

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Modelování zhášecí komory stejnosměrného vypínače

Model of interrupter DC circuit breaker

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Datum odevzdání 7.5.2013

.....
Bc. Antonín Hub

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Hytkovi, CSc, za veškeré odborné rady a pomoc v oblasti mé diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat svému konzultantovi Ing. Petru Kačorovi PhD za veškerou pomoc a rady v oblasti modelových a výpočetních operací.

V ne-poslední řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Kargerovi za ochotu ze strany závodu Postřelmov, za veškeré podklady, pomoc a odborné rady v oblasti mé diplomové práce.

Rád bych také poděkoval mým rodičům za veškerou podporu v celém proběhu mého studia.

Děkuji

Abstrakt :

Práce se zaměřuje na modelování elektrického oblouku uvnitř zhášecí komory stejnosměrného rychlo vypínače. Na realizaci virtuálního modelu konkrétního typu zhášecí komory stejnosměrného rychlo vypínače bylo využito vývojové prostředí SolidWorks . V mém případě byl vybrán typ zhášecí komory 1X2 z typové řady stejnosměrných vypínačů N-RAPID vyráběné závodem Postřelmov. V toto modelu jsou nasimulovány pozice oblouku v dané posloupnosti. Poté byl model převeden do výpočetního prostředí Workbench od společnosti ANSYS jenž se specializuje na výpočty Metodou konečných prvků. Posléze byly modelu přiřazeny dané atributy a proveden výpočet jenž zahrnuje rozložení silových poměrů, rozložení magnetické indukce, intenzity magnetického pole a proudové hustoty v celém modelu.

Klíčová slova :

Rychlovypínač , zhášecí komora, žebra, elektrický oblouk, rozvojová výška, elektromagnetické vyfukování , výboj, výfuková výška , metoda konečných prvků, simulace, numerický model.

Abstract

This thesis is focused on modeling the electric arc inside the arc chute of the DC High-Speed Circuit Breaker. For the implementation of a virtual model of a particular type of the DC High-Speed Circuit arc chute was used development environment SolidWorks. In my case, I selected the 1X2 type of DC High-Speed Circuit Breaker N-RAPID manufactured by manufacturer Postrelmov. In this model was simulated position of the arc in the given sequence. The model was then transferred to the model computing environment from ANSYS Workbench which specializes in finite element analysis. Given attributes were later assigned to the model and performed a calculation which included the distribution of power ratios, the distribution of magnetic flux density, magnetic field and current density throughout the model.

Key Words

High-Speed Circuit Breaker, arc chute, ribs, electric arc, development heigh, magnetic blow, exhaust heigh, Finite Element Method, simulation , numerical model

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Jednotka	Popis
α	V	Konstanta pro rovnici Ayrtonové
β	V/m	Konstanta pro rovnici Ayrtonové
γ	W	Konstanta pro rovnici Ayrtonové
δ	W/m	Konstanta pro rovnici Ayrtonové
I	A	Proud
U	V	Napětí
t	s	Čas
τ	s	Časová konstanta obvodu
e	-	exponent
i'	-	přechodná složka
i''	-	Ustálená složka
C	H	Kapacita
(p)	-	Laplaceův operátor
a		Reálná část
b		Imaginární část
f	Hz	Frekvence
ω		Úhlová rychlost
k	s	převrácená hodnota časové konstanty
B	T	Magnetická indukce
H	A/m	Intenzita magnetického pole
σ	A/m ²	Proudová hustota
μ		Permeabilita
μ_r		Relativní permeabilita
F	N	Síla
Zkratka		Popis
a		Na oblouku, obloukový
dir		řidiči
G		Generátorový, na svorkách generátoru
id		ideální
k		nakrátko
K		kontaktní, na kontaktech
m		maximální (u harmonického průběhu)
max		maximami (ze všech možných případů)
N		jmenovitý
n		nastavení
v		reakce při vypínání
Obr		obrázek

Obsah

Úvod.....	2
1. Stejnoseměrný elektrický oblouk a jeho vlastnosti.....	3
1.1. Statická charakteristika.....	4
1.2. Zapínání obvodu se stejnosměrným zdrojem napětím	5
1.3. Vypínání obvodu se stejnosměrným zdrojem napětí.....	6
1.4. Princip zhášedel stejnosměrného oblouku.....	9
1.5. Elektrodynamické síly proudovodné dráhy v blízkosti feromagnetického rozhraní	12
1.6. Zhášecí komory.....	14
1.6.1. Izolační zhášecí komory.....	14
1.6.2. Zhášecí komora s izolačním roštem.....	14
1.6.3. Štěrbínová zhášecí komora.....	15
1.7. Kovové zhášecí komory.....	16
1.7.1. Kovové zhášecí komory s hustým roštem.....	16
1.7.2. Kovové komory s jednoduchým roštem.....	17
1.8. Rychlo vypínače na stejnosměrný proud.....	18
1.8.1. Princip přídržného elektromagnetu.....	20
1.8.2. Princip odpalovacího transformátoru.....	21
2. Jednotlivé etapy modelu.....	22
2.1. SolidWorks.....	22
2.2. Realizace 3D modelu.....	22
2.3. Základní princip Metody konečných prvků.....	23
2.3.1. Element SOLID117.....	23
2.4. ANSYS - Workbench.....	24
2.5. Import do prostředí ANSYS - Workbench.....	25
2.6. Model v ANSYS Workbench.....	25
3. Analýza výsledků.....	32
3.1. Hodnoty pro celý model.....	32
3.2. Hodnoty na oblouku.....	35
3.3. Grafické porovnání modelů.....	37
3.4. Silové poměry elektrického oblouku v komoře.....	42
4. Závěr.....	44
5. Seznam použité literatury.....	46
6. Seznam příloh.....	47

Úvod

Diplomová práce pojednává o virtuální realizaci konkrétního modelu zhášecí komory stejnosměrného rychlovyvínače Závodu MEP Postřelmov spadající pod firmu Slovácké strojírna, a.s., jenž byla realizována v konstrukčním prostředí SolidWorks. Konkrétně se jedná o zhášecí komoru stejnosměrného rychlovyvínače řady N-RAPID s typem zhášecí komory 1X2. Byl realizován celý kompletní model zhášecí komory za spolupráce závodu MEP Postřelmov. Ve výše zmíněném typu zhášecí komory, byly vytvořeny vlastní objemy, reprezentující oblouky v jednotlivých pohybových pozicích a to dle uvážení, tak aby byl dodržen postup oblouku ve zhášecí komoře.

Model s implementovanými oblouky byl převeden do výpočtového prostředí Workbench od společnosti ANSYS. Platforma Workbench se zaměřuje na simulaci situací ve fyzikálních polích Metodou konečných prvků. Příslušnou úpravou modelu a nastavením potřebných atributů byl vytvořen výpočetní model s potřebnou výpočetní sítí. Tento model byl výpočtem realizován pro tři případy:

1. Příklad kdy veškerý materiál, bez prostředí byla nastavena relativní permeabilita $\mu_r = 1$
2. Příklad kdy pro veškerý materiál, bez prostředí byla nastavena relativní permeabilita $\mu_r = 2,5$ představující případ přesycení celého modelu
3. Příklad kdy pro veškerý materiál, bez prostředí byla nastaveny potřebné materiálové vlastnosti včetně nelinearity materiálu (BH charakteristika)

Parametry komory byl nastaveny tak aby byla zjištěna funkčnost komory a případný monitoring oblouku v komoře.

Za pomocí software Workbench bylo umožněno vizuální rozložení magnetické indukce, proudové hustoty, intenzity magnetického pole na celé modelu zhášecí komory a i rozložení sil na oblouky a jednotlivé jejich elementy.

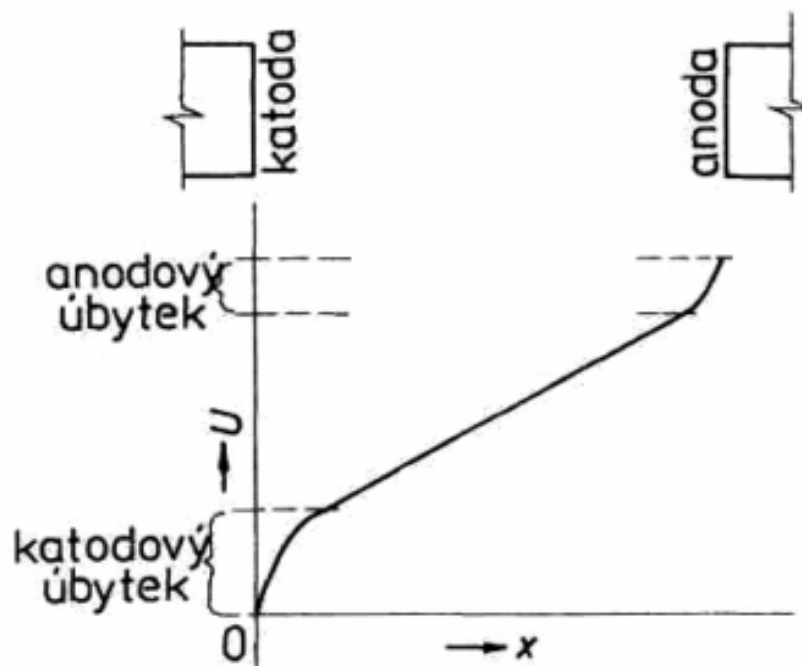
1. Stejnosměrný elektrický oblouk a jeho vlastnosti

Elektrický oblouk lze definovat jako výboj hořící v plynu za určitého tlaku, schopný samostatné existence po libovolný časový interval, není-li zasazeno do jeho struktury vhodným zásahem. Je-li elektrický oblouk napájen stejnosměrným proudem můžeme ho nazvat stejnosměrným obloukem.

Hlavní znaky oblouku jsou:

- Vysoká teplota a hustota katodové skvrny (dostačující pro tepelnou emisi elektronů)
- Malé elektrodové úbytky
- Vzhledem k napětí zdroje menší napětí mezi elektrodami
- Velký proud procházející obloukem
- Veliká intenzita vyzařování světla z plazmatu výboje a elektrod

Časový interval vytváření elektrického oblouku je velmi krátký, řádově 10^{-6} s. Plazma ve vzniklém oblouku je v termické rovnováze. Termická rovnováha nastává tehdy když elektrony, ionty, neutrální atomy, popřípadě molekuly mají stejné teploty. Podmínkou samostatné existence oblouku je průběh ionizačních přechodů, po dobu hoření oblouku by měly být ionizační přechody v rovnováze s rekombinačními přechody. Pro zánik elektrického oblouku je zapotřebí dosáhnout stavu kdy převládají rekombinační pochody nad ionizačními. Změna potenciálu v plazmatu oblouku má za následek změnu napětí v závislosti na délce oblouku v oblasti mezi elektrodami. V oblastech u elektrod je patrný velmi rychlý nárůst potenciálu, tyto oblasti nazýváme katodový a anodový úbytek viz obr. 1. Hodnoty těchto úbytku závisí na materiálu z něhož jsou elektrody vyrobeny. Mezi elektrodovými oblastmi nebo ve sloupci oblouku je nárůst potenciálu pomalejší a téměř lineární



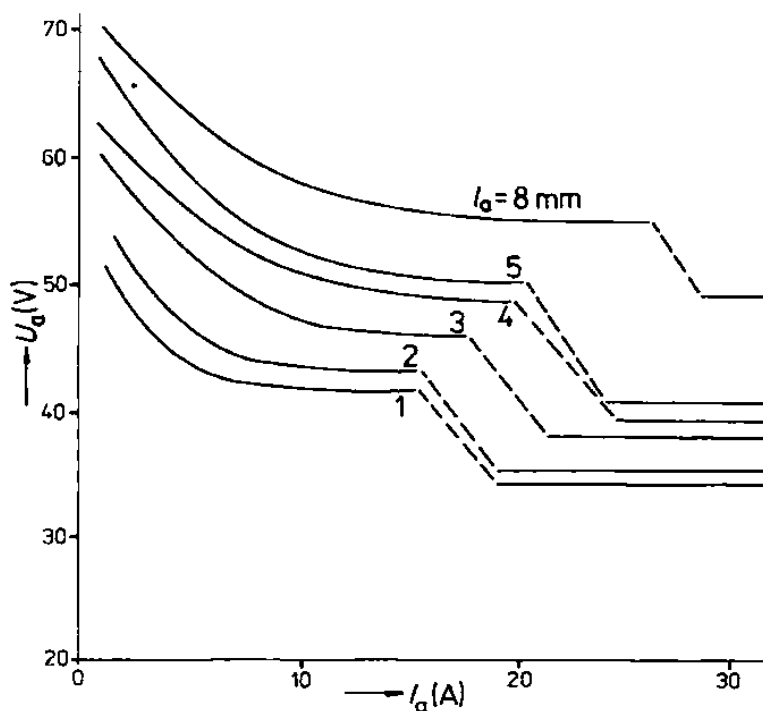
Obr. 1. - Rozložení potenciálů v oblouku

V případě stejnosměrného oblouku, který považujeme za statický, je závislost napětí mezi elektrodami na obloukovém proudu nazývána statickou charakteristikou.

Z principu můžeme oblouk v elektrických přístrojích vzniknout při spínání nebo vypínání. Můžeme tedy rozdělit oblouk dle vzniku na Zapínací oblouk, který za normálních okolností zanikne při spínání bez znatelného vlivu na spínací pochod a Vypínací oblouk, který je zapotřebí pro zdárné dokončení vypínacího procesu přerušit vhodným zásahem do jeho mechanismu. Při vypínání velkých proudů je realizace zhasení oblouku poměrně obtížná.

1.1. Statická charakteristika

Statická charakteristika oblouku viz Obr. 1.1.1. lze rozložit na dvě části, klesající jež má tvar hyperboly, probíhající v oblasti malých proudů, stoupající ve tvaru přímky a probíhající v oblasti velkých proudů. V oblasti malých proudů se charakteristika stanoví experimentálně za pomoci empiricky odvozeného vztahu od Ayrtonové.



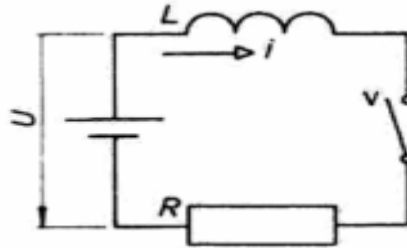
Obr. 1.1.1. - Změřené charakteristiky oblouků dle Ayrtonové

$$U_{a-r} = \alpha + \beta \cdot l_a + \frac{\gamma + \delta \cdot l_a}{I_a} \quad [1]$$

Pro tento vztah jsou $\alpha, \beta, \delta, \gamma$ materiálové a rozměrové konstanty elektrod závislosti na druhu a tlaku plynu ve kterém oblouk hoří a kterým prochází proud I_a .

1.2. Zapínání obvodu se stejnosměrným zdrojem napětím

Připojením stejnosměrného zdroje napětí na do obvodu, za předpokladu ideálního okamžiku sepnutí vypínače, nastává přechodný jev. Proud narůstá z nulové hodnoty, až do hodnoty jmenovitého proudu, přičemž zdroj napětí dodává konstantní napětí U . V tomto případě lze podle II. Kirchhoffova zákona zapsat ve tvaru lineární diferenciální rovnice 1. řádu s koeficienty a pravou konstantní stranou.



Obr.1.2.1. - Jednoduchá indukční obvod se stejnosměrným zdrojem napětí

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U \quad [2]$$

Při dodržení počáteční podmínky $i(0) = 0$. Řešení provedeme aplikací operátorového počtu a dosáhneme následující rovnice.

$$pLi + Ri - pLi(0) = U \quad [3]$$

z něj dosáhneme obrazu přechodového proudu

$$i(p) = \frac{U}{R} \frac{1}{p \left(1 + \frac{L}{R} p \right)} \quad [4]$$

Ze základů pravidel operátorového počtu dostaneme originál přechodného proudu, kde τ je časová konstanta obvodu.

$$\tau = \frac{L}{R} \quad [5]$$

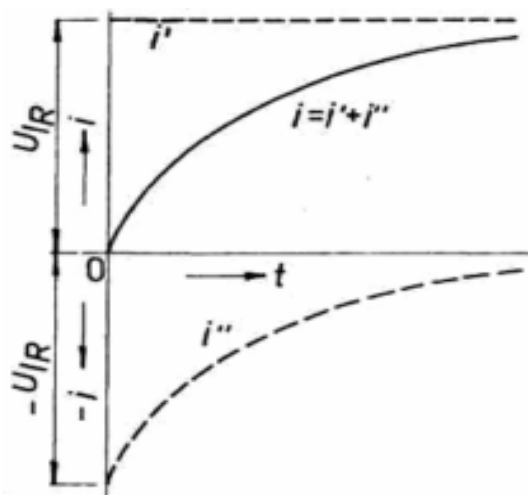
$$i(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad [6]$$

Přechodná složka

$$i'' = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [7]$$

Ustálená složka

$$i' = \frac{U}{R} \quad [8]$$

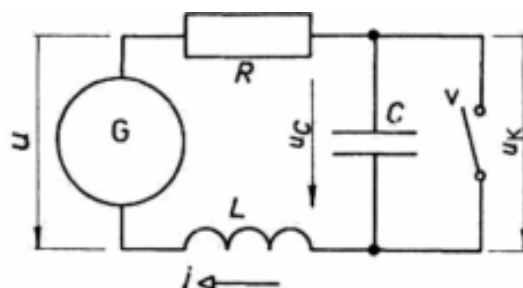


Obr. 1.1.2. - Znárodnění časové závislosti přechodného proudu obvodu napájeného stejnosměrným zdrojem napětí

Přechodný děj je složený ze dvou složek, přechodné a ustálené. Ustálená složka představuje proud, který prochází obvodem až po doznění přechodného děje, ustálená na konstantní hodnotě proudu.

Přechodná složka proudu pak charakterizuje přechodný jev, rostoucí od velikosti $-U/R$ proudu do nuly, přičemž rychlost její změny je dána časovou konstantou obvodu τ . Za uplynutí časového intervalu $t = 3\tau$ je absolutní hodnota přechodné složky na 5% ustálené velikosti. Když uplyne delší časový interval $t = 4\tau$ bude absolutní hodnota přechodné složky na 2% ustálené velikosti. Bude-li přechodný jev probíhat v časovém intervalu 4τ lze předpokládat, že se dopouštíme chyby 2% ustáleného proudu.

1.3. Vypínání obvodu se stejnosměrným zdrojem napětí



Obr. 1.1.3.1 - Náhradní schéma sítě se soustředěnými parametry napájené stejnosměrným napětím

Použijeme-li následující zapojení viz Obr. 1.1.3.1, za předpokladu použití stejnosměrného zdroje napětí ($u = U = \text{konst.}$) Při následujících počátečních podmínkách, kdy v čase $t = 0$ je $u_C = u_K = 0$.

Aplikací II. Kirchhofova zákona lze následující rovnicí vyjádřit napěťové poměry v obvodu

$$U = u_R + u_L + u_C \quad [9]$$

po rozepsání získáme

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt \quad [10]$$

proud lze vyjádřit vztahem

$$i = C \frac{du_C}{dt} \quad [11]$$

po dosazení proudu, po úpravě dostaneme

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U \quad [12]$$

Tato rovnice je lineárně diferenciální, druhého řádu s konstantními koeficienty. Řešení lze provést operátorovým počtem. Zavedením Laplaceovy transformace lze rovnici zapsat ve tvaru.

$$p^2 LC u_C(p) + pRC u_C(p) + u_C(p) = U \quad [13]$$

Upravením získáme napětí na kontaktech v obrazovém tvaru.

$$u_C(p) = \frac{U}{(p^2 LC + pRC + 1)} = \frac{U}{(p - p_1)(p - p_2)} \quad [14]$$

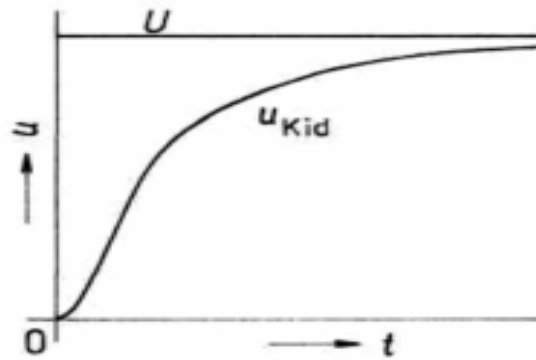
Jmenovatel nabývá nulové hodnoty mimo případ $p = 0$ i tehdy, jsou-li kořeny kvadratické rovnice p_1 a p_2 definovatelné vztahem

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} = a_{id} + jb_d \quad [15]$$

Je-li splněn předpoklad $\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$ lze říct že jsou kořeny kvadratické rovnice reálné. Po zpětné transformaci dostáváme vztah pro napětí na kontaktech v idealizovaném stavu.

$$u_{Kid} = \left[1 - \left(\frac{a_{id}}{b_{id}} \sinh b_{id} t + \cosh b_{id} t \right) e^{-a_{id} t} \right] \quad [16]$$

Průběh napětí na kontaktech lze rozdělit do dvou složek. První složka je časově nezávislá, druhá závislá s rostoucím časem zaniká. Nárůst napětí na kontaktech aperiodicky narůstá z nulové velikosti na hodnotu napětí zdroje viz Obr. 1.1.3.2.



Obr. 1.1.3.2 - Aperiodický průběh ideálního zotaveného napětí obvodu, jenž je napájený stejnosměrným proudem

Je-li splněn předpoklad $\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC}$ lze říct že jsou kořeny kvadratické rovnice komplexně sdružené.

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = -a_{id} + j\omega_{id} \quad [17]$$

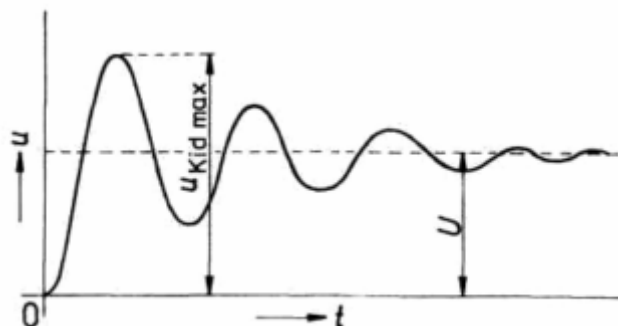
Provedeme-li zpětnou transformaci, získáme vztah pro napětí na kontaktech

$$u_{Kid} = U \left[1 - \left(\frac{a_{id}}{b_{id}} \sinh \omega_{id} t + \cosh \omega_{id} t \right) e^{-a_{id} t} \right] \quad [18]$$

Přechodná složka má harmonický průběh s časem tlumený. Lze vyjádřit kmitočet vztahem (v ideálním případě)

$$f_{rid} = \frac{\omega_{rid}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad [19]$$

V podstatě jde o rezonanční kmitočet obvodu. Můžeme vynést průběh časové závislosti napětí na kontaktech. viz Obr. 1.1.3.3. Lze říci, že napětí na kontaktech je větší než napětí zdroje. Při vypínání mohou vznikat přepětí.



Obr. 1.1.3.3 - Průběh periodického ideálního zotaveného napětí obvodu, jenž je napájen stejnosměrným napětím

Nastane-li případ, kdy kořeny p_1 a p_2 jsou reálné a stejné, když

$$0 = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad [20]$$

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad [21]$$

budou mít oba kořeny mít velikost

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} = -a_{id} \quad [22]$$

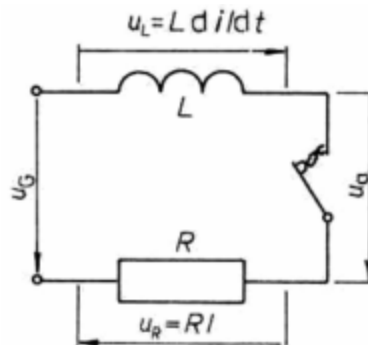
Tudíž se bude napětí měnit exponenciálně z nulové hodnoty na hodnotu napětí zdroje.

1.4. Princip zhášedel stejnosměrného oblouku

Podmínkou zdárného vypnutí stejnosměrného obvodu viz. obr. 1.1.4.1. je velké napětí na vypínaném oblouku. Zvětšení napětí na oblouku je následkem zvětšujícího odporu oblouku, následkem zvětšení odporu je zmenšování proudu procházejícího vypínaným obvodem. Zmenšení proudu má za následek úbytek napětí na tlumivce.

$$U_L = -L \frac{di}{dt} \quad [23]$$

Z důvodu souhlasného smyslu tohoto napětí, dojde přičtení k napětí zdroje, to má za následek vyšší napětí než napětí zdroje.



Obr. 1.1.4.1 - Obvod ve kterém vzniká stejnosměrný oblouk

Dle II. Kirchhoffova zákona lze popsat obvod

$$L \frac{di}{dt} + Ri + U_a = U \quad [24]$$

Rovnici lze řešit pro dva rozdílné průběhy vypínacího proudu

První případ vychází z předpokladu, kdy se proud zmenšuje lineárně, dle vztahu

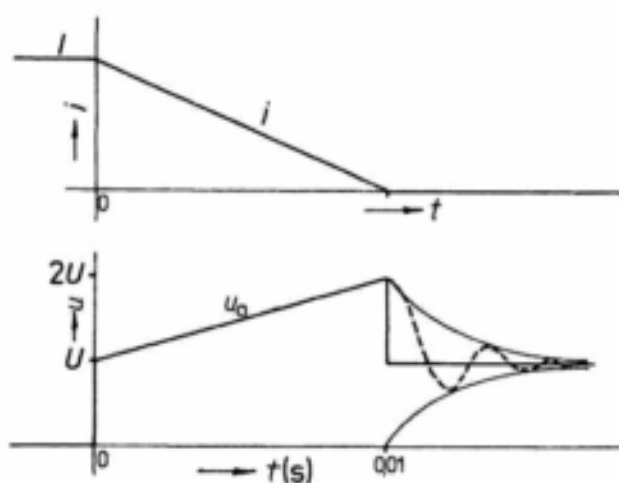
$$i = I(1 - kt) \quad [25]$$

kde $k = \frac{1}{\tau}$ [26]

Pak lze časovou závislost napětí na oblouku a odporu oblouku popsat vztahy

$$U_a = U(1 + kt) \quad [27]$$

$$R_a = R \frac{1 + kt}{1 - kt} \quad [28]$$



Obr. 1.1.4.2 - Průběh lineárního proudu, který prochází obloukem v stejnosměrném obvodu

Ze vzorce předpokládané časové konstanty obvodu $\tau = \frac{1}{k} = 0,01s$, lze tak určit celkovou dobu hoření z rovnice [25] $f_h = 0,01$ s. Časovou závislost napětí a proudu oblouku lze vykresli následovně viz Obr. 1.1.4.2.

Ze závislostí je patrné, že počáteční hodnota odporu oblouku, je stejná jako hodnota odporu zatěžovacího rezistoru. Dále napětí roste, z hodnoty zdroje na dvojnásobnou velikost při uhasínání oblouku. V praxi je tato závislost obdobou vypínání zkratu pojistkou a to principem, když dojde po přetavení tavného vodiče k následnému nárůstu na velkou hodnotu odporu.

Druhý případ vychází z předpokladu, kdy se proud zmenšuje z nenulové hodnoty a s přibývajícím časem se pokles zrychluje. Proud lze aproximativně popsat kosinovým průběhem viz [29].

$$i = I \cos \omega t \quad [29]$$

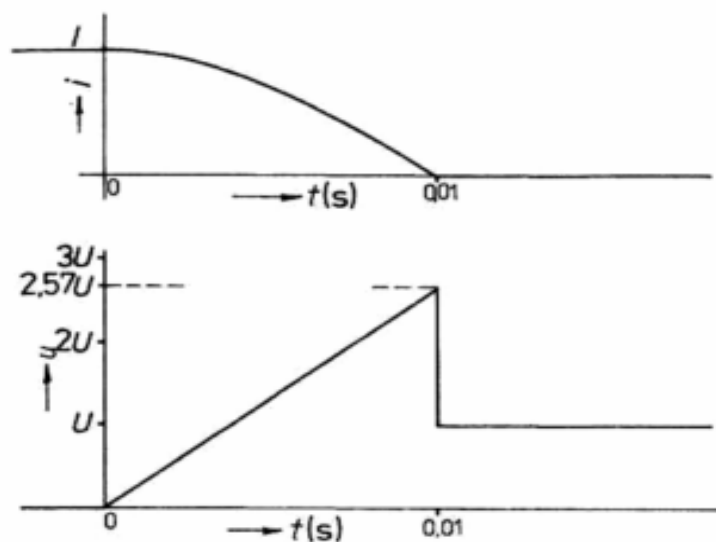
Pro tento případ lze napětí popsat jako zvětšující se z nulové hodnoty po oddálení kontaktů. Časovou závislost napětí lze popsat následující m vztahem.

$$u_a = U \left(1 + \frac{\omega}{k} \sin \omega t - \cos \omega t \right) \quad [30]$$

Průběh odporu oblouku v časové závislosti lze uvést jako

$$R_a = \frac{u_a}{i} = R \frac{1 + \frac{\omega}{k} \sin \omega t - \cos \omega t}{\cos \omega t} = R \left(\sec \omega t + \frac{\omega}{k} \tan \omega t - 1 \right) \quad [31]$$

Porovnáme-li průběhy napětí a proudu z průběhů viz Obr. 1.1.4.3, tak můžeme stanovit časovou hodnotu hoření oblouku na 0,01 s, čemuž odpovídá frekvence 25Hz a časová konstanta je stejná $\tau = 0,01$ s.

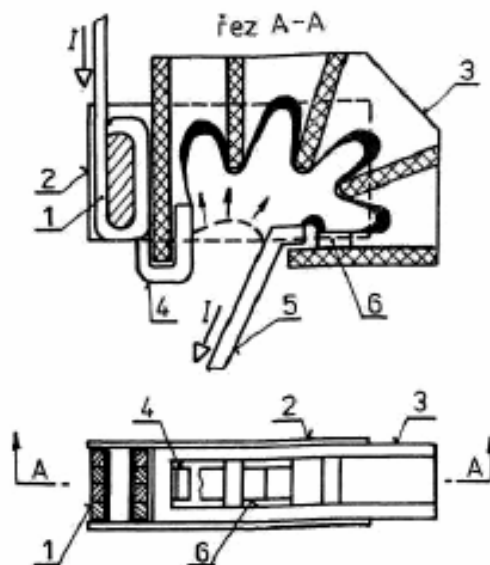


Obr. 1.1.4.3 - kosinový průběh proudu procházející obloukem při vypínání ve stejnosměrném obvodu

Z průběhu je patrné, že hodnota napětí se z nulové hodnoty postupně zvětšila až na $2,57U$ při uhasnutí oblouku.

Popsané příklady jsou idealizované, ve skutečnosti jsou poměry ještě složitější. Ve shrnutí lze obecně říci, že napětí na oblouku dosahuje maximální hodnoty v okamžiku zániku oblouku, z důvodu přičtení úbytku napětí musí být velikostně větší než hodnota napětí zdroje. Uhasnutí oblouku následuje, objevení zotaveného napětí na rozepnutých kontaktech a to posléze přehází do stavu obnoveného napětí, které je velikostně shodné s napětím zdroje.

Dle prvního principu používaného pro zhašení oblouku, se používá konstrukce kdy, je oblouk, za pomoci působení elektromagnetického pole vybuzeného vypínaným proudem, vháněn do zhašecí komory. Tyto typy vypínačů lze obecně nazvat jako vypínače magnetické, je možnost je rozdělit na s cizí a s vlastní zhašecí energií.



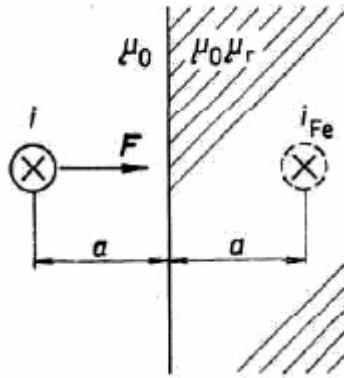
Obr. 1.1.4.4 - Skica principu funkce vypínače s magnetickým vyfukováním oblouku

Vypínač má zhášecí komoru tvořenou přepážkami, s izolačního materiálu viz Obr. 1.1.4.4.. Vypínaný proud prochází cívkou 1 s pólovými nástavci a jádrem 2 z feromagnetického materiálu. Pólové nástavce jsou umístěny na vnější straně zhášecí komory 3 z nevodivého materiálu. Dojde-li k oddálení pohyblivého kontaktu 5 od pevného kontaktu 4 vytvoří se mezi nimi elektrický oblouk, jenž je vháněn za působení elektrodynamických sil na žebra komory. Dochází tím ke zvětšení délky oblouku a ves styku oblouku s žebry komory dochází k jeho ochlazování a zvětšování odporu.

Obdobně je proveden i vypínač se štěrbinovou zhášecí komorou. Uvnitř komory jsou uloženy pólové nástavce, které svým magnetickým polem uvádí oblouk do pohybu a to směrem do zhášecí komory. Štěrbinová je u vrchní části komory zúžena, pro těsnější kontakt s obloukem. Při ochlazování oblouku stěnami komory, dochází ke zvětšování odporu oblouku. Štěrbinová zhášecí komora má větší účinnost, tudíž s ní lze vypínat větší výkony.

1.5. Elektrodynamické síly proudovodné dráhy v blízkosti feromagnetického rozhraní

Nastane-li případ kdy vodič (oblouk) jimž prochází elektrický proud je v blízkosti nějakého feromagnetického rozhraní (ocelové desky, lamely, konstrukce a podobně) viz Obr. 1.1.5.1, působí na něj síla. Velikost té to síly lze stanovit z pomoci zrcadlového obrazu vodiče se souhlasným smyslem procházejícího proudu o velikosti viz vztah [32].



Obr. 1.1.5.1 - Znáznornění přitažlivé síly mezi proudovodičem a feromagnetickým rozhraním

$$i_{Fe} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} i \quad [32]$$

Tento jev lze posuzovat jako případ dvou rovnoběžných, nekonečně dlouhých vodičů. Použijeme vztah pro výpočet síly

$$F = i_1 i_2 \frac{2l}{a} \cdot 10^{-7} \quad [33]$$

poté dosadíme do něj vztah pro i_{Fe}

$$F = \frac{2l}{2a} i i_{Fe} \cdot 10^{-7} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} \frac{l}{a} i^2 \cdot 10^{-7} \quad [34]$$

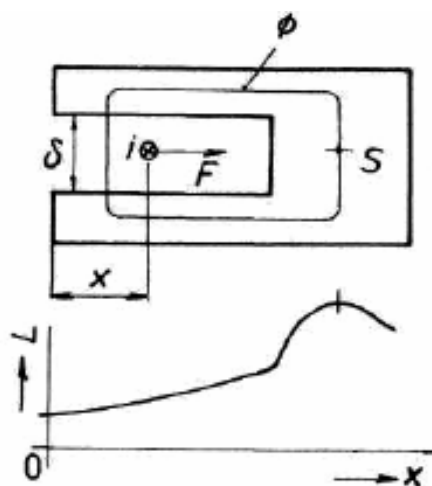
Pro případ kdy permeabilita bude mít hodnotu (případ oceli) a $\mu_r \gg 1$ dojde k úpravě rovnic na tvar

$$\frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} \approx 1 \quad [35]$$

$$F = \frac{l}{a} i^2 \cdot 10^{-7} \quad [36]$$

Případ kdy je určena konečná délka feromagnetického rozhraní ve směru proudu bývá složitější. Nejtypičtějším příkladem tohoto případu je zhášecí komora u magnetického vypínače, jehož zhášecí rošt komory je tvořen tvarovanými ocelovými plechy. Ve výřezích ocelových plechu u zhášecí komory hoří oblouk. Velikost síly, která vtahuje elektrický oblouk do hloubky výřezů zhášecí komory lze odvodit ze změny energie, která se nahromadí v magnetickém poli oblouku.

$$F = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x} \quad [37]$$



Obr. 1.1.5.2 - Vyobrazení síly jenž vtahuje oblouk do ocelové roštové komory

Závislost $L = f(x)$, pak můžeme zjistit měřením viz Obr. 1.1.5.2, že z výsledků je patrné, bude-li se oblouk v ose štěrbiny hýbat, indukčnost bude růst až do největšího místa S. S pokračujícím pohybe oblouku se bude indukčnost zmenšovat. To má za následek, změny směru síly. Síla se bude x -krát zvětšovat a to vzhledem k počtu x plechů.

Ve zmíněném příkladu jsme uměle zvětšovali působící sílu na část proudovodné dráhy (oblouk) z důvodu zvětšení rychlosti pohybu oblouku.

1.6. Zhášecí komory

Zhášecí komory, vzhledem k materiálu ze kterého jsou vyrobeny rozdělujeme na .

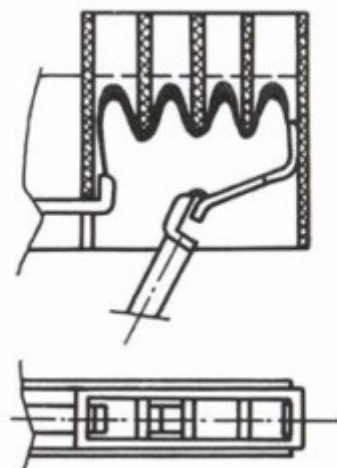
- izolační zhášecí komory
- kovové zhášecí komory

1.6.1. Izolační zhášecí komory

Zhášecí komory vyrobené z izolačního materiálu lze rozložit do dvou skupin z hlediska principiálního uspořádání, a to komory roštové a komory štěrbinové.

1.6.2. Zhášecí komora s izolačním roštem

Princip této komory spočívá v natažení oblouku přes žebra s izolačního materiálu která jsou konstrukčně řešena napříč k ose hoření oblouku viz Obr. 1.1.6.2.1.. Vyfouknutím oblouku do izolační komory dojde ke zvětšení délky a zároveň zvýšení odporu hořícího oblouku, ten se pak rozdělí do několika vln natažených přes izolační žebra komory. Při natažení oblouku se čelní strany oblouku zachytávají na žebrech komory a zbylé části oblouku jsou vytahovány dále do komory.



Obr. 1.1.6.2. - Principiální schéma izolační zhašecí komory

Nevýhodou izolačních zhašecích komor je malý chladicí účinek žebry, jenž má za následek, opalování a následný úbytek materiálu z žebry, to vede k rychlému opotřebení zhašecí komory.

Při hoření oblouku v prostoru pod a mezi žebry, se vzduch ohřívá na vysokou teplotu a za normálního stavu uniká mezi žebry výše ven z komory, ale od určité hodnoty proudu je zde riziko, že se ionizovaný plyn začne rozpínat směrem do mezi kontaktního prostoru. Tento jev by vedl k oslabení izolačního stavu mezi kontaktního prostou a znovu zapálení oblouku po průchodu nulou.

Jako další nebezpečí je stav kdy dojde k vyfouknutí oblouku na horní hrany žebry, což by mělo za následek trvalé hoření elektrického oblouku nad roštem zhašecí komory.

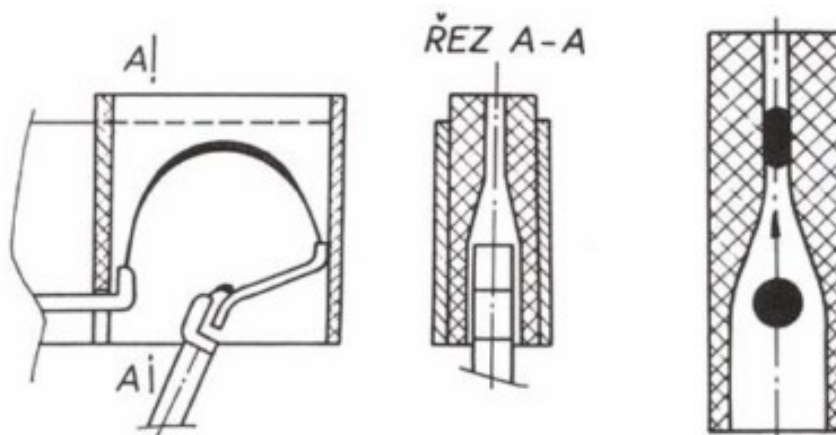
1.6.3. Štěrbínová zhašecí komora

Komora je konstruována podélně na osou hořícího oblouku. Oblouk je tak za pomoci magnetického vyfukování vyhnán do štěrbin, která je na konci otevřená a postupně zužuje, přímo úměrně se vzdáleností od kontaktů.. Oblouk se ve štěrbině dostává do těsného styku se stěnami, které oblouk ochlazují, tyto stěny jsou tvořeny žáruvzdorným materiálem viz Obr. 1.1.6.3.1..

Štěrbínová komora plní princip deformace kruhového průřez oblouku za pomoci stěn štěrbin, která zajišťuje odvod tepla od oblouku. Stěny štěrbin představují překážku pro unikající elektrony a vznikají zde rekombinační centra, v důsledku ambipolární difúze. Tudiž je dráha částic krátká a přirozená deionizace vysoká. Při zvětšování odvodu tepla se zvětšuje odpor oblouku (průběh závislosti narůstajícího napětí na oblouku na zužování štěrbin je hyperbolická).

Účinnost štěrbinové komory je při zhašení stejnosměrného oblouku vyšší než u izolační roštové komory. Opotřebení komory a snižování účinnosti stěn se snižuje pohybuje-li se oblouk v komoře.

Nebezpečí při vypínání vyšších výkonů je riziko případného zahlcování vnitřního prostoru ionizovaným plynem. Problém odvodu zplodin lze realizovat za pomoci odvodných kanálů, případně lze rozdělit komoru na několik za sebou řazených komor.



Obr. 1.1.6.31. - Principiální schéma šterbinové zhášecí komory

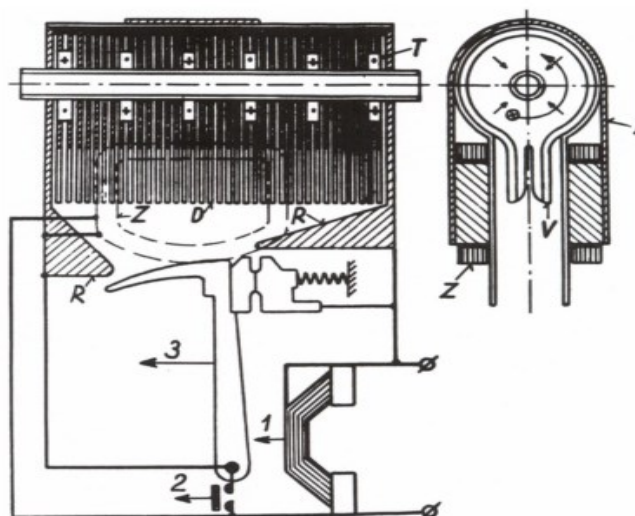
1.7. Kovové zhášecí komory

Kovové zhášecí komory lze rozdělit do dvou skupin a to vesměs podle hustoty roštu.

- Kovové zhášecí komory s hustým roštem
- Kovové zhášecí komory s řidším roštem

1.7.1. Kovové zhášecí komory s hustým roštem

Dnes již nepoužívaný, z důvodu rozměrné a finančně náročné konstrukce. Principem bylo zajištění průběhu zotavení prostředí v oblasti krátkého oblouku a to za předpokladu, že elektroda se po komutaci stane katodou a zůstává studena. Při podmínce, kdy za studenou elektrodu lze považovat takovou elektrodu, která emituje při průchodu nulou tak málo elektronů, že v následující fázi musí oblouk zapalovat přes mezifázi doutnavého výboje. Předpoklad proto aby zůstala elektroda studenou byl, realizace rychlého pohybu paty oblouku po elektrodě, za pomoci umístění pomocného vinutí.

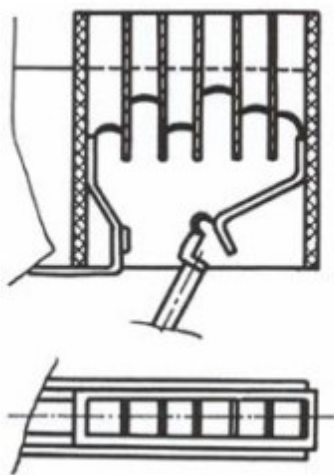


Obr. 1.7.1.1 - Slepianova konstrukce zhášecí komory s hustým roštem

1.7.2. Kovové komory s jednoduchým roštem

Z hlediska konstrukce je kovová zhášecí komora částečně obdobou izolační zhášecí komory. Kovová roštová zhášecí komora je uložena kolmo na osu hoření oblouku. Po rozepnutí kontaktů se vzniklý oblouk pomocí magnetického pole vynáší přes růžky do komory, kde se rozdělí za pomoci kovových žeber na jednotlivé, malé oblouky viz Obr. 1.7.2.1.

U roštové zhášecí komory tvořené měděnými lamelami by se mělo dbát dle výšky komory na rychlost pohybu zhášeného oblouku a to proto, aby nedošlo k riziku vyfouknutí oblouku ven ze zhášecí komory. Z toho důvodu nelze tedy předpokládat studenou katodu a opětovné zapálení přes doutnavý výboj, proto je nutné počítat s počáteční průraznou pevností mezi lamelami, odpovídající katodě s tepelnou emisí elektronů.

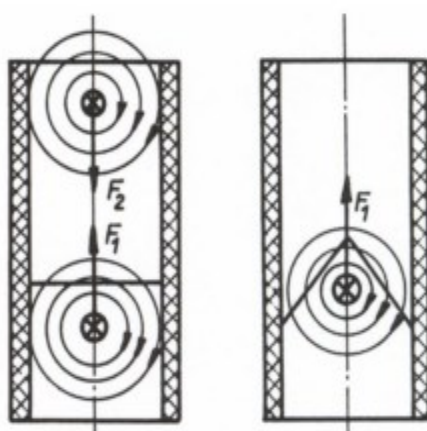


Obr. 1.7.2.1. - Principiální schéma kovové roštové zhášecí komory

Počet lamel roštové komory je dán dle vypínacího napětí. S rostoucím počtem lamel ve zhášecí komoře roste aerodynamický odpor kladeného oblouku a je zapotřebí silnějšího magnetického pole působící na pole.

Aby zhášecí komora plnila svůj účel, je zapotřebí ji předimenzovat, aby vypínání bylo funkční ve všech rozsazích včetně kritických proudů. Za kritické proudy jsou považovány ty, jejichž velikost při průchodu zhášecí cívkou nevytvoří dostatečně silné magnetické pole pro vynesení oblouku do zhášecí komory. Za podmínky když při rostoucím proudu negativně neovlivní magnetický systém feromagnetické vlastnosti použitého materiálu (přesycení a následná změna feromagnetických vlastností), můžeme říci, že účinnost systému roste s proudem. Praxe ukázala, že při velkých proudech vystačí magnetické polem proudovodného záhybu v úseku kontaktů pro vyfouknutí oblouku do komory. Z toho důvodu se proudovodný systém upravuje tak, aby se vytvořila účinná smyčka, ta se realizuje bočními příložkami. Původně měděný rošt se nahrazuje roštěm ocelovým z hlediska účinnějšího napomáhání vytáhnutí oblouku do komory.

Dojde-li k přiblížení oblouku k feromagnetické lamelle, zčásti se magnetický oblouk vyvolaný obloukem uzavírá skrze tuto lamelu. Oblouk se snaží dosáhnout takového stavu, aby energie potřebná pro vybuzení magnetického pole byla co nejmenší. Uzavírá-li se magnetický tok v prostředí s co nejmenším magnetickým odporem, tak mezi lamelou a obloukem vzniká síla F_1 , která je orientovaná směrem nahoru do prostoru zhašecí komory. U lamel z mědi tato síla F_1 nevzniká, jelikož měď má téměř stejnou permeabilitu jako vzduch. Tato situace se řeší zesílenými pólovými nástavci a zhašecí cívkou, která vyvolá vnější magnetické pole. Klínovým výřezem v lamelle roštu lze dosáhnout snadnějšího zavedení oblouku do roštu. Jako zábrana proti vyfouknutí oblouku ven z komory pak slouží interakce vnějšího magnetického pole proudové dráhy a horního okraje kovového okraje roštu (feromagnetika horní okrajové části) kdy vzniká síla F_2 opačného směru k F_1 viz Obr. 1.7.2.2..



Obr. 1.7.2.2. - Kovové lamely zhašecí komory
(vpravo s klínovým výřezem pro snadnější zavedení oblouku do roštu)

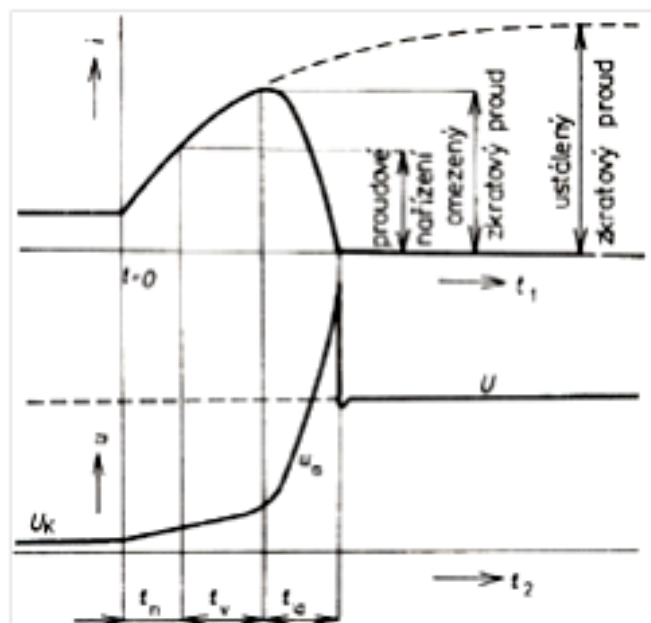
1.8. Rychlovypínače na stejnosměrný proud

Kdybychom aplikovali na stejnosměrný obvod zařízení k jištění střídavého obvodu, bylo by patrné že vypínací relé dostává vypínací proud v totožném čase, jen by se projevila značná pomalost celého mechanismu a k vypnutí by došlo až by hodnota proudu dosáhla vrcholové hodnoty I_m . Z tohoto důvodu by aplikovatelnost byla nevýhodná, protože vypínač by vypínal maximální hodnotu proudu.

Požadavky na jisticí zařízení umístěné ve stejnosměrném obvodu je tedy zřejmé, schopnost na rozpoznání začínající poruchy a rychlost vypínacích kontaktů v okamžiku. Zařízení pro rychlé vypínání stejnosměrných obvodů je tedy stejnosměrný rychlovypínač. Pro názornost lze uvést časovou závislost vypínání rychlovypínače.

V průběhu viz Obr. 1.8.1 je naznačen časový interval t_n - jenž označuje dobu nastavení, závislejší na časové konstantě obvodu. t_v - interpretuje rekční dobu spouště při vypínání od okamžiku náběhu spouště až po okamžiku oddálení kontaktů (u nejrychlejších vypínačů tato doba bývá okolo 1 ms). Časový interval označený t_a představuje dobu hoření oblouku, závislejší na typu provedení

zhášedla a napětí na obvodu (t_a se pohybuje v intervalu od 5 až do 30 ms). Celkový časový interval vypínání je realizován součtem všech tří časových intervalů.



Obr. 1.8.1. - Časový průběh vypínání rychlovypínače

Provedení ovládní kontaktů je zpravidla realizováno za použití silných pružin, jež dodají kontaktům velké zrychlení, popřípadě využitím elektrodynamických sil vyvolaných při průchodu vypínaného proudu vloženou cívkou do obvodu. Pro dosažení co nejmenší počáteční doby rozběhu se používají přímo na sebe dosedající typy kontaktů. Po rozpojení kontaktů se oblouk za pomoci magnetického pole vytahuje směrem do zhášecí komory a je natahován na délku, to má za následek destabilizaci a uhasnutí. Průběh nárůstu zotaveného napětí a omezeného proudu je patrný na časovém průběhu vypínání rychlovypínače viz Obr. 1.8.1..

Zhášecí komora by měla zajisti ochlazení a co nejrychlejší nárůst odporu oblouku na velkou hodnotu. Nejčastěji se používají štěrbinové zhášecí komory, kde je oblouk natahován na velkou délku za pomoci magnetického pole. Rozměry těchto komor jsou pak značné.

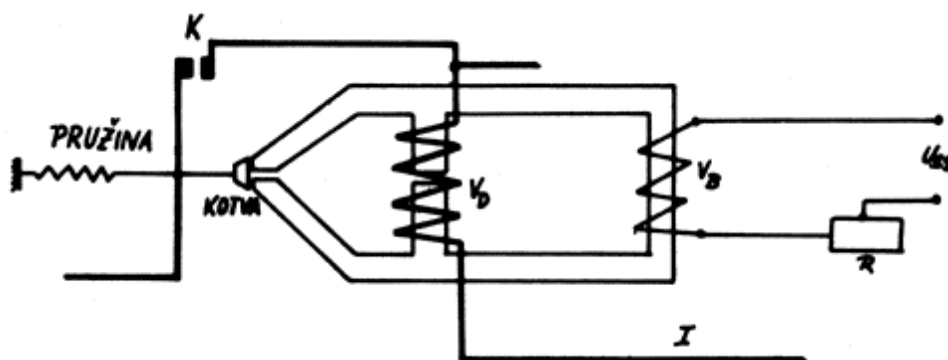
Narůstá-li obloukové napětí u rychlovypínačů vzniká velké přepětí, naopak u rychlo vypínačů s pomalým nárůstem obloukového napětí je přepětí malé. Proto je nejvýhodnější případ, kdy u rychlovypínače je počáteční nárůst napětí na oblouku prudký, ale v průběhu vypínání se zmenšuje.

Zásah rychlovypínače do průběhu vzniklého zkratového proudu, musí být proveden v době nárůstu zkratového proudu. Rozpojení kontaktů musí být provedeno v časovém intervalu menším než je časová konstanta obvodu. Zařízení, jež jistíme je dimenzováno na hodnotu omezeného proudu.

Podstatně nejdůležitější částí rychlovyvínače je mechanismus, mžikově reagující na narůstající proud. Používá se pár principů rychlých mechanismů například, přídržný magnet nebo odpalovací cívka.

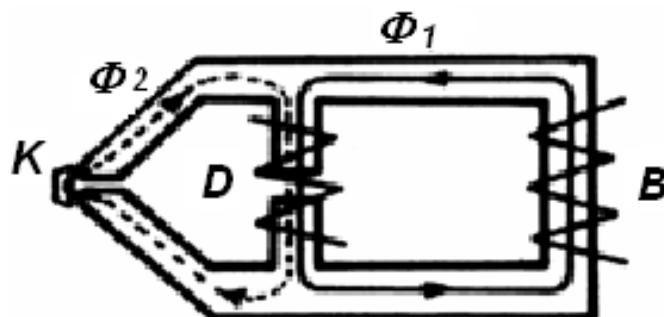
1.8.1. Princip přídržného elektromagnetu

Přídržný elektromagnet je v tomto případě tvořen dvěma cívkami na jádře elektromagnetu, z toho jedna cívka je napájena hlavním proudem a druhá je napájena z nezávislého stejnosměrného zdroje (např. akumulátorová baterie). Lehká kotva magnetu, působí proti tahu pružin. Pohyblivý kontakt, který je za pomoci pružin uváděn do polohy vypnuto je spojený s kotvou viz Obr.1.8.1.1..



Obr. 1.8.1.1. - Princip činnosti přídržného elektromagnetu u rychlovyvínače

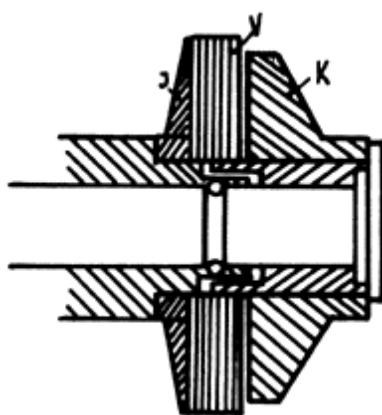
Princip viz Obr. 1.8.1.2 spočívá kdy za normálního stavu protéká obvodem pracovní proud I , současně protékající i demagnetizační cívkou D . Magnetický tok Φ_2 vyvolaný touto cívkou v kotvě je malý, zároveň působící vůči většímu toku Φ_1 , vyvolaný budící cívkou B . Magnetický tok Φ_2 při zkratu vzroste na takovou úroveň, že vybudí pole Φ_1 a kotva odpadne. Odpad kotvy je závislý na velikosti proudu a reguluje se buzením cívky B v širokém rozsahu. Aby nedocházelo k nežádoucímu demagnetizování závitů a přesycení železe, tak se provede vzduchová mezera v pólových nástavcích cívky D .



Obrázek 1.8.1.2 - Princip působení demagnetizační cívky

1.8.2. Princip odpalovacího transformátoru

Odpalovací transformátor se skládá z jádra na němž je uloženo vnutí **V** a kotvy **K** tvořené měděným kotoučem viz Obr. 1.8.2.1. Za pomoci odbočky z hlavního obvodu teče proud do odpalovacího transformátoru. Kotva je spojena za použití táhla s kontakty a z principu je kotva vytvořena jako závit na krátko. Projde-li zkratový proud odpalovacím transformátorem, tak se naindukuje v sekundárním vnutí velký proud, to má za následek, že dynamické síly mezi primárním a sekundárním vnutím způsobí odtlačení měděného kotouče. Velmi krátká doba uvolnění je způsobena vzrůstajícím zkratovým proudem, který vyvolá ihned dynamické síly mezi primárním a sekundárním vnutím.



Obr 1.8.2.1. - Skica odpalovacího transformátoru

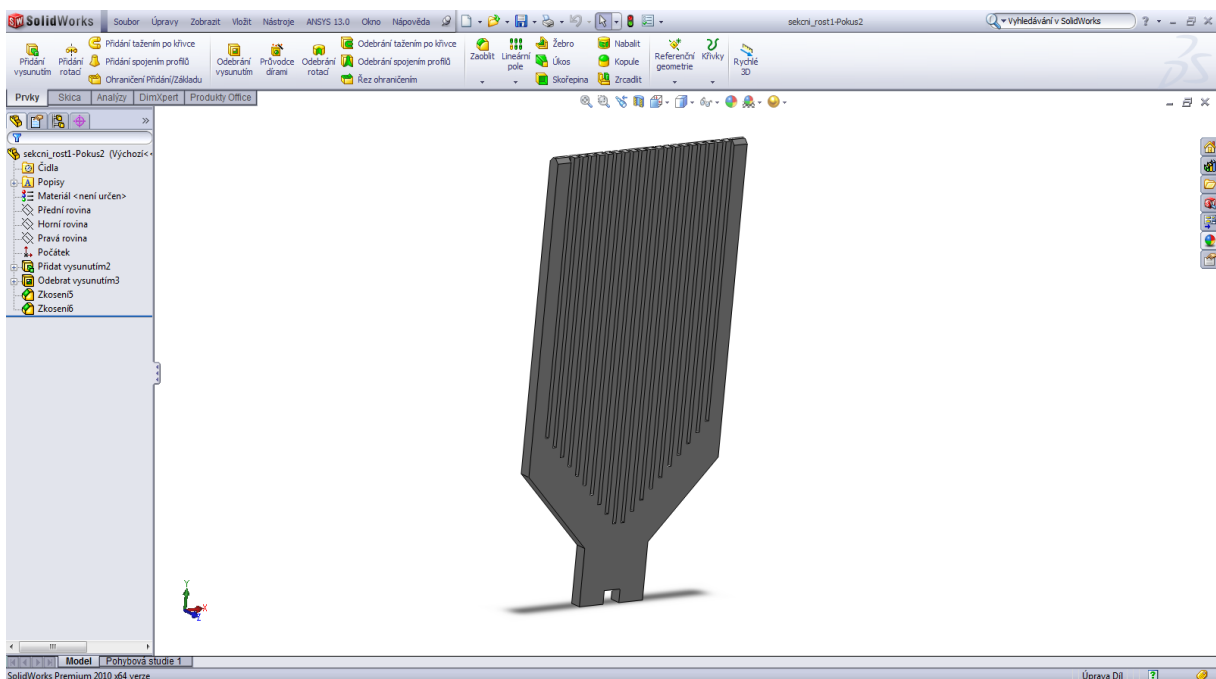
2. Jednotlivé etapy modelu

2.1. SolidWorks

SolidWorks® Premium se řadí mezi špičku nejkompexnějších softwarových řešení systému CAD ve 3D rozhraní, jenž umožňuje konstrukci virtuálního prototypu v požadované kvalitě. Tato softwarová platforma pro operační systémy Windows, se vyznačuje rozsáhlými možnostmi kupříkladu, práci s plechovými díly, tenké konstrukční prvky, výlisky, formy z rozličných materiálů, disponuje širokou škálou normalizovaných předpisů, norem, svařovacích předpisů, principů spojů a dalších. Uživatelské rozhraní Solidworks viz Obr. 2.2.1. se vyznačuje jednoduchostí, které umožňuje rychlejší a efektivnější konstruování požadovaných dílů či hotových výrobků. Výhoda pro export externí geometrie se projevuje v geometrickém formátu parasolid na, kterém je Softwarová platforma Solidworks založena.

2.2. Realizace 3D modelu

Ze současné nabídky stejnosměrných vypínačů na trhu, byl vybrán stejnosměrný rychlovypínač typové řady N-RAPID od společnosti Slovácké strojírny, a.s. vyráběné Závodem Postřelmov. Konkrétní výběr zhašecí komory byl vybrán z řady N-RAPID typ 1X2 pro $U_{Ne} = 750 \text{ V DC}$, který je určen zejména pro měnírny městských drah (tj.:tramvaj, trolejbus) jako jistič vedení.



Obr. 2.2.1 - Softwarové prostředí Solidworks® 10 Premium s vytvořenou součástí - sekcni rošt

Za pomoci spolupráce se Závodem Postřelmov, společnosti Slovácké strojírný, a.s. byl vytvořen 3D model zhášecí komory, jenž byl realizován ve vývojovém prostředí SolidWorks® Premium.

V prostředí SolidWorks® byly vytvořeny virtuální modely jednotlivých součástí zhášecí komory, izolovaně od sebe, kdy každý díl by tvořen jako nový díl viz Obr. 2.2.1.. Použitím sestavy se složily jednotlivé díly za pomoci vazeb do jednoho celku. Vazby se aplikovaly na jednotlivé hrany, plochy a body. Tímto postupem se vytvořila virtuální sestavu 3D modelu vybrané zhášecí komory ze stejnosměrného rychlo vypínače N-RAPID typu 1X2 viz příloha 1. Obr. 2.2.2..

Z kompletního virtuálního modelu komory byly vybrány potencionální proudovodné dráhy včetně vodivých lamel roštové komory. Výběru těchto částí se přiřadila podmínka zachování rozměrů a vzdálenostních poměrů s parametrem, kdy celý model je prohlášen za jednotný kus. Do nově vytvořeného kusu byly navrženy jednotlivé oblouky a umístěny do různých pozic tak aby byla dodržena posloupnost pohybu a základní dělení oblouku, přičemž oblouk byl prohlášen za rovný element kruhového průřezu sahající od jednoho objemu vývodu ke druhému objemu vývodu. V části komory, která obsahuje lamely byl oblouky vždy protaženy skrz vodivé lamely komory tak, aby element oblouku začínal na jednom objemu vývodu a končil na druhém objemu vývodu, přičemž je zachována rovnost elementu oblouku o průměru 5mm uprostřed mezi vývody, jdoucí nejkratší cestou mezi vývody skrz lamely.

2.3. Základní princip Metody konečných prvků

Za nejefektivnější řešení jakýchkoliv fyzikálních polí se v současné době považuje Metoda konečných prvků. Základní princip spočívá v co možná nejpresnější transformaci dané reálné situace, jenž se ve skutečnosti vyznačuje nekonečným počtem neznámých na model o končeném počtu neznámých, které jsou vzájemně provázány. Model by měl být proveden, tak aby jeho přiblížení skutečné situaci bylo co nejpresnější. Z důvodu minimalizace chyby a dosažitelnosti požadovaného výsledku. Daná situace ve fyzikálním prostředí, chceme-li "model", by měl model být pokryt výpočetní sítí, skládající se z jednotlivých elementů, spojených uzly. Tento strukturální koncept modelu, se pro všechny elementy (elements), uzly (nodes) nebo okrajové podmínky (*boundary conditions*) vyjadřuje potřebným matematickým popisem. Dochází tedy k idealizaci výpočetního modelu, jak z fyzikálního tak matematického hlediska. Využitelnost Metody konečných prvků by se dala aplikovat na nepřeberné množství situací. V současnosti jsou hlavními nedostatky, problematika okrajových podmínek a limitování hardwarovou konfigurací výpočetní stanice.

2.3.1. Element SOLID117

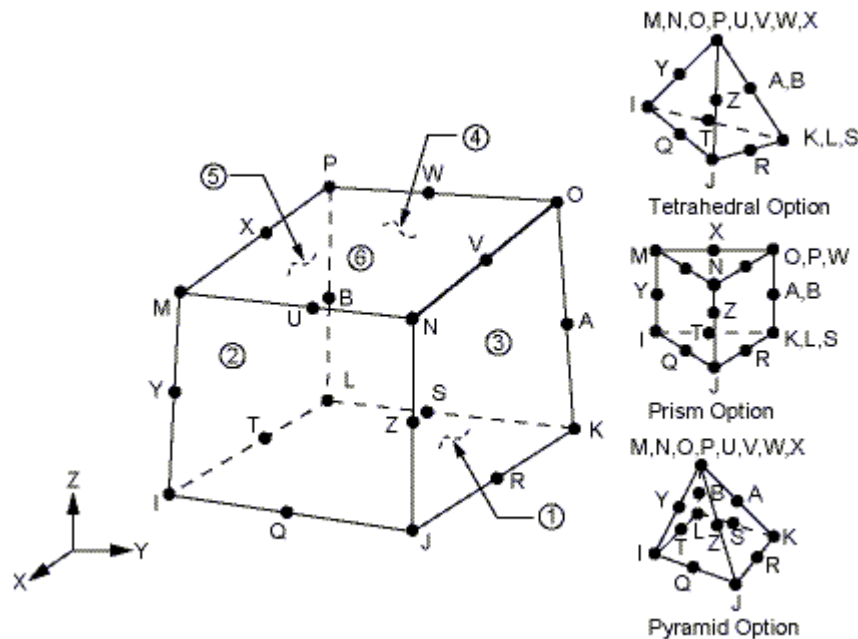
Pro náš případ modelování zhášecí komory stejnosměrného vypínače byla zvolena Magnetostatická analýza (*Magnetostatic Analysis*). Magnetostatická analýza využívá pro síť element

typu SOLID117 viz Obr 2.3.1.1.. SOLID117 je element charakterizující se jako 20 uzlový se 12 proměnnými hranami a osmi rohovými uzly, které nejsou časově integrovatelné. SOLID117 se zakládá na okrajové podmínkové formulaci, vztahující se k analýze nízkofrekvenčního magnetického pole a vířivých proudů. Při využití elementu SOLID117 jsou k dispozici pro nevířivé oblasti dvě použitelné formulace buď klasické nebo solenoidní.

Klasická formulace se využívá k reprezentaci vzduchového modelu, železa nebo neželezných materiálů.

Solenoidní formulace se aplikuje na případ modelu tuhého vodiče s napětím, s přívodem zatížení, bez uvážení vířivých proudů. Uvažováním vířivých proudů, u případu pevných vodičů se použije u hran elementu podmínka časové integrovatelnosti s elektrickým potenciálem VOLT.

Geometrické tvar prvku SOLID117 je definován 20 uzly, materiálovými vlastnostmi a umístěním uzlů. Prvek má možnost se transformovat do pyramidového nebo jiných povolených geometricky přijatelných tvarů, při zachování své charakteristiky viz Obr 2.3.1.1..



Obr. 2.3.1.1. - Element s označením SOLID117, včetně častých geometrických transformací použitý pro výpočetní síť modelu

2.4. ANSYS - Workbench

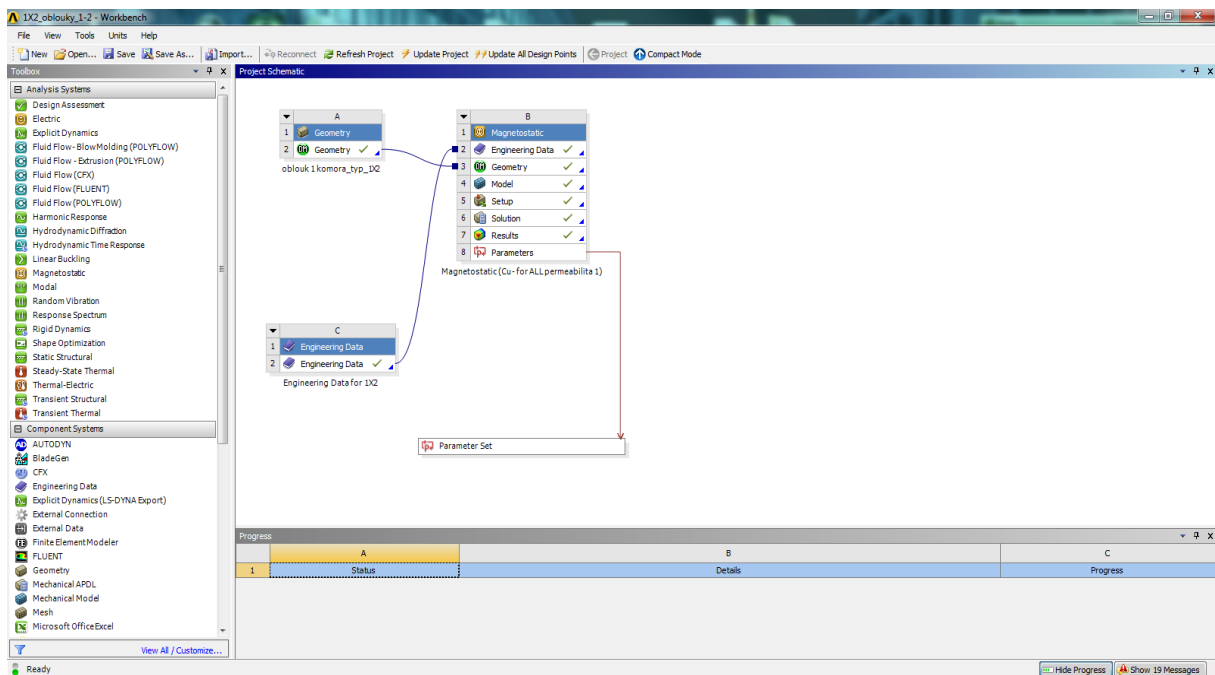
Společnost ANSYS je představitelkou výpočetní platformy Workbench specializující se na simulaci a výpočet fyzikálních polí, pomocí využití metody konečných prvků. Platforma Workbench se věnuje širokému spektru řešení fyzikálních polí, zahrnující pokročilé technologie pro analýzu nejrůznějších situací. Dalo by se říct, soubor programů pro řešení jednotlivých typů analýz. Workbench nabízí například řešení elektrických, tepelných, elektromagnetických polí, rozložení teplot, proudění a jiné.

Princip výpočetního programu workbench by se ve zkratce dal popsat jako řešení daných objemů rozdělných na menší pod-objemy dle daného předpisu jenž jsou charakterizovány požadovaným matematickým předpisem.

2.5. Import do prostředí ANSYS - Workbench

Výše zmíněný model se všemi pozicemi oblouku byl převeden za pomoci prostředí SolidWorks® do formátu parasolid (*.x_t) jenž je nejvhodnější pro export geometrie vytvořeného modelu. Pro převodový formát parasolid, byla zvolena straší verze a to v.17.1. , z důvodu zajištění větší kompatibility s předpokládanou verzí výpočetní platformy ANSYS Workbench.

Import externě vytvořené geometrie je proveden do programu ANSYS Workbench do samostatně vytvořené složky Geometrie (*Geometry*) viz Obr. 2.6.1. - (záložka *Geometry* ve schématu). Přičemž importovaná externí geometrie musí být vložena do nově vytvořeného souřadného systému, to z důvodu aby nedošlo pro další operace k případné změně stávajícího souřadného systému.

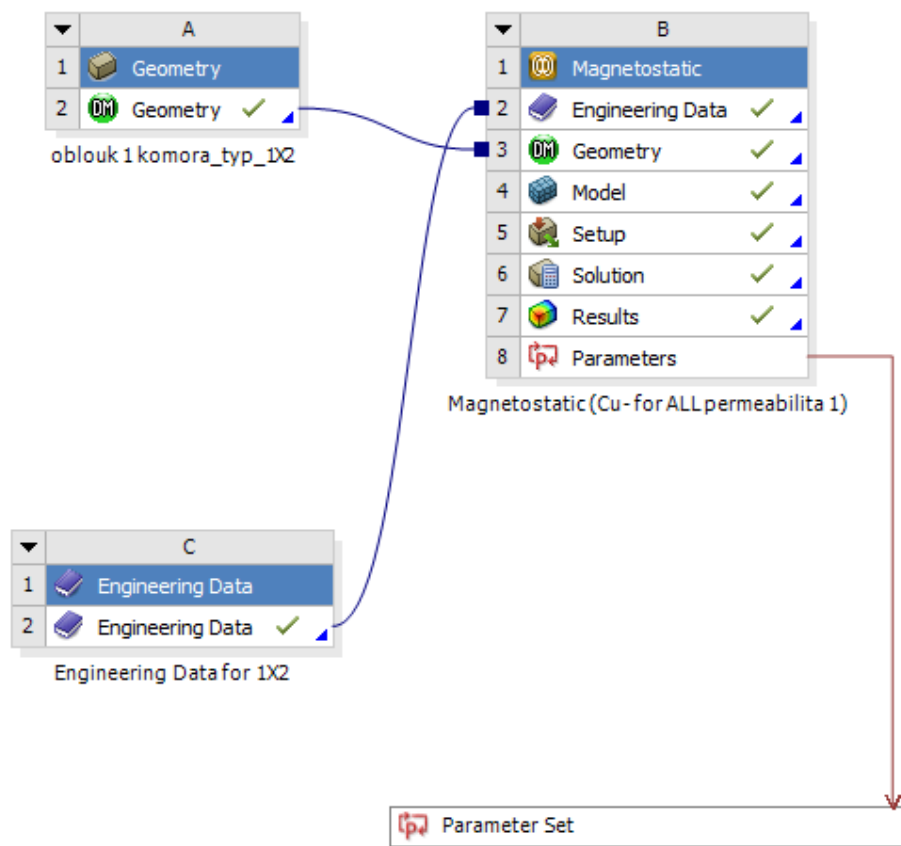


Obr. 2.5.1 - Prostředí Workbench od společnosti ANSYS, včetně schématu pro výpočet jedné předpokládané pozice oblouku (jeden model s jednou pozicí oblouku)

2.6. Model v ANSYS Workbench

V prostředí Wokrbench je zapotřebí, vytvořit schéma z jednotlivých součástí z nabídky viz. Obr. 2.4.1.- sloupec na prvé straně. Níže uvedené schéma, jenž bylo vytvořeno pro náš příklad viz Obr. 2.6.1. se v našem případě skládá z Geometrie (*Geometry*), Soupisu materiálů (*Engineering Data*), Megnetostatické analýzy (*Magnetostatic Analysis*) a Nastavovacích parametrů (*Parameter Set*), pro

náš případ jsou zde uvedeny hodnoty (*Parameter Set*), z důvodu přehlednosti a snadnějšího exportu výsledků do programu Excel pro další zpracování.



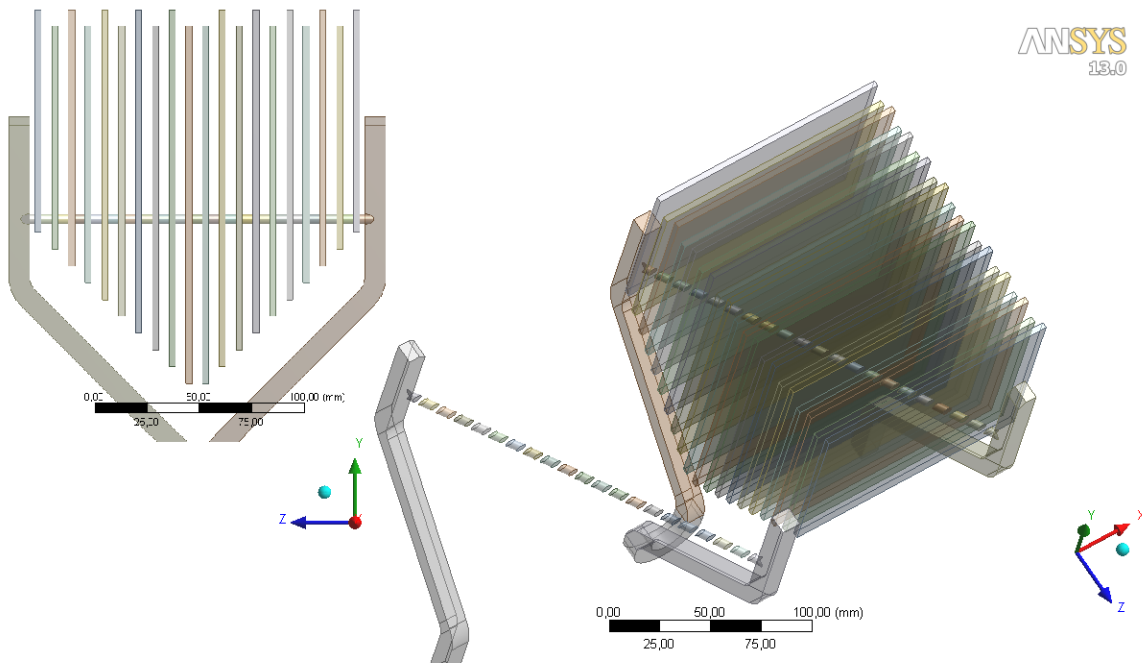
Obr. 2.6.2. - Schéma sestavené z potřebných komponentů po výpočet jednoho modelu

Geometrie - *Geometry*

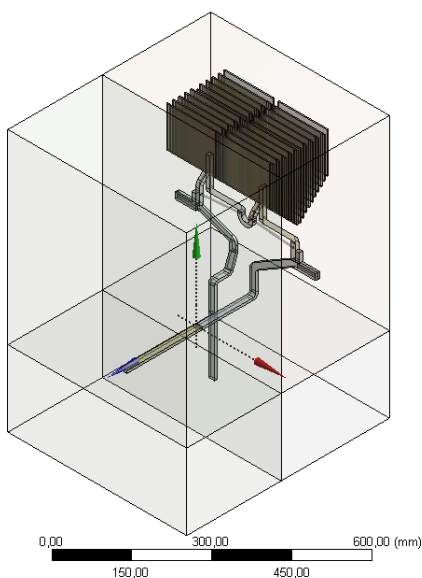
Import externí geometrie byl vložen v prostředí Workbench do systémové složky geometrie (*Geometry*) viz Obr. 2.6.1. - (vlevo nahoře). Import geometrie se musí v záložce opatřit podmínkou *Add Frozen*, která zabraní pevnému spojení jednotlivých objemů v modelu *Detail of Import* → *Operation* → *Add Frozen*. Tělesa reprezentující oblouky v oblasti lamel komory musí být rozděleny za pomoci funkce *Boolean*. Oblouky jsou poté rozděleny na jednotlivé elementární oblouky mezi lamelami roštové komory viz Obr. 2.6.2..

Z importované geometrie viz příloha 1. Obr. 2.6.3. nutno vybrat uvažovanou polohu oblouk, jenž bude označena jako součást modelu viz Obr. 2.6.5.. Výběr tedy zahrnuje vývody komory, opalovací elektrody, lamely komory a jeden případ výskytu oblouku viz příklad Obr. 2.6.5.. Zbylé oblouky musí být striktně schovány za pomoci funkce *suppressed*. Je zapotřebí model uzavřít do potřebné atmosféry, která se provádí příkazem *Enclosure*. Tento příkaz má v našem případě za následek vložení celého modelu do hranolu, představující atmosféru viz Obr. 2.6.3.. Příkaz *Enclosure* se aplikuje na vybrané objemy, z nich je model sestaven a doplněn příkazem *Non-Uniform*. Nyní musí

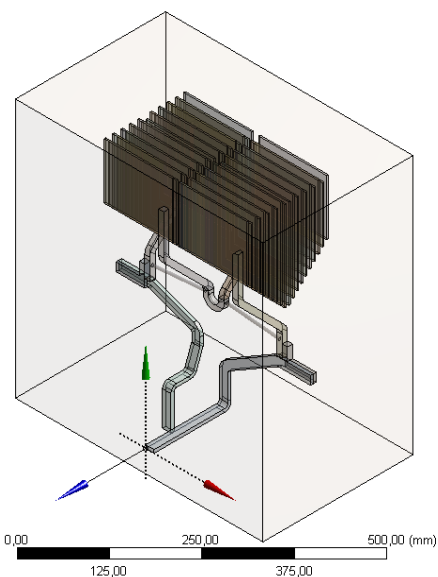
být vytvořeny dva další souřadné systémy které jsou totožné s plochami opalovacích kontaktů. Dle těchto nově vytvořených souřadných systémů se prostředí ořeže, z důvodu pozdějšího vyznačení přívodu proudu a napětí na opalovací kontakty v modelu viz Obr. 2.6.4..



Obr. 2.6.3. - Příklad rozdělení oblouku funkcí *Boolean* mezi lamely roštu komory



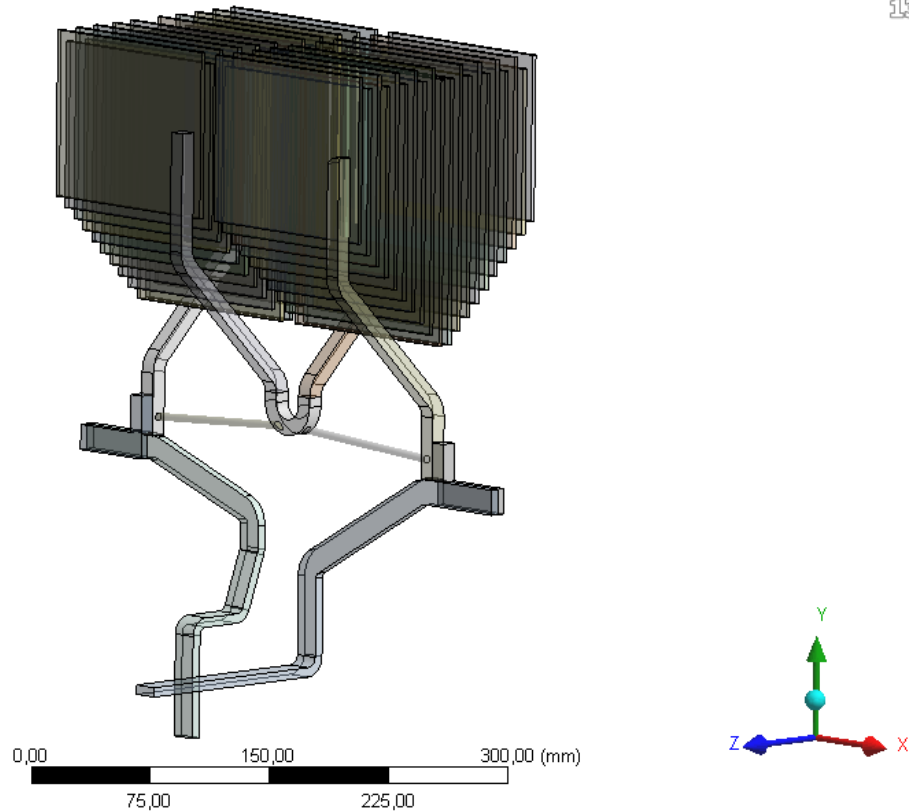
Obr. 2.6.3. - Celý model uzavřen do vzduchového prostředí - rozřezání ale bez odřábání zbylých vzduchových dílů



Obr. 2.6.4. - Model po ořezání vzduchového prostředí dle vytvořených souřadnic pro opalovací vývody

V neposlední řadě se z geometrickém modulu dají provádět další geometrické úpravy jak jednotlivých částí tak celého modelu včetně vytváření a úpravy vlastně vytvořené geometrie modelu.

ANSYS
13.0



Obr. 2.6.5. - Konkrétní případ vybrané geometrie modelu zhášecí komory včetně oblouků
Případ výskytu oblouku pozice č.7

Engineering Data

Engineering Data, zde se nacházejí jednotlivé materiály, které se nechávají zastupovat svými jednotlivými materiálovými vlastnostmi. Vlastnosti materiálů jsou nastaveny tak aby se v simulaci dosahovalo co nejvěrnější interpretaci skutečného materiálu. Materiály zvolené z integrované knihovny nebo vytvořeny samotným uživatelem v *Engineering Data* se posléze použijí pro aplikaci na vybrané objemy těles, z nichž se model skládá. Lze i vložit vlastní materiálové vlastnosti, či vytvořit svůj vlastní materiál dle vlastních požadavků. Pro náš případ byl vybrány a vytvořeny materiály s požadovanými vlastnostmi. Tak aby při následné aplikaci na jednotlivé objemy těles, ze kterých je model složen bylo dosaženo požadovaných výsledků.

Z důvodu snadnějšího exportu a přístupu k materiálovým vlastnostem jednotlivých materiálů byl vytvořen oddíl externě, posléze propojen s typem analýzy viz Obr. 2.6.1..

Magnetostatická analýza - *Magnetostatic Analysis*

Pro řešení simulovaného případu byla zvolena za nejvhodnější magnetostatická analýza (*Magnetostatic Analysis*) z nabídky systémové analýzy (*Analysis Systems*) výpočetního prostředí Workbench. Tento typ analýzy je nejvhodnější pro výpočet a zobrazení magnetické indukce, intenzity magnetického pole, proudové hustoty a zjištění sil v modelu, což se pro náš případ požaduje.

- **Geometry**

Pro Magnetostatickou analýzu byla přetažena geometrie s předchozího importu do záložky geometrie. Toto propojení značí modrá křivka viz Obr. 2.6.1.. Byla tedy použita geometrie, kdy se využije jen jeden oblouk v celém modelu a zbylé jsou skryty a to ještě před uzavřením do vzduchu viz příklad Obr. 2.6.5..

- **Model**

V položce *Model* jsou nastavovány už konkrétní atributy pro model převážně pro výpočetní síť.

V záložce *Geometry* se nachází rozpis jednotlivých částí objemů modelu. Poté jsou jednotlivým částem modelu přiřazeny materiálové vlastnosti, jenž byly vloženy nebo vybrány ve složce Engineering Data. Přiřazení materiálových vlastností požadovanému dílu se realizuje přes označený objem ve záložce Material → Assignment → požadovaný materiál. Posléze budou všechny součásti interpretovat přiřazenou materiálovou vlastnost.

Položkou *Coordinate Systems* se upravují vlastnosti souřadného systému, například jeho pozice, typ a směrový vektor globálního souřadného systému (Global Coordinate Systems).

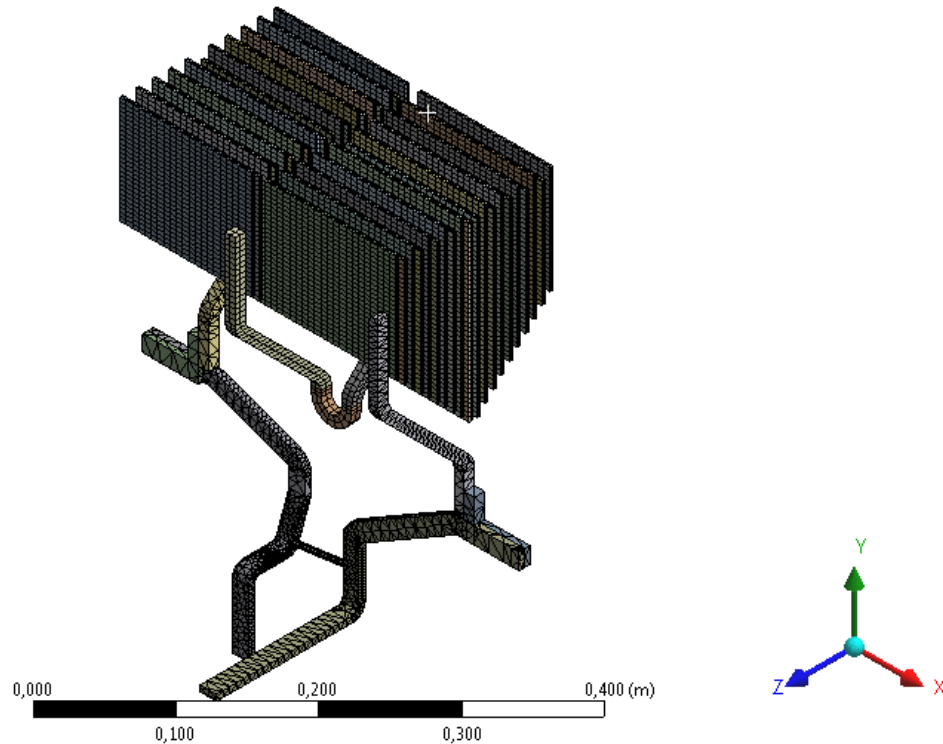
Položkou *Mesh* jsou nastavovány jednotlivé podmínky a vlastnosti výpočetní sítě aplikující se na vytvořený geometrický model viz Obr. 2.6.6. Pro vytvořený model jsou použity podmínky rozdělení počtu elementů dle hran, kdy jsou jednotlivým vybraným hranám nadefinovány počty elementů. Nastavení elementů na hrany objemů se provádí za pomoci označení hran v záložce *Definition* se provede výběr *Type* → *Number of Divisions*. Poté je v řádku *Number of Divisions* navolen konkrétní počet elementů které se rozloží na hranu vybraného objemu. Aby bylo zajištěno rozložení přesně definovaného počtu elementů na vybranou hranu, musí se zvolit *Behavior* → *Hard*. Pro zajištění co možná nejlepší navržené sítě byly předem dle skutečných rozměrů zhašecí komory proveden návrh odhadovaného počtu elementů u jednotlivých hran pro vybrané objemy. To z důvodu aby nedocházelo k velké nerovnosti rozložení výpočetní sítě a to převážně na problematických částech modelu. Zmíněnou úpravou sítě se zabraňuje nadbytečnému zvýšení počtu elementů nebo lokálnímu zvýšení extrémního počtu elementů výpočetní sítě, jenž by v následujícím výpočtu měl za následek zvýšení časové náročnosti výpočtu a v nejhorším případě (nekonvergenci) tudíž nemožnosti dokončení výpočtu.

Se zvyšujícím se počtem elementů nebo aplikací nelineární vlastnosti materiálu na objemy těles dochází k nárůstu výpočetního času. U případných lokálních míst s extrémním počtem elementů viz Obr. 2.6.7. (oproti rozložení okolní sítě) se může stát aplikací nelinearity materiálu případná

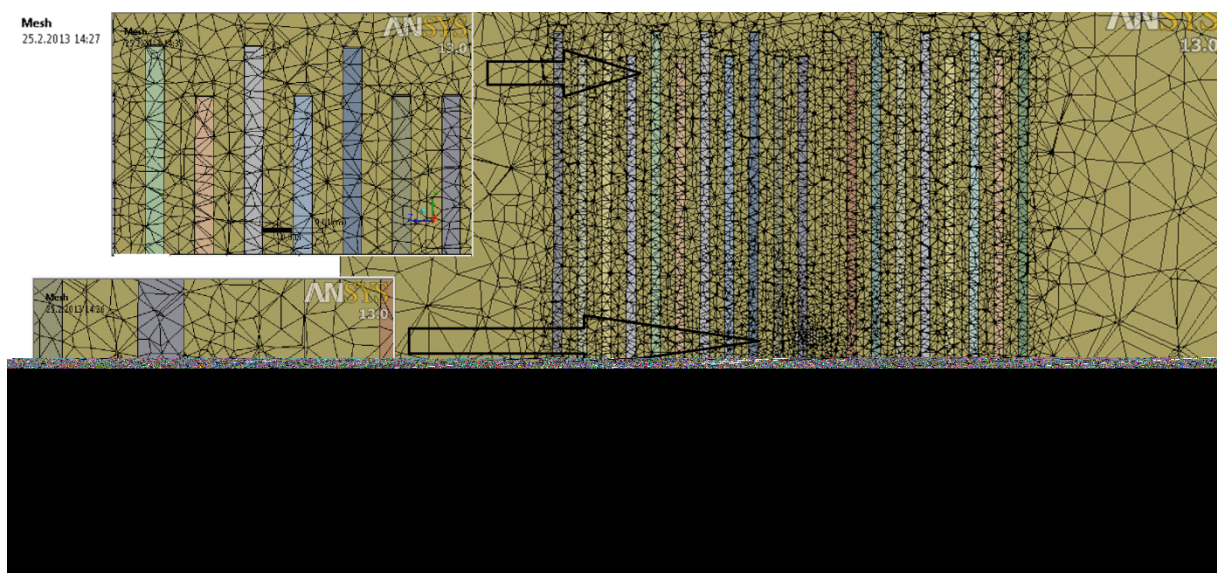
neschopnost dokončení výpočtu, pro tento případ je nutné aby byla síť na modelu vylepšena s patřičným ošetření od daných lokálních problémů.

Mesh
15.2.2013 14:58

ANSYS
13.0



Obr. 2.6.6. - Příklad kdy je model pokryt výpočetní sítí bez vzduchového okolí
Příklad výskytu oblouku pozice č.1



Obr. 2.6.7. - Ukázka složitosti výpočetní sítě a lokálních míst s extrémně velkým počtem elementů (síť mezi lamelami roštu komory a oblouk doléhající na lamelu uvnitř komory)

Záložka *Named Selection*, se využije pro případný popis skupiny objemů. Pro příklad se v našem případě funkce využije na shrnutí všech jednotlivých elementárních oblouků do popsaného

celku pro přehlednost a případnou další operaci. V neposlední řadě se seskupí i lamely roštové komory, opalovací kontakty a vývody do komory.

Magnetostatic

Analysis Settings, tak zde se nachází nastavení týkající se typu průběhu řešení. Lze zde možnost nastavit podrobnosti ke konvergenci řešení *CGS* a *AMPS Convergence*, změnit typ řešiče *Solver Type*, nastavení výstupních dat, případné krokování výpočtu. Ve výše uvedené záložce *Analysis Settings* → *Solver Controls* → *Solver Type* bylo nutno změnit typ řešiče, z důvodu nemožnosti konvergence z původního nastavení *Program Controlled* na *Iterative*. Tento zásah do nastavení se projevil na prodloužené době výpočtu.

Podmínka paralelního možno nastavit v záložce *Magnetic Flux Parallel*. Podmínka se aplikuje na všechny plochy (*Faces*) objemu prostředí, v němž se model nachází. Do toho výběru se nezahrnují vstupní povrchy opalovacích kontaktů.

Přivedení proudu a volba potenciálu napětí se zvolí v nabídce *Source Conductor*. Ve výše zmíněné položce je zapotřebí zadat všechny objemy potencionální proudovodné dráhy *Source Conductor* → *Scope* → *Geomtry* → výběr těl jimiž prochází proud. Proud (*Current*) se aplikuje na plochu opalovacího kontaktu hraničícího s atmosférou. Zapotřebí je zvolit velikost proudu a to ve *Source Conductor* → *Current* → *Magnitude*. Hodnota vstupního proudu byla zvolena vzhledem ke Jmenovitému zkratovému proudu O něco nižší a to hodnotou 25kA. Zvolená hodnota přivedeného proudu se aplikuje vzhledem k ověření funkčnosti modelu. Napětí (*Voltage*), tedy napětí je zapotřebí aplikovat na plochu druhého opalovacího kontaktu, hraničící z okolní atmosférou.

V poslední záložce je zapotřebí aby byly zvoleny požadované typy výpočtů, které má programy vykonat. V našem případě tomu jsou typy :

- Total Magnetic Flux - Magnetická Indukce
- Total Magnetic Field Intesity - Intenzita magnetického pole
- Current Density - Proudová hustota
- Directional Force - Axis X - Síla ve směru osy X
- Directional Force - Axis Y - Síla ve směru osy Y
- Directional Force - Axis Z - Síla ve směru osy Z

(všechny síly jsou vztaženy k vnitřnímu souřadnému systému, který byl stanoven dle geometrie)

Veškerá řešení a výpočty probíhaly na PC s konfigurací :

- Procesor : Intel Core i3-2105 (4 CPUs); 3,1 GHz
- Paměť RAM : 4078 MB
- Grafická karta : NVIDIA GeForce 8400GS, 1024 MB
- Pevný disk : 320 GB
- Operační systém Microsoft Windows XP Professional x64 Edition

3. Analýza výsledků

Výpočty jsou realizovány pro tři případy změn materiálových vlastností částí modelu, neuvažujeme-li žádnou změnu okolního prostředí do, kterého byl model uzavřen. Změna materiálových vlastností se týká opalovacích kontaktů, opalovacích vývodů do komory včetně spojek a lamelového roštu komory.

- Byla provedena změna materiálových vlastností v podobě změny relativní permeability na hodnotu jedna $\mu_r = 1$
- Relativní permeabilita byla nastavena na hodnotu 2,5 $\mu_r = 2,5$, interpretující případ přesycení materiálu v modelu
- Objemům se přiřazuje BH charakteristika litiny, pro interpretaci skutečného materiálu

Výpočty bylo zkoumáno, jak bude docházet k rozložení magnetické indukce v celém objemu modelu, jak bude vypadat intenzita magnetického pole modelu, dále jak bude ovlivněna proudová hustota v modelu a v neposlední řadě i velikost sil, jež působí na oblouk, popřípadě jeho jednotlivé elementy rozdělené mezi lamely roštu komory.

V geometrii se oblouk představuje jako objem od jednoho vývodu ke druhému koncovému vývodu, s průměrem 5mm jež byl vytvořen v geometrickém středu mezi objemy kolmo na osu oblouku. Z hlediska předpokládané změny tvaru byla komora rozdělena na tři oblasti. První oblast se nachází ve spodní části na opalovacích kontaktech, kde je oblouk jako jeden celistvý kus mezi opalovacími kontakty. Následuje oblast, kdy se oblouk rozděluje za pomoci prostředního opalovacího vývodu komory na dva oblouky v oblasti pod lamelami roštu komory. V poslední oblasti se oblouk rozděloval mezi lamely roštu komory a to v úhlopříčce mezi vrchní části opalovacích kontaktů komory. V každé této oblasti bylo vytvořeno šest případů pozic oblouku.

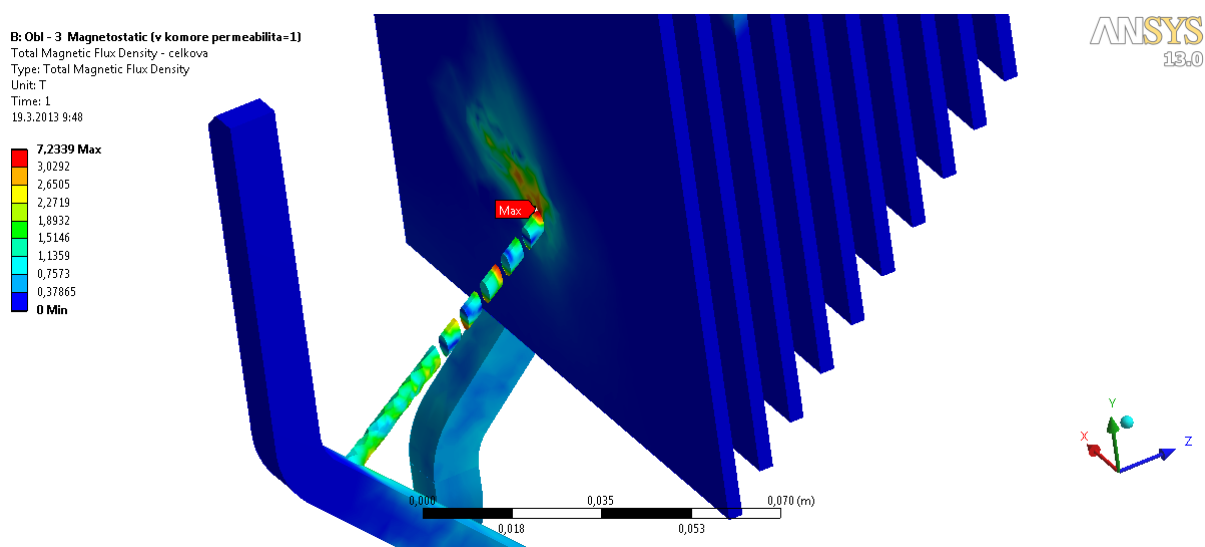
BH charakteristika byla vybrána ze stávající nabídky materiálové knihovny v programu Workbench a to z ohledem na nevhodnější podobnost ze skutečnými materiály jež jsou použity ve zhášecí komoře.

3.1. Hodnoty pro celý model

V programovém prostředí Workbench byl zadán požadavek na výpočet magnetické indukce, intenzity magnetického pole a proudovou hustotu. Tento případ se netýká výpočtu velikosti silových účinků, to z důvodu, že silové účinky jsou brány jako suma všech sil vypočtených na předložený objem ve zvoleném směru. Pro tyto požadavky, výpočtu magnetické indukce, intenzity magnetického pole a proudovou hustotu jsou k dispozici výsledky a to ve formě minimální a maximální hodnoty v celém modelu. Minimální hodnoty pro nás jsou méně podstatné, proto byly zvoleny maximální

hodnoty. V modelu jsou maximální hranice hodnot vodítkem k představě případného možného přesycení, míst lokálních extrémů a v těch horších případech se projevuje komplikace v podobě nevhodného síťování modelu, jenž souvisí z hardwarovými požadavky výpočetní stanice.

Pro všech 18 jednotlivých pozic výskytu oblouku v modelu komory, se zaznamenaly maximální hodnoty požadovaných veličin viz. příloha 1. tab. 3.1.1.. Tyto hodnoty interpretují převážně místa z největší hodnotou požadované veličiny, pouze v případě 15 pozice výskytu oblouku v komoře, se projevuje komplikace v podobě nevhodného síťování. V případě pozice 15 výskytu oblouku se mezi žebry vytvořilo místo z extrémním počtem elementů, což mělo za následek lokální zhuštění sítě v místě, kde se propojuje oblouk s lamelami komory viz obr 3.1.1.. Pro objektivní hodnocení nebudeme uvažovat případ oblouku nacházejícího se v pozici 15, z důvodu velkého výkyvu hodnot, způsobených nevhodným síťováním viz obr 3.1.1..



Obr. 3.1.1. - Lokální zhuštění sítě, způsobující lokální extrém maximální hodnoty (pozice 15)

Pro lepší znázornění byly vyneseny maximální hodnoty celého modelu v závislosti na jednotlivých pozicích oblouků.

$$\mu_r = 1$$

Z grafu viz příloha 1. obr. 3.1.1. je patrné hodnoty indukce se zvyšují, v pozici 6 kdy dochází k prvnímu rozdělení oblouku prostředním opalovacím vývodem na dva oblouky směřující dále na lamely roštu a pozici 16 kdy se oblouk objevuje téměř uprostřed lamely komory tedy v posledním ohybu opalovacích kontaktů v komoře. Pro případ použití permeability $\mu_r = 1$ se maximální hodnota magnetické indukce v celém modelu pohybuje mezi 2 až 3,23T.

Maximální hodnoty intenzity magnetického pole viz příloha 1. obr. 3.1.2. se pohybují v rozmezí od 1,59E+6 A/m do 2,52E+6 A/m, přičemž největší hodnoty jsou v pozici 6, kdy je pozice oblouku

těsně před rozdělením prostředním opalovacím vývodem komory na budoucí dva oblouky a v pozici 16, kdy se oblouk nachází ve vrchním ohybu opalovacích vývodů, s obloukem takřka u prostřed lamel.

Průběh viz příloha 1. obr. 3.1.4. kde jsou vyneseny maximální hodnoty proudové hustoty v závislosti na pozici oblouku je vidět, že proudová hustota narůstá do pozice 6 na hodnotou $2,66E+9$ A/m² poté začíná klesat a od desáté pozice oblouku prudce narůstá až do pozice 16 na maximální hodnotu ze všech pozic $4,49E+9$ A/m². Proudová hustota se pohybuje v rozmezí $1,59E+9$ A/m² až do maximální hodnoty $4,49E+9$ A/m².

$$\mu_r = 2,5$$

Pro případ užití relativní permeability ve velikosti $\mu_r = 2,5$ interpretující přesycení železa, lze říci, že hodnoty magnetické indukce se budou pohybovat v rozmezí mezi 4,11 až 6,94 T. Pro případ aplikace $\mu_r = 2,5$ je patrné že hodnoty magnetické indukce jsou cca dvojnásobné oproti případu užití permeability $\mu_r = 1$. Velikostně jsou největší hodnoty obdobou jakou u případu užití permeability $\mu_r = 1$ a to v pozicích 6 o hodnotě 6,04T a pozici 16 o hodnotě 6,94T viz příloha 1. obr. 3.1.1..

Hodnoty magnetické intenzity pole na obr. 3.1.2. viz příloha 1. jsou taktéž nejvyšší v pozici 6 s hodnotou $2,28E+6$ A/m a pozici 16 hodnotou $2,64E+6$ A/m. Nejnižší hodnota magnetické intenzity pole je v pozici 2 o hodnotě $1,57E+6$ A/m.

O průběhu závislosti proudové hustoty celého modelu, s ohledem pozici oblouku, lze říci že téměř totožná jako pro případ užití permeability $\mu_r = 1$, pouze o málo lišící se v poslední hodnoty 18-té pozice oblouku viz příloha 1. obr. 3.1.4..

BH charakteristika

V ohledu magnetické indukce v celém modelu viz příloha 1. obr. 3.1.1. za předpokladu aplikace nelinearity materiálu lze říci, že se hodnot magnetické indukce pohybují v rozmezí od 2,72T až od 3,49T. Rozmezí hodnot magnetické indukce (s BH charakteristikou) se oproti ostatním dvěma případům liší menším rozptylem hodnot magnetické indukce.

Z hlediska maximálních hodnot intenzity magnetického pole se dá říct, že hodnoty pro případ aplikování nelinearity materiálu a případ užití $\mu_r = 2,5$ jsou si podobné viz příloha 1. obr. 3.1.2..

Oblast průběhu proudové hustoty v celém modelu se vyznačuje velkou proměnlivostí hodnot a to v rozsahu od $2E+9$ A/m² až do $4,42E+9$ A/m² viz příloha 1. obr. 3.1.4.. Ve srovnáním proudové hustoty v případě užití BH charakteristiky pro model se vyznačuje velkým rozptylem hodnot oproti předchozím dvěma případům užití permeability. Největší hodnoty proudové hustoty jsou v pozici 7 ($3,3E+9$ A/m²) kdy se oblouk rozdělí na dva oblouky za pomocí prostředního opalovacího vývodu komory, dále se pak hodnota proudové hustoty se zvyšuje až při postupu oblouku po prvních 7

žebrech komory na hodnotu $4,42E+9 \text{ A/m}^2$ dále pak klesá až na hodnotu $3,53E+9 \text{ A/m}^2$ na pozici 18-té.

Průběhy pro všechny tři případy ($\mu_r = 1$, $\mu_r = 2,5$ a BH charakteristika) byly zde vyneseny pro snadnější porovnání do jednoho průběhu, přesnější průběhy jednotlivých hodnoty budou uvedeny v příloze nebo na přiloženém záznamovém médiu.

3.2. Hodnoty na oblouku

Z celého modelu zhášecí komory byl vybrán oblouk pro interpretaci rozložení hodnot na celém objemu oblouku. Hodnoty magnetické indukce, intenzity magnetického pole a proudové hustoty se zjišťovaly v první řadě dle průměru z barevné škály převažujících hodnot na celém objemu oblouku, pro kontrolu hodnot z vizuálního odečtu dle barevné škály, se využila lokální sonda hodnot (*probe*). Kdy se sonda kliknutím aplikovala na dané místo v oblouku pro zjištění hodnoty v daném místě na objemu oblouku.

Z hlediska ustálení barevné stupnice pro požadované hodnoty se vyhodnocení konalo na jednom počítačovém pracovišti a to z důvodu možnosti odchylek v barevnosti škály hodnot dle různého hardwarového vybavení počítačových pracovišť. Veškeré naměřené hodnoty byly zaznamenány do přehledné tabulky v pro přehled v závislosti na jednotlivých pozicích oblouku.

Hodnocení v oblasti lamel roštové komory se braly v úvahu všechny elementy dané pozice oblouku a poté z těchto x-elementů se vytvořila průměrná hodnoty. V oblasti kde jsou oblouky rozděleny na dva oblouky a dále se hodnoty na těchto obloucích shodovali, proto se uvádí pouze jedna hodnota pro oba oblouky, i pro oba oblouky s n-elementy.

Z tabulky 3.2.1. v příloze 1. jsou vyneseny průběhy pro jednotlivé veličiny v závislosti na pozici oblouku.

$\mu_r = 1$

V případě užití permeability o velikost jedna $\mu_r = 1$ se indukce na celém objemu oblouku pohybuje v rozmezí od 1,3T do 1,8T, viz obr 3.2.1. v příloze 1. přičemž největší hodnoty z tohoto rozsahu jsou v pozici 8 o hodnotě 1,67T, kdy se oblouk nachází o pozici výše při rozdělení prostředním opalovacím vývodem komory, další z nejvyšších hodnot se nachází v pozici 14 o hodnotě 1,8T, jenž je pozice kdy se oblouk nachází na 3 řadě žebrek komory.

Průměrná hodnota magnetické indukce na objemu oblouku viz obr 3.2.2. v příloze 1. pro případ $\mu_r = 1$ má proměnlivý charakter takřka každou hodnotou a to v rozmezí hodnot mezi $1E+6$ až $1,57E+6 \text{ A/m}$. Z pozice oblouk 12 je znatelný nárůst intenzity až do pozice 14, kde se nachází největší hodnota intenzity o velikosti $1,57E+6 \text{ A/m}$, od pozice 14 intenzita klesá do pozice 16 kde se nachází nejmenší hodnota intenzity magnetického pole a to o hodnotě $1E+6 \text{ A/m}$ a poté narůstá.

Závislost proudové hustoty oblouku na jeho pozici v komoře viz obr 3.2.3. v příloze 1. se dá říci, že narůstá do pozice 16 na hodnotu $2,88E+9A/m^2$, jenž je největší hodnotu proudové hustoty ze všech pozic oblouku pro případ užití permeability $\mu_r = 1$. Proudová hustota se v oblouku pohybuje od $1,31E+9A/m^2$ až do hodnoty $2,88E+9A/m^2$.

$$\mu_r = 2,5$$

Závislost magnetické indukce na pozici oblouku pro permeabilitu $\mu_r = 2,5$ viz obr 3.2.1. v příloze 1. se v porovnání s magnetickou indukcí pro $\mu_r = 1$ dá interpretovat jako dvojnásobek až na výjimku hodnotou indukce v pozici 16, kdy hodnota podílu je jeden a půl násobek. Obdobnou dvojnásobná velikost magnetické indukce se vyznačuje i závislost maximálních hodnot magnetické indukce pro celý model zhášecí komory. Magnetická indukce a se pohybuje v rozmezí hodnot 2,3T až 4,4T. Kdy největší hodnota indukce se nachází v pozici 13 a nejnižší v pozici 16.

Z grafu obr 3.2.2. v příloze 1. kde se nachází závislost průměrná hodnota magnetické intenzity na oblouku jsou v rozmezí hodnoty $8,9E+5$ až $1,44E+6$ A/m patrné výkyvy hodnoty jako u případu použití permeability $\mu_r = 1$. Obdobně se zde nachází i nárůst intenzity od 12-té pozice až do pozice 14 na nejvyšší hodnotu $1,44E+6$ A/m, posléze následuje pokles až na pozici 16 s nejnižší hodnotou ze všech pozic o velikosti $1,44E+6$ A/m, dále pak intenzita narůstá.

Průběh průměrné proudové hustoty viz obr 3.2.3. v příloze 1. se vyznačuje zprvu slabším nárůstem do pozice 7, poté poklesem a pozvolným nárůstem na maximální hodnotu $2,4E+9$ A/m² v pozici 14, následuje pokles na hodnotu $1,87E+9$ A/ m² v 15-té pozici a opětovný nárůst do pozice 15 na hodnotu $2,3E+9$ A/ m². Rozmezí průměrné proudové hustoty na oblouku se pohybuje mezi $1,29$ E+9 A/ m² a $2,4$ E+9 A/ m².

BH charakteristika

Magnetická indukce na oblouku v případě aplikaci nelinearity materiálu mírně proměnlivá v rozmezí od 1,37T do 1,93T. Nejzřetelnější velké hodnoty jsou v pozici 8 hodnotou 1,82T a pozici 14 hodnotou 1,93T, která je zároveň největší hodnotu indukce ze všech pozic oblouku viz obr 3.2.1. v příloze 1..

Intenzita na oblouku má proměnlivé hodnoty téměř střídavě s pozicí oblouk a to v rozmezí od $1E+6$ A/m do $1,47E+6A/m$ viz obr 3.2.2. v příloze 1. Kdy nejvyšší hodnota Intenzity magnetického pole oblouku se projevuje v pozici 8, kdy se oblouk rozdělil na dva oblouky a postupuje dále na lamely komory .

Z průběhu proudové hustoty na oblouku viz obr 3.2.3. v příloze 1. jsou patrné tři větší hodnoty a to v pozicích 5,6 a 15. Pozice pátého výskytu oblouku byla hodnota $1,86E+9$ A/m² překvapivě vysoká na tuto pozici oblouku. Hodnota proudové hustoty naroste opět v pozici 8 na hodnotu $1,77$ E+9

A/m^2 a poté v pozici 15 na hodnotu $1,93E+9 A/m^2$ za níž poklesne. Proudová hustota se pohybovala mezi hranicemi $1,22 E+9 A/m^2$ a $1,93 E+9 A/m^2$.

Průběhy pro všechny tři případy ($\mu_r = 1$, $\mu_r = 2,5$ a BH charakteristika) byly zde vyneseny pro snadnější porovnání do jednoho průběhu, přesnější průběhy jednotlivých hodnoty budou uvedeny v příloze nebo na přiloženém záznamovém médiu.

3.3. Grafické porovnání modelů

Z hlediska objemnosti výstupních dat, jsou zvolena pro porovnání tři případy pozice oblouku. Pozice oblouku se zvolily, taky aby se každý nacházel v různé části komory a to vzhledem ke změně topologie oblouku. První pozice oblouku se nachází na opalovacích kontaktech, prakticky nad kontakty stejnosměrného vypínače. Následující vybraný případ výskytu oblouku, budeme-li dvojici oblouků uvažovat jako jednu pozici oblouk, interpretuje situaci kdy se oblouk jdoucí po opalovacích kontaktech rozdělí za pomoci prostředního opalovacího vývodu komory na dva symetricky stejné oblouky na opalovacích vývodech v komoře. Pro třetí případ byl zvolena situace, kdy se oblouk rozdělil mezi lamely zhášecí komory, upřesním-li, mezi deset lamel a opalovací vývody zhášecí komory. Grafické porovnání v sobě nezahrnuje rozložení sil.

Pozice 3

Na obrázcích 3.3.1. 3.3.3. a 3.3.3. v příloze 1. se nachází grafické znázornění rozložením magnetické indukce na modelu kdy se oblouk vyskytuje v pozici 3. Všechny tři případy se vyznačují hodnotou magnetické indukce podél průtoku elektrického proudu, v lamelách zhášecí komory se indukce neprojevuje. Mezi obr 3.3.1 a 3.3.2 v příloha 1. je zřejmý již dříve zmiňovaný dvojnásobný rozdíl v hodnotě magnetické indukce.

Následující obrázky 3.3.4., 3.3.5. a 3.3.6. z přílohy 1. jsou interpretací rozložení intenzity magnetického pole na modelu (pozice 3). Z grafického výstupu na obrázcích 3.3.5. a 3.3.6. příloha 1. jen možné sledovat že rozložení intenzity magnetické pole v modelu je takřka totožné.

Jako poslední jsou vloženy grafické znázornění rozložení proudové hustoty na modelu, viz příloh 1. obr. 3.3.6., 3.3.7. a 3.3.8.. Rozložení proudové hustoty není realizováno za pomoci souvislého pole s barevnou škálou jimž by byla přiřazena daná hodnota, ale realizuje se šipkami směřujícími ve směru toku proudu. Šipky jsou barevně značeny, každé barvě se pak dle barvy přiřazuje dané rozmezí hodnot. Na obrázcích 3.3.7. a 3.3.8. v příloze 1. je možno vyzorovat velkou podobnost, rozdíly těchto hodnot rozložení proudové hustoty jsou minimální.

Pozice 7

Jako druhé grafické vyjádření byla zvolena pozice 7. Kdy oblouk přešel z opalovacích kontaktů na opalovací vývody komory kde se rozdělil na dva symetrické oblouky za pomoci opalovacího vývodu uprostřed zhášecí komory.

Znázornění magnetické indukce na modelu je k dispozici v příloze 1. na obrázcích 3.3.10., 3.3.11. a 3.3.12.. Obdobně jako u předchozích případů je patrné, že magnetická indukce v modelu pro případ užití permeability $\mu_r = 2,5$ (obr. 3.3.11. příloha 1.) se liší oproti případu rozložení magnetické indukce v modelu s permeabilitou $\mu_r = 1$ téměř více jak dvojnásobně. V pozici 7 již lze pozorovat rozložení magnetické indukce i v prostředním opalovacím vývodu komory, kterým jsou oblouky vzájemně propojeny. Místo kde jsou oblouky spojeny na prostředním opalovacím vývodu má v místě spoje docela vysokou hodnotu indukce. Kupříkladu pro aplikace nelinearity materiálu se tato hodnota pohybuje cca okolo 2T (BH charakteristika) viz příloha 1. obr 3.3:12. V případě aplikace nelinearity materiálu viz příloha 1. obr. 3.3.12. se vyskytuje mírná indukce u prostředního opalovacího vývodu komory a to v okolí druhého záhybu u lamel roštu komory. Obdobně jako u prostředního opalovacího vývodu v komoře se projevuje mírná indukce i v okrajových opalovacích vývodech komory taktéž v posledním ohybu vývodů.

Obrázky 3.3.13., 3.3.14. a 3.3.15. v příloze 1. jsou znázorněním intenzity magnetického pole v modelu. Obdobně jako u indukce, je možno vidět rozložení intenzity v prostředním opalovacím vývodu v komory, který jsou oblouky spojeny. Pro případ užití BH charakteristiky viz příloha 1. obr. 3.3.15. se hodnoty indukce pohybuje cca okolo $5,5E+5$ A/m. Intenzita v modelu se pro všechny tři případy dá popsat jako dosti podobná, rozdíly intenzity mezi těmito třemi případy jsou minimální. V zmíněných třech případech, pro pozici 7 bylo vyzorovat, že intenzita na lamelách roštu komory je ve srovnání s například s proudovodnou dráhou zanedbatelně malá.

Rozložení proudové hustoty je vyobrazeno v příloze 1. na obrázcích 3.3.16., 3.3.17. a 3.3.18.. Proudová hustota je nejzřetelnější na obloucích, kde by se dala posoudit proudová hustota v modelu s BH charakteristikou jako nejmenší ze všech tří případů a pro případy užití permitivit jen minimálně rozdílná. Největší proudová hustota se vyznačuje na prostředním vývodu v komoře, jimž jsou oblouky spojeny. Pro užití BH charakteristiky viz. příloha 1. obr. 3.3:18. se prostřední vývod, kde se spojují oblouky vyznačuje jako místo s největší proudovou hustotou v celém modelu, proudová hustota zde dosahuje až na hodnotu maxima $3,297A/m^2$. Pro porovnání na oblouků viz příloha 1. obr. 3:3.18 se na obloucích vyskytuje proudová hustota o hodnotě cca $1,22 A/m^2$.

Pozice 15

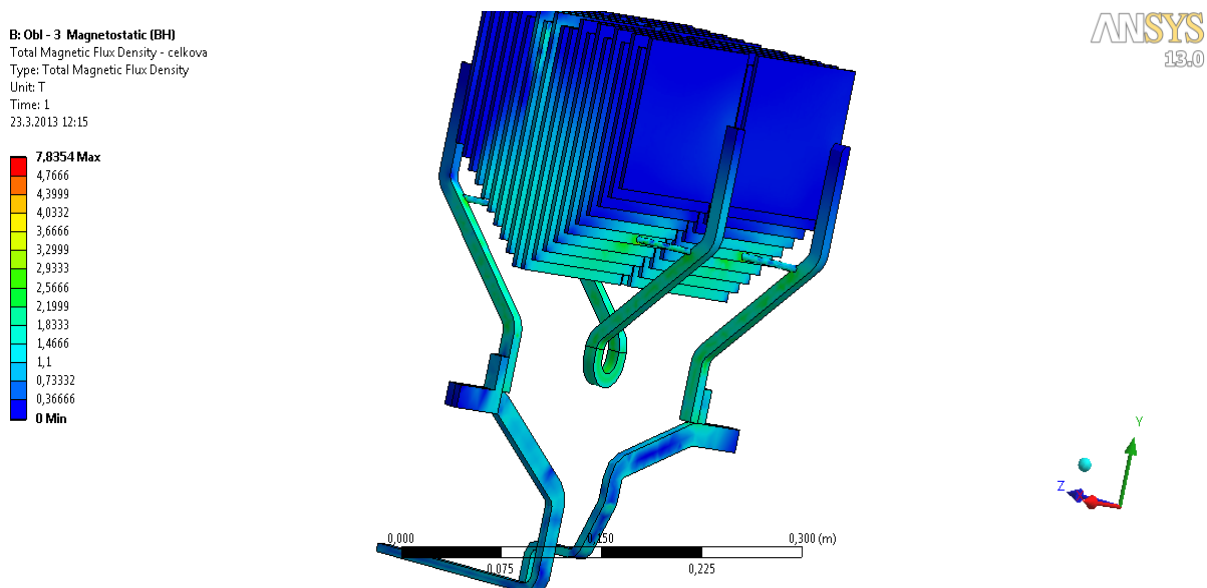
Jako třetí variantu příkladu pro ukázkou modelu s obloukem byla zvolena pozice 15, kdy se oblouk nachází na lamelách roštu komory. Protože, se oblouk v pozici 15 nachází již v komoře, tak jsou pro lepší přehlednost z hlediska grafického rozložení veličin uvedeny i pohledy z vrchu. Pohled z vrchu nabízí lepší náhled na oba oblouky v roštu komory zároveň.

Pozice 15 oblouku byla již dříve zmíněna z hlediska nevhodné sítě a tím i lokálního místa s extrémním počtem elementů viz obr. 3.1.1.. V případě pozice 15 se sešlo více komplikací najednou. Z prvního pohledu se místa s lokálními extrémy tedy se zhuštěnou sítí vyskytují mezi lamelami roštu zhášecí komory, tedy jsou zde rozhraní dvou odlišných prostředí, materiálu z něhož jsou lamely tvořeny a vzduchového prostředí nejen obklopující model, ale i vyplňující objemy mezi jednotlivými lamelami roštu. Limitování z hlediska vzorkování výpočetní sítě v oblasti mezi-lamelového prostoru se vzduchem má za následek generování výpočetní sítě dle programového algoritmu. Změnou atributů elementů vzduchového prostředí z ohledem na zlepšení sítě mezi-lamelového prostoru by mělo za následek prudké zvýšení počtu elementů a sním i přímo úměrně nárůst výpočetního času. Další problém e vyskytuje z hlediska přechodu více objemů z různými materiálovými vlastnostmi, kdy jsou zde spojeny lamely roštu, n-element oblouk a vzduchové prostředí mezi lamelového prostoru. Určitou nezanedbatelnou roli z hlediska lokálního extrému hraje i ostrost tvarů jednotlivých geometrických objemů k sobě spojených a ostrý úhel který svírá element oblouk s lamelou roštu. Nevhodná síť jenž byla původcem míst s lokálních extrémů by se mohla vylepšit zlepšením výpočetní sítě z hlediska velikosti elementů, což v našem případě bylo limitováno hardwarovým vybavením PC pracoviště a časem. Lokální extrémy jsou možné najít na obrázcích v pohledu z vrchu, viz. obr. níže.

Magnetickou indukci rozloženou na modelu znázorňují obrázky 3.3.19. až 3.3.24 v příloze 1., přičemž první (3.3.19.,3.3.20. a 3.3.21. příloha 1.) jsou pohledy ze předu, na nich je viditelná pouze část oblouku a byla zde vložena pro znázornění rozložení magnetické indukce na opalovacích vývodech a ostatních částech modelu. Lepší náhled na oblouky v rostech se nachází na obrázcích (3.3.22., 3.3.23. a 3.3.24. příloha 1.) jsou zde patrnější rozložení indukce po celých délkách oblouků, ale i místa s lokálními extrémy. Opět jsou patrné dvojnásobné rozdíly hodnot na modelu mezi případy užití permeability $\mu_r = 1$ a $\mu_r = 2,5$. Pro všechny případy výskytu oblouku 15 se projevuje velká indukce v krajních opalovacích vývodech komory, nejvíce ovšem se projevuje velká hodnota indukce na prostředním opalovacím vývodu, na němž se oblouky propojují, v případě permeability $\mu_r = 1$ nabývá hodnoty 0,7T.. Dále je již patná i indukce na lamelách roštu v okolí oblouku se však projevuje nejvíce. Neznatelnější rozložení magnetické indukce se projevuje v případě užití BH charakteristiky. V opalovacích vývodech a prostředním opalovacím vývodu se magnetická indukce pohybuje v rozmezí od 1,4T a ž do 2,5T. Lze tedy říci, že všechny opalovací vývody v komoře při použití BH charakteristiky jsou značně přesycené.

U případu užití BH charakteristiky se magnetická indukce v lamelách komory projevuje znatelně a to v rozmezí 0,3T až 2,8T, kdy v okolí oblouku se hodnota pohybuje cca okolo 1,5T viz. obr. 3.3:25..

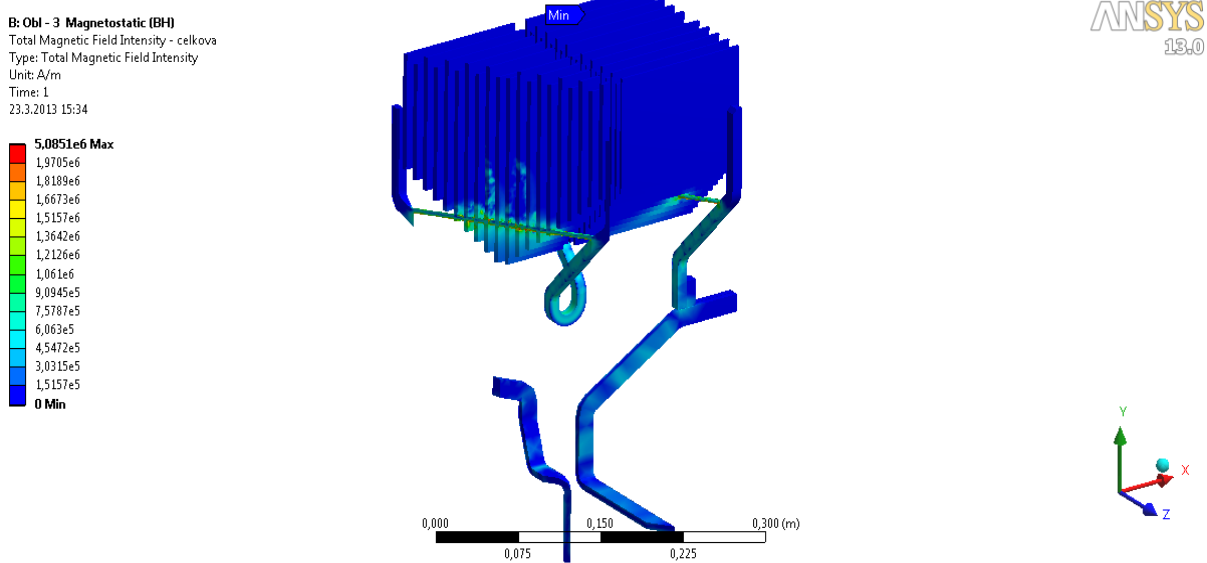
U zaoblení prostředního opalovacího vývodu v komoře se projevuje rozložení magnetické indukce ve směru od prostřed s hodnotou 2,5T ke kraji na hodnotu 1,5T. Minima magnetické indukce v celém modelu se nacházejí v nejvrchnějších částích lamel.



Obr. 3.3.25. - Rozložení magnetické indukce pozice 15, pro lepší pohled na rozložení magnetické indukce na lamelách roštu a opalovacích vývodech komory (Pozice 15, BH charakteristika)

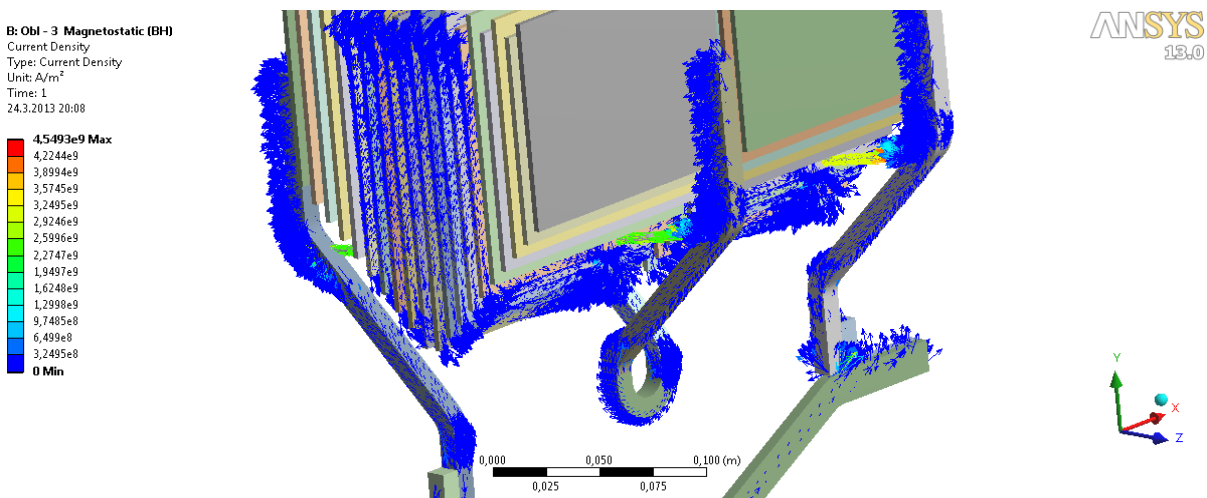
Intenzita magnetického pole rozkládající se na modelu je uvedena na obrázcích 3.3:26. až 3.3.31. uvedených v příloze 1. Opětovně jako u rozložení indukce se rozložení magnetické intenzity pole na modelu nachází ze dvou stran a to z předního pohledu, kdy je v modelu viditelná jenom část oblouku a vrchního pohledu kdy jsou viditelné oba oblouky na lamelách. Ve všech případech je viditelná magnetická intenzita na opalovacích vývodech komory až po oblouk a dále na opalovacích kontaktech se intenzita rapidně zmenšuje. Kolem oblouku vyskytujícího se na lamelách oblouk se v lamelách roštu projevuje zvýšená intenzita. Intenzita magnetického pole na oblouku ve všech třech případech přesahuje hodnotu $1E+6$ A/m. Také se projevuje větší intenzita v prostředním opalovacím vývodu komory a to téměř vždy se větší intenzita magnetického pole soustředí u vnitřní strany průměru záhybu, posléze má zmenšující charakter projevující se úměrně ke vnější straně záhybu prostředního opalovacího vývodu. Nejvíce se intenzita projevuje ve vnitřní části objemů, se vzdáleností ke hranám objemů mírně klesá. Nejlépe zřetelná intenzita se dá pozorovat na modelu s BH charakteristikou, v tomto případě se kupříkladu oblouk vyznačuje ve spodní straně větší intenzitou magnetického pole než-li na vrchní části oblouku. Tento princip který se projevil na oblouku má za

následek obdobně u lamel zvětšení magnetické intenzity v se spodní části lamel viz příloha 1. obr 3.3.32..



Obr. 3.3.32. - Rozložení magnetické intenzity v řezu modelu skrz oblouk v modelu komory (Pozice 15, BH charakteristika)

Model se znázorněním proudové hustoty se nachází v příloze 1. na obrázcích 3.3.33. až 3.3.38.. Jsou zde uvedeny i pohledy z vrchu, pro zřetelnější rozložení proudové hustoty na obloucích. Největší proudová hustota na oblouku ze všech tří případů se nachází na oblouk v případě modelu s BH charakteristikou dosahující hodnoty $1,93E+9 \text{ A/m}^2$, tato hodnota je nejvyšší ze všech pozic oblouku pro model s BH charakteristikou. U případu užití BH charakteristiky je nejpatrnější rozložení proudové hustoty opět jako v předchozích případech se vyznačuje svou výrazností ze všech tří případů.



Obr. 3.3.33. Zvýraznění proudové hustoty se stejnou velikostí šipek (pozice 15, BH charakteristika)

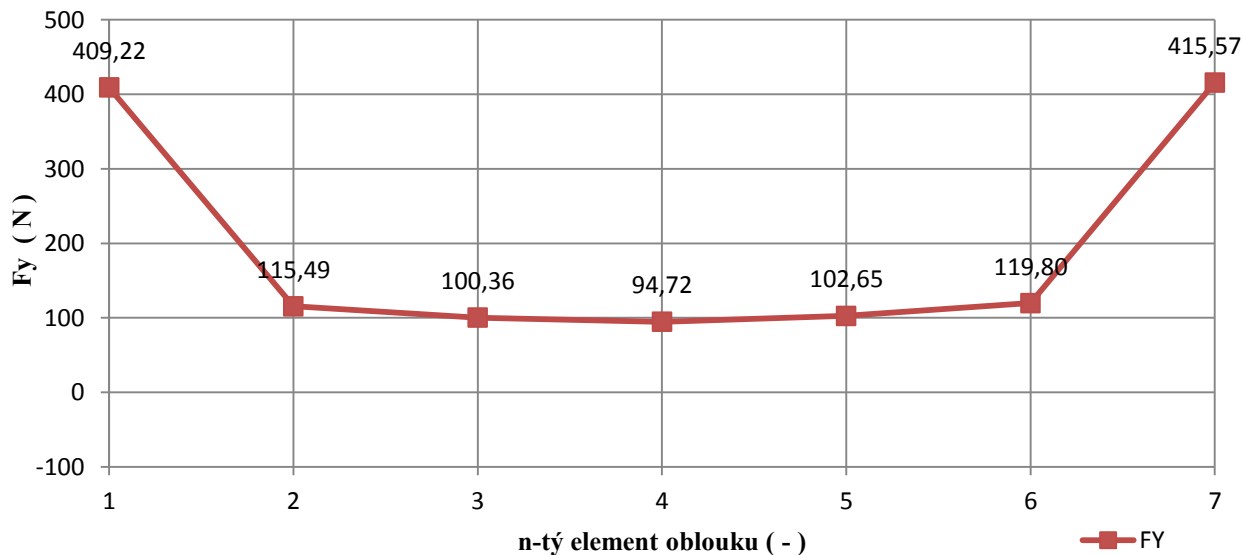
Při bližším pohledu se proudová hustota nad obloukem v lamelě snižuje s výškou nad obloukem. Pro lepší interpretaci se zvolí stejná velikost šípek představující velikost hustoty proudového pole, dva krát se zvětší velikost obr 3.3.33.. Na obr. 3.3:33. se výrazně projevuje směr proudové hustoty z hlediska průtoku proudu. Viditelně se projevuje i směr proudové hustoty v lamelách roštu jenž na pravé straně, tedy po směru průtoku proudu vyznačuje směrem nad komoru a v levé straně lamel se směřuje na levou stranu.

3.4. Silové poměry elektrického oblouku v komoře

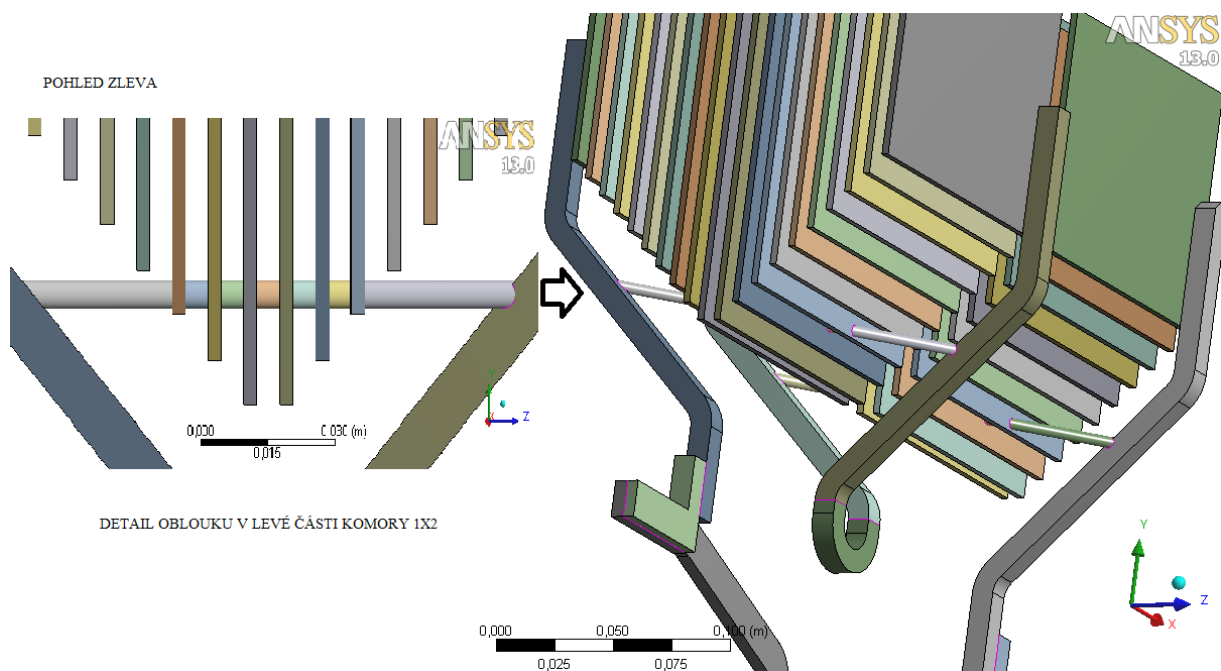
Za pomoci programu Workbench byly vypočteny silové účinky působící na jednotlivé oblouky popřípadě jeho část. Tyto silové poměry jsou k dispozici viz příloha 2 pro případ kdy byla užitá relativní permeability $\mu_r = 1$, dále pro permeabilitu $\mu_r = 2,5$ jsou k dispozici viz příloha 3 a pro modely, kde byla aplikována nelinearita materiálu (BH charakteristika) jsou uvedeny viz příloha 4.

Z hlediska objemnosti vypočtených dat, byl vybrán jeden příklad pro vhodnější znázornění vypočtených sil. Jedná se tedy o vybraný případ kdy se oblouk vyskytuje v pozici 14, tedy druhá poloha oblouku na lamelách roštu, kdy oblouk prochází přes 6 lamel roštu viz obr. 3:4.2. v příloze 1. Pro nejvhodnější interpretaci sil budeme uvažovat případ užití nelinearity materiálu (BH charakteristiky), viz příloha 4 - tabulka pozice 14. Jednotlivé silové účinky částí oblouku byly demonstrovány za pomoci výpočetního programu Matlab. Pro demonstraci byl vybrán oblouk z levé části komory a pro každou část levého oblouku byl znázorněn za pomoci Matlabu vektor síly, znázorňující následný pohyb daného elementu oblouku viz příloha 1. Obr 3.4.1.. Předpis ve tvaru m-file pro program Matlab se uvádí v příloze 1. jako Předpis 3.4.5.. Vektory sil jsou znázorněny jedním směrem pro lepší přehled jejich velikosti, pro přesný pohyb jednotlivých elementů oblouku v komoře je zapotřebí brát na zřetel, že v ose Y se nachází výška modelu, tedy i v ose Y se bude oblouk pohybovat směrem do komory vzhůru viz příloha 1. obr 2.4.2.. Z vyjádřených vektorů jednotlivých částí levého oblouk je patrné, že síla v ose Y je tedy vždy největší, tato velikost má za následek pohybu oblouku v ose Y. Pro názornější přehled sil působících na oblouk v pozici 14 viz detail levého oblouku obr 3.4.4., byla vynesena závislost sil v ose Y působících na jednotlivé elementy oblouku v závislosti na pořadí elementů oblouku po celé jeho délce viz obr. 3.4.3. Z průběhu obr. 3.4.3. je patrné, že největší silový účinek bude vyvíjen na krajní elementy 1-L a 7-L oblouku a to přes u opalovacích vývodů komory a to přes 400N, dále se pak budou síly s elementy zmenšovat až k prostřednímu elementu mezi lamelami roštu 4-L kde bude síla nejmenší. U prostředního elementu oblouku v jeho délce 4-L se síla projevuje velikostí 94,72N

Rozložení velikosti síly působící ve směru osy Y na jednotlivé elementy oblouku v jeho délce (BH, Pozice 14 - A, na levém oblouku)



Obr. 3.4.3. - Rozložení sil na jednotlivé elementy oblouk v ose Y po délce oblouku
Pozice 14, užití BH charakteristiky



Obr. 3.4.4. - Detail oblouku z levé části komory pozice 14 včetně pohledu zleva

4. Závěr

Obsah práce byl zaměřen na modelování zhášecí komory stejnosměrného vypínače při vypínání elektrického oblouku. Ze současné nabídky stejnosměrných vypínačů byla vybrána typová řada stejnosměrných vypínačů N-Rapid, vyráběná závodem Postřelmov pro Slovácké strojírny, a.s., konkrétně zhášecí komora typu 1X2. Model zhášecí komory typu 1X2 se z konstrukčního hlediska řešil v CAD systému Solidworks a výpočty byly realizovány metodou konečných prvků ve výpočetním prostředí Ansys Workbench.

Snahou diplomové práce bylo zjištění intenzity magnetického pole, proudové hustoty a magnetické indukce ve zhášecí komoře za přítomnosti oblouku a demonstrovat tím aplikaci moderních výpočetních systému pro možnost grafického rozložení hodnot ve zhášecí komoře, aby bylo možné získat vizuální představu o velikosti již výše zmíněných hodnot. V neposlední řadě se má snaha zaměřila i na výpočet silových poměrů působících na elektrický oblouk, abych mohl zjistit, jak se bude elektrický oblouk ve zhášecí komoře tvarovat.

Byl vytvořen model zhášecí komory s více oblouky tak, aby byla dodržena posloupnost postupu oblouku do komory, včetně zachování základního dělení a rozdělní oblouku. Z těchto oblouků bylo vybráno 18 oblouků, jenž byly posléze namodelovány tak, že bylo vytvořeno 18 modelů zhášecí komory pokaždé s jinou pozicí oblouku. Pro každou jednotlivou pozici elektrického oblouku byly vypočteny požadované parametry magnetické indukce, intenzity magnetického pole a proudové hustoty, a to jak pro daný oblouk, tak pro celý model zhášecí komory. Pro elektrický oblouk ve zhášecí komoře jsou také vypočteny silové poměry, které na oblouk působí. Výpočet se realizoval pro tři případy odlišných vlastností materiálu, z něhož se skládá proudovodná dráha a lamely roštu komory. První případ se realizoval nastavením poměrné permeability na hodnotu jedna, v dalším případě interpretujícím přesycení materiálu byla poměrná permeabilita nastavena na hodnotu dva a půl. Pro třetí případ, byla daným objemům přiřazena BH charakteristika litiny, která svými vlastnostmi byla nejideálnějším kompromisem mezi použitými materiály ve skutečné komoře

Hodnoty magnetické indukce, intenzity magnetického pole a proudové hustoty byly pro všechny tři případy různých materiálových vlastností vyneseny v závislosti na jednotlivých pozicích oblouku (viz příloha 1). Veškeré hodnoty pro vnesené závislosti jsou k dispozici shrnuty v tabulkách 3.1.1 a 3.2.1 příloha 1.. Jako další jsou vypočteny silové poměry působící na elektrický oblouk ve zhášecí komoře. Pro všechny tři případy a pro veškeré namodelované pozice elektrického oblouku jsou zaznamenány vypočtené silové poměry viz příloha 2. ,3. a 4.. Každá jednotlivá příloha je věnována konkrétní materiálové vlastnosti. Z vypočtených silových poměrů je patrné, že oblouk se formuje dle tvaru a uspořádání proudovodné dráhy, uprostřed oblouku na něj bude působit největší síla a oblouk se bude formovat do tvaru oblouku (čtvrt kruhu, vypouklý tvar směrem nahoru), kdy bude částečně

přítahován lamelami roštu. V roštu se bude oblouk tvarovat naopak, bude se tedy prohýbat směrem dolů, a na krajní elementy oblouku budou působit největší síly (viz příklad oblouku v pozici 14 obr. 3.4.3.) a na prostřední část elektrického oblouku bude silový účinek nejmenší.

Jako přínos mé práce považuji možnost viditelného grafického rozložení magnetické indukce a intenzity magnetického pole v celém modelu, dále i znázorněnou proudovou hustotu v modelu její absolutní hodnotu a velikost viz příklad obr. 3.3.33.. V neposlední řadě považuji za přínos výpočet silových poměrů, ze kterého lze určit kupříkladu určit, tvar oblouku, zhášecí výšku, možné tvarování oblouku, případné smyčky a tvarové rozložení jednotlivých částí oblouku, jak mezi vodivými tak i izolačními lamelami.

Budoucí možný rozvoj mé práce lze navázat v první řadě vhodnějším zjemněním výpočetní sítě, zejména hrubostí síťování v oblasti roštu viz obr 2.6.7. V oblasti roštu jsou obsaženy úzké objemy jak lamel, tak prostředí mezi lamelami, jenž by bylo vhodné hustěji vysítovat. Dále by bylo možné zlepšení tvaru oblouku. Kupříkladu namodelování každého následovného tvarování oblouku. Problematika tvarování oblouku se nejlépe dá řešit v softwarovém prostředí s názvem Maxwell. Veškeré modely a výpočty, které byly provedeny, byly především limitovány ze strany hardwarového vybavení počítačového pracoviště. Proto veškeré komplikace, či limitování hardwarovým vybavením, nehledě na výpočtový čas, by bylo nejvhodnější řešit za pomoci superpočítače.

5. Seznam použité literatura

1. Cigánek, L.: *Elektrické přístroje spínací, ochranné a řídicí*, SNTL, 1956, vydání třetí, počet stran 392, Typové číslo L25-C3-4-II
2. Havelka, O.: *Stavba elektrických přístrojů I*, VUT Brno – Fakulta elektrotechnická, 1984, vydání první, počet stran 262
3. Havelka, O.: *Elektrické přístroje I*, SNTL, Praha 1974, číslo publikace 412-33349, vydání první, počet stran 318
4. Helštýn, D., Kačor, P., Hytka, Z.: *Elektrické přístroje spínací, ochranné a jistící*, VŠB – TU Ostrava, 2003, ISBN 80-248-0315-1, počet stran 216
5. BUL B. K. a kol.: *Elektrické přístroje – Základy teorie*, Přeložil Suchánek V., SNTL, Praha 1977, Typové číslo L25-B3-V-31f/52220, vydání první, počet stran 544
6. Král, J.: *Technologie výroby elektrických přístrojů*, VUT Brno – Fakulta elektrotechnická, 1984, počet stran 195
7. Bauer K., List V. a kol.: *Elektrické přístroje – Díl II*, Technický průvodce, Elektrotechnika XV, SNTL, Praha 1965, Typové číslo L25-E1-IV-31/5740/I, vydání první, počet stran 320
8. Gross B., Havelka O.: *Elektrické přístroje II*, VUT Brno – Fakulta elektrotechnická, 1978, skriptum, počet stran 273
9. Informace o produktech firmy ANSYS Inc. (13.2013 16:43)
<https://www.svsfem.cz/content/produkty-firmy-ansys-inc>
10. Řešené úlohy metodou konečných prvků v programovém systému ANSYS Workbench 12.1. (17. 4. 2013 v 11:47)
http://www.umth.fme.vutbr.cz/MKP/ANSYS_WB12.htm
11. Laboratoř Modelování Fyzikálních polí kat.Elektroenergetiky (25.3.2013 v 9.41)
<http://lmfp.vsb.cz/navody/>
12. Ansys Workbench Help

6. Seznam příloh

- Příloha 1. Kompletní sestava komory 1X2
- Model proudovodné dráhy komory se všemi oblouky
- Tabulka maximálních hodnot celého modelu
- Grafy pro maximální hodnoty celého modelu
- Tabulka hodnoty pro objem oblouku v modelu
- Grafy pro hodnoty oblouku
- Grafické výstupy z Workbench pro vybrané případy pozice oblouku
- Pozice 3 výskytu oblouku
- Pozice 7 výskytu oblouku
- Pozice 15 výskytu oblouku
- Silové poměry elektrického oblouku v komoře - vektory sil
- M-File - předpis pro vyobrazení vektorů
- Příloha 2. Tabulky hodnot sil působící na oblouk pro všechny pozice pro případ užití permeability $\mu_r = 1$
- Příloha 3. Tabulky hodnot sil působící na oblouk pro všechny pozice pro případ užití permeability $\mu_r = 2,5$
- Příloha 4. Tabulky hodnot sil působící na oblouk pro všechny pozice pro případ užití permeability BH charakteristiky
- Příloha na DVD Grafické výstupy vybraných pozic oblouku, včetně detailů