometrie.

Následující kapitola se už zabývá samotnou optimalizací induktoru, popisuje zvolené materiály induktorů a koncentrátorů a dále definuje podmínky, které musí výsledný prototyp induktoru splňovat tak, aby mohl být na automatickou linku instalován a výsledný zapájený spoj měl uspokojivé vlastnosti. Zmíněna jsou zde i rizika spojená s nevhodným průběhem ohřevu. Dále je uvedeno pět navrhovaných prototypů a jejich jednotlivých tvarových variant, zmíněny jsou vždy úvahy vedoucí k jejich vzniku a vlastnosti vyplývající ze simulací a z testů v praxi, byly-li provedeny. Tyto vlastnosti jsou následně diskutovány a jsou navrhována možná zlepšení.

Vlastnosti prototypů jsou nakonec přehledně shrnuty v podkapitole nazvané vyhodnocení optimalizace. Po rekapitulaci vlastností jednotlivých prototypů induktoru následuje vyhodnocení těch s nejlepšími vlastnostmi, a to z několika různých hledisek. Tato hlediska jsou následně diskutována s přihlédnutím k reálným poznatkům z praxe a je vybrán optimální prototyp induktoru. Pro tento prototyp induktoru a k němu příslušící koncentrátor je nakonec vytvořena výrobní dokumentace uvedená v přílohách.

1 Technologie pro tvrdé pájení

Za tvrdé pájení označujeme veškeré pájení s teplotou nad 450 °C. „V průmyslu je dnes přibližně 75 % všech pájení prováděno plamenem.“ [18] Kromě pájení plamenem se v praxi setkáváme s mnoha dalšími metodami, jako je odporové pájení, pájení v pecích či ponorné pájení. Čím dál více se do popředí dostává pájení indukční. Je to dáno především snadnou automatizací celého procesu, rychlostí a širokou škálou možných použití. Indukčním pájením lze dosáhnout širokého rozsahu teplot především díky tomu, že teplo vzniká v samotné vsázce. Tento fakt napomáhá i větší bezpečnosti celého provozu, není přítomen otevřený plamen či leptavé látky. Celý pájecí systém je potom vzhledem k ostatním metodám tišší, nepříliš náročný na údržbu a lze ho účinně použít i v ochranných atmosférách. Induktor nemusí být umístěn pouze na automatické výrobní lince, ale často se používá i v malovýrobě či v domácnostech, kde se setkáváme s manuálními nástroji, většinou s výměnnými induktorovými nastavci pro rozličné aplikace.

Parametry pájení lze v případě indukční metody ovlivňovat několika způsoby. Největší mírou je proces ovlivněn tvarem induktoru. V praxi se setkáme s velkým množstvím různých tvarů používaných induktorů, od typického tvaru solenoidu až po různorodé jednozávitové induktory či masivní kovové bloky. Induktory bývají téměř vždy chlazeny pro snížení Jouleových tepelných ztrát. Chladit je lze jak vzduchem, tak častěji kapalinou, v praxi nejčastěji vodou. Induktory jsou v mnoha případech doplněny o koncentrátoři elektromagnetického pole či stínění. Celý proces lze dále ovlivňovat velikostí proudu induktorem, vzdáleností induktoru od vsázky, dobou pájení a frekvencí napájecího zdroje. Právě možnost ovlivnit hloubku ohřevu pomocí frekvence, je jednou z hlavních předností této metody.

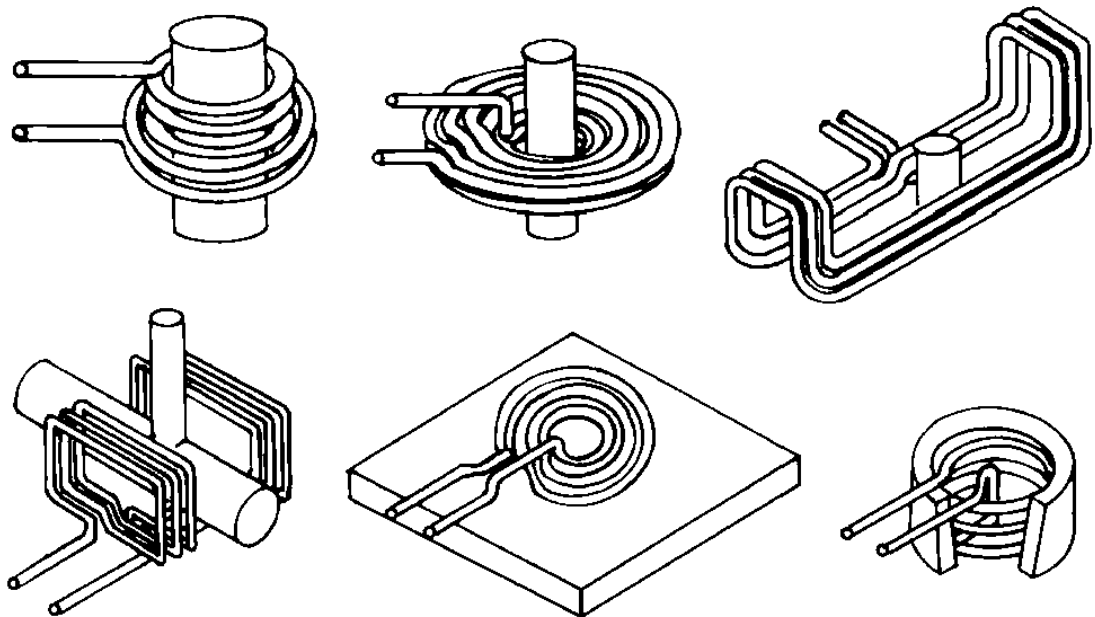
„Při vhodné optimalizaci celého procesu lze snadno dosáhnout i účinnosti nad 90 %.“ [23] Při pájení se ideálně zahřívá pouze konkrétní pájené místo, při ohřevu nechtěných částí vsázky se vystavujeme nebezpečí jednak změn mechanických, jako je zakřivení materiálu, jednak chemických, např. koroze. Při příliš dlouhém ohřevu je problémem také růst zrn pájky a oduhličení materiálu. Indukční pájení tyto problémy do jisté míry eliminuje a „lze jím docílit poměrně přesného rozložení teploty v malém konkrétním místě spoje.“ [19] Životnost takového spoje je pak výrazně delší. Na rozdíl od pájení plamenem lze také ve vsázce dosahovat mnohem většího rozsahu požadovaných teplot.

Ačkoliv lze induktor vyrobit v nejrůznějších tvarech, jedním z problémů indukčního pájení je pájení složitých nebo velkých geometrií, pro tyto aplikace se stále častěji používají pájecí pece. Také náklady na automatizovaný systém indukčního pájení jsou poměrně vysoké a vyplatí se proto spíše pro velkosériovou výrobu. Je také nutné vzít v potaz velikost komplexního systému indukčního pájení zahrnujícího nejen induktor, ale i zdroj elektrického proudu, chlazení celého systému a další součásti jako kapacitorové baterie či

transformátor. Nevýhodou je i to, že jeden tvar induktoru není většinou možné použít pro příliš odlišné geometrie. [1] [18] [19] [23]

1.1 Induktory

Tvar induktoru je klíčový pro výslednou kvalitu zapájeného spoje, avšak navrhnout optimální tvar induktoru je poměrně složité. Pokud není geometrie vsázky příliš neobvyklá, vychází se z osvědčených v praxi využívaných tvarů. Skoro vždy je potom testováno více možných variant induktoru. Jednotlivé induktory se testují buď přímo v provozu, z ekonomického hlediska je ale většinou nevýhodné vyrábět množství možných variant induktorů, často se tedy přistupuje k počítačovým simulacím. Analytické výpočty jsou v těchto případech z hlediska složitosti celé geometrie nemyslitelné. „Poslední dobou se objevují i experimentální postupy optimalizace jako využití Tagucioho neuronové sítě.“ [14]

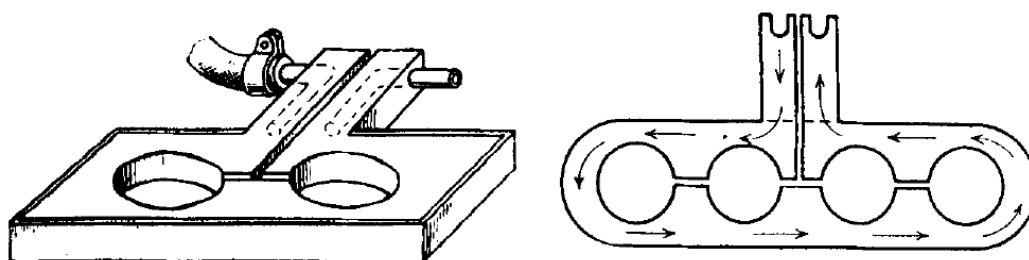


Obrázek 1.1: Příklady používaných geometrií a induktorů. (Převzato z [1], str. 263)

Obecně lze tvrdit, že z důvodů minimalizace ztrát by měl být induktor co nejbližší ohřívané vsázce. V mnoha případech ale toto tvrzení vědomě porušujeme. Výhoda poměrně přesného zacílení místa ohřevu vsázky může být často nevýhodou z hlediska velkého teplotního gradientu, který způsobuje reziduální mechanické namáhání. Oddálením induktoru od vsázky tento gradient zmenšíme a vsázku prohříváme rovnoměrněji. Větší odstup induktoru od vsázky je nutný i v případě, že se průřezy pájených entit liší či jsou vyrobeny z odlišně elektricky vodivých materiálů. Oddálení je využito i tehdy, je-li jeden tvar induktoru používán pro více různých vsázek. V těchto případech je geometrie

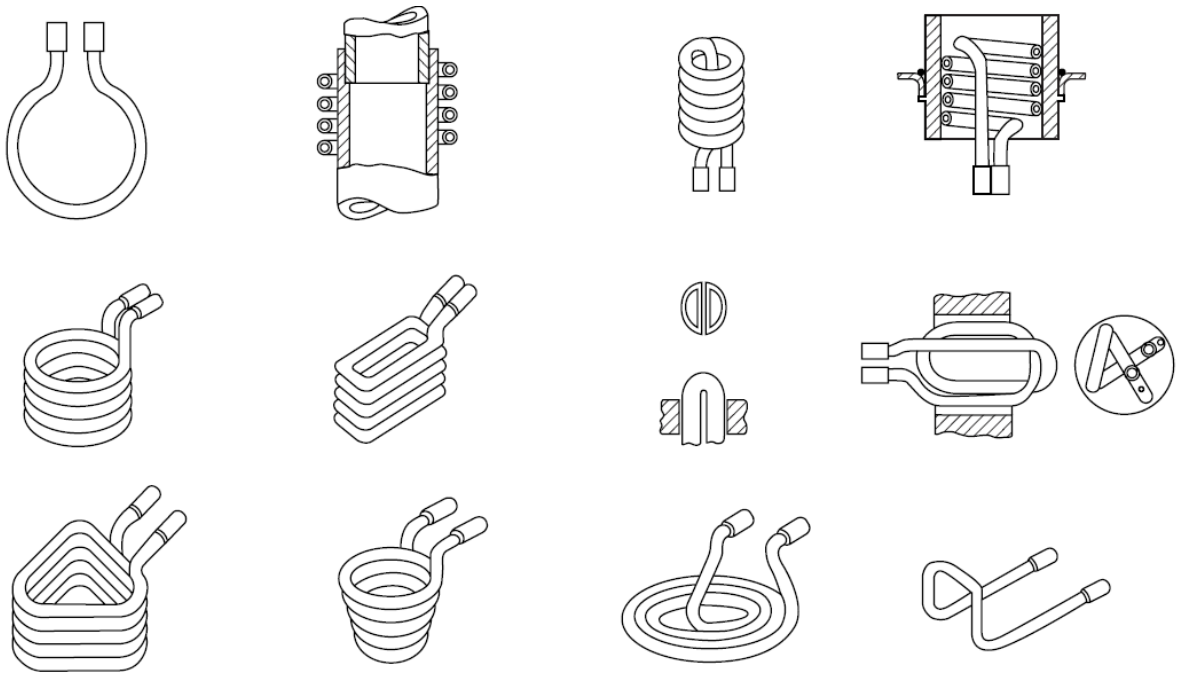
pájeného spoje téměř vždy tvarově odlišná a je tak nutné, aby byla pájená místa všech používaných vsázek prohřata rovnoměrně. Problém reziduálního namáhání materiálu se v praxi někdy řeší tak, že je na výrobní linku za vysokofrekvenční pájecí induktor umístěn další induktor, prohřívací, s řádově nižší frekvencí. Tento induktor redukuje teplotní gradient a reziduální namáhání a také zjemňuje a vylepšuje mikrostrukturu rychle zapájeného spoje.

Kategorizace induktorů je poměrně obtížná, jelikož každá geometrie většinou vyžaduje speciálně uzpůsobený tvar induktoru. Ve všech případech je však snaha induktor co nejlíže tvarově přizpůsobit tvaru vsázky. V potaz musí být samozřejmě bráno i chlazení induktoru a to jak bude celý systém automatizován. Nejběžnějšími tvary jsou jedno či vícezávitové induktory a to jak s kruhovým průřezem pro cylindrické vsázky, tak s průřezem čtvercovým, obdélníkovým či jinak tvarovaným dle stěn vsázky. Nízkofrekvenční induktory bývají častěji vícezávitové a větší. Induktory se používají jak ve vnější, tak ve vnitřní variantě, kdy je induktor umístěn uvnitř duté vsázky. U těchto běžných induktorů lze tvar elektromagnetického pole ovlivňovat jejich vzdáleností od vsázky, počtem závitů a velikostí a tvarem průřezu použitého vodiče či trubice. Pokud je nutné vyrobit induktor jednozávitový, je často potřeba pro dosažení rovnoměrného ohřevu vsázkou či induktorem v průběhu pájení otáčet. Induktory ve tvaru spirály lze využít na kuželové geometrie a induktory ploché, někdy nazývané palačinkové, jsou využívány, je-li potřeba vsázku prohřát pouze z některé strany, nebo ji není možné z hlediska geometrického uspořádání induktorem obklopit. Vodiče či trubice pro induktor se volí nejčastěji s kruhovým či čtvercovým průřezem. „Trubice se čtvercovým průřezem mají tu výhodu, že předávají více magnetického toku vsázce, než-li trubice s průřezem kruhovým.“ [23] Velmi často není induktor tvořen trubicí ani vodičem, ale je vyroben z masivního kovového bloku. Tyto induktory se používají nejčastěji pro pájení více vsázek najednou.



Obrázek 1.2: Induktory z masivních kovových bloků. (Převzato z [20], str. 283)

Při použití vyšších frekvencí se často přehřívají ostré hrany a případné otvory vsázky, lze tomu zamezit jak optimalizací tvaru induktoru, tak vyplněním otvoru kovovými vložkami během procesu pájení. Pokud je vsázka pájena na dvou blízkých místech jedním induktorem a je nežádoucí, aby se materiál mezi pájenými spoji příliš ohříval, je nutno



Obrázek 1.3: Další příklady používaných induktorů. (Převzato z [18], str. 166)

induktor tvarovat tak, aby se elektromagnetická pole obou částí vzájemně odečítala. Pro tento účel lze využít i tzv. absorberů, které pohlcují nežádoucí magnetický tok, absorbery musí být ve většině případů chlazeny. Pokud je induktor v pohybu, lze přehřívání omezit přibližováním a oddalováním induktoru od vsázky. Tvar induktoru musí být řešen i s ohledem na vzájemné silové působení vsázky a induktoru. Induktor je tak často kromě upevnění konců k napájecímu zdroji ještě připevněn k další pomocné pevné konstrukci. V případě nízkofrekvenčních induktorů je třeba uvažovat i akustický šum. [1] [9] [14] [18] [20] [23]

1.2 Koncentrátory a stínění

Častým problémem při optimalizaci indukčního ohřevu je nedokonalé rozložení teploty pájeného místa. Pokud tento problém nelze dostatečně eliminovat tvarem induktoru, lze pro lepší zacílení a zvýšení efektivity ohřevu použít koncentrátory a stínění. Koncentrátory jsou materiály s vysokou relativní permeabilitou. Tyto materiály přirozeně představují pro magnetický tok snazší cestu a ten se jimi uzavírá, lze tak magnetické pole účinně koncentrovat do požadovaného místa. Jako koncentrátory pro nižší frekvence se využívají svazky laminovaných elektrotechnických plechů. Plechy musí být elektricky nevodivě odděleny, aby se co nejvíce eliminovaly ztráty vířivými proudy. Nevýhodou těchto svazků je poměrně vysoká hmotnost. Pro frekvence vyšší se potom využívají ferity vyráběné z keramických oxidů, jsou odolné proti korozi, ale velmi křehké. Problém také nastává při překročení

Curieho teploty, kdy tyto materiály ztrácí svoje magnetické vlastnosti. Z tohoto důvodu často vyžadují vlastní chlazení.

Stínění spíše než pro koncentraci magnetického pole slouží k jeho odstínění tak, aby nebyla zahřívána nežádoucí místa jak na vsázce, tak na zbytku systému indukčního pájení. Pro stínění jsou většinou používány kovové pláty s takovou tloušťkou, aby bylo pole induktoru při dané frekvenci utlumeno. Nejčastěji jsou používány ocel, hliník či měď. [1] [19] [23]

1.3 Susceptory

Susceptory jsou součásti, které umožňují indukčně pájet i elektricky nevodivé materiály. Jsou to elektricky vodivé materiály přejímající roli vsázky, ze kterých je teplo následně přenášeno vedením a sáláním do pájené součásti. Susceptor, jakožto součást systému, nesmí se změnou teploty zásadně měnit svůj tvar. Namísto kovů se tedy častěji používají materiály jako je grafit či molybden. Nevýhodou těchto materiálů ovšem je, že při vyšších teplotách rychle oxidují, použití susceptorů tak často vyžaduje ochrannou atmosféru či pokrytí susceptorů speciální vrstvou karbidu křemíku. Susceptory jsou v praxi využívány hlavně v polovodičové technice a při práci s optickými vlákny, kde jsou vyžadovány vysoké teploty. [1] [23]

1.4 Pájky

Základní požadavky na pájku jsou dobrá smáčivost, bod tání pod bodem tání pájených materiálů, dobrá elektrická vodivost a mechanická a chemická odolnost. Výsledný zapájený spoj by měl být minimálně stejně pevný jako obě spájené součásti. Na trhu existuje velké množství pájek určených k tvrdému pájení, mnoho komerčně používaných pájek lze použít na více různých materiálů. K dostání je však i pájky pro speciální aplikace a současně jsou stále vyvíjeny nové experimentální slitiny.

Pájky jsou běžně prodávány ve formě klubek drátu, tyčí, plátů či prášku. Výsledný tvar pájky v automatizovaném systému pak závisí na geometrii vsázky, nejčastěji se však při indukčním pájení setkáváme s tvary podložek, kroužků, vložek a dalšími různě tvarovanými výlisky. Pájet lze také s různými druhy ochranných atmosfér či ve vakuu. Pájení ve vakuu je ale poměrně drahé, a proto je snaha vyvinout takové pájky, které vytvoří vyhovující spoj i v běžném prostředí. Důležitá je při pájení správná teplota, vysoká teplota pomáhá lepší tekutosti pájky a spíše se v zapájeném utvoří homogenní mikrostruktura. S vyšší teplotou však rostou i zrna pájky a zhoršují se výsledné mechanické vlastnosti spoje. Některé pájky jsou speciálně vyvíjeny jako nízkoteplotní, snižují se tím požadavky na dodanou energii a především se redukuje nežádoucí metalurgické změny samotných

pájených materiálů. Díky nižším teplotám je zabráněno oxidaci a přetečení pájky do nežádoucích míst.

„Na trhu se pro měď vyskytuje nejvíce pájek ze všech skupin kovů.“ [2] „Měď je užívána díky své vysoké mechanické pevnosti a poměrně nízké ceně.“ [1] Do pájek na bázi mědi se nejčastěji jako příměsi přidávají zinek, křemík, mangan, nikl či cín. Problémem pájek s přídavkem cínu jsou rozdílné teploty tavení obou kovů a tendence k likvacii slitiny. Zlato, stříbro a platina jsou velmi odolné proti oxidaci při vysokých teplotách a jako příměsi zlepšují vlastnosti pájek. Pájky s příměsí zlata jsou však velmi drahé a používají se pouze ve speciálních případech. Stříbro je často doplňováno fosforem, zinkem či kadmíem. Pájky s příměsí stříbra mají nízké tavicí teploty a je u nich většinou nutné použít tavidlo. Pájky často obsahují i třetí přídavnou složku, např. křemík pomáhá proti odpařování zinku při pájení a zlepšuje hladkost výsledného spoje.

„Měď, slitiny mědi a vzácné kovy jsou pravděpodobně nejsnadněji pájitelnými kovy.“ [2] V praxi se snažíme nežádoucím interakcím mezi pájkou a pájeným materiálem zabránit přílišným nepřekračováním tavicí teploty pájky a snížením potřebného pájecího času na minimum. Pokud však požadujeme difuzní spojení, jsou vyšší teploty a delší časy žádoucí. Měděné slitiny obsahující chrom nebo zirkon utváří na povrchu vrstvu oxidu, která brání toku pájky, u těchto materiálů je tak třeba brát ještě větší ohled na čistotu spoje. Lze si pomoci i ochrannou atmosférou či speciálním tavidlem. Největší skupinou slitin mědi jsou mosazi. Pokud obsahují vyšší poměr zinku, vždy vyžadují použití tavidla. V případě bronzu je většinou třeba obě pájené části před pájením tepelně povolit, jinak by mohly při pájení prasknout. „V aplikacích, kde dříve převládalo pájení mědí či jejichmi slitinami, nyní začíná převládat pájení hliníkem, je odolnější vůči korozi, lehčí a mnohdy levnější než měď, lze ho též 100 % zrecyklovat.“ [6]

Pro indukční pájení se nejčastěji používají tavidla obsahující fluoridy a alkalické soli, převážně draslík. Tavidla jsou většinou ve formě pasty a na vsázku jsou aplikovány sprejem nebo štětcem, nejčastěji pomocí automatizované linky. Tavidla mohou být i tekutá či ve formě prášku. Běžná aktivační teplota tavidla je 593 °C. Tavidlo chrání jak pájku, tak i samotný pájený kov před oxidací během pájení. Tavidla jsou speciálně vyrobena pro určité druhy pájek a rozsahy teplot. Tavidlo nemusí být v některých případech použito, pokud je zajištěno, že jsou pájené plochy čisté a proces pájení probíhá v ochranné atmosféře. Tavidlo také není nutné použít u některých pájek obsahujících fosfor. Proces pájení většiny měděných pájek se však zlepší, je-li tavidlo použito. [1] [2] [6] [12] [19] [23]

1.5 Napájecí zdroje

Požadavek na napájecí zdroj se odvíjí vždy od dílčí aplikace, hlavními faktory při výběru či návrhu jsou ale vždy frekvence, příkon, požadované napětí induktoru, proud jím proté-

kající a účinník. V případě indukčního pájení je frekvence volena tak, aby byla pájená část co nejlépe prohřáta a frekvence se tedy odvíjí od tloušťky stěn pájených součástí. Ideálně požadujeme, aby teplota všech pájených dílů s různými tloušťkami stěn byla totožná a nevznikal tak příliš velký teplotní gradient. Lze říct, že ve většině případů indukčního pájení jsou používané frekvence v rozmezí 10 - 485 kHz a příkony se pohybují ve stovkách kW. Vysokofrekvenční zdroje s frekvencí do 15 MHz jsou používány při pájení součástí s velmi malými průřezy. Díky vyšším frekvencím mohou být induktor i přívodní vodiče menší, než by tomu bylo u frekvencí nižších.

Velikost zdroje se primárně odvíjí od velikosti a hmotnosti vsázky. Odhadovaný požadavek na příkon lze spočítat ze znalosti hmotnosti, měrné tepelné kapacity vsázky, rozdílu počáteční a koncové teploty a potřebného času pro ohřev. Většinu z těchto veličin však nelze bez experimentu či simulace určit. Zjednodušené výpočty též nezahrnují ztráty v samotném induktoru a nezohledňují nedokonalý přenos energie z induktoru do vsázky. Při návrhu systému je nutné zohlednit i silové účinky elektromagnetického pole. V otázce volby frekvence je nutno počítat s tím, že cena za kW s požadovanou frekvencí roste, z ekonomického hlediska je tak často volena nejmenší možná dostačující. Bude-li jedním induktorem pájeno více různých geometrií a výstupní frekvence zdroje není nastavitelná, je třeba zvolit takovou, aby vyhovovala všem pájeným geometriím. „Napájecí zdroje určené přímo pro indukční pájení jsou schopny pracovat s širokou škálou různých induktorů.“ [19] Správné nastavení zdroje je vždy doprovázeno i testem v praxi. Kvůli obtížným geometriím musí být často celý systém přenositelný, tyto zdroje jsou většinou v řádu několika jednotek kW.

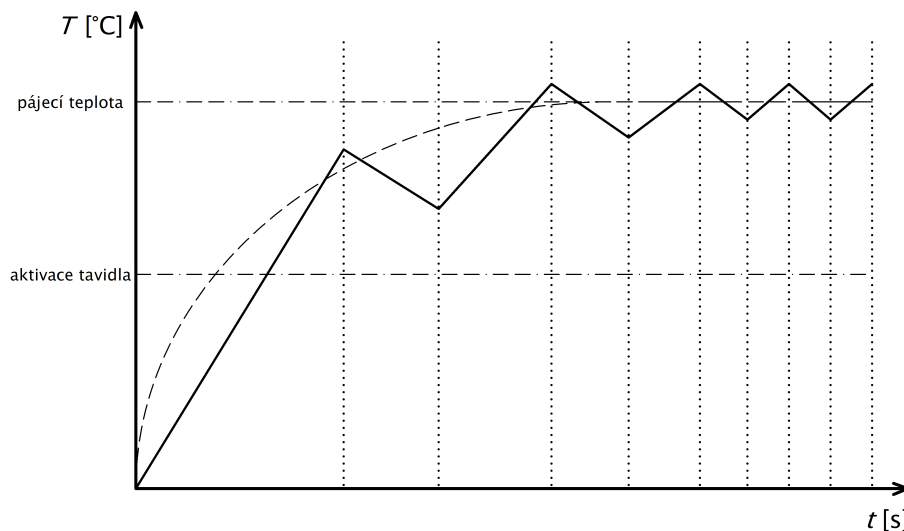
Největší ztráty v systému indukčního pájení vznikají při předávání energie mezi induktorem a vsázkou, Jouleovými ztrátami v induktoru a v přívodních vodičích, úbytky na výkonových polovodičových součástkách napájecího zdroje, nesprávně zvolenou rezonanční frekvencí a impedančním nepřizpůsobením induktoru a napájecího zdroje. Nejlepší přenos energie z induktoru do cívk je totiž zajištěn, je-li výstupní impedance zdroje rovna vstupní impedanci induktoru. Jako impedanční přizpůsobení se nejčastěji používají oddělovací transformátory či autotransformátory. Napájecí zdroj by měl ideálně pracovat tak, aby s induktorem a vsázkou vytvořil rezonanční obvod. Rezonance zajistí, že bude maximální množství energie použito pro ohřev vsázky. Geometrie cívk určuje indukanci a ohmický odpor. Mnoho dnešních zdrojů má vnitřně nastavitelnou indukanci a kapacitanci, pokud ne, je třeba využít kapacitorových baterií. Kapacitory musí být dimenzovány pro vysoká napětí, většinou tedy vyžadují chlazení vodou. Pomocí kapacitorových baterií téměř nikdy nelze dosáhnout přesné rezonanční frekvence. Některé dnešní zdroje jsou dokonce schopny určit rezonanční frekvenci samy.

„V polovině 20. století byly jako napájecí zdroje používány motorgenerátory pro nízko až středofrekvenční aplikace a elektronkové zdroje pro vyšší frekvence do 10 MHz.“ [18] Výkonové elektronky ve zdrojích velmi rychle degradovaly a tím klesal i dodávaný výkon. Pokud neměl zdroj ve zpětné vazbě informaci o tom, jaký výkon je do vsázky dodáván,

zapájené spoje bývaly nekvalitní. Elektronkové systémy měly i poměrně vysoké nároky na chlazení.

Výstupní frekvence motorgenerátorů, neboli rotačních měničů, byla určena rychlostí otáčení a počtem pólů alternátoru. Výstupní napětí bylo potom řízeno pomocí napětí dodávaného statorovému vinutí alternátoru. Výstupní napětí mělo ovšem tendenci značně kolísat v závislosti na fyzikálních změnách ve vsázce, bylo tedy nutno do systému zařadit automatické regulátory napětí, které řídily alternátor tak, aby výstupní napětí zůstávalo konstantní. Účinnost takovýchto soustrojí byla poměrně nízká, tyto zdroje téměř vždy vyžadovaly kompenzaci pomocí kapacitorové baterie a transformátor pro impedanční působení. Dnes se už téměř nepoužívají.

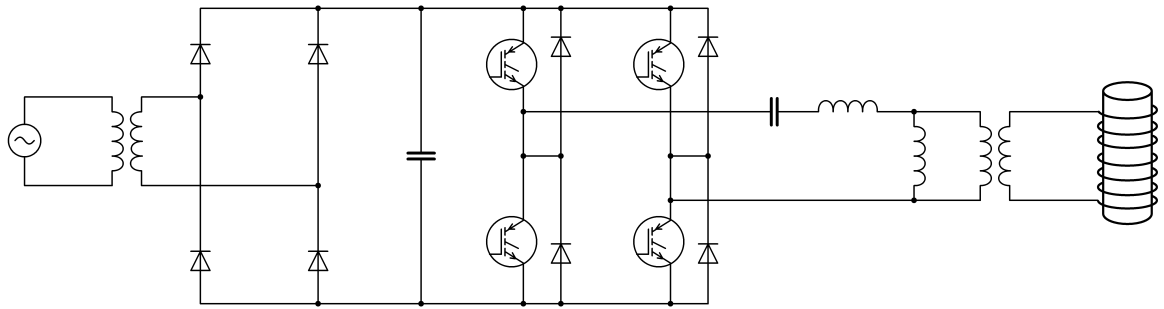
Mezi dnes již také spíše archaické napájecí zdroje patří, kromě elektronkových zdrojů a motorgenerátorů, i zdroje s jiskříštěm, tyto zdroje byly schopné generovat frekvence od 80 do 200 kHz. Nevýhodou bylo, že na výstupu současně generovaly mnoho frekvencí a výstup tak obsahoval velké množství vyšších harmonických. Další nevýhodou byla i velmi nízká účinnost. Všechny tyto zdroje dnes již plně nahradily zdroje s výkonovými polovodičovými součástkami. Dnešní zdroje mají mnohem menší spotřebu chladiwa a menší rozměry.



Obrázek 1.4: Spínací diagram napájecího zdroje.

Napěťové zdroje na frekvenci sítě jsou nejlevnější variantou používanou pro indukční pájení. Používají se převážně tam, kde je síťová frekvence dostatečná pro prohřátí stěn vsázky. Tyto zdroje se vyskytují jak v jedno, tak v třífázové variantě, nejčastěji v kombinaci s nízkonapěťovými induktory a oddělovacím transformátorem. Pokud je impedance induktoru dostatečně velká, může být systém používán i bez oddělovacího transformátoru. Energie dodávaná do vsázky je u těchto typů zdrojů řízena střídavým zapínáním a vypínáním v závislosti na zpětné vazbě z pyrometru či termočlánku (1.4).

Mezi dnes nepoužívanější napájecí zdroje patří rezonanční měniče. Oscilační obvod těchto měničů může být jak uvnitř samotného zdroje, tak může být jako rezonanční obvod



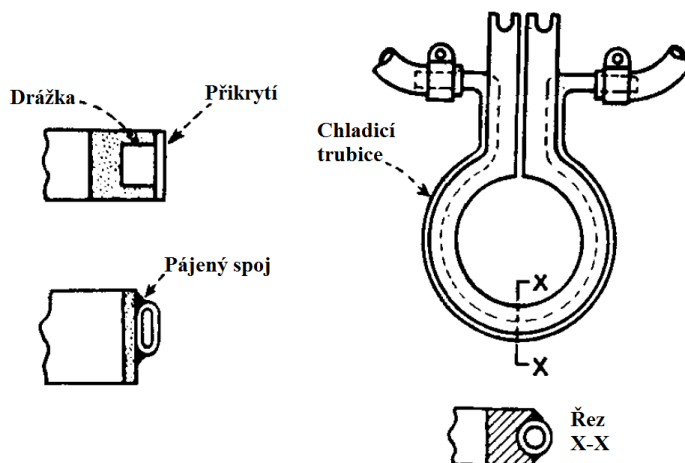
Obrázek 1.5: Zjednodušený příklad vnitřního zapojení moderního napájecího zdroje.

využit i induktoru se vsázkou. Oscilační obvod může být sériový, paralelní nebo sérioparalelní, v praxi je ovšem nejčastěji využíván paralelní. Tyto zdroje jsou většinou schopny automaticky kompenzovat fyzikální změny ve vsázce jako je průchod teploty Curieho bodem. Většina dnešních zdrojů má v určitém rozsahu nastavitelné výstupní pracovní frekvence. Vnitřní usměrňovače mohou být jak neřízené, tak řízené či polořízené, nejčastěji v můstkové variantě. Samotný střídač je pak řízený můstek, častěji půlmůstek. Tyto měniče se vyznačují velmi dobrou účinností až kolem 90 % a často mívají i zpětnou vazbu udržující fázový posun proudu a napětí na nulové hodnotě. Toho je docíleno buď jednoduššími analogovými zpětnovazebními systémy, nebo mikrokontrolery. [1] [5] [16] [18] [23]

1.6 Chlazení

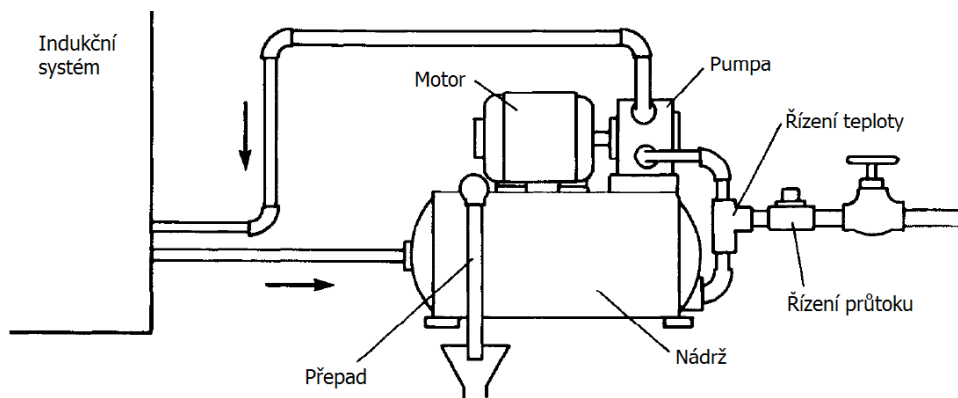
Pro dosažení co nejvyšší účinnosti indukčního systému je téměř vždy zapotřebí chlazení. Chlazen musí být často jak induktor, tak napájecí zdroj, ale i další součásti jako jsou kapacitorové baterie či transformátor. Při návrhu chladicího systému je třeba předem určit jaké maximální teploty jsou jednotlivé součásti systému schopny snést. Dále je třeba zvolit jaké chladivo bude použito, jeho množství, potřebný tlak a průtok. Při výpočtu potřebného průtoku a tlaku je důležité počítat se všemi paralelně či sériově chlazenými částmi systému a průřezy jejich chladicích kanálků. Požadavky na vlastnosti chladiva jsou především nízká hodnota elektrické vodivosti a čistota. Při vyšších hodnotách elektrické vodivosti se chladivem uzavírá elektrický proud, což vede jak k nežádoucímu ohřevu chladiva, tak k elektrolýze uvnitř chladicího systému. Snaha je tedy navrhnout průchod chladiva systémem tak, aby neumožňoval vytvořit uzavřený elektrický obvod. Pokud je to zajištěno, lze použít i chladivo s větší elektrickou vodivostí. Chlazení induktoru může být vnitřní nebo vnější. Pokud je induktor vytvořen z trubice, lze ji s výhodou použít pro průtok chladiva. Další možností je v materiálu po obvodu vytvořit drážku, přikrýt ji a vytvořit tak kanálek. Často je k induktoru pouze po obvodu připájena speciální chladicí trubice.

Nejrozšířenějším chladivem je potom voda, používá se jak destilovaná, deionizovaná,



Obrázek 1.6: Varianty chlazení induktorů. (Převzato z [20], str. 282)

tak běžná voda z vodovodního řadu. Použití deionizované vody má negativní vliv na některé kovy, např. zinek. Problémy vody z vodovodního řadu jsou vyšší elektrická vodivost a případné nečistoty, které mohou v důsledku zanášet chladicí systém. Samotné chladiivo je pak nejčastěji ochlazováno pomocí výměníků voda-voda či voda-vzduch pro menší systémy. Běžné je též použití odpařovacích systémů, kde chladiivo protéká žebry a je zevnějšku ostříkáváno studenou vodou. Výhodou tohoto chlazení je izolace celého potrubí, kterým chladiivo protéká, od okolí.

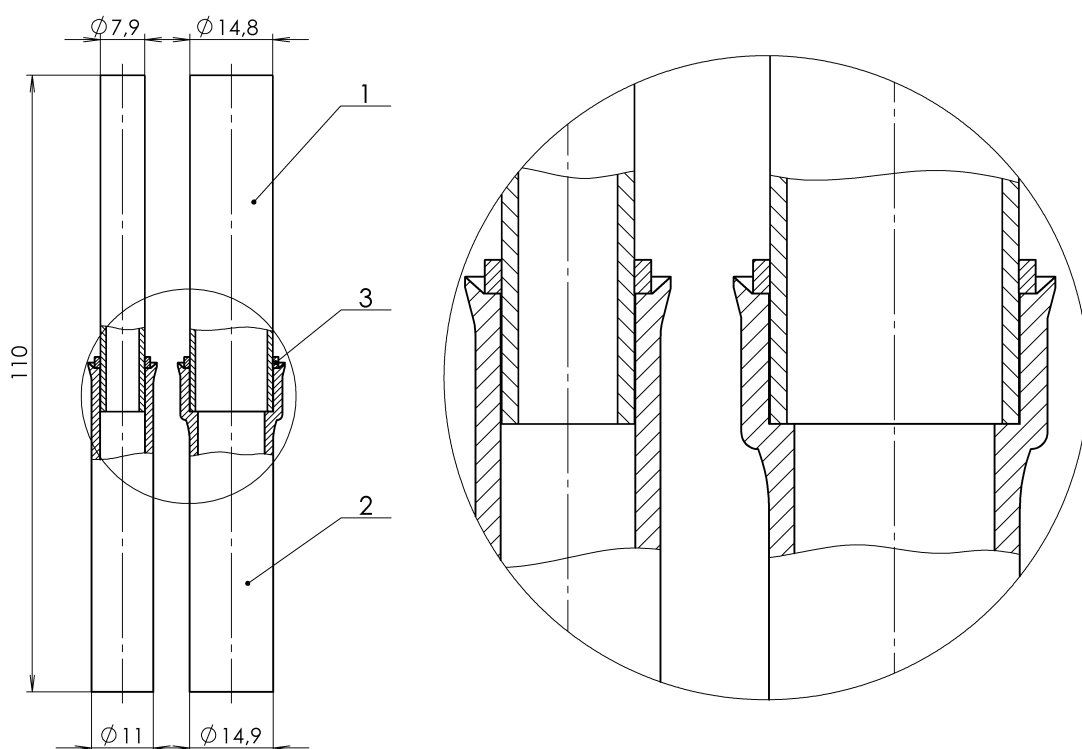


Obrázek 1.7: Příklad nejjednoduššího chladicího systému. (Převzato z [23], str. 78)

Nejjednodušší systém chlazení indukčního systému je uveden na obrázku 1.7. Voda je hnána z nádrže čerpadlem do indukčního systému a následně vracena zpět do nádrže. Koncová trubice je opatřena čidlem teploty, které ovládá ventil dodávající do chladicího systému vodu z vodovodního řadu. Tato voda je do systému vpuštěna pouze v případě, že teplota chladiiva, v dosud uzavřeném okruhu, překročí určitou limitní teplotu. Aby bylo v systému možno udržet stále stejné množství vody, obsahuje nádrž přepadovou trubicí. Takovýto systém je ovšem vždy závislý na externím zdroji chladiiva a voda z vodovodního řadu nemusí vždy vyhovovat. [1] [20] [23]

2 Definice problému

Geometrie řešená v této práci se skládá ze dvou základních komponent, jsou to dvě sady trubíc o rozdílných průměrech, na obrázku 2.1 jsou to díly 1 a 2 a kroužků pájky, označené číslem 3. Z obrázku jsou patrné základní rozměry těchto dílů v milimetrech. Mezera mezi trubícemi umožňující kapilární vztlínání pájky není ani v detailu příliš viditelná, činí totiž pouze 0,1 mm. Trubice jsou vyrobeny z mědi, jejíž teplota tavení je přibližně 1085 °C. Při pájení je ovšem vhodné příliš nepřekračovat teplotu 900 °C, materiál má potom tendenci značně měknout a i sebemenší změna rozměrů je u takto malých trubíc problémem. Malé rozměry mají též za následek to, že se trubice velmi rychle ohřívají.



Obrázek 2.1: Pájené trubice s kroužky pájky.

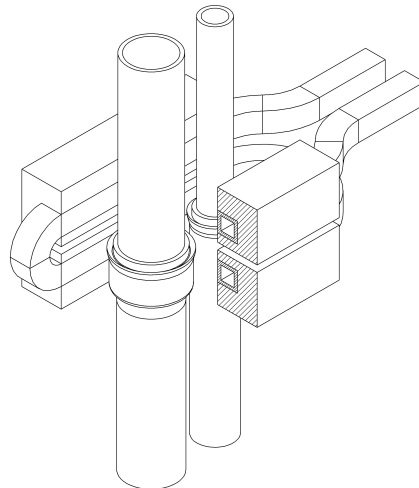
Pájka používaná pro spájení trubíc je BCUP-1, obsahuje 95 % mědi a 5 % fosforu. Tato pájka je přímo určena pro pájení bez tavidla, je to umožněno právě přítomností fosforu ve slitině. Doporučená teplota tavení se pohybuje od 710 do 930 °C. To je teplota poměrně vysoká, způsobena je absencí stříbra, která u těchto typů pájek teplotu tavení snižuje. Je patrné, že interval doporučené teploty pro tavení pájky překračuje bezpečnou teplotu pro práci s měděnými trubícemi, tedy 900 °C. S uvážením velmi rychlého ohřevu těchto komponent bude nutné velmi přesně stanovit dobu pájení tak, aby se pájka dostatečně roztavila a navzlínala do mezery mezi trubícemi a zároveň, aby nebyla překročena

jejich maximální dovolená teplota. Používané materiály nekladou požadavky na speciální ochrannou atmosféru, pájení tak může probíhat v běžném vzduchovém prostředí.

Celý proces je automatizován takovým způsobem, že trubice jsou před přesunem do pájecího místa zkompletovány a doplněny o kroužky pájky. Následně jsou zasouvány do induktoru horizontálním posuvem ve vzpřímené poloze. To s sebou přináší hlavní tvarový požadavek na induktor, který nemůže zcela obepínat pájené místo, jak by tomu bylo v ideálním případě. Další tvarový požadavek na induktor plyne z rozdílného průměru obou pájených trubíc. Vzhledem k velmi malým rozměrům celé geometrie jsou kladeny poměrně vysoké nároky na přesnost celého procesu. Induktor musí být pro dosažení co nejvyšší účinnosti velmi blízko trubicím, v důsledku toho i malý odklon induktoru o jednotky milimetrů způsobuje velké změny v rozložení teplot kroužků pájky.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} \quad (2.1)$$

Frekvence použitého napájecího zdroje je proměnná a je automaticky nastavována podle impedance použitého induktoru tak, aby byl celý obvod v rezonanci. Použitá frekvence je klíčová pro rychlost ohřevu, čím je vyšší, tím se materiál ohřívá rychleji. Při testu s první verzí induktoru byla zdrojem nastavena frekvence 200 kHz, při této frekvenci vychází hloubka vniku pro měď σ , dle vzorce 2.1, přibližně 0,15 mm. Impedanci, potažmo vlastní indukčnost induktoru, je poměrně obtížné změřit, jednak má induktor poměrně neobvyklý tvar a jednak se indukčnost pohybuje v řádech desetin μH . Hodnota indukčnosti jednotlivých induktorů je tedy zpětně počítána z velikosti komplexní impedance \underline{Z} , kterou software automaticky určuje při každé simulaci, a ze známé hodnoty frekvence f .

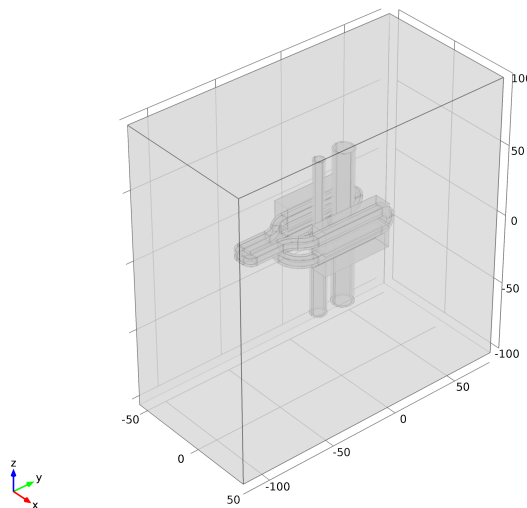


Obrázek 2.2: Ukázka zkompletované geometrie.

3 Matematický model

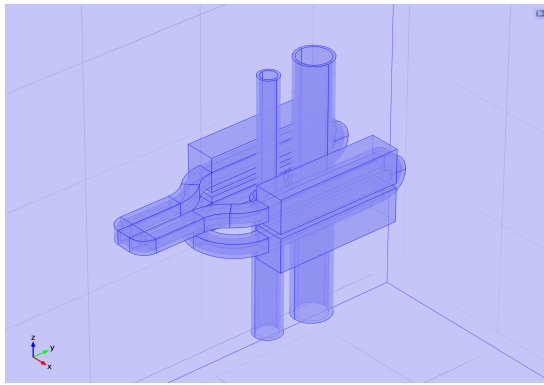
Pro simulaci problému byl zvolen software COMSOL Multiphysics[®], který využívá pro výpočet simulací dnes nejčastěji používanou metodu konečných prvků. „Metoda konečných prvků je použitelná při řešení fyzikálních polí v nejrůznějších typech prostředí (nelineárních, anizotropních, nehomogenních), automaticky respektuje podmínky na rozhraních, je stabilní a velmi spolehlivá.“ [11]. Samotné modely trubice, pájky a induktorů byly modelovány v programu SOLIDWORKS[®].

Při sestavování matematického modelu indukčního ohřevu je třeba uvažovat dvě fyzikální pole, jednak je to pole elektromagnetické, jednak pole teplotní. Tato pole jsou popsána parciálními diferenciálními rovnicemi, jejichž členy jsou závislé jednak na sobě, jednak na fyzikálních a chemických vlastnostech použitých materiálů. Dále je třeba určit, ve kterých komponentech budeme tato fyzikální pole uvažovat.

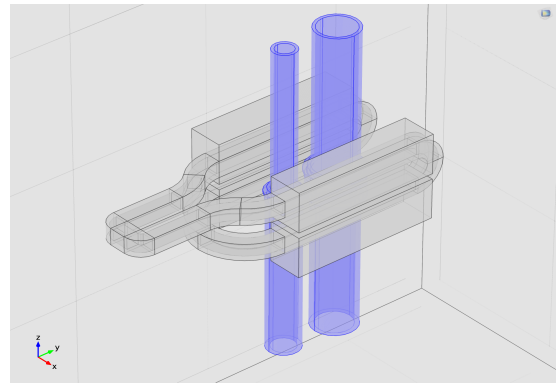


Obrázek 3.1: Řešená geometrie se vzduchovou obálkou.

Elektromagnetické pole je nutno z hlediska dané úlohy řešit v oblasti celé geometrie. Vzniká totiž primárně průchodem harmonického proudu induktorem a následně se šíří do jeho okolí. Trubice s kroužky pájky a induktor s koncentrátorem jsou tak ještě doplněny o vzduchovou obálku reprezentující okolní prostředí. Pole teplotní je pro zjednodušení celého problému a zkrácení výpočetního času řešeno pouze v samotné vsázce, tedy v trubicích a kroužku. Je tak zcela zanedbáno ohřívání induktoru a okolního vzduchu. Toto zjednodušení bylo učiněno na základě praktického testu s prototypem induktoru. Bylo ověřeno, že induktor lze při dané hodnotě proudu I pomocí instalovaného chladicího systému účinně uchládit a předpokládáme, že teplo dodané vsázce jednak prouděním, jednak sáláním je, oproti teplu vyvíjenému indukčním ohřevem, zanedbatelné. Tento předpoklad byl ověřen dvěma simulacemi, z nichž v jedné bylo teplotní pole řešeno v celé geometrii



(a) Elektromagnetické pole



(b) Teplotní pole.

Obrázek 3.2: Oblast řešení jednotlivých fyzikálních polí.

a v druhé pouze ve vsázce. Výsledná rozložení a velikosti teplot se u obou simulací lišily pouze o jednotky procent, což je pro náš konkrétní případ chyba marginální. Další komponenty jako napájecí zdroj, kapacitorové baterie, chladicí systém či mechanismus uchycení trubic jsou v řešené geometrii zanedbány. Jejich vzdálenost od pájeného místa je dostatečně velká a jejich vliv na uvažovaná fyzikální pole je tedy zanedbatelný.

3.1 Elektromagnetické pole

Řešení elektromagnetického pole vychází z Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru. Tyto rovnice jsou doplněny ještě o okrajové a počáteční podmínky pro jednotlivé proměnné, vztahy popisující souvislosti mezi elektrickými a magnetickými intenzitami a indukcemi pomocí materiálových veličin a rovnice skalárních a vektorových potenciálů.

Rovnice 3.1 je první Maxwellovou rovnicí v diferenciálním tvaru, popisující souvislost rotace intenzity magnetického pole \mathbf{H} a hustot proudu elektrického \mathbf{J} a Maxwellova posuvného proudu $\partial\mathbf{D}/\partial t$. Pro naši simulaci je možno Maxwellův posuvný proud zanedbat, jelikož je jeho velikost oproti proudové hustotě \mathbf{J} zanedbatelná. Je to dáno jednak pracovními frekvencemi využívanými při indukčního ohřevu, které málokdy přesahují 1 MHz, jednak prací s kovy, kde je měrná elektrická vodivost daných materiálů, oproti permeabilitě vyšší až o 17 řádů. Tato úloha tedy splňuje podmínku kvazistacionarity pole a dané vztahy a rovnice lze převést do fázorových tvarů.

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (3.1)$$

Dalšími rovnicemi popisující toto pole jsou rovnice 3.2 magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} a rovnice 3.3 elektrického skalárního potenciálu φ . Oba tyto potenciály bude nutno dále normovat, u magnetického vektorového potenciálu navíc uvažujeme Coloum-

bovu kalibrační podmínku pro kvazistacionární pole, tedy že divergence \mathbf{A} je nulová.

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{E} = -\text{grad } \varphi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3.3)$$

V modelu jsou uvažovány i doplňující rovnice 3.4 a 3.5 popisující vztahy mezi vektorem magnetické indukce, resp. elektrické indukce, a vektorem magnetické intenzity, resp. elektrické intenzity, pomocí permeability μ a permitivity ε . Členy \mathbf{M} a \mathbf{P} jsou vektory magnetické a elektrické polarizace. Oba tyto vztahy se značně zjednoduší, budeme-li uvažovat dané prostředí za lineární, izotropní a homogenní. Výsledné vztahy jsou potom $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ a $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}$. Hodnoty permitivity a permeability, stejně jako další materiálové konstanty, byly převzaty z knihoven [4].

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.4)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (3.5)$$

S využitím výše uvedených vztahů a s uvážením jejich zjednodušujících podmínek dostáváme výslednou rovnici pro magnetický vektorový potenciál 3.6, kde $\gamma(\partial \mathbf{A}/\partial t)$ vyjadřuje proudovou hustotu indukovanou v dané entitě proměnným elektromagnetickým polem a \mathbf{J}_v externí proudovou hustotu, v našem případě dodávanou napájecím zdrojem.

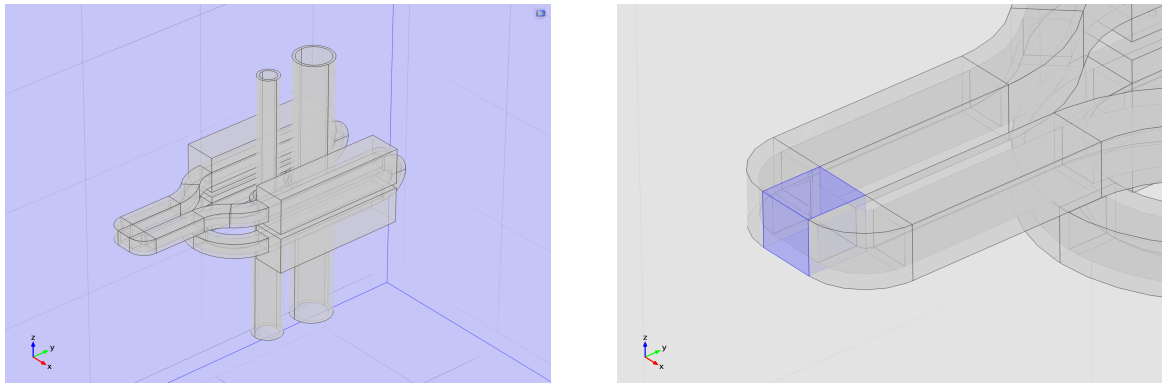
$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } \mathbf{A} \right) + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_v \quad (3.6)$$

Na hranicích vzduchové obálky je aplikována Dirichletova okrajová podmínka (3.7) udávající nulovou hodnotu tečné složky vektorového potenciálu \mathbf{A} k dané ploše. Jako počáteční podmínku pro celou geometrii uvažujeme nulovou hodnotu vektorového magnetického potenciálu \mathbf{A} .

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0 \quad (3.7)$$

Proud je do obvodu zadán pomocí speciální okrajové podmínky, jejímiž parametry jsou velikost požadovaného proudu I , výška přírodního portu a délka integrační křivky c , charakterizující tvar tohoto portu. Dále je volen vektor směru mezi vstupní a výstupní branou portu, v rovnici 3.8 označený písmenem \mathbf{n} . Symbol \mathbf{J}_s je potom vektor povrchové proudové hustoty, který je použit jako okrajová podmínka portu s konstantní velikostí a směrem. Port tak funguje jako jistý ekvivalent proudového zdroje.

$$I = \int_c (\mathbf{n} \times \mathbf{J}_s) \, d\mathbf{l} \quad (3.8)$$



(a) Dirichletova okrajová podmínka.

(b) Přívodní proudový port.

Obrázek 3.3: Okrajové podmínky elektromagnetického pole.

3.2 Teplotní pole

První rovnicí tepelného pole (3.9) je základní diferenciální rovnice tepla pro pevné látky, kde ρ je hustota daného materiálu, c_p jeho měrná tepelná kapacita a \mathbf{v} je rychlost pohybu daného prostředí. Člen β je teplotní součinitel objemové roztažnosti, $\partial T/\partial t$ popisuje změnu vnitřní energie v čase a $\mathbf{v} \text{ grad } T$ zohledňuje pohyb prostředí. Naši geometrii ale uvažujeme po celou dobu pájení v klidu, tento člen tedy nebude uvažován. Difuzi, tedy tepelný tok přiváděný či odváděný z daného objemu jeho povrchem a to jak vedením, tak sáláním, vyjadřuje $\text{div}(\mathbf{q} + \mathbf{q}_r)$. Symbolem p je označen měrný výkon, tedy teplo vzniklé přímo v daném materiálu, v případě indukčního ohřevu především Jouleovými a magnetizačními ztrátami. Člen $\beta T : (dS/dt)$ popisuje disipaci, neboli přeměnu mechanického namáhání na teplo, kde S je druhý Piola-Kirchhoffův tenzor napětí.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \text{ grad } T \right) + \text{div}(\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = p - \beta T : \frac{dS}{dt} \quad (3.9)$$

Druhou rovnicí (3.10) je potom hustota tepelného toku reprezentující vedení tepla ve vsázce vyjádřená pomocí Fourierova zákona, tedy skalárního součinu součinitele tepelné vodivosti materiálu λ a gradientu teploty. Výsledný vektor hustoty má potom opačný směr.

$$\mathbf{q} = -\lambda \text{ grad } T \quad (3.10)$$

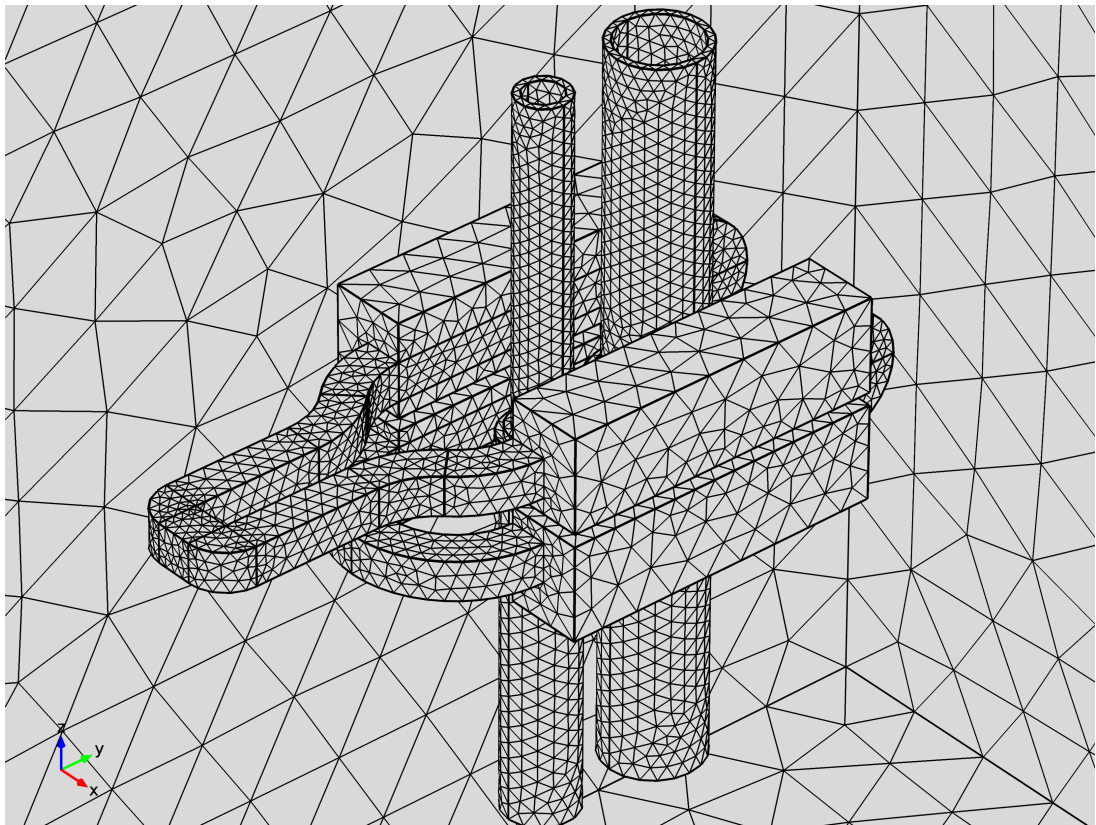
Na rozhraní vzduchu a vsázky je využito Newtonova ochlazovacího zákona popisujícího šíření tepla prouděním (3.11), kde α je součinitel přestupu tepla, T_{ext} je teplota okolního prostředí a T_2 teplota daného povrchu. Součinitel přestupu tepla je poměrně obtížně určitelnou konstantou. Při reálném testu s prototypem induktoru tak byla změřená teplota vsázky porovnána s výsledkem simulace s přibližně nastavenou hodnotou konstanty, která vychází z obvyklého intervalu těchto hodnot. Následně byla zvolena taková hodnota, aby se výsledky simulací uspokojivě shodovaly s reálnými testy, konkrétně $10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$.

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \alpha (T_{ext} - T_2) \quad (3.11)$$

Počáteční podmínka pro celé tepelné pole je, že teplota T je v čase 0 totožná s teplotou prostředí, kde je dané zařízení instalováno, tato teplota činí 21 °C. [4] [11]

3.3 Diskretizace

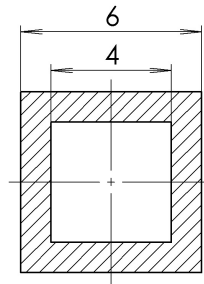
Před samotným výpočtem bylo třeba ještě celou geometrii diskretizovat sítí konečných prvků, v našem případě čtyřstěnných elementů. Použité přednastavení sítě počítá s minimální délkou hrany čtyřstěnu 2 mm a největší možnou délkou 16 mm. Toto nastavení se ukázalo být vhodným kompromisem mezi požadovanou přesností výsledků a délkou výpočetního času. Software pak sám automaticky vyhodnotí, kde je nutné udělat síť jemnější, především v blízkosti dotyku dvou ploch či hran.



Obrázek 3.4: Diskretizovaná geometrie.

4 Optimalizace induktoru

Induktory jsou vyrobeny z dutých měděných trubic čtvercového průřezu, jejichž rozměry jsou patrné z obrázku 4.1. Čtvercový průřez byl zvolen proto, že rovné strany trubic lépe předávají energii vsázce. Dutina umožňuje průtok chladicí kapaliny, v tomto případě vody. Tloušťka stěny trubice, kterou protéká elektrický proud je pouze 1 mm, ale jelikož je hloubka vniku počítaná v předchozích kapitolách 0,15 mm, tato plocha stejně není plně využita.



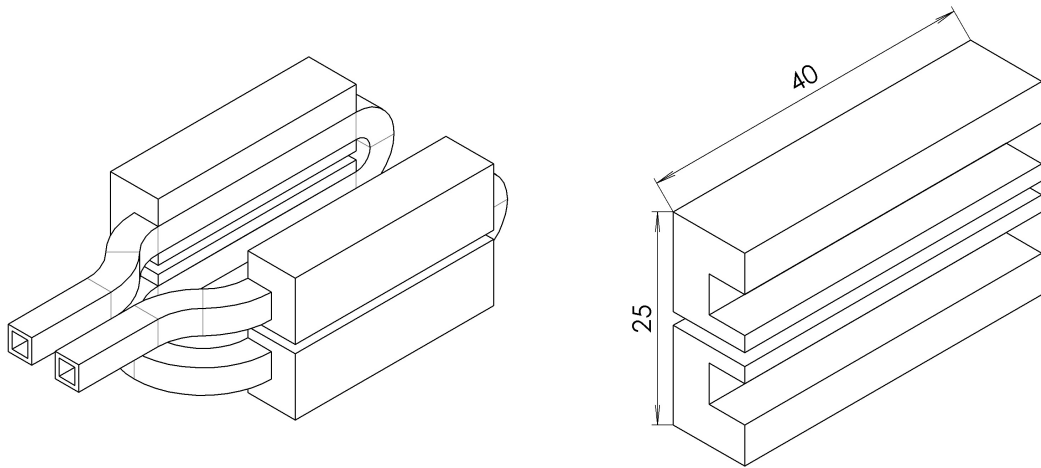
Obrázek 4.1: Trubice induktoru.

Jako materiál pro koncentrátory byl potom zvolen Fluxtrol[®] 50, určený pro frekvence 10 - 1000 kHz, výrobce ovšem garantuje nejlepší funkční vlastnosti při 50 - 500 kHz, kam spadá i námi použitá frekvence napájecího zdroje. Nejvyšší možná hodnota magnetické indukce před úplným nasycením materiálu je 1,2 T, takto vysokých hodnot však není žádným z induktorů dosahováno. Jako problémovým faktorem se ukázala velikost měrného elektrického odporu tohoto materiálu, výrobce uvádí hodnotu 0,5 k Ω cm, rozdíl potenciálů mezi vrchním a spodním vodičem induktoru je ale tak velký, že při praktických testech docházelo k průrazům koncentrátoru. Z tohoto důvodu je koncentrátor u všech induktorů v půlce rozdělen tak, aby jím nemohl procházet vyrovnávací proud. Dalším uvažovaným materiálem pro koncentrátor byly elektrotechnické plechy. Problémem je, že i speciální, velmi tenké plechy, dokáží pracovat s frekvencemi maximálně v řádu desítek kHz.

Jak už bylo zmíněno v předchozích kapitolách, automatizace celého systému neumožňuje zvolit optimální tvar induktoru, kterým by byl pravděpodobně solenoid obepínající obě trubice, jehož průřez by kopíroval jejich vnější stěny. U všech jiných tvarů bude nutno počítat s tím, že rozložení teploty po obvodu kroužků pájky nebude pravděpodobně nikdy zcela ideální. Z praktických testů bylo zjištěno, že má-li být spoj uspokojivě zapájen, rozdíl teplot nejteplejšího a nejstudenějšího místa kroužku pájky může být maximálně 10 °C. Zároveň se oba kroužky, stejně jako trubice, musí hřát přibližně stejně rychle, příliš dlouhé ohřívání jedné z trubic může zapříčinit nevratné strukturální změny. V extrémním případě může trubice dosáhnout svého bodu tavení. Celková délka pájecího procesu od spuštění napájecího zdroje by potom neměla přesáhnout 1 minutu. Z hlediska přesnosti je

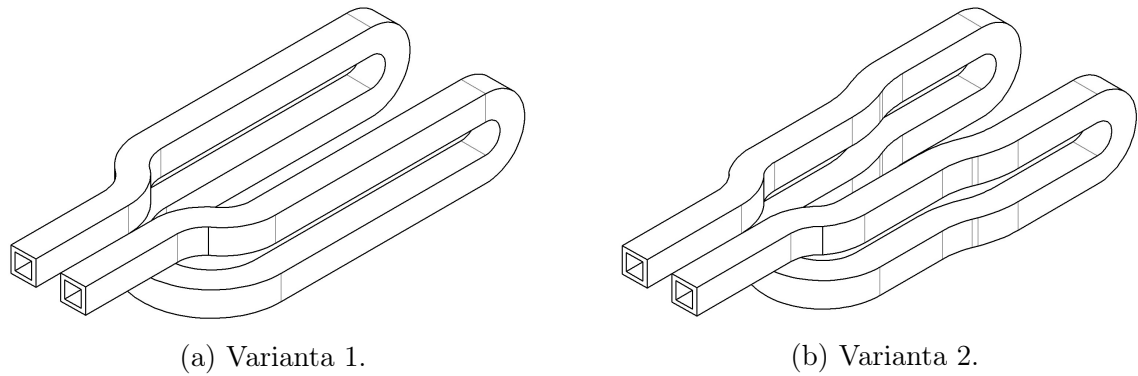
také žádoucí, aby induktor nebyl příliš blízko vsázce a zabránilo se tak přímému dotyku těchto součástí.

Pokud nebude uvedeno jinak, ve všech simulacích je počítáno s frekvencí 200 kHz a proudem 1500 A. Impedance, a především vlastní indukčnosti induktoru, by se zásadně neměla odchylovat od prvního v praxi testovaného prototypu. Odlišná velikost indukčnosti by znamenala automatické přenastavení rezonanční frekvence zdroje a výsledek simulace by tak neodpovídal realitě.



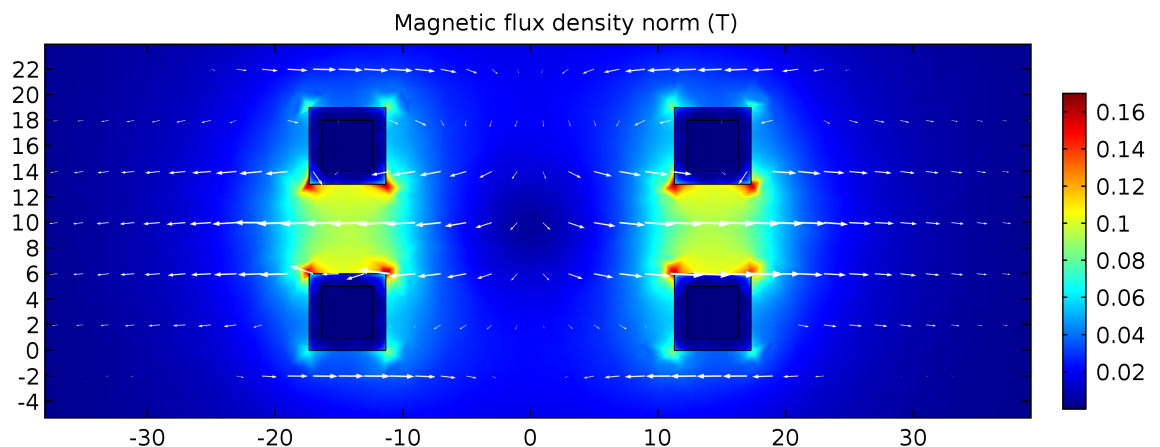
Obrázek 4.2: Ukázka induktoru s koncentrátorem.

4.1 První prototyp



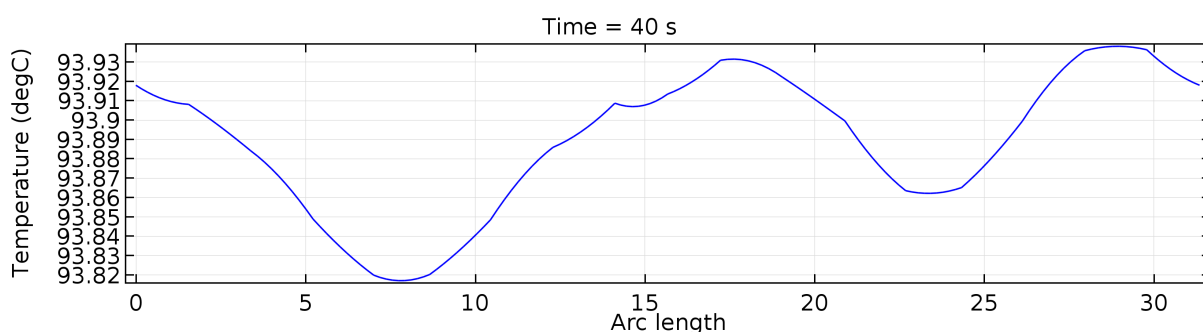
Obrázek 4.3: Testované tvary prvního prototypu.

Prvním testovaným prototypem byl induktor na obrázku 4.3 (a). Pro názorný pohled na rozložení magnetického pole byla simulace prototypu nejdříve provedena bez vsázky a koncentrátoru. Průřez na obrázku 4.4 je veden v přibližném středu pracovní části induktoru v místech, kde budou později umístěny trubice. Z výsledného rozložení magnetického pole je zřejmé, že pole je nejslabší v geometrickém středu pracovní oblasti. Největší magnetická indukce je potom vždy mezi dvojicí spodního a horního vodiče. Ze simulace také vyplývá, že vodiče čtvercového průřezu poměrně dobře směřují magnetické pole kolmo do vsázky tak, jak bylo předpokládáno v předchozích kapitolách. Zásadním problémem je ovšem maximální velikost magnetické indukce, která dle obrázku dosahuje přibližně 0,16 T. To je ovšem velikost velmi zavádějící, jednak je zřejmé, že v místech, kde budou umístěny trubice, je hodnota magnetické indukce o řád nižší, jednak jsou tato maxima v místech ostrých hran trubice, které jsou ve skutečnosti mírně zkoseny. Lepším způsobem se ukázalo odečítání hodnoty magnetické indukce z podélných průřezů induktoru, v tomto případě vychází maximální indukce 0,09 T. I takto získané hodnoty magnetických indukcí jsou spíše orientační. Vlastní indukčnost tohoto induktoru potom vychází

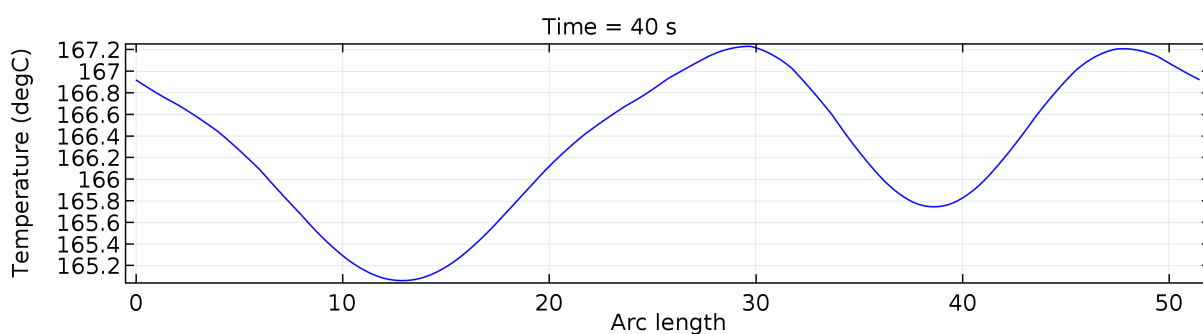


Obrázek 4.4: Rozložení magnetické indukce induktoru bez koncentrátoru (varianta 1).

0,156 μH . Dalším problémem je, že pole není soustředěno v pracovní oblasti induktoru, kde budou umístěny pájené trubice, ale jeho značná část se nachází v jeho vnější části. Při simulaci induktoru se vsázkou byla za dobu 40 s dosažena maximální teplota pouze 167 $^{\circ}\text{C}$, což je z hlediska našich požadavků, tedy dosažení teploty alespoň 710 $^{\circ}\text{C}$ za méně než 1 minutu, nedostatečné. Při simulaci se ukázala jako problém i diametrálně rozdílná teplota obou kroužků pájky. Obrázek 4.5 představuje rozložení teploty po obvodu velkého a malého kroužku pájky, podélná osa představuje délku hrany kroužku. Ačkoliv rozdíl jednotlivých maximálních a minimálních teplot obou kroužků vyhovuje požadovanému maximálního rozdílu 10 $^{\circ}\text{C}$, a tento rozdíl činí dokonce pouze 2 $^{\circ}\text{C}$, kroužky se hřejí velmi odlišnou rychlostí a jejich teploty se vzájemně liší asi o 70 $^{\circ}\text{C}$, což je nepříjemné.



(a) Malý kroužek.

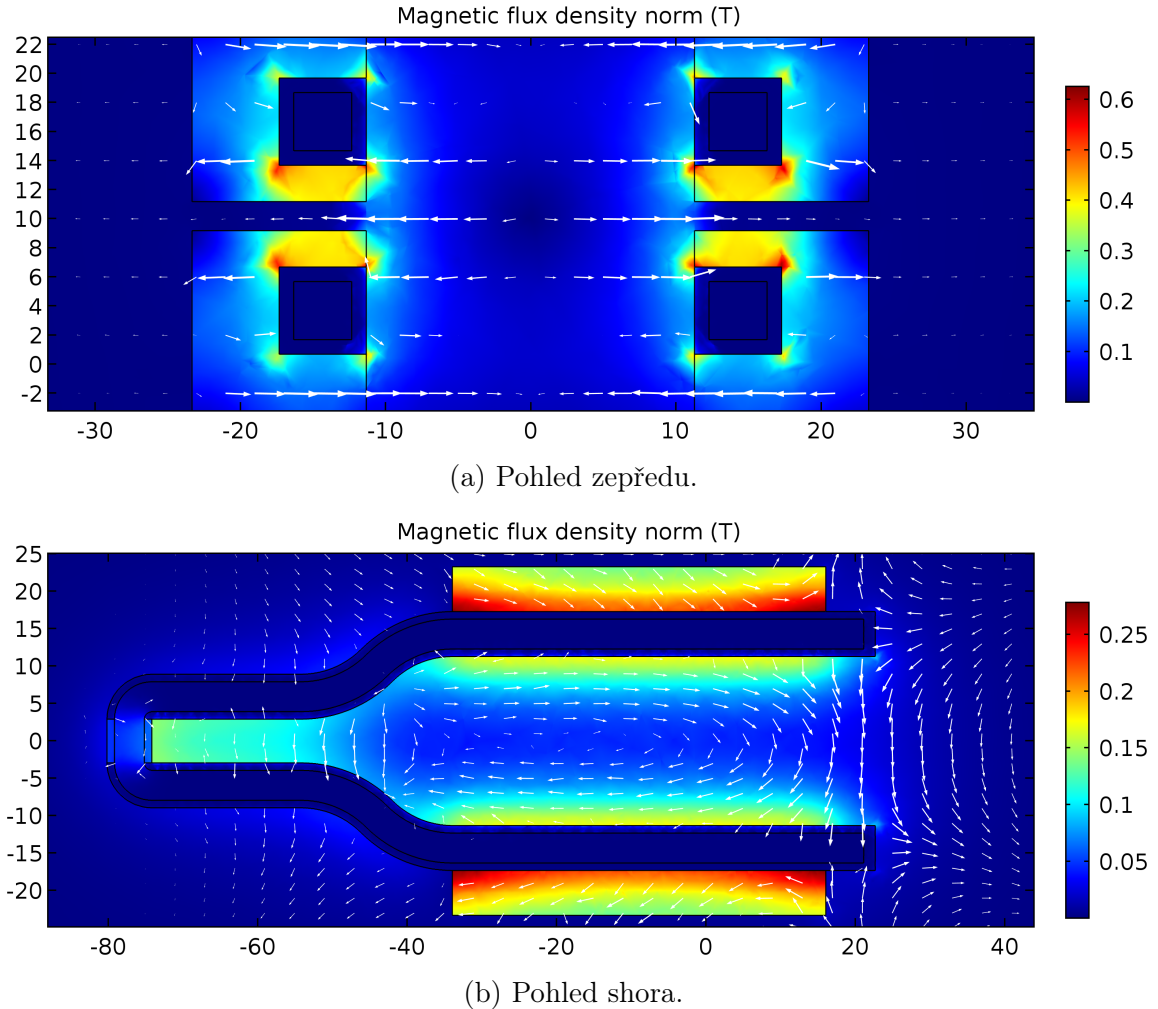


(b) Velký kroužek.

Obrázek 4.5: Teploty po obvodu kroužků pájky (varianta 1).

V dalším kroku byl induktor doplněn o koncentrátor. Již z prvních simulací je zřejmé, že feromagnetický materiál pomohl velikost magnetické indukce zvětšit na 0,25 T, což je téměř trojnásobek původní hodnoty. Vlastní indukčnost vychází dvojnásobná, tedy přibližně 1,06 μH . Dalším zlepšením je, že se podařilo magnetické pole více koncentrovat v pracovní oblasti a koncentrátoři tak fungují jako jistý ekvivalent zrcadel. V pohledu shora (4.6) je vidět, že magnetické pole má tendenci v této oblasti induktoru cirkulovat. Při simulaci se vsázkou je nyní po 40 s dosahováno maximální teploty 854 $^{\circ}\text{C}$, se zvýšením teploty značně narostly i teplotní rozdíly obou kroužků pájky, kdy se teplota menšího a většího kroužku liší téměř o 460 $^{\circ}\text{C}$. Znatelně horší je i rozložení teplot podél hrany velkého kroužku, kde se teploty pohybují v těsné blízkosti maximálního rozdílu

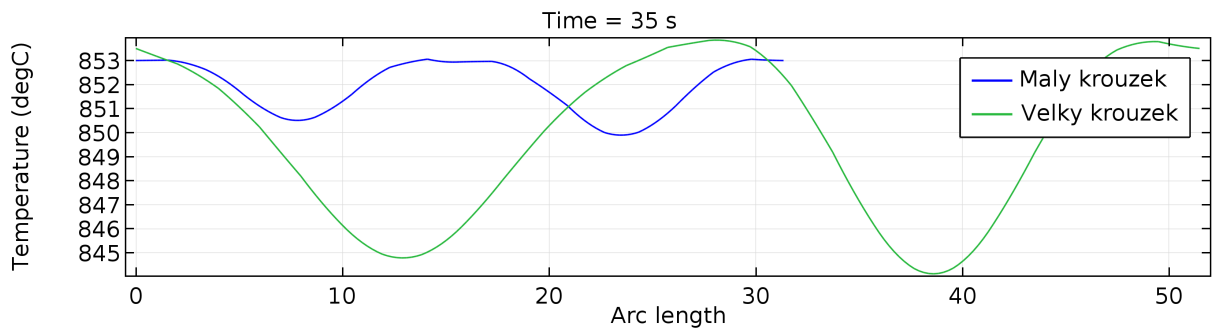
10 °C. U malého kroužku je teplota po obvodu téměř uniformní a rozdíl nejteplejšího a nejstudenějšího místa činí přibližně 1 °C, je to dáno pravděpodobně tím, že je trubice s kroužkem od induktoru poměrně vzdálená a magnetické pole je v tomto místě víceméně homogenní.



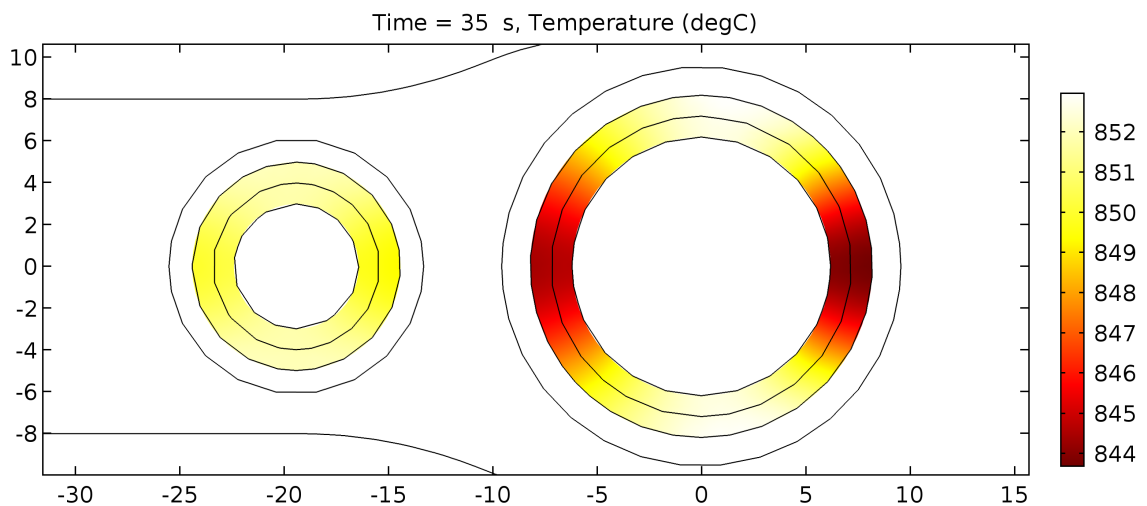
Obrázek 4.6: Rozložení magnetické indukce induktoru s koncentrátorem (varianta 1).

Použití koncentrátoru pomohlo k dosažení požadovaných teplot v kratším časovém intervalu, problémem však nadále zůstává velký teplotní rozdíl mezi oběma kroužky pájky. Jako nejsnazší způsob zlepšení se jeví zmenšit vzdálenost mezi vodiči v těch místech, kam je v automatizovaném procesu zasunována malá trubice. Prvním nápadem bylo přiblížit vodiče induktoru k trubici tak, aby byla jejich vzájemná vzdálenost stejná, jako je tomu u trubice velké. Tento předpoklad přímé úměrnosti se ale ukázal jako mylný a malá trubice se hřála mnohem rychleji. Při opakovaných pokusech o srovnání teplot obou kroužků pájky se ukázalo, že teplota je na změnu vzdálenosti velmi citlivá a změny v řádech desetin milimetrů způsobují výkyvy teplot o desítky °C. To v praxi činí velké problémy, ne vždy se automatizované lince podaří trubice zasunout tak, jak by bylo vhodné, výsledný spoj potom není dobře zapájen a nevyhovuje mechanickým zkouškám. Z výsledků simulace též vyplývá, že menší trubice se ze začátku hřeje rychleji, ale postupně se teploty

srovnávají. Je to pravděpodobně dáno tím, že se teplo ve objemu větší trubice šíří pomaleji. Po 40 s se maximální teplota blíží 940 °C, což je hodnota větší než doporučená maximální pro měděné trubice. Z grafu 4.7 je ovšem zřejmé, že po 35 s se křivky teplot obou kroužků pájky podařilo překrýt. Rozsah teplot odpovídá požadovaným teplotám pro použitou pájku a není překročena maximální dovolená teplota trubic. Problémem však zůstává rozdíl teplot po obvodu velkého kroužku pájky, který se blíží k hranici 10 °C. Z grafu 4.8, který je horizontálním řezem trubicemi v místě kroužků pájky, je patrné, že nejvyšší teploty jsou v osách příčných, tedy v místech nejbližších vodičům induktoru, naopak nejchladnější jsou místa v oblasti podélné osy. Nejchladnějším místem je potom přední část velkého kroužku pájky (na obrázku vpravo). Test tohoto induktoru v praxi ukázal, že chladná místa v podélných osách jsou velmi problémová a pájka v těchto místech dostatečně nevzlíná do mezery mezi trubicemi, výsledkem jsou špatně zapájené spoje.

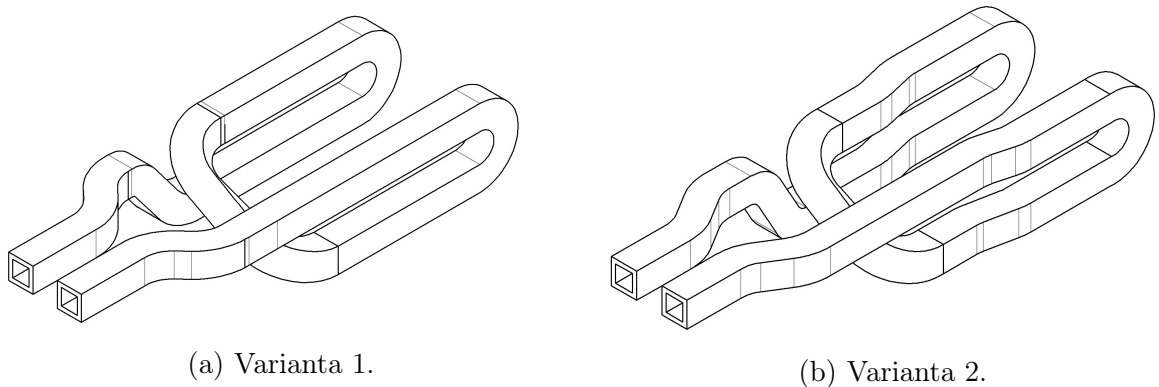


Obrázek 4.7: Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2).



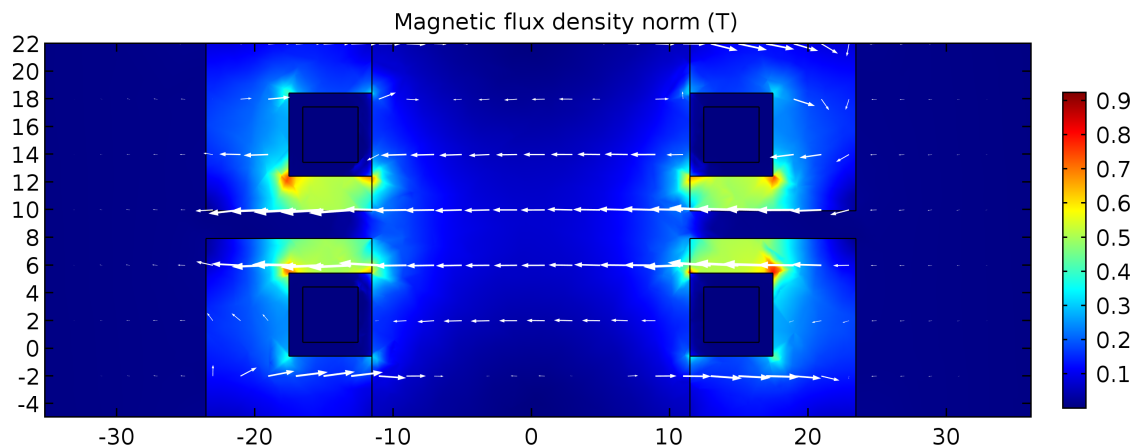
Obrázek 4.8: Teploty kroužků pájky v horizontálním řezu.

4.2 Druhý prototyp

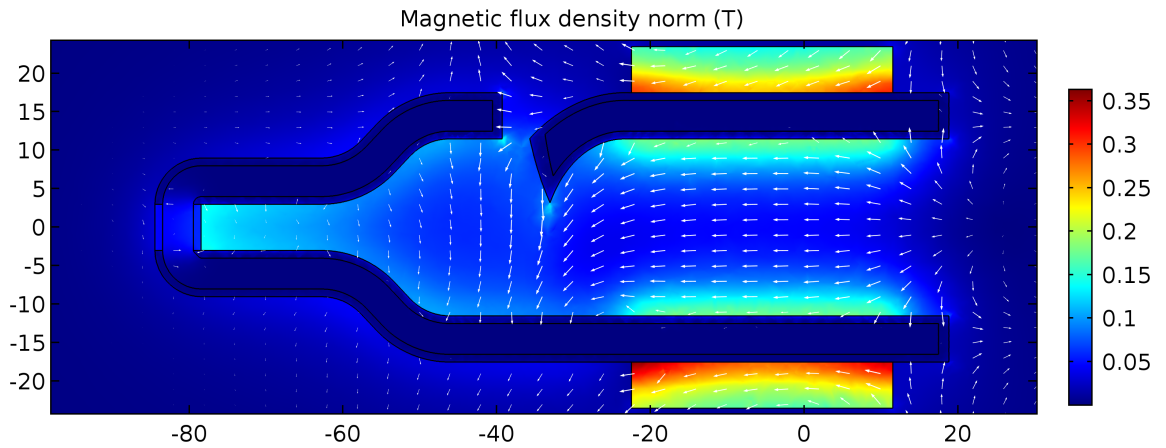


Obrázek 4.9: Testované tvary druhého prototypu.

Tvar druhého prototypu vycházel z analýzy magnetického pole prototypu prvního. Snaha byla především eliminovat slepé místo v geometrickém středu pracovní oblasti. Výsledkem analýzy pole byl požadavek na to, aby proudy v horních a spodních vodičích induktoru protékaly stejným směrem, z tohoto požadavku vznikl induktor na obrázku 4.9 (a). Nejprve byla jako v předchozím případě provedena simulace bez vsázky pro ověření předpokládaného tvaru magnetického pole. Z obrázku 4.10 je zřejmé, že zatímco se v předchozím případě magnetická pole z levých a pravých vodičů ve středu pracovní oblasti odečítala a vytvářela zmiňované slepé místo, v tomto případě se tato pole sčítají a v závislosti na směru proudu napájecího zdroje směřují vektory magnetické indukce výsledného pole buď doleva nebo doprava. Při pohledu shora (4.11) se ukazuje, že magnetické pole v pracovní oblasti induktoru již necirkuluje a jeho vektory jsou natočeny v závislosti na směru proudu jedním směrem. Koncentrátor opět zajišťuje to, že je magnetické pole zhuštěno v pracovní oblasti. Problémem je vodič spojující spodní a horní podélné vodiče (na obrázku vlevo), který natočení vektorů deformuje. Maximální hodnota magnetické indukce

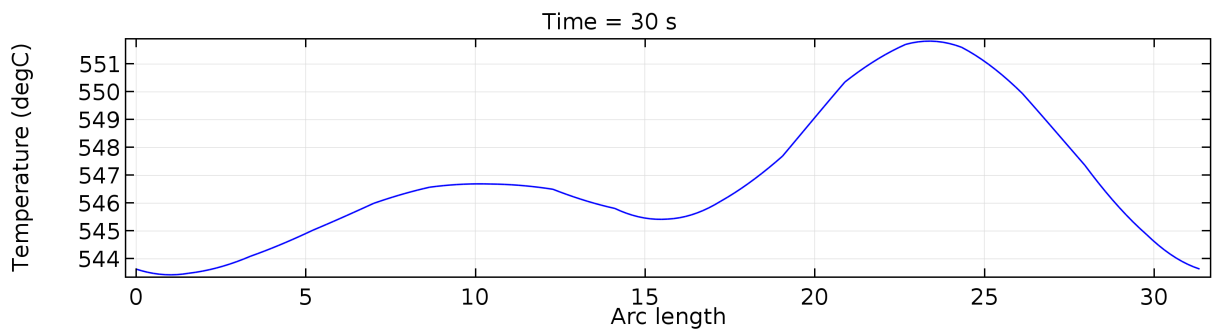


Obrázek 4.10: Rozložení magnetické indukce induktoru (varianta 1).

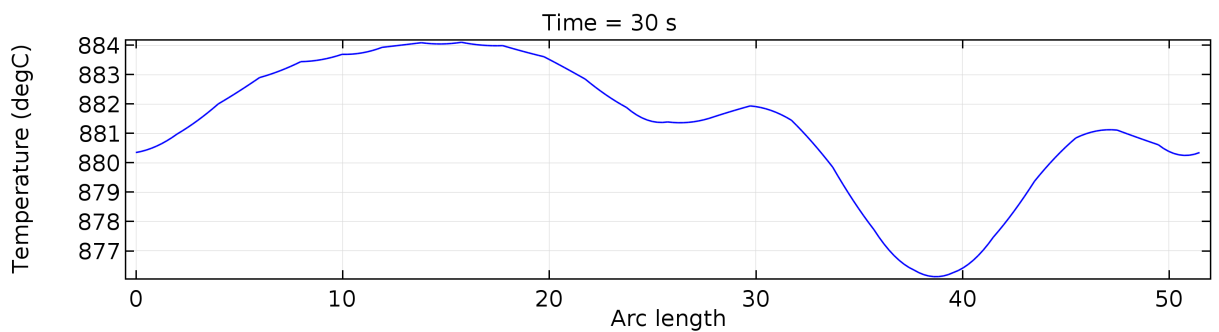


Obrázek 4.11: Rozložení magnetické indukce induktoru, pohled shora (varianta 1).

se zvýšila vzhledem k předchozí variantě o jednu desetinu na 0,35 T. Vlastní indukčnost se od prvního prototypu téměř nezměnila a činí 0,15 μH . Zásadně se však změnila rychlost ohřevu, kdy je po 40 s dosaženo teploty přes 1000 $^{\circ}\text{C}$, to je o více než 150 $^{\circ}\text{C}$ vyšší teplota než u prvního prototypu v první variantě. Jako v minulém případě je v první variantě rozdíl teplot mezi jednotlivými kroužky vysoký, konkrétně 325 $^{\circ}\text{C}$. Změna rozložení magnetického pole způsobila i změnu rozložení teplot po obvodu kroužků pájky. Ani jeden z intervalů teplot kroužků pájky nepřekračuje rozdíl maximální a minimální teploty 10 $^{\circ}\text{C}$ a teploty v ose podélné jsou větší než v osách příčných, tedy tam kde jsou trubice nejbližší



(a) Malý kroužek.

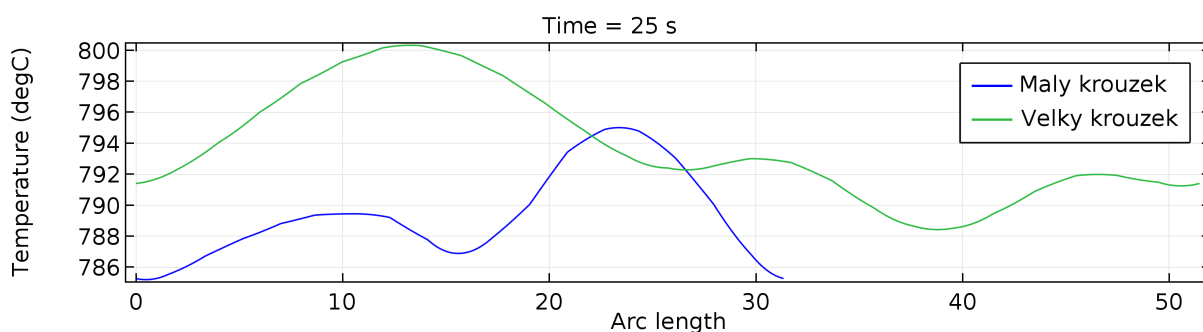


(b) Velký kroužek.

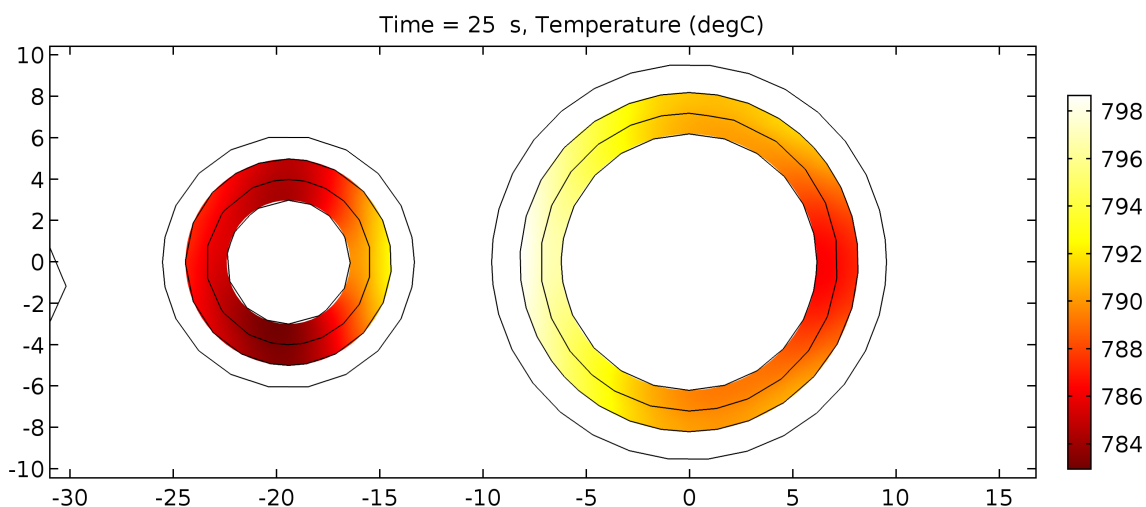
Obrázek 4.12: Teploty po obvodu kroužků pájky (varianta 1).

vodičům induktoru. Je tomu přesně naopak než v předchozím případě. V příčných osách jsou rozdíly teplot velkého kroužku v jednotkách desetin $^{\circ}\text{C}$ a 1°C u kroužku malého, což může být způsobeno zmiňovaným zakřivením magnetického pole.

Po přiblížení vodičů k malé trubici tak, aby se obě trubice hřály přibližně stejnou rychlostí, je dostačující teplota pro tavení pájky dosažena po 25 s, po 30 s už je přesahována teplota 900°C . Oproti prvnímu prototypu ve druhé variantě se však zhoršil rozdíl maximální a minimální teploty, který nyní dosahuje 14°C . Z obrázku 4.14 je zřejmé, že nejvyšší teploty jsou opravdu v podélné ose mezi trubicemi. To se při praktickém testu tohoto induktoru ukázalo být problémem. Trubice a kroužky pájky se v těchto místech hřály velmi rychle a při následné kontrole zapájení bylo zjištěno, že měděné trubice byly vlivem tepla dokonce narušeny a jejich stěny zeslabeny. Tomuto jevu by se dalo pravděpodobně částečně, nikoliv však zcela, zabránit úpravou místa, kde se vodiče induktoru odklánějí od malé trubice. Nejchladnějším bodem velkého kroužku je potom stejně jako u prvního prototypu jeho přední část. Obecně lze konstatovat, že tento prototyp je oproti předchozímu účinnější a dokáže vsázku ohřát rychleji, srovnatelných teplot dosahuje přibližně o 8 s dříve.

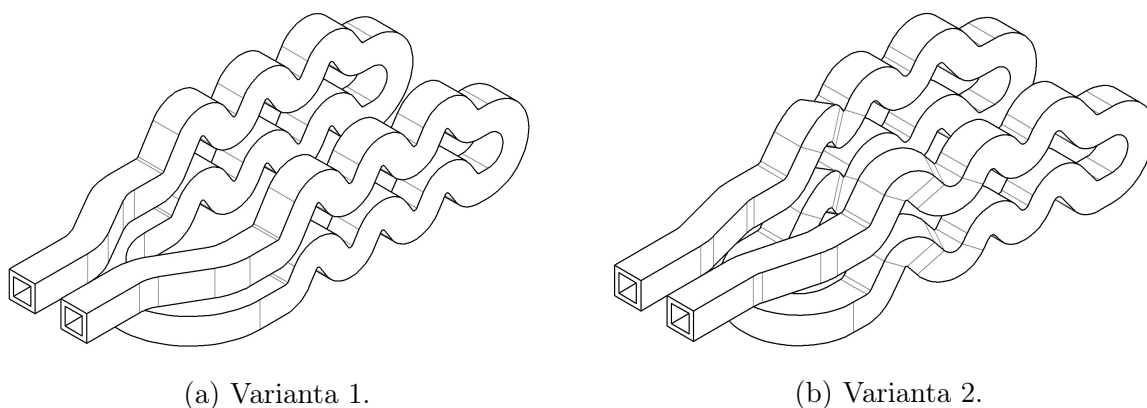


Obrázek 4.13: Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2).



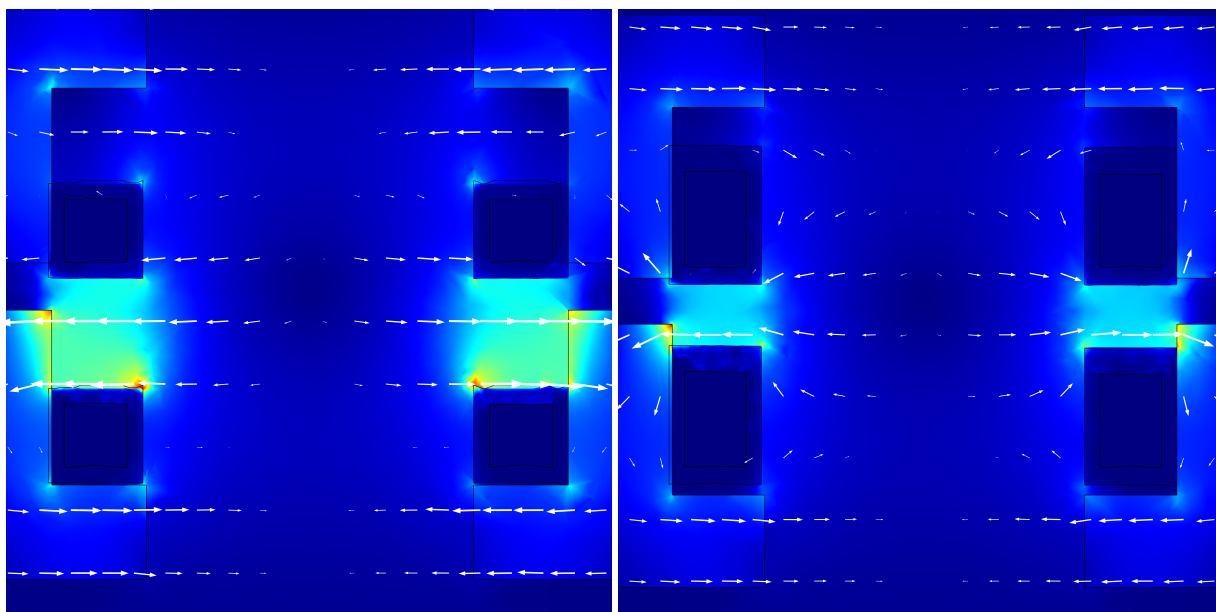
Obrázek 4.14: Teploty kroužků pájky v horizontálním řezu.

4.3 Třetí prototyp



Obrázek 4.15: Testované tvary třetího prototypu.

Tvar třetího prototypu induktoru vycházel ze snahy vylepšit rozložení magnetického pole tak, aby se dané kroužky ohřívaly po celém obvodu co nejrovnoměrněji. Přímé vodiče v pracovní oblasti byly upraveny tak, aby vytvořily určité „vlny“. Předpoklad byl potom takový, že magnetické pole bude těmito vlnami více rozmítáno do prostoru. Grafy 4.16 ukazují rozložení magnetického pole v příčném průřezu a to rovinách procházejících nejnižší a střední částí jedné vlny. Rozložení magnetického pole v nejvyšší části vlny je téměř totožné jako v části spodní a není proto pro přehlednost uváděno. Pole se v zásadě podobá magnetickému poli prvního prototypu, z něhož i konstrukčně vychází. Vektory sice nejsou zcela kolmé na vodiče a jisté rozmítání je především v průřezu střední části patrné. V geometrickém středu se však opět nachází slepé místo a nelze tak očekávat zásadní

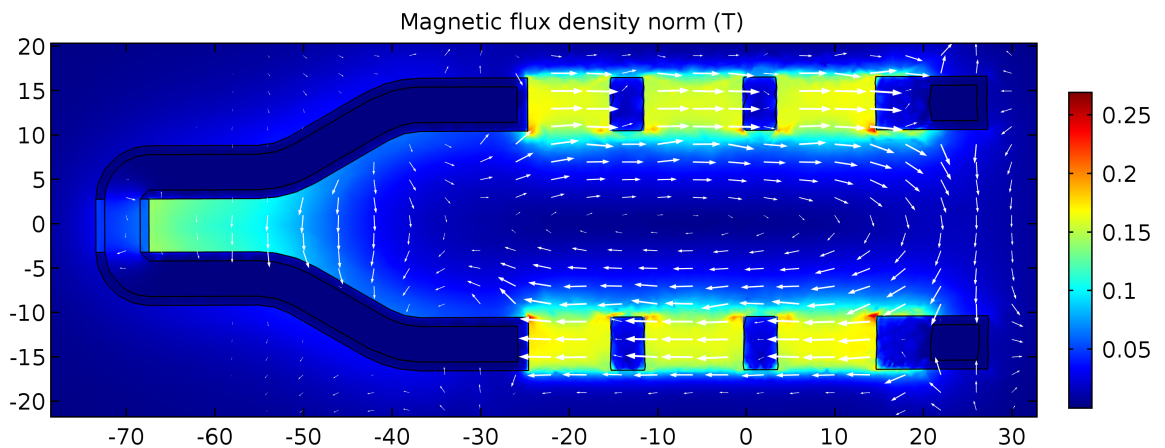


(a) Spodní část.

(b) Střední část.

Obrázek 4.16: Rozložení magnetické indukce induktoru.

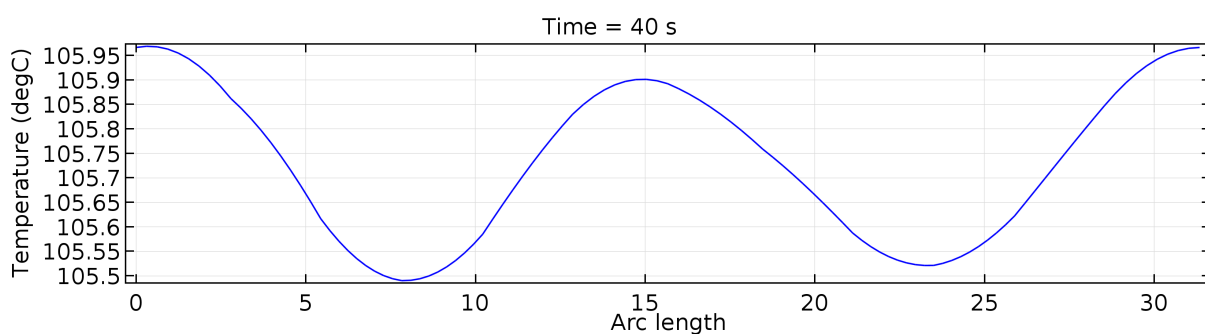
zlepšení rozložení teplotního pole oproti prvnímu prototypu. Při pohledu shora (4.17) magnetické pole opět cirkuluje, i zde je patrné nepatrné rozmítání, především v blízkosti vodičů. Zdali většímu rozmítání vektorů magnetické indukce nebrání tvar koncentrátoru, který jednotlivé vlny tvarově nijak nekopíruje, bylo ověřeno simulací samotného induktoru bez koncentrátoru. Výsledné směry vektorů magnetické indukce v pracovní oblasti se však ukázaly být víceméně totožné a tvar koncentrátoru tedy nemá na rozmítání vliv. Výsledný tvar magnetického pole na první pohled nepřináší žádné zásadní zlepšení oproti magnetickému poli prvního prototypu. Dosahované hodnoty magnetické indukce jsou i s použitím koncentrátoru téměř totožné a dosahují maximálně 0,25 T. Z obrázku 4.17 je však zřejmé, že tato hodnota je dosahována pouze v několika málo bodech a lze se domnívat, že magnetická indukce je dokonce o něco menší než u prototypu prvního. Vlastní indukčnost vychází přibližně 0,08 μH . To je hodnota téměř poloviční než u předchozích dvou prototypů. Po připojení tohoto induktoru k napájecímu zdroji lze bez změny kapacitorové baterie předpokládat posun rezonanční frekvence směrem k vyšším hodnotám.



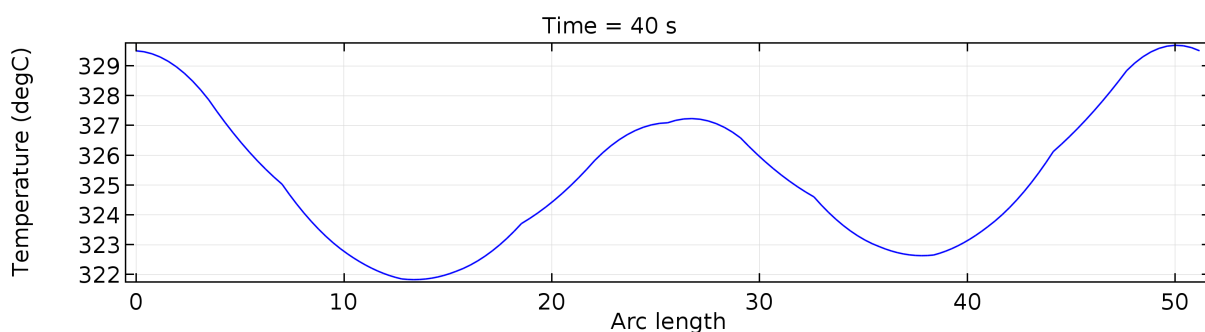
Obrázek 4.17: Rozložení magnetické indukce induktoru, pohled shora (varianta 1).

Simulace induktoru v první variantě potvrdila závěry analýzy magnetického pole a rozložení teplot po obvodu kroužků pájky se nijak nezlepšilo. Z grafů 4.18 je očividné, že ačkoliv rozdíl maximální a minimální teploty vychází pro menší kroužek velmi malý, tedy jednotky desetin $^{\circ}\text{C}$, u velkého kroužku tomu tak už není, a rozdíl teplot činí 7 $^{\circ}\text{C}$. Po přiblížení vodičů malému kroužku se teploty obou kroužků sice po 1 minutě podařilo vyrovnat, maximální teplota ovšem dosahuje pouhých 590 $^{\circ}\text{C}$ a není tedy dosažena teplota potřebná pro tavení pájky. S rostoucím časem se navíc větší trubice ohřívá mnohem rychleji než trubice malá a teploty obou kroužků nerostou stejnoměrně. Rozdíl maximální a minimální teploty v grafu 4.19 sice není tak velký jako u předchozích prototypů a činí pouze přibližně 5 $^{\circ}\text{C}$, ze simulace v delším časovém úseku je však zřejmé, že tento rozdíl se nadále navyšuje a lze předpokládat, že po dosažení požadované teploty by se blížil 10 $^{\circ}\text{C}$ a byl tak s předchozími prototypy srovnatelný. I z dalších grafů, které zde nejsou uváděny, je zřejmé, že rozložení teploty je téměř totožné jako v případě prvního prototypu a nedo-

šlo k žádnému zlepšení. Problémem je i složitost tvaru induktoru, který by bylo nejspíše obtížné vyrobit s námi požadovanou přesností. Možným zlepšením tohoto tvaru by bylo pokusit se pole rozmítat i ve směru horizontálním, pravděpodobný výsledný tvar by ale byl ještě složitější. Většího rozmítání by se dalo dosáhnout s vodiči menšího průřezu, kde by bylo možno vytvořit větší počet vln. U takového vodiče by však musela být snížena velikost zadávaného proudu a ohřev by se ještě více zpomalil. Problémem zůstává nízká hodnota vlastní indukčnosti.

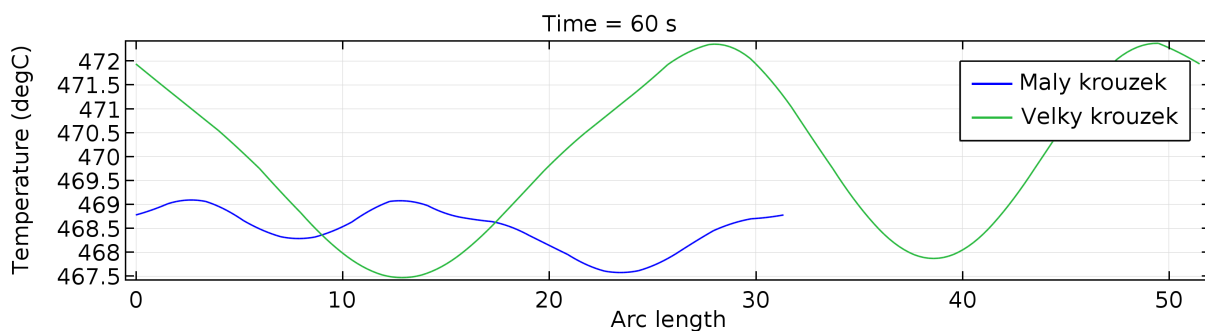


(a) Malý kroužek.



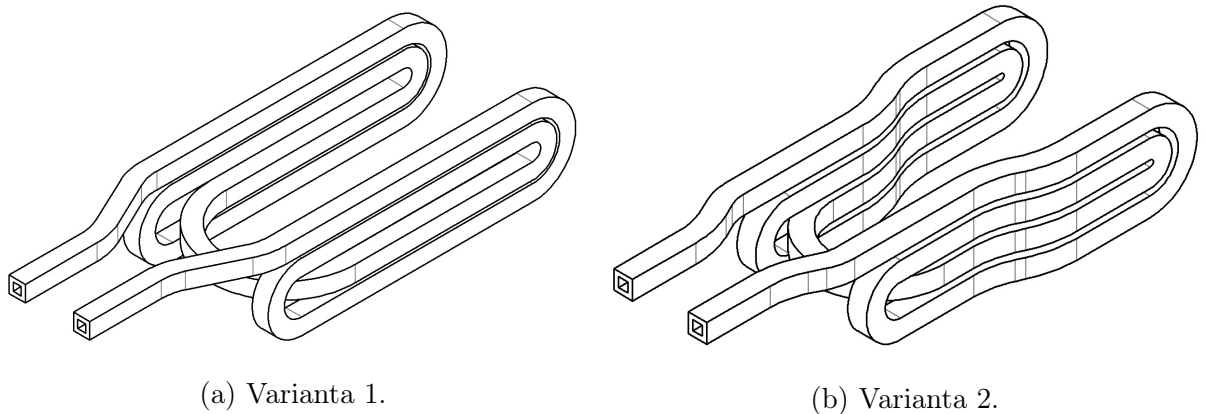
(b) Velký kroužek.

Obrázek 4.18: Teploty po obvodu kroužků pájky (varianta 1).



Obrázek 4.19: Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2).

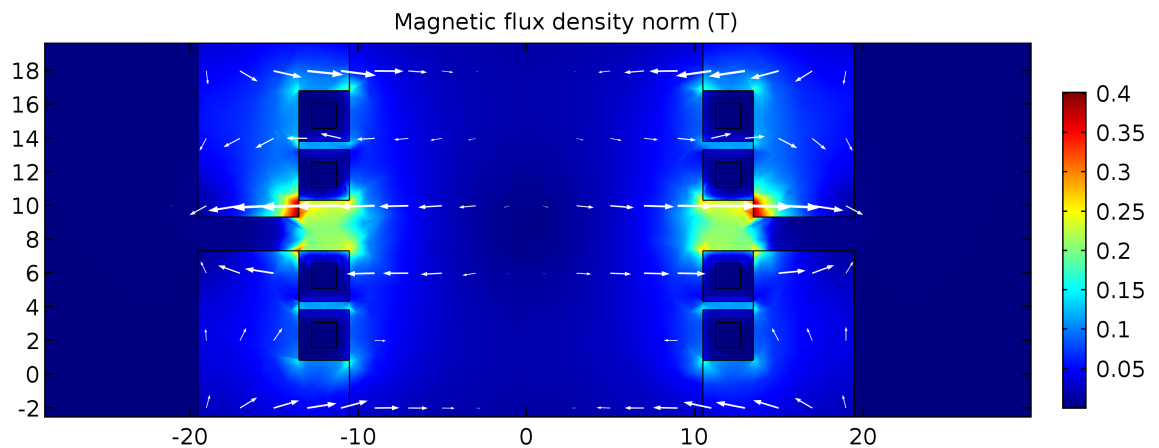
4.4 Čtvrtý prototyp



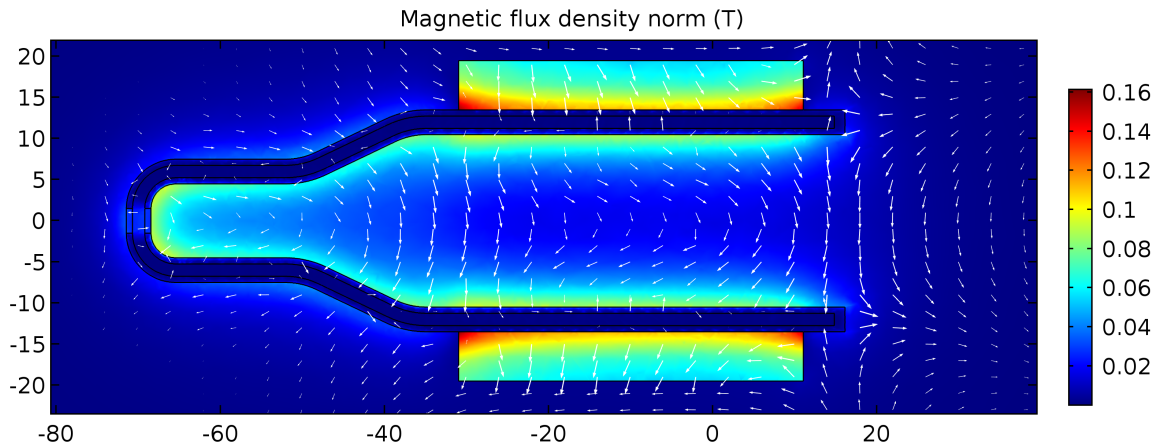
Obrázek 4.20: Testované tvary čtvrtého prototypu.

Tento prototyp se snaží přiblížit tvar induktoru obvyklejším tvarům cívek s více závitů a zlepšit tak tvar magnetického pole a navýšit vlastní indukčnost. Jelikož byly průřezy vodičů používané v předchozích prototypích pro tento účel příliš velké, byly zvoleny trubice s průřezem čtvrtinovým, délka vnější hrany je nyní 3 mm. Menší průřez vodiče znamená i menší dovolenou velikost proudu z napájecího zdroje, pro simulaci byla zvolena hodnota 600 A, zadávaná frekvence zůstala stejná jako v předchozích případech, tedy 200 kHz. Ze simulace vyplývá, že tvar magnetického pole v podstatě odpovídá tvaru magnetického pole prvního prototypu, maximální hodnota magnetické indukce při pohledu shora dosahuje 0,16 T, což je přibližně o jednu desetinu méně než u prvního a druhého prototypu. Z grafů 4.21 a 4.22 však vyplývá, že pole je lépe rozprostřeno v prostoru a slepé místo uprostřed pracovní oblasti induktoru již není tak výrazné, to je dobře vidět při pohledu shora.

Při simulaci induktoru v první variantě se vsázkou je rozdíl minimální a maximální teploty malého kroužku pájky pouze 0,3 °C, to je však dáno jako v předchozích případech

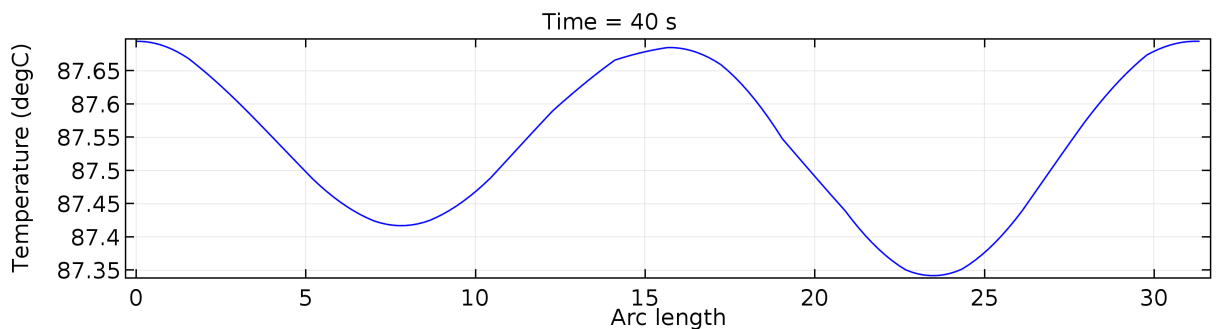


Obrázek 4.21: Rozložení magnetické indukce induktoru (varianta 1).

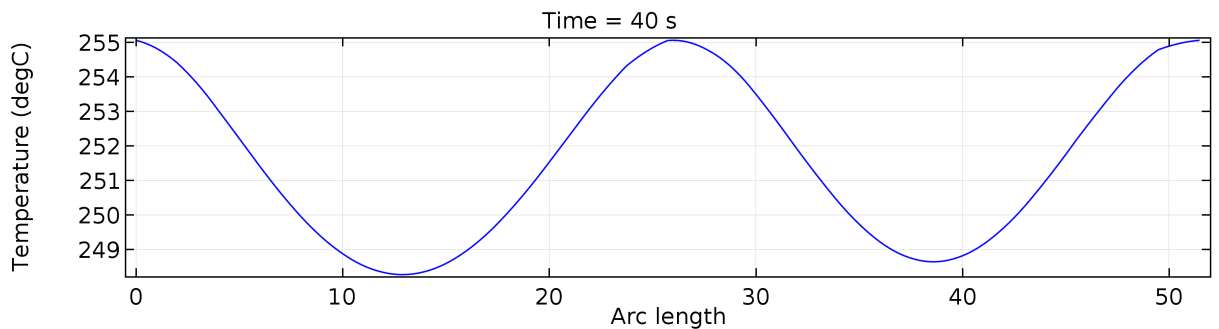


Obrázek 4.22: Rozložení magnetické indukce induktoru, pohled shora (varianta 1).

tím, že je trubice od induktoru velmi vzdálená a magnetické pole je v těchto místech více homogenní. U velkého kroužku pak tento rozdíl činí $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maximální teplota malého kroužku dosahuje po 40 s přibližně $87,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, maximální teplota kroužku velkého potom $255\text{ }^{\circ}\text{C}$. Je zřejmé, že teploty obou kroužků jsou po 40 s ve srovnání s předchozími prototypy velmi nízké (druhý prototyp dosahoval za stejný čas teplot téměř o $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ vyšších). Ze simulací bylo zjištěno, že po přiblížení vodičů induktoru k menší trubici (druhá varianta) se křivky teplot obou kroužků nerozcházejí tak rychle, jako u předchozích prototypů. Rozdíl teplot obou kroužků, jejichž křivky byly v čase 1 minuta překryty a dosahovaná maximální teplota byla $158\text{ }^{\circ}\text{C}$, se po 10 min rozcházejí přibližně o $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ při maximální



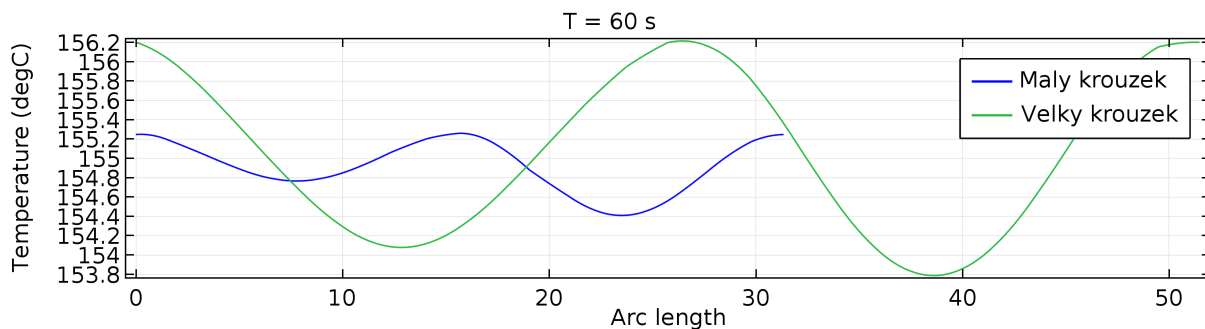
(a) Malý kroužek.



(b) Velký kroužek.

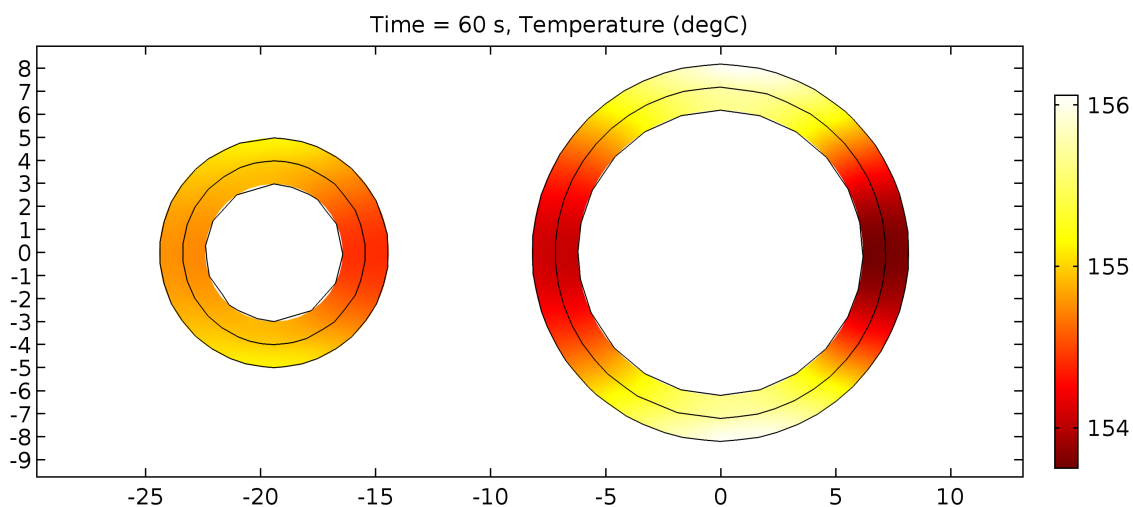
Obrázek 4.23: Teploty po obvodu kroužků pájky (varianta 1).

teplotě 545 °C. Tento jev nejspíše není způsoben lepším tvarem induktoru, ale spíše velmi pomalým ohřevem obou trubic s kroužky pájky, kdy mají teploty po obvodu více času na vyrovnání. Graf 4.25 opět ukazuje podobnost s prototypem prvním, změnou je nepatrně vyšší teplota malého kroužku v podélné ose, konkrétně v zadní části (na obrázku vlevo). To je způsobeno obloukovým spojovacím vodičem pravé a levé části induktoru, který se nachází v těsné blízkosti menší trubice. Vlastní indukčnost je potom 0,15 μH , tedy přibližně stejná jako u prvních dvou prototypů, předpoklad navýšení vlastní indukčnosti pomocí většího počtu závitů se u tohoto induktoru nepotvrdil.



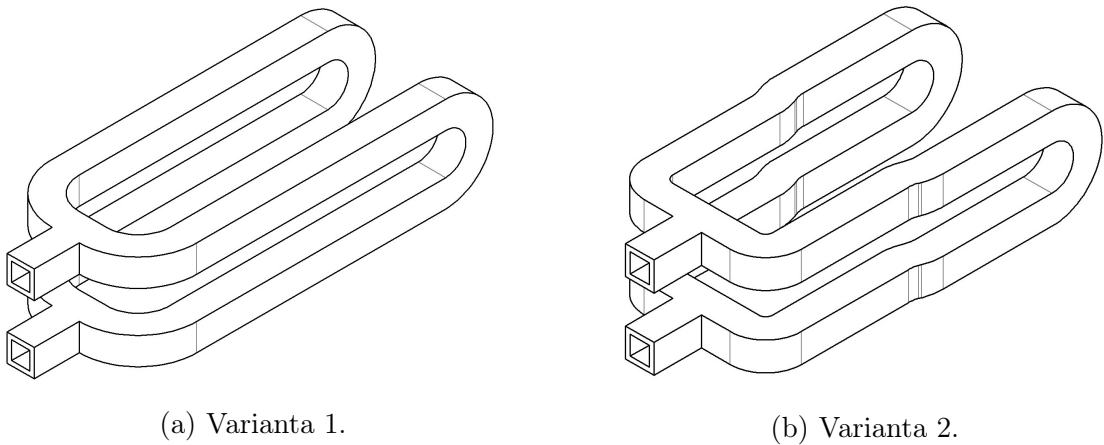
Obrázek 4.24: Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2).

Přestože se podařilo částečně vylepšit rozložení magnetického pole, ohřev je neúměrně pomalý a po jedné minutě je dosaženo teploty čtvrtinové, než je teplota potřebná pro roztavení kroužků pájky. Možným řešením by bylo navýšit velikost proudu protékajícího induktorem, další možností je navýšit frekvenci, to by však, při vlastní indukčnosti srovnatelné s prvním prototypem, znamenalo měnit velikost kapacitorové baterie tak, aby bylo dosaženo vyšší rezonanční frekvence.



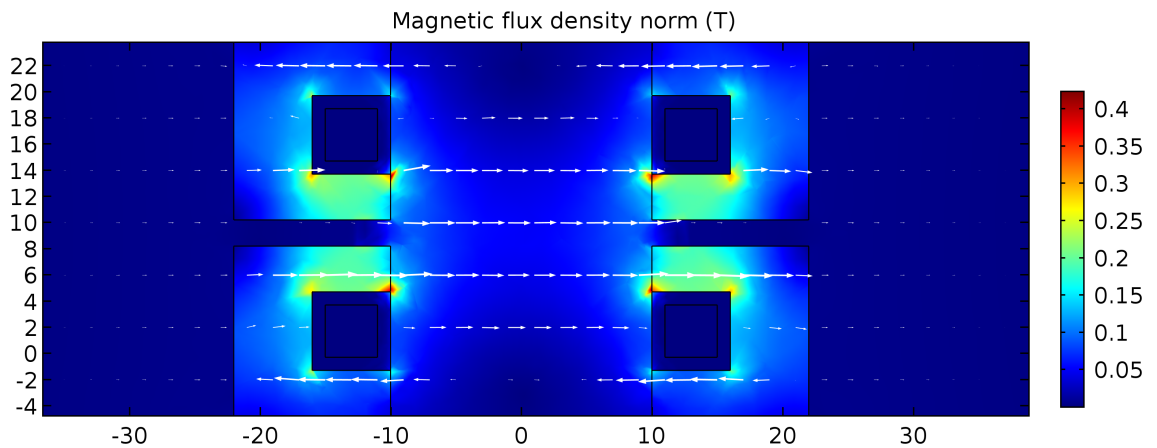
Obrázek 4.25: Teploty kroužků pájky v horizontálním řezu.

4.5 Pátý prototyp

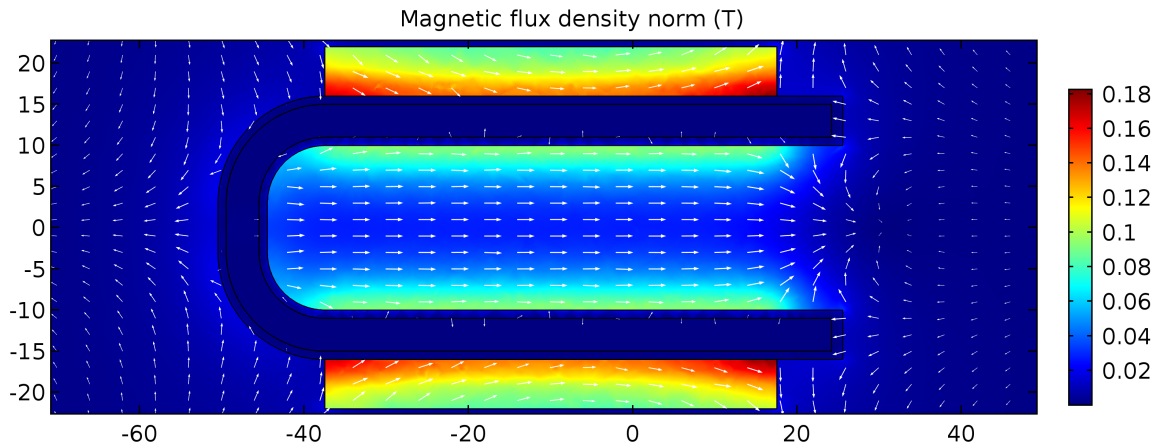


Obrázek 4.26: Testované tvary pátého prototypu.

Tvar pátého prototypu se inspiroje směrem toku proudů prototypu druhého, požadavek byl potom takový, aby byl eliminován vodič spojující spodní a horní vodorovné vodiče, který magnetické pole zakřivoval nežádoucím způsobem. Výsledkem jsou induktory na obrázku 4.26. Rozložení magnetického pole vypadá téměř identicky jako v případě druhého prototypu (4.27). Vektory magnetické indukce sice mají opačný směr, to je však dáno opačným směrem toku proudu. Maximální hodnota magnetické indukce je oproti druhému prototypu poloviční a v pohledu shora (4.28) činí 0,18 T. V tomto pohledu je vidět i to, že vektory pole v pracovní oblasti induktoru mají stejný směr a nezakřivují se vlivem příčného spojení, jak tomu bylo u druhého prototypu. Kromě maximální velikosti magnetické indukce nastává problém i ve velikosti vlastní indukčnosti, ta je dokonce o řád nižší než v předchozích případech a činí přibližně 0,03 μH . To by však při stejné velikosti kapacitorové baterie podle Thomsonova vztahu znamenalo nárůst frekvence až na 1 MHz. Při praktických testech se ale ukázalo, že takto vysoké hodnoty frekvencí už nejsou pro



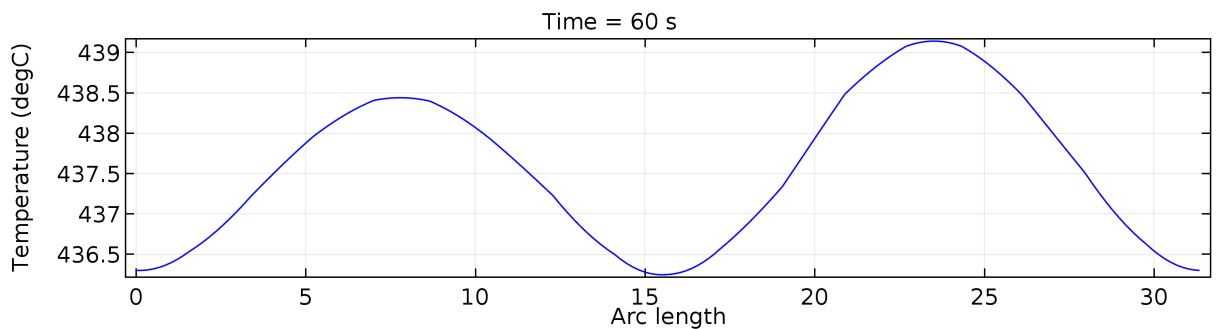
Obrázek 4.27: Rozložení magnetické indukce induktoru (varianta 1).



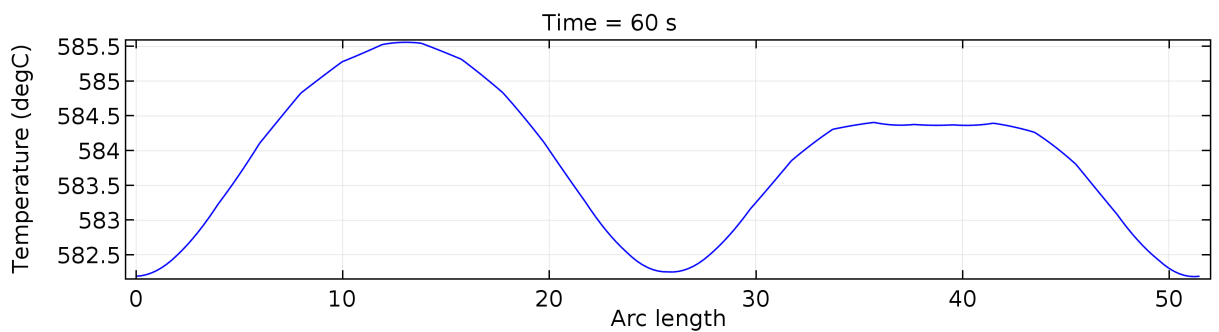
Obrázek 4.28: Rozložení magnetické indukce induktoru, pohled shora (varianta 1).

indukční ohřev vsázek s podobnou tloušťkou stěn vhodné, navíc se pravděpodobně dostáváme za operační rozsah frekvencí napájecího zdroje. Řešením tohoto problému může být změna kapacitorové baterie nebo úprava přírodních vodičů induktoru tak, aby vlastní indukčnost vzrostla a lépe odpovídala velikosti indukčností prvního a druhého prototypu.

Po jedné minutě se teploty na malém kroužku pohybují v rozmezí přibližně 436 až 439 °C, což je rozdíl necelé 3 °C, tento rozdíl je srovnatelný s ostatními prototypy v prvních variantách. Rozdíl teplot velkého kroužku pájky je pak téměř shodný a činí též 3 °C, to se zatím u žádného z předchozích induktorů nepodařilo. Je však opět nutno brát v po-

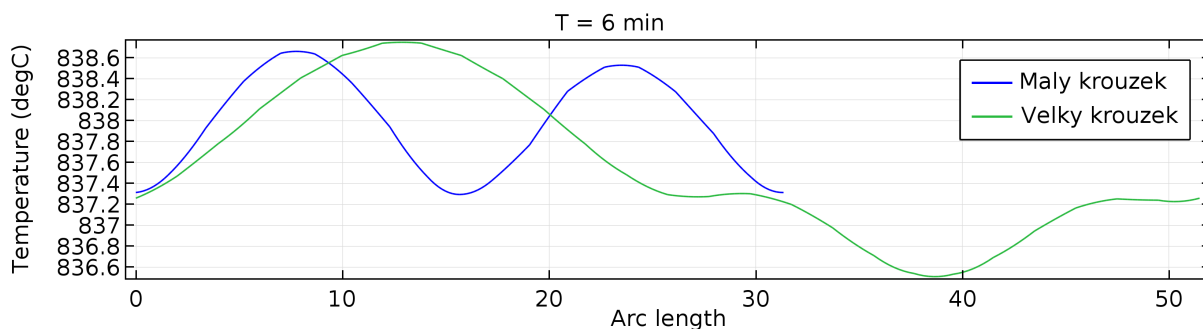


(a) Malý kroužek.



(b) Velký kroužek.

Obrázek 4.29: Teploty po obvodu kroužků pájky (varianta 1).

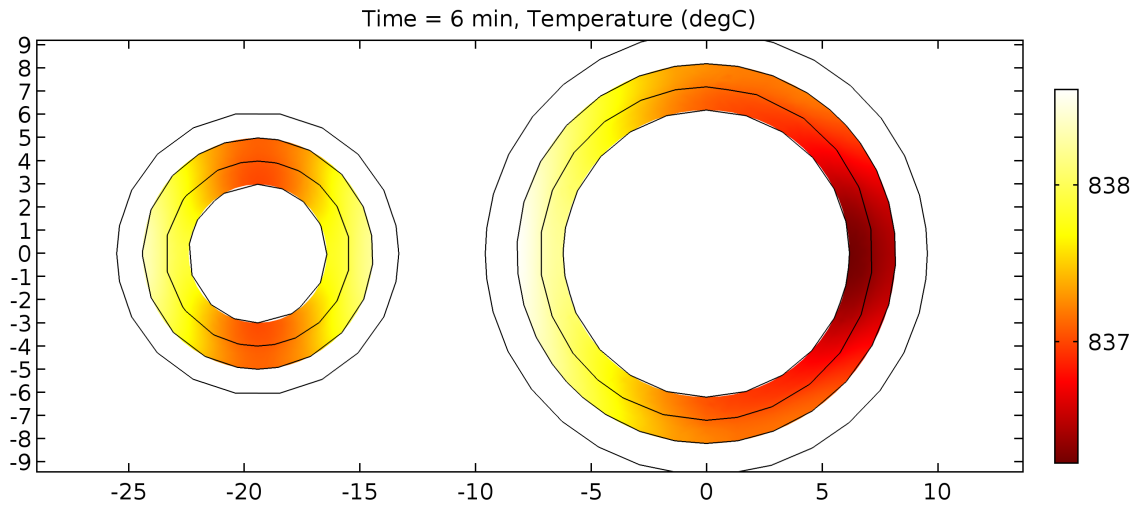


Obrázek 4.30: Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2).

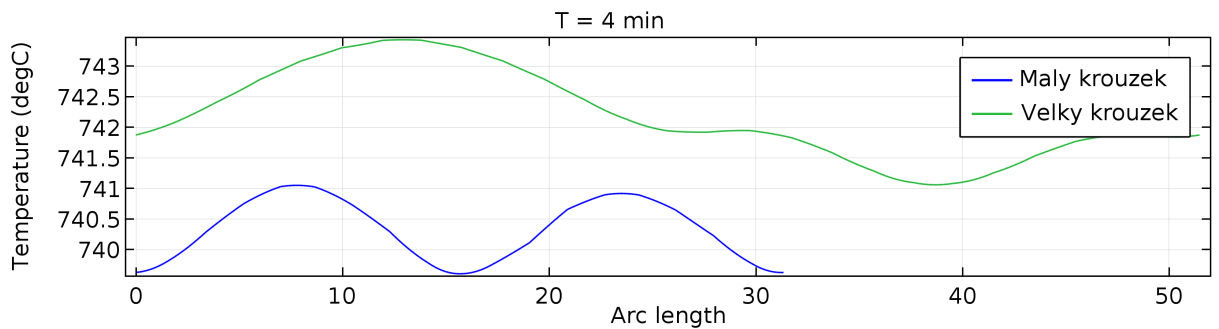
taz poměrně dlouhý čas ohřevu. Maximální teplota velkého kroužku je potom 585,5 °C, ohřev je tedy jako v předchozím případě pomalejší než u prvních dvou prototypů. I po přiblížení vodičů induktoru k malé trubici zůstává zásadním problémem čas, za který kroužky pájky dosahují svých tavicích teplot. Minimální potřebná teplota tavení, tedy 710 °C, je dosahována po 5 minutách. Pro dobře zapájený spoj je však nutná teplota alespoň 800 °C, která je dosahována až po 6 minutách. Rozdíl teplot obou kroužků se v tomto čase pohybuje mezi 2 a 3 °C a křivky teplot po obvodu kroužků se překrývají. Avizovaný předpoklad, že jsou tyto na první pohled příznivé vlastnosti způsobeny z velké části pomalým ohřevem, se u tohoto prototypu potvrzuje jen do jisté míry. Při pokusné simulaci byl pro zrychlení ohřevu použit proud 3200 A, rozdíly maximální a minimální teploty jsou potom přibližně 9 °C. Po úpravě vzdálenosti vodičů induktoru od vsázky se však dostáváme na 6 °C, což je velmi dobrý výsledek.

Z grafu 4.31 lze vyčíst, že rozložení teplot velkého a malého kroužku pájky je velmi podobné rozložení teplot druhého prototypu s tím, že jsou rozdíly maximálních a minimálních teploty mnohem menší. V případě malého kroužku se zlepšilo i ohřívání jeho zadní strany v podélné ose, které bylo předtím ovlivňováno již zmiňovaným spojením spodních a horních podélných vodičů. Po úpravě induktoru do druhé varianty se zásadně zmenšila maximální hodnota magnetické indukce, a to na 0,09 T, což je hodnota poloviční než v první variantě. Je to dáno tím, že první varianta induktoru byla delší a širší, což se ukázalo být jako zbytečné. Velká vzdálenost vodičů od induktoru sice homogenizuje pole v pracovní oblasti, snižuje se ale radikálně i schopnost účinně předávat vsázce energii.

Ve snaze navýšit účinnost a zrychlit tím ohřev byly vodiče induktoru ještě více přiblíženy oběma tubicím. Vzdálenost mezi vodiči induktoru v místě velké trubice je nyní 20 cm, oproti předchozím 20,4 cm. To se zdá jako zanedbatelný rozdíl, je však třeba brát v úvahu malé rozměry celé geometrie a již avizovanou velkou citlivost teploty na změnu rozměrů induktoru. Po této úpravě je minimální teplota potřebná pro tavení kroužků pájky dosažena po 4 minutách, tedy o minutu dříve než v předchozím případě, rozdíl teplot po obvodu obou kroužků se posunul jen minimálně a to na 4 °C. Otázkou je, zdali je možno induktor s takovou přesností vyrobit a umístit na automatickou linku, průměr nejširšího místa velké trubice totiž činí 19,12 cm. Požadavek na rychlost celého procesu,

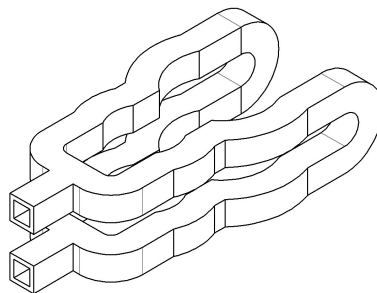


Obrázek 4.31: Teploty kroužků pájky v horizontálním řezu.

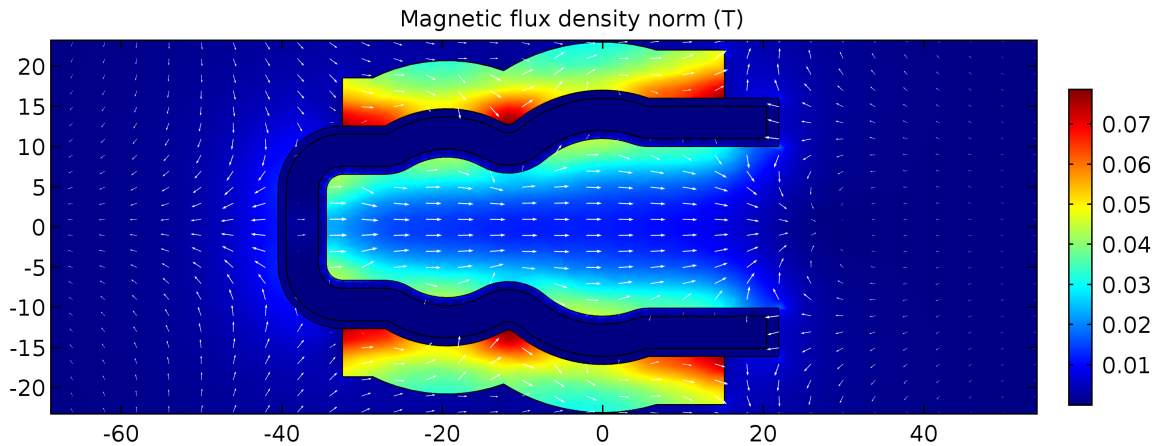


Obrázek 4.32: Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2.2).

tedy zapájení obou trubic pod 1 minutu ale stále není splněn. Byla tedy vytvořena ještě jedna tvarová modifikace tohoto induktoru (4.33). Tvar se snaží co nejlépe obklopit vodiče induktoru kolem obou trubic a zvýšit tak účinnost celého procesu. Obklopení je však limitováno tím, aby bylo možno trubice bezpečně zasunout a vysunout bez toho, aby hrozil dotyk některé z trubic a vodičů induktoru. Z rozložení magnetického pole v pohledu shora (4.34) je zřejmé, že největších hodnot magnetické indukce je dosahováno v požadovaných místech, tedy tam kde jsou umístěny trubice. Mírně potom klesla maximální hodnota magnetické indukce a to na 0,07 T.

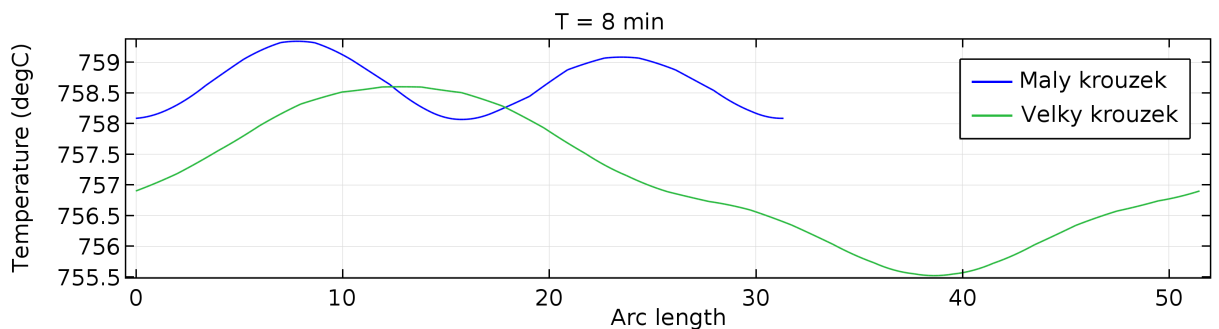


Obrázek 4.33: Tvar induktoru ve variantě 3.



Obrázek 4.34: Rozložení magnetické indukce induktoru, pohled shora (varianta 3).

Rychlost ohřevu se však ani v této variantě příliš nezlepšila, ba naopak ohřev je ještě pomalejší než v případě první varianty tohoto prototypu. Vzdálenost vodičů od vsázky je totiž v této variantě o něco větší. Další přibližování vodičů k induktoru by nemělo smysl, jelikož by oblouky kopírující stěny induktoru měly čím dál menší průměry a vodiče by pak byly opět téměř přímé, tvar by se potom příliš nelišil od varianty druhé. K zrychlení ohřevu by tedy pravděpodobně jako u předchozího prototypu pomohlo navýšení proudu či zvýšení frekvence. V pokusné simulaci s frekvencí 400 Hz se maximální teplota v čase 4 minuty zvýšila z původní hodnoty o 117 °C na 860 °C. Ukázalo se však, že původní vzdálenosti vodičů od trubic již nevyhovují a větší trubice se nyní ohřívá mnohem rychleji.



Obrázek 4.35: Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 3).

4.6 Vyhodnocení optimalizace

Vyhodnocení optimalizace se ukazuje být problémem, v praxi byl totiž reálně vyzkoušen pouze první a druhý prototyp induktoru. Reálné poznatky, tedy především to jak pájka vzlíná do mezery mezi oběma trubicemi, u dalších prototypů nejsou k dispozici. S prvním prototypem bylo dosaženo vhodných pájecích teplot kroužků pájky přibližně po 35 s, kdy

maximální teplota kroužků dosahuje 853 °C. Rozdíl maximální a minimální teploty je potom 8 °C a nejvyšší teploty kroužků pájky jsou v osách příčných, tedy v místech kde jsou vodiče induktoru nejbližší trubicím. Maximální dosahovaná magnetická indukce je 0,25 T a vlastní indukčnost induktoru je 0,156 μH . Praktický test tohoto induktoru prokázal, že splňuje všechny podmínky a je tedy pro automatickou linku použitelný. Přestože zapájený spoj všem námahovým zkouškám vyhověl, metalurgické zkoumání tohoto spoje poukázalo na nedostatky, kdy pájka v chladnějších místech po obvodu dostatečně nenavzlínala do mezery mezi trubicemi.

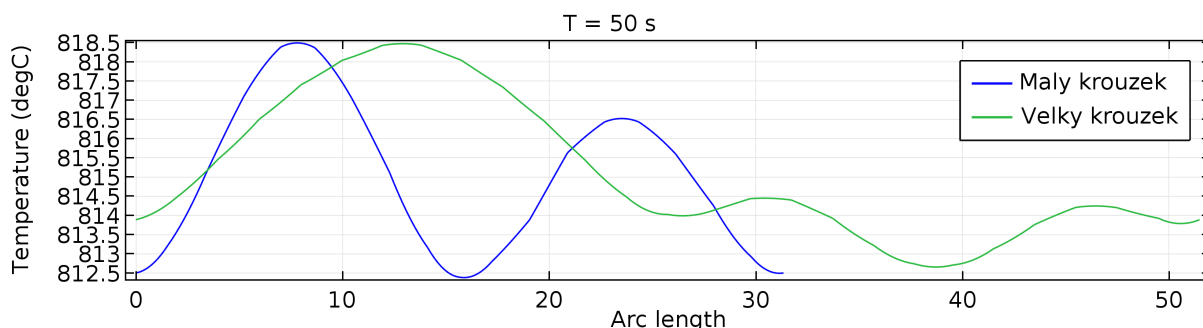
Rychlejšího ohřevu oproti prvnímu prototypu se podařilo dosáhnout s prototypem druhým, požadovaných teplot nyní dosahuje už po 25 s. Zhoršilo se však rozložení teplot po obvodu kroužků pájky, kdy je o 4 °C překročena maximální požadovaná hodnota rozdílu teplot, tedy 10 °C. Nejteplejší místa jsou nyní v podélné ose. Maximální hodnota magnetické indukce je v tomto případě 0,35 T a vlastní indukčnost se téměř nezměnila a činí 0,15 μH . Zhoršené rozložení teploty po obvodu kroužků pájky se projevilo i v praktických testech, kdy byly trubice vlivem tepla na některých místech narušeny.

Experimentální třetí prototyp, vycházející z prototypu prvního, nedokázal vylepšit ani rychlost ohřevu, ani rozložení teplot po obvodu kroužků pájky. Po jedné minutě je dosahováno maximální teploty 472 °C, rozdíl minimální a maximální teploty kroužků sice činí pouze 5 °C, jak ale bylo zjištěno, tento malý rozdíl se vyskytuje u všech pomalu hřejících prototypů a je dán, spíše než tvarem, dlouhou dobou ohřevu. Maximální hodnota magnetické indukce je 0,25 T, tedy stejná jako u prvního prototypu. Vlastní indukčnost je potom 0,08 μH . Právě malá hodnota indukčnosti, pomalý ohřev a zcela minimální zlepšení tvaru magnetického pole oproti prvnímu a druhému prototypu tento induktor vyřazují z našich úvah.

Velmi podobně je na tom i čtvrtý prototyp, který stejně jako prototyp třetí vychází tvarově z prototypu prvního. Po jedné minutě dosahují kroužky maximální teploty 158 °C, rozdíl maximální a minimální teploty je potom 2,2 °C. Ačkoliv se s tímto induktorem podařilo mírně zlepšit rozložení magnetického pole v pracovní oblasti, maximální hodnota magnetické indukce dosahuje pouze 0,16 T a vlastní indukčnost je 0,15 μH . Problémem je i odlišný průřez vodičů a tím pádem je kladen požadavek na menší proud. Ohřev je ve výsledku ještě pomalejší než u třetího prototypu.

Zjednodušení tvaru druhého prototypu vedlo na prototyp pátý, který byl zkoušen dokonce ve třech různých variantách. Ačkoliv se zjednodušením tvaru podařilo značně vylepšit rozložení magnetického pole, klesla maximální hodnota magnetické indukce a to na 0,18 T. Zásadním problémem je potom pokles vlastní indukčnosti na 0,03 μH . Bohužel ani tento induktor nedosahuje rychlosti ohřevu prvních dvou prototypů. Nejlepší z variant tohoto prototypu dosáhla požadované teploty pro tavení kroužku až po 4 minutách, maximální teplota v tomto čase byla 743 °C. Rozdíly teplot po obvodu kroužků pájky se při pokusu s vyšším proudem oproti druhému prototypu opravdu zmenšily, malá vlastní indukčnost a pomalý ohřev při původní velikosti proudu však zůstávají problémem.

Nejlepším kompromisem mezi rychlostí ohřevu a rozdíly teplot po obvodu kroužků pájky je první prototyp. Ten jako jediný splňuje všechny podmínky a v praxi se již osvědčil. Pokud jako hlavní faktor určíme rychlost ohřevu, nejlepší variantou je druhý prototyp, musel by však být modifikován tak, aby se zabránilo mechanickému narušení struktury trubic příliš vysokou teplotou. Vyhodnocení z hlediska nejmenších rozdílů teplot po obvodu kroužků pájky je s přihlédnutím k velmi rozdílným rychlostem ohřevu poměrně obtížné. Jako nejlepší se však z tohoto hlediska jeví prototyp pátý v druhé variantě. Tento prototyp se ze všech dosavadních prototypů vyznačuje nejlepší homogenitou magnetického pole v pracovní oblasti, to umožňuje dobré zapájení spoje i když vsázka nebude umístěna v ideální poloze. Při posunu trubic o 1 mm nalevo či napravo od ideální polohy se původní maximální rozdíl teplot kroužků zvětší o 13 °C na 18 °C, v případě prvního prototypu, však tento nárůst činní téměř dvojnásobek, tedy 27 °C. S přihlédnutím k tomu, že vodiče prvního prototypu jsou od vsázky více vzdáleny než u prototypu pátého, je to zásadní zlepšení. Problémem je sice pomalý ohřev, to lze však řešit úpravou frekvence či zvětšením napájecího proudu. Při simulacích se ukázalo, že stačí aby tento proud byl přibližně dvojnásobný než proud původní. S tímto proudem induktor ohřívá kroužky pájky na tavicí teploty už po 40 s. Kvůli větší rychlosti ohřevu však bylo nutno mírně upravit tvar induktoru tak, aby byla zachována uniformita ohřevu. V praxi se ukázalo, že ani dvojnásobný proud není pro chlazené vodiče problémem a jedinou překážkou zůstává velmi malá vlastní indukčnost. To lze řešit jednak pomocí kapacitorové baterie, jednak úpravou přírodních vodičů do takového tvaru, aby sloužily jako další sériová indukčnost. Tento induktor byl tedy zvolen jako nejlepší varianta, nesplňuje sice podmínku rychlosti ohřevu s původním proudem pod 1 minutu. Rozložení magnetického pole a vysoká uniformita teplot po obvodu kroužků pájky by však měla výrazně pomoci rovnoměrnému vzlínání pájky a výsledkem by měl být pevněji zapájený spoj, nežli je tomu v případě prototypu prvního.



Obrázek 4.36: Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky pátého prototypu při rychlém ohřevu.

5 Závěr

Cílem této práce bylo splnit tři základní body. Prvním bodem bylo vypracování podrobné rešerše metod tvrdého pájení mědi. V samém úvodu rešerše jsou rozebrány výhody a nevýhody této technologie a následuje popis jednotlivých komponentů indukčního pájení. U jednotlivých komponentů je nejprve stručně uvedena jejich funkce a následně jsou rozebírány používané materiály, tvary, případně poznatky z praxe či aktuální trendy a výzkumy. Největší pozornost je věnována induktorům, jednak jsou kategorizovány podle nejčastěji používaných tvarů, jednak je rozebírán jejich vliv na jednotlivé parametry ohřevu vsázky. Následující kapitola se věnuje koncentrátorům a stíněním jak z hlediska funkce, tak z hlediska používaných materiálů. Zmíněny jsou zde spíše pro zajímavost i tzv. susceptory. V další podkapitole se práce zabývá pájkami, uvedeny jsou nejčastěji používané pájky umožňující pájet měď či její slitiny, jejich příměsi a vliv těchto příměsí na vlastnosti pájky. Poměrně rozsáhlá je potom podkapitola popisující napájecí zdroje, uvedeny jsou zde jednak starší, dnes již příliš nepoužívané zdroje, jednak zdroje moderní. Nakonec je zmíněno i chlazení indukčních systémů, to je však problematika velmi obsáhlá, a je tak uvedena pouze ve stručnosti.

Dalším bodem už je samotná optimalizace. Tomu předchází definice problému, kde jsou popsány vsázka a další jednotlivé uvažované komponenty procesu. Následující kapitola obsahuje matematický model na jehož základě simulační software daný problém metodou konečných prvků řeší. Před návrhy jednotlivých prototypů jsou ještě zmíněny nutné podmínky, které musí výsledný prototyp splnit tak, aby mohl být v praxi použit. Navrženo bylo celkem pět prototypů, každý z prototypů byl nejprve simulován bez vsázky, aby byl zjištěn tvar magnetického pole. Při návrhu prototypů se v malých modifikacích objevovaly dva tvary magnetických polí. Jedno cirkulující s nejmenší hodnotou magnetické indukce v geometrickém středu pracovní oblasti a druhé pole tekoucí od jedné dvojice vodičů induktoru ke druhé v závislosti na směru proudu. Následně proběhly simulace v prvních verzích, tedy ve verzích kde není vzdálenost vodičů induktoru od vsázky přizpůsobena její velikosti. Na základě výsledků z těchto simulací byly vodiče přiblíženy k vsázce tak, aby se oba kroužky pájky hrály co nejrovnoměrněji.

Všechny prototypy potom byly posuzovány z hlediska rychlosti ohřevu, jeho rovnoměrnosti, posuzována byla i hodnota vlastní indukčnosti. Z vyhodnocení těchto vlastností vyšel jako optimální první prototyp, jeho testy v praxi však ukázaly na nedostatky v zapájení spoje a byl hledán takový prototyp, jehož magnetické pole je co nejvíce homogenní. Tento požadavek nejlépe splňoval pátý prototyp, problémem byl ale pomalý ohřev a malá hodnota vlastní indukčnosti. Proto jsou v této kapitole uvedena opatření jak tyto překážky odstranit. Posledním bodem bylo vytvoření výrobní dokumentace daného induktoru, ta je spolu s výkresem příslušného koncentrátoru uvedena v přílohách.

Seznam použité literatury

- [1] AMERICAN WELDING SOCIETY. *Brazing handbook*. 5th ed. Miami, Fla.: American Welding Society, ©2007. ISBN 978-0-87171-046-8.
- [2] ASM INTERNATIONAL HANDBOOK COMMITTEE. *ASM handbook. Vol. 6, Welding brazing and soldering*. 4th ed. Materials Park: ASM International, ©1993. ISBN 0-87170-382-3.
- [3] AVEMANN, J., WILLY, R., ZHAO, G. a GROCHE, P. Forming process integrated induction brazing. *Procedia CIRP*. 2012, vol. 3, s. 614-619. ISSN 2212-8271.
- [4] COMSOL. Multiphysics [program]. Version 5.2.0.166. Stockholm: Comsol, 2015.
- [5] DAWSON, P. Francis a JAIN, Praaven. A comparison of load commutated inverter systems for induction heating and melting applications. *IEEE Transactions on power electronics*. 1991, vol. 6, no. 3, s. 430-441. ISSN 0885-8993. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=63>
- [6] DEMIANOVÁ, Kristína, OŽVOLD, Milan a TURŇA, Milan. Application of induction heating for brazing parts of solar collectors. *Acta Polytechnica*. 2012, vol. 52, no. 4, s. 44-48. ISSN 1805-2363. Dostupné také z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/viewFile/1586/1418>
- [7] HUY-TIEN, Bui a SHENG-JYE, Hwang. Modeling a working coil coupled with magnetic flux concentrators for barrel induction heating in an injection molding machine. *International journal of heat and mass transfer*. 2015, vol. 86, s. 16-30. ISSN 0017-9310.
- [8] CHABOUDEZ, C., CLAIN, S., GLARDON, R., MARI, D., RAPPZAZ, J. a SWIERKOSZ, M. Numerical modeling in induction heating for axisymmetric geometries. *IEEE transactions on magnetics*. 1997, vol. 33, no. 1, s. 739-745. ISSN 0018-9464. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=20>
- [9] JAKUBIČOVÁ, Lenka, GAŠPAREC, Andrej, KOPAS, Peter a SÁGA, Milan. Optimization of the induction heating process in order to achieve uniform surface temperature. *Procedia Engineering*. 2016, vol. 136, s. 125-131. ISSN 1877-7058.
- [10] KAI, Gao, XUNPENG, Qin, WANG, Zhou, SHENGXIAO, Zhu a ZHONGMING, Gan. Effect of magnetizer geometry on the spot induction heating process. *Journal of materials processing technology*. 2016, vol. 231, s. 125-136. ISSN 0924-0136.

- [11] KOTLAN, Václav. *Modelování a využití vybraných termoelastických jevů vyvolaných tepelnými účinky elektromagnetického pole*. Plzeň. 2014. Habilitační práce. Západočeská univerzita. Fakulta elektrotechnická.
- [12] LANIN, V. L. a SERGACHEV, I. I. Induction devices for assembly soldering in electronics. *Surface engineering and applied electrochemistry*. 2012, vol. 48, no. 4, s. 384-388. ISSN 1068-3755.
- [13] LUPI, Sergio, FORZAN, Michele a ALIFEROV, Aleksandr. *Induction and direct resistance heating: theory and numerical modeling*. Cham: Springer, 2015. ISBN 978-3-319-03478-2.
- [14] MUANGSONG, Nattachai, WONGSA, Sarawan a PHUNG-ON, Isarat. Optimization of induction brazing parameters for stellite strip of steam turbine blade using Taguchi-neural network. *Key engineering materials*. 2013, vol. 545, s. 225-229. ISSN 1662-9795.
- [15] NODA, T., SHIMUZU, T., OKABE, M. a IIKUBO, T. Joining of TiAl and steels by induction brazing. *Materials science and engineering. Sect. A, Structural materials, properties, microstructure and processing*. 1997, vol. 239-240, s. 613-618. ISSN 0921-5093.
- [16] PHADUNGTHIN, R. a HAEMA, J., High frequency induction heating of full bridge resonant inverter application. In: *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*. Anacapri, Italy, 2016, s. 1383-1387. ISBN 978-1-5090-2068-3.
- [17] RAPOPORT, Edgar a PLESHIVTSEVA, Yulia. *Optimal control of induction heating processes*. Boca Raton: CRC Press, ©2007. Mechanical engineering, 201. ISBN 978-0-8493-3754-3.
- [18] ROBERTS, Philip M. *Industrial brazing practice*. Boca Raton: CRC Press, ©2004. ISBN 0-8493-2112-3.
- [19] RUDNEV, Valery, LOVELESS, Don, COOK, Raymond a BLACK, Micah. *Handbook of induction heating*. New York: Marcel Dekker, ©2003. Manufacturing engineering and materials processing, 61. ISBN 0-8247-0848-2.
- [20] SETAPEN, A. M. Silver alloy brazing with induction heating. *Journal of the Electrochemical Society*. 1944, vol. 86, no. 1, s. 273-294. ISSN 0013-4651.
- [21] TIANXING, Zhu, PANSHANG, Feng a XUEKUN, Li. The study of the effect of magnetic flux concentrator to the induction heating system using coupled

- electromagnetic-thermal simulation model. In: *2013 International conference on mechanical and automation engineering (MAEE)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, s. 123-127. ISBN 9781467361811.
- [22] YI, Han, EN-LIN, Yu a TIAN-XU, Zhao. Three-dimensional analysis of medium-frequency induction heating of steel pipes subject to motion factor. *International journal of heat and mass transfer*. 2016, vol. 101, s. 452-460. ISSN 0017-9310.
- [23] ZINN, Stanley a SEMIATIN, Lee. *Elements of induction heating design, control, and applications*. Palo Alto: EPRI, Electric Power Research Institut, [2011]. ISBN 978-0-87170-308-8.

Seznam obrázků

1.1	Příklady používaných geometrií a induktorů. (Převzato z [1], str. 263)	12
1.2	Induktory z masivních kovových bloků. (Převzato z [20], str. 283)	13
1.3	Další příklady používaných induktorů. (Převzato z [18], str. 166)	14
1.4	Spínací diagram napájecího zdroje.	18
1.5	Zjednodušený příklad vnitřního zapojení moderního napájecího zdroje.	19
1.6	Varianty chlazení induktorů. (Převzato z [20], str. 282)	20
1.7	Příklad nejjednoduššího chladicího systému. (Převzato z [23], str. 78)	20
2.1	Pájené trubice s kroužky pájky.	21
2.2	Ukázka zkompletované geomterie.	22
3.1	Řešená geometrie se vzduchovou obálkou.	23
3.2	Oblast řešení jednotlivých fyzikálních polí.	24
3.3	Okrajové podmínky elektromagnetického pole.	26
3.4	Diskretizovaná geometrie.	27
4.1	Trubice induktoru.	28
4.2	Ukázka induktoru s koncentrátorem.	29
4.3	Testované tvary prvního prototypu.	30
4.4	Rozložení magnetické indukce induktoru bez koncentrátoru (varianta 1).	30
4.5	Teploty po obvodu kroužků pájky (varianta 1).	31
4.6	Rozložení magnetické indukce induktoru s koncentrátorem (varianta 1).	32
4.7	Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2).	33
4.8	Teploty kroužků pájky v horizontálním řezu.	33
4.9	Testované tvary druhého prototypu.	34
4.10	Rozložení magnetické indukce induktoru (varianta 1).	34
4.11	Rozložení magnetické indukce induktoru, pohled shora (varianta 1).	35
4.12	Teploty po obvodu kroužků pájky (varianta 1).	35
4.13	Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2).	36
4.14	Teploty kroužků pájky v horizontálním řezu.	36
4.15	Testované tvary třetího prototypu.	37
4.16	Rozložení magnetické indukce induktoru.	37
4.17	Rozložení magnetické indukce induktoru, pohled shora (varianta 1).	38
4.18	Teploty po obvodu kroužků pájky (varianta 1).	39
4.19	Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2).	39
4.20	Testované tvary čtvrtého prototypu.	40
4.21	Rozložení magnetické indukce induktoru (varianta 1).	40

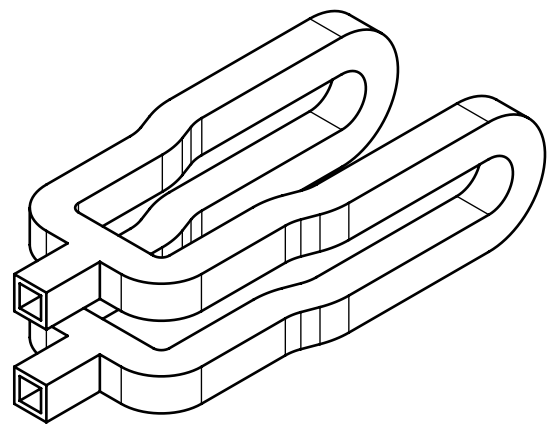
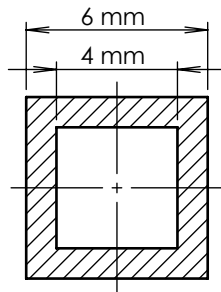
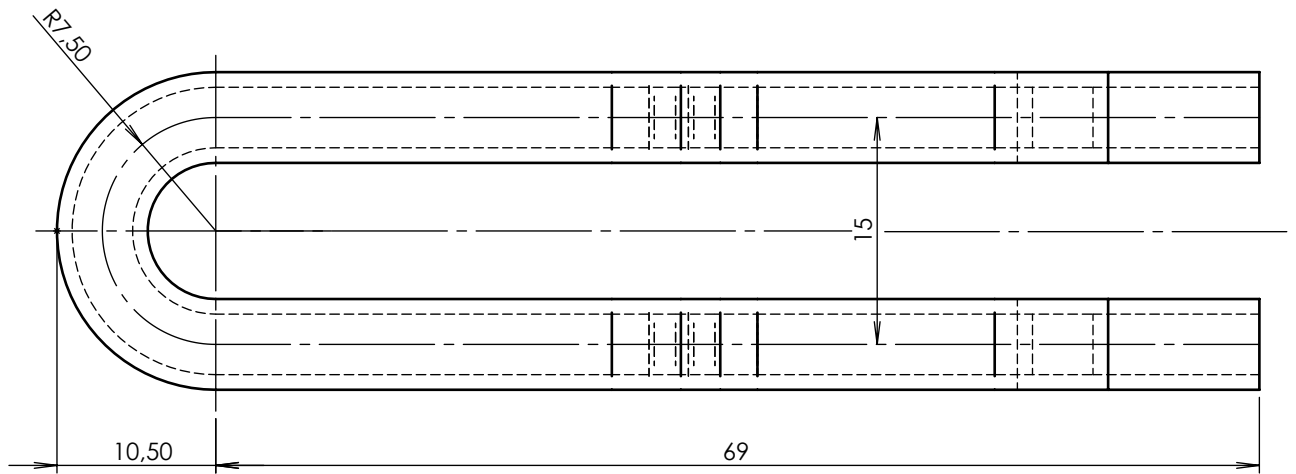
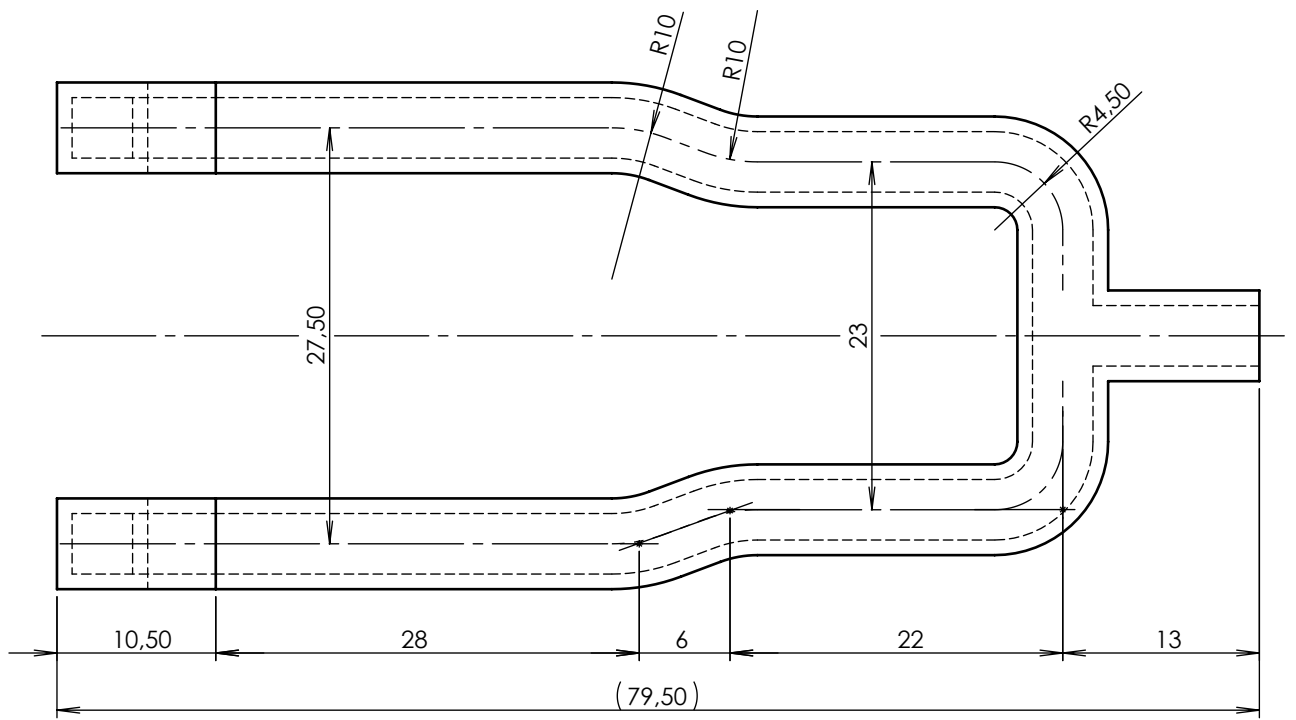
4.22	Rozložení magnetické indukce induktoru, pohled shora (varianta 1).	41
4.23	Teploty po obvodu kroužků pájky (varianta 1).	41
4.24	Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2).	42
4.25	Teploty kroužků pájky v horizontálním řezu.	42
4.26	Testované tvary pátého prototypu.	43
4.27	Rozložení magnetické indukce induktoru (varianta 1).	43
4.28	Rozložení magnetické indukce induktoru, pohled shora (varianta 1).	44
4.29	Teploty po obvodu kroužků pájky (varianta 1).	44
4.30	Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2).	45
4.31	Teploty kroužků pájky v horizontálním řezu.	46
4.32	Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 2.2).	46
4.33	Tvar induktoru ve variantě 3.	46
4.34	Rozložení magnetické indukce induktoru, pohled shora (varianta 3).	47
4.35	Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky (varianta 3).	47
4.36	Srovnání teplot malého a velkého kroužku pájky pátého prototypu při rychlém ohřevu.	49

Přílohy

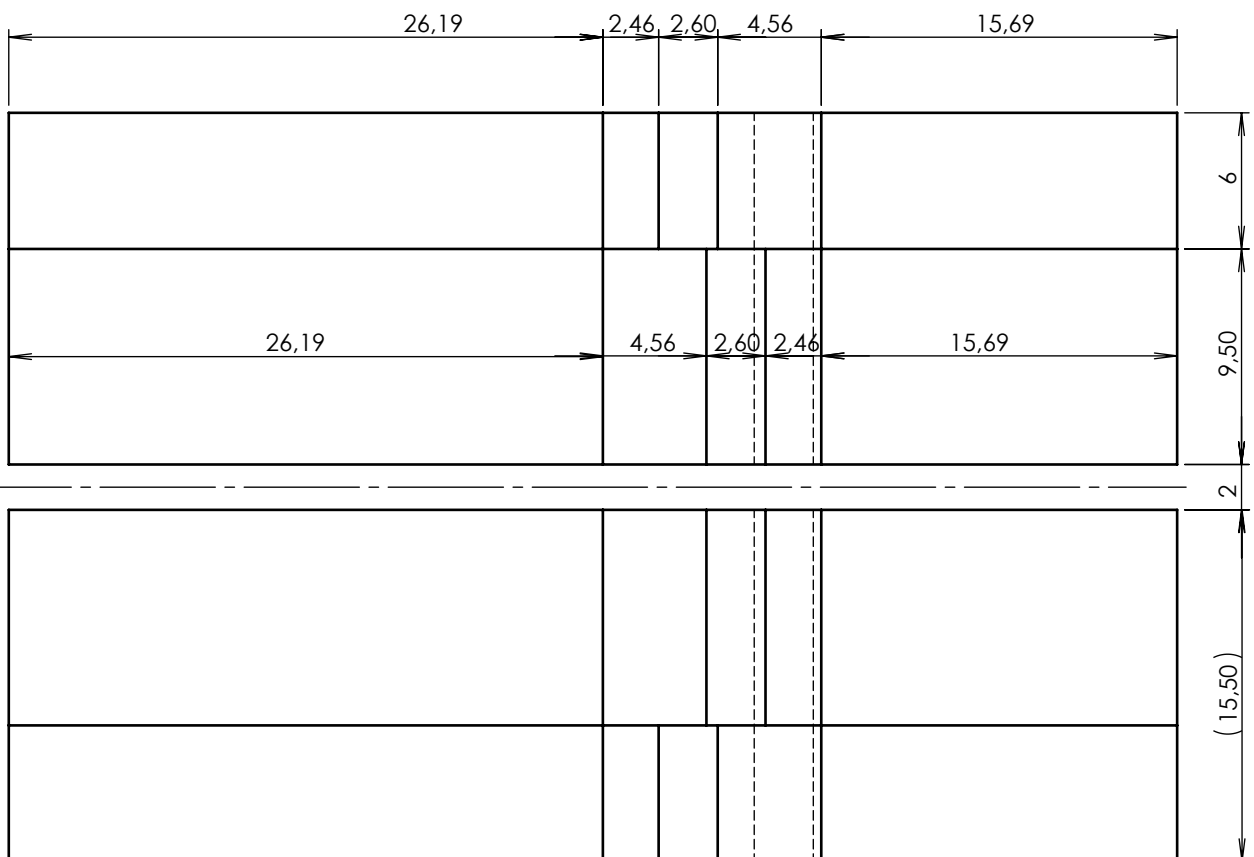
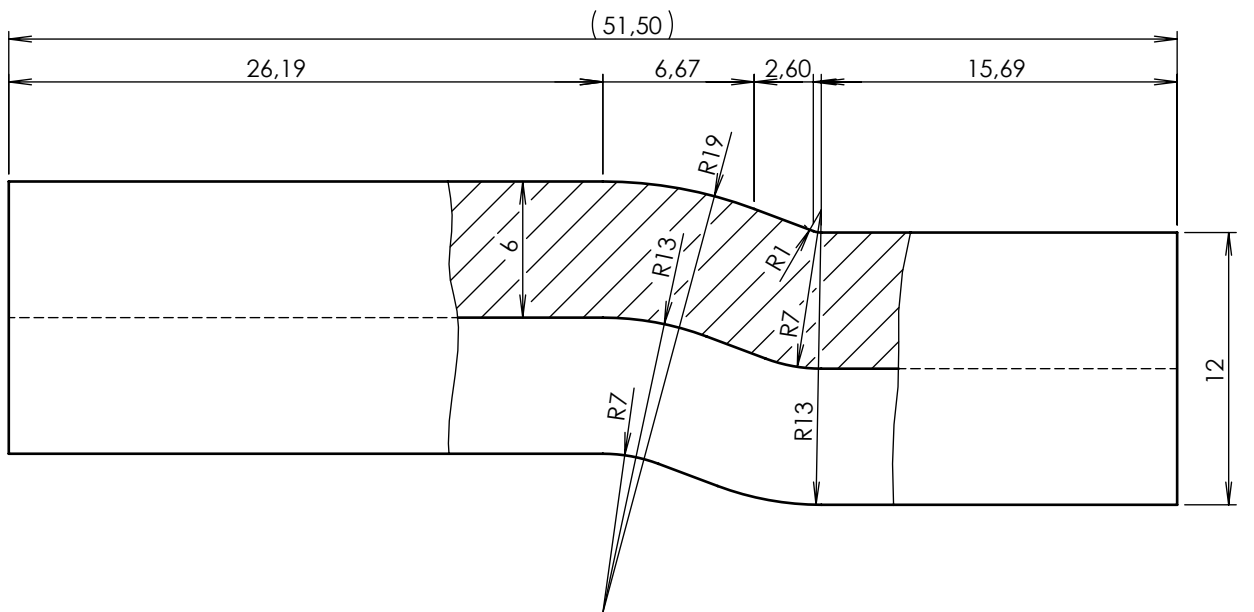
Seznam příloh

Příloha 1 - Výkres induktoru (pátý prototyp)

Příloha 2 - Výkres koncentrátoru



NAVRHL Jan Kaska	MATERIÁL: měď	NÁZEV: Induktor - prototyp 5	A4
	HMOTNOST: 60 g	MĚŘÍTKO: 2:1	LIST 1 Z 2 LISTŮ



NAVRHL Jan Kaska	MATERIÁL: Fluxtrol 50	NÁZEV: Koncentrátor - prototyp 5	A4
	HMOTNOST: 82 g	MĚŘÍTKO: 3:1	LIST 2 Z 2 LISTŮ