

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Optimalizace spojování potrubí indukčním ohřevem

Originál (kopie) zadání BP/DP

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na optimalizaci spojování potrubí indukčním ohřevem. V první části jsou popsány dosavadní používané metody pro spojování potrubí, indukční ohřev, elektromagnetické vlnění a metody optimalizace. Druhá část je věnována simulacím proveditelnosti z hlediska použitelných materiálů a rozměrů.

Klíčová slova

Trubky, spojování trubek, indukční ohřev, optimalizace, elektromagnetické vlnění, Agros2D, spojka, frekvence

Abstract

This diploma thesis is focused on the induction heating optimization for connecting pipes. Current methods for connecting pipes, induction heating, electromagnetic waves and optimization methods are described in the first part. The second part is devoted to simulations of feasibility in terms of usable materials and dimensions.

Key words

Pipes, connecting pipes, induction heating, optimalization, electromagnetic waves, Agros2D, clutch, frequency

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 27.8.2019

Hynek Haimrle

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Lence Šroubové, Ph.D. za její cenné rady, připomínky, trpělivost a vstřícný přístup.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
1 POTRUBÍ	13
1.1 KOMPONENTY POTRUBÍ	13
1.2 ROZDĚLENÍ POTRUBÍ	13
1.3 ZÁKLADNÍ POJMY POTRUBÍ	14
1.4 MATERIÁL PRO VÝROBU POTRUBÍ	14
1.5 SPOJOVÁNÍ KOVOVÝCH TRUBEK	15
1.5.1 <i>Rozebíratelné a nerozebíratelné spoje</i>	15
1.5.2 <i>Šroubový spoj</i>	16
1.5.3 <i>Přírubový spoj</i>	16
1.5.4 <i>Svařování</i>	16
1.5.5 <i>Pájení</i>	17
2 OPTIMALIZAČNÍ METODY	17
2.1 ITERAČNÍ METODY	19
3 INDUKČNÍ OHŘEV	20
4 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE	21
5 OPTIMALIZACE SPOJOVÁNÍ POTRUBÍ - ILUSTRATIVNÍ PŘÍKLADY	22
5.1 <i>Formulace problému</i>	23
5.2 <i>Matematický model</i>	23
5.3 <i>Numerický model</i>	24
6 SIMULACE A VÝSLEDKY	27
6.1 ROZMĚRY CÍVKY	28
6.2 PROUD CÍVKY	31
6.3 ROZLOŽENÍ TEPLoty	32
6.4 VZDÁLENOST CÍVKY OD TRUBKY	33
6.5 PRŮMĚR TRUBKY	35

6.6	TLOUŠŤKA STĚNY TRUBKY	36
6.7	FREKVENCE	38
7	SIMULACE A VÝSLEDKY – SPOJOVÁNÍ POTRUBÍ	39
7.1	OCELOVÉ SPOJKY	40
7.2	HLINÍKOVÉ SPOJKY	42
7.3	MĚDĚNÉ SPOJKY	43
	ZÁVĚR	45
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	46
	PŘÍLOHY	49

Seznam symbolů a zkratk

A	vektorový potenciál	Wb/m
a	koeficient přestupu tepla	W/m ² .K ¹
B	magnetická indukce	T
c_p	měrná tepelná kapacita	J/kg.K
D	elektrická indukce	C/m ²
E	intenzita elektrického pole	V/m
E	Yongův modul	Pa
f	frekvence	Hz
H	intenzita magnetického pole	A/m
J	proudová hustota	A/m ²
k	konstanta šíření elmag. pole	-
P	činný, tepelný výkon	W
S	Poyntingův zářivý vektor	W/m ²
T	teplota	K
t	čas	s
W	energie, práce	W
w_j	měrné Jouleovo ztráty	W/m ³
γ	měrná elektrická vodivost	S/m
ε	permitivita	F/m
ε_r	relativní permitivita	-
μ	permeabilita	H/m
μ_r	relativní permeabilita	-
λ	koeficient teplotní vodivosti	W/m.K
α_T	koeficient tepelné roztažnosti	K ⁻¹
ρ	hustota materiálu	kg/m ³
ν	Poissonovo číslo	-

Úvod

Indukční ohřev může být vhodnou alternativou k dosud běžně používaným metodám spojování potrubí. Tématem této diplomové práce je tedy optimalizace spojování potrubí za pomoci indukčního ohřevu. Práce, zabývající se tímto problémem v následujících sedmi kapitolách, je rozdělena na teoretickou i praktickou část.

Nejprve je nutné seznámit se s potrubím obecně. Tomu je věnována první kapitola, v které se řeší funkce potrubí a jeho všeobecné požadavky, komponenty a všeobecné požadavky kladené na potrubí. Dále pak rozdělení, základní pojmy a materiál běžně používaný pro výrobu potrubí. V poslední části kapitoly je rozebráno téma spojování kovových trubek dnes používanými metodami.

Dalším tématem předkládaného textu je optimalizace a různé metody optimalizace, především iterační metody. Při optimalizaci spojování potrubí indukčním ohřevem budou sledovanými kritérii frekvence a čas indukčního ohřevu, dosažená teplota a dosažené roztažení zkoumaných materiálů.

Principem indukčním ohřevu se zabývá následující kapitola. Popisuje vznik vířivých proudů v elektricky vodivých tělesech vystavených elektromagnetickému poli. Dále zmiňuje výhody indukčního ohřevu, například jeho rychlost a vysokou účinnost. Navazujícím tématem je samotné elektromagnetické pole, Maxwellovy rovnice a materiálové konstanty.

Dále se také seznámíme s programem Agros2D, vyvíjeném v Plzni na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU. Program umožňuje simulaci fyzikálních polí, včetně polí elektromagnetického, tepelného a termoelastického, které budeme v simulacích využívat. Je zde formulován řešený problém a vysvětlen matematický a numerický model včetně hodnot materiálových konstant, které jsou nutné pro správné vyhodnocení příkladů vytvářených ve výpočetním programu.

Poslední dvě kapitoly jsou věnovány simulacím řešeného problému a jejich výsledkům. Sledovanými parametry jsou teplota a roztažení trubek či spojek, na základě kterých se hledá optimální řešení. První z těchto kapitol se zabývá základními poznatky indukčního ohřevu na jejichž základě jsou stanoveny rozměry a proud cívky, zjistíme, jak je rozložena teplota v indukčně ohřivaném tělese, závislost vzdálenosti cívky, závislost průměru či tloušťky ohřivaného tělesa a vliv použité frekvence. Z těchto poznatků vyplynula nutnost použití

spojek pro spojování trubek, čemuž se věnuje závěrečná kapitola práce. Je zde hledána optimální frekvence indukčního ohřevu pro co nejvíce možných trubek.

1 Potrubí

Potrubí je mechanismus skládající se především z trubek sloužící k dopravě kapalin, plynů a par i sypkých hmot (cement, písek, uhlí,...). [1] Obecným účelem potrubí je poskytnout přímou a chráněnou cestu. [2] Pro přepravu sypkých hmot je zapotřebí využít nosnou látku, podle jejíhož typu můžeme potrubí rozdělit na hydraulické (kapalina jako nosná látka) nebo pneumatické (plyn jako nosná látka). Při přenosu látek nedochází k změnám skupenství a s výjimkou dlouhých vzdáleností (desítky až stovky kilometrů) se tlak a teplota přenášených látek mění jen minimálně. [1]

Všeobecné požadavky:

- nepropustnost
- odolnost proti poškození
- teplotní odolnost
- přehlednost uspořádání
- snadný přístup k armaturám [3]

1.1 Komponenty potrubí

Pojem potrubí se týká celkové sítě trubek, tvarovek (kolena, ohyby, oblouky, tvarovky T, Y), potrubních spojů (nerozebíratelné, rozebíratelné), kompenzátorů, upevňovacích prvků (podpěry, závěsy, vedení, kotvení, izolace aj.) a armatur (uzavírací, zpětné, regulační, pojistné, speciální). Ať už se potrubní systém používá k prostému dopravování tekutin z jednoho místa do druhého, nebo ke zpracování a úpravě kapaliny, potrubní komponenty hrají důležitou roli ve složení a provozu systému. Systém používaný výhradně pro dopravu tekutin může sestávat z poměrně málo složek, jako jsou ventily a armatury, zatímco komplexní systém chemického zpracování může sestávat z různých složek používaných pro měření, kontrolu, stav a dopravu tekutin. [4]

1.2 Rozdělení potrubí

Podle:

- účelu potrubí (sací potrubí, výtlačná, vypouštěcí,...)

- pracovní teploty nebo stavu pracovního přetlaku
- způsobu provedení a materiálu (litinové, měděné, přírubové,...)
- tlaku (podtlakové, nízkotlaké, vysokotlaké)
- druhu spoje (svařované, šroubované, přírubové, hrdlové, pájené, lepené, se závitovými objímkami,...)
- druhu izolace (technické konopí, pěnový polyetylen, skelná nebo čedičová vata,...)
- umístění (vnitřní, vnější, stěnové, dálkové, tranzitní,...)
- druhu přepravované látky (vodní, parní, plynové, ropné, cementové,...) [1]

1.3 Základní pojmy potrubí

- pracovní přetlak (vnitřní přetlak dopravované látky)
- pracovní teplota (teplota dopravované látky)
- pracovní látka (specifikovaná dopravovaná látka, která ovlivňuje materiál trubek)
- jmenovitá světlost DN (vnitřní průměr trubek)
- jmenovitý tlak PN (pracovní přetlak v závislosti na pracovní teplotě)
- pracovní stupně I. – XI. (kritérium dělení potrubí do skupin podle velikosti, teploty a pracovního tlaku) [3]

1.4 Materiál pro výrobu potrubí

V závislosti na typu přepravované látky se potrubí přizpůsobuje materiálem a konstrukcí. V současné době je na trhu obrovský výběr materiálu, který může být zvolen pro výrobu potrubí. Materiál se však odvíjí od plnění požadovaných podmínek konkrétního řešení. [5] V současné době jsou například zaznamenány velké pokroky v kabelových technologiích, protože náklady na opravu citlivých kabelových materiálů, jako je kabel s optickými vlákny, vedly ke zvyšování ochrany potrubí.[6]

Výběr materiálů pro potrubní aplikace je proces, který vyžaduje posouzení materiálových charakteristik vhodných pro požadovanou službu. Zvolený materiál musí být vhodný pro průtokové médium a provozní podmínky teploty a tlaku bezpečné během plánované životnosti výrobku. Mechanická pevnost musí být vhodná pro dlouhodobou údržbu a odolávat provozním proměnným. Extrémy v aplikační teplotě mohou vyvolat problémy s materiálovými schopnostmi, od křehké lomové houževnatosti při nízkých teplotách až po

adekvátní pevnost při tečení a odolnost proti oxidaci na druhém konci teplotního spektra. Kromě toho je třeba zvážit provozní prostředí, které obklopuje potrubí nebo trubky. Zhoršení vlastností materiálu nebo ztráta účinného průřezu nesoucího zatížení může nastat v důsledku koroze, eroze nebo kombinace obou. Povaha látek obsažených v potrubí je také důležitým faktorem. [4]

Potrubí může být vyrobeno z různých materiálů. V minulosti byly využívány materiály, jako jsou dřevo a olovo. V současné době se vyrábí potrubí z různých materiálů včetně keramiky, skelných vláken, betonu, plastů a kovů. [7]

Jedním z nejvyužívanějšího materiálu na výrobu potrubí je ocel. Výhodou oceli je vysoká tepelná a tlaková odolnost, snadné spojování (např. svařováním) a odolnost vůči abrazivním účinkům při přenosu sypkých látek. Nevýhodou je nízká antikorozní odolnost. Po opatření bitumenovým povlakem naopak dobře odolávají korozi trubky litinové. Z neželezných kovů (olovo, cín, měď) se nejvíce využívají trubky měděné pro jejich antikorozní a teplotní vlastnosti. V potravinářském a chemickém průmyslu je typickým materiálem skleněné potrubí, jelikož je netečné vůči chemickým a biologickým účinkům pracovních látek a je snadné jej důkladně dezinfikovat. Slabinou jsou špatné mechanické vlastnosti. Mechanické vlastnosti se podařilo vylepšit u plastových rozvodů a nízké pořizovací náklady vedly k jejich častému využívání hlavně ve stavebnictví pro nízkotlaké rozvody, při vyšších tlacích se projevuje jejich špatná tlaková odolnost. Dalším typem potrubí je potrubí keramické, které se vyznačuje vysokou otěruvzdorností, korozivzdorností a křehkostí. Pro provoz vnější kanalizace a pro beztlaké odvádění se využívá beton a železobeton. [4]

1.5 Spojování kovových trubek

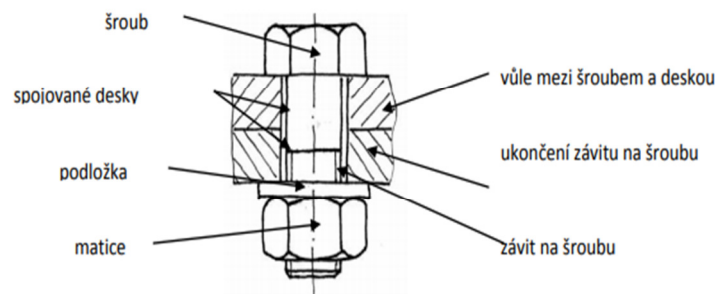
1.5.1 Rozebíratelné a nerozebíratelné spoje

Určením zda je spoj rozebíratelný, lze říci, že tento spoj jde znovu smontovat s týmiž spojovacími součástmi. Nerozebíratelný spoj je tedy takový, který tuto schopnost nemá. Je to tedy například svár dvou trubek apod. [8]

Mezi rozebíratelnými spoji jsou nejvíce používané spoje šroubové, přírubové, spoje svěracím kroužkem, trubkové spojky. Mezi nerozebíratelné spoje patří sváření a pájení. [8]

1.5.2 Šroubový spoj

Šroubový spoj se dá lehce rozebírat a lze říci, že je to spolehlivý druh spoje, který vykazuje značnou jednoduchost. Tyto spoje se skládají ze spojovaných součástí s dírou pro šroub, šroubu, matice a podložky, která nemusí být součástí spoje. Šroub je v tomto případě závit, který je na vnější válcové ploše a maticí je zde součást, která má díru se závitem. [8]



obr 3.5.1 Šroubový spoj (převzato z [9])

1.5.3 Přírubový spoj

Přírubové spoje jsou jedním rozšířených druhů spojů na potrubí větších dimenzí, jsou snadno rozebíratelné, dobře těsní a jejich výroba není obtížná. Příruby jsou s trubkou vcelku, nebo se s ní spojují různými způsoby – přivařením, připájením, naválcováním a našroubováním. Přírubový spoj se skládá ze dvou přírub, šroubů a těsnění. [10]

1.5.4 Svařování

Procesní potrubí je obvykle spojeno svařováním netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu nebo svařováním wolframovou elektrodou. [11] Při svařování kovů se využívá teplená nebo mechanická energie, aby se dosáhlo nerozebíratelného spojení dvou podkladových materiálů. Toto spojení je definováno jako působení meziatomových sil, adhezních vazeb teplem nebo tlakem aktivovaných kontaktních ploch. U pevných látek jsou také různé typy vazeb, které odpovídají různému uložení elektronů a iontů. Ionty mají vždy uspořádání takové, aby byla potenciální energie krystalu v co nejmenší míře. Pokud přitažlivé síly mezi kovovými ionty a elektronovým mrakem převyšují odpudivé síly elektronů v tomto mraku, dochází ke kovové vazbě.[12] Konce trubky, která má být svařena, musí mít určitý svařovací prostředek nazývaný koncová svarová koncovka, která je typicky v úhlu 37,5 stupňů pro uložení plnicího svarového kovu. [11]

1.5.5 Pájení

Dalším způsobem spojování je pájení. Jedná se o tepelný proces, kdy dochází ke spojení dvou podkladů, nebo se jedná o nanesení materiálu, přičemž není dosaženo teploty tavení základního materiálu, ale spoj vzniká difúzí tekuté pájky. Pájení je také závislé na smáčivosti, difúzi, vzlínivosti, pracovní teplotě a teplotě tavení. Pájení kovů lze rozdělit:

- měkké pájení = teplota liquidu pájky $< 450^{\circ}\text{C}$, pájky na bázi Sn a Pb
- tvrdé pájení = teplota liquidu pájky $> 450^{\circ}\text{C}$, pájky Al, Ag, Cu-P, CuZn
- vysokoteplotní pájení = teplota liquidu pájky $> 900^{\circ}\text{C}$, pájení ve vakuu nebo ochranné atmosféře, pájky Cu a Ni [13]

2 Optimalizační metody

Snahou optimalizačního procesu je nalézt co nejkvalitnější, nejvýhodnější popřípadě nejvhodnější řešení určitého problému.[14] Vlivem rostoucí konkurenceschopnosti na dnešním globálním ekonomickém trhu se stává optimalizace nevyhnutelnou nutností a velmi silným nástrojem pro zlepšení mnoha případů lidských činností. V současné době je optimalizační proces nepředstavitelný bez využití výpočetní techniky. Prvním krokem optimalizace je vytvoření počátečního návrhu systému popsáno pomocí vhodných numerických nástrojů. Dále jsou parametry takového systému postupně upravovány tak, aby pomocí zvolené optimalizační metody vyvíjené zařízení projevvalo nejvhodnější vlastnosti.[15]

S optimalizací se lze setkat při mnoha různých problémech, např. při přepravě nákladu z místa na místo s co nejnižšími časovými nebo finančními náklady, optimalizace výrobních programů, optimalizace technických konstrukcí ve stavebnictví, strojírenství a vojenství, či hledání optimálního stavu v chemických procesech.[16] Další možností je uvažovat o optimalizaci jako o matematické disciplíně, jejímž úkolem je nalézt minimum nebo maximum dané funkce $f(x)$ v dané množině X . Této funkci říkáme kriteriální, účelová nebo optimalizační. Kriteriální funkce obecně nemusí být spojitá, může mít velké množství lokálních extrémů, její definiční obor může být zadán příliš komplikovaně a také bývá definována v mnohorozměrném prostoru, což má vliv na velkou časovou náročnost výpočtu. Množina X je pak oblast omezena soustavami rovnic či nerovnic, ve které lze nalezené řešení považovat za fyzikálně realizovatelné. Dochází-li v optimalizačním procesu ke změně stavů

proměnných optimalizovaného objektu, je zapotřebí sledovat dopady těchto změn a na jejich základě stanovit optimální vlastnosti systému. Ne vždy lze dosáhnout naprosto optimálních vlastností a cílem je tedy se k těmto vlastnostem alespoň přiblížit.[14]

Optimalizace s a bez použití matematického modelu

Máme-li k dispozici pro daný problém odpovídající matematický model, na jehož základě lze vytvořit odpovídající kriteriální funkci (většinou v analytickém tvaru), jedná se o optimalizaci s využitím matematického modelu. V případech, v kterých je problém vyjádřit kriteriální funkci v analytickém tvaru nebo výpočet kriteriální funkce v daném bodě trvá dlouhou dobu, jde o optimalizaci bez matematického modelu. V takové situaci lze získat funkční hodnoty kriteriální funkce měřením nebo z počítačových simulací.[17]

Rozdělení optimalizačních metod

Optimalizační metody lze rozdělit podle počtu parametrů na jednoparametrické a víceparametrické. [17]

Jednoparametrické

- systematické prohledávání
- náhodné prohledávání s rovnoměrným rozdělením
- náhodné prohledávání s normálním rozdělením
- metoda zkracování intervalu
- metoda zlatého řezu a parabolické interpolace

Víceparametrické

- systematické prohledávání
- náhodné prohledávání s rovnoměrným rozdělením
- náhodné prohledávání s normálním rozdělením
- simplexová metoda
- Rosenbrockova metoda
- Fletcherova metoda
- Boxova metoda

Dalším možným rozdělením optimalizačních metod je rozdělení podle způsobu výpočtu extrémů na analytické metody, iterační metody a speciální metody. [15]

Analytické

- v případě jednorozměrných úloh – derivace
- v případě vícerozměrných úloh – gradienty

Iterační

- Komparativní (jednorozměrné, mnohorozměrné)
- Gradientní (bez omezení, s omezením)
- Metody náhodného vyhledávání (jednoduché, adaptivní)

Speciální

- Lineární programování
- Dynamické programování
- Konvexní programování

2.1 Iterační metody

Pojmem iterace se rozumí opakování, je tedy myšlen postup, při kterém se daný úkol opětně užije na výsledek předcházejícího úkonu. Iterační metodou je tedy opakované provádění konkrétních postupů za účelem postupného přibližování k hledanému (optimálnímu) řešení. [14]

Komparativní metody

Pro tyto optimalizační metody je určující vyčíslení diskrétních hodnot kriteriální funkce v určitých bodech. Dále porovnání těchto hodnot s hodnotami vypočtenými v dalším kroku. Tento postup je opakován tak dlouho, dokud je dosahováno zlepšování hodnoty kriteriální funkce. Komparativními metodami jsou např.: [14]

- Fibonacciho metoda
- Metoda zlatého řezu
- Powelova metoda
- Rovnoměrná komparativní metoda

- Box – Wilsonova metoda
- Simplexová metoda
- Gauss – Seidlova metody

Gradientní metody

Oproti komparativním metodám používají gradientní metody iterační algoritmus tak, aby zvyšování výsledků jednotlivých kroků úměrně odpovídalo gradientu kritériální funkce. Mezi tyto metody patří např.: [14]

- Newtonova metoda
- Metoda regula falsi
- Gradientní metoda s dlouhým krokem
- Metoda konjugovaných gradientů
- Metoda paralelních tečen

Metody náhodného vyhledávání

Rozdílem proti předcházejícím metodám je, že přírůstek proměnných závisí na náhodně generované veličině. Obecně lze tyto metody rozdělit na metody jednoduché, při kterých se pouze sleduje, zda má nový bod lepší hodnoty než bod předchozí a na metody s adaptací, u kterých je použita vyhodnocující strategie a která rozhoduje o správnosti velikosti a směru kroku. Navzdory jisté intuitivnosti jsou tyto metody mnohdy efektivnější zvláště tehdy, není-li kritériální funkce zadána analyticky. [14]

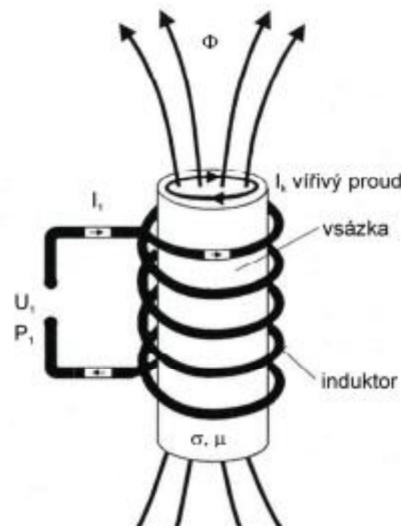
3 Indukční ohřev

Elektricky vodivé materiály (především kovy) lze energeticky velmi účinně a navíc bezkontaktně zahřát indukčním ohřevem. [18] Prochází-li vodičem (induktorem) střídavý harmonický proud, jsou tyto elektricky vodivé materiály (vsázka) vystaveny proměnnému elektromagnetickému poli, které v nich indukuje vířivé proudy. Volné elektrony v materiálu se dávají do pohybu (ve směru intenzity elektrického pole) interakcí elektromagnetického

vlnění, přičemž nabývají velkých rychlostí a velké kinetické energie. Srážkami elektronů s atomy vodivého materiálu dochází k zvýšení teploty materiálu, energie elektromagnetického vlnění se přemění na energii tepelnou. [19]

Výhodami indukčního ohřevu jsou rychlost ohřevu, vysoká účinnost, snadné řízení regulace teploty, možnost volby tloušťky prohřívané vrstvy, není zapotřebí kontakt mezi vsázkou a induktorem. Pro tavení, tváření, pájení, lisování za tepla, povrchové kalení a pro speciální účely (např. vakuové tavení, plasma) se dnes běžně využívá indukční ohřev. [20]

Pro dobrou účinnost přenosu energie je vhodné přizpůsobit tvar vodiče tvaru zahřívajícího předmětu. Pro účely této práce je zapotřebí souosá cívka válcového tvaru, jejíž vnitřní povrch bude do své dutiny vyzařovat válcové elektromagnetické vlnění. [19]



obr. 2.1 Válcové indukční zařízení (převzato z [20])

4 Elektromagnetické pole

Vlnový charakter elektromagnetického pole vyplývá z Maxwellových rovnic. Základním předpokladem je konečná rychlost šíření vlnových jevů. V prostoru se všechny fyzikální veličiny šíří určitou rychlostí, která je pro tento prostor charakteristická. [21]

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (4.2)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho \quad (4.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0 \quad (4.4)$$

Materiálové vztahy:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (4.6)$$

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (4.7)$$

Elektromagnetické vlnění skládající se ze složky elektrické a magnetické je příčné vlnění, přičemž jsou na sebe tyto složky vzájemně kolmé, stejně jako jsou kolmé na směr šíření. Elektromagnetické vlnění se šíří v prostředí definovaném konstantami γ , μ , ε (neohraničené homogenní izotropní prostředí). [21](*Pozn. pro odvození rovnic elektromagnetického vlnění viz příloha A.*)

5 Optimalizace spojování potrubí - ilustrativní příklady

Tato práce je věnována optimalizaci spojování potrubí indukčním ohřevem. Pro tuto optimalizaci bude vytvořen matematický a numerický model v programu Agros2D (viz kap. 5.1, 5.2), který bude následně zkoumán a porovnáván při různých vstupních podmínkách (viz kap. 6, 7). Sledovaným parametrem bude především závislost použité frekvence indukčního ohřevu pro potrubí z různých materiálů.

5.1 Formulace problému

Myšlenkou spojování potrubí pomocí indukčního ohřevu je zahřívání jednotlivých trubek tímto ohřevem tak, aby se hrdlo jedné trubky roztáhlo o požadovaný posun a následně šlo nasadit na druhou trubku. Po vychladnutí by takto do sebe vsazené trubky vytvořili dostatečně pevný spoj bez použití dalšího přídavného materiálu. Jak ale vyplyne v dalších kapitolách, tento záměr se nepodařilo realizovat, proto bude spojení provedeno za pomoci spojek. Snahou optimalizace jsou tyto kritéria:

- minimalizace použité frekvence indukčního ohřevu, ideální frekvence by byla 50 Hz, aby napájení zařízení mohlo probíhat z běžných sítí
- minimalizace teploty ohřívání spojek trubek
- minimalizace času indukčního ohřevu
- dosažení maximálního roztažení spojek trubek v radiální ose, aby mohlo dojít k nasazení spojky na trubku

Pro takovouto optimalizaci je třeba nejprve vytvořit matematický a numerický model, přičemž vycházíme z předpokladu, že se jedná o trojnásobně sdružený problém daný vzájemnou interakcí elektromagnetického pole, tepelného pole a termoelastického pole.

5.2 Matematický model

Elektromagnetické pole

Elektromagnetický problém při harmonické analýze je řešen v oblasti obsahující obecně nelineární elektricky vodivé materiály. V osově souměrném uspořádání, při využití vztahů $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ a $\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A}$, lze rozložení elektromagnetického pole popsat parciální diferenciální rovnicí pro vektorový magnetický potenciál takto:

$$\text{rot}\left(\frac{1}{\mu}\text{rot}\mathbf{A}\right) + \gamma\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{ext}, \quad (5.2.1)$$

kde μ je magnetická permeabilita, γ elektrická vodivost a \mathbf{J}_{ext} je vnější proudová hustota v poli cívky. Vztah:

$$w_j = \gamma\left(\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}\right)^2 \quad (5.2.2)$$

vyjadřuje objemové Joulovy ztráty ohřívající válcové těleso. [22]

Tepelné pole

Následující rovnice:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - w_j, \quad (5.2.3)$$

kde T je teplota, λ tepelná vodivost, ρ hustota materiálu a c_p specifické teplo při konstantním tlaku, popisuje přenos tepla v tepelně vodivém prostředí. [24].

Termoelastické pole

Lamého rovnice ve tvaru:

$$(\varphi + \psi) \operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{u} + \psi \Delta \mathbf{u} - (3\varphi + 2\psi) \alpha_T \operatorname{grad} T = -\mathbf{f}, \quad (5.2.4)$$

$$\varphi = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \psi = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (5.2.5)$$

kde $\varphi \geq 0, \psi \geq 0$ jsou koeficienty spojené s parametry materiálu, E je Youngův modul pružnosti, ν Poissonova konstanta, \mathbf{u} vektor posunu, α_T koeficient tepelné roztažnosti a \mathbf{f} vektor objemových vnitřních sil, popisuje problém strukturální analýzy. [22]

5.3 Numerický model

Pro řešení elektromagnetického pole definujeme dvojrozměrnou oblast pro vzduch. Do této oblasti jsou umístěny podoblasti představujících cívku a spojovací trubku pro roztažení. Pro pole tepelné a termoelastické definujeme oblasti cívky a trubky.

Pro správné vytvoření modelu je třeba zadat materiálové konstanty do oblastí polí elektromagnetického, tepelného a termoelastického.

Materiálovými konstantami zadávanými pro elektromagnetické pole, které určuje šíření siločar elektromagnetického pole, jsou permeabilita materiálu μ a vodivost materiálu γ (hodnoty pro jednotlivé materiály viz *tab. 5.3.1*). Řešíme harmonickou analýzu. Okrajová podmínka se zadává pro magnetický vektorový potenciál na hranici řešené oblasti, platí $\mathbf{A} = 0$.

tab. 5.3.1 Materiálové konstanty pro elektromagnetické pole

	$\mu_r[-]$	γ [S/m]
měď	0,99	49,2E6
hliník	1	30E6
ocel	8000	7,6E6
vzduch	1	0

Materiálovými konstantami zadávanými pro teplotní pole, které určuje šíření tepla v materiálu a přestup do okolí, jsou teplotní vodivost λ , hustota materiálu ρ a měrné teplo c_p (hodnoty pro jednotlivé materiály viz tab. 5.3.2). Řešíme přechodový stav s počáteční teplotou $20\text{ }^\circ\text{C}$. Okrajová podmínka definující přestup tepla do okolí se nastaví na hranách modelované trubky a zvolíme okolní teplotu $T_e = 293,15\text{ [K]}$, koeficient přestupu tepla $a = 20\text{ [W m}^{-2}\text{ K}^{-1}\text{]}$ emisivitu $\varepsilon = 0\text{ [-]}$.

tab. 5.3.2 Materiálové konstanty pro teplotní pole

	λ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	ρ [kg m ⁻³]	c_p [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
měď	391	8920	383
hliník	210	2700	896
ocel	50	7850	460
vzduch	-	-	-

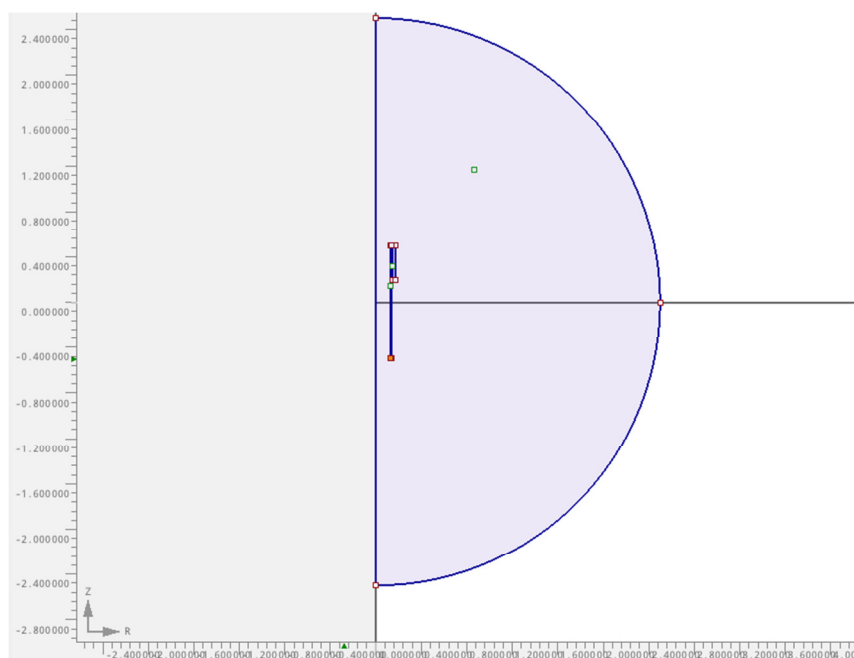
Materiálovými konstantami zadávanými pro termoelastické pole, které řeší roztažnost materiálů v závislosti na teplotě, jsou Youngův modul E , Poissonovo číslo ν a koeficient teplotní roztažnosti α (hodnoty pro jednotlivé materiály viz tab. 5.3.3). Aby se materiál mohl roztahovat do všech směrů, je třeba nastavit okrajovou podmínku *volná – volná*.

tab. 5.3.3 Materiálové konstanty pro teplotní pole

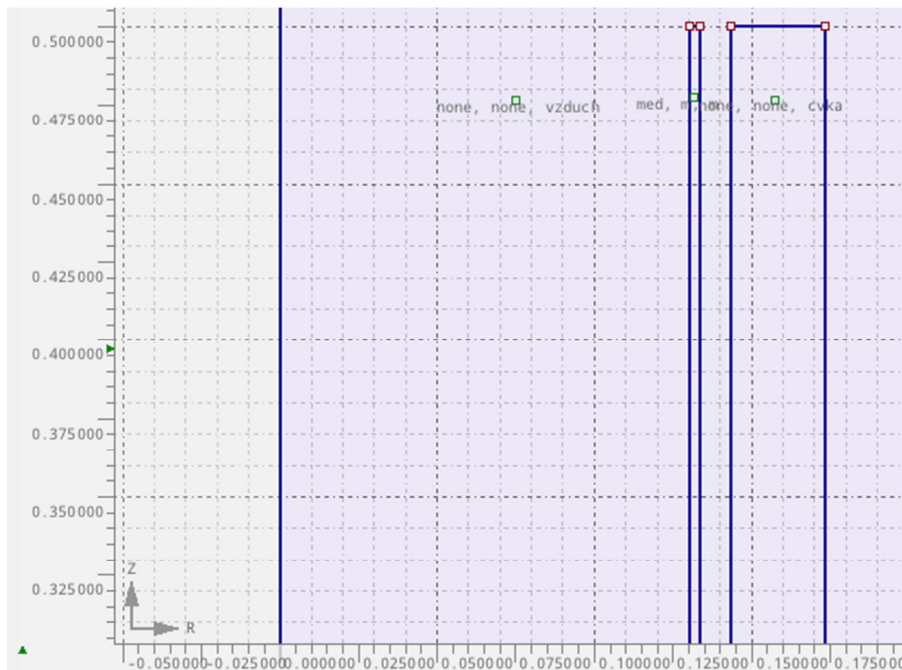
	E [GPa]	ν [-]	α [K ⁻¹]
měď	130	0,33	16,9E-6
hliník	70	0,31	23,4E-6
ocel	210	0,31	11E-6
vzduch	-	-	-

Pro provedené simulace v této práci je využit program Agros2D, což je univerzální aplikace pro řešení fyzikálních polí, který je vyvíjen na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni. Program je napsán v jazyce C++ a k řešení parciálních diferenciálních rovnic využívá metodu konečných prvků vyššího řádu přesnosti, výsledkem je tedy dostatečně přesné přibližné řešení. Program je rozdělen na tři hlavní části. Jedná se o preprocessor, který se využívá k určení řešeného modelu, volby materiálových vlastností a geometrie, procesor, který je určen k řešení daného problému a postprocessor, který slouží ke zhodnocení vypočtených údajů. [23, 24]

Na *obr. 5.3.1a* 5.3.2 je zobrazen model sítě vytvořený v programu Agros2D. V následujících kapitolách budou zkoumány vlivy různých frekvencí na měděné, hliníkové a ocelové potrubí různých rozměrů.



obr. 5.3.1 Numerický model vytvořen v programu Agros2D



obr. 5.3.2 Numerický model vytvořen v programu Agros2D (detail)

Při respektování všech kritérií by bylo nutno řešit multikriteriální úlohu. Pro optimalizační výpočet byla vybrána dvě kritéria:

- minimalizace teploty ohříváných spojek trubek – f_1
- dosažení maximálního roztažení spojky trubek v radiální ose f_2

Podle výše uvedených kritérií je sestavena kriteriální funkce. Optimalizace je provedena vždy pro konstantní rozměr cívky.

V následující kapitole jsou uvedeny získané výpočty a optimalizace je prováděna také metodou vhodného výběru.

6 Simulace a výsledky

Simulace budou provedeny na jeden metr délky pro tři různé materiály trubek, které se běžně používají v praxi. Jedná se o měděné trubky (fosforem dezoxidovaná měď – EN CW 024A), hliníkové trubky (EN AW 6060) a ocelové trubky (ČSN 11 343). Průměry a tloušťky trubek jsou určeny podle rozměrových norem, v této práci jsou simulovány běžně používané rozměry. Sledovanými parametry jsou teplota trubek a s tím související roztažení trubek

v radiální ose (posun d_r) při indukčním ohřevu za použití různých frekvencí. Doby ohřevu při jednotlivých simulacích jsou voleny tak, aby nedošlo k tání materiálů (měď – 1085 °C, hliník – 660 °C, ocel – 1500 °C), maximální doba k ohřevu je určena na 180 vteřin. Jelikož roztažení trubky není rovnoměrné, posun d_r je vždy měřen v nejužším místě trubky.

6.1 Rozměry cívky

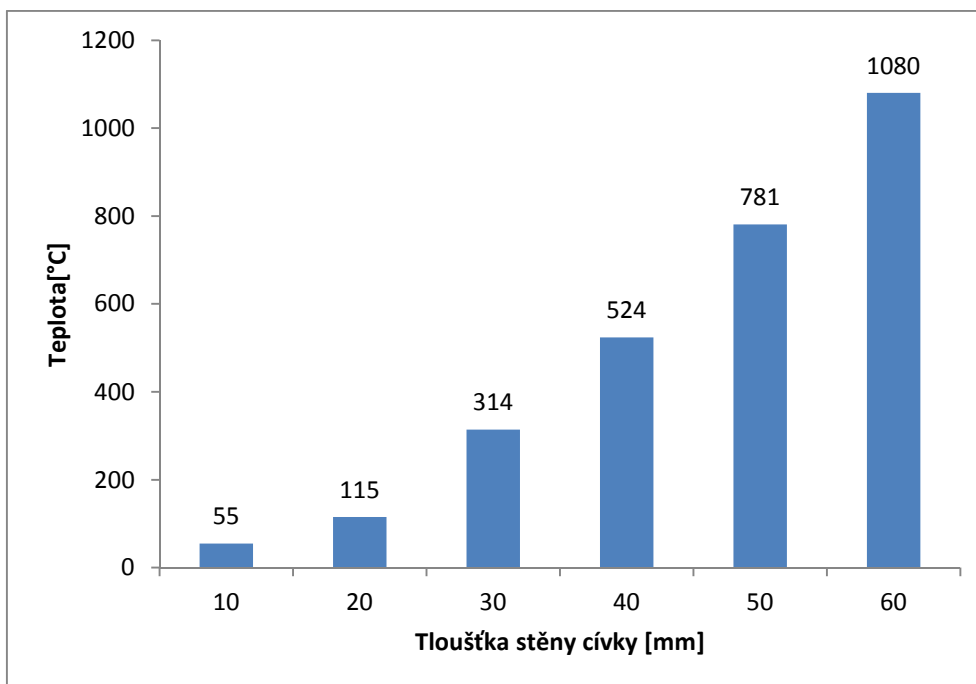
Pro simulace v této práci bylo nejprve nutno určit rozměry cívky pro indukční ohřev. Cívka válcového tvaru, do jejíž dutiny budou vkládány trubky, musí mít vnitřní průměr větší než vkládané trubky. Největší zkoumaný vnější průměr trubky bude 267 mm, zároveň je třeba počítat se vzduchovou mezerou mezi cívkou a trubkou alespoň 10 mm. Vnitřní průměr cívky tedy vychází na 287 mm.

Dále potřebujeme určit vnější průměr cívky neboli tloušťku stěny cívky. Na *grafu 6.1.1* je znázorněna závislost teploty trubky na tloušťce cívky při simulaci měděné trubky o vnějším průměru 267 mm a tloušťce stěny 3 mm při frekvenci 50 Hz. *Graf 6.1.2* zobrazuje závislost roztažení (posun d_r) téže trubky v radiálním směru. Doby simulací indukčního ohřevu jsou zvoleny tak, aby nedošlo k tání měřeného materiálu trubky (např. měď – 1085 °C). Zkoumané tloušťky stěny cívky byly 10, 20, 30, 40, 50 a 60 mm. Je patrné, že s rostoucí tloušťkou stěny cívky roste teplota a roztažení trubky. Stejně reagují i hliníkové a ocelové trubky (*viz příloha B*).

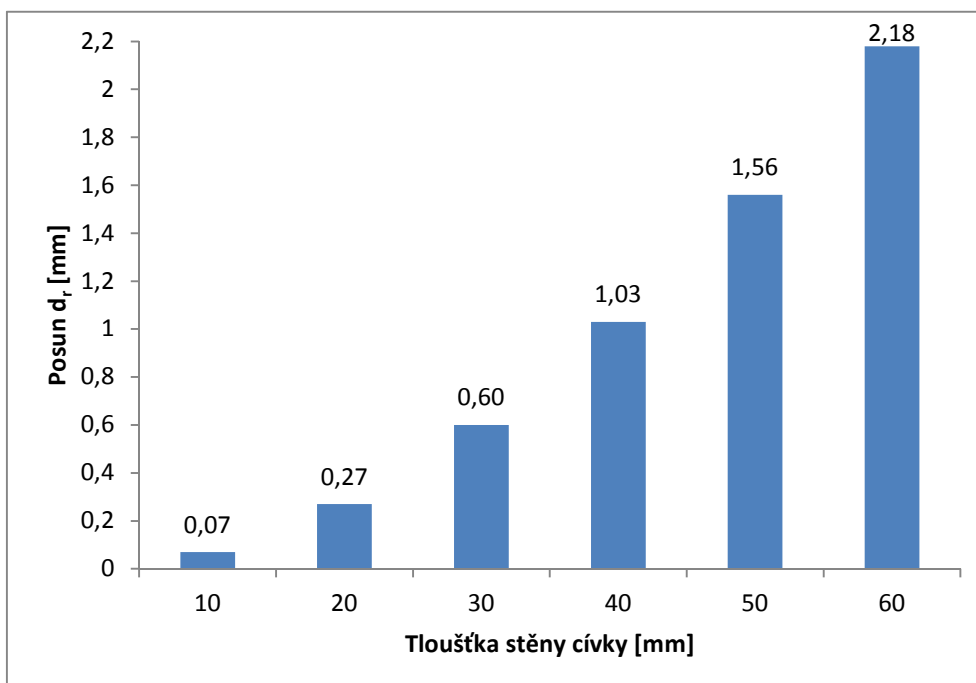
Dalším rozměrem, který je zapotřebí určit, je délka cívky. *Grafy 6.1.3* a *6.1.4* zobrazují závislost teploty trubky, respektive posun d_r na délce cívky. Zvolenými délkami jsou 100, 200, 300, 400 a 500 mm. I zde je patrná přímá úměra mezi délkou a teplotou, respektive roztažením cívky, ovšem mezi hodnotami 300 mm a 500 mm již nejsou patrné tak velké rozdíly (*pozn. pro další grafy a naměřené hodnoty k této kapitole viz příloha B*).

S přihlédnutím k výše zmíněnému bude pro další simulace využita cívka s tloušťkou stěny 30 mm a délkou 300 mm.

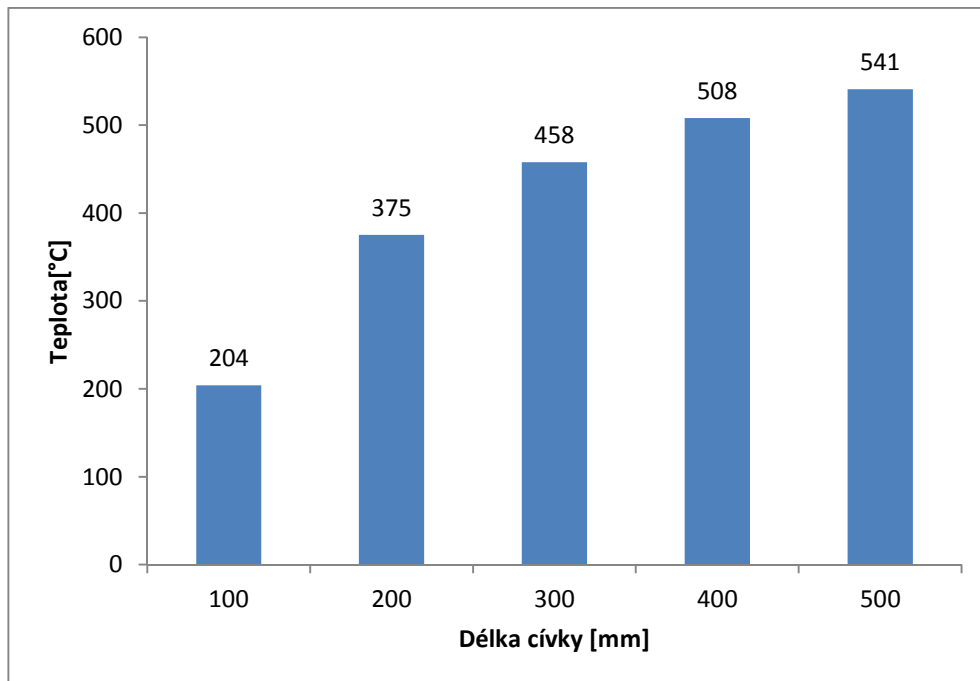
graf 6.1.1 Teplota v závislosti na tloušťce stěny cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 60 s)



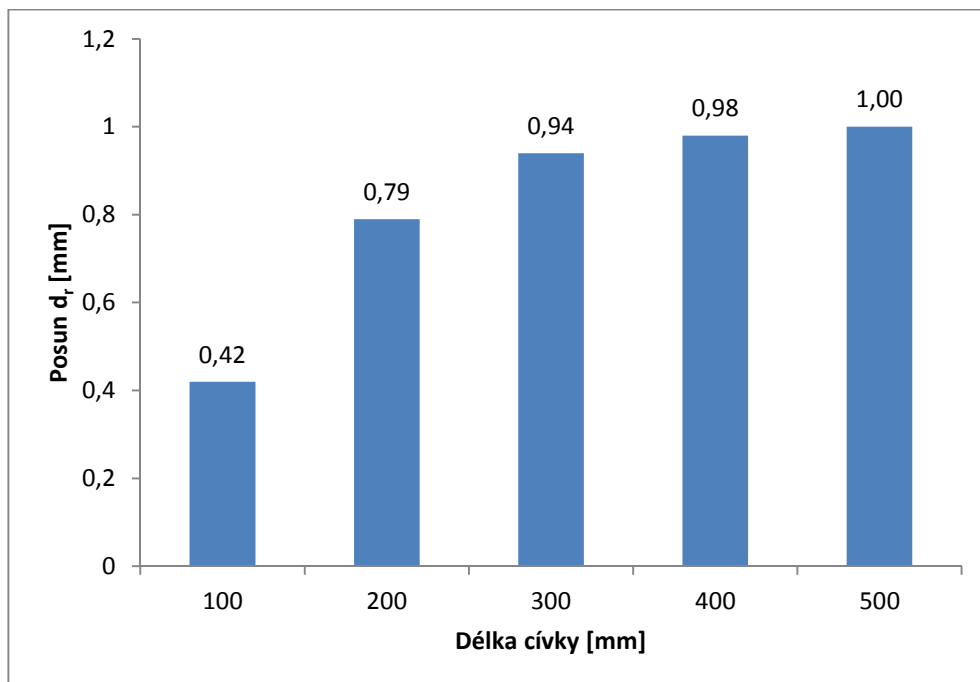
graf 6.1.2 Posun d_r v závislosti na tloušťce stěny cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 60 s)



graf 6.1.3 Teplota v závislosti na délce cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 100 s)



graf 6.1.4 Posun d_r v závislosti na délce cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 100 s)

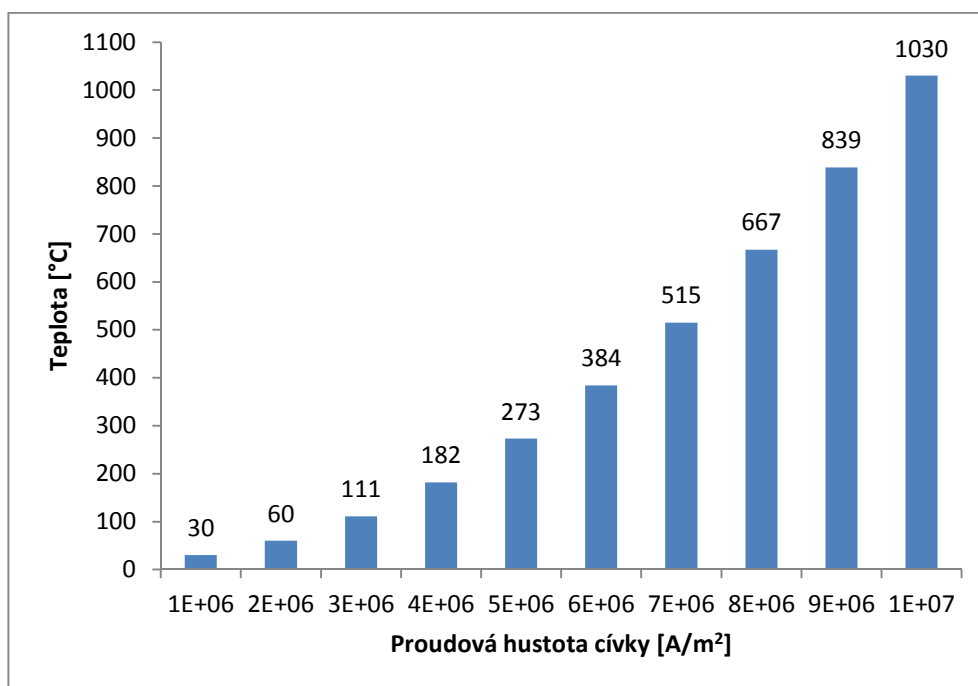


6.2 Proud cívky

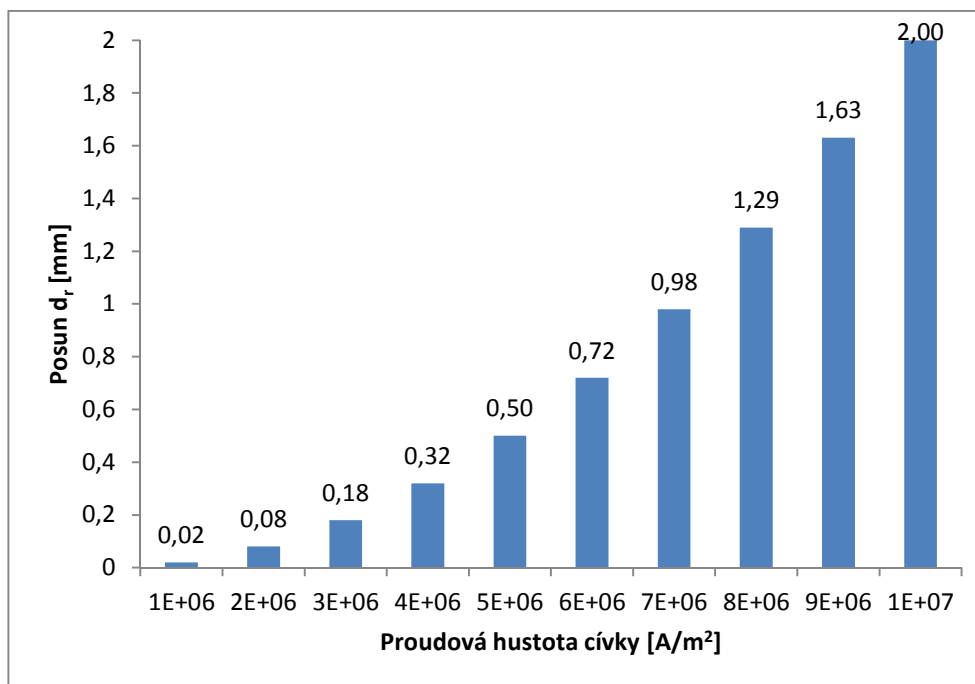
Dalším důležitým faktorem při prováděných simulacích je volba proudu cívky, v tomto případě budeme pracovat s proudovou hustotou v cívce. Závislost teploty trubky a radiálního posunu trubky lze vidět na *grafech 6.2.1 a 6.2.2*. Simulace zde zobrazena byla provedena na měděné trubce o vnějším průměru 267 mm a tloušťce stěny 3 mm při frekvenci 50 Hz (*pozn. pro další grafy a naměřené hodnoty k této kapitole viz příloha C*). Proudová hustota byla v rozsahu $1 \cdot 10^6 - 1 \cdot 10^7 \text{ A/m}^2$.

S přihlédnutím k získaným výsledkům a k možnosti chlazení cívky pouze vzduchem bude dále uvažována proudová hustota $5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$.

graf 6.2.1 Teplota v závislosti na proudové hustotě cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 50 s)



graf 6.2.2 Posun d_r v závislosti na proudové hustotě cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 50 s)



6.3 Rozložení teploty

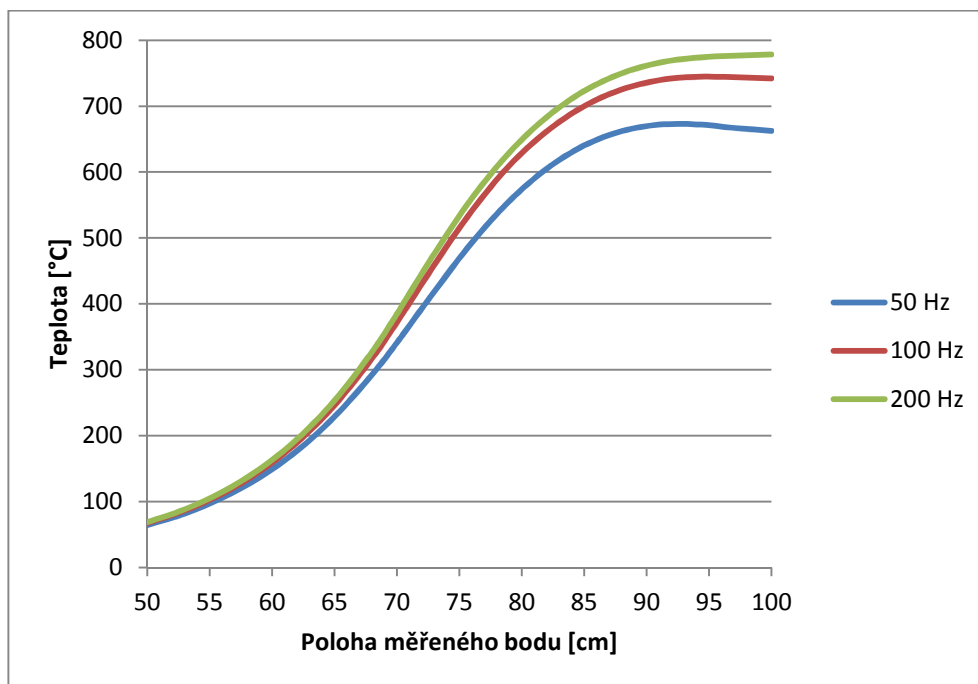
V této kapitole je zobrazen průběh teploty v trubkách různých materiálů při frekvencích 100, 200 a 300 Hz. Teplota byla měřena v 18 různých bodech uvnitř trubky, přičemž první bod byl umístěn do poloviny délky trubky (na grafech zobrazen jako bod v 50cm) a dále se pokračovalo po třech centimetrech (s výjimkou mezi body v 68cm a 70cm), až k bodu měřenému na konci trubky uvnitř dutiny cívky (na grafech zobrazen jako bod v 100cm). Skupina bodů (v rozmezí 50 až 70 cm) je tedy umístěna ještě vně dutiny cívky a druhá skupina (v rozmezí 70 až 100 cm) je umístěna uvnitř dutiny cívky.

Podíváme-li se na *graf 6.3.1*, můžeme pozorovat, že teplota v měděné trubce vzrůstá od nulového bodu až k hranici cívky, poté je nárůst strmější a kolem 85. centimetru se růst zpomaluje a ke konci trubky je již takřka konstantní. Hliníkový materiál vykazuje podobný průběh teploty jako měděný, ale v posledních 10cm trubky začíná teplota klesat v řádech desítek stupňů Celsia. Nejkomplikovanější rozložení teploty sledujeme u ocelových trubek, jelikož teplota začne v poslední části trubky prudce klesat, tudíž bude u tohoto materiálu složitější roztažení trubky na požadovaný průměr. S vyšší frekvencí dle předpokladů roste teplota v trubkách, u měděných trubek není rozdíl teplot tak markantní jako u hliníkových

nebo ještě více u ocelových materiálů (*pozn. pro schématický náhled měřených bodů, pro další grafy a naměřené hodnoty k této kapitole viz příloha D*).

graf 6.3.1 Rozložení teploty v měděné trubce

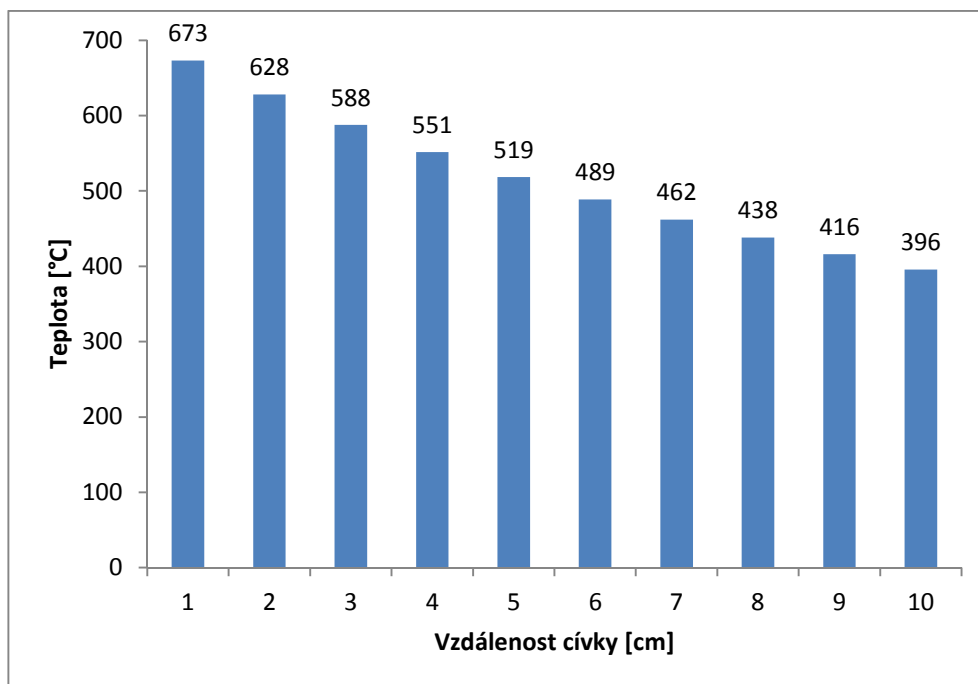
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 180 s)



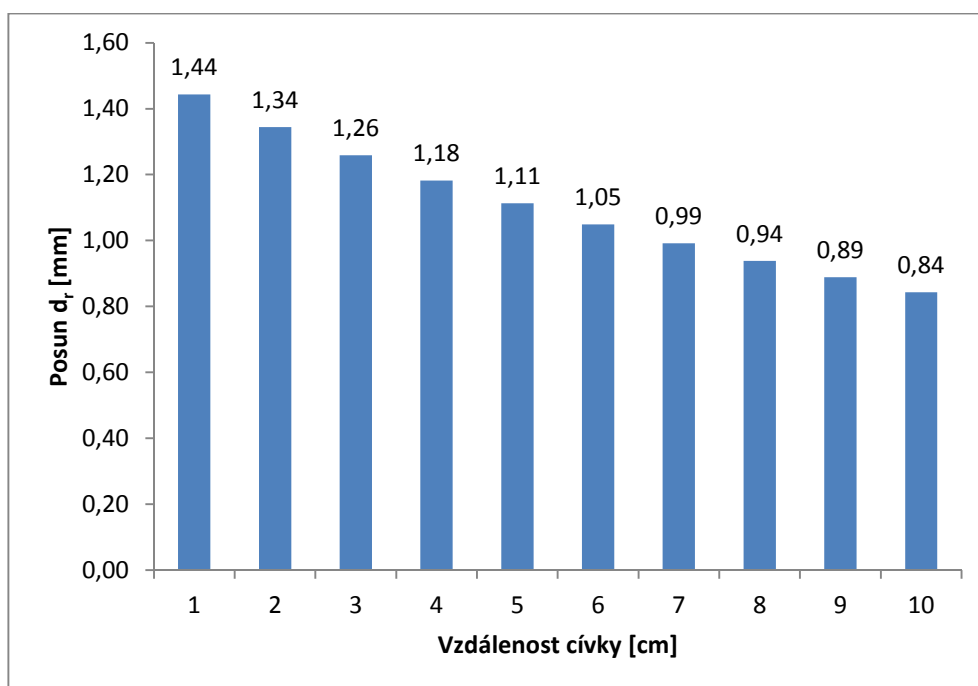
6.4 Vzdálenost cívky od trubky

Jak je zmíněno již výše, vnitřní průměr cívky je 287 mm, a jelikož se do dutiny cívky budou vkládat trubky o různých průměrech, bude se vzdálenost mezi cívkou a ohřívanou trubkou zvětšovat. Závislost teploty a posunu d_r na rostoucí vzdálenosti zobrazují grafy 6.4.1 a 6.4.2. Vzdálenost cívky od trubky byla modelována pro 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 a 10 cm. S rostoucí vzdáleností pak samozřejmě klesá teplota trubky a její roztažnost. Pokles mezi vzdáleností cívky 1 cm a vzdáleností 10 cm u měděného materiálu je 41 % pro teplotu a 42 % pro posun d_r . U hliníkového materiálu jsou tyto hodnoty 44 % a 39 % a u ocelových materiálů shodně 34 % (*pozn. pro další grafy a naměřené hodnoty k této kapitole viz příloha E*).

graf 6.4.1 Teplota měděné trubky v závislosti na vzdálenosti cívky
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 180 s)



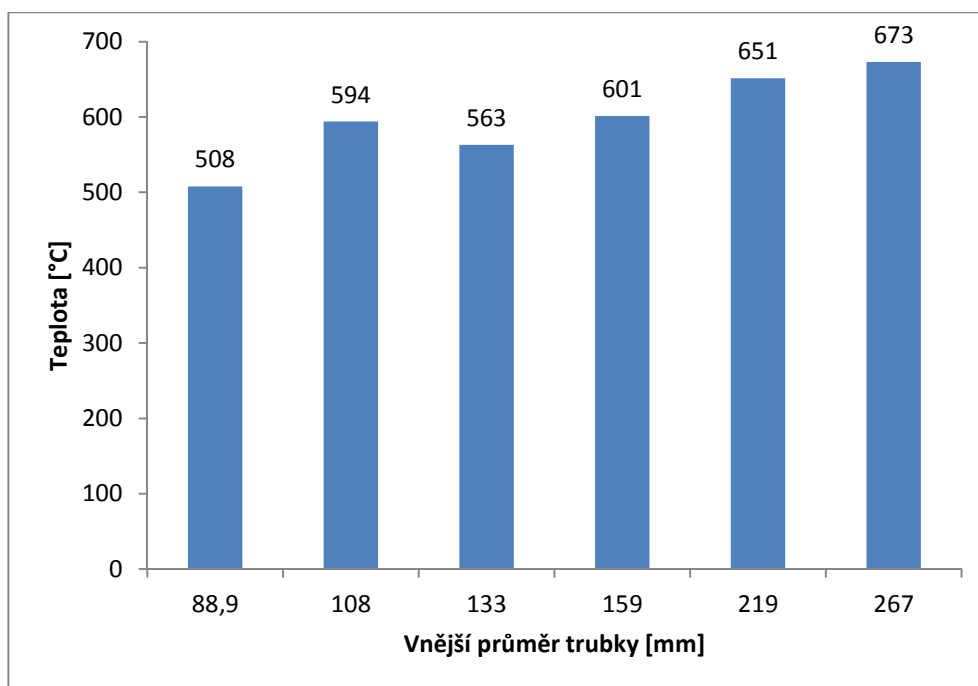
graf 6.4.2 Posun d_r měděné trubky v závislosti na vzdálenosti cívky
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 180 s)



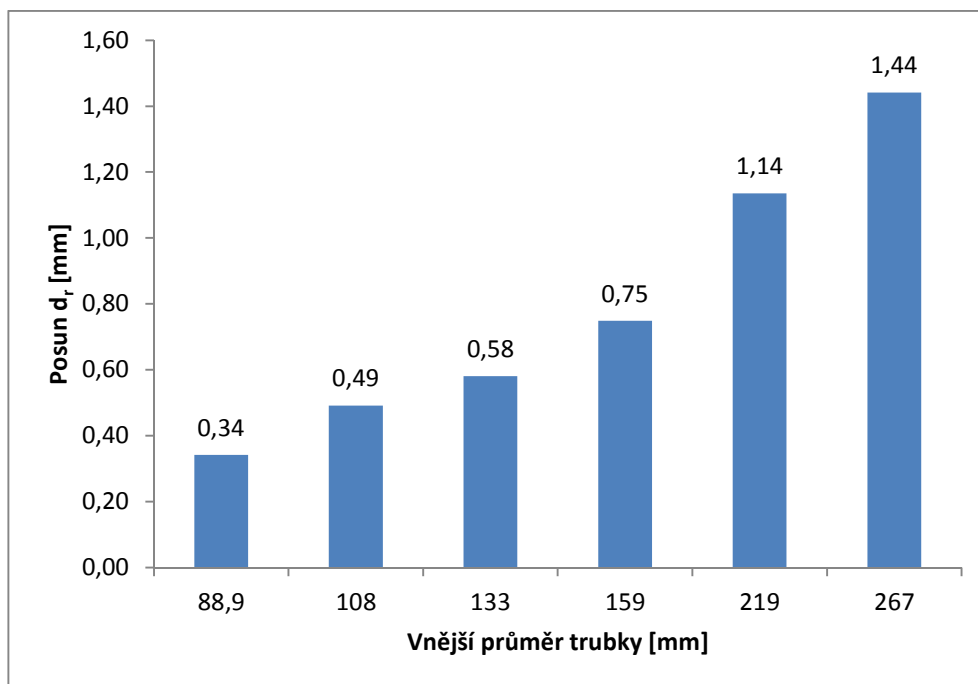
6.5 Průměr trubky

Teplota a roztažení trubky také závisí na průměru trubky. V této kapitole je tato závislost ukázána na vnějších průměrech trubek 267, 219, 159, 133, 108 a 89,1 mm (viz grafy 6.5.1 a 6.5.2). U měděných a hliníkových trubek je patrné, že teplota popřípadě posun d_r se se zvětšujícím se průměrem zvyšuje (výjimkou jsou hodnoty u měděných trubek o průměrech 133 a 108 mm, kde je teplota u menšího průměru větší, ale to je dáno rozdílnou tloušťkou stěn trubek – problematika rozdílné tloušťky trubek je popsána v následující kapitole 6.6). Naopak u ocelových trubek se teplota snižuje s rostoucím průměrem, nicméně posun d_r stoupá se zvětšujícím se průměrem stejně jako u měděných a hliníkových trubek (pozn. pro další grafy a naměřené hodnoty k této kapitole viz příloha F).

graf 6.5.1 Teplota měděných trubek v závislosti na vnějším průměru trubek
(frekvence 50 Hz, doba ohřevu 180 s)



graf 6.5.2 Posun d_r měděných trubek v závislosti na vnějším průměru trubek
(frekvence 50 Hz, doba ohřevu 180 s)

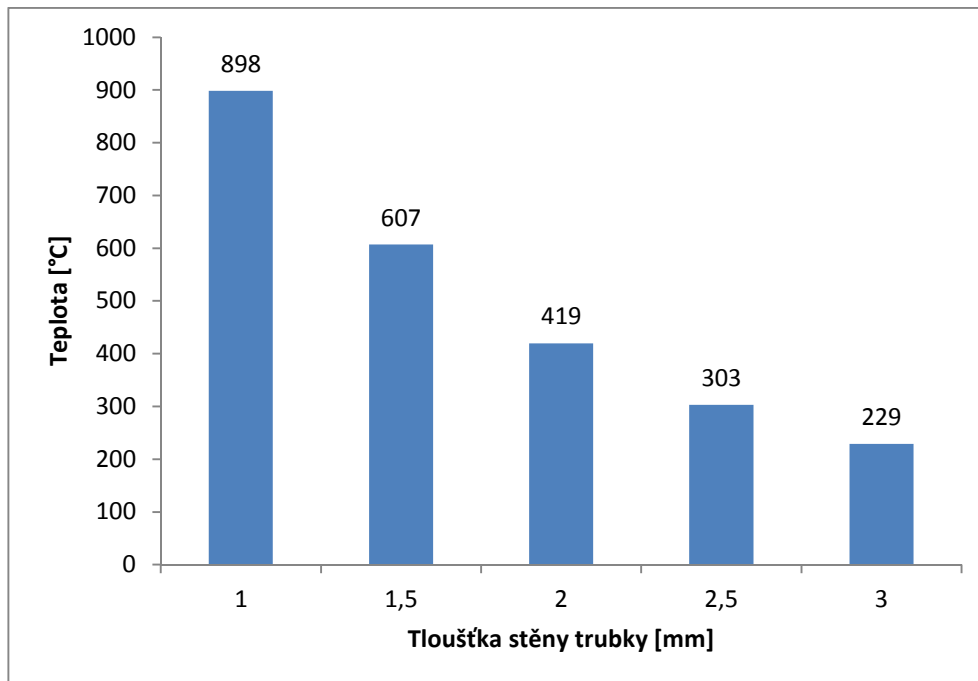


6.6 Tloušťka stěny trubky

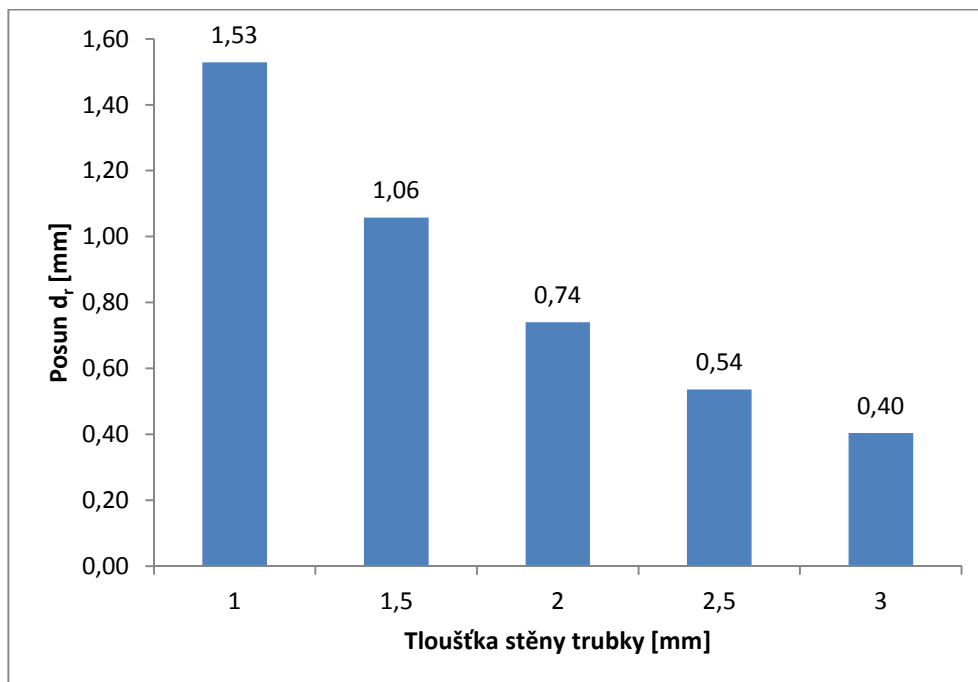
V předešlé kapitole bylo zmíněno, že tloušťka stěny trubky také ovlivňuje měřené parametry. Tloušťky, kterými se zabýváme, jsou 1, 1,5, 2, 2,5 a 3 mm. Graf 6.6.1 zobrazuje závislost teploty trubky na zvětšující se tloušťce. Pro simulaci zde byla použita trubka o průměru 267 mm, která se běžně vyrábí s tloušťkou stěny 3 mm, proto je třeba brát tuto simulaci pouze jako ilustrativní příklad závislosti teploty na tloušťce stěny a závislosti posunu d_r na tloušťce stěny, kterou zobrazuje graf 6.6.2.

Pokles teploty pro nejširší variantu měděné trubky oproti nejužší variantě je 75 % a s tím samozřejmě i menší roztažení trubky, přesněji 74 %. Pro hliník dostáváme pokles teploty o 63 % a o 61 % menší roztažení trubky, pro ocel pak pokles teploty o 43 % a o 45 % menší roztažení trubky (pozn. pro další grafy a naměřené hodnoty k této kapitole viz příloha G).

graf 6.6.1 Teplota měděné trubky v závislosti na tloušťce stěny trubky
(vnější průměr 267 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 40 s)



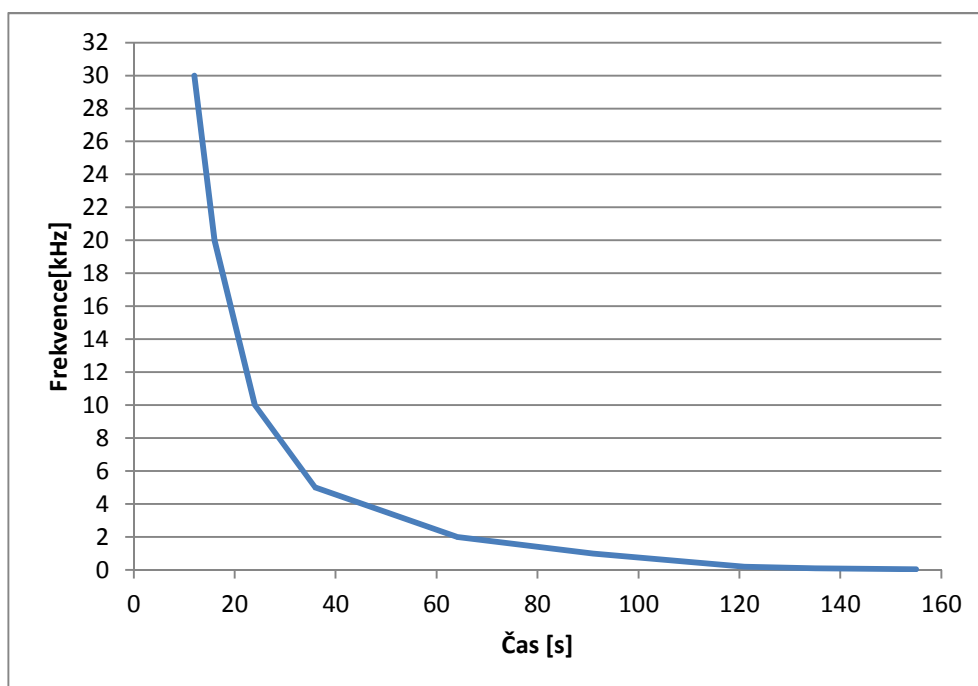
graf 6.6.2 Posun d_r měděné trubky v závislosti na tloušťce stěny trubky
(vnější průměr 267 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 40 s)



6.7 Frekvence

Důležitým faktorem pro indukční ohřev je volba frekvence. *Graf 6.7.1* zobrazuje časovou závislost indukčního ohřevu na frekvenci, čím větší frekvence je použita, tím rychlejší ohřev bude. Byla zde měřena vždy doba, za kterou dosáhla trubka v určitém bodu určité teploty, pro měď to bylo 600 °C, pro hliník 400 °C a pro ocel 1000 °C. Další grafy (*viz příloha H*) zobrazují závislost teploty a posunu d_r na použité frekvenci. Lze pozorovat, že zatímco u měděných a hliníkových trubek je závislost v podstatě lineární, u ocelových trubek sleduje prudký růst hodnot až do 0,5 kHz – 1 kHz a poté jsou hodnoty již skoro konstantní (*pozn. pro další grafy a naměřené hodnoty k této kapitole viz příloha H*).

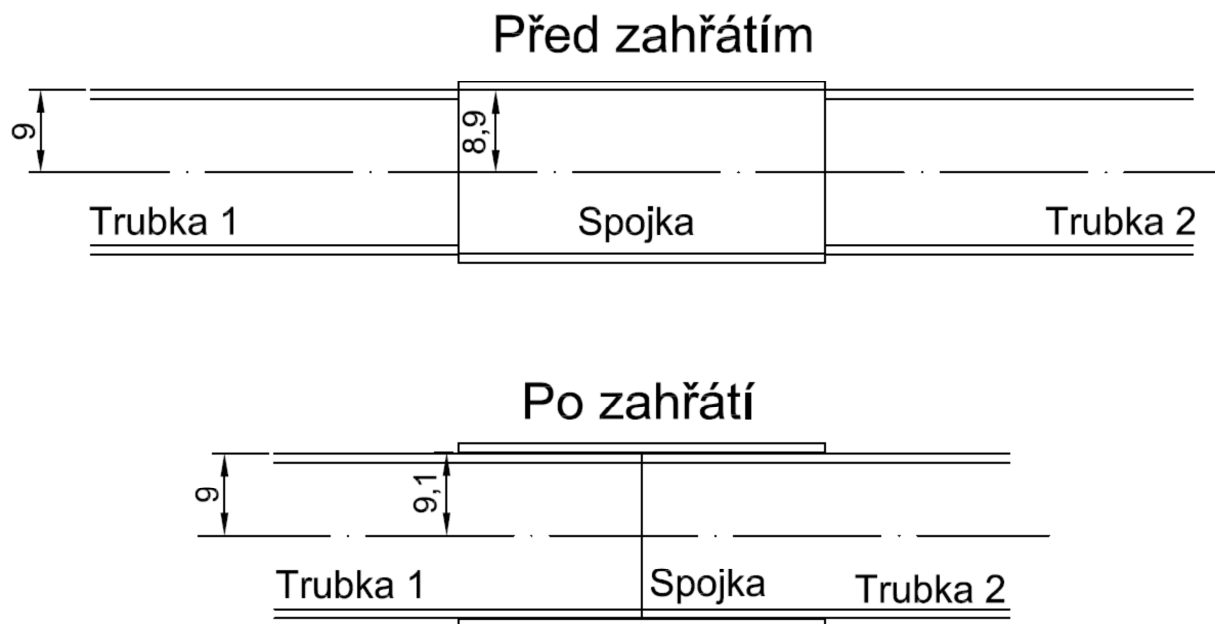
graf 6.7.1 Rychlost ohřevu měděné trubky v závislosti na frekvenci
(vnější průměr 267 mm, čas měřen v době dosažení 600 °C)



7 Simulace a výsledky – spojování potrubí

Z výsledků předchozí kapitoly plyne, že je prakticky nemožné spojovat potrubí zahřátím jedné z trubek a následným vložení do sebe. Roztažení trubky by muselo být větší než 3 mm pro trubky s tloušťkou stěny 3 mm (větší než 2,5 mm pro trubky s tloušťkou stěny 2,5 mm atd.). Tohoto roztažení ale nejsme schopni dosáhnout před kritickou teplotou trubek. Tato kapitola je tedy zaměřena na spojování potrubí pomocí spojky.

Budeme uvažovat spojku ze stejného materiálu, jaký je použit pro spojované trubky. Dále je potřeba určit délku zasunutí trubky do spojky, která může být v podstatě libovolná. Pro simulace v této práci je zvolena délka zasunutí trubky 2 cm, a proto bude spojka dlouhá celkem 4 cm. Tloušťka stěny spojky bude stejná jako tloušťka stěny spojované trubky. Vnitřní poloměr spojky bude o 0,1 mm menší než vnější poloměr trubky a snahou bude spojku roztáhnout o 0,2 mm tak, aby do spojky šla trubka vložit. Po vychladnutí a následném stažení spojky vznikne dostatečně pevné spojení. Na *obr. 7.1* je naznačeno spojení trubek pomocí spojky. V *tab. 7.1* jsou rozměry trubek, které budeme spojovat pomocí spjek.



obr. 7.1 Spojení trubek pomocí spojky

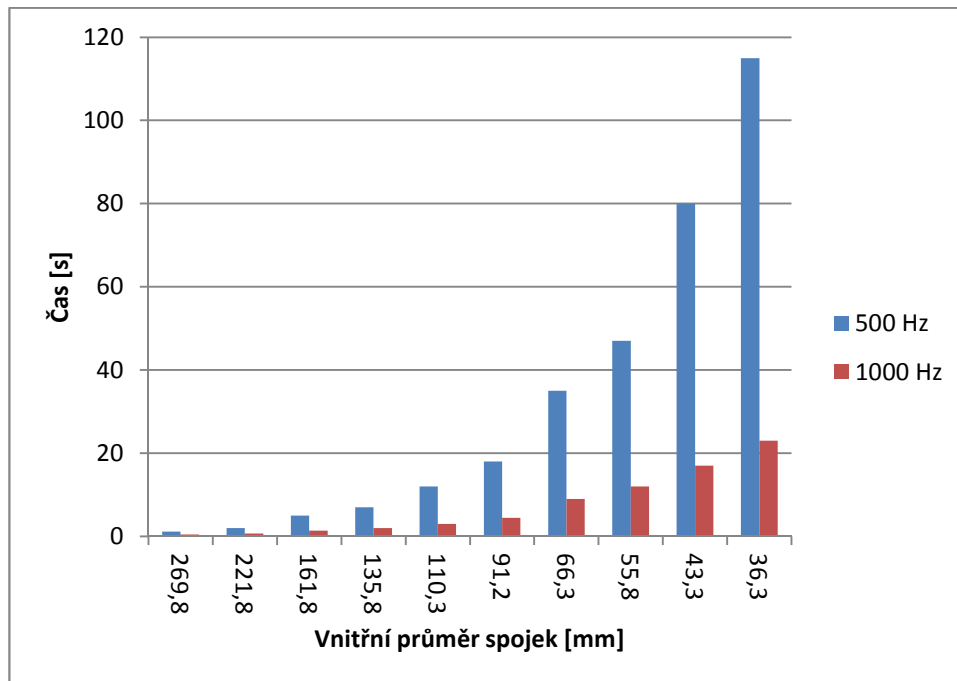
tab. 7.1 Rozměry měřených trubek

Vnější průměr/tloušťka stěny trubky [mm/mm]	Vnitřní průměr/tloušťka stěny spojky [mm / mm]
267 / 3	269,8 / 3
219 / 3	221,8 / 3
159 / 3	161,8 / 3
133 / 3	135,8 / 3
108 / 2,5	110,3 / 2,5
88,9 / 2,5	91,2 / 2,5
64 / 2	66,3 / 2
54 / 2	55,8 / 2
42 / 1,5	43,3 / 1,5
35 / 1,5	36,3 / 1,5
30 / 1,5	31,3 / 1,5
28 / 1,5	29,3 / 1,5
15 / 1	15,8 / 1
8 / 1	8,8 / 1

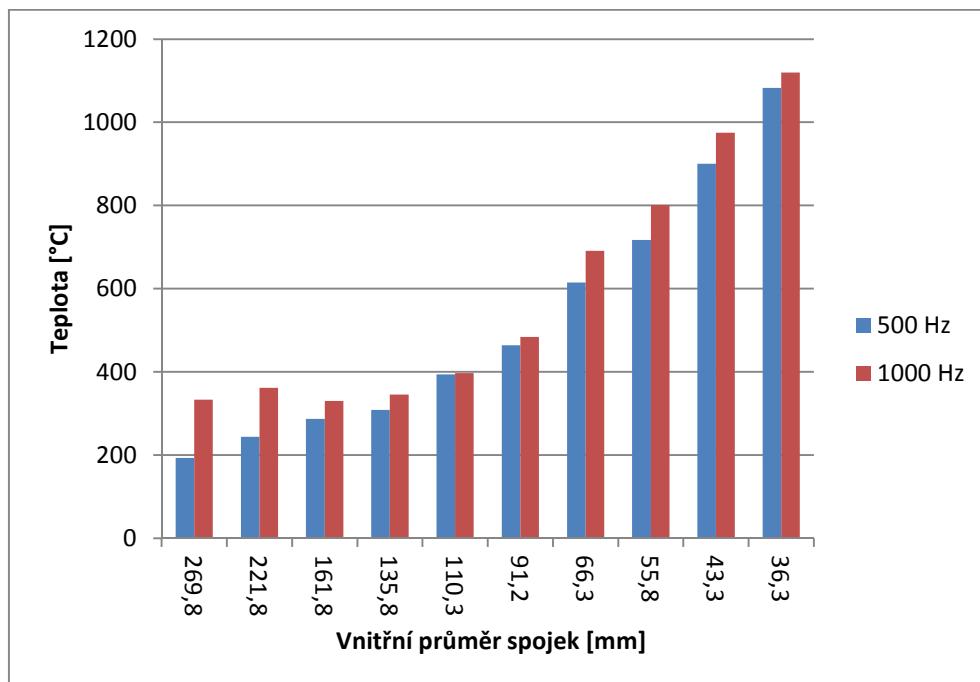
7.1 Ocelové spojky

Mějme různé frekvence (50, 100, 200, 500, 1 000, 2 000, 5 000, 10 000, 20 000 a 30 000 Hz), při kterých budeme simulovat chování jednotlivých ocelových spojek. Sledovanými parametry bude čas a teplota při roztažení spojky o 0,2 mm. Získané hodnoty prezentuje *graf 7.1.1* a *graf 7.1.2*. Snahou je na základě těchto parametrů získat optimální frekvenci pro indukční ohřev. Již u spojky o vnitřním průměru 269,8 mm, vlivem příliš vysoké teploty (> 1 500 °C), se jeví frekvence 2 000 Hz a vyšší jako nevhodné, u dalších spojek tedy nebyly dále zkoumány. Se snižujícím průměrem spojek byly vyloučeny i frekvence nižší (50, 100 a 200 Hz), jelikož s jejich použitím se nepodařilo získat požadované roztažení spojek. Jako vhodné frekvence se tedy projeví 500 a 1 000 Hz, při jejichž použití bylo dosaženo dostatečného roztažení spojek při teplotě nepřesahující teplotu tání materiálu, v relativně slušném čase a to až do spojky o vnitřním průměru 36,3 mm. Pro spojky o vnitřním průměru 269,8 a 221,8 mm (při frekvenci 1 000 Hz) dokonce menší než jedna vteřina (*pozn. pro naměřené hodnoty viz příloha I*).

graf 7.1.1 Potřebný čas pro posun $d_r > 0,2$ pro různé průměry použitých spojek
(frekvence 500 Hz a 1000 Hz)



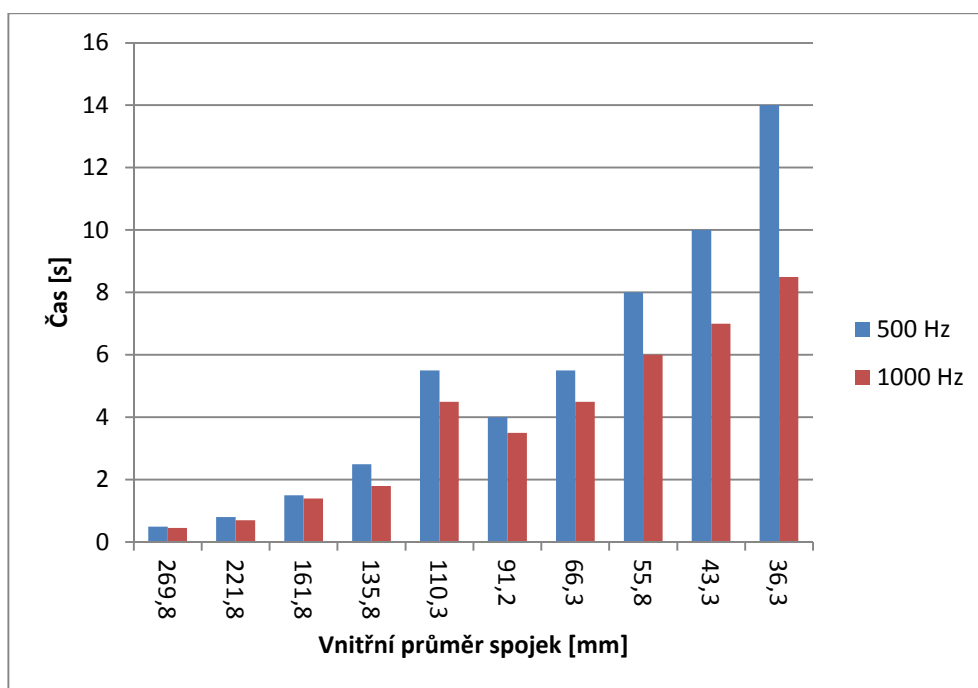
graf 7.1.2 Dosažená teplota při posunu $d_r > 0,2$ pro různé průměry použitých spojek
(frekvence 500 Hz a 1000 Hz)



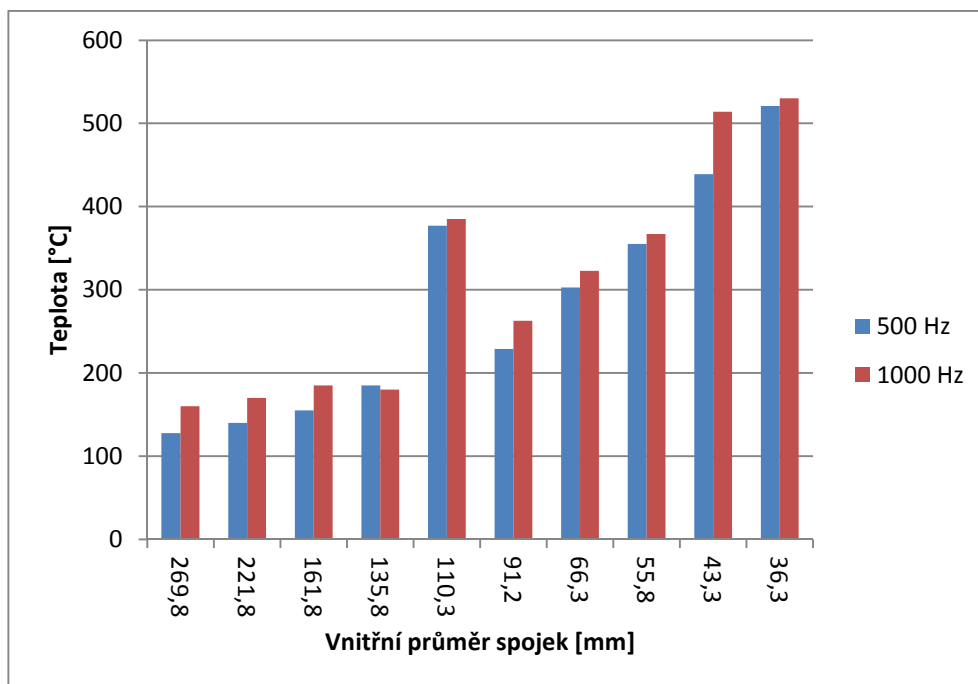
7.2 Hliníkové spojky

Jelikož hledáme optimální řešení pro všechny materiály, byly pro simulace hliníkových spojek použity frekvence 500 a 1 000 Hz, protože ty se výše projeví jako jediné možné u ocelových spojek. Při použití těchto frekvencí nebyl problém dosáhnout požadovaného roztažení pro všechny spojky od vnitřního průměru 269,8 mm až do 36,3 mm. Časy potřebné pro roztažení byly rychlejší, než časy potřebné pro ocelové spojky (viz *graf 7.2.1*). Jak zobrazuje *graf 7.2.2*, u spojky o vnitřním průměru 36,3 mm se teplota pohybovala kolem 530 °C, je tedy důležité nepřekračovat určený čas ohřevu, aby u spojky nedošlo k tavení materiálu (*pozn. pro naměřené hodnoty viz příloha I*).

graf 7.2.1 Potřebný čas pro posun $d_{i>0,2}$ pro různé průměry použitých spojek (frekvence 500 Hz a 1000 Hz)



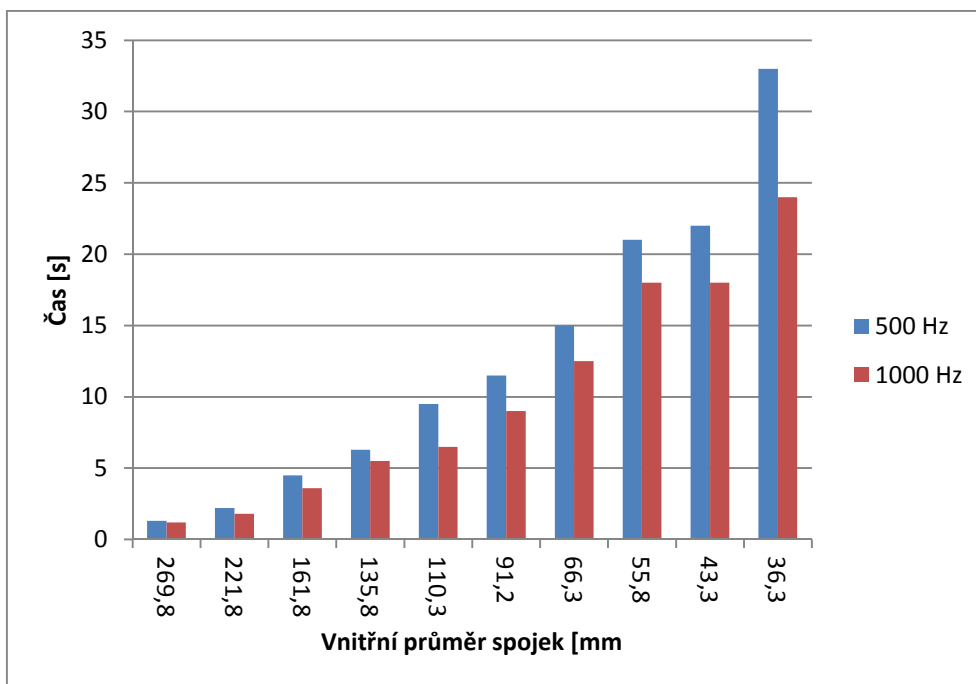
graf 7.2.2 Dosažená teplota při posunu $d_r > 0,2$ pro různé průměry použitých spojek
(frekvence 500 Hz a 1000 Hz)



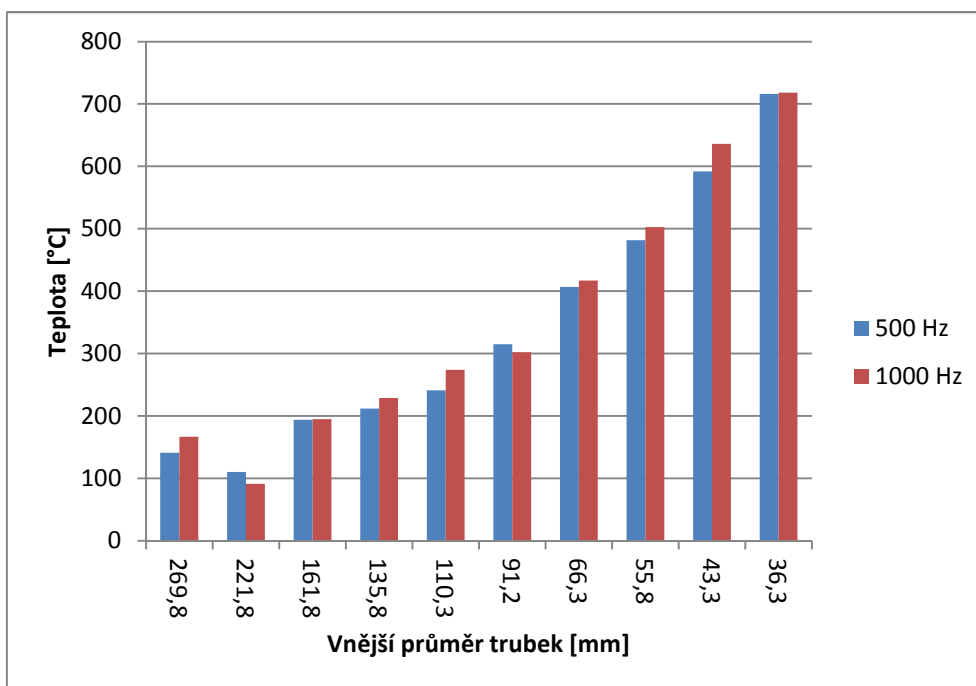
7.3 Měděné spojky

I pro měděné spojky v rámci optimalizace uvažujeme frekvence 500 a 1 000 Hz. Jak zobrazuje *graf 7.3.1*, hodnoty potřebných časů pro roztažení měděných spojek se pohybují někde mezi časy hliníkových a ocelových spojek. Teploty, které můžeme vidět v *grafu 7.3.2*, se i u spojky nejmenšího vnějšího průměru pohybují v bezpečné zóně, nemusíme se zde tedy obávat tavení materiálu (*pozn. pro naměřené hodnoty viz příloha I*).

graf 7.3.1 Potřebný čas pro posun $d_r > 0,2$ pro různé průměry použitých spojek
(frekvence 500 Hz a 1000 Hz)



graf 7.3.2 Dosažená teplota při posunu $d_r > 0,2$ pro různé průměry použitých spojek
(frekvence 500 Hz a 1000 Hz)



Závěr

Cílem této práce byla optimalizace spojování potrubí použitím indukčního ohřevu nalezením takové frekvence, která by byla vhodná pro co nejvíce spojovaných trubek různých průměrů a materiálů. Stavebním kamenem byla znalost běžně používaného potrubí, indukčního ohřevu a elektromagnetického pole, následována vhodnou volbou matematického a numerického modelu elektromagnetického, tepelného a termoelastického pole, který byl použit pro simulace.

Sledovanými parametry byly teplota a s tím související roztažení trubek. V práci jsou simulovány běžně používané, normované rozměry trubek, z nichž největší použitý vnější průměr trubky byl 267 mm. Z toho jsme získali informaci o vnitřním průměru válcové cívky, do jejíž dutiny byly trubky vkládány. Na základě výsledků simulací, bylo rozhodnuto o tloušťce stěny cívky 30 mm a délce cívky 300 mm. Po zvolení rozměrů byl zkoumán vliv proudu cívky na teplotu a roztažení trubky. Proudová hustota $5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ se svými výsledky projevila jako vhodná volba, jejíž výhodou je i fakt, že cívka nebude potřebovat cizí chlazení. Za povšimnutí jistě stála i kapitola o rozložení teploty v trubce po indukčním zahřátí.

Dále bylo ukázáno, jaký vliv na teplotu a roztažení trubek mají zvyšující se vzdálenost trubek od cívky a klesající průměr trubek. Bylo tedy patrné, že zahřívát trubky o menších průměrech bude složitější a nic na tom nezměnil ani fakt, že naopak s menší tloušťkou stěny trubky byl tento vliv částečně kompenzován. Při použití různých frekvencí bylo zjištěno, že při použití měděného či hliníkového materiálu rostou sledované parametry s takřka lineární závislostí přímo úměrné frekvenci. U ocelového materiálu byl vysoký nárůst hodnot do frekvence 1 kHz, dále už byl průběh v podstatě konstantní.

Jelikož ze získaných výsledků bylo patrné, že nelze spojovat trubky pouhým zahřátím a následným zasunutím do sebe (roztažení nebylo dostatečné), byly alternativním řešením spojky vhodných rozměrů. Zde již byla hledána optimální frekvence (v rozmezí 50 – 30 000 Hz) pro potřebné roztažení spojek tak, aby zároveň nebyla překročena teplota tání jednotlivých materiálů. Po provedených simulacích byla optimální frekvence nelezena v rozmezí 500 – 1 000 Hz, přičemž s rostoucí frekvencí klesá čas potřebný pro dostatečné roztažení spojek, ale stoupá i teplota. Zejména u hliníkových spojek menších průměrů se již teplota přibližuje kritickým hodnotám. Indukční ohřev se ukázal být vhodný od vnitřních průměrů spojek 269,8 – 36,3 mm (tj. pro trubky vnějších průměrů 267 – 35 mm). Pro menší průměry se již nepodařilo spojky dostatečně roztáhnout.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MIKULA, Julius *akol. Potrubí a armatury*. 2. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1974. 585 s.
- [2] HOSNEDL, S. a L. NĚMEC: *STROJNÍ ČÁSTI POTRUBNÍCH SYSTÉMŮ*. Plzeň, 2007
- [3] FREISLEBEN, Bohumil. *Základy strojnictví*. Úvaly: ALBRA, 2004. ISBN 80-7361-001-9.
- [4] NAYYAR, M. L. *Piping handbook*. 7th ed. New York: McGraw-Hill, c2000. ISBN 0-07-047106-1.
- [5] BOŽÍKOVÁ, J. a M. BOŽÍK: *VODOHOSPODÁRSKE STAVBY* [online]. Bratislava: STU, 2014 [cit. 2019-02-22]. ISBN 978-80-227-4240-5. Dostupné z: https://www.svf.stuba.sk/buxus/docs/dokumenty/skripta/Vodohospodarske_stavby_Bozikova.pdf
- [6] DUCT AND CONDUIT. *Plastics Pipe Institute* [online]. ©2019, 1, 473-513 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://plasticpipe.org/pdf/chapter14.pdf>
- [7] SMITH, F. Piping Materials. *TRADE OF Pipefitting* [online]. SOLAS, 2014, 2(3), 1-28 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: http://local.ecollege.ie/Content/APPRENTICE/liu/pipefitting/pdf/M3_U1_Piping%20Materials.pdf
- [8] SHIGLEY, J. E.. *Standard handbook of machine design*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, [cit. 2019-02-24], c1996, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 0-07-056958-4.
- [9] ŠLUPINA, M.: *Spoje ve strojírenství* [online]. Kopřivnice [cit. 2019-02-24]. ©2019 Dostupné z: http://moodle2.voskop.eu/download/teu/U36_Spoje_ve_strojirenstvi.pdf. Elektronická učebnice. VOŠ, SOŠ A SOU KOPŘIVNICE.
- [10] POLCER, J.: *SPOJOVÁNÍ ČÁSTÍ POTRUBÍ ROZEBÍRATELNÝMI SPOJI* [online]. 2015 [cit. 2019-02-24]. Studijní text k vzdělávacímu modulu. Centrum uznávání a celoživotního učení olomouckého kraje.

- [11] SMITH, F.: Pipe Joining. *TRADE OF Pipefitting* [online]. SOLAS, 2014, 2(3), 1-28 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: http://local.ecollege.ie/Content/APPRENTICE/liu/pipefitting/pdf/M3_U5_Pipe%20Joining.pdf
- [12] KUBÍČEK, J. *TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ* [online]. Praha, ©2019 [cit. 2019-02-24]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf. Studijní materiál. Ústav strojírenské technologie.
- [13] KUBÁLEK J.: Pájení kovů, Časopis KONSTRUKCE 4/2012 , [cit. 2019-02-24], Ostrava: KONSTRUKCE Media, 2012, 4, ISSN 1803-8433
- [14] KOČICA, Bc. Martin. *ITERAČNÍ METODY OPTIMALIZACE*. Zlín, 2006. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Prof. Ing. Roman Prokop.
- [15] RAIDA, Zbyněk. *OPTIMALIZACE V ELEKTROTECHNICE. [OPTIMALIZACE V ELEKTROTECHNICE]* [online]. Brno: Zbyněk Raida [cit. 2019-08-14]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/optimalizace/index.htm>
- [16] JUREK, Bc. Miloš. *Numerické metody optimalizace*. Zlín, 2007. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Radek Matušů.
- [17] KROPÍK, Ing. Petr. *Využití optimalizačních metod v elektrotechnice*. Plzeň, 2009. Disertační práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Prof. Ing. Daniel MAYER, DrSc.
- [18] Černý V. *CHOZE hobybastler* [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <http://choze.aspone.cz/inducak.aspx>
- [19] LANGER, Emil. *Teorie indukčního a dielektrického tepla*. Praha: ACADEMIA, 1979.
- [20] HRADÍLEK, Zdeněk, LÁZNÍČKOVÁ, Ilona a KRÁL, Vladimír. *Elektrotepelná technika*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. 266 s. ISBN 978-80-01-04938-9
- [21] RADA, J.: *Elektrotepelná technika*, Praha: SNTL -Nakladatelství technické literatury,1985.

- [22] ŠROUBOVÁ, Lenka., KROPÍK, Petr a HAMAR, Roman. Connection of Cylindrical Pipes by Induction Shrink Fits. In *XXIII Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits*. Plzeň: University of West Bohemia, 2014. s. 69-70. ISBN: 978-80-261-0350-9
- [23] KARBAN, Pavel. Agros2D: Aplikace pro řešení fyzikálních polí. In: *AbcLinuxu.cz: Linux na stříbrném podnose* [online]. Praha: Nitimedia s.r.o., c1999-2015 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>
- [24] HAIMRLE, Hynek. *Elektromagnetické pole přípojnicových systémů*. Plzeň, 2016. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. Vedoucí práce Ing. Lenka Šroubová.

Přílohy

Příloha A – příloha ke kapitole 3

Obecné elektromagnetické vlnění – odvození rovnic

Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru:

$$\operatorname{rot}\mathbf{H} = \gamma\mathbf{E} + \varepsilon\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} \quad (\text{A-1})$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\mu\frac{\partial\mathbf{H}}{\partial t} \quad (\text{A-2})$$

$$\operatorname{div}\mathbf{D} = \rho \quad (\text{A-3})$$

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = 0 \quad (\text{A-4})$$

jelikož $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$:

$$\operatorname{rot}\mathbf{B} = \mu\gamma\mathbf{E} + \mu\varepsilon\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t} \quad (\text{A-5})$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{A-6})$$

dále uvažujeme prostředí bez vnitřních zdrojů elektřiny, takže:

$$\operatorname{div}\mathbf{D} = \operatorname{div}\varepsilon\mathbf{E} = 0 \quad (\text{A-7})$$

$$\operatorname{div}\mathbf{B} = \operatorname{div}\mu\mathbf{H} = 0 \quad (\text{A-8})$$

rotace rovnice (A-6):

$$\operatorname{rot}\operatorname{rot}\mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t}\operatorname{rot}\mathbf{B} \quad (\text{A-9})$$

po dosazení do (A-6) za $\operatorname{rot}\mathbf{B}$ z (A-5):

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu\gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (\text{A-10})$$

platí:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\operatorname{grad} \operatorname{div} \mathbf{E} - \nabla^2 \mathbf{E} = \nabla^2 \mathbf{E} \quad (\text{A-11})$$

po dosazení do (A-10) získáme:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (\text{A-12})$$

stejným způsobem získáme rovnici pro vektor \mathbf{H} :

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\gamma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (\text{A-13})$$

Tímto jsme získali zobecněné rovnice elektromagnetického vlnění, které dále upravíme pro prostředí nevodivé a prostředí dobře vodivé.

Prostředí nevodivé ($\gamma = 0$):

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{H} &= \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} &= \frac{1}{\mu\varepsilon} \nabla^2 \mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r} \nabla^2 \mathbf{H} = \frac{c^2}{\mu_r \varepsilon_r} \nabla^2 \mathbf{H} = \vartheta^2 \nabla^2 \mathbf{H} \end{aligned} \quad (\text{A-14})$$

stejně tak:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} &= \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} &= \vartheta^2 \nabla^2 \mathbf{E} \end{aligned} \quad (\text{A-15})$$

rychlost elektromagnetického vlnění v daném prostředí:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \quad (\text{A-16})$$

Prostředí vodivé:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \frac{\partial}{\partial t} \left(\varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \gamma \mathbf{E} \right) = 0 \quad (\text{A-17})$$

zanedbáme-li proud posuvný (první člen v závorce, druhý člen je proud vodivý) dostaneme:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - \mu \gamma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \frac{1}{\mu \gamma} \nabla^2 \mathbf{E} \end{aligned} \quad (\text{A-18})$$

stejně tak:

$$\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \frac{1}{\mu \gamma} \nabla^2 \mathbf{H} \quad (\text{A-19})$$

Harmonické elektromagnetické vlnění – odvození rovnic

Zobecněné rovnice elektromagnetického vlnění upravíme do fázorového tvaru:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \mathbf{E} - j\omega \mu \gamma \mathbf{E} = \nabla^2 \mathbf{E} + (\omega^2 \mu \varepsilon - j\omega \mu \gamma) \mathbf{E} = 0 \quad (\text{A-20})$$

zavedeme konstantu šíření charakterizující elektromagnetické vlnění v daném prostředí:

$$k^2 = (\omega^2 \mu \varepsilon - j\omega \mu \gamma) = -j\omega \mu (\gamma + j\omega \varepsilon) \quad (\text{A-21})$$

a poté získáme obecné rovnice harmonického elektromagnetického vlnění, které platí ve vodivém i v nevodivém prostředí pro rovinné i válcové elektromagnetické vlnění:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (\text{A-22})$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (\text{A-24})$$

Konstanta „ k “ má reálnou (fázová konstanta) a imaginární (měrný útlum) složku:

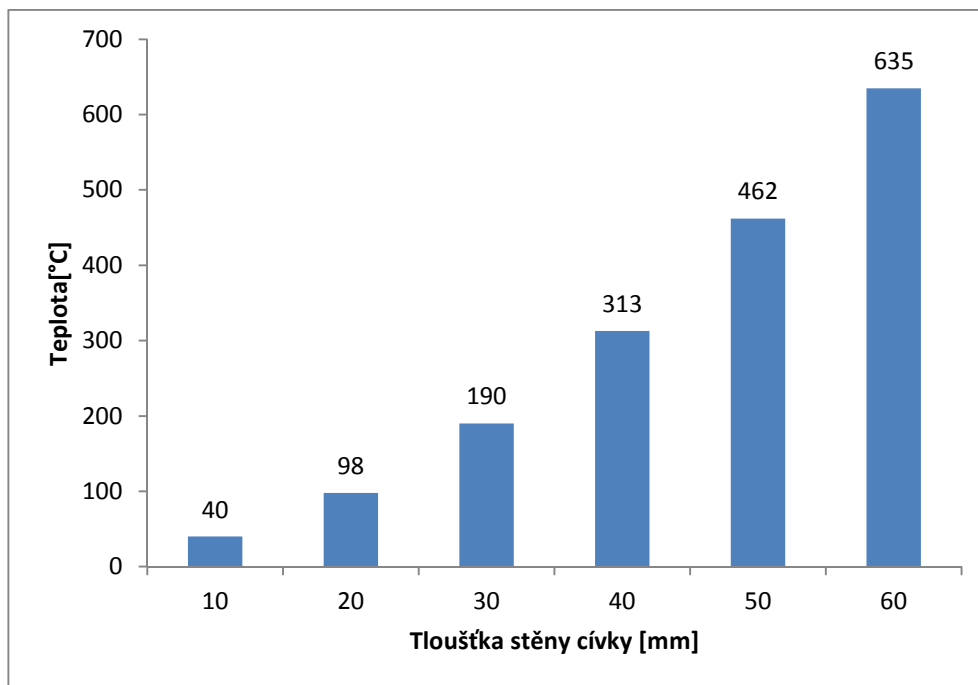
$$k = \alpha - j\beta, k^2 = \alpha^2 - 2j\alpha\beta - \beta^2 \quad (\text{A-25})$$

Mezi reálnými a imaginárními částmi platí rovnost, proto z rovnic (A-21) a (A-25) dostaneme

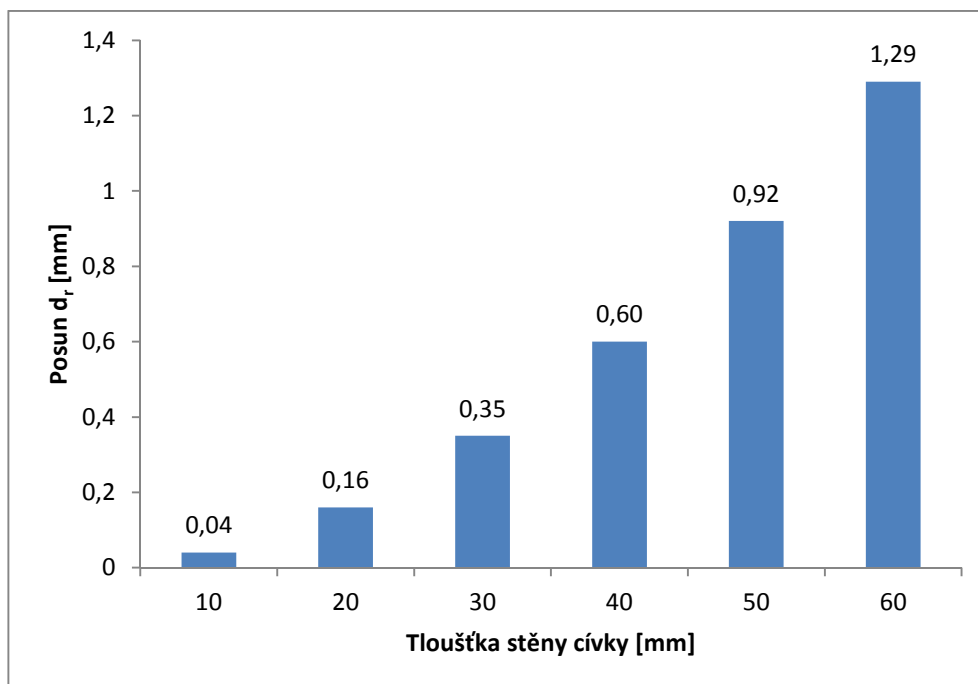
$$\omega^2 \mu \varepsilon = \alpha^2 - \beta^2, \quad j\omega \mu \gamma = j2\alpha\beta \quad (\text{A-26})$$

Příloha B – příloha ke kapitole 6.1

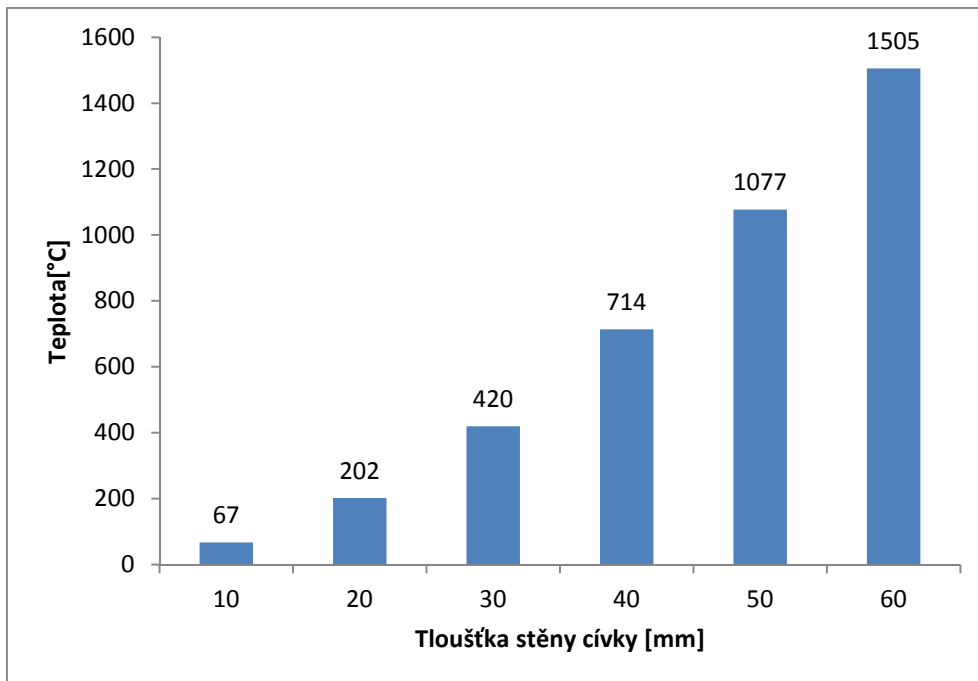
graf B-1 Teplota v závislosti na tloušťce stěny cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)



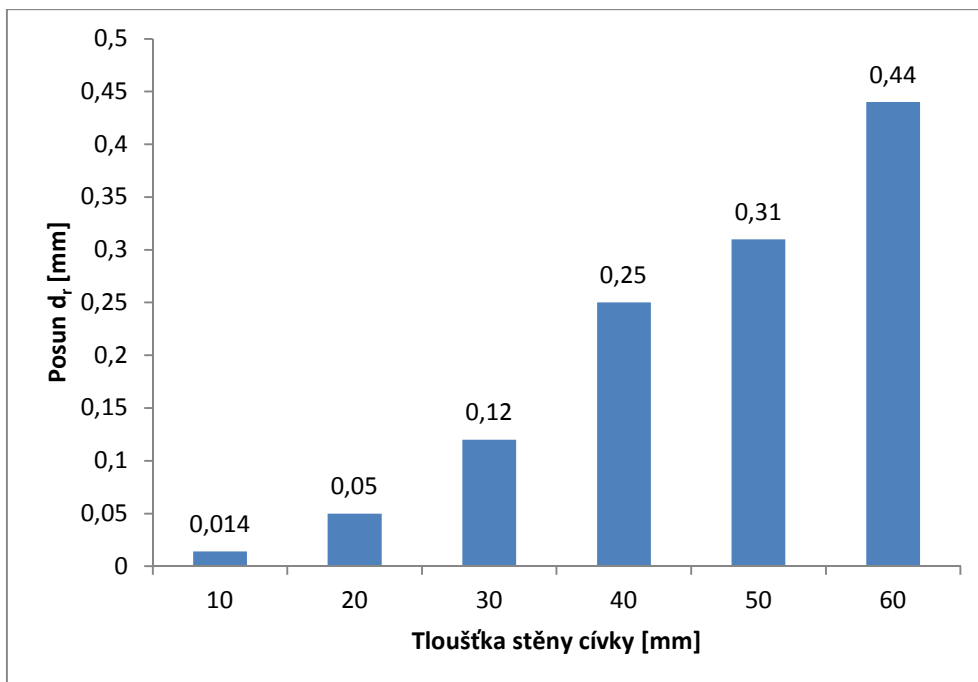
graf B-2 Posun d_r v závislosti na tloušťce stěny cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)



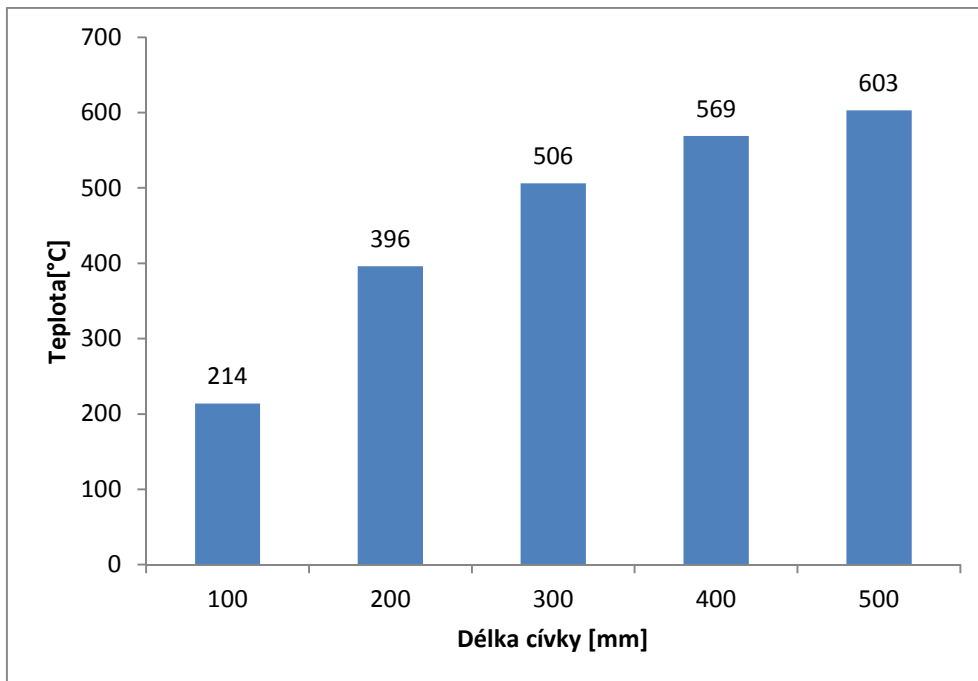
graf B-3 Teplota v závislosti na tloušťce stěny cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 20 s)



graf B-4 Posun d_r v závislosti na tloušťce stěny cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 20 s)

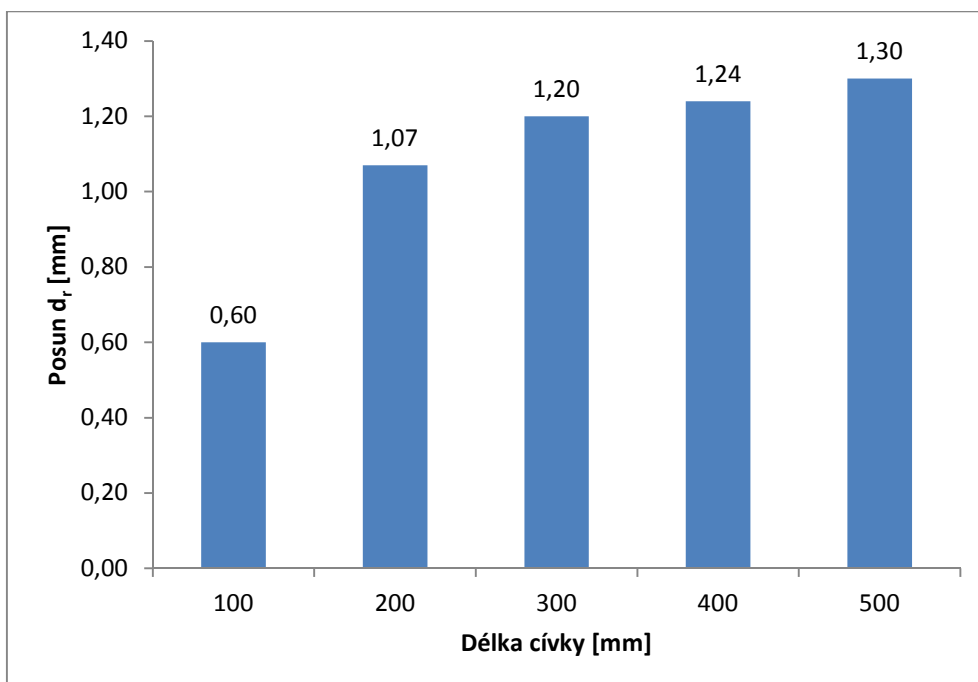


graf B-5 Teplota v závislosti na délce cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 50 s)

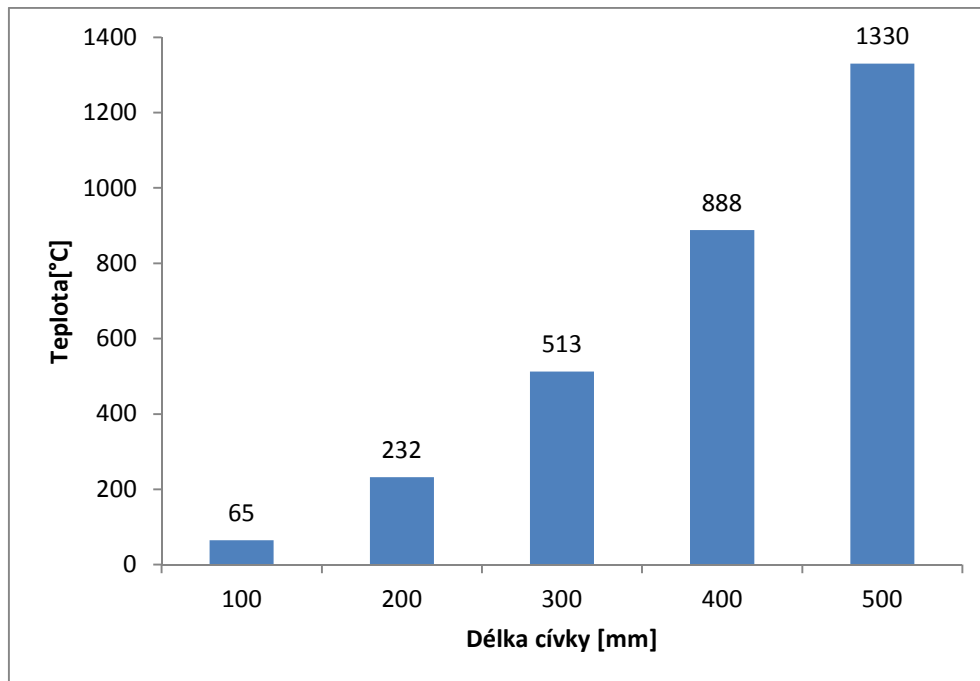


-

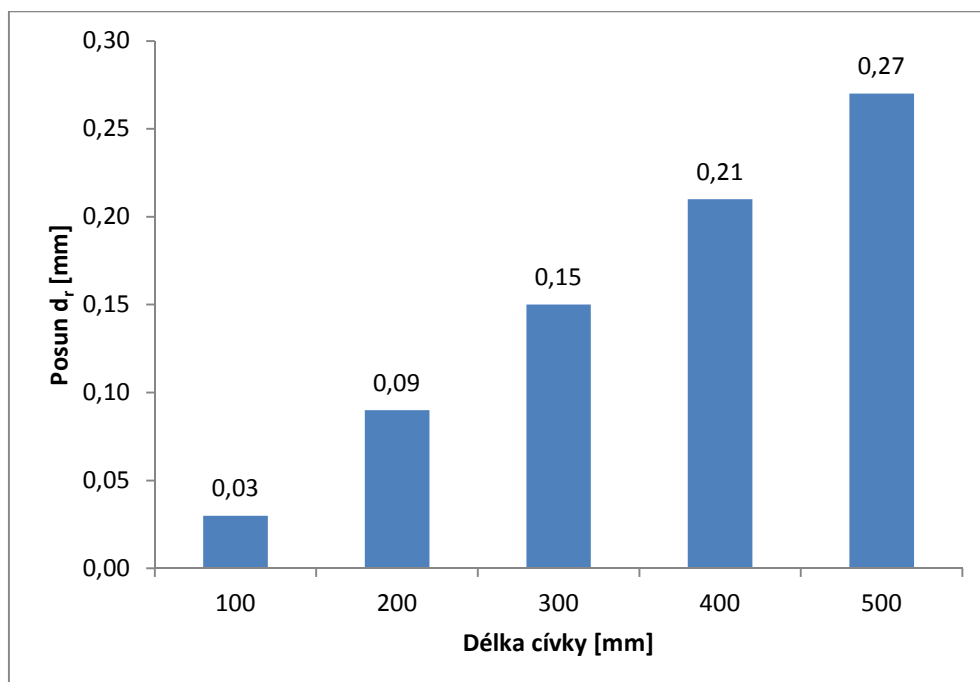
graf B-6 Posun d_r v závislosti na délce cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 50 s)



graf B-7 Teplota v závislosti na délce cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 25 s)



graf B-8 Posun d_r v závislosti na délce cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 25 s)



tab. B-1 Naměřené hodnoty pro různou tloušťku stěny cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 60 s)

Tloušťka stěny cívky [mm]	Posun d_r [mm]	Teplota [°C]
10	0,07	55
20	0,27	115
30	0,60	314
40	1,03	524
50	1,56	781
60	2,18	1080

tab. B-2 Naměřené hodnoty pro různou tloušťku stěny cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)

Tloušťka stěny cívky [mm]	Posun d_r [mm]	Teplota [°C]
10	0,04	40
20	0,16	98
30	0,35	190
40	0,60	313
50	0,92	462
60	1,29	635

tab. B-3 Naměřené hodnoty pro různou tloušťku stěny cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 20 s)

Tloušťka stěny cívky [mm]	Posun d_r [mm]	Teplota [°C]
10	0,014	67
20	0,05	202
30	0,12	420
40	0,25	714
50	0,31	1077
60	0,44	1505

tab. B-4 Naměřené hodnoty pro různou délku cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 100 s)

Délka cívky [mm]	Posun d_r [mm]	Teplota [°C]
100	0,42	204
200	0,79	375
300	0,94	458
400	0,98	508
500	1,00	541

tab. B-5 Naměřené hodnoty pro různou délku cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 50 s)

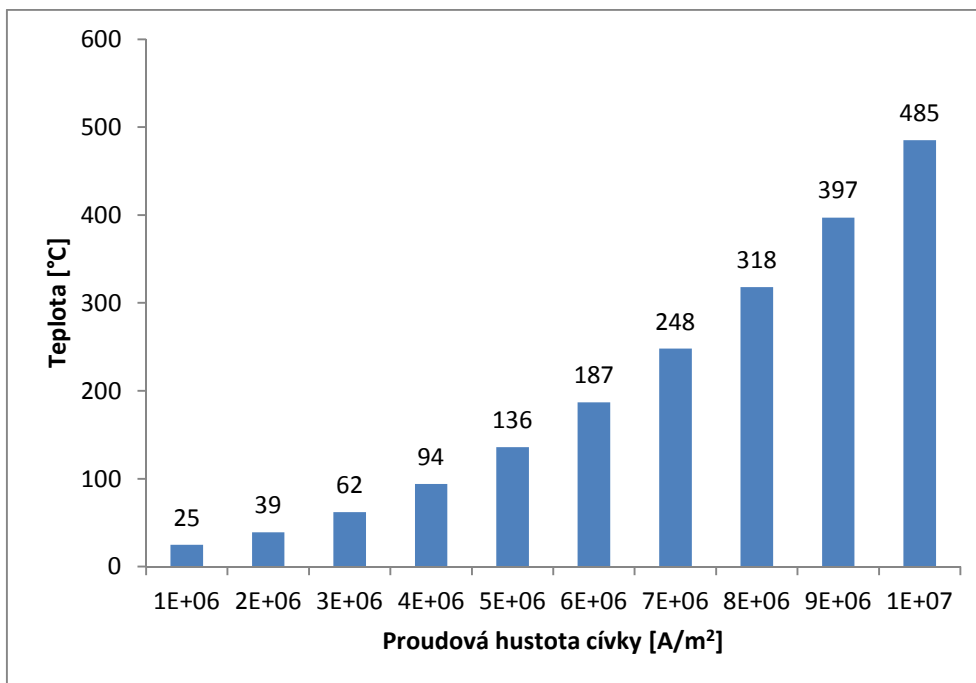
Délka cívky [mm]	Posun d_r [mm]	Teplota [°C]
100	0,60	214
200	1,07	396
300	1,20	506
400	1,24	569
500	1,30	603

tab. B-6 Naměřené hodnoty pro různou délku cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 50 s)

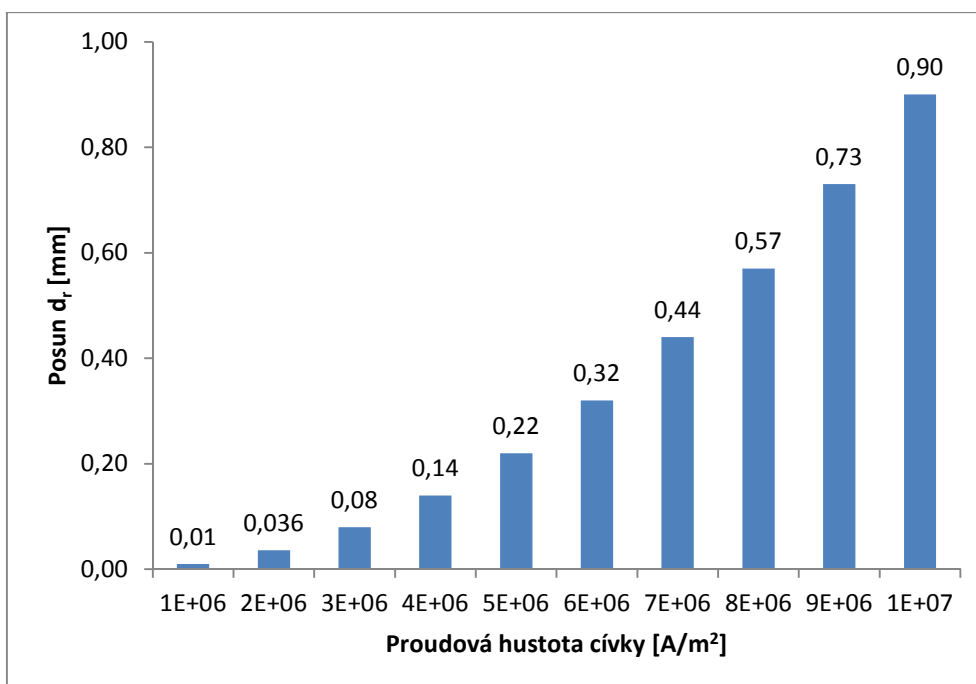
Délka cívky [mm]	Posun d_r [mm]	Teplota [°C]
100	0,03	65
200	0,09	232
300	0,15	513
400	0,21	888
500	0,27	1330

Příloha C – příloha ke kapitole 6.2

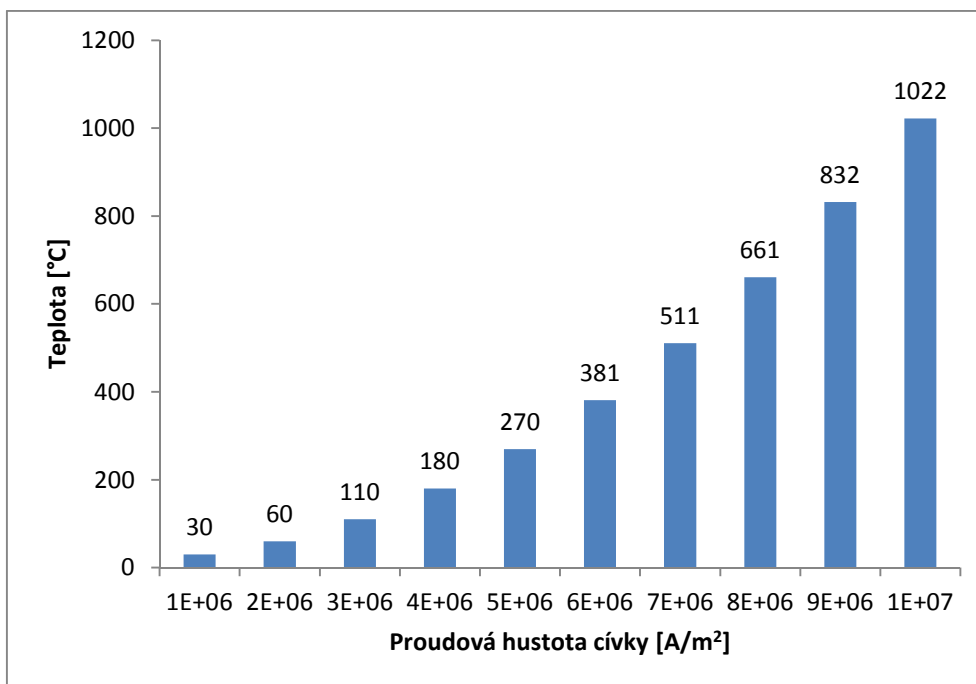
graf C-1 Teplota v závislosti na proudové hustotě cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 10 s)



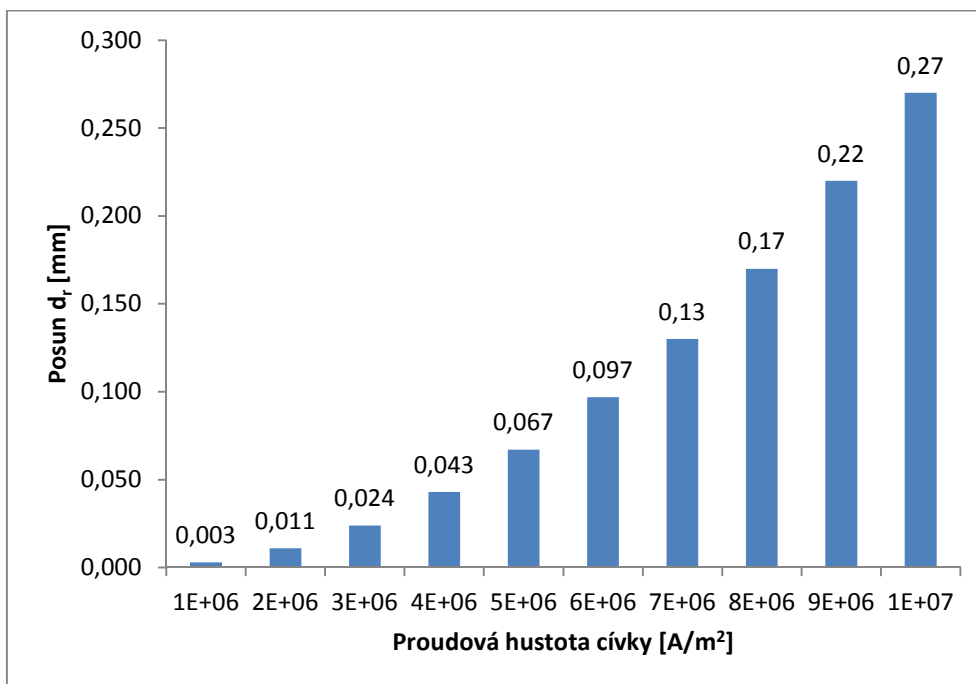
graf C-2 Posun d_r v závislosti na proudové hustotě cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 10 s)



graf C-3 Teplota v závislosti na proudové hustotě cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)



graf C-4 Posun d_r v závislosti na proudové hustotě cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)



tab. C-1 Naměřené hodnoty pro různou proudovou hustotu cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 50 s)

Proud. hustota [A/m ²]	Posun d _r [mm]	Teplota [°C]
1E+06	0,02	30
2E+06	0,08	60
3E+06	0,18	111
4E+06	0,32	182
5E+06	0,50	273
6E+06	0,72	384
7E+06	0,98	515
8E+06	1,29	667
9E+06	1,63	839
1E+07	2,00	1030

tab. C-2 Naměřené hodnoty pro různou proudovou hustotu cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 10 s)

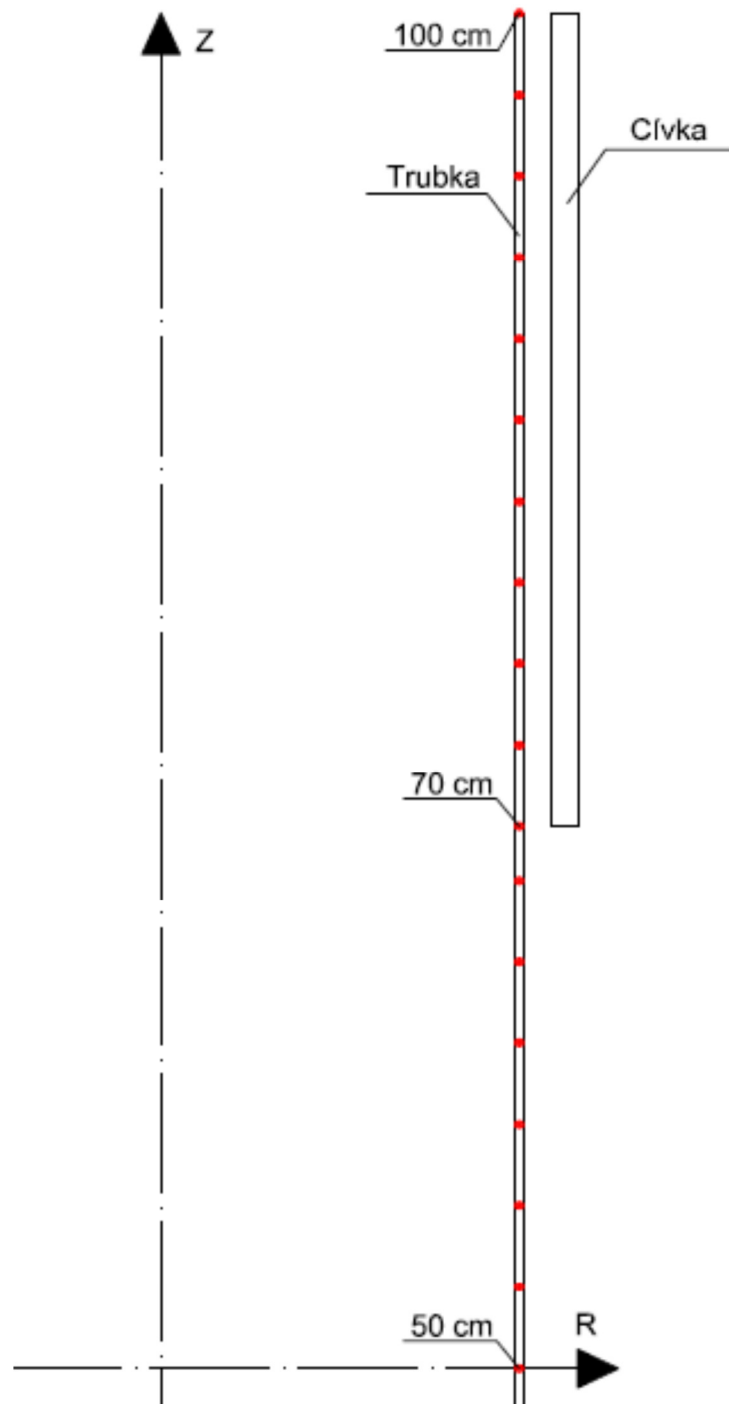
Proud. hustota [A/m ²]	Posun d _r [mm]	Teplota [°C]
1E+06	0,01	25
2E+06	0,036	39
3E+06	0,08	62
4E+06	0,14	94
5E+06	0,22	136
6E+06	0,32	187
7E+06	0,44	248
8E+06	0,57	318
9E+06	0,73	397
1E+07	0,90	485

tab. C-3 Naměřené hodnoty pro různou proudovou hustotu cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)

Proud. hustota [A/m ²]	Posun d _r [mm]	Teplota [°C]
1E+06	0,003	30
2E+06	0,011	60
3E+06	0,024	110
4E+06	0,043	180
5E+06	0,067	270
6E+06	0,097	381
7E+06	0,13	511
8E+06	0,17	661
9E+06	0,22	832
1E+07	0,27	1022

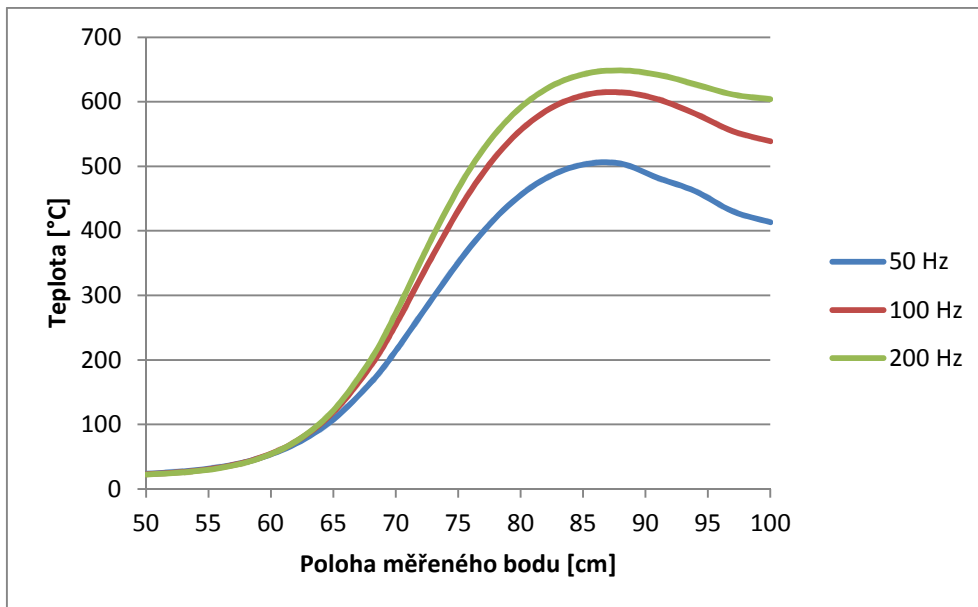
Příloha D – příloha ke kapitole 6.3

obr. D-1 Schématické rozložení měřených bodů pro měření rozložení teploty v trubce (axiální řez)



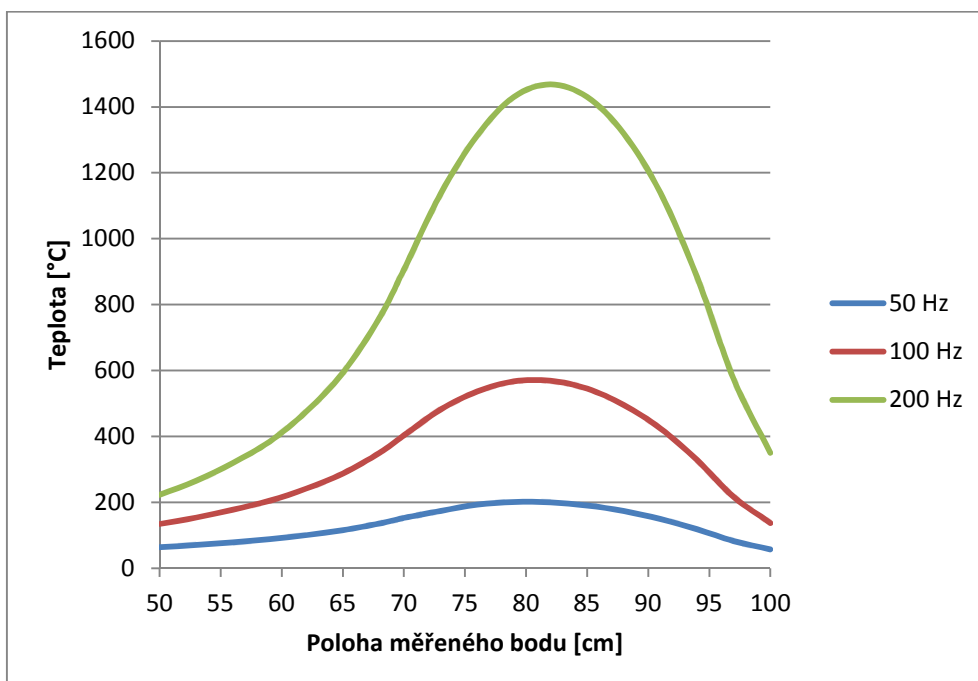
graf D-1 Rozložení teploty v hliníkové trubce

(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 50 s)



graf D-2 Rozložení teploty v ocelové trubce

(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 9 s)



tab. D-1 Naměřené hodnoty pro různou proudovou hustotu cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 180 s)

Poloha X [cm]	Teplota [°C] - 50 Hz	Teplota [°C] - 100 Hz	Teplota [°C] - 200 Hz
50	64,51	67,5	68,8
53	82,21	86,6	88,5
56	105,9	112,1	114,8
59	137	145,9	149,6
62	177,4	189,9	195
65	228,9	246,4	253,5
68	292,6	317,3	327,3
70	341,4	372,3	385
73	419	459,7	476,5
76	493	541,1	560,3
79	556	609,9	629,5
82	605,2	661,7	683,4
85	640,3	700	723
88	662	725,2	749,8
91	671,9	739,3	765,8
94	672,3	744,4	773,6
97	667	743,9	776,7
100	662,5	742	778,4

tab. D-2 Naměřené hodnoty pro různou proudovou hustotu cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 50 s)

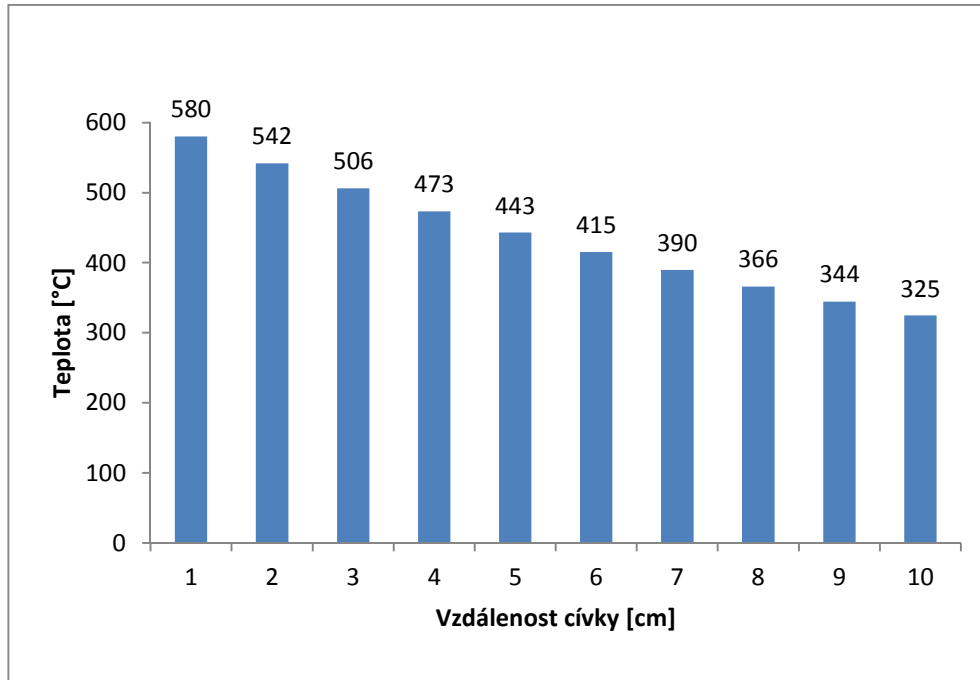
Poloha X [cm]	Teplota [°C] - 50 Hz	Teplota [°C] - 100 Hz	Teplota [°C] - 200 Hz
50	23,65	22,9	22,56
53	27,31	26,35	25,82
56	34,36	33,51	32,81
59	47,41	47,63	46,99
62	70,28	73,8	73,99
65	107,9	119,1	122
68	165	191,1	200,8
70	214,2	254,9	272,4
73	297,1	363	392,8
76	376	462,3	497,9
79	438,9	537,2	572,9
82	481,3	585,3	619,3
85	502,6	609,8	642,6
88	504,4	614,7	648,6
91	481,9	603,8	641,8
94	461,3	581,2	626,9
97	430,2	554,3	611,2
100	413,3	538,8	604

tab. D-3 Naměřené hodnoty pro různou proudovou hustotu cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 9 s)

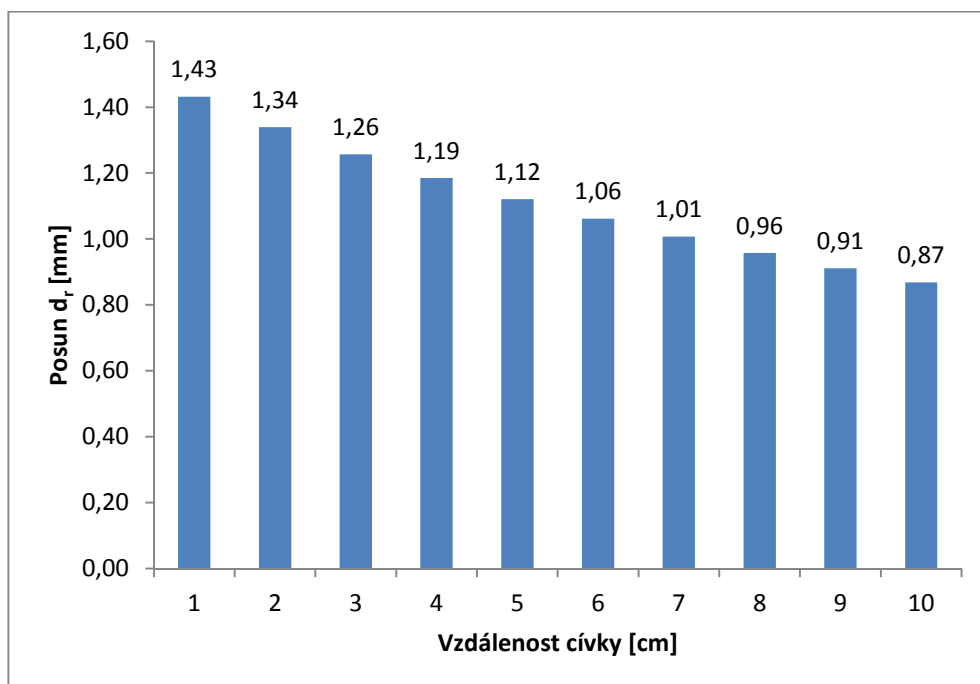
Poloha X [cm]	Teplota [°C] - 50 Hz	Teplota [°C] - 100 Hz	Teplota [°C] - 200 Hz
50	64,1	134,8	223,2
53	70,97	154,3	265,9
56	79,21	178,2	320,2
59	88,55	205,3	384,7
62	100,8	242,1	475,5
65	116	288	593,5
68	136,2	350,4	759,9
70	153,1	403,5	906,5
73	174,4	482	1136
76	193,5	536,6	1313
79	201,4	567,3	1430
82	200,3	569,3	1468
85	190,9	545,2	1430
88	173,8	496	1319
91	149,8	424,4	1139
94	118,7	328,7	883,5
97	82,91	216,7	573,8
100	57,92	137,7	350,6

Příloha E – příloha ke kapitole 6.4

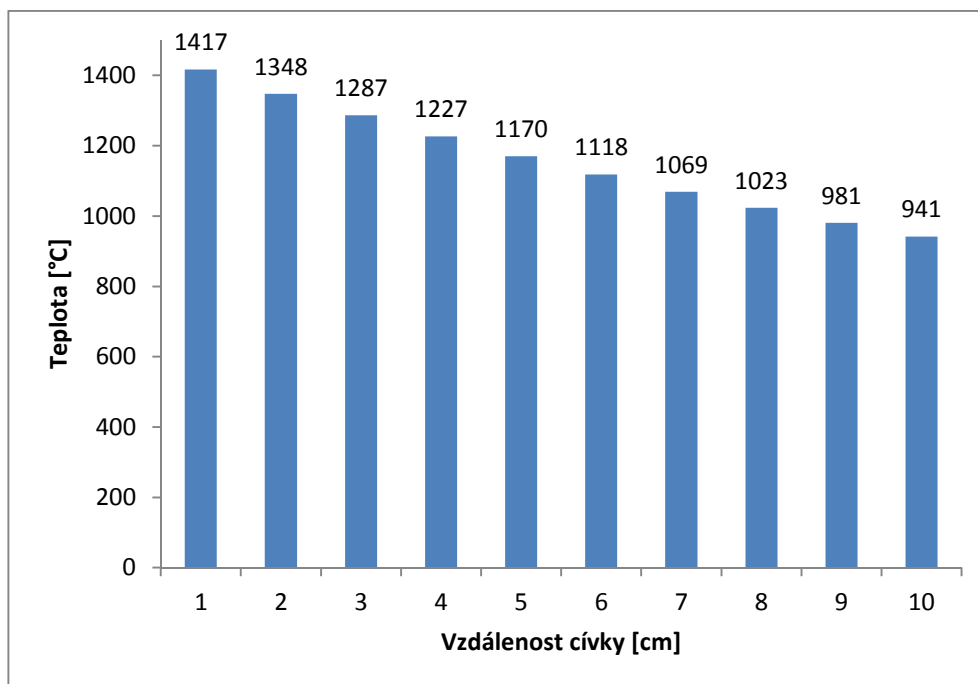
graf E-1 Teplota hliníkové trubky v závislosti na vzdálenosti cívký
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 60 s)



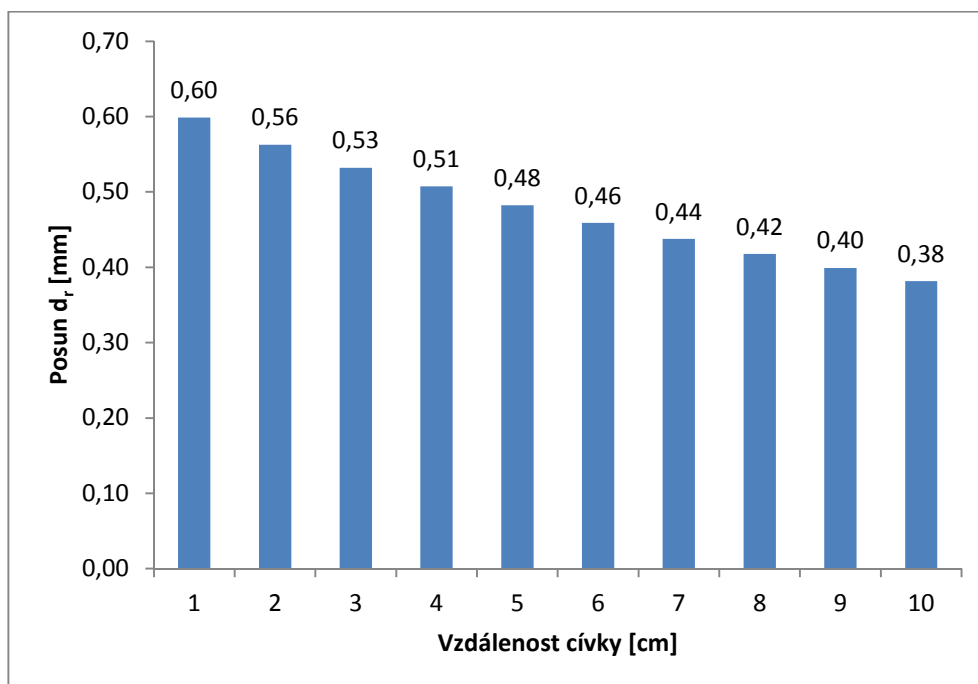
graf E-2 Posun d_r hliníkové trubky v závislosti na vzdálenosti cívký
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 60 s)



graf E-3 Teplota ocelové trubky v závislosti na vzdálenosti cívký
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 80 s)



graf E-4 Posun d_r ocelové trubky v závislosti na vzdálenosti cívký
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 80 s)



tab. E-1 Naměřené hodnoty pro různou vzdálenost cívky – měděná trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 180 s)

Vzdálenost cívky [cm]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
1	673	1,44
2	628	1,34
3	588	1,26
4	551	1,18
5	519	1,11
6	489	1,05
7	462	0,99
8	438	0,94
9	416	0,89
10	396	0,84

tab. E-2 Naměřené hodnoty pro různou vzdálenost cívky – hliníková trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 60 s)

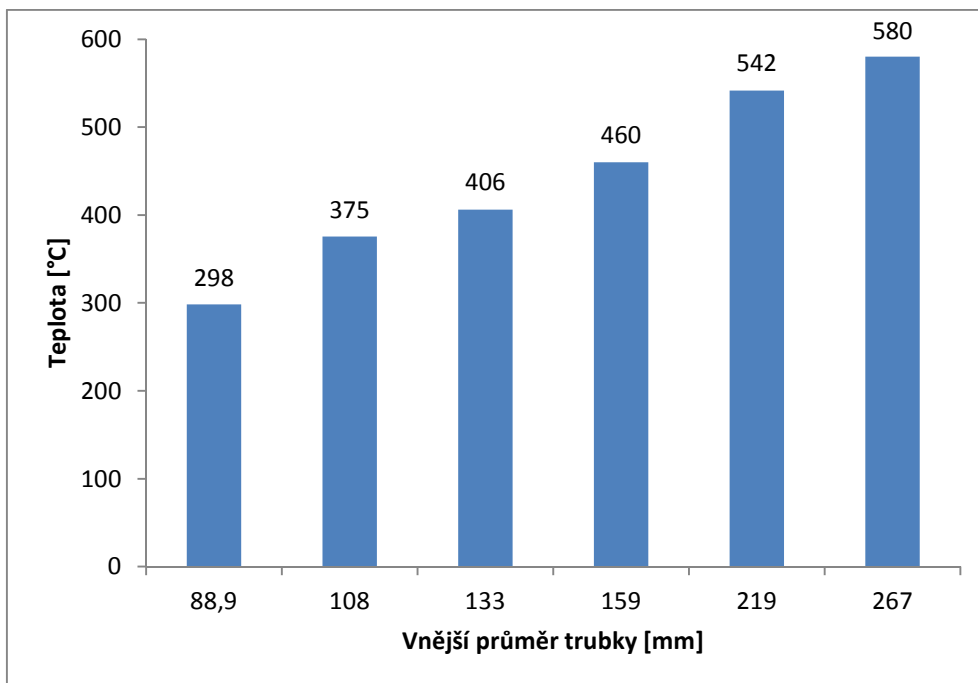
Vzdálenost cívky [cm]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
1	580	1,43
2	542	1,34
3	506	1,26
4	473	1,19
5	443	1,12
6	415	1,06
7	390	1,01
8	366	0,96
9	344	0,91
10	325	0,87

tab. E-3 Naměřené hodnoty pro různou vzdálenost cívky – ocelová trubka
(vnější průměr 267 mm, tloušťka stěny 3 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 80 s)

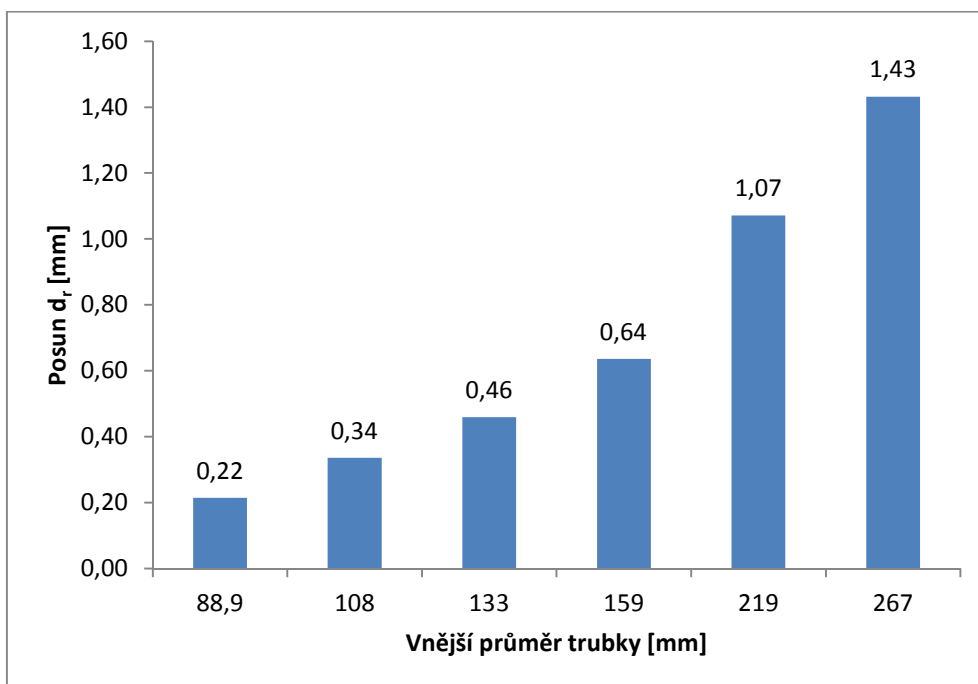
Vzdálenost cívky [cm]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
1	1417	0,60
2	1348	0,56
3	1287	0,53
4	1227	0,51
5	1170	0,48
6	1118	0,46
7	1069	0,44
8	1023	0,42
9	981	0,40
10	941	0,38

Příloha F – příloha ke kapitole 6.5

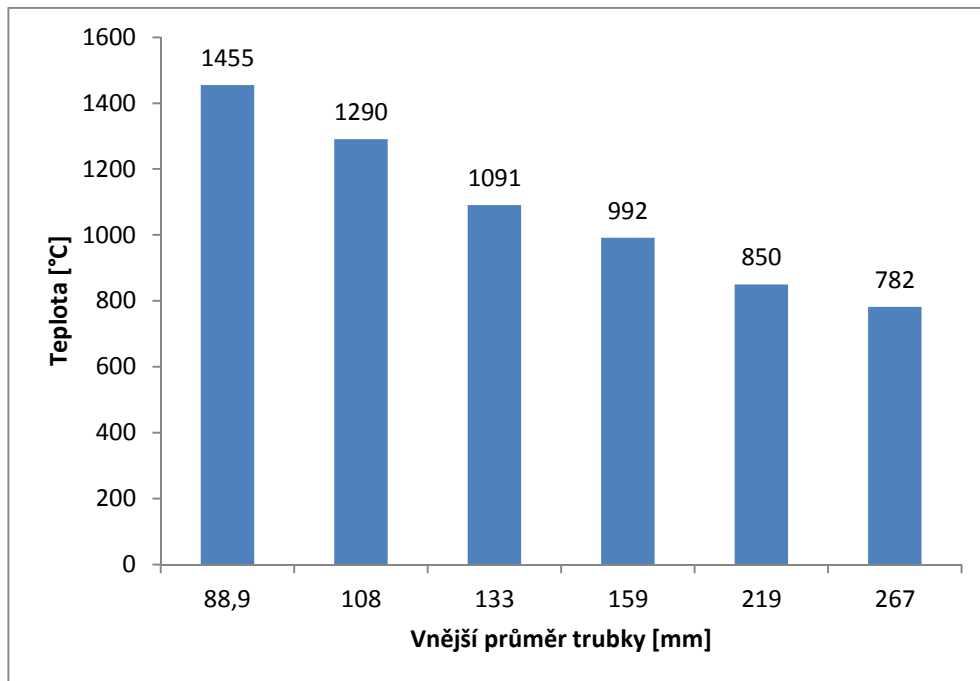
graf F-1 Teplota hliníkových trubek v závislosti na vnějším průměru trubek
(frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)



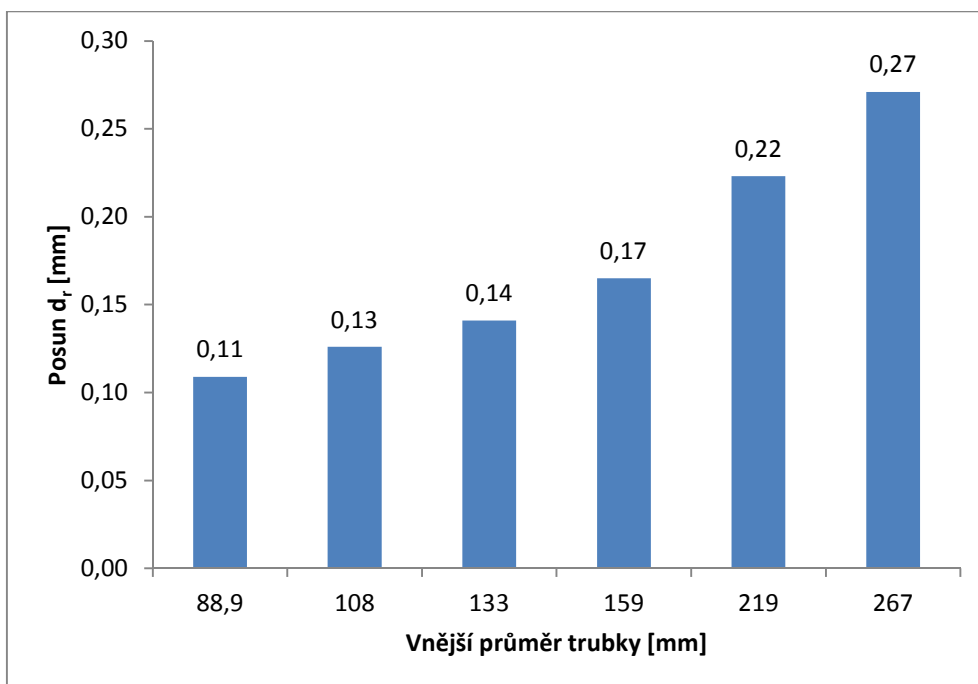
graf F-2 Posun d_r hliníkových trubek v závislosti na vnějším průměru trubek
(frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)



graf F-3 Teplota ocelových trubek v závislosti na vnějším průměru trubek
(frekvence 50 Hz, doba ohřevu 40 s)



graf F-4 Posun d_r ocelových trubek v závislosti na vnějším průměru trubek
(frekvence 50 Hz, doba ohřevu 40 s)



tab. F-1 Naměřené hodnoty měděných trubek pro různé průměry trubek
(frekvence 50 Hz, doba ohřevu 180 s)

Vnější průměr trubky [mm]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
88,9	508	0,34
108	594	0,49
133	563	0,58
159	601	0,75
219	651	1,14
267	673	1,44

tab. F-2 Naměřené hodnoty hliníkových trubek pro různé průměry trubek
(frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)

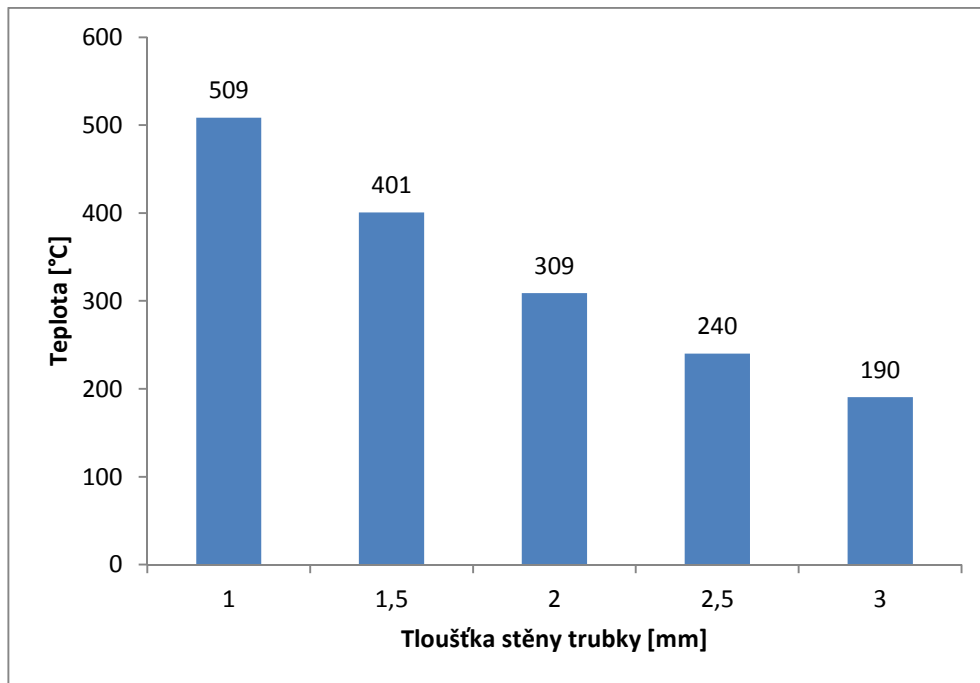
Vnější průměr trubky [mm]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
88,9	298	0,22
108	375	0,34
133	406	0,46
159	460	0,64
219	542	1,07
267	580	1,43

tab. F-3 Naměřené hodnoty ocelových trubek pro různé průměry trubek
(frekvence 50 Hz, doba ohřevu 40 s)

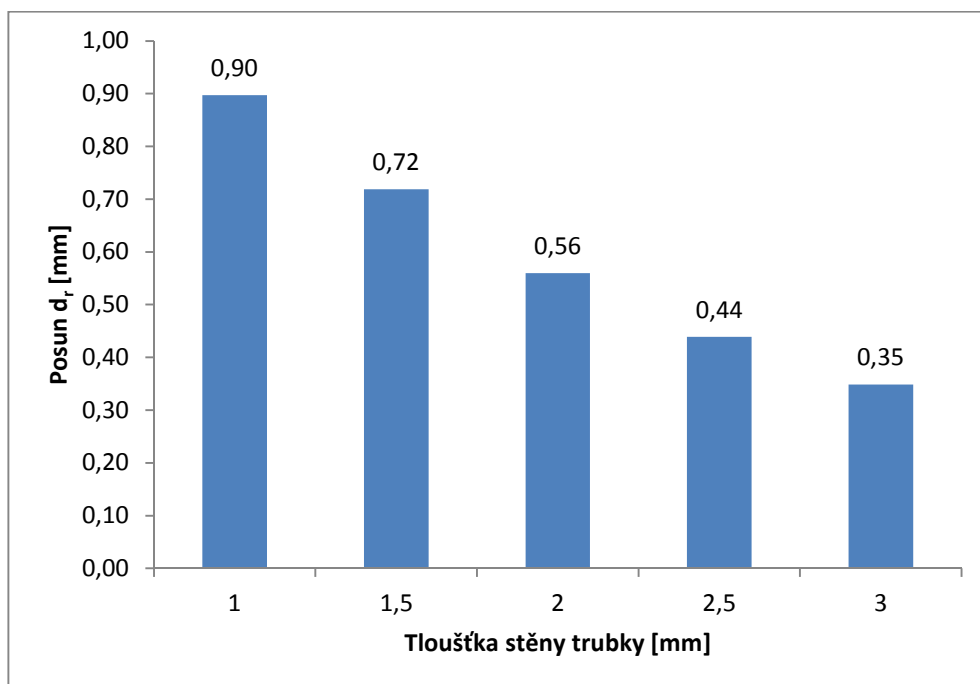
Vnější průměr trubky [mm]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
88,9	1455	0,11
108	1290	0,13
133	1091	0,14
159	992	0,17
219	850	0,22
267	782	0,27

Příloha G – příloha ke kapitole 6.6

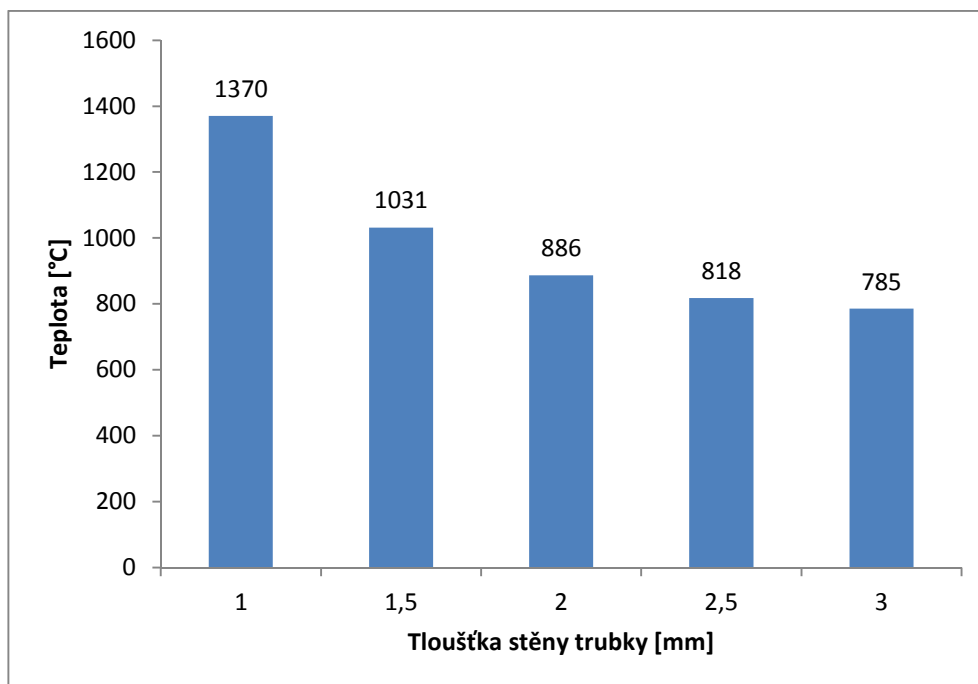
graf G-1 Teplota hliníkové trubky v závislosti na tloušťce stěny trubky
(vnější průměr 267 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)



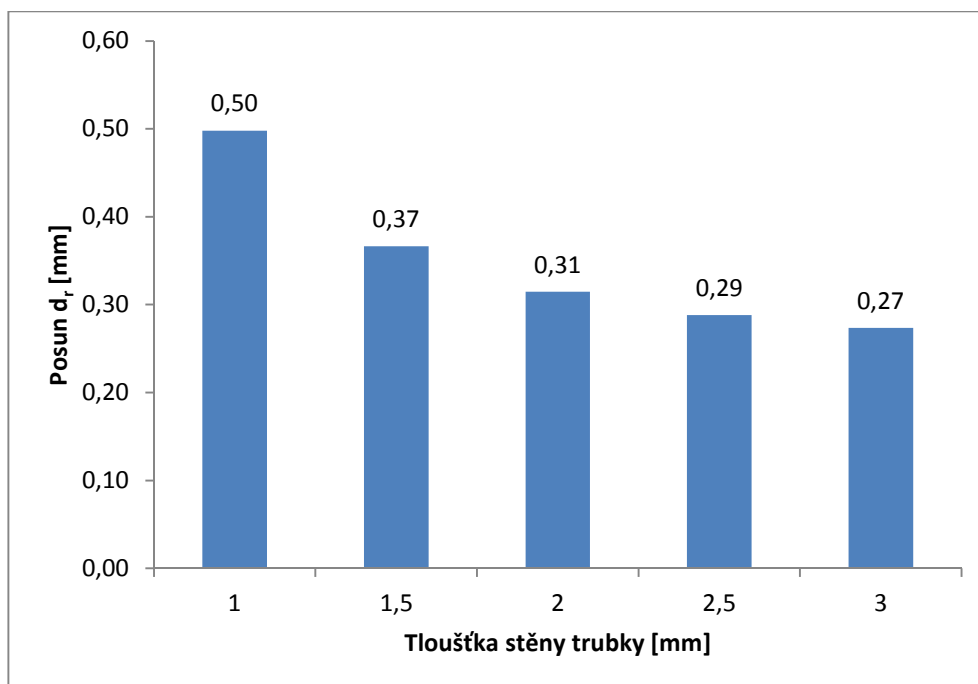
graf G-2 Posun d_r hliníkové trubky v závislosti na tloušťce stěny trubky
(vnější průměr 267 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)



graf G-3 Teplota ocelové trubky v závislosti na tloušťce stěny trubky
(vnější průměr 267 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 40 s)



graf G-4 Posun d_r ocelové trubky v závislosti na tloušťce stěny trubky
(vnější průměr 267 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 40 s)



tab. G-1 Naměřené hodnoty měděné trubky pro různou tloušťku stěny trubky
(vnější průměr 267 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 40 s)

Tloušťka stěny trubky [mm]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
1	898	1,53
1,5	607	1,06
2	419	0,74
2,5	303	0,54
3	229	0,40

tab. G-2 Naměřené hodnoty hliníkové trubky pro různou tloušťku stěny trubky
(vnější průměr 267 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 15 s)

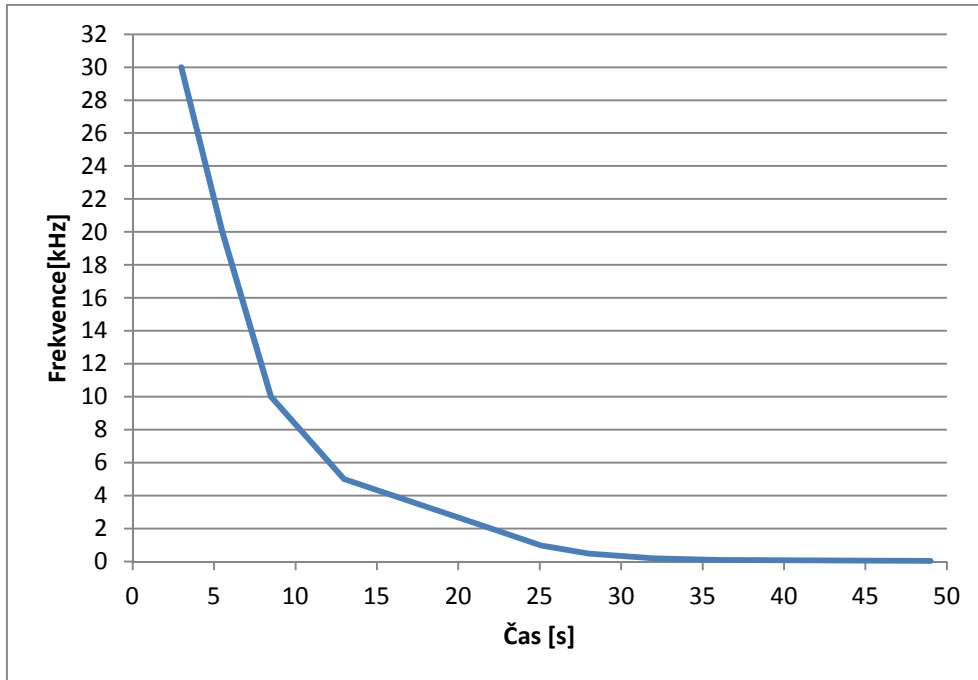
Tloušťka stěny trubky [mm]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
1	509	0,90
1,5	401	0,72
2	309	0,56
2,5	240	0,44
3	190	0,35

tab. G-3 Naměřené hodnoty ocelové trubky pro různou tloušťku stěny trubky
(vnější průměr 267 mm, frekvence 50 Hz, doba ohřevu 40 s)

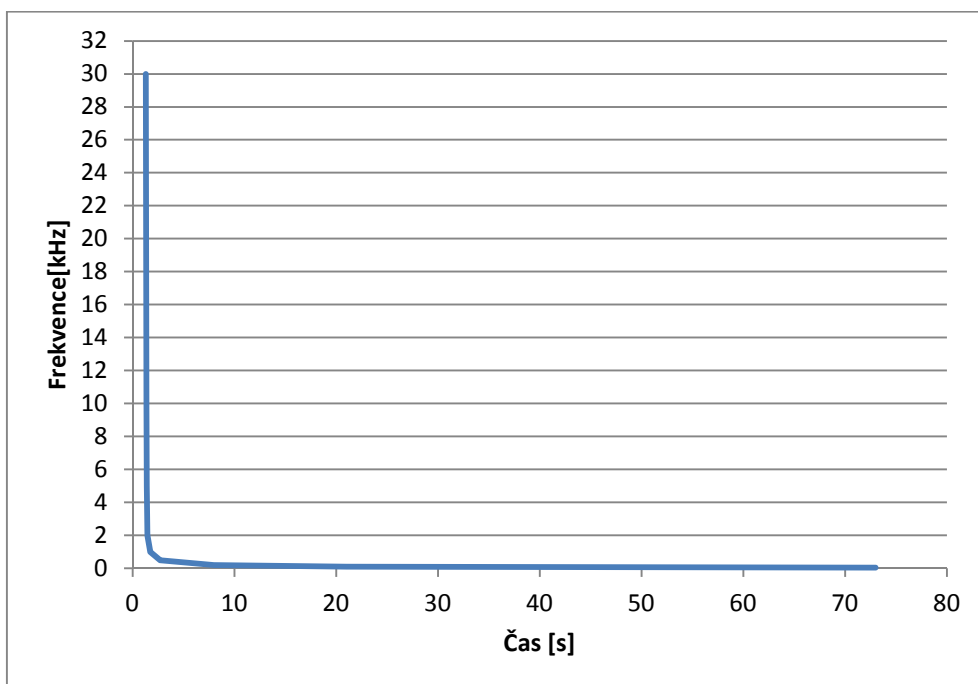
Tloušťka stěny trubky [mm]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
1	1370	0,50
1,5	1031	0,37
2	886	0,31
2,5	818	0,29
3	785	0,27

Příloha H – příloha ke kapitole 6.7

graf H-1 Rychlost ohřevu hliníkové trubky v závislosti na frekvenci
(vnější průměr 267 mm, čas měřen v době dosažení 400 °C)



graf H-2 Rychlost ohřevu ocelové trubky v závislosti na frekvenci
(vnější průměr 267 mm, čas měřen v době dosažení 1 000 °C)



tab. H-1 Naměřené hodnoty měděné trubky pro rychlost ohřevu
(vnější průměr 267 mm, čas měřen v době dosažení 600 °C)

Frekvence [kHz]	Čas [s]	Teplota [°C]
0,05	155	600
0,1	135	600
0,2	121	600
0,5	110	600
1	91	600
2	64	600
5	36	600
10	24	600
20	16	600
30	12	600

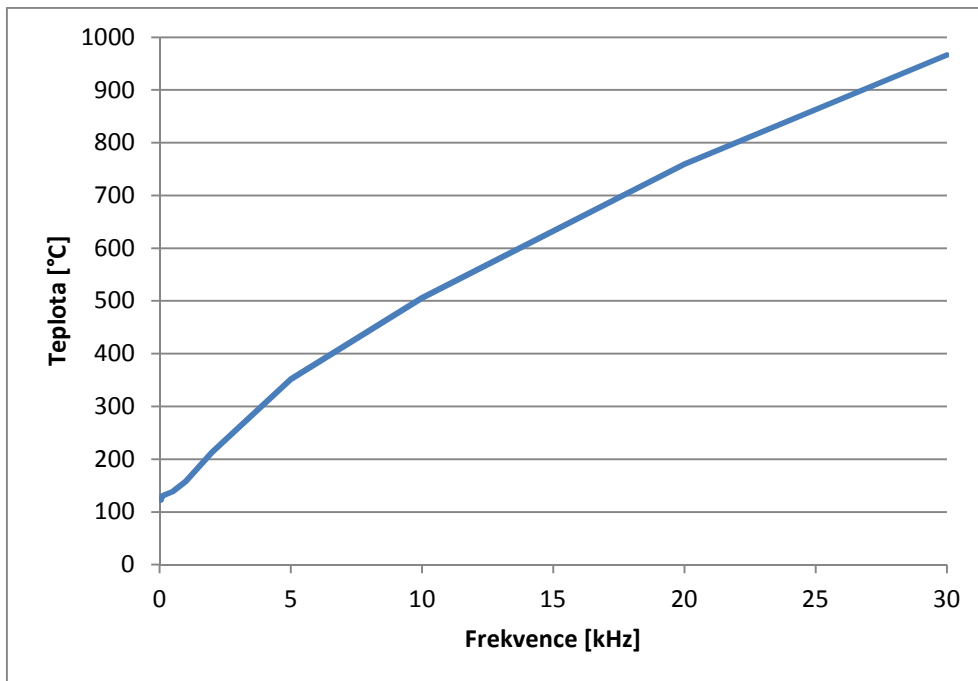
tab. H-2 Naměřené hodnoty hliníkové trubky pro rychlost ohřevu
(vnější průměr 267 mm, čas měřen v době dosažení 400 °C)

Frekvence [Hz]	Čas [s]	Teplota [°C]
50	49	400
100	36	400
200	32	400
500	28	400
1000	25	400
2000	22	400
5000	13	400
10000	8,5	400
20000	5,5	400
30000	3	400

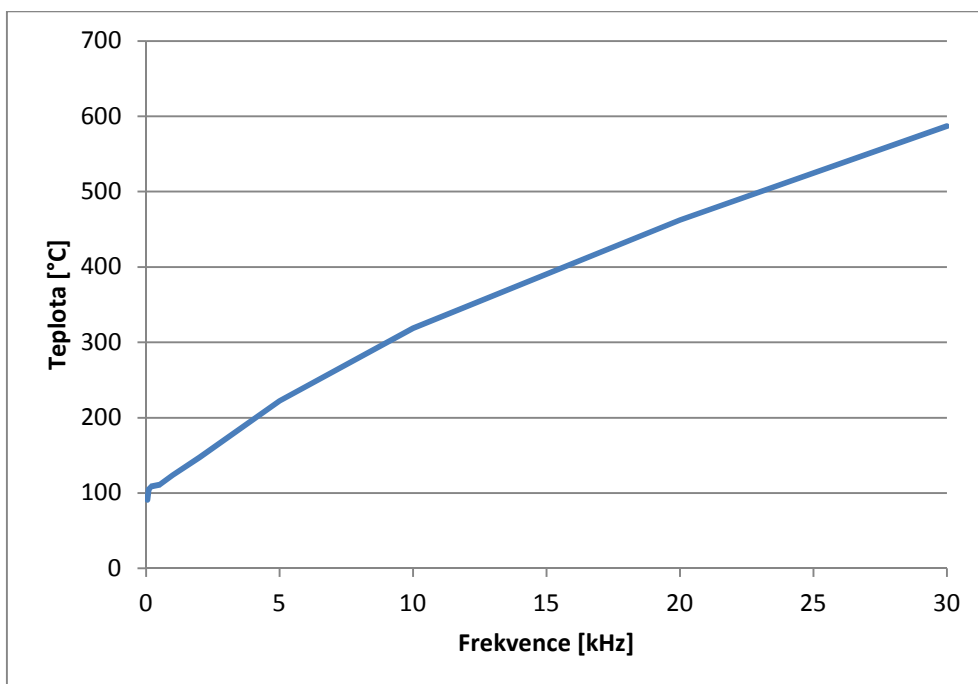
tab. H-3 Naměřené hodnoty ocelové trubky pro rychlost ohřevu
(vnější průměr 267 mm, čas měřen v době dosažení 1 000 °C)

Frekvence [Hz]	Čas [s]	Teplota [°C]
50	73	1000
100	21	1000
200	8	1000
500	2,7	1000
1000	1,75	1000
2000	1,45	1000
5000	1,4	1000
10000	1,35	1000
20000	1,32	1000
30000	1,29	1000

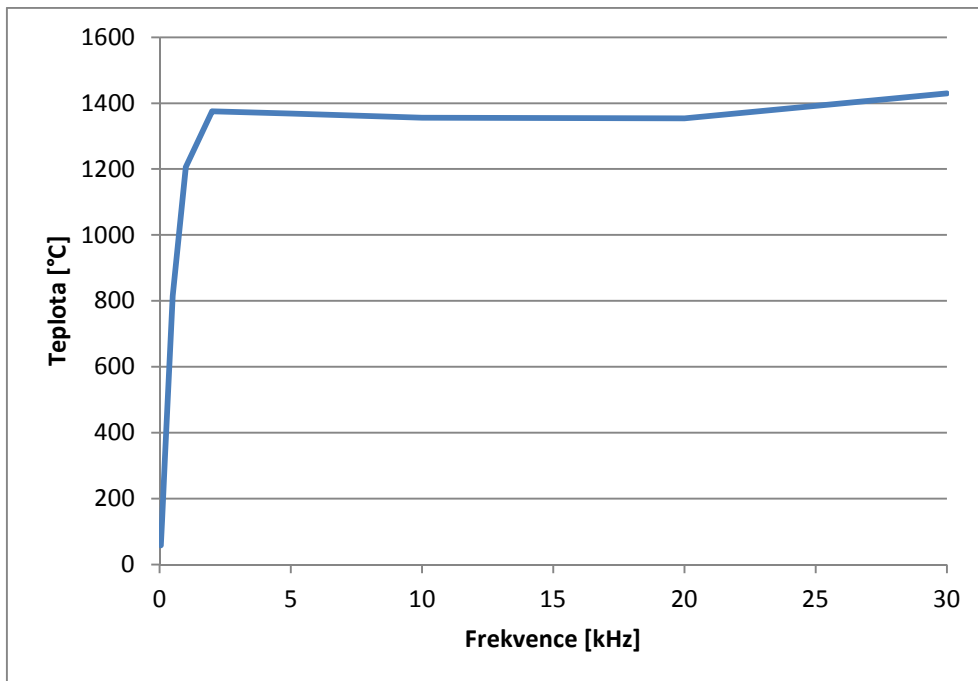
graf H-3 Teplota měděné trubky v závislosti na použité frekvenci
(vnější průměr 267 mm, doba ohřevu 18 s)



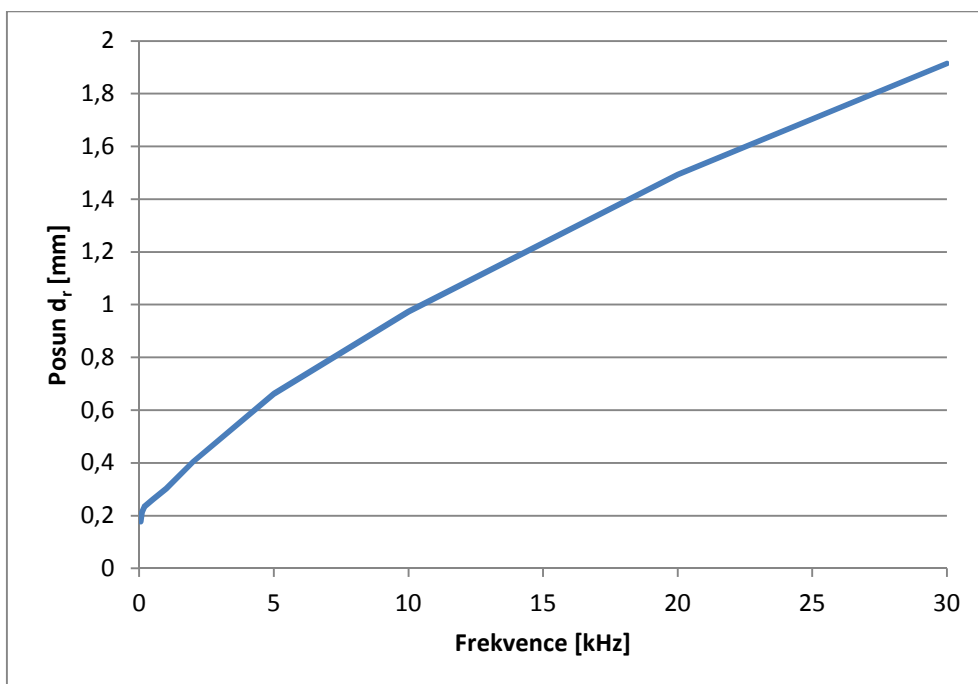
graf H-4 Teplota hliníkové trubky v závislosti na použité frekvenci
(vnější průměr 267 mm, doba ohřevu 6 s)



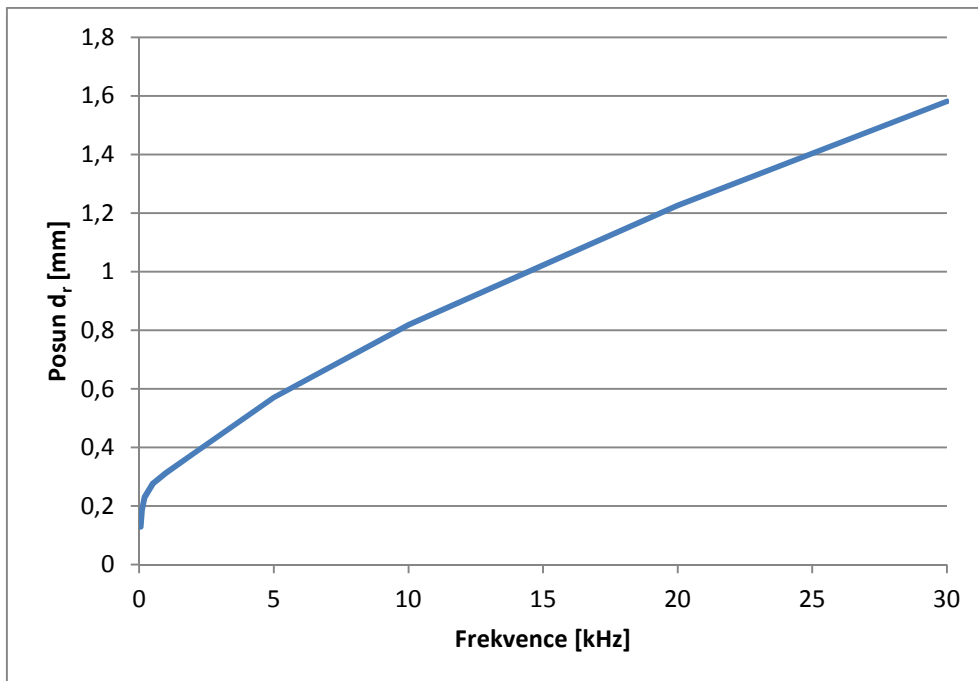
graf H-5 Teplota ocelové trubky v závislosti na použité frekvenci
(vnější průměr 267 mm, doba ohřevu 1,7 s)



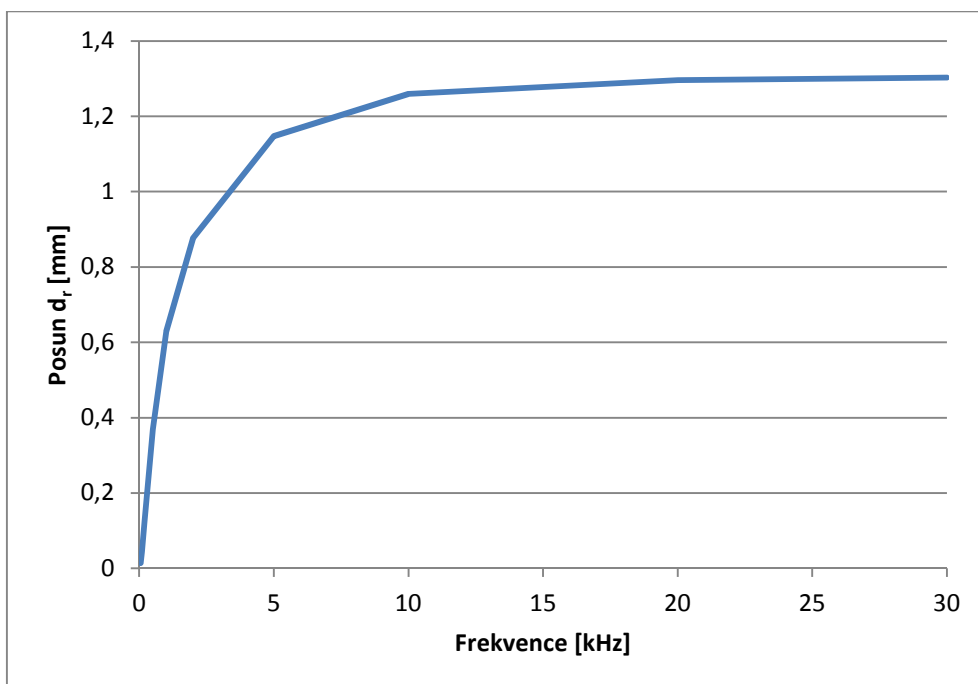
graf H-6 Posun d_r měděné trubky v závislosti na použité frekvenci
(vnější průměr 267 mm, doba ohřevu 18 s)



graf H-7 Posun d_r hliníkové trubky v závislosti na použité frekvenci
(vnější průměr 267 mm, doba ohřevu 6 s)



graf H-8 Posun d_r ocelové trubky v závislosti na použité frekvenci
(vnější průměr 267 mm, doba ohřevu 1,7 s)



tab. H-4 Naměřené hodnoty měděné trubky pro různé frekvence
(vnější průměr 267 mm, doba ohřevu 18 s)

Frekvence [kHz]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
0,05	122,51	0,1777
0,1	130,03	0,2129
0,2	132,52	0,2345
0,5	138,83	0,2612
1	157,9	0,3031
2	212,99	0,4043
5	351,83	0,6625
10	505,96	0,9742
20	759,46	1,493
30	966,04	1,915

tab. H-5 Naměřené hodnoty hliníkové trubky pro různé frekvence
(vnější průměr 267 mm, doba ohřevu 6 s)

Frekvence [Hz]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
0,05	91,083	0,1293
0,1	105,29	0,1856
0,2	108,92	0,2303
0,5	111,16	0,2769
1	123,97	0,314
2	147,02	0,378
5	222,26	0,5702
10	318,8	0,8187
20	462,49	1,226
30	586,89	1,581

tab. H-6 Naměřené hodnoty ocelové trubky pro různé frekvence
(vnější průměr 267 mm, doba ohřevu 1,7 s)

Frekvence [Hz]	Teplota [°C]	Posun d_r [mm]
0,05	58,76	0,01417
0,1	137,55	0,04416
0,2	329,32	0,1244
0,5	815,36	0,3688
1	1205,9	0,6293
2	1375,4	0,8768
5	1368,3	1,147
10	1355,7	1,259
20	1354	1,296
30	1429,3	1,303

Příloha I – příloha ke kapitolám 7.1, 7.2, 7.3

tab. I-1 Naměřené hodnoty ocelových spojek – čas ohřevu a teplota spojky pro posun $d_r > 0,2$ mm
(frekvence 500 Hz a 1000 Hz)

Vnitřní průměr spojky [mm]	Frekvence [Hz]	Čas [s]	Teplota [°C]
269,8	500	1,2	193
	1 000	0,5	333
221,8	500	2	244
	1 000	0,7	362
161,8	500	5	287
	1 000	1,4	330
135,8	500	7	309
	1 000	2	346
110,3	500	12	394
	1 000	3	397
91,2	500	18	464
	1 000	4,5	484
66,3	500	35	615
	1 000	9	691
55,8	500	47	717
	1 000	12	801
43,3	500	80	900
	1 000	17	975
36,3	500	115	1083
	1 000	23	1120

tab. I-2 Naměřené hodnoty hliníkových spojek – čas ohřevu a teplota spojky pro posun $d_r > 0,2$ mm
(frekvence 500 Hz a 1000 Hz)

Vnitřní průměr spojky [mm]	Frekvence [Hz]	Čas [s]	Teplota [°C]
269,8	500	0,5	128
	1 000	0,45	160
221,8	500	0,8	140
	1 000	0,7	170
161,8	500	1,5	155
	1 000	1,4	185
135,8	500	2,5	185
	1 000	1,8	180
110,3	500	5,5	377
	1 000	4,5	385
91,2	500	4	229
	1 000	3,5	263
66,3	500	5,5	303
	1 000	4,5	323
55,8	500	8	355
	1 000	6	367
43,3	500	10	439
	1 000	7	514
36,3	500	14	521
	1 000	8,5	530

tab. I-3 Naměřené hodnoty měděných spojek – čas ohřevu a teplota spojky pro posun $d_r > 0,2$ mm
(frekvence 500 Hz a 1000 Hz)

Vnitřní průměr spojky [mm]	Frekvence [Hz]	Čas [s]	Teplota [°C]
269,8	500	0,5	128
	1 000	0,45	160
221,8	500	2,2	160
	1 000	1,8	169
161,8	500	4,5	194
	1 000	3,6	195
135,8	500	6,3	212
	1 000	5,5	229
110,3	500	9,5	241
	1 000	6,5	274
91,2	500	11,5	315
	1 000	9	302
66,3	500	15	407
	1 000	12,5	417
55,8	500	21	482
	1 000	18	503
43,3	500	22	592
	1 000	18	636
36,3	500	33	716
	1 000	24	718