

České vysoké učení technické v Praze

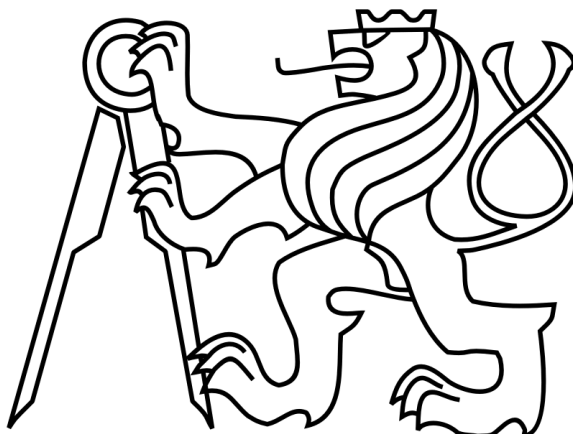
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Magisterský studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Diplomová práce



Návrh indukčního ohřevu pro pyrolýzu odpadu

The proposal of induction heating for pyrolysis of waste

Autor: Bc. Martin Popelka

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Novák

akademický rok 2013/2014

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Bc. Martin Popelka

.....

V Praze dne 12. 5. 2014

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Zdeňku Novákovi za jeho cenné rady a odborné vedení při zpracování mé práce. Rovněž bych chtěl poděkovat panu Ing. Lubomíru Musálkovi za pomoc při práci v programu Agros2D.

Anotace

Práce se zabývá návrhem indukčního ohřevu pro pyrolýzu odpadu. První část této práce popisuje pyrolýzu jako fyzikálně-chemický termický proces. Zabývá se jejími výhodami, zápory a využitím. Jsou uvedeny zadané požadavky na indukční pyrolýzní pec pro rozklad tuhého komunálního odpadu. Další část práce se pak podrobně věnuje teorii indukčního ohřevu a výpočtů určených pro konkrétní indukční ohřev navržené pyrolýzní pece. Jsou vytvořeny dva modely zařízení v softwaru Wolfram Mathematica a Agros2D a jejich výsledky vzájemně porovnány. Na jejich základě je zhodnocena schopnost pyrolýzní pece splnit zadané požadavky. Poslední část práce se věnuje napájení zařízení a jeho zpětným účinkům na napájecí síť. Řešena je symetrizace, kolísání napětí, vyšší harmonické a jalový výkon indukční pyrolýzní pece.

Klíčová slova: Pyrolýza odpadu; indukční ohřev; Wolfram Mathematica; Agros2D; zpětné účinky na napájecí síť

Annotation

The work deals with the design of induction heating device for pyrolysis of waste. First part describes the pyrolysis as physico-chemical thermal process. It deals with the advantages, disadvantages and application. Listed here specified requirements for induction pyrolysis furnace for the decomposition of municipal solid waste. Next part of the work is closely examines the theory of induction heating and calculations designed for a specific induction heating proposed pyrolysis furnace. There are two models of the device created in the software Wolfram Mathematica and Agros2D and their results are compared with each other. On their basis is reviewed ability of the pyrolysis furnace meet the specific requirements. The last part of this work deals with the power supply of device and its reverse effect to the power grid. Here is the solution of symmetrization, voltage fluctuations, harmonics and reactive power of induction pyrolysis furnace.

Keywords: Pyrolysis of waste; induction heating; Wolfram Mathematica; Agros2D; reverse effect to the power grid

Obsah

Seznam grafů	i
Seznam obrázků	ii
Seznam tabulek	iii
Seznam symbolů a zkratk	iv
Seznam konstant	v
1. Úvod.....	1
2. Pyrolýza	2
2.2 Fyzikálně – chemický pohled na pyrolýzu.....	2
2.3 Výhody a nevýhody pyrolýzy odpadů	3
2.4 Zařízení určené pro pyrolýzu odpadu	4
2.5 Technické parametry indukční pece pro pyrolýzu odpadu	5
3. Výpočet indukční pyrolýzní pece	7
3.1 Teorie indukčního ohřevu	7
3.2 Vlnové rovnice válcového elektromagnetického vlnění	7
3.3 Model odvozený z náhradního schématu	9
3.3.1 Výpočet indukčního ohřevu válcové vsázky	13
3.3.2 Výsledky výpočtu indukčního ohřevu pro pyrolýzu odpadu.....	21
3.4 Tepelný ohřev.....	22
3.4.1 Teorie sdílení tepla.....	22
3.4.2 Model sdílení tepla při indukčním ohřevu pro pyrolýzu odpadu v programu Wolfram Mathematica	23
3.5 Model indukčního ohřevu v programu Agros2D	33
3.5.1 O programu Agros2D	33
3.5.2 Tvorba modelu indukčního ohřevu.....	34
3.6 Vliv izolace na účinnost pyrolýzní pece	40
4. Zpětný vliv indukčního ohřevu na síť.....	43
4.1 Způsob napájení pyrolýzní pece.....	43
4.1.1 Přímé připojení na síť	43
4.1.2 Rotační měnič kmitočtu	44
4.2 Zpětné účinky pyrolýzní pece na napájecí síť.....	46
4.2.1 Symetrizace obvodu.....	46
4.2.2 Kolísání napětí, flicker.....	48
4.2.3 Vyšší harmonické	48
4.2.4 Vliv jalového výkonu na síť	50

5. Závěr	53
Seznam literatury	54
Příloha I.....	I

SEZNAM GRAFŮ

GRAF I - P.CP V ZÁVISLOSTI NA POLOMĚRU ROTAČNÍHO VÁLCE.....	25
GRAF II - DETAIL P.CP PŘECHODU MEZI VÁLCEM A TKO.....	25
GRAF III – PRŮBĚH QV V ZÁVISLOSTI NA PRŮMĚRU VÁLCE PRO PŘÍPAD A.....	28
GRAF IV – PRŮBĚH QV V ZÁVISLOSTI NA PRŮMĚRU VÁLCE PRO PŘÍPAD B.....	29
GRAF V – NÁRŮST TEPLoty T V ZÁVISLOSTI NA ČASE T A POLOMĚRU R PRO PŘÍPAD A.....	30
GRAF VI - NÁRŮST TEPLoty T V ZÁVISLOSTI NA ČASE T A POLOMĚRU R PRO PŘÍPAD B.....	30
GRAF VII - NÁRŮST TEPLoty V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO PŘÍPAD A.....	31
GRAF VIII - NÁRŮST TEPLoty V ZÁVISLOSTI NA ČASE PRO PŘÍPAD B.....	31
GRAF IX - ROZLOŽENÍ TEPLoty DLE PRŮMĚRU VÁLCE V ČASE PRO PŘÍPAD A.....	32
GRAF X - ROZLOŽENÍ TEPLoty DLE PRŮMĚRU VÁLCE V ČASE PRO PŘÍPAD B.....	32
GRAF XI - ZÁVISLOST SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA A NA TEPLotĚ.....	35
GRAF XII - POROVNÁVÁNÍ POLYNOMU S FUNKCÍ SOUČINITELE PŘESTUPU TEPLA.....	36
GRAF XIII - ROZLOŽENÍ TEPLoty V ŘEZU VÁLCE V ČASE 150 000s (AGROS2D).....	39
GRAF XIV - 3D MODEL ROZLOŽENÍ TEPLoty VE VÁLCI V ČASE 150 000s (AGROS2D).....	39
GRAF XV - NÁRŮST TEPLoty T V ZÁVISLOSTI NA ČASE T A POLOMĚRU R PRO PŘÍPAD DOKONALE ZAIZOLOVANÉHO VÁLCE (E=0).....	41
GRAF XVI -- POROVNÁNÍ NÁRŮSTU TEPLoty V PROSTORU VÁLCE V ZÁVISLOSTI NA RŮZNÉM E (R=0,5M).....	42
GRAF XVII - PRŮBĚH NAPÁJECÍHO PROUDU A NAPĚTÍ OBVODU INDUKČNÍ PYROLÝZNÍ PECE.....	49
GRAF XVIII - PROCENTUÁLNÍ ZASTOUPENÍ HARMONICKÝCH V PROUDU VZTAŽENÝCH NA PRVNÍ HARMONICKOU.....	50
GRAF XIX - PRŮBĚHY PROUDU I _I (T), I _C (T), I _{RL} (T) A NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ PŘI IDEÁLNÍ KOMPENZACI.....	51
GRAF XX - PRŮBĚHY PROUDU I _I (T), I _C (T), I _{RL} (T) A NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ PŘI KOMPENZACI KONDENZÁTOREM 400kVAR.....	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>OBRÁZEK I - OBECNÉ SCHÉMA ROTAČNÍHO VÁLCOVÉHO BUBNU.....</i>	<i>6</i>
<i>OBRÁZEK II - INDUKČNÍ PYROLÝZNÍ PEC (ILUSTR. OBR.) [8].....</i>	<i>6</i>
<i>OBRÁZEK III - SOUSTAVA VÁLCOVÝCH SOUŘADNIC.....</i>	<i>8</i>
<i>OBRÁZEK IV - PRINCIPIÁLNÍ SCHÉMA INDUKČNÍHO OHŘEVU.....</i>	<i>10</i>
<i>OBRÁZEK V - PŘETRANSFORMOVANÉ SCHÉMA INDUKČNÍHO OHŘEVU NA JEDNODUCHÝ OBVOD.....</i>	<i>10</i>
<i>OBRÁZEK VI - VÁLCOVÁ CÍVKA S VÁLCOVOU VSÁZKOU.....</i>	<i>14</i>
<i>OBRÁZEK VII - SOUČINITEL A PRO VÝPOČET INDUKČNOSTI VÁLCOVÝCH CÍVEK, 1 - D/L, 2 - D/L.....</i>	<i>15</i>
<i>OBRÁZEK VIII - ELEKTRICKÉ SCHÉMA PRO ODVOZENÍ POTŘEBNÉ KAPACITY.....</i>	<i>17</i>
<i>OBRÁZEK IX - MODEL PYROLÝZNÍ PECE.....</i>	<i>34</i>
<i>OBRÁZEK X - ROZLOŽENÍ TEPLŮ V PYROLÝZNÍM VÁLCI V ČASE 150 000s (AGROS2D).....</i>	<i>38</i>
<i>OBRÁZEK XII - SCHÉMA INDUKČNÍHO OHŘEVU NA 50 Hz.....</i>	<i>43</i>
<i>OBRÁZEK XIII - SCHÉMA NAPÁJENÍ INDUKČNÍHO OHŘEVU MĚNIČEM KMITOČTU.....</i>	<i>44</i>
<i>OBRÁZEK XIV - SCHÉMA ROTAČNÍHO MĚNIČE KMITOČTU.....</i>	<i>45</i>
<i>OBRÁZEK XV - SYMETRIZAČNÍ OBVOD, PŘEVOD NA ADMITANCE.....</i>	<i>46</i>

SEZNAM TABULEK

<i>TABULKA I - PRODUKCE A SLOŽENÍ TKO NA HLAVU V USA, NORSKU A POLSKU [3]</i>	<i>2</i>
<i>TABULKA II - SLOŽENÍ PRODUKTŮ PYROLÝZY NĚKTERÝCH POLYMERŮ PŘI TEPLOTĚ 740°C [5].....</i>	<i>3</i>
<i>TABULKA III - PARAMETRY VÁLCOVÉ PYROLÝZNÍ PECE</i>	<i>5</i>
<i>TABULKA IV - VÝSLEDKY VÝPOČTŮ ELEKTRICKÉ ČÁSTI ZAŘÍZENÍ.....</i>	<i>21</i>
<i>TABULKA V - KONSTANTY PRO VÝPOČET SDÍLENÍ TEPLA [15] [16].....</i>	<i>24</i>
<i>TABULKA VI - SOUSTAVA ROVNIC PRO ŘEŠENÍ SYMETRIZACE</i>	<i>47</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

TKO		tuhý komunální odpad
∇^2	—	Laplaceův operátor
\mathbf{E}	$V \cdot m^{-1}$	vektor intenzity elektrického pole
\mathbf{H}	$A \cdot m^{-1}$	vektor intenzity magnetického pole
μ	$H \cdot m^{-1}$	permeabilita
ε	$F \cdot m^{-1}$	permitivita
γ	$S \cdot m^{-1}$	měrná elektrická vodivost
ω	s^{-1}	úhlový kmitočet
μ_r	$H \cdot m^{-1}$	relativní permeabilita
U	V	elektrické napětí
I	A	elektrický proud
L	H	indukčnost
C	F	elektrická kapacita
R	Ω	elektrická kapacita
M	H	vzájemná indukčnost
Z	Ω	impedance
N	—	počet závitů
M	H	vzájemná indukčnost
q	—	činitel jakosti cívky
p	—	poměr počtu závitů
η_{el}	—	elektrická účinnost
$\cos \varphi$	—	účinník
$\tan \varphi$	—	ztrátový činitel
a	m	hloubka vniku
Q_v	$W \cdot m^{-3}$	výkon objemového zdroje
ρ	$kg \cdot m^{-3}$	hustota
c_p	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku
T	K	absolutní teplota
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	tepelná vodivost
T_a	K	teplota v jádru proudícího prostředí
T_s	K	teplota povrchu tělesa
α	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	součinitel přestupu tepla
ε	—	emisivita
β	K^{-1}	teplotní objemová roztažnost kapaliny
$T_{stř}$	K	střední teplota
ΔT	K	absolutní hodnota rozdílu teplot
ν	$m^2 \cdot s^{-1}$	kinematická viskozita kapaliny
Gr	—	Grashofovo číslo
Pr	—	Prandtlovo číslo
Nu	—	Nusseltovo číslo
a	$m^2 \cdot s^{-1}$	teplotní vodivost
S	m^2	plocha
V	m^3	objem

Z	—	počet zubů rotoru rotačního měniče kmitočtu
n	$\text{ot.} \cdot \text{min}^{-1}$	počet otáček za minutu
X_L	Ω	induktivní reaktance
X_C	Ω	kapacitance
G	S	vodivost
Y	S	admitance

SEZNAM KONSTANT

μ_0	$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$	permeabilita vakua
σ	$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$	Stefan-Boltzmannova konstanta,
g	$g = 9.81 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	tíhové zrychlení

1. Úvod

Cílem této diplomové práce je návrh indukčního ohřevu pro pyrolýzu odpadu. Konkrétně pak ověření funkčnosti pyrolýzní indukční pece navržené dle charakteristických hodnot zadaných katedrou elektroenergetiky FEL ČVUT. K tomuto účelu jsou v práci zpracovány matematické modely v softwarech *Wolfram Mathematica* a *Agros2D*, které simulují indukční ohřev v zařízení. Porovnáním těchto modelů také vzniká přesnější představa o chování daného zařízení. Dalším cílem této práce bylo celkové zhodnocení takového zařízení v praxi včetně jeho zpětného vlivu na napájecí síť.

Indukční pyrolýzní pece jsou zařízení, která se k likvidaci odpadu používají poměrně krátkou dobu a na velmi omezené úrovni. Přitom technologie pyrolýzy se využívá již od 80. let, kdy však byla využívána hlavně na experimentální úrovni. Většina těchto zařízení pracovala na principu přímého ohřevu pece způsobeném spalováním plynů a technologie indukčního elektrického ohřevu pyrolýzních pecí se vyskytovala zcela minoritně. V současné době existuje určitý rozvoj v této oblasti, hlavně podmíněný rostoucími nároky na ekologické zpracování odpadu, stále se však jedná spíše o jednotlivé projekty. Ty se pak ve většině případů soustředí na likvidaci materiálů s dominantním obsahem polymerů, např. použité pneumatiky, zdravotnický materiál apod. Zařízení analyzované v této práci zaměřující se na likvidaci tuhého komunálního odpadu se dá považovat spíše za unikátní.

Cílem této práce je zhodnotit výhody a nevýhody technologie pyrolýzy odpadu, zanalyzovat klady a zápory navrženého indukčního zařízení, jeho funkčnost a využitelnost pro pyrolýzu odpadu a jeho zpětné účinky, kterými může zatěžovat síť a ovlivňovat tak nepříznivě jiná zařízení připojená v síti.

2. Pyrolýza

2.1 Likvidace odpadů

Množství společností vyprodukovaných odpadů se rok od roku zvyšuje. Příčinou je nejen zvyšující se životní úroveň, ale také narůstající procento materiálů, dříve běžně využívaných, dnes zařazených mezi odpadní materiály. Naopak možnosti skládkování odpadů se každým rokem snižují v důsledku ekonomické náročnosti (technologické úpravy prostor určených k umístění skládky, údržba skládky atd.), zaplňujícím se skládkám a také díky zvyšujícím se ekologickým nárokům kladeným na jejich provoz. Např. na území ČR smí být od 19. července 2009 v provozu pouze skládky, které jsou plně v souladu s legislativou EU. [1] V důsledku toho došlo k jejich úbytku na našem území.

Zpracování odpadů je z hlediska současného stavu moderní společnosti existenční nutností. Jejich skládkování má negativní a někdy i vysloveně destruktivní ráz na životní prostředí. Jedním z nejmarkantnějších problémů jsou polymery, jež jsou v přírodních podmínkách téměř nerozložitelné a přitom mohou tvořit více jak 10% tuhého komunálního odpadu (dále TKO), viz *Tabulka I*. Za komunální odpad je pak považován „veškerý odpad vznikající na území obce při činnosti fyzických osob a který je uveden v prováděcím právním předpise s výjimkou odpadu vznikajícího u právnických osob nebo fyzických osob oprávněných k podnikání“ [2].

	Produkce odpadu na hlavu (kg)	Papír/karton (%)	Plasty (%)	Mokrý organický odpad (%)	Železo a sklo (%)	Zbylé části (%)
USA	800	38	9	29	14	10
Norsko	470	31	7	18	8	36
Polsko	260	14	2	38	9	37

Tabulka I - Produkce a složení TKO na hlavu v USA, Norsku a Polsku [3]

Nároky moderní doby pak ještě zvyšují zájem o hledání nových energetických zdrojů a s tím i o nové způsoby zpracování odpadu. Vyjma recyklace, při které dochází k cyklickému zpracování materiálu, je nejrozšířenějším způsobem energetického využití odpadů jejich spalování. Tento oxidační proces prováděný ve spalovnách umožňuje zmenšit objem odpadů na minimum a vyprodukovat energii vhodnou k vytápění či k výrobě elektrické energie. Jiným aplikovaným termickým procesem je pyrolýza, které se dále věnuje tato práce. V případě TKO jsou výhody zpracování odpadů zřejmé. Nižší přímá zátěž životního prostředí formou otevřené skládky, zvyšující se energetická využitelnost materiálu a v některých případech ekonomická výhodnost. Naopak negativně může být životní prostředí ovlivněno unikajícími plyny vznikajícími při termických procesech. Tento fakt také výrazně ovlivňuje ekonomickou výhodnost projektů nových spaloven díky potřebě vysokoúčinného čištění spalin vzniklých při spalování.

2.2 Fyzikálně – chemický pohled na pyrolýzu

Za pyrolýzu je označován termický proces likvidace odpadu. Jedná se o reduktivní proces, tj. proces, při němž je obsah kyslíku v reakčním prostoru nulový nebo substechiometrický vzhledem ke zpracovanému materiálu. Termický rozklad technologií pyrolýzy probíhá nejčastěji v rozmezí teplot 400 až 800°C. Na zpracovávaný materiál je působeno teplotou na hranici jeho chemické stability. Rozkládají se organické části materiálu,

dochází k odštěpení bočních řetězců makromolekulárních látek až na stálé nízkomolekulární produkty a tuhý uhlíkatý zbytek. [4] Při tomto exotermním procesu dochází k růstu míry entropie. Výstupem z pyrolýzy je standardně pevný, kapalný a plynný zbytek. Pevná část obsahuje minerály obsažené v původním materiálu a uhlík. Používá se jako aktivní uhlí, bezkouřové palivo nebo jako výztuha v gumárenském průmyslu. Kapalná frakce je směs organických sloučenin. Využívá se v petrochemii, jako zdroj chemických látek nebo jako palivo. Plynná frakce obsahuje nezkondenzované látky.

Produkt (% objemu)	PVC	Polyester	Polyetylen	Pneumatiky
Vodík	0,7	-	0,5	0,8
Metan	2,8	0,3	16,2	10,2
Etylen	2,1	0,5	25,5	2,6
Alifatické uhlovodíky	0,8	0,1	18,9	2,4
Benzen	4,8	7,8	16,9	9,9
Styren	-	71,6	1,1	-
Ostatní aromatické uhlovodíky	22,4	16,0	12,1	18,0
Vosky	-	-	7,3	0,3
Chlorovodík	56,3	-	-	1,6
Plniva	-	-	-	7,9
Uhlík	8,8	0,3	0,9	42,8
Součet (%)	98,7	96,6	99,4	95,5

Tabulka II - Složení produktů pyrolýzy některých polymerů při teplotě 740°C [5]

Pyrolýzu dělíme dle teploty na nízkoteplotní (<500°C), středně-teplotní (500-800°C) a vysokoteplotní (>800°C).

Chemický proces pyrolýzy probíhá standardně ve třech fázích. V první fázi dochází k vysušení vsázky odpadu a vzniku vodních par vlivem odpaření vody z TKO. Tento proces probíhá, dokud teplota v reakčním prostoru pyrolýzního kotle nevystoupá k hodnotě 200°C. Dále dochází k procesu suché destilace. Ve velké míře zde nastává odštěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních organických látek a přeměna makromolekulárních struktur na plynné a kapalné organické produkty a pevný uhlík. V poslední fázi se tvoří plyny a produkty suché destilace se dále transformují a štěpí. V průběhu tohoto procesu se mohou makromolekulární organické látky transformovat i vícekrát. Přitom jak z pevného uhlíku, tak i z pevných kapalných látek vznikají stabilní plyny jako je H₂, CO, CO₂ a CH₄.

2.3 Výhody a nevýhody pyrolýzy odpadů

Pyrolýza patří nepochybně mezi moderní technologická řešení problému likvidace odpadu. Nahrazuje, stejně jako oxidační procesy spalování odpadu, dnes zastaralé a stále méně perspektivní skládkování. Proti spalování má ale celou řadu výhod.

V první řadě poskytuje výhodu fakt, že pyrolýza jako redukční proces probíhá v inertním prostředí, tedy bez přístupu vzduchu. Na rozdíl od spalovacích procesů, které produkují velké objemy spalin, jež je následně nutno za velkých nákladů čistit, produkuje pyrolýzní proces až 10x menší objem spalin, které jsou navíc po vyčištění zcela využitelné. [5] Produkované plyny také zcela postrádají oxidy dusíku. Zásadní výhodou tohoto postupu je, že k rozkladu makromolekul likvidovaného odpadu dochází při nedostatku kyslíku a tím je omezena tvorba

polychlorovaných dibenzo-dioxinů, resp. furanů, což jsou extrémně toxické a zároveň persistentní organické polutanty.

Pyrolýza je teoreticky více investičně výhodná než spalování. Je tomu tak z důvodu již zmíněného menšího množství spalin, tedy i menších nároků na jejich čištění. Paliva vyprodukovaná na konci procesu jsou navíc snadněji obchodovatelná než pára či teplo, které lze dodávat pouze v omezeném okruhu v blízkosti spaloven.

Na druhou stranu plyny vzniklé pyrolýzou vykazují mnohem vyšší míru znečištění než plyny vzniklé při spalování. Surový plyn z pyrolýzy obsahuje značná množství lehkých uhlovodíků, fenolů i jiných kyslíkatých látek, dehet i plynné škodliviny jako HCl, H₂S a HF. [6]. Je třeba chránit obsluhu zařízení, jelikož kysličník uhelnatý i siřičíky v pyrolýzních plynech jsou silně toxické a při únicích by mohlo dojít k otravě. Při technologii ohřevu kotle za pomoci přímého spalování surového plynu vzniklého z pyrolýzy také odpadá výhoda čištění malého množství plynů a je nutné čistit spaliny stejným způsobem jako je tomu u spaloven.

Pyrolýzní proces potřebuje k tomu, aby byl účinný určitou výhřevnost TKO. Tomu napomáhá zejména velké množství plastů v odpadech. Lze zpracovávat také pneumatiky (u spalování pouze při použití speciálních roštů), oleje a nebezpečné odpady (u spalování nelze). Na rozdíl od spalování je tento proces také jen minimálně závislý na složení likvidovaného odpadu, což je kladem zvláště pro nehomogenní a měnící se složení TKO. Nevýhodou může být koroze, ubývání a znečištění kovu pyrolýzního kotle při přítomnosti chloru v TKO. Naneštěstí není možné z uhlíkatého zbytku nebo prchavých produktů během pyrolýzy sloučeniny chloru odstranit.

Z výše uvedených hledisek vyplývá, že pyrolýza je zvláště výhodná pro likvidaci odpadů s vysokou výhřevností, obsahujících např. polymery, dřevo apod. Naopak zpracování TKO touto cestou může být problematické.

2.4 Zařízení určené pro pyrolýzu odpadu

Technologie zařízení určených pro pyrolýzu dosáhla v posledních desetiletích značného vývoje. Téměř všechny praktické realizace pyrolýzních stanic se zaměřily na jediný typ karbonizačního reaktoru – kontinuální rotační pec, která představuje skutečně optimální technologickou jednotku i pro značně nehomogenní odpady. Odpad je v nepřímě otápeném bubnu pece otáčením neustále promícháván, posunován a poměrně stejnosměrně zahříván. [6]

Základem bubnových rotačních pecí je ocelový válec, otočný kolem podélné osy, která je obvykle mírně skloněná vůči horizontální rovině. V přední části válce je hermeticky uzavíratelný poklop, v zadní části válce je umístěn odvod tuhých zbytků a plynných produktů.

Bubnové rotační pece lze považovat za univerzální agregát na likvidaci odpadu, dají se v nich likvidovat všechny druhy průmyslových odpadů, ale i TKO, kaly, pastovité, kapalné i pevné odpady. Výhodou bubnových rotačních pecí je nejen dobré přehrnování a promísení odpadů v důsledku otáčení pece, ale i intenzivní přenos tepla jak sáláním, tak konvekcí. Regulace a řízení procesu pyrolýzy je tak částečně možná i změnou otáček. [7] Bubnové rotační pece se využívají při spalování a princip jejich konstrukce je stejný i u procesu pyrolýzy pouze rozdílnými charakteristickými specifiky.

Pyrolýzní pece se zásadně liší způsobem přívodu tepla. Klasickou známou konstrukcí pyrolýzních stanic konstruovaných již v počátku 70. let jsou pece přímo ohřívány plynovými hořáky, či s přívodem horkého ohřátého vzduchu např. zavedenými oteplovacími kanály v bubnu pyrolýzní pece (buben KWE). K vyhřívání pyrolýzního kotle je využíváno spalování surového pyrolýzního plynu. V takovém případě ale odpadá výhoda čištění malého objemu plynů a vzniklé spaliny je nutno čistit stejným způsobem jako je tomu u spaloven odpadu.

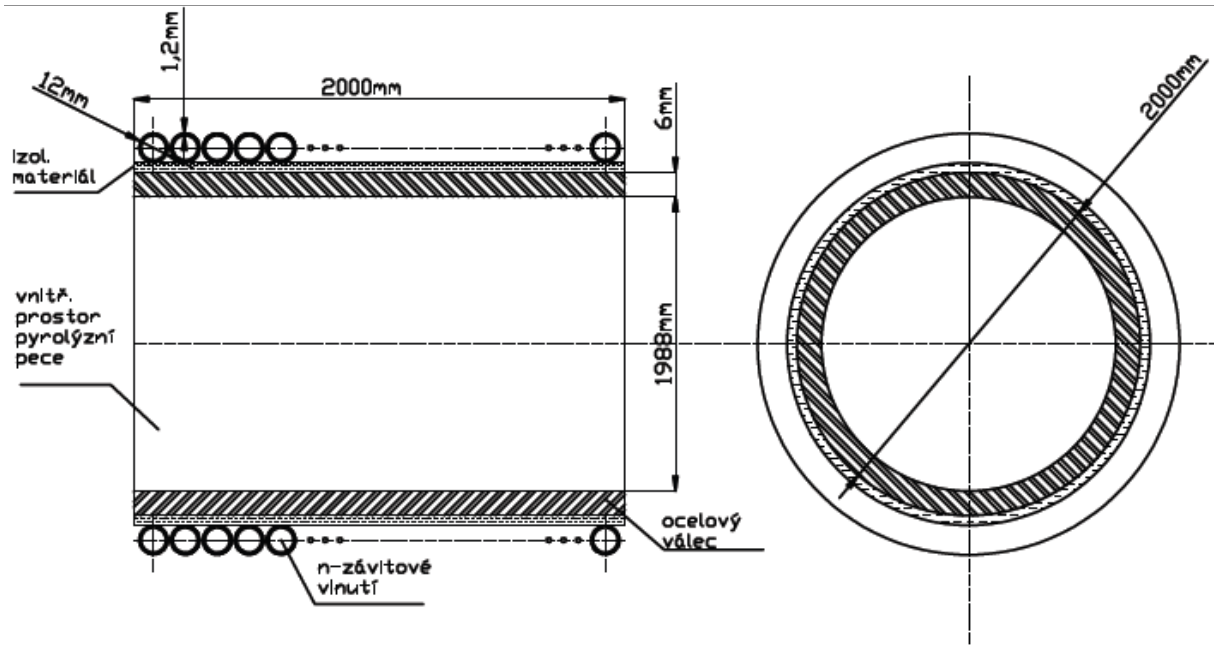
2.5 Technické parametry indukční pece pro pyrolýzu odpadu

Druhým způsobem, jenž je i tématem této práce, jsou pyrolýzní bubnové rotační pece pracující na principu indukčního ohřevu. Buben rotační pece je vybaven cívkou z duté trubky, v níž koluje chladicí kapalina. Vinutí je umístěno v axiální ose bubnu a je napájeno střídavým napětím o dané frekvenci z měniče napětí. Buben je zkonstruovaný z dobře tepelně vodivé vhodné oceli a otáčí se velmi nízkými otáčkami za pomoci motoru, aby docházelo k dobrému míšení vloženého TKO, což ulehčuje tepelný přenos a rozklad materiálu. Vznikající plyny jsou odváděny do zásobníku. Kapalné palivo je ke konci procesu odváděno z reakčního prostoru do připravených nádob. Na konci procesu jsou z bubnu rotační pece odsáty pevné zbytky ve formě koksu.

Vlivem průchodu proudu vinutím dochází k elektromagnetické indukci a válec rotační pece je ohříván procházejícími vířivými proudy a hysterezními ztrátami až na požadovanou teplotu. Teplota válce je přitom přímo ovlivněna kmitočtem, kterým je napájeno vinutí válce. Konkrétní zadané parametry zařízení jsou uvedeny v tabulce (*Tabulka III*) a na schématu zařízení (*Obrázek I*).

Parametry válcové pyrolýzní pece	
Materiál pláště	Ocel 11 375
Průměr	2000 mm
Délka	2000 mm
Tloušťka pláště	6 mm
Teplota provozní zaizolovaného pláště	420°C
Materiál vinutí	Cu
Průměr vinutí	12 mm
Šířka vinutí	1,2 mm
Odebrané teplo vsázkou	50 kW/h
Doba potřebná pro konverzi	8-10 h

Tabulka III - Parametry válcové pyrolýzní pece



Obrázek I - obecné schéma rotačního válcového bubnu (bokorys, nárys)



Obrázek II - Indukční pyrolýzní pec (ilustr. obr.) [8]

3. Výpočet indukční pyrolýzní pece

3.1 Teorie indukčního ohřevu

Indukční ohřev je možný jen u materiálů elektricky vodivých. V předmětu z vodivého materiálu, který je vložen do střídavého magnetického pole, se indukují vířivé proudy. Tyto proudy předmět zahřívají. Často se zjednodušeně přirovnává indukční ohřev k transformátoru, kde výstupní vinutí představuje vsázka a je spojeno nakrátko. Doprava tepla do vsázky se tedy neděje tepelným spádem jako u zařízení např. odporových (s nepřímým ohřevem). Teplo se dopravuje střídavým magnetickým polem a vzniká přímo ve vsázce. Vsázka je nejteplejším objektem celé soustavy — vše ostatní může být studené. Vznik tepla přímo ve vsázce, přičemž vsázka není mechanicky s ničím vázána, patří k největším výhodám indukčního ohřevu.

Indukční ohřev umožňuje nezvykle vysoké měrné příkony do vsázky. Volbou frekvence proudu, který napájí ohřívací vinutí (induktor) a v jehož magnetickém poli je vsázka, můžeme vhodně ovlivnit i rozdělení tepla vyvíjeného ve vsázce. Frekvence se při indukčních ohřevech pohybuje od 50Hz až do 30 000Hz. Pro mnoho dalších výhod získává indukční ohřev v metalurgii, ve strojírenství atd. stále širší uplatnění. Teorie indukčního ohřevu je založena na elektrodynamice, vyplývající z Maxwellových rovnic. Tyto rovnice určují vlnový charakter elektromagnetického pole. Podstatou vlnových jevů je konečná rychlost šíření těchto jevů. Kdyby se daný jev šířil rychlostí nekonečně velkou, nebylo by jeho šíření postupné. Jev by byl okamžitě v celém daném prostoru a neexistovalo by proto ani vlnění.

Jakákoliv fyzikální veličina (tlak, mechanická výchylka, intenzita elektrického pole) se v prostoru šíří určitou rychlostí v charakteristickou pro tento prostor.

Budeme-li uvažovat šíření rovinné a prostor bez útlumových vlastností, bude se např. tlaková výchylka postupně v jednotlivých místech zvyšovat na stále stejnou maximální hodnotu. Tlaková výchylka „poběží“ a její maximální hodnota (amplituda) se nebude zmenšovat. Prostor však má vždy útlum (ztráty), takže výchylka „poběží“ a její maximální velikost se bude postupně zmenšovat.

Výchylka se však může zmenšovat ještě jiným vlivem než tlumením. Nastává to např. při uvažování kulového prostoru, v němž se výchylka šíří ze středu tohoto prostoru. Výchylka (amplituda) zde klesá vlivem rozšiřování se prostoru od středu. [9]

Průchodem proudu vodičem induktoru vzniká elektromagnetické vlnění, jež vždy při dopadu na vodivou stěnu vytváří indukční Joulovo teplo. Určitá část vlnění se při dopadu na vodivou stěnu dostává do materiálu a indukuje v něm vířivé proudy, které ho zahřívají. Zbylá část se odrazí. Vířivé proudy vznikají předáním značné kinetické energie elektronů atomům materiálu vsázky, čímž dochází k ohřevu materiálu v důsledku zvýšení rozkmitu atomů.

3.2 Vlnové rovnice válcového elektromagnetického vlnění

Pro obecné elektromagnetické vlnění se uvažuje homogenní neohrazené izotropní klidné prostředí. Je charakterizováno konstantami ε, μ, γ . Rovnice šíření se odvodí z Maxwellových rovnic.

Transformací Maxwellových rovnic se získají vlnové rovnice, které obsahují pouze jednu hodnotu intenzity elektromagnetického pole, \mathbf{H} nebo \mathbf{E} ve tvaru

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \cdot \varepsilon \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu \cdot \gamma \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

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

kde ∇^2 je Laplaceův operátor,
 \mathbf{E} je vektor intenzity elektrického pole,
 \mathbf{H} je vektor intenzity magnetického pole,
 μ je absolutní permeabilita,
 ε je absolutní permitivita,
 γ je měrná elektrická vodivost.

Při předpokladu, že jsou intenzity \mathbf{H} a \mathbf{E} harmonicky proměnné ve tvaru fázoru, lze pro prostředí vodivé i nevodivé, pro elektromagnetické vlnění rovinné i válcové psát

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0 \quad (3)$$

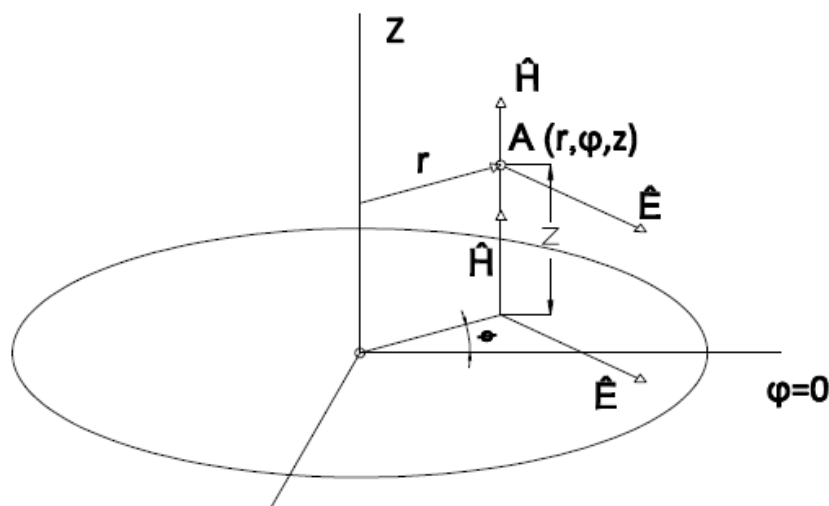
$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

kde

$$(5) \quad k^2 = (\omega^2 \cdot \mu \cdot \varepsilon - j \cdot \omega \cdot \mu \cdot \gamma) = -j \cdot \omega \cdot \varepsilon \cdot (\gamma + j \cdot \omega \cdot \varepsilon)$$

Konstanta k se nazývá *konstanta šíření* a charakterizuje elektromagnetické vlnění z hlediska prostředí, úhlového kmitočtu ω a harmonických průběhů \mathbf{H} a \mathbf{E} .

Velmi často je v praxi zdrojem elektromagnetického vlnění válcová plocha. Je tomu tak i u této práce, kde je válcový dutý rotační kotol vsázkou a induktor je ve formě válcové cívky. Pro zjednodušení úvah se pracuje pouze s představou teoreticky nekonečně dlouhých válcových cívek, kde studované jevy závisí pouze na rozměru r . Stoupání cívky je natolik malé, že se dá předpokládat kolmost proudových vláken k ose cívky. Rychlost šíření proudové vlny je nekonečně velká.



Obrázek III - Soustava válcových souřadnic

Umístíme vyzářující válec tak, aby jeho osa splynula s osou Z válcového souřadnicového systému. V kterémkoliv bodě A tohoto systému o souřadnicích r, φ, z jsou vektory elektrické intenzity \vec{E} a magnetické intenzity \vec{H} funkcí poloměru r a nezávisí na úhlu natočení φ ani na vzdálenosti z . Ve vzdálenost r od osy mají všechny body sousedě válcové plochy stejné hodnoty \vec{E} a \vec{H} . [10]

Pro válcové elektromagnetické vlnění se využívá válcová soustava souřadnic, takže je nezbytné převést do této soustavy i Laplaceův operátor ∇^2 . Pro vyjádření v cylindrických souřadnicích využijí transformaci

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \quad (6) [11]$$

ve válcových souřadnicích lze pak psát

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} \quad (7)$$

Pokud je jev pro zjednodušení výpočtu závislý pouze na souřadnici poloměru r , pak lze položit hodnoty závislé na úhlu natočení φ a vzdálenosti z rovny nule.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial \varphi^2} = \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial z^2} = 0 \quad (8)$$

Potom po dosazení do obecných vlnových rovnic budou vlnové rovnice válcové elektromagnetické vlny pro vodivé i nevodivé prostředí

$$\frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial r} + k^2 \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (9)$$

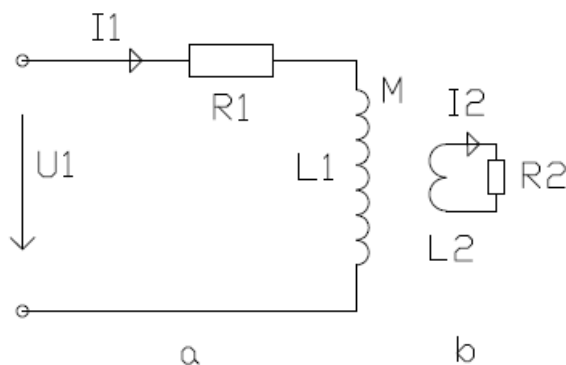
$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial r} + k^2 \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (10)$$

Tyto funkce jsou funkcemi Besselovými. Konstanta k je dána vlastnostmi materiálu použitého zařízení.

Z vlnových rovnic pak lze vypočítat určitá specifika, s kterými je nutno počítat v části věnující se výpočtům tepelného ohřevu vsázky. V ose válce totožné s osou Z je hodnota průvodiče r rovna nule. Jak je vidět z vlnových rovnic, r se nachází ve zlomku $\frac{1}{r}$ v čitateli. Kdyby se postupovalo ve výpočtech, až k ose Z , došlo by k dělení nulou, což je dělení, jenž nemá v oboru reálných čísel smysl. Je tedy nutné při zadávání oboru hodnot r postupovat od nějakého vyššího kladného reálného čísla, aby nedošlo ve výpočtech k chybám.

3.3 Model odvozený z náhradního schématu

Na základě teorie elektromagnetického vlnění ve vodivém materiálu lze využít následující schéma k odvození modelu pro výpočet parametrů elektrotepelného zařízení. Schéma elektrotepelného zařízení tvoří dva indukčně spřažené obvody. Schéma je totožné se schématem (Obrázek IV) transformátoru se sekundární stranou spojenou nakrátko.



Obrázek IV - Principiální schéma indukčního ohřevu

Na primární straně obvodu lze vidět induktor, tj. ohřívací cívku s jejím odporem a indukcí. Hodnoty na primární straně na obrázku označené písmenem *a* označujeme indexem „1“. Sekundární obvod označený písmenem *b* je v mém případě tvořen ohřívaným rotačním válcem pece, ve kterém dochází k pyrolytickému procesu. Hodnoty příslušící této části zařízení budou označovat indexem 1. Rotační válec je umístěn uvnitř válcové cívky tvořené vinutím primární strany a má s ní vzájemnou indukčnost, jež značí *M*.

Dále hodnoty náhradního schématu značí:

U_1 ... efektivní hodnota napětí přivedeného na svorky primární strany

I_1 ... efektivní hodnota proudu v obvodu induktoru

R_1 ... činný odpor induktoru

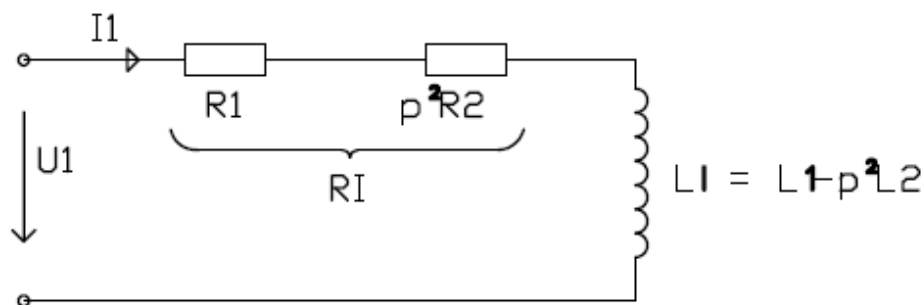
L_1 ... indukčnost ohřívací cívky

R_2 ... činný odpor rotačního válce (vsázky)

L_2 ... indukčnost rotačního válce (vsázky)

Úspěch technologického řešení pyrolýzní pece závisí na jejím uspořádání odvozeném z technických parametrů. Účelem výpočtu je stanovit a ověřit parametry induktoru, tj. ohřívací cívky tak, aby odebírala patřičný výkon. U většiny indukčních zařízení se pracuje velmi často se zkušenostmi získanými při konstrukci obdobných zařízení v minulosti. Bohužel indukční pyrolýzní pec je poměrně značnou novinkou a tudíž se nelze příliš odvolávat na dřívější zkušenosti s konstrukcí obdobných zařízení. S jasným návrhem uspořádání cívky bude pro tuto práci podstatné především určit počet závitů cívky induktoru potřebných pro dodání patřičného výkonu do ohřívaného materiálu, tedy do rotačního válce pyrolýzní pece.

Aby byla soustava jednodušeji řešitelná, provedla se dle [12] transformace schématu pro dva indukčně vázané obvody na obvod jednoduchý (Obrázek V).



Obrázek V - Přetransformované schéma indukčního ohřevu na jednoduchý obvod

Pro obvod se dvěma indukčně spráženými obvody lze psát jednoduchým odvozením z Kirchhoffových zákonů následující rovnice

$$R_1 \cdot I_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 \cdot I_1 + j \cdot \omega \cdot M \cdot I_2 = U_1 \quad (11)$$

$$R_2 \cdot I_2 + j \cdot \omega \cdot L_2 \cdot I_2 + j \cdot \omega \cdot M \cdot I_1 = 0 \quad (12)$$

Z rovnice (11) vyjádřím I_2 a dosadím do (12):

$$I_2 = -\frac{j \cdot \omega \cdot M \cdot I_1}{R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2} \quad (13)$$

$$I_1 \cdot \left(R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2} \right) = U_1 \quad (14)$$

což dále upravuji na

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2}} \quad (15)$$

ve jmenovateli je impedance na svorkách induktoru

$$\begin{aligned} Z_1 &= R_1 + j \cdot \omega \cdot L_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2 \cdot (R_2 - j \cdot \omega \cdot L_2)}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} = \\ &= R_1 + \frac{\omega^2 \cdot M^2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} \cdot R_2 + \left(L_1 - j \cdot \omega \cdot \frac{\omega^2 \cdot M^2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} \cdot L_2 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Z předchozího odvozování lze vyjádřit poměr

$$\vec{p} = \frac{\vec{I}_2}{\vec{I}_1} = -\frac{j \cdot \omega \cdot M}{R_2 + j \cdot \omega \cdot L_2} \quad (17)$$

V komplexní formě výraz (17) přibližuje převod mezi dvěma indukčně vázanými obvody. Poměr p vyjadřuje přímo poměr mezi primárním proudem, jenž je přítomen v induktoru, a sekundárním proudem, který se objevuje ve vsázce. Dále pracuji s hodnotou absolutní:

$$p = \frac{|I_2|}{|I_1|} = \frac{\sqrt{\omega^2 \cdot M^2}}{\sqrt{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2}} \quad (18)$$

$$p^2 = \frac{\omega^2 \cdot M^2}{R_2^2 + \omega^2 \cdot L_2^2} \quad (19)$$

Pakliže aplikuji poměr p a p^2 na rovnici (16) mohu po dosazení psát

$$Z = R_1 + p^2 \cdot R_2 + (L_1 - j \cdot \omega \cdot p^2 \cdot L_2) = R_I + j \cdot \omega \cdot L_I \quad (20)$$

$$\text{kde } R_I \text{ a } L_I \text{ značí:} \quad R_I = R_1 + p^2 \cdot R_2 \quad (21)$$

$$L_I = L_1 - p^2 \cdot L_2 \quad (22)$$

Odpor a indukčnost, veličiny přetransformované ze strany vsázky na stranu induktoru, značím $p^2 R_2$ a $p^2 L_2$. Díky tomu dojde k zjednodušení obvodu z původního schématu (*Obrázek IV*) na schéma přetransformované (*Obrázek V*). Původní obvod má naprosto stejné veličiny na primární straně jako obvod přetransformovaný. Odpor R_2 se transformuje na primární stranu kladně a indukčnost ze strany vsázky záporně, což má za následek, že výsledný odpor na přepočtené primární straně vzroste a indukčnost poklesne.

Nejprve pro odvození výpočtu uvažuji pro cívku induktoru, pouze jeden závit, který má shodnou geometrii jako celé vinutí o N závitů. Veškeré hodnoty, jež se budou vztahovat k jednomu závitů, jsou dále značeny indexem „(1)“.

Počet závitů, potřebný pro návrh je dán vzorcem

$$N = \frac{U_1}{U_{1(1)}} \quad (23)$$

kde N je počet závitů (-),
 U_1 je napětí na primární straně (V),
 $U_{1(1)}$ je napětí (V), které je nutno přivést na induktor pouze s jedním závitěm, aby ohřívací cívka se vsázkou odebírala zadaný příkon P_1 (nebo aby vsázka absorbovala příkon P_2) při daném kmitočtu f .

Pro zjednodušení předpokládám, že cívka L_1 má pouze jeden závit. Vsázka je prakticky vždy jednozávitová. Lze psát

$$Z_{1(1)} = R_{I(1)} + j \cdot \omega \cdot L_{I(1)} \quad (24)$$

$$R_{I(1)} = R_{1(1)} + p_{(1)}^2 \cdot R_2 \quad (25)$$

$$L_{I(1)} = L_{1(1)} - p_{(1)}^2 \cdot L_2 \quad (26)$$

Pro jednozávitovou cívku platí následující vztahy

$$p = N \cdot p_{(1)} \quad (27)$$

$$I_{1(1)} = N \cdot I_1 \quad (28)$$

$$I_1 = \frac{I_{1(1)}}{N} \quad (29)$$

Uvažuji-li, že jednozávitovou cívku induktoru protéká proud $I_{1(1)}$, bude dle odvození z rovnic (24), (25) a (26)

$$P_1 = R_{I(1)} \cdot I_{1(1)}^2 \quad (30)$$

$$\text{nebo} \quad P_2 = p_{(1)}^2 \cdot R_2 \cdot I_{1(1)}^2 \quad (31)$$

$$I_1^2 = \frac{U_{1(1)}^2}{Z_{1(1)}^2} = \frac{U_{1(1)}^2}{R_{I(1)}^2 + \omega^2 \cdot L_{I(1)}^2} \quad (32)$$

Po dosazení (30) a (31) do (32) mohu tedy psát:

$$P_1 = R_{I(1)} \cdot \frac{U_{1(1)}^2}{R_{I(1)}^2 + \omega^2 \cdot L_{I(1)}^2} \quad (33)$$

$$\text{nebo} \quad P_2 = p_{(1)}^2 \cdot R_2 \cdot \frac{U_{1(1)}^2}{R_{I(1)}^2 + \omega^2 \cdot L_{I(1)}^2} \quad (34)$$

Z toho lze odvodit vzorec pro napětí, které je nutné přivést na induktor, aby jeden závit odebíral výkon P_I

$$U_{1(1)} = \sqrt{\frac{P_1}{R_{I(1)}}} \cdot \sqrt{R_{I(1)}^2 + \omega^2 \cdot L_{I(1)}^2} \quad (35)$$

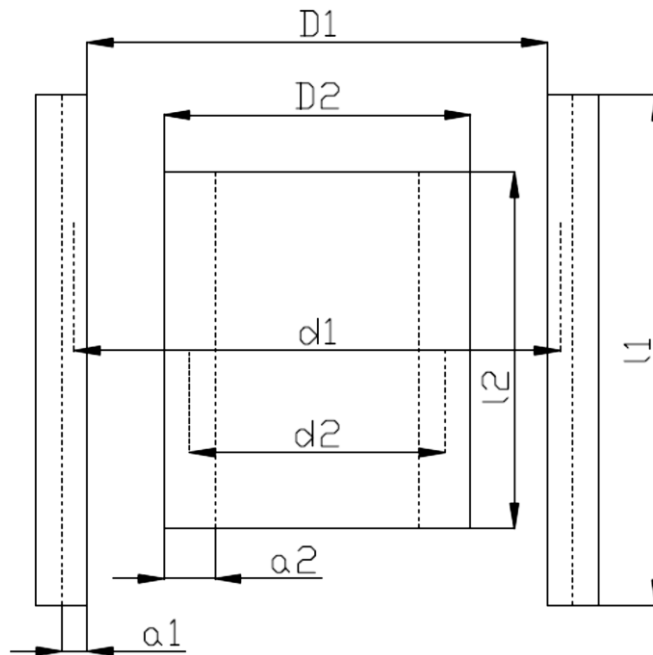
$$\text{nebo} \quad U_{1(1)} = \sqrt{\frac{P_2}{p_{(1)}^2 \cdot R_2}} \cdot \sqrt{R_{I(1)}^2 + \omega^2 \cdot L_{I(1)}^2} \quad (36)$$

Napětí $U_{1(1)}$ mohu vypočítat, znám-li hodnotu P_1 nebo P_2 a hodnotu odporu $R_{I(1)}$, resp. $p^2 R_2$ a $L_{I(1)}$.

Na základě geometrických a materiálových vlastností induktoru spočítám celkový odpor a indukčnost dle vzorců (25) a (26).

3.3.1 Výpočet indukčního ohřevu válcové vsázky

Cílem výpočtu je stanovit $R_{I(1)}$, $L_{I(1)}$ a $p_{(1)}^2 R_2$ pro základní rovnice (25) a (26). Pro zjednodušení uvažuji plnou válcovou vsázku. Hodnoty s indexem 1 se týkají cívky, s indexem 2 pak vsázky.



Obrázek VI - Válcová cívka s válcovou vsázkou

Elektrické průměry se spočítají jako

$$d_1 = D_1 + a_1 \quad (37)$$

$$d_2 = D_2 - a_2 \quad (38)$$

kde a_1, a_2 jsou hloubky vniku (m) u vodiče cívky a vsázky. Hloubka vniku se vypočítá dle vzorce

$$a = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}} \quad (39)$$

a to jak pro cívku, tak pro vsázku, pouze s jinými hodnotami pro konduktivitu γ a pro relativní permeabilitu μ_r .

Dále počítám odpor $R_{1(1)}$ a odpor R_2 . Platí

$$R_{1(1)} = k \cdot \frac{l}{\gamma \cdot a \cdot l_1} \quad (40)$$

kde l je délka vodiče (m), tedy $l = \pi \cdot d_1$,

l_1 šířka stěny (m),

k je činitel respektující vzrůst odporu vinutí s N závity (1,04~1,2). Při více závitovém vinutí vznikají mezi závity izolační mezery, odpor stoupne o 4 až 20%.

Odpor vsázky se počítá obdobně jako odpor pro cívku a to dle vzorce

$$R_2 = \frac{l_{vc}}{\gamma \cdot a_2 \cdot l_2} \quad (41)$$

kde l_{vc} je obvod válcové vsázky (m), tedy $l = \pi \cdot d_2$.

Při výpočtu indukčnosti $L_{1(1)}$ pracuji se dvěma zjednodušujícími předpoklady:

- 1) Všechn konfázní proud $I_{1(1)}$ prochází pouze v hloubce vniku a .
- 2) Celý proud $I_{1(1)}$ prochází středem hloubky vniku (vlastně nulovým průřezem).

Lze psát:

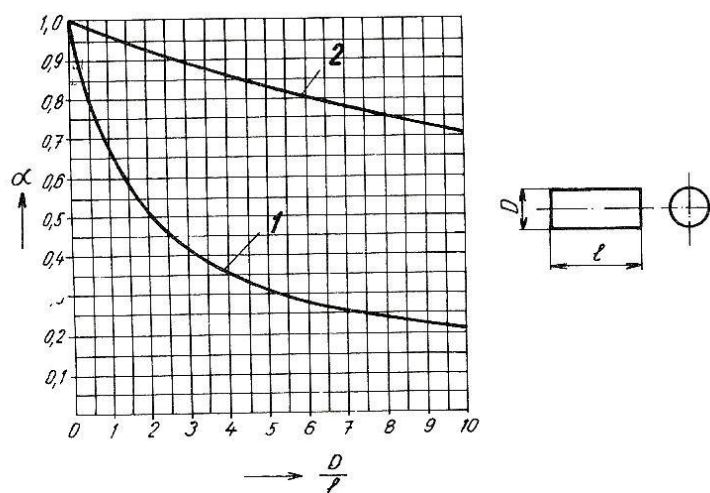
$$L_{1(1)} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A_1}{l_1} \cdot \alpha_1 \quad (42)$$

kde μ_r je poměrná permeabilita, obvykle $\mu_r = 1$,

l_1 osová délka cívky (m),

A_1 je plocha průřezu dutiny cívky (m²), tedy $A_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$,

α_1 koeficient (-) zahrnující v sobě vliv tvaru průřezu cívky a rozměrových poměrů. Pro relativně dlouhé vinutí ($l \rightarrow \infty$) vzhledem k ostatním rozměrům cívky mohou psát $\alpha_1 = 1$. Avšak α_1 je vždy menší než 1, jelikož l_1 má vždy omezenou délku.



Obrázek VII - Součinitel α pro výpočet indukčnosti válcových cívek, 1 - D/l , 2 - D/l

Pro výpočet a jeho přesnost je velmi podstatné určení správné indukčnosti prázdné ohříváné cívky. Při špatném výpočtu této hodnoty může být negativně ovlivněna přesnost celého výpočtu. Koeficient je možno spočítat či odečíst z diagramu (Obrázek VII). Tyto hodnoty vztažené na délku a průměr cívek kruhového průřezu nazýváme Nagaokovy koeficienty. Více viz [13].

Indukčnost L_2 se obdobně jako $L_{1(1)}$ určí z

$$L_2 = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A_2}{l_2} \cdot \alpha_2 \quad (43)$$

kde $A_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$ je průřez vsázkou (m^2),
 $\alpha_2 = f\left(\frac{d_2}{l_2}\right)$ součinitel pro výpočet indukčnosti cívky (-) z *Obrázek VII*.

Dále se spočítá vzájemná indukčnost ohřívací cívky a vsázky dle vzorce

$$M_{(1)} = \mu_0 \cdot \frac{\pi \cdot \frac{d_2^2}{4}}{l_2} \cdot F \quad (44)$$

kde F je činitel pro výpočet vzájemné indukčnosti dvou válcových cívek jako funkce poměrů $F = f\left(\frac{d_1}{l_1}, \frac{d_2}{l_2}, \frac{l_1}{l_2}\right)$, jenž určím z tabulky hodnot, viz [9].

Znám-li $M_{(1)}$, doplníme zpět do odvozené rovnice (19), čímž získám druhou mocninu transformačního převodu induktoru $p_{(1)}^2$ pro zjednodušenou jednozávitovou ohřívací cívku. Doplním zpět do rovnic (25) a (26) a získám hodnoty odporu R_{I1} a indukčnosti L_{I1} pro jednozávitovou cívku se vsázkou. Jelikož je znám výkon navrhovaného zdroje napájení indukčního ohřevu, dosazuji výkon a získané hodnoty R_{I1} a L_{I1} zpět do vzorce (35) a dostávám napájecí napětí obvodu s jednozávitovou cívku U_{11} . Poměr skutečného napájecího napětí a napájecího napětí zjednodušeného obvodu s uvažovanou jednozávitovou cívku udává počet závitů induktoru dle (23). Indukčnost L_I a odpor R_I obvodu získám po vynásobení druhou mocninou počtu závitů z

$$L_I = N^2 \cdot L_{I1} \quad (45)$$

$$R_I = N^2 \cdot R_{I1} \quad (46)$$

Stejně tak indukčnost i odpor ohřívací cívky bez vsázky

$$L_1 = N^2 \cdot L_1 \quad (47)$$

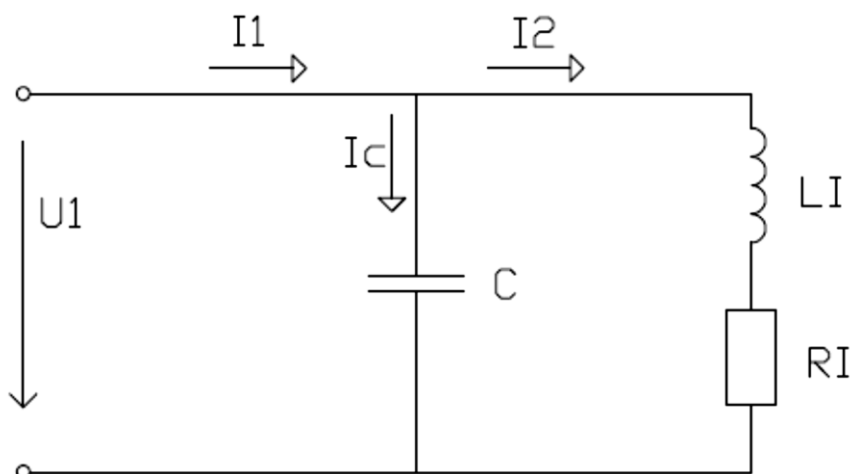
$$R_1 = N^2 \cdot R_1 \quad (48)$$

Skutečný transformační obvod se pak určí ze vzorce

$$p = N \cdot p_{(1)} \quad (49)$$

Proud do cívky induktoru spočítáme z Ohmova zákona dle vzorce

$$I_2 = \frac{U_1}{Z_I} = \frac{U_1}{\sqrt{R_I^2 + \omega^2 \times L_I^2}} \quad (50)$$



Obrázek VIII - Elektrické schéma pro odvození potřebné kapacity

Proud I_2 tekoucí do induktoru má značně větší jalovou složku než složku činnou. Vzniká problém s nadměrným zatěžováním zdroje dodávkou velkého jalového magnetizačního proudu. Tento problém se řeší paralelním připojením vhodně dimenzované cívky paralelně k indukční cívce (Obrázek VIII). Kmitočet obvodu je roven kmitočtu přiváděnému. [11] Proud v kondenzátoru se rovná

$$I_C = j \cdot \omega \cdot C \cdot U_1 \quad (51)$$

kde C je kapacita kondenzátoru (F), která musí mít takovou hodnotu, aby byl obvod právě vyladěný pro přiváděný kmitočet. Potřebnou kapacitu C kondenzátorové baterie pro paralelní připojení k ohřivací cívce se vsázkou a pro kompenzaci na $\cos\varphi = 1$ získám ze vzorce

$$C = \frac{L_I}{R_I^2 + \omega^2 \cdot L_I^2} \quad (52)$$

Začne-li vzrůstat hodnota skutečného odporu cívky se vsázkou R_I pak se hodnota hledané kapacity kondenzátoru pro vyladěný obvod snižuje. Pakliže se hodnota činného odporu obvodu blíží nule, dosahuje kapacita maximálních hodnot. Cílem je získání takové hodnoty kapacity, aby obvod odebíral ze zdroje pouze činnou složku proudu a nikoliv jalovou a nezatěžoval tak nadměrně zdroj. Toho je dosaženo, když je obvod v rezonanci pro přiváděný kmitočet.

Obvod odebírá ze zdroje proudu

$$I_1 = \frac{U_1}{R_I^2 + \omega^2 \cdot L_I^2} \cdot R_I + j \cdot \frac{U_1}{R_I^2 + \omega^2 \cdot L_I^2} \cdot (\omega \cdot C \cdot R_I^2 + \omega \cdot C \cdot \omega^2 \cdot L_I^2 - \omega \cdot L_I) \quad (53)$$

Když je ale obvod vyladěný, jak bylo odvozeno výše, odebírá pouze činnou složku

$$I_1 = \frac{U_1}{R_l^2 + \omega^2 \cdot L_l^2} \cdot R_l \quad (54)$$

čímž byly stanoveny veškeré proudy v obvodu a lze spočítat hodnoty podstatné pro realizaci tepelného modelu zařízení. Více pak o kompenzaci jalového výkonu v části „Vliv jalového výkonu na síť“.

V první řadě se jedná o výkon absorbovaný vsázkou

$$P_2 = p^2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 \quad (55)$$

Tento vztah dává hodnotu výkonu, který byl dodán do vsázky, tj. ocelového válce, z induktoru napájeného zdrojem. Hodnotu předaného tepla Q_v stanovím, jestliže si danou hodnotu vztáhnou na obsah dutého ocelového válce, tj. na obsah oceli ve vsázce. Obsah dutého ocelového válce V_v stanovím ze vzorce

$$V_v = \frac{\pi \cdot D_2 - \pi \cdot (D_2 - t)^2}{4} \cdot l_2 \quad (56)$$

kde t je šířka ocelového válce (m),
 l_2 je osová délka válce (m).

Předané teplo pak lze již získat z těchto hodnot jako poměr

$$Q_v = \frac{P_2}{V_v} \quad (57)$$

což je tedy teplo, které induktor předá vsázce.

Dále lze určit následující hodnoty:

1) Úhel ϕ o který se zpožďuje proud I_1 za napětím U_1 se zjistí z rovnice

$$tg\phi = \frac{\omega \cdot L_l}{R_l} = q \quad (58)$$

z toho se odvodí účinník

$$\cos\phi = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2\phi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + q^2}} \approx \frac{1}{q} \quad (59)$$

kde q je činitel jakosti cívky (-).

2) Příkon, jež odebírá cívka se vsázkou

$$P_1 = R_l \cdot I_2^2 = \frac{U_1}{R_l^2 + \omega^2 \cdot L_l^2} \cdot R_l \quad (60)$$

3) Příkon, jež absorbuje vsázka, viz (55).

4) Elektrická účinnost s jakou je výkon dodávaný induktoru předáván vsázce, tj. ocelovému dutému válci

$$\eta_{el} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{p^2 \cdot R_2 \cdot I_2^2}{R_I \cdot I_2^2} = \frac{p^2 \cdot R_2}{R_I} \quad (61)$$

5) Ztráty, které vznikají v ohřívací cívce induktoru (se vsázkou)

$$P_{1z} = P_1 - P_2 = R_1 \cdot I_2^2 = \frac{U_1^2}{R_I^2 + \omega^2 \cdot L_I^2} \cdot R_1 \approx \frac{U_1^2}{\omega^2 \cdot L_I^2} \cdot R_1 \quad (62)$$

Tyto ztráty mohou nepříznivě působit na práci induktoru, tudíž je potřeba je z cívky odvádět. V případě návrhu pyrolýzní stanice je tento problém řešen dutými měděnými vodiči použitými v cívce induktoru, kterými proudí voda jako chladicí kapalina a odvádí tyto tepelné ztráty pryč z ohřívací cívky.

6) Jalový příkon cívky se vsázkou

$$P_{1j} = \omega \cdot L_I \cdot I_2^2 = \frac{U_1^2}{R_I^2 + \omega^2 \cdot L_I^2} \cdot \omega \cdot L_I \approx \frac{U_1^2}{\omega \cdot L_I} \quad (63)$$

7) Pakliže není v cívce umístěna vsázka, je proud odebíraný prázdnou ohřívací cívkou roven

$$I_0 = \frac{U_1}{Z_0} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_1^2}} \approx \frac{U_1}{\omega \cdot L_1} \quad (64)$$

8) Fáze proudu, který odebírá prázdná ohřívací cívka

$$\cos\varphi = \frac{1}{1 + \frac{\omega^2 \cdot L_1^2}{R_1^2}} \approx \frac{R_1}{\omega \cdot L_1} \quad (65)$$

9) Ztráty v ohřívací cívce bez vsázky

$$P_{1z} = R_1 \cdot I_{10}^2 = \frac{U_1^2}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_1^2} \cdot R_1 \approx \frac{U_1^2}{\omega^2 \cdot L_1^2} \cdot R_1 \quad (66)$$

10) Jalový příkon cívky bez vsázky

$$P_{1j} = \omega \cdot L_1 \cdot I_{10}^2 = \frac{U_1^2}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_1^2} \cdot \omega \cdot L_1 \approx \frac{U_1^2}{\omega \cdot L_1} \quad (67)$$

11) Kapacita kondenzátorové baterie pro ohřívací cívku bez vsázky

$$C_0 = \frac{L_1}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_1^2} \quad (68)$$

11) Vlastní rezonanční frekvence ohřívací cívky se vsázkou

$$\omega^2 = \frac{L_I - C \cdot R_I^2}{L_I^2 \cdot C} \approx \frac{1}{L_I \cdot C} \left(f = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} \right) \quad (69)$$

12) Vlastní rezonanční frekvence ohřívací cívky bez vsázky lze odvodit z rovnic (68) a (69) jako

$$\omega_0^2 = \frac{L_1 - C_0 \cdot R_1^2}{L_1^2 \cdot C_0} \approx \frac{1}{L_1 \cdot C_0} \quad \left(f = \frac{\omega_0}{2 \cdot \pi} \right) \quad (70)$$

13) Činitel jakosti ohřívací cívky induktoru se vsázkou se určí ze vzorce

$$q = \frac{\omega \cdot L_I}{R_I} \quad (71)$$

14) Činitel jakosti ohřívací cívky induktoru bez vsázky se určí ze vzorce

$$q_0 = \frac{\omega \cdot L_1}{R_1} \quad (72)$$

15) Ztráty v kondenzátorové baterii

$$P_{ZC} = U_1^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (73)$$

kde $\operatorname{tg} \delta$ je ztrátový činitel (-) kondenzátorů pro danou frekvenci. Udává poměr mezi kapacitní a odporovou složkou impedance kondenzátoru. Ztrátový činitel vypovídá o kvalitě kondenzátoru. Čím nižší, tím menší ztráty způsobuje. Jeho hodnota se v praxi pohybuje od 0,0002 do 0,005.

16) Někdy se pro kontrolu či výpočty převádí zatěžovací odpor cívky bez vsázky R_1 či se vsázkou R_I na odpor zapojený paralelně R_{1p} resp. R_{Ip} , jenž je připojen na stejné napájecí napětí jako odpor sériový a odebírá stejný činný příkon. Odporem prochází proud I_{10} resp. I_2 . Lze psát

$$R_1 \cdot I_{10}^2 = \frac{U_1^2}{R_{1p}} = \frac{U_1^2}{R_1^2 + \omega^2 \cdot L_1^2} \quad (74)$$

z čehož si vyjádřím náhradní paralelní odpor pro cívku bez vsázky jako

$$R_{1p} = R_1 + \frac{\omega \cdot L_1}{R_1} \cdot \omega \cdot L_1 = R_1 + q_0 \cdot \omega \cdot L_1 \quad (75)$$

Stejně tak lze psát pro cívku se vsázkou

$$R_{Ip} = R_I + \frac{\omega \cdot L_I}{R_I} \cdot \omega \cdot L_I = R_I + q \cdot \omega \cdot L_I \quad (76)$$

Z těchto výpočtů již lze spočítat veškeré podstatné parametry pro konstrukci indukčního zařízení, a to jak samotné ohřívací cívky, tak i kondenzátorové baterie a dalších částí zařízení. [9]

3.3.2 Výsledky výpočtu indukčního ohřevu pro pyrolýzu odpadu

Cílem výpočtů této části mé práce bylo získání konkrétních číselných výsledků pro navrhované zařízení. Zařízení indukční pyrolýzní pece je blíže popsáno v části „*Technické parametry indukční pece pro pyrolýzu odpadu*“. Technické parametry doplňují do aplikovaného postupu z předchozí části této práce. Parametry zařízení byly zadány katedrou a vedoucím mé práce. Výpočty jsem provedl v softwaru *Wolfram Mathematica 7.0.0* a jsou přiloženy k této práci v notebooku *popelka_A.nb* a *popelka_B.nb*. Všechny zde uvedené výsledky jsou zaokrouhleny na dvě desetinná místa. Počet závitů vinutí jsem určil jako nejbližší vyšší celé číslo z výsledku. Hodnotu činitele pro výpočet vzájemné indukčnosti F jsem určil z tabulky hodnoty, viz [9], jako bezrozměrné číslo $F = 0,68$. Nejpodstatnější hodnotou pro mé další výpočty je hodnota předávaného výkonu Q_v . Pro konstrukci induktoru je významný počet závitů cívky. Všechny výpočty byly provedeny pro dva navrhované zdroje.

Výpočet Q_v se v obou případech počítal pro dva myšlenkové modely. V první představě bližší skutečnosti dochází k ohřevu ocelového bubnu a poté až k ohřevu TKO uvnitř. Uvažuji tedy ocelový válec a hodnotu výkonu dodávaného do zařízení P_2 vztahuji na objem ocelového válce jako Q_{v1} . Rozměrem je W/m^3 . Při druhé možnosti výpočtu Q_v dochází k přímému předání výkonu do vsázky z celého povrchu vnitřního válce. Jednotkou Q_{v2} je v tomto případě W/m^2 . Dostal jsem dvě možné sady výsledků s dvěma hodnotami Q_v pro dva různé způsoby napájení:

- I. Zdroj: rotační měnič VÚ ZEZ 380V, 50Hz, 55kW; výpočet s uvažovaným Q_{v1} , Q_{v2}
- II. Zdroj: rotační měnič VÚ ZEZ 500V, 4400Hz, 50kW; výpočet s uvažovaným Q_{v1} , Q_{v2}

Výsledky výpočtů elektrické části zařízení			I.		II.	
Počet závitů induktoru	N	[-]	24		2	
Odpor vsázky	R_2	[mΩ]	1,58		14,86	
Indukčnost vsázky	L_2	[μH]	1,97		1,97	
Skutečný odpor cívky	R_1	[mΩ]	60,04		11,40	
Skutečná indukčnost cívky	L_1	[μH]	148,94		25,85	
Proud zdroje	I_1	[A]	148,94		129,30	
Proud v kondenzátoru	I_c	[A]	959,44		1576,25	
Proud do induktoru	I_2	[A]	970,93		1581,54	
Příkon odebíraný cívkou se vsázkou	P_1	[kW]	56,59		37,34	
Výkon absorbovaný vsázkou	P_2	[kW]	52,83		64,00	
Předávaný výkon	Q_v	[MW.m ⁻³][MW.m ⁻²]	1,40	4,22	1,70	5,11

Tabulka IV - Výsledky výpočtů elektrické části zařízení

Z výsledků výpočtů indukčního zařízení vychází, že v druhé uvažované variantě konstrukce, tj. při napájecím napětí o kmitočtu 4400Hz, by byl induktor složen pouze ze dvou závitů. To by znamenalo při navrženém materiálu a konstrukci vinutí jeho neúměrné zatěžování procházejícím proudem. Docházelo by k značným ztrátám, vinutí by se značně ohřívalo a pravděpodobně by došlo k poškození zařízení. Ani chlazení vinutí by v tomto případě pravděpodobně nedokázalo ztrátový výkon odvést a bylo by velice nákladné. Z toho důvodu variantu napájení frekvencí 4400Hz v dalších výpočtech neuvažují.

3.4 Tepelný ohřev

Po určení všech důležitých elektrických veličin obvodu lze přistoupit k výpočtům tepelného ohřevu vsázky a přechodu vsázka-odpad. Při výpočtech jsem postupoval dle modelu pro ohřev kabelu, jež jsem obdržel od vedoucího práce. Model jsem přepracoval pro své podmínky a využil k výpočtům teplot a tepelných přechodů při mnou zpracovávaném indukčním ohřevu. Následně jsem dle spočtených hodnot vyhodnotil, zda navrhovaný indukční ohřev je využitelný pro pyrolýzu odpadu. Všechny výpočty byly provedeny v programu *Wolfram Mathematica 7.0.0*.

Wolfram Mathematica je výpočetní software, jenž se využívá v mnoha vědeckých technických, matematických i IT oborech, založený na symbolické matematice. Byl zkoncipován Stephenem Wolframem a vyvinut ve Wolfram Research Inc. v Illinois v roce 1988.

Výsledkem mých výpočtů v tomto matematickém softwaru byly grafy přechodu mezi vsázkou a induktorem pro hodnotu tepla Q_v a $\rho \cdot c_p$ v závislosti na poloměru a dále 3D graf nárůstu tepla ve vsázce v závislosti na čase a poloměru a graf nárůstu teploty v závislosti na poloměru. Veškeré grafy byly zpracovány pro oba myšlenkové modely.

3.4.1 Teorie sdílení tepla

V principu lze sdílení tepla označit za přenos energie z prostoru vyšších teplot do prostoru o nižších teplotách. Základní způsoby pro sdílení tepla jsou tři a ve většině případů se uplatňují všechny najednou. Jedná se o sdílení tepla konvekcí, kondukcí a radiací, resp. prouděním, vedením a zářením.

Nejpodstatnější pro výpočet mechanismů sdílení tepla při indukčním ohřevu je Fourier-Kirchhoffova rovnice, která má základní tvar

$$\underbrace{\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial t}}_{1.} = \underbrace{\nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T(r, t))}_{2.} + \underbrace{Q_v}_{3.} \quad (77)$$

kde ρ je hustota ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 c_p měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 T absolutní teplota (K),
 λ tepelná vodivost ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Jednotlivé části rovnice pak popisují:

1. změnu vnitřní energie
2. rychlost konduktivního přívodu tepla
3. výkon objemového zdroje energetické přeměny dalších netepelných energií, v tomto případě výkon vznikající ve vsázce, vztažený na plochu nebo objem vsázky

Dalším podstatným krokem při řešení sdílení tepla a tepelných přechodů je stanovení počátečních a okrajových podmínek. Okrajové podmínky jsou podmínky, které musí splňovat elektromagnetické pole na rozhraní dvou různých prostředí. Vedení tepla je popsáno diferenciálními rovnicemi. Řešením diferenciálních rovnic přímých úloh je rozložení teplot v prostoru a čase za pomoci počátečních (u nestacionárních úloh) a okrajových podmínek. Pro složky intenzity \mathbf{E} tečné k rozhraní platí $E_{teč\ 1} = E_{teč\ 2}$. Obě intenzity jsou intenzity v bodech těsně přilehlých k rozhraní, ale po jeho různých stranách. Pro normálové složky elektrické indukce platí obdobně $D_{norm\ 1} = D_{norm\ 2}$. Pro magnetické pole platí analogicky rovnost tečných složek intenzity \mathbf{H} a normálových složek indukce \mathbf{B} . Nejprve se stanoví počáteční podmínka diferenciálních rovnic, přičemž počáteční podmínka určuje rozložení teploty v tělese při počátku ohřevu, tj. v čase $t = 0$. Počáteční podmínka se dá obecně popsat jako

$$T(r, 0) = T_0(r) \quad (78)$$

Dále se řeší okrajové podmínky. Ty mohou být trojího druhu. Prvním typem je okrajová podmínka I. druhu (Dirichletova), kde je zadána teplota povrchu tělesa T_s jako funkce času

$$T_s(t) = f(r, z, t) \quad (79)$$

Okrajová podmínka II. druhu (Newmannova) určuje rozložení hustot tepelného toku q na povrchu tělesa jako funkce času

$$q(t) = -\lambda \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \quad (80)$$

Okrajová podmínka III. druhu (Fourierova) určuje rozložení součinitele přestupu tepla na povrchu tělesa v čase. Teplo přivedené tělesu/z tělesa vedením je rovno teplu odvedenému/přivedenému prouděním prostředím.

$$\lambda \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = \alpha \cdot (T_a - T_s) \quad (81)$$

kde T_a je teplota v jádru proudícího prostředí (K),
 T_s teplota povrchu tělesa (K),
 α součinitel přestupu tepla ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$). [14]

Řešením Fourier-Kirchhoffovy rovnice a okrajových a počátečních podmínek dostanu výpočet rozložení teplot $T(r, t)$ v ohřivaném válci. Tyto hodnoty následně vynáším do grafů a interpretuji výsledky.

3.4.2 Model sdílení tepla při indukčním ohřevu pro pyrolýzu odpadu v programu Wolfram Mathematica

Vypočítal jsem tepelný ohřev ocelového válce, tj. vsázky induktoru, a ohřev TKO. Při výpočtech jsem postupoval dle modelu pro ohřev kabelu, jež jsem obdržel od vedoucího práce. Model jsem přepracoval pro své podmínky a využil k výpočtům teplot a tepelných přechodů při mnou zpracovávaném indukčním ohřevu. Následně jsem dle spočtených hodnot vyhodnotil, zda navrhovaný zdroj pro indukční ohřev je využitelný pro pyrolýzu odpadu. Všechny výpočty byly provedeny v programu *Wolfram Mathematica 7.0.0*.

Výsledkem byly grafy tepelného ohřevu pro hodnotu dodávané energie Q_v a $\rho \cdot c_p$ v závislosti na poloměru a dále 3D graf nárůstu teploty ve vsázce a TKO v závislosti na čase a poloměru a graf nárůstu teploty v závislosti na poloměru. Všechny výsledky byly zpracovány pro dva různé myšlenkové modely ohřevu, jednou s uvažovaným ohřevem ocelového válce a následného prohřívání TKO, druhý se zanedbaným ocelovým válcem, předpokládající rovnoměrné prohřívání TKO z celé plochy vnitřního povrchu válce.

Při řešení sdílení tepla v pyrolýzní peci, uvažuji vnitřní prostor rotačního ocelového válce zcela zaplněn TKO. Míchání odpadu vlivem postupné rotace rotačního bubnu neuvažuji.

Nejprve jsem z dostupných zdrojů určil charakteristické konstanty dané oceli a komunálního odpadu potřebné pro výpočet, viz (*Tabulka V*).

KONSTANTY	Měrná tepelná kapacita C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	Hustota ρ (kg.m ⁻³)	Měrná tepelná vodivost λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Ocel	461,00	7850,00	50,00
Odpad¹	2459,79	1991,37	7,3

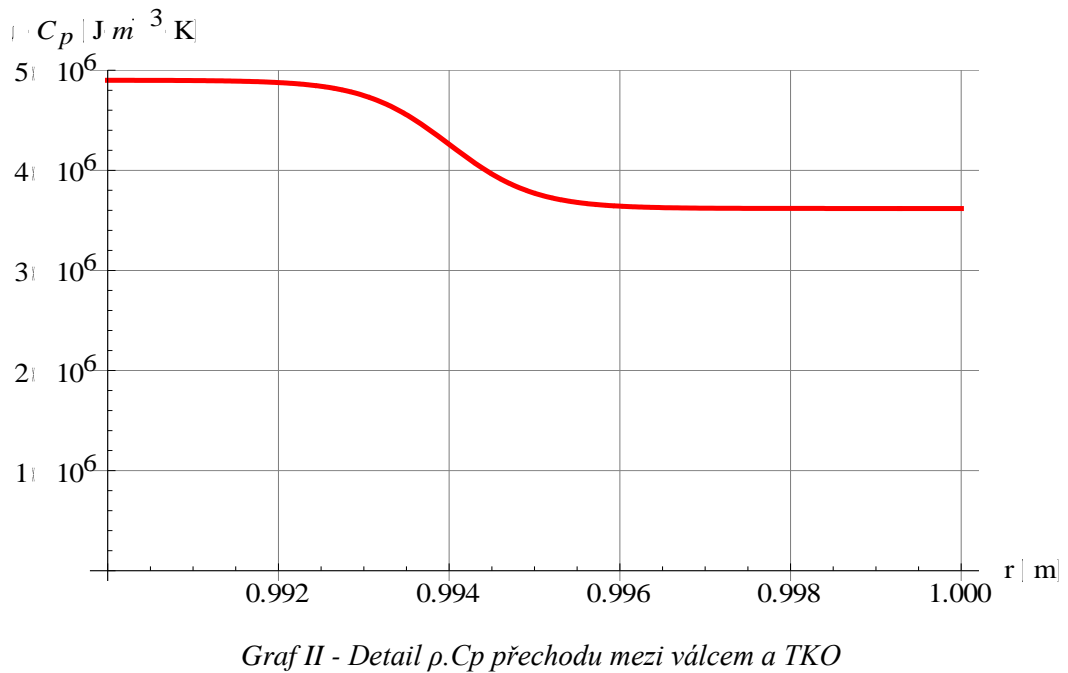
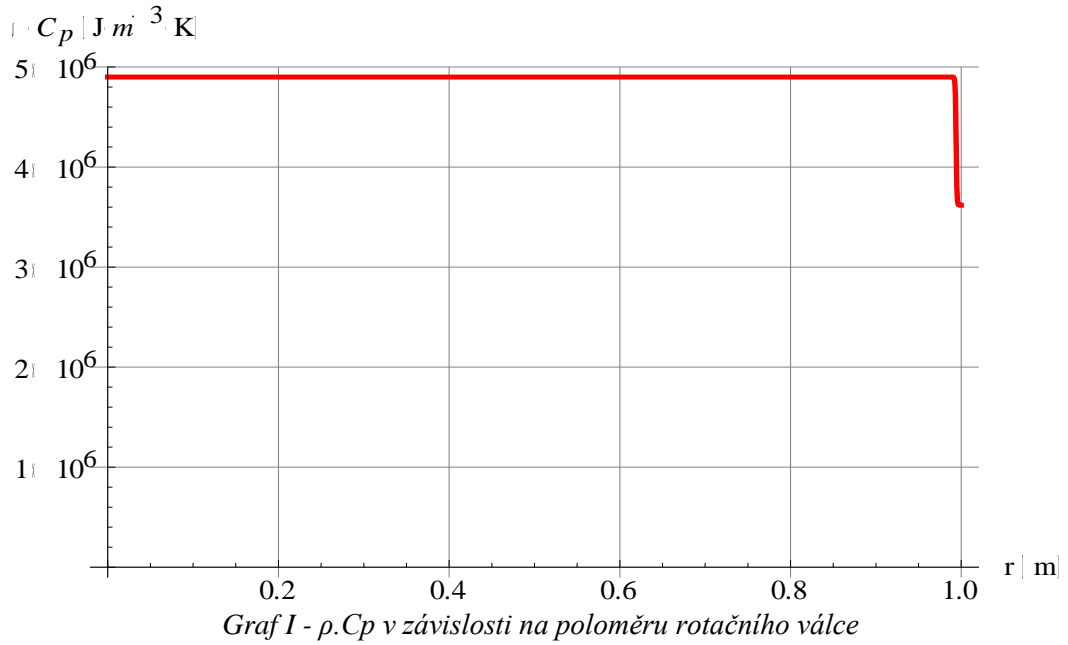
Tabulka V - Konstanty pro výpočet sdílení tepla [15] [16]

Pro lepší představu je hodnota $\rho \cdot c_p$ ve válci v závislosti na poloměru přiblížena v grafech (*Graf I* a *Graf II*). Ve výpočtech používám dva možné uvažované výpočty se dvěma různými okrajovými podmínkami

- A.** při okrajové podmínce vztahujících se k vnějšímu okraji vsázky, tj. ocelového válce;
- B.** při zanedbání vsázky indukčního ohřevu a předpokladu přímého rovnoměrného ohřevu vnitřku válce, tj. komunálního odpadu, z vnitřní plochy ocelového válce.

Při úvaze **B.** by mělo docházet k rychlejšímu dosažení teplot v prostoru dutého válce zaplněného komunálním odpadem a tedy i k jeho případnému rozložení. V prvním případě musí nejprve dojít k ustálení teplot ve válcové ocelové vsázce a až pak dochází k ustálení teplot v prostoru válce.

¹ Hodnota $\rho \cdot c_p$ a λ odpadu byla stanovena, jako průměr z hodnot jednotlivých složek TKO k jejich zastoupení viz PŘÍLOHA I



Počáteční podmínka určuje teplotu ohřivaného materiálu na počátku děje. Jako počáteční podmínku dle (78) platnou pro začátek děje v čase $t = 0$ jsem si stanovil, že

$$T(r, 0) = \underline{10^\circ C} \quad (82)$$

Okrajovou podmínku pro vnitřní průměr indukčního válce zaplněného TKO určím z (79) jako Dietrichovu podmínku I. druhu

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = 0 \quad (83)$$

kde $r \rightarrow 0,994$.

Jak vyplývá z vlnových rovnic, není možné začínat výpočet od osy rotačního válce. Poloměr r je v takovém případě nulový a protože se poloměr nachází ve vlnové rovnici ve jmenovateli, došlo by k dělení nulou. K dobrání se reálného výsledku je nezbytné, aby nejmenší hodnota r byla hodnotou nenulového poloměru blízkého počátku. V mém výpočtu jsem tuto hodnotu stanovil jako $r = 0,01m$.

Dále stanovím vnější okrajovou podmínku válce. Ta se bude lišit dle bodu, ke kterému budu ohřev vztahovat. Pokud za **A.** nezanedbávám ocelový rotační válec, bude vnější okrajová podmínka III. druhu dle (81), tzv. Fourierova, ve tvaru

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = t_{prechod} \cdot \left\{ \alpha \cdot (T(r, t) - T_{vzduch}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T(r, t)^4 - T_{stena}^4) \right\} \quad (84)$$

kde ε je emisivita, $\varepsilon_{ocel} \approx 0,8 (-)$,
 σ Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$,
 α součinitel přestupu tepla ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$).

Součinitel přestupu tepla získám z postupu dle M. A. Michajeva pro proudění do neomezeného prostoru:

1) Spočteme bezrozměrné číslo Gr (Grashofovo číslo)

$$Gr = \frac{\beta \cdot \Delta T \cdot g \cdot l^3}{\nu^2} \quad (85)$$

kde β je teplotní objemová roztažnost kapaliny při střední teplotě
 $T_{stř} = \frac{T+T_0}{2}$ (K^{-1}),
 ΔT absolutní hodnota rozdílu teplot (K),
 g tíhové zrychlení ($9.81 m/s^2$)
 l tzv. charakteristický rozměr; $l = 2 \cdot \pi \cdot r = 6,28m$,
 ν kinematická viskozita kapaliny při střední teplotě $T_{stř}$ ($m^2 \cdot s^{-1}$).

2) Spočteme bezrozměrné číslo Pr (Prandtlovo číslo)

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (86)$$

kde ν kinematická viskozita kapaliny při střední teplotě mezi teplotou stěny a kapaliny ($m^2 \cdot s^{-1}$),
 a teplotní vodivost ($a = \lambda / (\rho \cdot c_p)$) při střední teplotě mezi teplotou stěny a kapaliny.

3) Ze spočteného Gr a Pr vypočteme Nu (Nusseltovo číslo)

$$Nu = c \cdot (Pr \cdot Gr)^n \quad (87)$$

kde c a n jsou konstanty závislé na hodnotě $Pr \cdot Gr$. Konstanty použiji z tabulky:

Pr·Gr	c	n
$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2$	1.18	1/8
$5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7$	0.54	1/4
$2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}$	0.135	1/3

4) Z Nu vypočteme α

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} \quad (88)$$

kde λ je součinitel tepelné vodivosti při střední teplotě $T_{stř}$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 l je charakteristický rozměr, stejný jako při výpočtu Grashofova čísla Gr (m) [17].

Pakliže zanedbám dle **B.** ohřev ocelového válce a přímo působím na jeho vnitřek, využívám podle (80) Neumannovu podmínku II. druhu ve formě

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = t_{prechod} \cdot \frac{-P_2}{S_{in}} \quad (89)$$

kde $t_{prechod}$ je konstanta času přechodu (s),
 P_2 výkon absorbovaný vsázkou (W), podle (55),
 S_{in} plocha, na kterou vztahuji přiváděný výkon, tj. vnitřní plocha rotačního válce (m^2), jenž spočítám z

$$S_{in} = 2 \cdot \pi \cdot r_{min} \cdot l_1 = 2 \cdot \pi \cdot 0,994 \cdot 2 = \underline{12,49\text{m}^2} \quad (90)$$

V ideální představě by ale tento děj trval nekonečně dlouho a nikdy se nezastavil, jelikož by nedošlo k jeho konečnému ustálení. Je tedy nutné zavést regulaci ohřevu, aby se ohřev materiálu v určitý čas zastavil a zdroj přestal dodávat energii zařízení. Jako regulátor poslouží hyperbolický tangens. Regulovat by se dalo i jinými způsoby, např. příkazy if/else. Hyperbolický tangens byl zvolen díky tomu, že se jedná o spojitou funkci na definičním oboru a rovnoměrně tak přechází ze stavu 1 do stavu 0. Pakliže se teplota ve válci dostane na požadovanou hodnotu, získá tangens hodnotu 0 a zdroj tepla dodávaného do válce tak přestává topit a teplota ve válci se ustálí.

Po doplnění regulátoru do okrajové podmínky vypadá výpočet následovně

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = t_{prechod} \cdot \frac{-P_2}{S_{in}} * 0.5 \left(1 - \text{Tanh} \left[\frac{T[r, t] - T_{max}}{10} \right] \right) \quad (91)$$

kde $T_{max} = 300^\circ\text{C}$.

Maximální teplotu jsem určil tak, aby mohlo dojít k porovnání mezi vypočtenými modely. Jelikož v případě **A.** se teplota ustálí přibližně při 300°C , zvolil jsem tuto hodnotu i pro regulaci varianty **B.**

Poslední rovnicí potřebnou k řešení sdílení tepla je výše zmíněná Fourier-Kirchhoffova rovnice viz (77). Měrná tepelná kapacita c_p , hustota ρ a tepelná vodivost λ jsou dány hodnotami

v *Tabulce IV.* a rovnicí přechodu ve výpočtech. Energie z vnitřního zdroje Q_v je v případě indukčního ohřevu reprezentovaná výkonem vypočítaným dle (55) absorbovaným vsázkou, tj. rotačním ocelovým bubnem, a vztaženým na jednotku objemu. Do výpočtu pro případ přímého rovnoměrného ohřevu bez ohřevu válce dle **A.**, Q_v nezahrnuji. Energii z vnitřního zdroje označuji ve výpočtech $Q_{v\text{přechodu}}$ a je dána jako funkce přechodu Q_v .

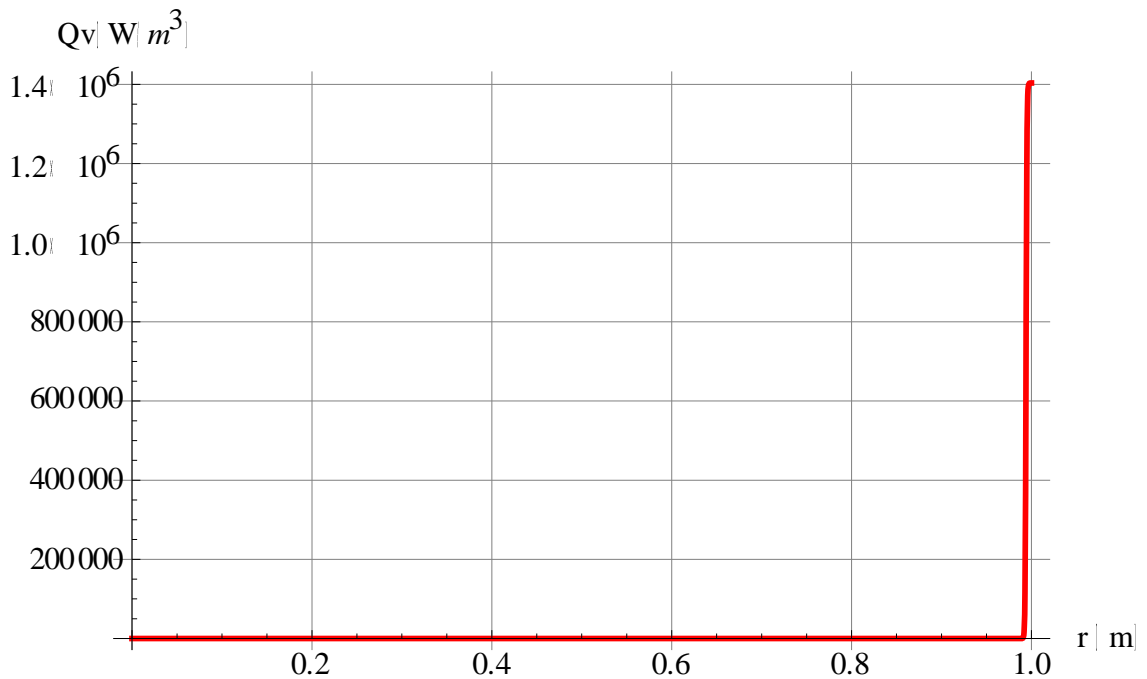
V případě výpočtu dle **A.** a zahrnutí ocelového válce do výpočtu spočítám hodnotu Q_v jako

$$Q_v = \frac{P_2}{V_{\text{valce}}} = \frac{52\,831}{0,038} = \underline{1403,5\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}} \quad (92)$$

kde V_{valce} je objem ocelového válce (m^3), tj.

$$V_{\text{valce}} = \frac{\pi \cdot D_2^2 - \pi \cdot (D_2 - t)^2}{4} \cdot l_2 = \frac{\pi \cdot 2^2 - \pi \cdot (2 - 0,006)^2}{4} \cdot 2 = \underline{0,038\text{m}^3} \quad (93)$$

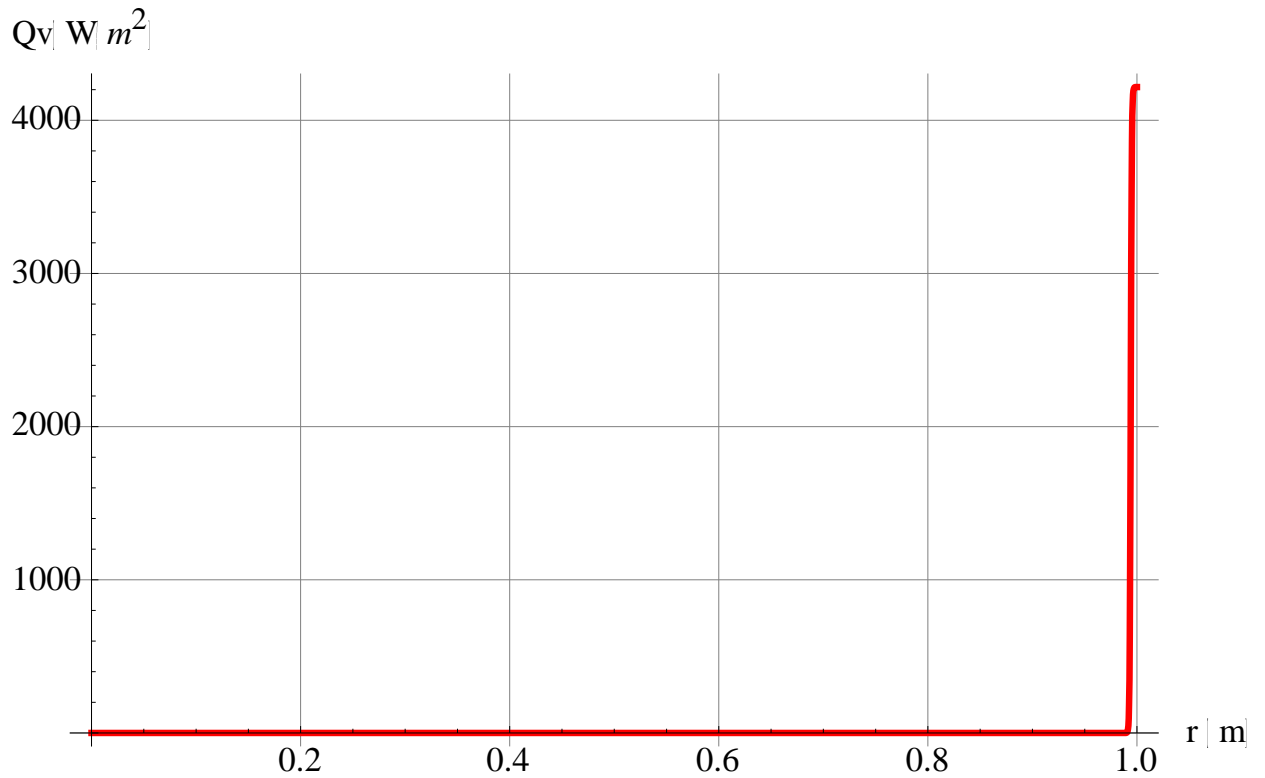
kde t je tloušťka ocelového válce (m).



Graf III – Průběh Q_v v závislosti na průměru válce pro případ **A.**

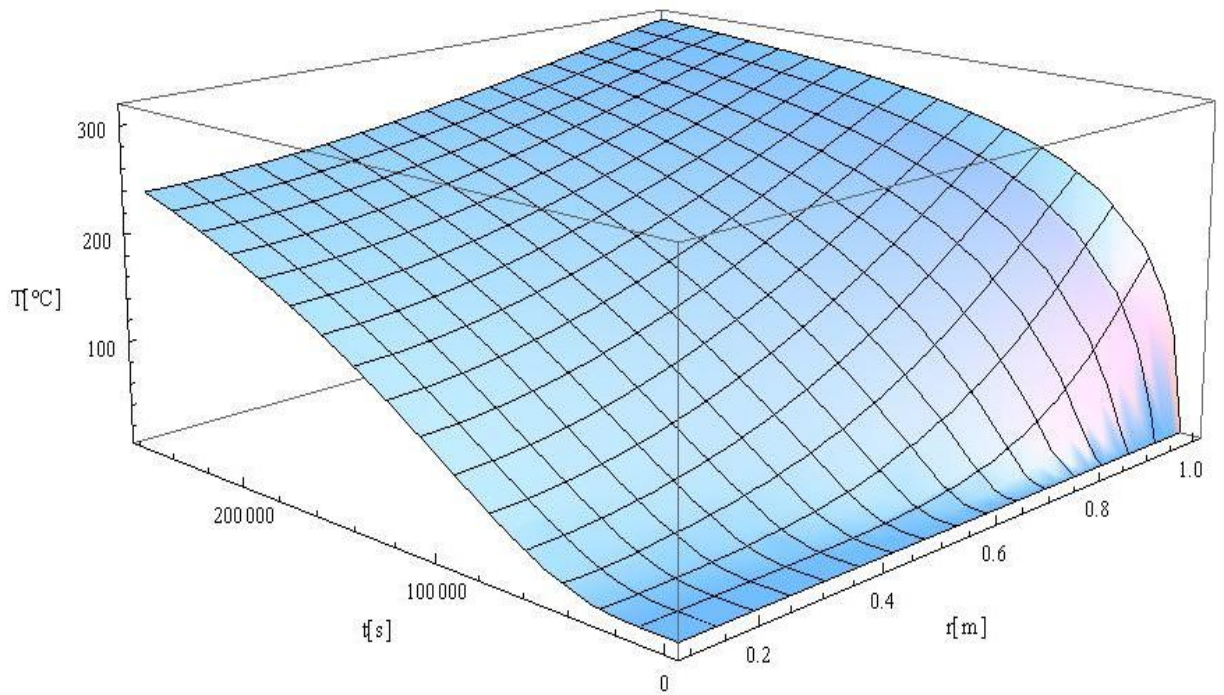
Při druhé výpočtu, kdy nezapočítávám ocelový válec a působím přímo na jeho dutý vnitřek zcela zaplněný vloženým TKO, vztahuji hodnotu absorbovaného výkonu na vnitřní plochu válce S_{in} viz (90), přičemž Q_v zjistím jako

$$Q_v = \frac{P_2}{S_{\text{vnitr}}} = \frac{52\,831}{12,49} = \underline{4229,86\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}} \quad (94)$$

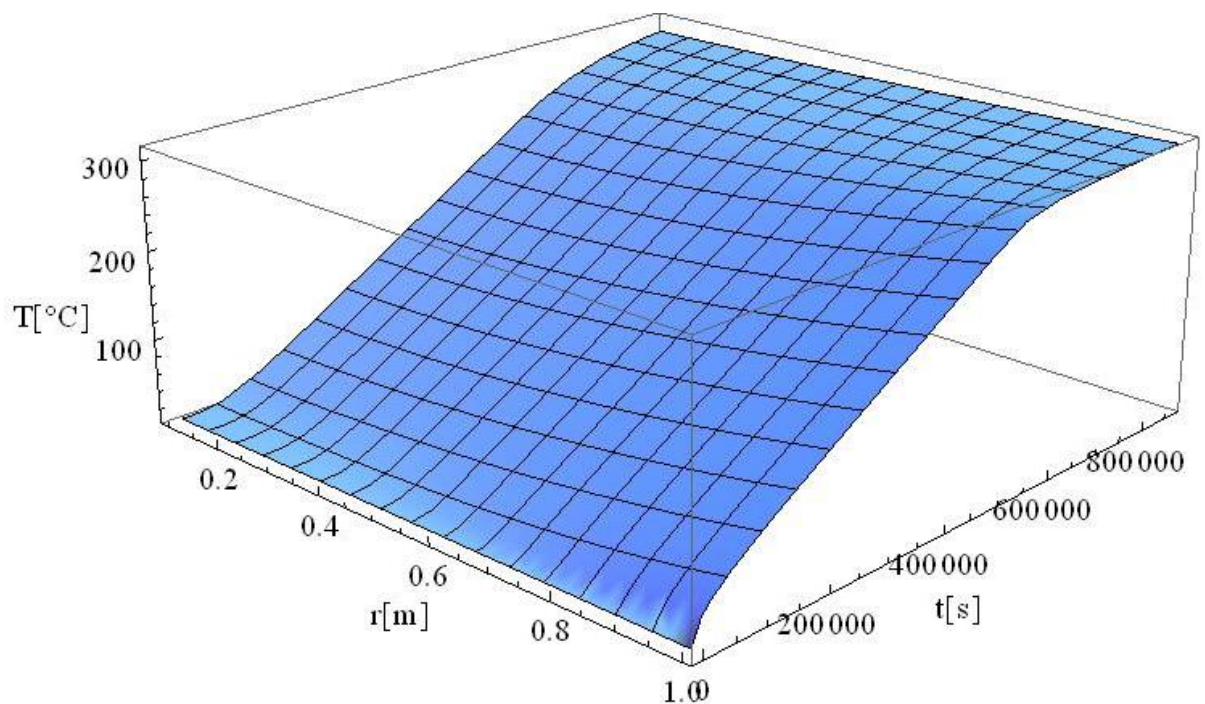


Graf IV – Průběh Q_v v závislosti na průměru válce pro případ B.

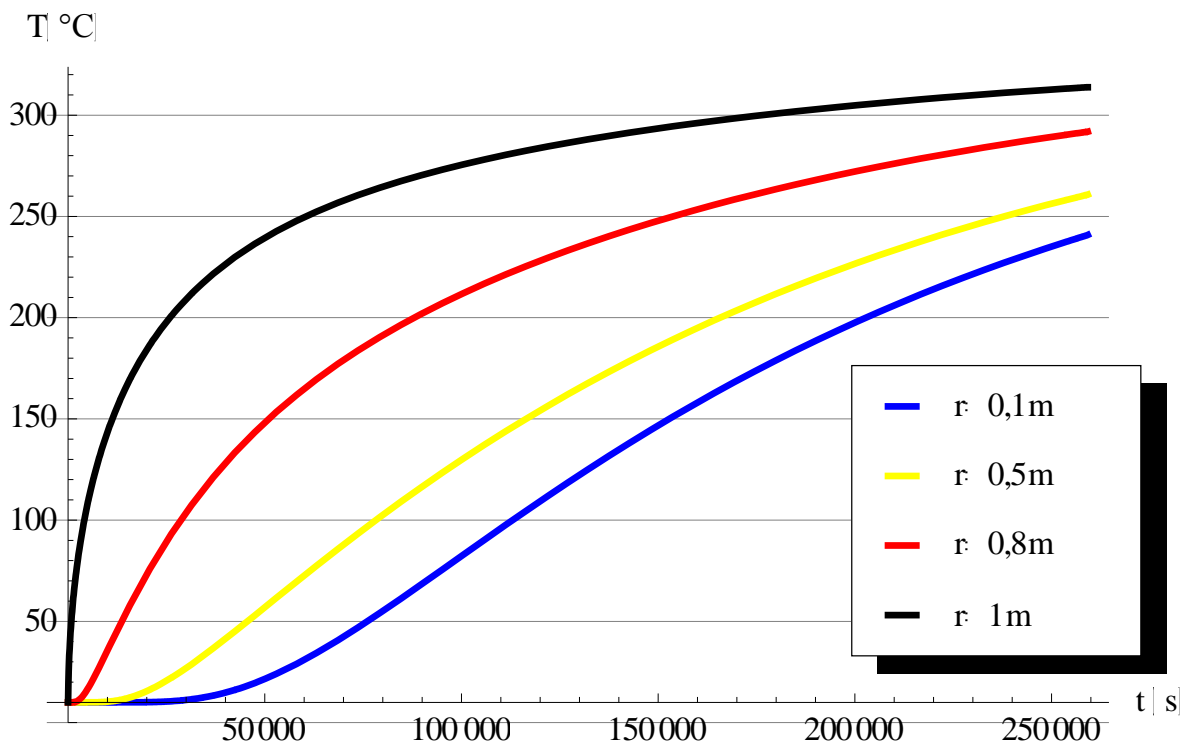
Z řešení Fourier-Kirchhoffovy rovnice, okrajových a počátečních podmínek pak získávám řešení ohřevu TKO v pyrolýzní peci. Ze softwaru *Wolfram Mathematica 7.0.0* získávám 3D grafy ukazující nárůst teploty v peci v závislosti na rostoucím čase t a poloměru r .



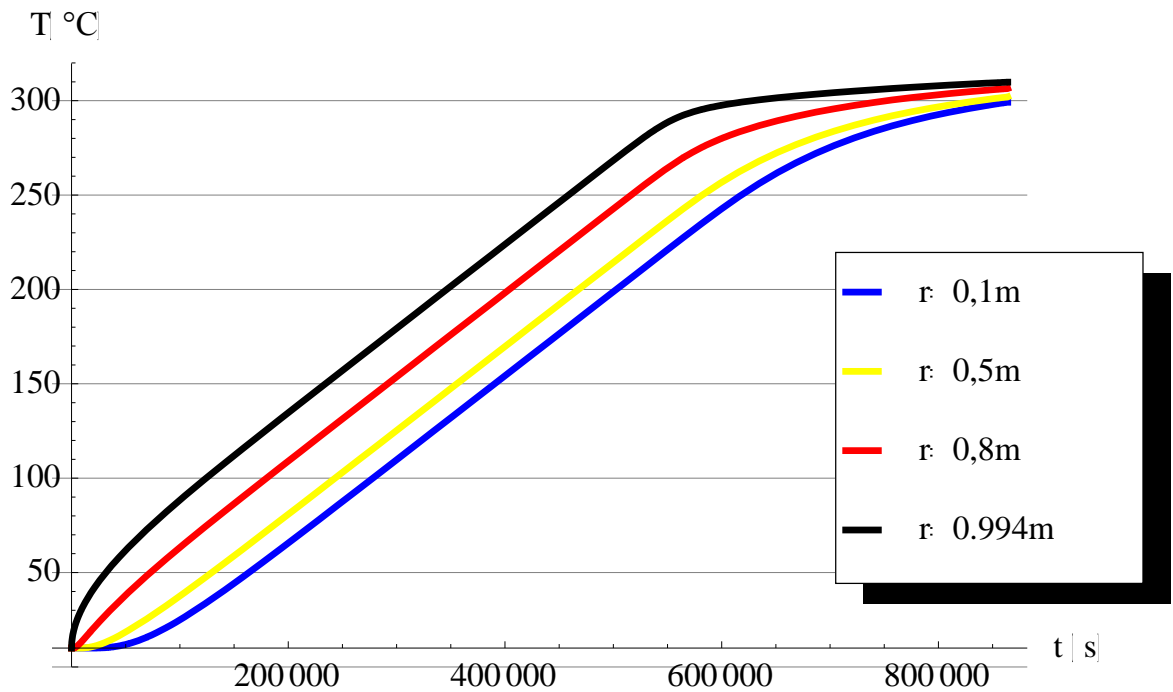
Graf V – Nárůst teploty T v závislosti na čase t a poloměru r pro případ A.



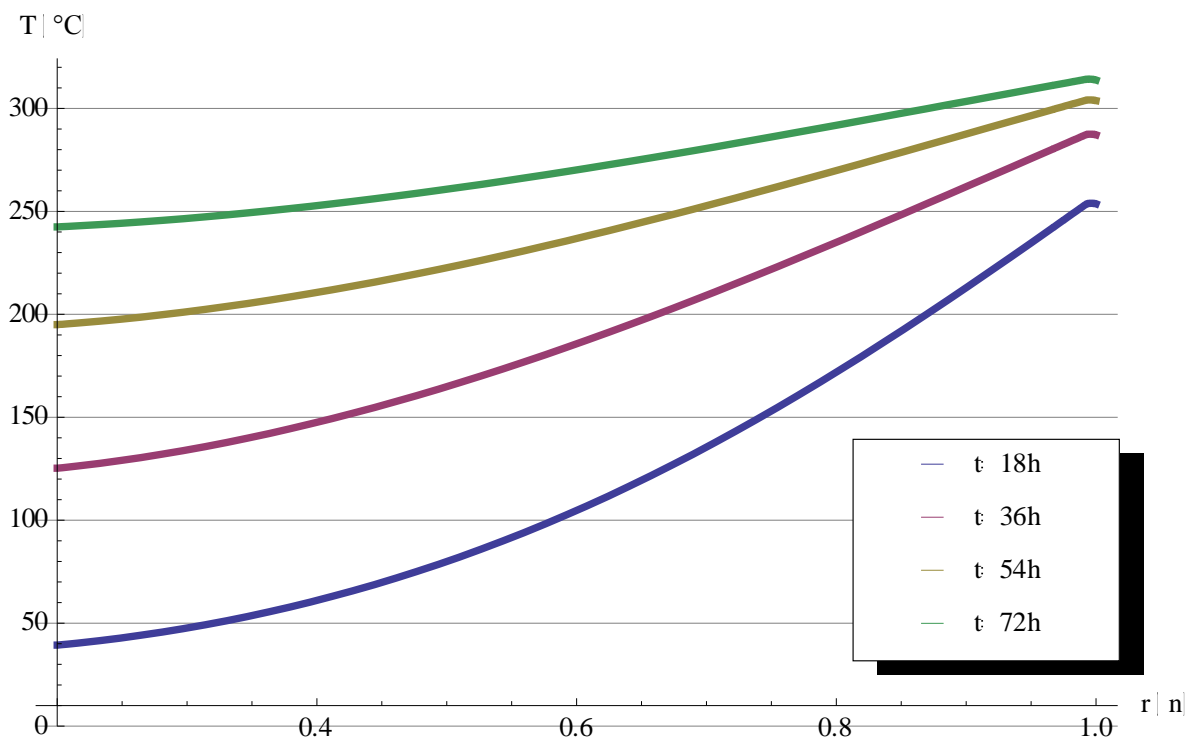
Graf VI - Nárůst teploty T v závislosti na čase t a poloměru r pro případ B.



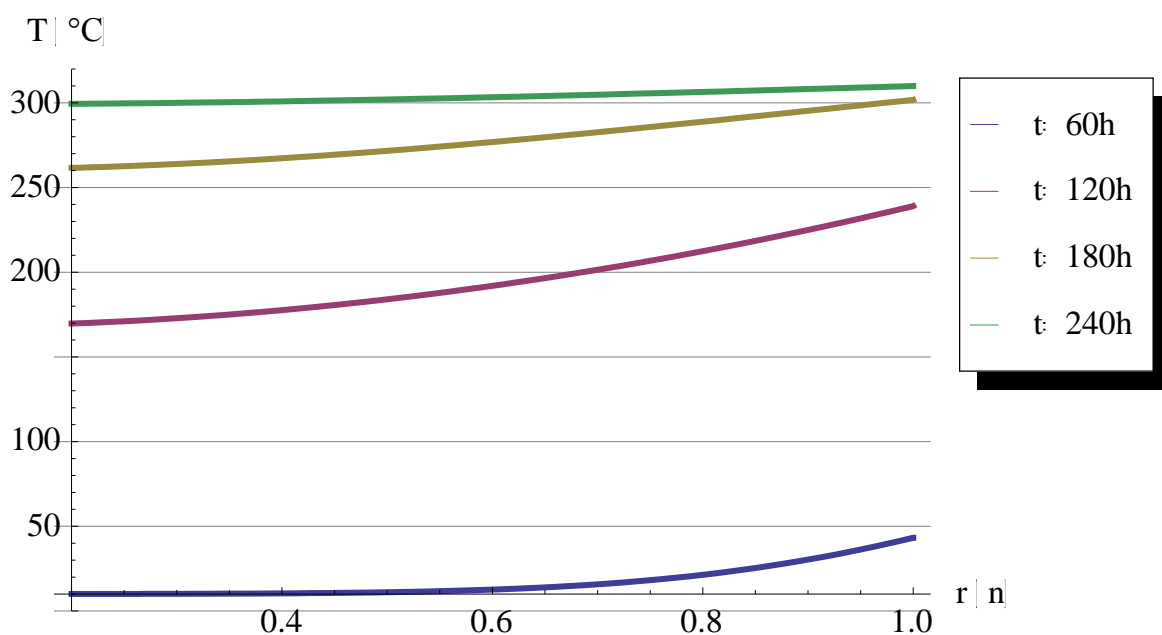
Graf VII - Nárůst teplot v závislosti na čase pro případ A.



Graf VIII - Nárůst teplot v závislosti na čase pro případ B



Graf IX - Rozložení teplot dle průměru válce v čase pro případ A.



Graf X - Rozložení teplot dle průměru válce v čase pro případ B

Pro případ **A.** popisuje situaci uvnitř rotačního válce pyrolýzní pece během indukčního ohřevu graf (*Graf V*). Sledovaný čas celého procesu byl stanoven pro výpočet na tři dny. Z grafu je vidět zjevný rozdíl mezi prohříváním vsázky, tj. ohřevem ocelového válce, a ohřevem

komunálního odpadu uvnitř válce. Na začátku celého procesu znatelně a rychle roste teplota v ocelovém bubnu. Téměř ustálené teploty je zde dosaženo přibližně za 12 hodin. Oproti tomu uvnitř válce v komunálním odpadu dochází pouze k pomalému růstu teplot a výrazněji se začne projevit až za 15-17 hodin. Po dosažení téměř ustálené teploty v ocelovém bubnu, roste teplota uvnitř válce takřka lineárně (viz *Graf VII*). Tím se začne model **A.** přibližovat modelu **B.**, kde již pracuji s ideální představou vnitřní plochy válce, která dodává rovnoměrně konstantní výkon vztahovaný na jednotku plochy do celého obsahu válce. Po dosažení téměř ustálené teploty tak ve válci začínají křivky reprezentující teploty v různých vzdálenostech od středu rotačního válce růst lineárně. Rychlost prohřívání odpadu se stupňuje se zvyšující se hodnotou poloměru, tedy se snižující se vzdáleností od ocelového válce, jak je vidět v grafu (*Graf IX*), zobrazujícím teploty v průřezu válce v čase. Avšak ani při výpočtu zahrnujícím nereálný předpoklad prohřívání vsázky a TKO po dobu tří dní, nedojde ke konečnému ustálení teplot ve válci.

Výraznější a zásadním problémem je dosažená teplota, která sotva dosahuje teploty 300°C a to ještě pouze přímo v ocelovém válci a jeho bezprostřední blízkosti. Pro proces pyrolýzy je ovšem potřeba přinejmenším teplota o 100°C vyšší a to ještě za předpokladu nízkoteplotní pyrolýzy. V požadavcích na dané zařízení se pak hovoří o konkrétní teplotě 420°C. Při dosažení teploty 300°C by došlo pouze k vysušení odpadu a případně k započítání suché destilace, avšak nedošlo by k zplynování ani k celkovému rozložení materiálu, tudíž by pyrolýza neproběhla. Navíc je zde ještě fakt, že těchto teplot by bylo dosaženo až za 72 hodin, což je vzhledem k zadání projektu a předpokladu času pro jednu várku odpadu 8-10 hodin zcela nereálné. V tomto rozvržení a s příslušným zdrojem není pomocí indukčního ohřevu možné pyrolýzu TKO dosáhnout.

V případě **B.** předpokládám předávání energie do TKO z vnitřního povrchu rotačního válce, a proto zanedbávám samotné rozehtívání ocelového válce. Proces je ale v tomto případě ještě o něco pomalejší, k ustálení teplot dochází (vlivem regulátoru, který omezí nárůst teplot při dosažení 300°C) za skoro týden provozu, což je příliš dlouhý časový interval k dosažení dané teploty. K prohřívání komunálního odpadu dochází v této představě prakticky rovnoměrně po celém průřezu válce (*Graf X*).

Výsledkem modelování příslušného indukčního ohřevu v rámci softwaru Wolfram Mathematica je konstatování, že takto navržený indukční ohřev je nevhodný pro pyrolýzu odpadu. Zadané uspořádání není schopné dosáhnout požadovaných teplot. Navíc doba, za kterou dosáhne likvidovaný odpad požadovaných hodnot, výrazně překračuje požadavek na likvidaci vloženého odpadu za 8-10 hodin. I kdyby tedy pyrolýzní pec byla schopna dosáhnout požadovaných hodnot, je pravděpodobné, že by tento proces byl výrazně ekonomicky nerentabilní.

Takto navržený indukční ohřev není schopen splnit zadaná kritéria ani při idealizované představě plně rozehtátého ocelového bubnu dodávajícím rovnoměrně energii do TKO.

3.5 Model indukčního ohřevu v programu Agros2D

3.5.1 O programu Agros2D

Pro lepší názornost a další pohled na indukční ohřev použitý pro pyrolýzu odpadu jsem vpracoval další model navrhovaného zařízení v softwaru Agros2D. Agros2D je multiplatformní C++ aplikace založená na knihovně Hermes, vyvinuté na Západočeské univerzitě v Plzni. Je šířena pod operačním systémem GNU. Agros2D umožňuje řešení nelineárních problémů, analýzu ustáleného stavu, harmonického ustáleného stavu a přechodovou analýzu.

V elektrostatickém poli je možné využít funkci sledování pohybu částic. Agros2D podporuje skriptování pomocí jazyka Python. Program je vyvíjen pro skupinu matematicko-fyzikálního modelování.

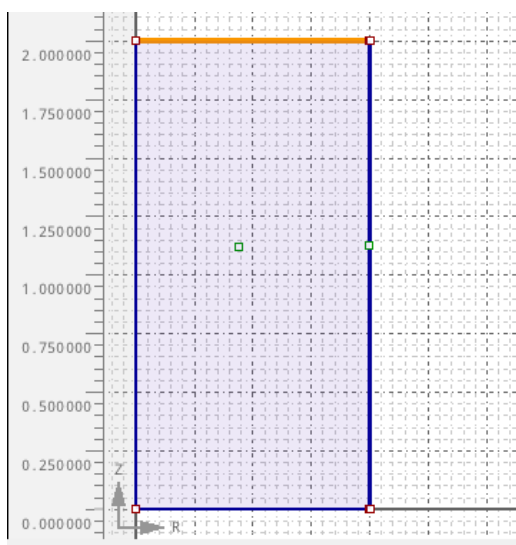
Agros2D umožňuje řešení polí ve 2D kartézském nebo, jak je tomu i v případě pyrolýzy odpadu, v osově symetrickém uspořádání. Agros se dá rozdělit na tři hlavní části definující postup vytváření a analyzování modelů, a tj. preprocesor, procesor a postprocesor. Preprocesor slouží k vytváření patřičné geometrie zařízení a definuje materiály a okrajové a počáteční podmínky. Geometrie zařízení je dána značkami a hranami. Lze také importovat geometrii zařízení z programu CAD. Každé hraně je třeba v této fázi přiřadit okrajovou podmínku, každý prostor musí být materiálově definovaný. Procesor využívá programu „Triangle“ umožňujícím vytváření vysoce kvalitních nestrukturalizovaných trojúhelníkových sítí k diskretizaci geometrie řešeného zařízení. Postprocesor je pak používán ke generování barevných map a vektorů a zpracovávání objemových a integrálních veličin charakterizujících dané pole. Mezi výhody postprocesoru je analýza pomocí 2D i 3D modelů i generování grafů příslušných veličin jak proměnných v čase, tak stálých v závislosti na poloze. Postprocesor nabízí i generaci série obrázků, či animace přechodových dějů.

Další významnou součástí Agrosu2D je pak editor skriptů využívající jazyk Python. Umožňuje spouštění částí i celých skriptů a hlavně funkci automatického vytvoření skriptu z již vytvořeného modelu z preprocesoru. Tím se velice urychlí celý proces tvorby skriptu, kdy je možné veškeré hodnoty již zpracovat v graficky uživatelsky přívětivém prostředí preprocesoru a pak již v skriptu vygenerovaném z existujícího modelu jen provádět příslušnou parametrizaci pole.

Agros2D je freewarový software, volně stahovatelný a šiřitelný. Ve své práci pak využívám verze Agros2D 3.2.0.20140311. [18]

3.5.2 Tvorba modelu indukčního ohřevu

Agros2D poskytuje možnost modelování zařízení v souřadnicovém systému buď osově souměrném, nebo v kartézském. V případě pyrolýzní pece se jedná o soustavu osově souměrnou. Vytvořím tedy řez válcem v rovině osy, a osu válce považuji za osu souměrnosti. Získám obdélník reprezentující polovinu řezu válcem, osově souměrnou dle osy válce.



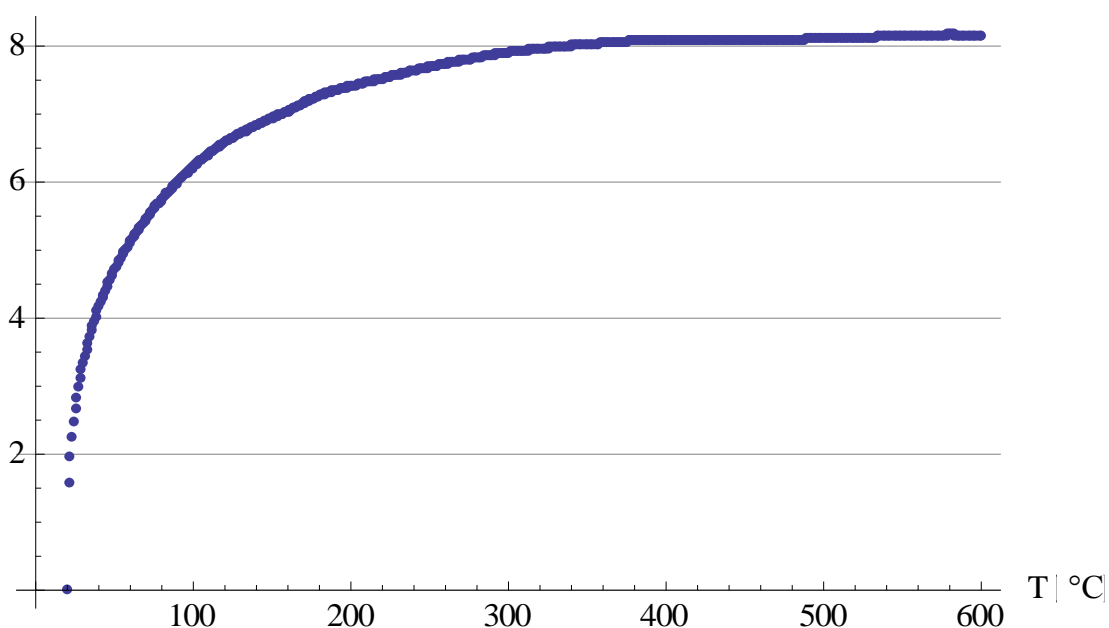
Obrázek IX - Model pyrolýzní pece

Děj jsem řešil jako přechodný. Hrany jsou definovány jako spojnice uzlů. V této fázi jsem přiřadil jednotlivým hranám příslušné okrajové podmínky. Vytvářím tři okrajové podmínky. První přiřazuji hraně přiléhající k ose válce a nazývám jí „symetrie“. Popisuje symetrii řezu válce kolem jeho osy. Dále vytvářím okrajové podmínky součinitele přestupu tepla α pro ocel a odpad, které přiřazuji vnější, resp. vnitřní straně válce. Jelikož se jedná o zjednodušenou představu a neuvažuji pec uzavřenou, tak jak by tomu bylo ve skutečnosti za pomoci ocelových uzávěrů, hraně vrchní i spodní přiřazuji okrajovou podmínku odpadu.

V této části je již možno vygenerovat příslušné tepelné modely zařízení. Byly by ale velice nepřesné, jelikož se ve výpočtech nachází součinitel přestupu tepla, který se mění s teplotou v čase. Je tedy potřeba ho vyjádřit jako funkci, aby mu bylo v průběhu děje možné přiřadit různé hodnoty. Přechází se k úpravám skriptu v části PythonLab. V jazyce Python jsem nechal vygenerovat skript pro daný model. Je nutné definovat hodnotu součinitele přestupu tepla jako funkci teploty. Jelikož program Agros2D umí pracovat s polynomy, potřebuji získat příslušný polynom pro výpočet α . Ten jsem získal za pomoci programu Wolfram Mathematica z již použitého výpočtu v první části.

Funkce α byla v části pro výpočet indukčního ohřevu definována vzorcem (88). Vypočítal jsem soustavu bodů pro součinitel přestupu tepla pro počáteční teplotu 10°C až do teploty 600°C. Tyto body jsem nechal vypsát do grafu.

alfa | $W.m^{-2}.K^{-1}$ |

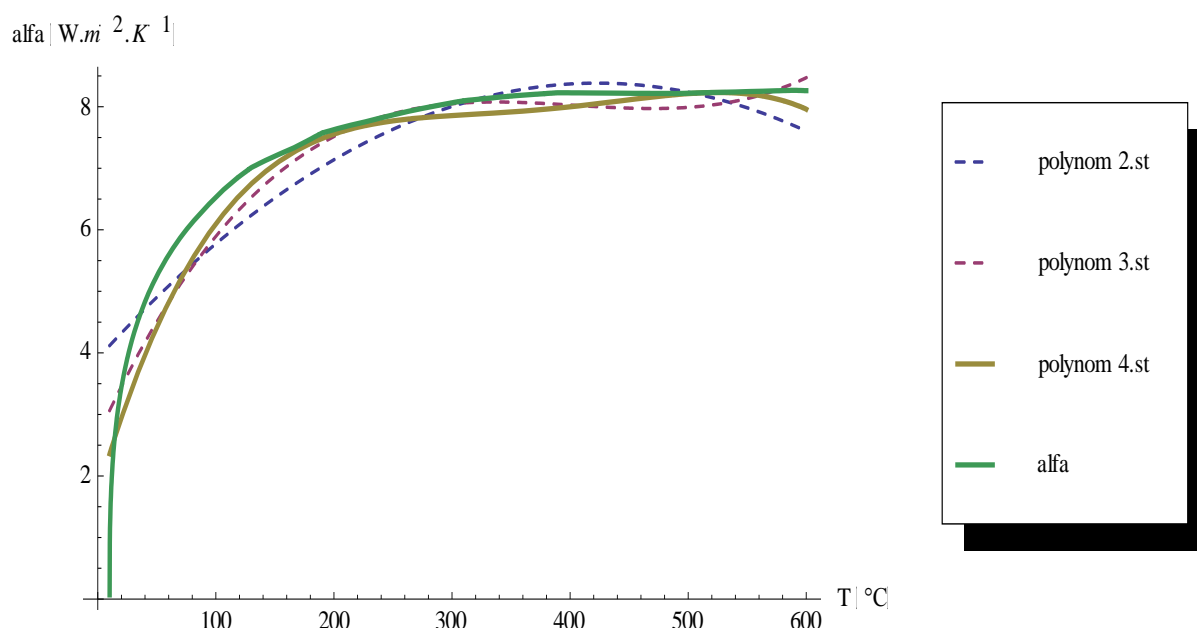


Graf XI - Závislost součinitele přestupu tepla α na teplotě

S takto vypsanou funkcí jsem hledal blízký polynom, kterým lze proložit body popisující hodnotu α pro různé teploty. Funkcí *Fit* prokládám body s proměnnou teplotou umocněnou na i . Získal jsem polynomy dle zadaného stupně:

<i>Stupeň polynomu</i>	<i>Výsledný polynom</i>
...	...
2. Stupeň	$3.90995 + 0.0211364 t - 0.0000249655 t^2$
3. Stupeň	$2.64963 + 0.0423882 t - 0.000108125 t^2 + 8.94186 \times 10^{-8} t^3$
4. Stupeň	$1,72568 + 0,0661121 t - 0,000269099 t^2 + 4,85257 \times 10^{-7} t^3 - 3,19225 \times 10^{-10} t^4$
...	...

Tyto polynomy jsem nechal vynést do jednoho grafu a hledal jsem co neshodnější průběh s funkcí proloženou hodnotami součinitele přestupu tepla, viz *Graf XII*. Z grafu vizuální kontrolou vyplývá, že polynom čtvrtého stupně má již tak malé odchylky od průběhu funkce alfa, že není potřeba dále hledat a použiji právě tento polynom.



Graf XII - Porovnání polynomu s funkcí součinitele přestupu tepla

Takto vygenerovaný polynom tedy zadávám do svého skriptu vytvořeného skriptu a definuji jako funkci *alfa(t)*.

```

...
import agros2d as a2d

def alfa(t):

return [1.72568 + 0.0661121*(t-273) - 0.000269099*(t-273)*(t-273) + 4.85257*0.0000001*(t-273)*(t-273)*(t-273) - 3.19225*0.0000000001*(t-273)*(t-273)*(t-273)*(t-273)]

...

```

Všechny ostatní veličiny jsem již dříve určoval při vytváření modelu v Agrosu2D z hodnot určených pro pyrolýzní pec.

Ve skriptu je ještě potřeba přesně nadefinovat, ve kterém bodě budu teplotu materiálu určovat a pracovat s ní. To je dáno v následujících řádcích skriptu:

```
...
pomTproAlfa=heat.local_values(0.9996,0.7899)

teplota=pomTproAlfa["T"]

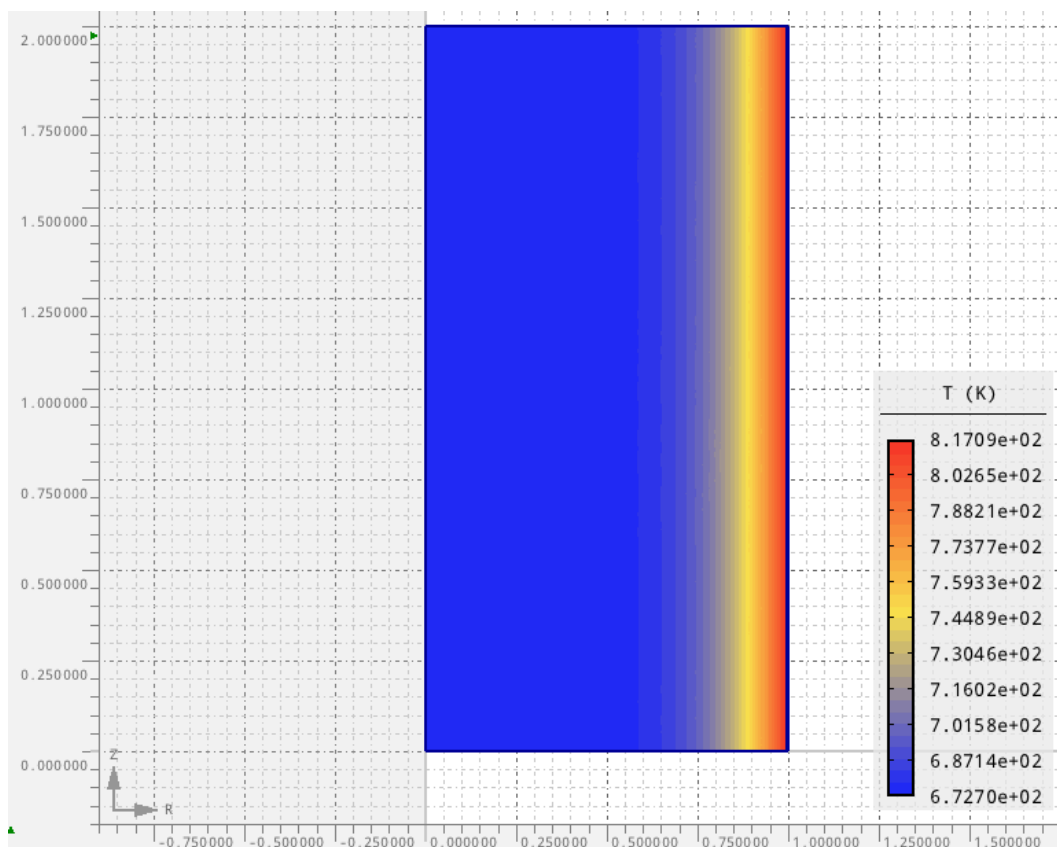
pomTeplotaPoc=heat.volume_integrals(labels = [0,1], time_step = -1)

konTep=pomTeplotaPoc["T"]/pomTeplotaPoc["V"]
...
```

kde vytvářím pomocný bod pro měření teploty pro výpočet α v bodě o daných souřadnicích. Referenční bod je umístěn blíže ocelovému válci, jelikož zde dochází rychleji k změnám teplot a tedy i k změně součinitele přestupu tepla α . Jelikož se tedy α mění s časem, rozdělím čas, v kterém chci sledovat teplotní děje v materiálu, na jednotlivé úseky. Každý poběží stanovenou dobu. Děj proběhne v definovaném počtu cyklů. Konečná teplota dosažená v referenčním bodě pro měření teploty je počáteční teplotou dalšího děje. Konečnou teplotu *konTep* získám jako poměr pomocné naměřené teploty v referenčním bodě a objemu válce. *Agros2D* je v tomto případě nedokonale nastaven a teplotu v bodě udává trochu nesmyslně v $K \cdot m^3$, tudíž je pro správný výpočet nutno hodnotu vydělit objemem.

Aby se dali oba modely porovnat, tj. model z *Wolfram Mathematici* a model z *Agrosu2D*, byla hodnota času zadaná ve skriptu shodná s časem, v kterém jsem tepelné děje sledoval v notebooku v *Mathematice*. Na základě tohoto byl celkový sledovaný čas ohřevu roven 150000s. V tomto čase by mělo dojít k patřičnému ustálení tepelných dějů a dosažení hledaných konečných hodnot v zařízení. Kvůli výše zmíněné změně součinitele přestupu tepla v závislosti na měnící se teplotě byl děj rozdělen na 10 cyklů po 15000s.

Po dokončení všech předchozích výpočtů lze přistoupit k vyhodnocení výsledků. Výpočtový software *Agros2D* poskytuje pro výsledky výpočtů nepřebornou škálu interpretačních možností. Lze využít grafické modely, grafy i jiné techniky k zobrazení teplot materiálu v modelu, teplotních gradientů, teplotní vodivosti apod.

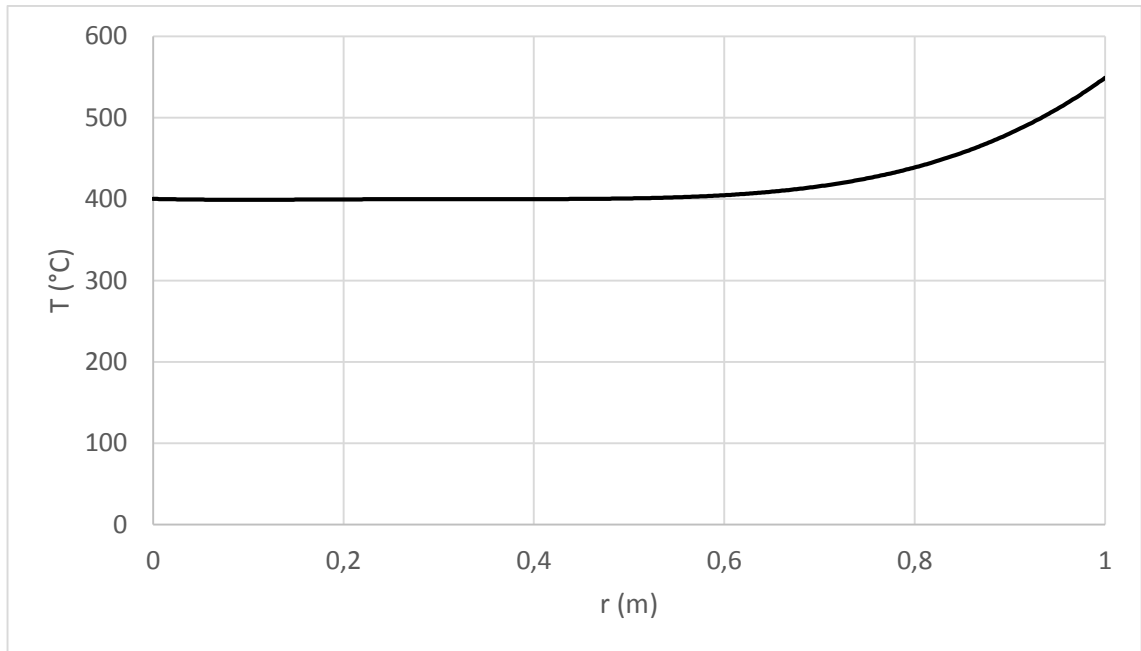


Obrázek X - Rozložení teplot v pyrolýzním válci v čase 150 000s (Agros2D)

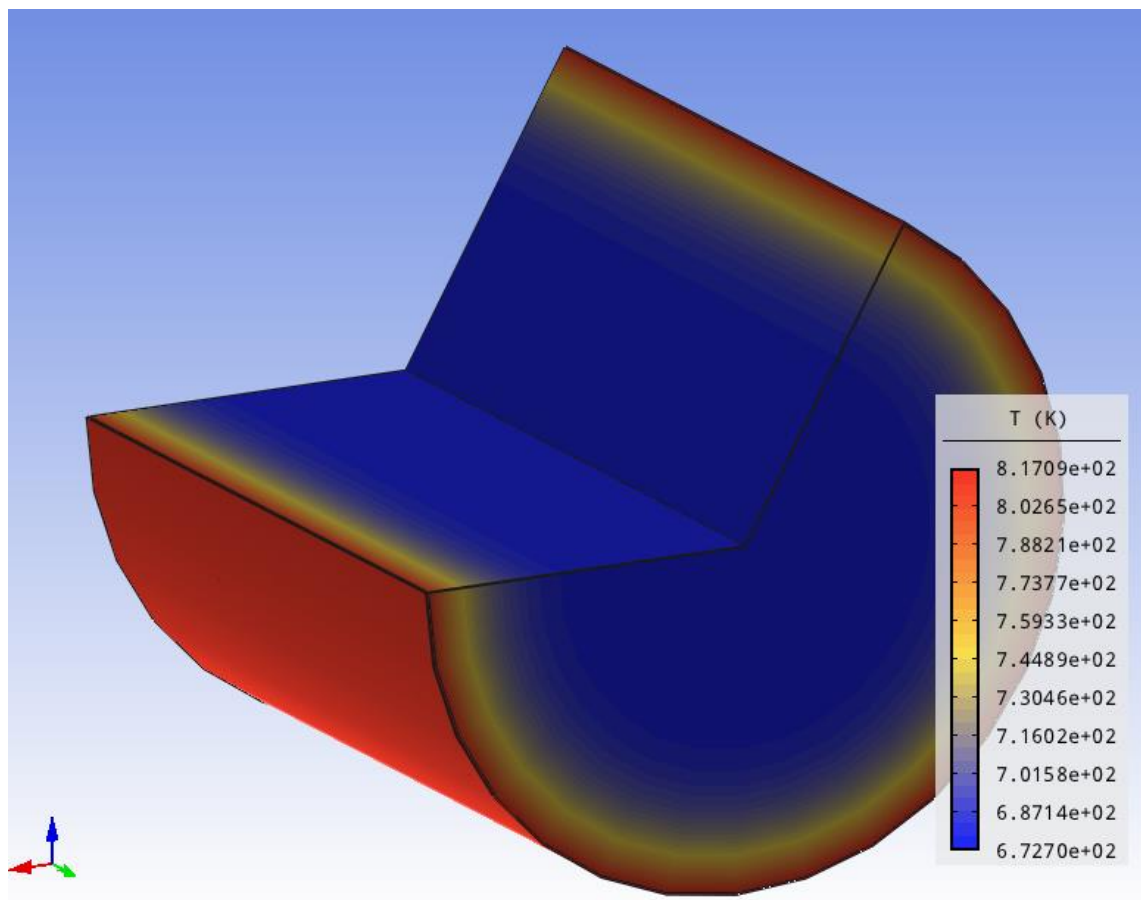
Jako základní zhodnocení slouží grafické 2D zobrazení rozložení teplot v materiálu viz *Obrázek IX*. Zde je zobrazeno rozložení teplot v řezu materiálu v konečném čase děje, tj. $t = 150000s$.

Jak je vidět, teplota v materiálu nepřesáhne hodnotu $544^{\circ}C$ (v modelu jsou teploty uvedeny v Kelvinech). Nejnižší teplota v pyrolýzním válci bude cca $400^{\circ}C$. Z tohoto zobrazení lze také vygenerovat videa znázorňující celý děj v sledovaném čase. Tato videa je nutno případně generovat postupně pro každý cyklus zvlášť.

Lepší představu o reálném rozložení teplot ve válci na konci tepelného ohřevu poskytuje graf zobrazující teploty v průřezu válce, viz *Graf XIII*. Z grafu je vidět, že teplota v čase 150 000s je již téměř ustálená v celém průřezu válce. Přesnější prostorové uspořádání lze také vyčíst z 3D postprocesoru. Lze vygenerovat 3D model zařízení s výřezem na konci děje.



Graf XIII - Rozložení teplot v řezu válce v čase 150 000s (Agros2D)



Graf XIV - 3D model rozložení teplot ve válci v čase 150 000s (Agros2D)

Z vygenerovaných grafů a modelů ze skriptu v softwaru *Agros2D* lze již interpretovat výsledky v porovnání s výsledky získanými výpočty v programu *Wolfram Mathematica*.

Dosažené teploty ukazují na schopnost zařízení dosáhnout ve sledovaném čase teploty odpadu 400°C. To je vůbec nejnižší možná teplota pro pyrolýzu odpadu. Při této teplotě je ale potřeba na odpad působit stejnou nebo vyšší teplotou po dobu 8-10 hodin. Zařízení je schopné dosáhnout požadované teploty až za téměř dva dny provozu. To je pochopitelně nepřijatelně dlouhá doba. Celkový cyklus pyrolýzy odpadu by tak trval dva a více dní, což je zcela mimo požadavky kladené na dané zařízení. Je k diskusi, zda kdyby byl samotný válec zahřátý na požadované teploty, by ohřev odpadu netrval kratší dobu, avšak dá se předpokládat, že by se nejednalo o významné změny. Doba dosažení požadovaných teplot by se také změnila, kdyby zde byla uvažována ocelová víka na zakončeních pyrolýzního válce. I přesto lze usuzovat z průběhu ohřevu zařízení, že by to nestačilo pro splnění podmínek kladených na zařízení. Indukční pyrolýzní pec je tak v navrhovaném provedení s daným napájením nevhodná pro pyrolýzu odpadu.

Modely z obou využitých softwarů tak ukazují na neschopnost indukční pece splnit požadavky kladené na zařízení. Rozdíly v dosažených teplotách v obou výpočtech jsou dány více faktory. V první verzi zpracované ve *Wolfram Mathematice* se jedná hlavně o zjednodušení plynoucí z výpočtů určených pro plnou vsázku indukčního ohřevu, místo ohřevu duté válcové vsázky. Je otázkou, který z uvažovaných modelů se více blíží skutečnosti, pravdou je, že ani při jednom způsobu výpočtu navrhované zařízení neobstálo a nedokázalo v požadovaném čase dosáhnout nezbytných hodnot.

3.6 Vliv izolace na účinnost pyrolýzní pece

Pyrolýzní indukční pec, tak jak je navržena a zhodnocena by nedokázala dosáhnout požadovaných teplot v daném čase. Existuje více možností, kterými by se dal zvýšit výkon Q_v a dosáhnout tak lepších výsledků, odpovídajících požadavkům kladeným na pec. Ale při zachování stávajícího návrhu zařízení, je jen velmi omezená možnost ovlivnit proces sdílení tepla a rozkladu TKO uvnitř bubny. Jednou takovou možností, která se ve výpočtech ukázala jako vysoce účinná, je snížení emisivity rotačního bubny pyrolýzní pece.

Emisivita je podstatnou radiční vlastností, která se určuje jako poměr intenzity vyzařování E tělesa k intenzitě vyzařování černého tělesa E_0 se stejnou teplotou T . Emisivita se určí ze vzorce

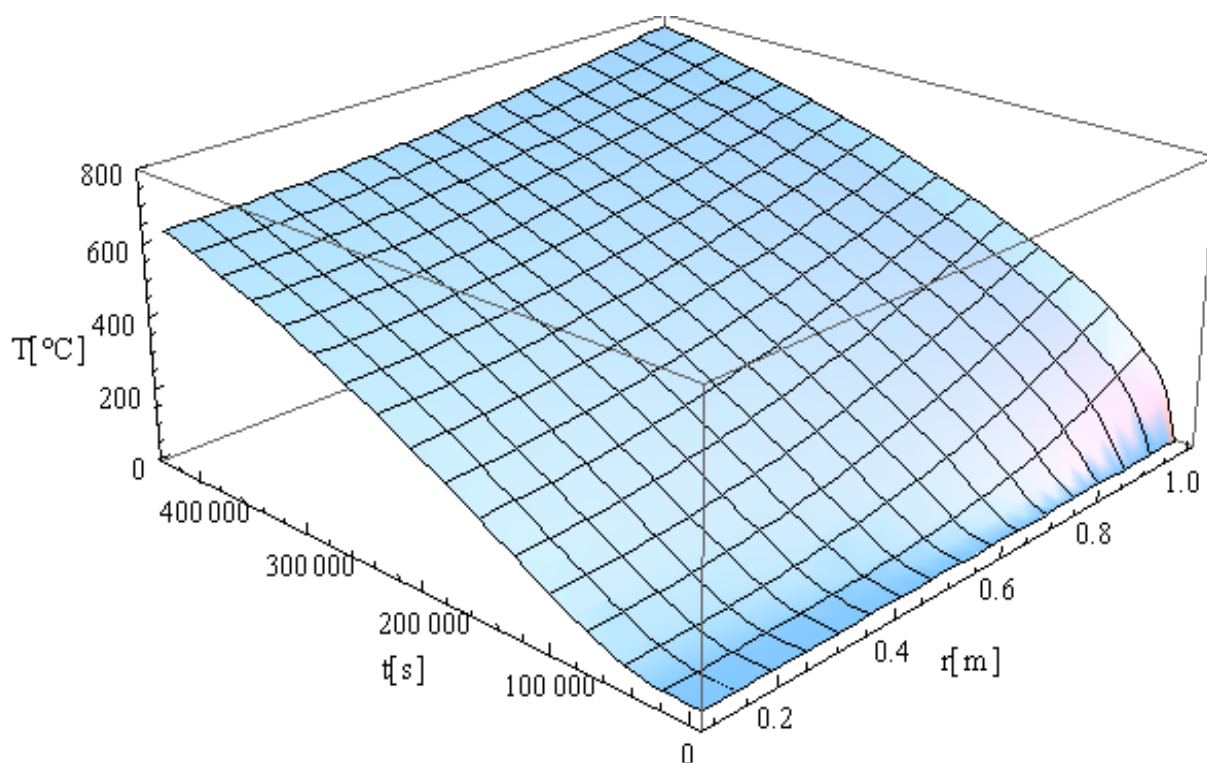
$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{E}{\sigma \cdot T^4} \quad (95)$$

Černé těleso vyzařuje největší možné množství energie, takže u černého tělesa je $\varepsilon = 1$. Z toho vyplývá, že hodnota emisivity se jinak pohybuje v rozmezí od 0 do 1. [19]

U ocelového rotačního bubny jsem v standardním výpočtu uvažoval běžně uváděnou hodnotu ocele $\varepsilon_{ocel} = 0,8$. Jednalo se tedy o válec nezaizolovaný, kde je přímý styk mezi ocelovým válcem a okolním prostředím. Dochází k radiaci energie do okolí na teoretické stěny místnosti, v níž je rotační buben umístěn (v mém případě jsem uvažoval $T = 10^\circ$). Výraznou nevýhodou takového typu zařízení je, že k radiaci energie nedochází pouze na stěny, ale také na veškeré okolní prostředí, tj. například i obsluhu pyrolýzní pece. V případě vyšších výkonů nebo dlouhodobého pohybu v prostoru s pyrolýzní pecí, tak může pro osoby v blízkosti zařízení docházet k poměrně značně nekonformním podmínkám. Pro zlepšení tohoto stavu by bylo potřeba navrhnout opatření k omezení sálání, jako je např. stínění či chlazení.

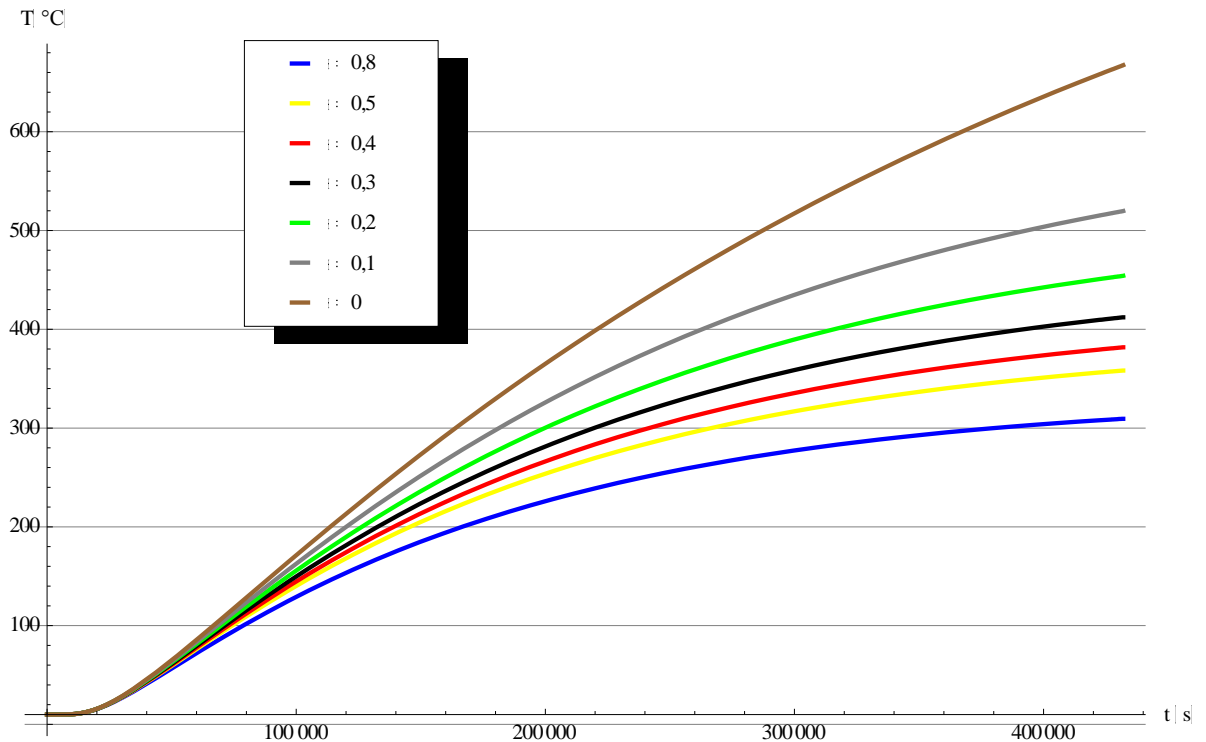
Nejlepším řešením v tomto směru se zdá zaizolování ocelového rotačního bubnu pyrolýzní pece, a to ze dvou důvodů. Prvním je snížení sálání do okolního prostředí a díky tomu i snazší manipulace a vybavenost prostoru umístění zařízení. Tím druhý a podstatnějším je značné zvýšení účinnosti zařízení. Dochází k menší radiaci do okolního prostoru a tudíž k větší účinnosti přenosu tepla. Tímto způsobem dokáží znatelně zvýšit množství energie, které dodávám do TKO v prostoru ocelového bubnu a tak zvýšit i teploty, kterých je pec schopna dosáhnout. Pro názornost jsem uvažoval ideálně zaizolovaný válec, tj. jeho emisivita je 0. Z grafu (*Graf XV*) lze odečíst, že teplota se v takovémto ideálním stavu ustálí na hodnotě cca 800°C. K tomu by ale došlo asi až za 4 dny provozu. Podstatnější je, že teploty 400°C, která je nejnižším bodem pro pyrolýzní rozklad materiálu uvnitř pece, začne dosahovat TKO v dokonale zaizolovaném válci již po nějakých cca 200000s. V takovémto případě již má smysl přemýšlet o využitelnosti indukční pyrolýzní pece.

Z porovnání nárůstu teplot v prostoru válce při $r = 0,5m$ pro různé emisivity ε (*Graf XVI*) lze vysledovat, že zařízení pro pyrolýzu odpadu začíná dosahovat nezbytných teplot při snížení emisivity ocelového válce na hodnoty cca $\varepsilon \leq 3$.²



Graf XV - Nárůst teploty T v závislosti na čase t a poloměru r pro případ dokonale zaizolovaného válce ($\varepsilon=0$)

² Viz příloha práce *emisivita.nb*



Graf XVI -- Porovnání nárůstu teplot v prostoru válce v závislosti na různém ε ($r=0,5m$)

Nejčastějším materiálem používaným pro izolaci průmyslových pecí bývaly azbestové lepenky. Ty se přestaly užívat z důvodu překonání jejich tepelných vlastností moderními materiály. Navíc po prokázání azbestu jako karcinogenu bylo jeho užívání vyjma výzkumné laboratorní práce, analytické práce a práce při likvidaci skladových zásob, zařízení a částí staveb obsahujících azbest zakázáno zákoníkem práce (Zák. 65/1965 Sb.). Nejnovějšími materiály využívanými pro izolaci průmyslových pecí jsou různé speciální materiály, např. SIBRAL.

4. Zpětný vliv indukčního ohřevu na síť

4.1 Způsob napájení pyrolýzní pece

Zpětný vliv indukčního ohřevu na síť závisí především na způsobu připojení pyrolýzní pece na síť. V uvažovaném případě indukční pyrolýzní pece jsou nasnadě dvě možnosti napájení. V prvním případě při napájení frekvencí 50Hz se jedná o přímé připojení pyrolýzní pece na síť. V takovém případě je třeba řešit problematiku symetrizace zařízení a vyšších harmonických, které mohou nepříznivě působit na síť.

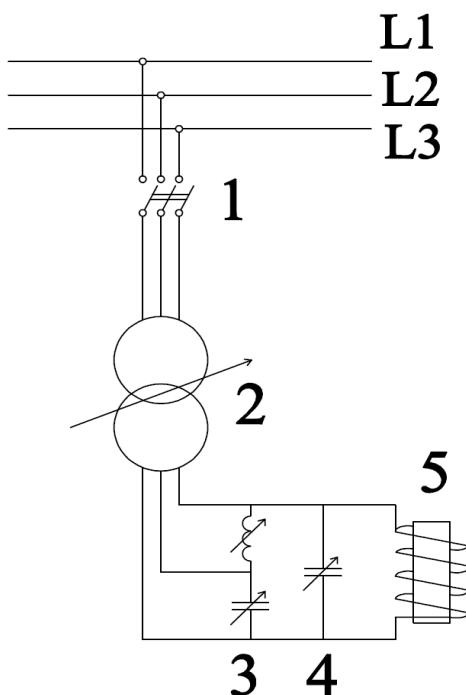
V případě napájení z rotačního měniče kmitočtu nedochází k zatěžování sítě vyššími harmonickými a zařízení je napájeno jednofázovým střídavým proudem, takže není zapotřebí řešit symetrizaci.

V obou uvažovaných případech je třeba uvažovat dimenzování vhodného kondenzátoru jako zdroje jalového výkonu pro zařízení a zatěžování sítě odebíraným jalovým výkonem.

4.1.1 Přímé připojení na síť

Napájení síťovou frekvencí 50Hz je nejjednodušším řešením uspořádání s přímým připojením zařízení na síť přes regulační transformátor. Lze nakreslit principiální schéma indukčního ohřevu (*Obrázek XI*). Je v něm naznačeno připojení indukční pyrolýzní pece (5) obsahující i kondenzátor pro kompenzaci jalového výkonu (4) na trojfázové napájení přes regulační třífázový transformátor (2). Jelikož je napájení třífázové a zátěž jednofázová, je nutné mezi transformátor a indukční pec připojit symetrizační obvod (3). Ten je zde umístěn z potřeby vytvořit z nesymetrické jednofázové zátěže, zatěžující síť nevyvážeností proudového zatížení jednotlivých fází, zátěž symetrickou trojfázovou. Symetrizační článek se skládá z vhodné zvolené kapacity a indukčnosti. Před celý obvod je pak vřazen ještě výkonový vypínač (1).

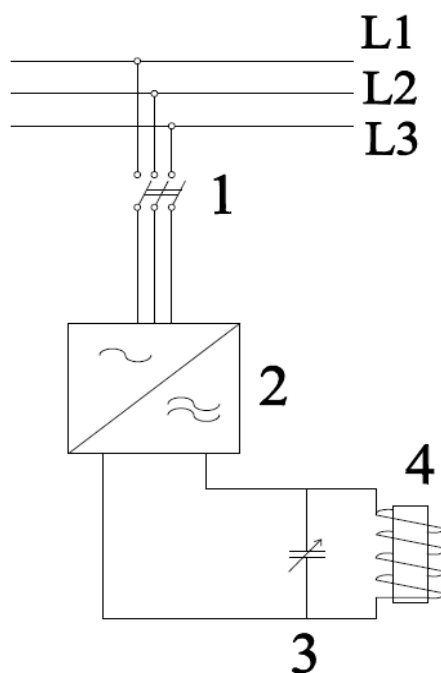
V navrhovaném zařízení bude tento způsob napájení řešen odbočkou připojenou za rotační měnič kmitočtu, což je druhá varianta napájení zařízení.



Obrázek XI - Schéma indukčního ohřevu na 50 Hz

4.1.2 Rotační měnič kmitočtu

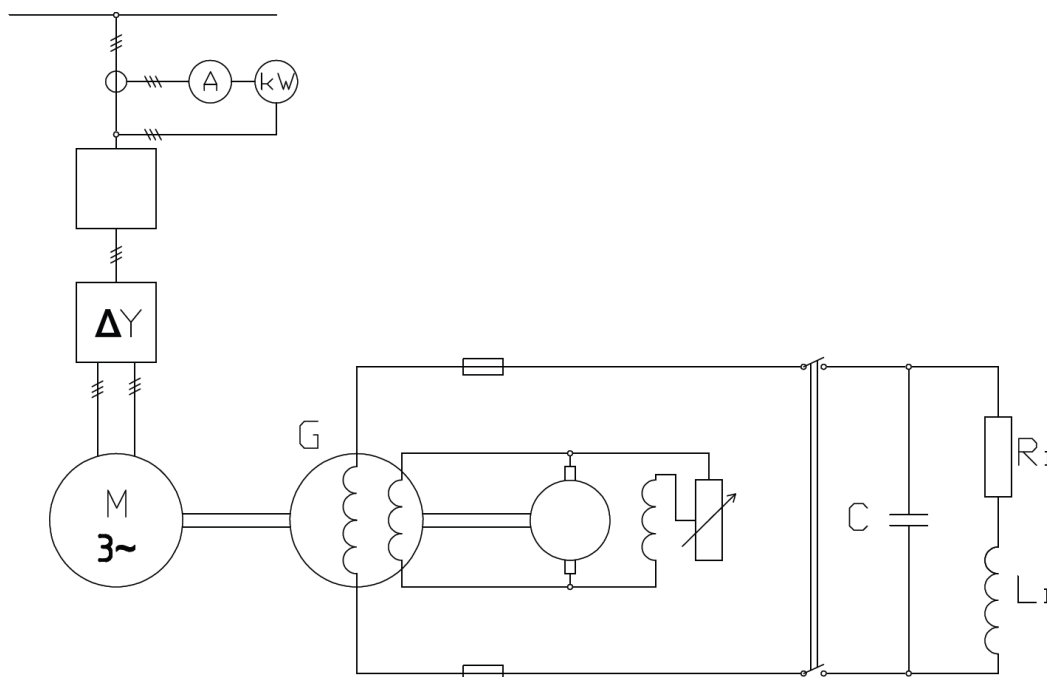
V navrhovaném zařízení byl k napájení indukční pyrolýzní pece napětím o vyšším kmitočtu použit rotační měnič kmitočtu. Konkrétně se jedná o zařízení VÚ ZEZ 380V, 50Hz, 55kW / 500V(250)V, 4400Hz, 50kW. Rotační měnič (2) je napájen ze sítě třífázovým napětím, které převádí na napětí jednofázové stejné amplitudy, ale jiného kmitočtu. Z tohoto důvodu také není potřeba symetrizační obvod, jak je naznačeno ve schématu (Obrázek XII).



Obrázek XII - Schéma napájení indukčního ohřevu měničem kmitočtu

Rotační generátory jsou schopny generovat proudy v rozmezí kmitočtů cca 500 ÷ 10000Hz. Jsou tak vhodné k napájení středofrekvenčních indukčních zařízení určených pro tavení a prohřívání. Na počátku minulého století se začaly používat jako zdroje vysokofrekvenční energie pro radiotelegrafii. K tomuto účelu se ale brzy užívat přestaly z důvodu jejich velmi malé účinnosti při vysokých frekvencích. Obecně lze říci, že čím vyšší kmitočet požadujeme, tím méně jsou rotační měniče účinné. Jejich účinnost se dle požadované frekvence pohybuje mezi 90 až 70%. Od dvacátých let minulého století byla tato zařízení využívána k indukčním ohřevům. Dnes se již využívají minimálně a jsou převážně nahrazovány polovodičovými měniči.

Rotační soustrojí je poměrně mohutné zařízení a vyžaduje větší množství prostoru. Je zapotřebí ho zasadit do těžkých betonových základů. Generátor navíc sám o sobě produkuje značný hluk, takže musí být zasazen v samostatné místnosti. Zařízení má naproti tomu dlouhou životnost, nevyžaduje žádnou zvláštní údržbu vyjma občasného mazání ložisek.



Obrázek XIII - Schéma rotačního měniče kmitočtu

Na obrázku (Obrázek XIII) je elektrické schéma, které popisuje napájení indukční pyrolýzní pece přes rotační měnič kmitočtu. Asynchronní motor (převážně s kotvou nakrátko) je napájen z třífázové sítě přes olejový vypínač a přepínač hvězda-trojúhelník. Motor M je spojen pružnou spojkou s rotačním „heteropolárním“ generátorem G. Generátorové budící vinutí je napájeno z rotačního budiče s derivačním regulátorem.

Stator rotačního generátoru má na svém obvodu dva druhy drážek. V menších je uloženo pracovní vinutí s proudy vyšších kmitočtů. Ve větších drážkách je uloženo vinutí stejnosměrné napájené z rotačního budiče. Rotor generátoru nemá vinutí. Místo něho je na povrchu vytvořen věnec z dynamových plechů s drážkami. Stejnosemný magnetický tok v zubu mezi pracovními vodiči kolísá mezi hodnotami maximálními a minimálními. Dle zidealizované představy lze říci, že se ke stejnosměrné složce magnetické indukce $B_{stř}$ přičítá střídavá složka $B_{..}$. Naindukované napětí v pracovním vinutí přibližně odpovídá střídavé zidealizované složce $B_{..}$. Ta obsahuje i vyšší harmonické, které se však neuplatní, jelikož je obvod pyrolýzní pece vyladěn pouze na první harmonickou. [20]

Výkon dodávaný do pyrolýzní pece odpovídá naindukovanému napětí do pracovního vinutí generátoru. To je řízeno budícími proudy, jež jsou nastavovány regulátorem. Regulátorem lze takto řídit výkon generátoru. Pyrolýzní pec je reprezentována kompenzační kondenzátorovou baterií a odporem a indukčností pecní cívky (induktoru). Ty jsou paralelně připojeny na rotační měnič kmitočtu přes hlavní spínač. [21]

Frekvenci vygenerovaného napětí lze získat ze vzorce

$$f = \frac{Z \cdot n}{60} \quad (96)$$

kde Z je počet zubů rotoru (-),
 n je počet otáček za minutu (ot. / min.). [12]

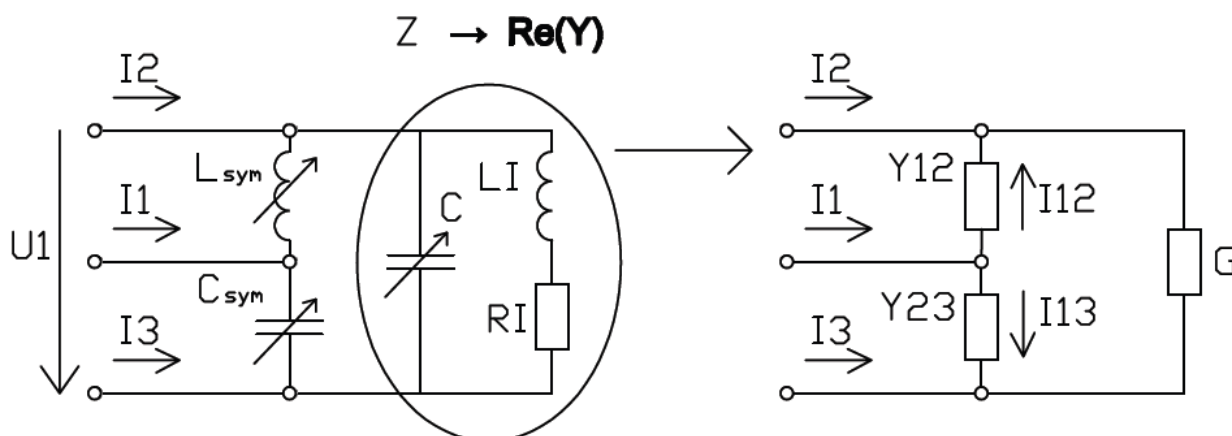
4.2 Zpětné účinky pyrolýzní pece na napájecí síť

Z hlediska zpětných vlivů na síť, lze považovat indukční pece obecně za jedno z nejproblematičtějších zařízení. Z důvodů velké proměnlivosti odebíraného výkonu způsobují kolísání napětí, dále také odbírají výkon s nízkým účínkem, generují vyšší harmonické proudy a mají nesymetrický odběr.

4.2.1 Symetrizace obvodu

Indukční pece pracující se síťovou frekvencí 50Hz (první uvažovaný případ napájení pyrolýzní pece), jsou typickým příkladem nesymetrického zatěžování. Nesymetrický odběr proudů se odbourává za pomoci symetrizace jednofázového obvodu. Jak již bylo popsáno v bodě 4.2.1, symetrizační článek se skládá z vhodné zvolené kapacity a indukčnosti a vytváří z nesymetrické jednofázové zátěže zátěž symetrickou trojfázovou. Je tomu tak hlavně z důvodu, že celek, jenž je symetrizován, zatěžuje všechny fáze rovnoměrně.

Vykompenzovanou indukční pec si představují jako reálnou admitanci o vodivosti G . Tu jsem získal z reálné části admitance indukční pyrolýzní pece, viz schéma (Obrázek XIV).



Obrázek XIV - Symetrizační obvod, převod na admitance

Admitanci si lze představit jako převrácenou hodnotu impedance. Celý obvod pyrolýzní pece si tak zjednoduším na jednu hodnotu impedance. Obě větve obvodu si převedu na impedance a impedance celkovou spočítám dle postupu pro paralelní spojování impedancí. Výsledné výpočty jsou následující

$$X_L = j \cdot \omega \cdot L_I = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,0012 = j \cdot 0,387\Omega \quad (97)$$

$$X_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} = \frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,008} = -j \cdot 0,396\Omega \quad (98)$$

kde X_L je induktivní reaktance (Ω),
 X_C kapacitance (Ω).

Dále převádím části RLC obvodu na impedance dle

$$Z_1 = R_I + X_L = 0,06 + j \cdot 0,387\Omega \quad (99)$$

$$Z_2 = X_C = -j \cdot 0,396\Omega \quad (100)$$

a výslednou impedanci obvodu získám ze vztahu

$$Z_C = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \underline{2,55 + 3,15 \cdot 10^{-15}\Omega} \quad (101)$$

Když jsem spočítal celkovou impedanci Z_C získám vodivost obvodu jako reálnou část její převrácené hodnoty

$$G = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{Z_C} \right] = \underline{0,3919S} \quad (102)$$

Takto jsem tedy získal vodivost obvodu RLC reprezentujícího pyrolýzní pec. Pro správně provedenou symetrizaci je nutné, aby byla zátěž reálná a symetrická. Požadavky kladené na symetrizaci jsou dány:

- 1) musí být zachován činný výkon – je zajištěno když Y_{12} a Y_{23} jsou čistě imaginární
- 2) výsledné zapojení nebude odebírat jalový výkon – je zajištěno když $Y_{12} = Y_{23}$; platí $Y_{23} = j \cdot Y$ a $Y_{31} = -j \cdot Y$
- 3) existuje symetrie odebíraných proudů: $I_1 = k \cdot U_1$, $I_2 = k \cdot U_2$, $I_3 = k \cdot U_3$

Platí následující vztahy:

I.	$U_1 = U$
II.	$U_2 = U \cdot a^2$
III.	$U_3 = U \cdot a$
IV.	$I_1 = I_{12} + I_{13} = j \cdot Y \cdot (U_1 - U_2) - j \cdot Y \cdot (U_1 - U_3)$ $= j \cdot Y \cdot U \cdot (1 - a^2) - j \cdot Y \cdot U \cdot (1 - a) = k \cdot U$
V.	$I_2 = I_{23} - I_{12} = G \cdot (U_2 - U_3) - j \cdot Y \cdot (U_1 - U_2)$ $= G \cdot U \cdot (a^2 - a) - j \cdot Y \cdot U \cdot (1 - a) = k \cdot U_2 = k \cdot U \cdot a^2$
VI.	$I_3 = -I_{23} - I_{13} = -G \cdot (U_2 - U_3) - (-j \cdot Y) \cdot (U_1 - U_3)$ $= -G \cdot U \cdot (a^2 - a) + j \cdot Y \cdot U \cdot (1 - a) = k \cdot U_3 = k \cdot U \cdot a$
<i>Operátor otočení v komplexní rovině</i>	
$a = e^{\frac{2 \cdot \pi \cdot j}{3}}$	

Tabulka VI - Soustava rovnic pro řešení symetrizace

Takto jsem tedy získal soustavu 6 rovnic o 2 neznámých. Po jejím vyřešení jsem získal výsledné vztahy pro k a Y

$$k = G = \underline{0,3919S} \quad (103)$$

$$Y = -\frac{G}{\sqrt{3}} = \underline{-0,226S} \quad (104)$$

z této hodnoty admitance jsem získal kapacitu a indukčnost pro symetrizační obvod

$$C_{sym} = \frac{-j \cdot Y}{j \cdot \omega} = \frac{-j \cdot (-0,226)}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50} = \underline{720,293\mu F} \quad (105)$$

$$L_{sym} = j \cdot Y \cdot j \cdot \omega = j^2 \cdot (-0,226) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = \underline{71,09H} \quad (106)$$

Zapojil bych tedy mezi fází 1 a 2 symetrizační tlumivku dle spočtené hodnoty a mezi fází 1 a 3 symetrizační kapacitu a získal tak symetrický třífázový spotřebič zapojený do trojúhelníku.

Je k diskuzi, zda by symetrizační obvod měl v tomto konkrétním případě velký význam. Zařízení nemá tak vysoký výkon, aby výrazněji negativně ovlivňovalo napájecí síť. Symetrizační obvody se většinou užívají u zařízení, jejichž napájecí výkon je 500kW a vyšší. [22]

4.2.2 Kolísání napětí, flicker

Kolísání napětí je způsobeno proměnlivostí odebíraného výkonu. Dochází ke „změně efektivních (případně maximálních) hodnot napětí mezi dvěma sousedními úrovněmi napětí, mezi nimiž stoupá či klesá v blíže nespecifikovaném čase.“ [23] Napěťové změny mohou být často pod hranicí citlivosti elektrických přístrojů a mohou způsobovat flicker. Flicker znamená subjektivní vjem blikání zářivého zdroje. Přestože kolísání napětí může být pouze v řádu desetin procent (pro frekvenci periodického kolísání 8,8Hz cca 0,25%), může způsobit velmi nepříjemné změny v záření světelných zdrojů, které jsou takto napájeny. U pyrolýzní pece je proto nutné ověřit, zda změny pece odebíraného výkonu nevedou k nepřipustným hodnotám flickeru.

Omezení flickeru se provádí zvětšením zkratových výkonů napájecí sítě. Následujícími opatřeními lze zároveň omezit kolísání napětí vyvolené změny činného a jalového výkonu:

- zvětšení průřezu napájecího vedení (zdvojení přívodů),
- zvětšení zkratového výkonu napájecího transformátoru,
- připojením nového generátoru, synchronního kompenzátoru,
- zmenšením impedance napájecího vedení pomocí sériové kompenzace,
- připojením do vyšší napěťové hladiny. [23]

4.2.3 Vyšší harmonické

Dle normy ČSN IEC 1000-2-1 „jsou harmonické sinusová napětí nebo proudy o kmitočtech, které jsou celistvými násobky kmitočtu, na kterém je navržena a provozována rozvodná síť (např. 50Hz nebo 60Hz)“. Norma ČSN IEC 50 (161) dále uvádí, že „harmonická (složka) je definována jako složka většího než 1. řádu Fourierovy řady periodické veličiny, přičemž složka 1. řádu Fourierovy řady jako základní harmonická“. Činný výkon harmonických nevykonává žádnou práci. Podílí se na vytváření ztrát, zahřívání vedení, na vedení způsobují úbytky a zahřívají ho, stejně jako vlastní spotřebiče.

Zdrojem vyšších harmonických může být zařízení s prvky výkonové elektroniky, tj. usměrňovače, pulzní zdroje, pohony s frekvenčními měniči apod. Ale zdrojem mohou být i zařízení s nelineární V-A charakteristikou. Kromě indukčních pecí jsou to např. středofrekvenční obloukové pece, zářivky, plynové výbojky a indukční stroje.

Indukční pyrolýzní pec zatěžuje síť vyššími harmonickými, jestliže je připojena přímo na síť. V případě připojení přes rotační měnič kmitočtu k zatěžování zdroje vyššími harmonickými nedochází. Ověřuji vliv harmonických na síť.

Napájecí napětí si vyjádřím v obecném časovém průběhu jako

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (107)$$

Obvod indukční pece popisují obvodovými rovnicemi v diferenciálním tvaru

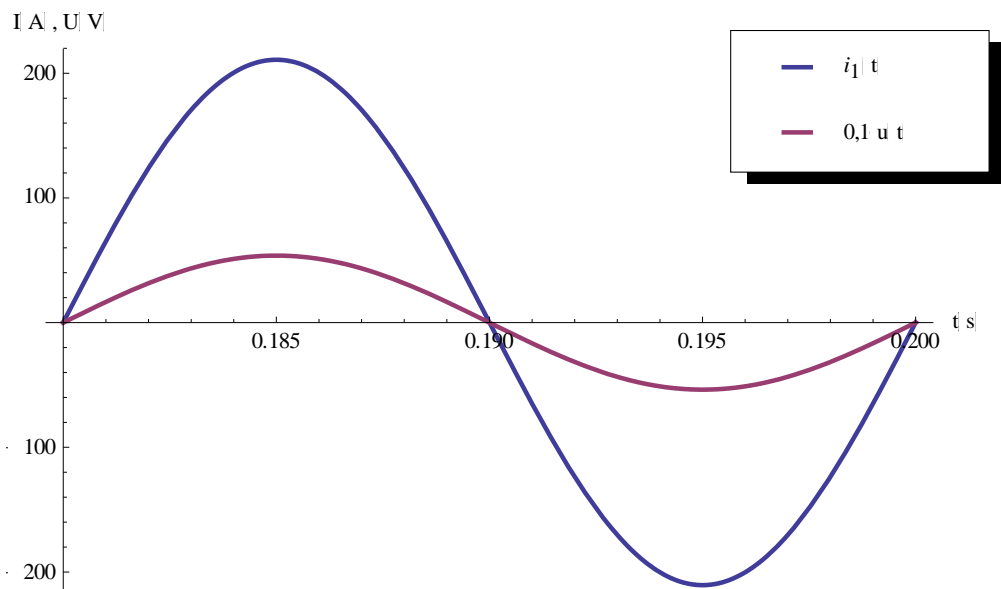
$$i_C(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (108)$$

$$u(t) = R_I \cdot i_{RL}(t) + L_I \cdot \frac{di_{RL}(t)}{dt} \quad (109)$$

$$i_1(t) = i_{RL}(t) + i_C(t) \quad (110)$$

Počáteční podmínka pro řešení soustavy diferenciálních rovnic je

$$i_{RL}(t) = 0 \quad (111)$$



Graf XVII - Průběh napájecího proudu a napětí obvodu indukční pyrolýzní pece

Přistupuji k řešení analýzy harmonických v softwaru *Wolfram Mathematica 7.0.0*. Nejprve je potřeba zabývat se soustavou diferenciálních rovnic popisujících elektrický obvod indukční pyrolýzní pece (viz výše). Po jejím vyřešení je jedním z výstupů průběh napájecího napětí $0,1 \cdot u(t)$ a proudu $i_1(t)$ (Graf XVII). Vizuální kontrolou lze zpozorovat, že v průběhu není patrné téměř žádné zvlnění a deformace proudu, takže předpokládám nízký obsah harmonických. Přistupuji k bližší analýze harmonických obsažených v proudu $i_1(t)$.

Pomocí příkazu *Evaluate* získám interpolační funkci pro průběh $i_1(t)$. Tuto funkci jsem vzorkoval na 1000 bodů příkazem *Table* v rámci jedné periody a získám tak diskrétní funkci. Použiji diskrétní Fourierovu transformaci a převádím tak hodnoty z časové oblasti do oblasti frekvenční. Komplexní čísla převádím na jejich absolutní hodnoty. Získávám seznam *faz1*. Absolutní hodnoty získané z Fourierovy transformace vyjadřující obsah jednotlivých harmonických v proudu $i_1(t)$ jsem převedl na poměrné procentní hodnoty k obsahu první harmonické dle vzorce

$$faz2 = \frac{faz1}{faz1[[2]]} \cdot 100 \quad (112)$$

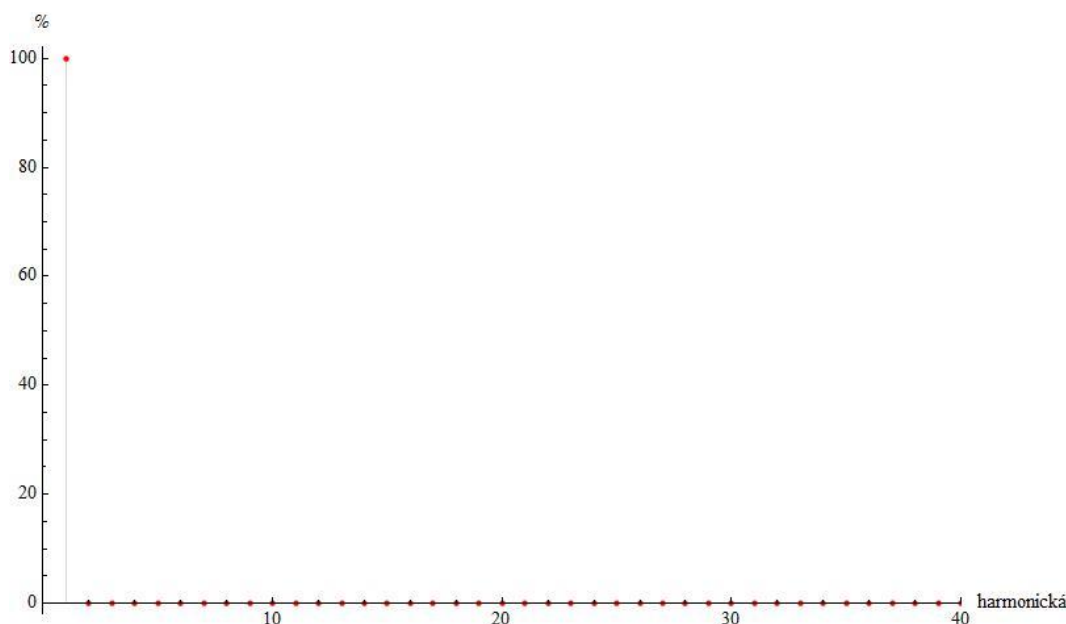
kde $faz1[[2]]$ dává hodnotu první harmonické.

Z tohoto vzorce jsem tedy získal následující hodnoty reprezentující procentuální zastoupení harmonických vztahených k hodnotě první harmonické

$faz2$

= { 0,126809; 100; 0,123673; 0,0684929; 0,0484397; 0,0377475; 0,031018; 0,026365 ... }

Hodnoty $faz2$ jsem převedl na seznam hodnot $faz3$ začínající první harmonickou a končící poslední uvažovanou harmonickou (v tomto případě f_{40}). Tyto hodnoty jsem nechal vypsát do grafu. Graf (*Graf XVIII*) zobrazuje diskrétní funkci harmonických v procentuálním vyjádření k první harmonické. Z grafu jednoznačně vyplývá, že obsah harmonických je v tomto případě zcela zanedbatelný.

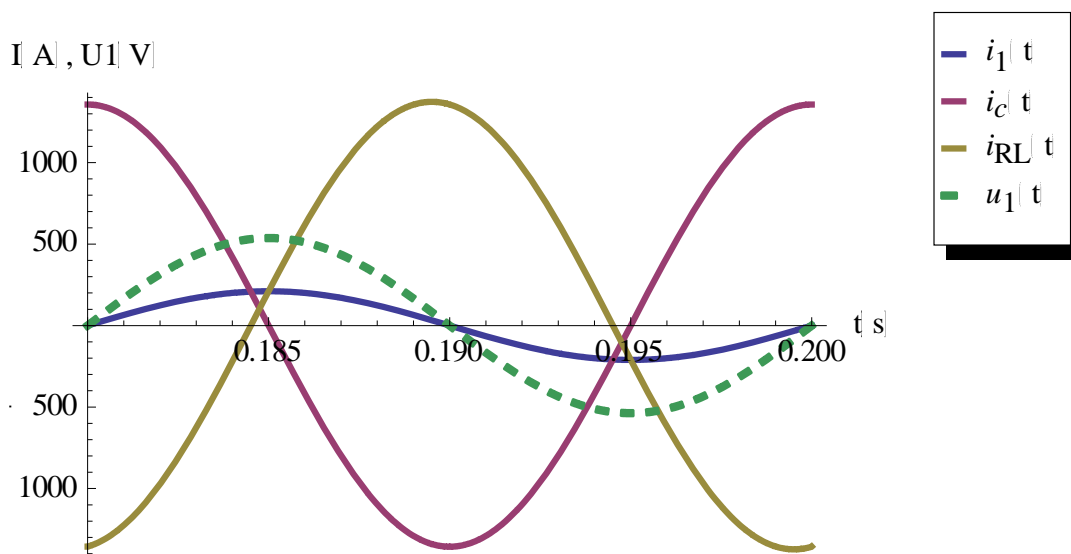


Graf XVIII - Procentuální zastoupení harmonických v proudu vztahených na první harmonickou

4.2.4 Vliv jalového výkonu na síť

Indukční pec pracuje na základě magnetických účinků střídavého proudu. K vytvoření potřebného magnetizačního pole odebírá ze sítě magnetizační (jalový) proud I_m , který se zpožďuje o 90° za napětím. Jalový výkon, jenž vytváří magnetizační proud, je nutné přenášet po distribučních napájecích sítích, aby mohly indukční spotřebiče řádně pracovat.

Induktivní charakter jalového výkonu pyrolýzní pece udává nutnost kompenzovat tato zařízení. Cílem kompenzace je snížit odběr jalového výkonu ze sítě. Toho lze dosáhnout zapojením kondenzátoru potřebné velikosti paralelně k cívice induktoru. Kondenzátor kompenzuje dodávky jalového proudu do induktoru a síť tak není namáhána odběrem jalových výkonů a tyto není nutné přenášet po vedení.



Graf XIX - Průběhy proudu $i_l(t)$, $i_c(t)$, $i_{RL}(t)$ a napájecího napětí při ideální kompenzaci

V případě zapojení kondenzátoru s přesně požadovanou hodnotou kapacity dojde k ideální kompenzaci a účinník zařízení, definovaný jako poměr činného a zdánlivého výkonu, bude mít hodnotu $\cos\varphi = 1$. Takovéto průběhy ideální kompenzace lze pozorovat v grafu (Graf XIX), kde jsou zobrazeny průběhy napájecího napětí a proudů v obvodu indukční pece. Napájecí napětí je v takovémto případě ve fázi s napájecím proudem, nedochází k žádnému fázovému posunu, a tudíž zařízení neodebírá ze sítě jalový výkon.

Tato problematika je v práci zmíněna již v části 3.3.1 a je zde uveden i vzorec pro výpočet kompenzačního kondenzátoru. V práci jsem počítal s možností ideální kompenzace a parametry zařízení tak byly počítány pro účinník roven 1.

Před kompenzací jalového výkonu zařízení byl účinník

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + tg^2\varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 6,442^2}} = \underline{0,153} \quad (113)$$

Hodnota účinníku před kompenzací je velmi malá a blíží se čistě jalovému zatížení. Je potřeba obvod indukční pece poměrně značně kompenzovat, jelikož distributor energie (pokud není dohodnuto jinak) vyžaduje účinník v rozmezí 0,95-1. Pokud je účinník nižší, může distributor uplatňovat finanční náhradu, kterou stanoví Energetický regulační úřad. [24]

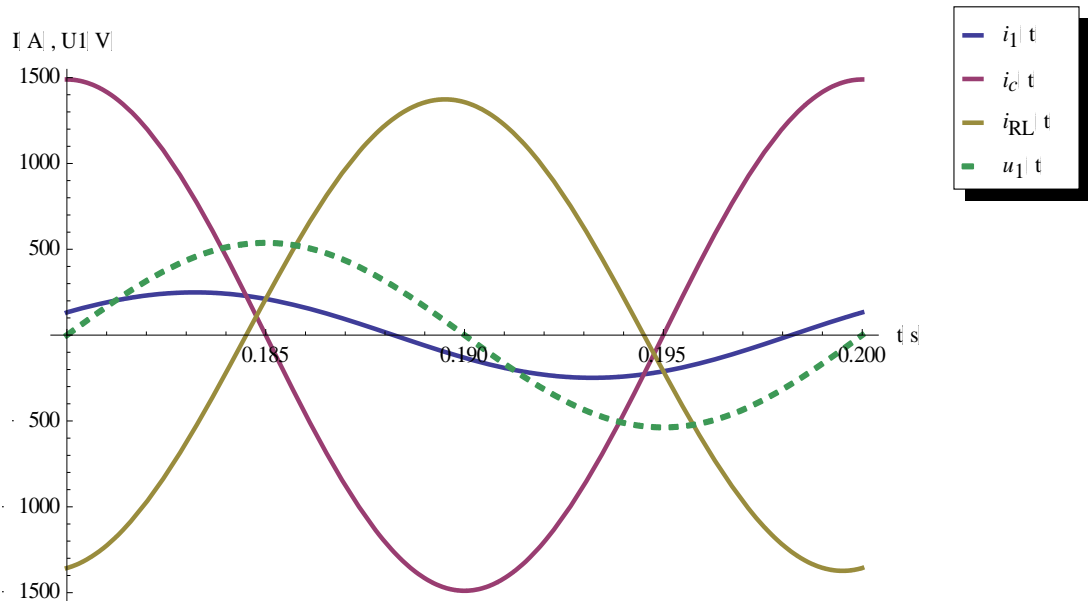
Po dosažení hodnot pyrolýzní pece, byla hodnota kapacity kondenzátoru stanovena dle vzorce (52) jako $C = 8,04mF$ a kapacitního proudu dle vzorce (51) jako $I_c = 989,4A$. Tato hodnota proudu je ale hodnotou efektivní a kondenzátor musí být navržen na maximální proud, jenž jím může procházet. Maximální proud kondenzátorem je tedy

$$I_{cmax} = \sqrt{2} \cdot I_c = \sqrt{2} \cdot 989,4 = \underline{1399,22A} \quad (114)$$

V reálných podmínkách se lze ideální kompenzací přiblížit zvolením vhodného kompenzačního kondenzátoru. Požadovaný jalový výkon kompenzačního kondenzátoru se při nejnižším možném účinníku 0,95 určil ze vzorce

$$\begin{aligned}
 Q_c &= P \cdot \{\tan[\cos^{-1}(\cos \varphi_1)] - \tan[\cos^{-1}(\cos \varphi_2)]\} = \\
 &= RI \cdot I_2^2 \cdot \{q - \tan[\cos^{-1}(\cos \varphi_2)]\} = 0,60 \cdot 970,93 = \\
 &= \{6,44 - \tan[\cos^{-1}(0,95)]\} = \underline{\underline{345,99kVAr}}
 \end{aligned} \tag{115}$$

Volím z katalogu dle hodnoty procházejícího proudu a dle hodnoty kapacity. Např. při volbě kondenzátoru z katalogu firmy ZEZ SILKO, s.r.o. se nejvíce požadovaným parametrům blíží jednofázový kompenzační kondenzátor typu CUEFS 23 o jalovém výkonu $Q_c = 400kVAr$.



Graf XX - Průběhy proudu $i_l(t)$, $i_c(t)$, $i_{RL}(t)$ a napájecího napětí při kompenzaci kondenzátorem $400kVAr$

V grafu (Graf XX) lze vidět jak by průběhy vypadaly v případě reálné neideální kompenzace. Napájecí proud induktoru se zpožďuje za napájecím napětím, což znamená, že zařízení je překompenzováno a dodává do sítě jalový proud. V takovémto případě je obvod vybaven zbytečně velkým kondenzátorem a lepší by z ekonomického hlediska bylo nalézt alternativní řešení s jalovým výkonem v mezích $Q_c \approx 350 - 400kVAr$.

5. Závěr

Pyrolýza je perspektivní metodou k likvidaci odpadu, zvláště pak kvůli zvyšujícím se požadavkům na jeho zpracování. Právě díky ekologické perspektivnosti této technologie získává na významu bližší výzkum jejího využití v praxi. Tato práce předkládá náhled na danou technologii a hodnotí její pozitiva i negativa oproti častěji využívanému spalování odpadu.

V hlavní části jsem se zaměřil na hodnocení využití indukčního ohřevu pro pyrolýzu odpadu. Zařízení bylo navrženo dle parametrů, které katedře elektroenergetiky poskytl zadavatel projektu. Pyrolýzní pec byla navržena jako rotační ocelový buben ohříváný dutým chlazeným vinutím. Nejprve jsem zjišťoval charakteristické veličiny potřebné pro navržení indukčního ohřevu postaveného na teorii válcového elektromagnetického vlnění. Pro zpracování výpočtů byl využit postup pro plnou válcovou vsázku. Toto zjednodušení mohlo způsobit při vyhodnocování určité nejistoty, na celkové výsledky by pak ale nemělo mít vliv. Z výpočtů pro induktor vyplývá, že navržené řešení napájené napětím o kmitočtu 4400Hz se dá již v této části považovat za nevyužitelné, jelikož pro takový ohřev vychází pouze dva závitů indukční cívky.

Dále uvažuji jen variantu napájení napětím o frekvenci 50Hz. Hodnocení tepelného ohřevu tuhého komunálního odpadu provádím pro lepší názornost a přesnost výsledků ve dvou výpočtových softwarech a to v programu Wolfram Mathematica a Agros2D. Z vygenerovaných výsledků jsem stanovoval schopnost zařízení splnit požadavky na něj kladené. Navržená indukční pyrolýzní pec z tohoto hodnocení vychází jako nepříliš dobré technologické řešení. Oba výsledné modely ukazují na neschopnost zařízení dosáhnout v přijatelném čase dostatečně vysokých teplot v prostoru rotačního ocelového bubnu, nezbytných pro pyrolýzu odpadu. V peci by tak za zadaných podmínek nedošlo k úplné pyrolýze odpadu, pouze k jeho ohřevu či částečnému rozkladu. Nepříznivý výsledek se zlepšil při předpokladu zaizolování pece a díky tomu snížení její emisivity. Přestože bude indukční pec i v tomto provedení dosahovat potřebných teplot poměrně značnou dobu, dokáže jich dosáhnout a s dostatečnou izolací je tak použitelná pro pyrolýzu odpadu.

Závěrečná část práce řeší připojení zařízení k síti a jeho zpětné účinky na síť. Indukční pyrolýzní pec je jednofázový spotřebič. Symetrizace řešená v této části počítá se zapojením zařízení do třífázové sítě a navrhuje konkrétní kondenzátor a cívku. Vyšší harmonické byly pro kompenzovanou indukční pec Fourierovou transformací určeny jako zanedbatelné. Je navrženo řešení kompenzace indukčního charakteru pyrolýzní pece, konkrétně pak stanoveny parametry kompenzačního kondenzátoru.

Indukční pyrolýzní pec je perspektivním řešením pro zpracování odpadu. Nabízí spoustu výhod, které jiné technologie neposkytují. Pro rozklad tuhého komunálního odpadu ale není nejvhodnější. Dá se předpokládat, že pro jiné druhy odpadu s lepší tepelnou vodivostí (např. polymery) by výsledky analýzy požadavkům vyhověly a k nárůstu teplot v prostoru pece by došlo rychleji a tudíž i k rozkladu materiálu. Pro tuhý komunální odpad je ale zařízení účinné jen při delším cyklu ohřevu vsázky. Navrhované řešení pro pyrolýzu se dá na základě výsledků považovat za nevhodné, či v případě použití dostatečně kvalitní izolace přinejmenším za neefektivní.

Seznam literatury

- [1] *směrnice Rady 1999/31/ES o skládkách odpadů, rozhodnutí Rady 2003/33/ES*, 1999,2003.
- [2] *Zákon o odpadech - č. 185/2001 Sb.*, 1.1.2002.
- [3] L. Sorum, M.G.Gronli, J.E. Hustand, „Pyrolysis characteristics and kinetics of municipal solid waste,“ *Fuel*, 2001.
- [4] „Vysoká škola Báňská, Katedra Energetiky, Fakulta Strojní,“ [Online]. Available: http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Pdf/Pyrolyza.pdf. [Přístup získán 21 11 2013].
- [5] doc. Ing. Karel Trnobranský, CSc., doc. Ing. Ladislav Dvořák. Csc., *Využití a likvidace odpadu*, Praha: Ediční středisko ČVUT, 1988.
- [6] Ing. František Straka, *Metody likvidace a energetického využití odpadů*, Praha: CA..Publishing, 1991.
- [7] *ČSN 06 3090; Zařízení pro termické odstraňování/zneškodňování a energetické využívání odpadů*, Praha, 2007.
- [8] „Our Machine: The WXT-8,“ [Online]. Available: http://www.tyrerecyclermachine.com/index_3.htm. [Přístup získán 12 11 2013].
- [9] Prof. Ing. Josef Rada, Csc. a kolektiv, *Elektrotepelná technika*, Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985.
- [10] Doc. Prof. Ing. Dr. Emil Langer, *Teorie indukčního a dielektrického tepla*, Praha: Academia, nakladatelství Československé akademie věd, 1979.
- [11] Prof. Ing. Zdeněk Hradílek, DrSc., doc. Ing. Ilona Lázničková, Ph.D., Ing. Vladimír Král, Ph.D., *Elektrotepelná technika*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [12] Prof. Ing. Josef Rada,Csc., *Elektrotepelná technika II.*, Praha: Ediční středisko ČVUT, 1983.
- [13] H. Nagaoka, „The Inductance Coefficients of Solenoids“ *Journal of the college of science, Imperial university*, Sv. %1 z %2Vol. 27,6, 1919.
- [14] Ing Jiří Krumphanzl, *Optimalizace zářivého přenosu tepla*, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2005.
- [15] Ing. Jan Leinveber, Ing. Pavel Vávra, *Strojnické tabulky; Druhé doplněné vydání, Úvaly: ALBRA - pedagogické nakladatelství*, 2005.

- [16] Tomáš Suchánek, Karel Laboutka, Výpočtové tabulky pro vytápění 9, 2001.
- [17] „Koeficient přestupu tepla,“ [Online]. Available: <https://www.powerwiki.cz/wiki/LadaMusilTeploAlfa>. [Přístup získán 31 3 2014].
- [18] P. Karban, „Agros2D – aplikace pro řešení fyzikálních polí,“ Abc Linuxu, 31 3 2010. [Online]. Available: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli#preprocesor>. [Přístup získán 16 4 2014].
- [19] Prof. Ing. Miroslav Rédr, DrSc., Prof. Ing. Miroslav Příhoda, Csc., Základy tepelné techniky, Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1991.
- [20] D. Ing. Dr. Emil Langer a C. Doc. Ing. Jiří Kožený, Elektrotepelná zařízení indukční - Základy teorie, výpočty a konstrukce, Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická v Plzni, 1982.
- [21] D. Prof. Ing. Zdeněk Hradílek, Elektrotepelná technika, Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1996.
- [22] J. Kyncl a J. Nečesaný, „Symetrizace 1f a 3f spotřebičů,“ 5 Říjen 202. [Online]. Available: <http://www.powerwiki.cz/wiki/Symetrizace>. [Přístup získán 12 Březen 2014].
- [23] Josef Tlustý, Jan Švec, Petr Bannert, Zbyněk Brettschneider, Zbyněk Kocur, Petr Mareček, Zdeněk Müller, Tomáš Sýkora, Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [24] *Cenové rozhodnutí Energetického regulačního úřadu č. 5/2011 ze dne 21. listopadu 2011, kterým se stanovují ceny regulovaných služeb souvisejících s dodávkou elektřiny*, Energetický regulační úřad, 2011.

Příloha I.

Určení hodnoty $c_p \cdot \rho$ a λ				
	(%)	c_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ (kg.m ⁻³)	λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
<i>papír</i>	0,14	1336	800	0,05
<i>plasty</i>	0,02	1317,50	1314,17	0,32
<i>mokrý org.odpad</i>	0,38	4180	998	0,6
<i>železo</i>	0,045	440	7850	58
<i>sklo</i>	0,045	840	2600	0,76
<i>zbylé části</i>	0,37	1622,70	2712,43	11,95
celkem		2459,79	1991,37	7,31
$c_p \cdot \rho$		4 898 359		