

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Model rotorové tyče asynchronního stroje

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na rozptylové reaktance, činné odpory a modely několika typů a variant rotorových tyčí asynchronního stroje s kotvou na krátko

Klíčová slova

rozptylová reaktance, činný odpor, skinefekt, hloubka vniku, model ve FEMMu, proudová hustota, rotorové tyče, jmenovitý stav, rozběhový stav

Abstract

This bachelor thesis is focused on the leakage reactance, resistance and models of several types of rotor bars of squirrel – cage inductions machine.

Key words

leakage reactance, effective resistance, skin effect, skin depth, model in FEMM, current density, rotor bars, nominal condition, starting state

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 8.7.2013

Ladislav Bečvář

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval konsultantovi mé bakalářské práce Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. za jeho velmi vstřícný přístup, konstruktivní připomínky, podněty a profesionální rady. Dále bych chtěl využít tuto stránku k poděkování panu doc. Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D. za jeho vstřícný přístup při mém seznamování se s programem FEMM.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 STATOR ASYNCHRONNÍHO STROJE S KOTVOU NA KRÁTKO	10
2 ROTOR ASYNCHRONNÍHO STROJE S KOTVOU NA KRÁTKO	10
2.1 KONSTRUKCE	11
2.2 MATERIÁLY	11
2.3 ZTRÁTY	12
3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	12
4 SPECIÁLNÍ KOTVY ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	13
4.1 VÍROVÁ KOTVA	14
4.1.1 FEMM modelace rozptylové reaktance vírové rotorové tyče.....	14
4.1.2 FEMM modelace činného odporu vírové rotorové tyče.....	20
4.2 DVOJITÁ (BOUCHERATOVA) KOTVA	26
4.2.1 FEMM modelace rozptylové reaktance dvojité rotorové tyče.....	28
4.2.2 FEMM modelace činného odporu dvojité rotorové tyče.....	30
ZÁVĚR	33
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	36

Seznam symbolů a zkratek

a	[mm]	Hloubka vniku
$f_1; f_2$	[Hz]	Statorová a rotorová frekvence
G	[S]	Vodivost
$I_2; I_3$	[A]	Proudy rotorových tyčí
$I_{2\text{ }Cu}; I_{2\text{ }mos}$	[A]	Rotorový proud pro měděnou a mosaznou tyč
L_σ	[H]	Rozptylová indukčnost
l	[m]	délka tyče
M	[Nm]	Moment
P_m	[W]	Mechanický výkon
$\Delta P_{j\text{ }Cu}; \Delta P_{j\text{ }mos}$	[W]	Joulové ztráty v mědi a v mosazi
$R_2; R_3$	[Ω]	Činné odpory rotorových tyčí
$R_{2\text{ }Cu}; R_{2\text{ }mos}$	[Ω]	Činný odpor dvojité rotorové tyče pro měď a mosaz
R_{2e}	[Ω]	Ekvivalentní odpor dvojité rotorové tyče
S	[m^2]	Průřez
U_2	[V]	Rotorové napětí
W_m	[J]	Magnetická energie
$X_{2\sigma}; X_{3\sigma}$	[Ω]	Rozptylové reaktance rotorových tyčí
Z_e	[Ω]	Ekvivalentní impedance
Z_2	[Ω]	Rotorová impedance
γ	[$S \cdot m^{-1}$]	Měrná vodivost
μ	[$H \cdot m^{-1}$]	Permeabilita
ω	[$rad \cdot s^{-1}$]	Úhlová rychlost
ρ	[Ωm]	Měrný elektrický odpor

Úvod

Bakalářská práce se zabývá hodnocením několika variant rotorových tyčí asynchronního stroje s kotvou na krátko. Měla by postupně odhalovat vlastnosti jednotlivých typů tyčí, které následně ovlivňují vlastnosti celého stroje ve dvou zásadních provozních stavech. Je to stav rozběhový a jmenovitý. Práce je složena ze 4 základních bodů. První bod stručně popisuje stator a připomíná jeho funkci a vliv na vlastnosti stroje, se kterými ovšem v modelacích nebude počítáno. Dále v druhém bodě následuje podrobnější popis rotoru. V tomto bodě jsme postupně seznámeni s konstrukcí, materiálem a ztrátami. Tyto odstavce budou využívány později v bodě 4. Následuje zběžný popis metody konečných prvků v bodě 3, pro numerický výpočet elektromagnetického pole. Tento bod nás posunul k poslednímu a rozsáhlému bodu 4, který obsahuje výčet základních tvarů a polohy vírových rotorových tyčí a se zadáním jednoho typu vírové tyče určené k analýze. Dále se zabývá rozptylovou reaktancí, která je postupně zkoumána v závislosti na frekvenci rotorového proudu, rozměru a materiálu. Dále je u vírové tyče zkoumán činný odpor, také z hlediska frekvence, rozměrů a materiálu. V dalším odstavci tohoto bodu je provedena modelace dvou typů dvojité rotorové tyče, kde je použita stejná kombinace různých materiálů pro oba typy tyče. Analýza řeší rozptylové reaktance a činné odpory, kdy u dvojité tyče je počítáno se dvěma materiály současně, což vyplývá z konstrukce dvojité rotorové tyče. Všechny údaje jsou zaneseny do přehledných tabulek a grafů a opatřeny komentářem, případně hodnocením. Veškeré výsledky jsou shrnuty v závěru do finální tabulky a pro lepší orientaci ve výsledcích je také z této tabulky vytvořen graf. Na obrázcích je vidět syčení železa ve jmenovitém a rozběhovém stavu okolo tyče, kde syčení zubů nad tyčí neodpovídá realitě, protože v kompletním a funkčním stroji se magnetický tok uzavírá přes vzduchovou mezeru a stator. Tento fakt není možné respektovat, protože se práce zabývá pouze jednou tyčí. Z tohoto důvodu nastává problém i s rozptylovými toky v okolí rotorové výseče, kde rozptyl mimo výseč není brán v úvahu, protože ve skutečném provedení zuby pokračují k další tyči. Na obrázcích je tedy pouze rotorová tyč a z každé strany $\frac{1}{2}$ zubu. Práce neobsahuje žádné přílohy. Výpočtové vztahy, modelace a výsledky v tabulkách jsou řazeny ke kapitolám dle příslušnosti z důvodu přehlednosti.

1 Stator asynchronního stroje s kotvou na krátko

Tato práce se zabývá modelací rotorových tyčí asynchronního stroje. Víme, že asynchronní stroj je složen z rotoru a statoru, kde rotor je součástí magnetického obvodu statoru a současně stator je součástí magnetického obvodu rotoru. Z toho plyne, že pokud bude při modelaci jedna součást chybět, nemohou být výsledky modelací realizované v této práci shodné s realitou. Proto uvedeme alespoň základní informace o statoru.

Stator se skládá z magnetického obvodu a primárního vinutí. Magnetický obvod je složen z plechů od sebe vzájemně izolovaných lakem nebo chemicky pro snížení ztrát v železe. Vinutí cívek je uloženo v drážkách magnetického obvodu, kde mezi železem a cívkou je drážková izolace. Vinutí cívek je rozloženo v drážkách statoru v jedné nebo dvou vrstvách jako koncentrické nebo postupné. Cívky jsou po obvodu statoru rozloženy v třífázovém vinutí po 120° pro vytvoření točivého magnetického pole a dle požadovaných otáček je vinutí uspořádáno do jednoho nebo více pól párů. Do takto uspořádaného statoru je otočně uložen rotor[1].

2 Rotor asynchronního stroje s kotvou na krátko

V odborné literatuře se rotor nazývá „kotva“. Přes vzduchovou mezeru a kotvu se uzavírá magnetický tok vybuzený statorovým vinutím a tím ve vinutí kotvy indukuje napětí. Vinutí je spojeno na krátko, proto protéká proud, který zajišťuje magnetické pole kotvy, uzavírající se opět přes vzduchovou mezeru a stator. Statorový a rotorový obvod je oddělen již zmiňovanou vzduchovou mezerou, která bývá 0,2 až 2 mm. Konstrukteři se snaží mezeru navrhovat co nejmenší pro lepší účinník[1].

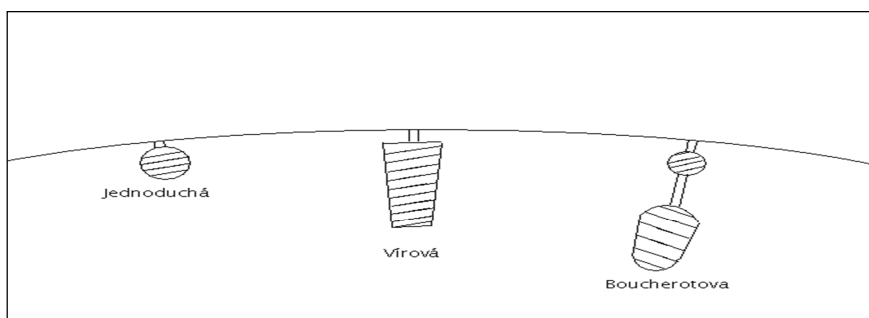
Z elektromagnetického hlediska by byla ideální mezera v řádu tisícín mm, ale musí se respektovat mechanické nepřesnosti způsobené například vibracemi nebo vůlí v ložiscích a výrobními tolerancemi. Rotor převádí elektrickou energii dodanou ze sítě do statoru na mechanický výkon vyjádřený vztahem (2-1).

$$P_m = M\omega \text{ [W]} \quad (2-1)$$

Rotor plní také chladicí funkci. Stroj se v důsledku Joulových ztrát zahřívá a je nutné zajistit chlazení. Pokud se stroj zahřívá na vyšší teplotu než je schopna snášet izolace vinutí, dojde k poškození a následnému vykratování vinutí a tím ke zničení stroje.

2.1 Konstrukce

Konstrukce rotoru s klecí na krátko je velice jednoduchá na výrobu a montáž. Tyto rotory jsou velice odolné a spolehlivé. Rotor se skládá z drážkovaného hřídele pro osazení svazku plechů samotného rotoru bez možnosti prokluzu. Z důvodu menších ztrát v železe se používají plechy tloušťky 0,35 mm. Pro výrobu rotorů se používají také silnější plechy, např. 0,5 mm. Tyto plechy jsou od sebe izolovány lakem nebo chemickou vrstvou. Jednotlivé plechy jsou vypalovány nebo vyseknuty raznicí, která současně vytvoří otvory pro chlazení a pro rotorové tyče. Rotorové tyče se umísťují k povrchu rotoru v provedení jednoduché, vírové nebo dvojité klece. Příklady tvaru a uspořádání rotorových tyčí jsou na obr. 2.1. Jak později uvidíme, tvar a uspořádání tyčí je velice důležité zejména pro velikost rozběhového proudu a záběrného momentu[1].



Obr. 2.1 Typy rotorových tyčí[1]

U dvojité klece jsou rozběhové tyče u povrchu rotoru a provozní tyče se umísťují hlouběji, směrem k ose rotoru. Všechny tyče jsou z obou stran spojeny kruhy do krátka na boku rotoru. Dvojitá klec má buďto dva kruhy z každé strany, jeden pro rozběhové a druhý pro běhové tyče nebo jeden společný kruh z každé strany.

2.2 Materiály

Materiály používané pro výrobu rotorů jsou feromagnetické a nemagnetické. Hřídel rotoru je vyráběna z plného feromagnetického materiálu dle průměru, délky a výkonu stroje. Rotorové plechy jsou vyrobeny z magneticky měkké ocele s přidaným křemíkem do struktury pro omezení ztrát vířivými proudy. Rotorové tyče jsou vyráběny z hliníku, mosazi, bronzu a mědi. Odlišná rezistivita materiálů je využita ve dvojité kleci, kde každá tyč je z jiného

materiálu. Pro výrobu rozběhové klece se používá materiál s vyšší rezistivitou (mosaz) a na běhovou klec materiál s nižší rezistivitou (měď).

2.3 Ztráty

Ztráty můžeme rozdělit na ztráty v železe a ztráty Joulovy. Ztráty v železe jsou způsobeny vířivými proudy a hysterezí. Hysterezní závisí na frekvenci a jsou úměrné velikosti plochy hysterezní smyčky. Pro potlačení těchto ztrát používáme magneticky měkké plechy v magnetickém obvodu. Ztráty vířivými proudy jsou závislé na f^2 . Pro omezení vířivých proudů přidáváme do struktury materiálu plechů křemík a dále se tyto rotorové plechy od sebe izolují.

Joulovy ztráty se také projevují v rotorových tyčích při průchodu proudem. Tyto ztráty jsou závislé na frekvenci, materiálu, délce a průřezu rotorové tyče.

3 Metoda konečných prvků

Pro modelaci rotorové tyče budeme používat FEMM pro numerický výpočet rozložení magnetického pole a proudové hustoty. Metoda konečných prvků je založena na aproximaci parciální diferenciální rovnice, kterou je vyjádřeno fyzikální pole, na jednodušší typ rovnice. Analyzované těleso nebo plocha se rozdělí na malé prvky, kde počet těchto prvků je konečný (konečný počet prvků). Prvky se nesmí překrývat a zároveň musí být pokrytá celá plocha. Krok prvku může být různě velký, ale obecně platí, že čím menší krok, tím větší můžeme očekávat přesnost výsledku. Dále platí, že čím menší zkreslení výsledku požadujeme, tím vyšší jsou nároky na hardware a i doba výpočtu se prodlouží. Každý prvek, ať je obdélníkový nebo trojúhelníkový, obsahuje neznámé řešení, které nahradíme aproximační funkcí ve tvaru (3-1) se třemi aproximačními koeficienty. Těchto koeficientů je tolik, kolik je uzlů. Abychom vyřešili koeficienty $\alpha_{1,2,3}$, musíme sestavit soustavu tří algebraických rovnic (3-2). Metoda generuje chyby (rezidua), jejichž existence a velikost se nechá dokázat dosažením výsledků do počátečních parciálních diferenciálních rovnic[4].

$$\phi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (3-1)$$

$$\phi_1 = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 y_1$$

$$\phi_2 = \alpha_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 y_2$$

$$\phi_3 = \alpha_1 + \alpha_2 x_3 + \alpha_3 y_3 \quad (3-2)$$

Rozdělení analýzy fyzikálního pole

1. Preprocessor - slouží k zadání materiálových vlastností, geometrie modelované konstrukce, okrajových podmínek, proudu nebo proudové hustoty, B-H charakteristiky. Pro naše modelace jsme zadávali měď, hliník, mosaz, železo a vzduch, použili pět geometrických variant, zadávali jednu okrajovou podmínku $A = 0$ kolem rotorové výseče, pracovali jsme se čtyřmi velikostmi proudu a pro všechny varianty použili stejnou B-H charakteristiku železa [5].
2. Procesor - pro uživatele je to spouštěcí ikona se symbolem ozubeného kola, ukrývající výše popsaný matematický model. Než je možné spustit samotný výpočet, je potřeba analyzovaný předmět pokrýt sítí s volitelnou hustotou [5].
3. Postprocessor - poskytuje řešení zadaného úkolu. Pro další práci je možné vyčíst parametry řešení jako je indukčnost, magnetická energie, odpor, intenzita magnetického pole, indukce, magnetický tok, atd. Zde je důležité výsledky zhodnotit a porovnat s reálnými možnostmi na základě znalostí a zkušeností řešitele. V naší práci jsme využili hodnoty magnetické energie, Joulových ztrát, magnetické indukce, proudové hustoty a pro kontrolu při změně rozměrů také obsah analyzované plochy [5].

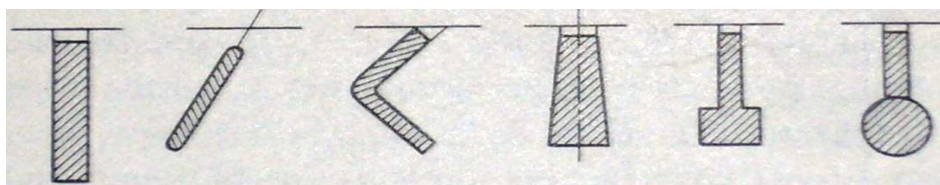
4 Speciální kotvy asynchronních strojů

Na obrázku 2.1 jsou vidět tři typy klecí nazývané speciální, kam patří vírová a dvojitá klec. Speciální klece jsou používány z důvodu úpravy především záběrného momentu u strojů, které se rozbíhají se zátěží na hřídeli. U kotvy do krátka není možné do jejího obvodu připojovat odpory, ale zvyšování a snižování odporu tyčí jsme schopni zajistit tvarem a materiálem při využití skinefektu, kde dochází k vytlačování rotorového proudu ke vzduchové mezeře na povrch tyčí. Skin efekt ovlivňuje hloubku vniku vyjádřenou vztahem (4-1) [1].

$$a = \sqrt[2]{\frac{2}{\omega \mu \gamma}} \quad [mm] \quad (4-1)$$

4.1 Vírová kotva

Vírová rotorová kotva má z geometrických důvodů při rozběhu vlastnosti podobné kroužkové kotvě s odporem v rotoru. Vírová tyč je úzká a hluboká a při působení skin efektu dochází k výrazné regulaci průřezu a tím ke změně odporu. Vírové tyče mají několik geometrických a prostorových variant, viz obr. 4.1. Důvodem pro používání velkého množství variant je zajištění menších / větších hodnot rozptylové reaktance a činného odporu. Modelací rotorové tyče ve FEMMu se soustředíme na zjištění hodnot rozptylové reaktance a činného odporu pro tři výšky tyče. Aby výsledky nebyly zkresleny, průřez zůstane stejný, při zachování stejného poměru horní a spodní strany tyče. Aby bylo vidět sycení železa, zachováme i zvolenou výseč rotoru, kterou jsme nastavili cca do 2 Tesla pro jmenovitou rotorovou frekvenci, abychom se přiblížili reálným podmínkám.



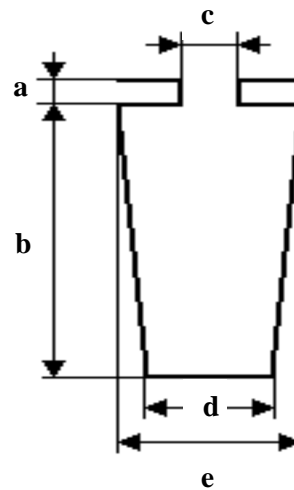
Obr. 4.1 Možné varianty vírových rotorových tyčí [3]

4.1.1 FEMM modelace rozptylové reaktance vírové rotorové tyče

Zadání:

JMENOVITÝ STAV (sinusové napětí $U_f(\text{V}) = 300,23$; $f(\text{Hz}) = 70$)								
Příkon	[kW]	178,13	Proud fáze	[A]	236,21	Účinnost	[%]	93,75
Výkon	[kW]	167,00	Proud tyče	[A]	1078,02	$\cos j$	[-]	0,84
Moment	[Nm]	769,56	Otáčky	$[\text{min}^{-1}]$	2072,28	Rotor vnější \emptyset	[mm]	263,7
Ztráty	[kW]	11,13	Skluz	[%]	1,32	Rotor vnitřní \emptyset	[mm]	95

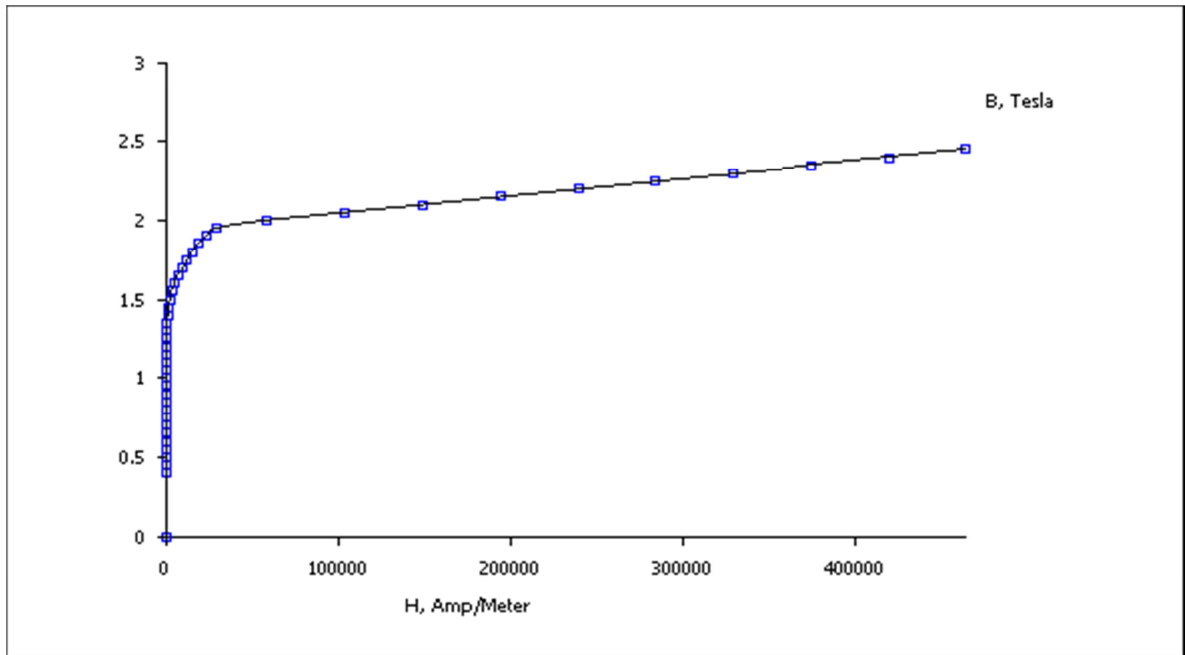
a	[mm]	2,25
b	[mm]	20,00
c	[mm]	2,25
d	[mm]	9,20
e	[mm]	12,90
dog house	[mm]	



B-H charakteristika železa

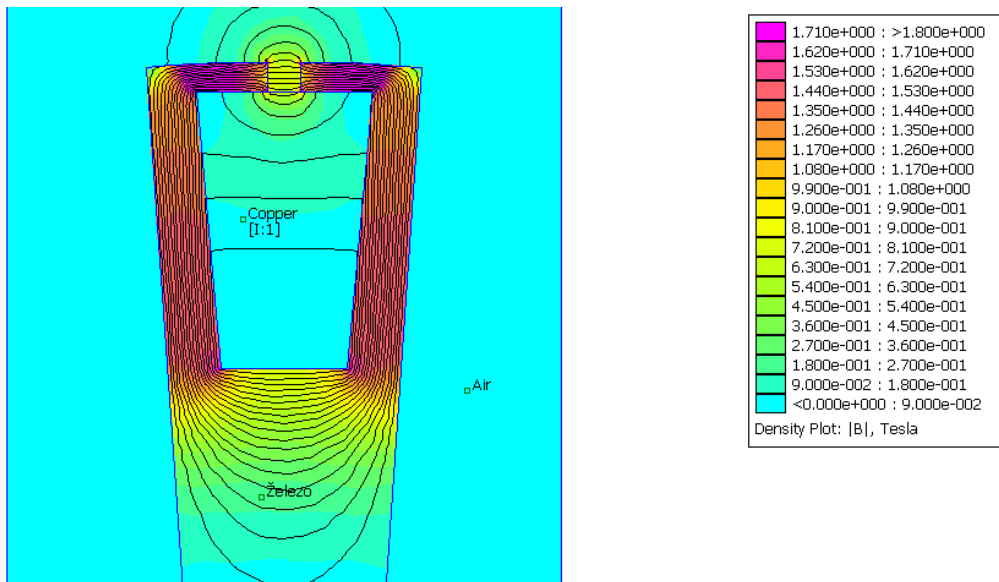
B [T]	H[A/m]	B [T]	H[A/m]	B [T]	H[A/m]
0	0	1.10	295	1.85	19100
0.40	67	1.15	344	1.90	23900
0.45	72	1.20	399	1.95	30000
0.50	77	1.25	460	2.00	59000
0.50	83	1.30	585	2.05	104000
0.60	90	1.35	860	2.10	149000
0.65	99	1.40	1230	2.15	194000
0.70	109	1.45	1750	2.20	239000
0.75	119	1.50	2500	2.25	284000
0.80	133	1.55	3540	2.30	329000
0.85	147	1.60	5000	2.35	374000
0.90	166	1.65	7120	2.40	419000
0.95	187	1.70	10000	2.45	464000
1.00	217	1.75	12500		
1.05	252	1.80	15600		

Pro názornou představu o B-H charakteristice jsme přiložili graf – viz obr. 4.0.

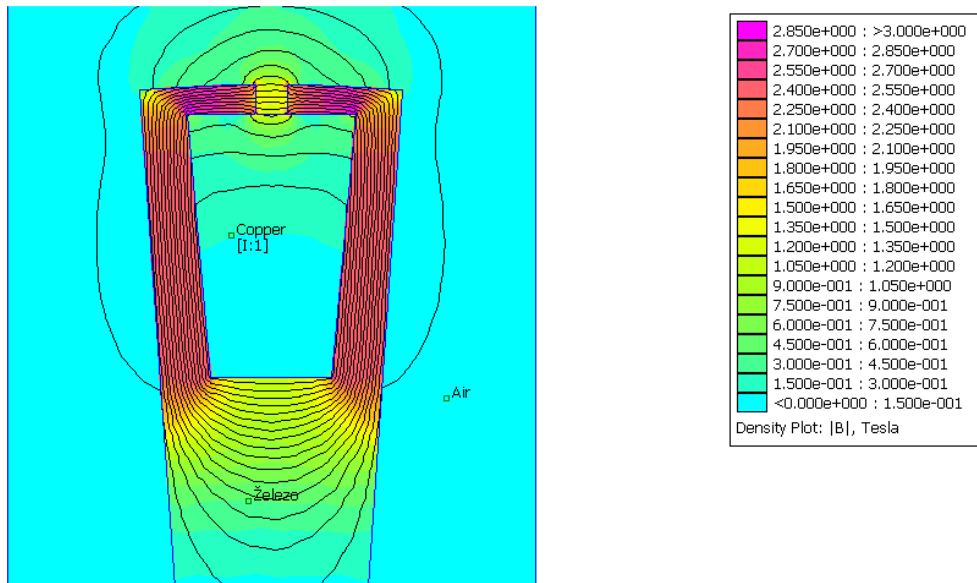


Obr. 4.0: B-H charakteristika – graf FEMM

Průřez tyče dle zadaných rozměrů je v tomto případě 221mm². Pro představu a srovnání rozptylových toků resp. reaktancí, namodelujeme zadanou tyč v měděném provedení ve jmenovitém stavu obr. 4.1a a v rozběhovém stavu obr. 4.1b. Pro rozběh jsme použili $f_2 = f_1$, tedy 70 Hz a proud 5 x vyšší než u jmenovitého stavu.



Obr. 4.1a: Magnetická indukce měděné tyče ve jmenovitém stavu pro zadanou variantu



Obr.4.1b: Magnetická indukce měděné tyče v rozběhovém stavu pro zadanou variantu

Na výše uvedeném je velice dobře vidět, že sycení železa vzrostlo na 2.5 až 3 Tesla a je pochopitelné, že i rozptylová reaktance je vyšší. Srovnání reaktancí obou stavů je v tabulce č. 1. Rozptylovou reaktanci $X_{2\sigma}$ vyjádříme pomocí integrované hodnoty W_m na průřezu tyče pomocí vztahů (4-2) a (4-3).

$$L_{\sigma} = \frac{4 W_m}{I_2^2} [H] \tag{4-2}$$

$$X_{2\sigma} = L_{\sigma} \omega [\Omega] \tag{4-3}$$

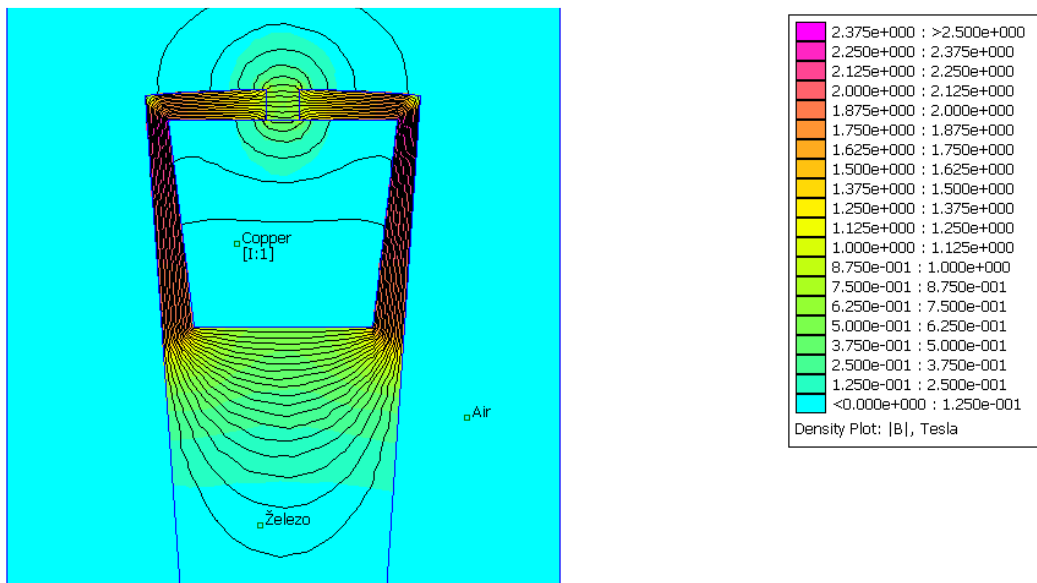
Tabulka č. 1: Porovnání jmenovitého a rozběhového stavu pro zadaný rozměr měděné tyče

f_2 [Hz]	W_m [J]	L_{σ} [H]	$X_{2\sigma}$ [Ω]	I_2 [A]
0.924	$6.29 \cdot 10^{-1}$	$1.06 \cdot 10^{-6}$	$6.18 \cdot 10^{-6}$	1537.28
70	$2.66 \cdot 10^0$	$1.87 \cdot 10^{-7}$	$8.24 \cdot 10^{-5}$	7537.28
Zadané hodnoty	Zvolené hodnoty	FEMM hodnoty	Dopočtené hodnoty	

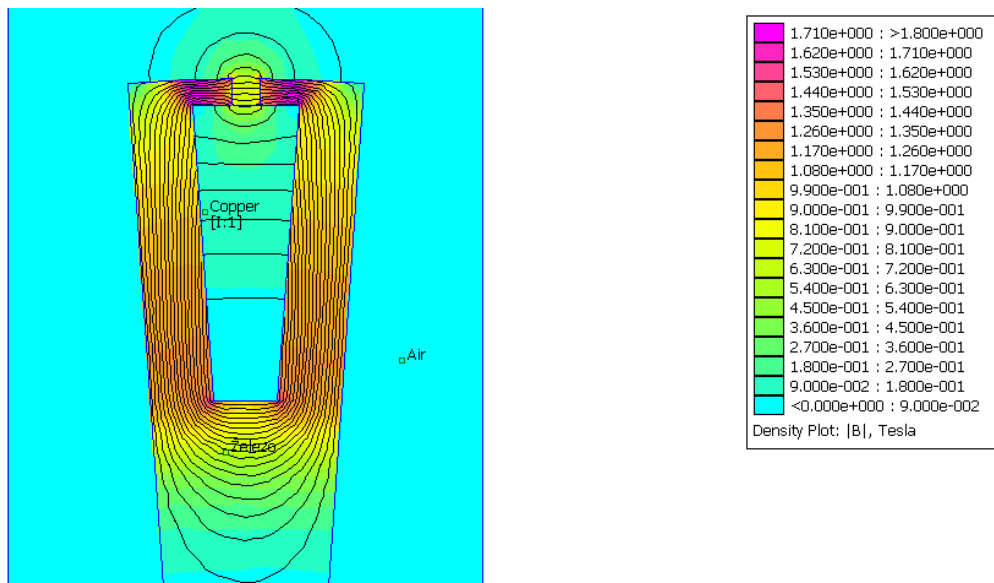
Z tabulky č. 1 je patrné, že při rozběhu je 13,33 x větší rozptylová reaktance než ve jmenovitém stavu a to je nárůst o 1233 %. Takto vysoká rozběhová hodnota reaktance je očekávaná. Od vírové tyče chceme snížení rozběhového proudu a zvýšení záběrného momentu. Při rozběhu je větší imaginární část proudu a ta má velký odpor, čímž dojde k navýšení momentu a snížení hodnot rozběhového proudu ve srovnání s jednoduchou tyčí.

Ve jmenovitém stavu tyčí teče proud o malé frekvenci a o moment se stará reálná složka proudu. Rozptylová reaktance nyní způsobuje ztráty a tím menší účinnost.

V této práci se nebudeme věnovat jednoduché tyči, ale provedeme srovnání parametrů tří hloubek vírové tyče, kde se nejmělejší varianta (obr. 4.2) přibližuje požadavkům na jednoduchou tyč, střední varianta je výše zadaný rozměr (obr. 4.1a,b) a třetí variantou je hluboká tyč (obr. 4.3). Modelaci jsme provedli pro jmenovitý a rozběhový stav se zachováním průřezu a poměru horní a spodní strany tyče, abychom zajistili srovnatelné výsledky.



Obr. 4.2: Magnetická indukce mělké měděné tyče ve jmenovitém stavu



Obr. 4.3: Magnetická indukce hluboké měděné tyče ve jmenovitém stavu

Tabulka č. 2: Rozptylové hodnoty tří výšek měděných tyčí pro jmenovitý a rozběhový stav

Měď					
f_2 [Hz]	I_{m2}	h tyče [m]	W_m [J]	$L\sigma$ [H]	$X_{2\sigma}$ [Ω]
0.924	1537.28	0.015	$3.62 \cdot 10^{-1}$	$6.13 \cdot 10^{-7}$	$3.56 \cdot 10^{-6}$
		0.02	$6.29 \cdot 10^{-1}$	$1.06 \cdot 10^{-6}$	$6.18 \cdot 10^{-6}$
		0.025	$8.55 \cdot 10^{-1}$	$1.45 \cdot 10^{-6}$	$8.40 \cdot 10^{-6}$
70	7537.28	0.015	$1.57 \cdot 10^0$	$1.11 \cdot 10^{-7}$	$4.87 \cdot 10^{-5}$
		0.02	$2.66 \cdot 10^0$	$1.87 \cdot 10^{-7}$	$8.24 \cdot 10^{-5}$
		0.025	$4.96 \cdot 10^0$	$3.49 \cdot 10^{-7}$	$1.54 \cdot 10^{-4}$
Zadané hodnoty		Zvolené hodnoty	FEMM hodnoty	Dopočtené hodnoty	

Z tabulky je vidět nárůst rozptylových hodnot s nárůstem výšky tyče i s nárůstem rotorové frekvence. Dá se odvodit, že pokud bychom navrhovali stále hlubší tyče, stroj by měl ve jmenovitém stavu vyšší ztráty od imaginární složky proudu, což znamená nižší účinnost a tím menší tvrdost stroje. Naproti tomu se navýší záběrný moment.

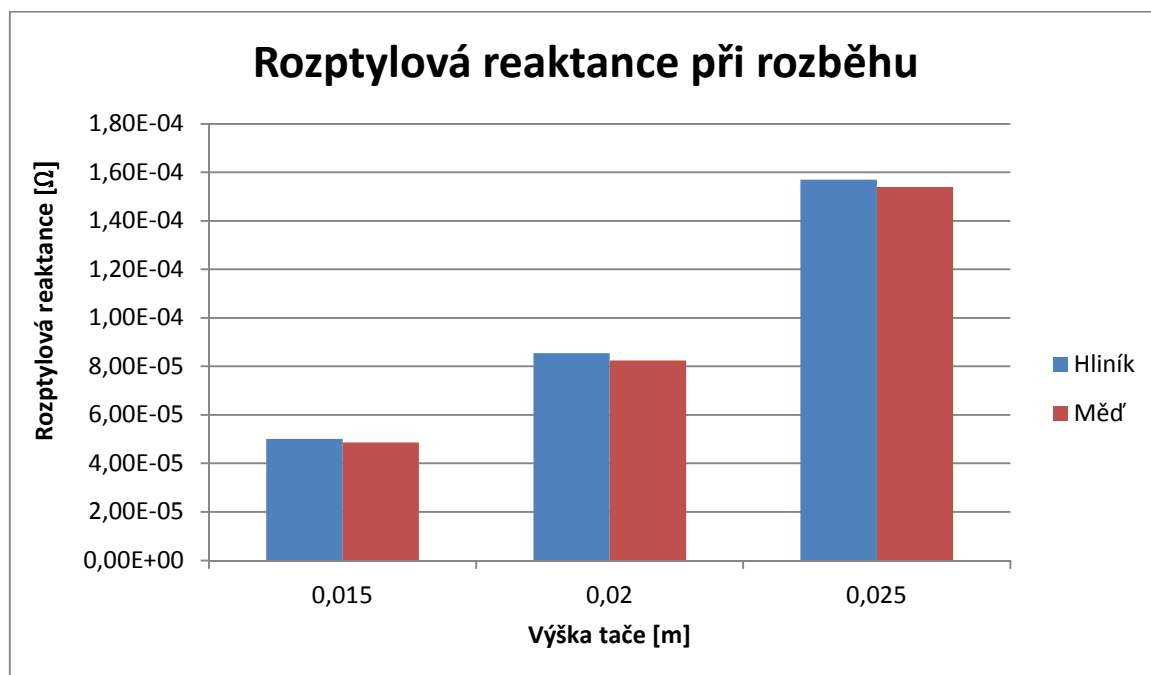
Také jsme zkoumali vlastnosti rozptylových polí při změně materiálu rotorové tyče. Do FEMMu jsme zadali jako materiál rotorové tyče hliník a opět provedli modelaci jmenovitého a rozběhového stavu, viz tab. č 3.

Tabulka č. 3: Rozptylové hodnoty tří výšek hliníkových tyčí pro jmenovitý a rozběhový stav

Hliník					
f_2 [Hz]	I_{m2}	h tyče [m]	W_m [J]	$L\sigma$ [H]	$X_{2\sigma}$ [Ω]
0.924	1537.28	0.015	$3.62 \cdot 10^{-1}$	$6.13 \cdot 10^{-7}$	$3.56 \cdot 10^{-6}$
		0.02	$6.29 \cdot 10^{-1}$	$1,06 \cdot 10^{-6}$	$6.18 \cdot 10^{-6}$
		0.025	$8.55 \cdot 10^{-1}$	$1.45 \cdot 10^{-6}$	$8.40 \cdot 10^{-6}$
70	7537.28	0.015	$1.62 \cdot 10^0$	$1.14 \cdot 10^{-7}$	$5.01 \cdot 10^{-5}$
		0.02	$2.76 \cdot 10^0$	$1.94 \cdot 10^{-7}$	$8.54 \cdot 10^{-5}$
		0.025	$8.40 \cdot 10^1$	$3.58 \cdot 10^{-7}$	$1.57 \cdot 10^{-4}$
Zadané hodnoty		Zvolené hodnoty	FEMM hodnoty	Dopočtené hodnoty	

Z tabulky č. 3 je opět vidět menší rozptyl ve jmenovitém a větší v rozběhovém stavu. Pokud porovnáme jmenovité stavy obou materiálů, vidíme shodné rozptylové reaktance, ale při rozběhu stroje je tomu jinak. Pro lepší orientaci v hodnotách rozběhových reaktancí

sestrojíme graf, viz obrázek 4. 4.

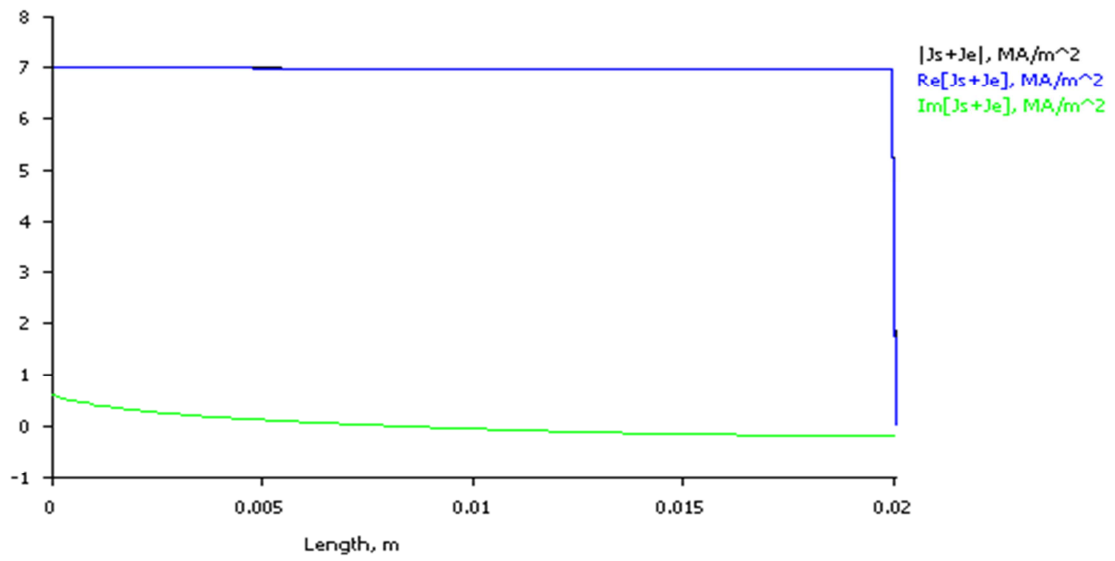


Obr. 4. 4: Rozptylová reaktance pro tyče z hliníku a mědi v rozběhovém stavu dle tab. 2 a 3.

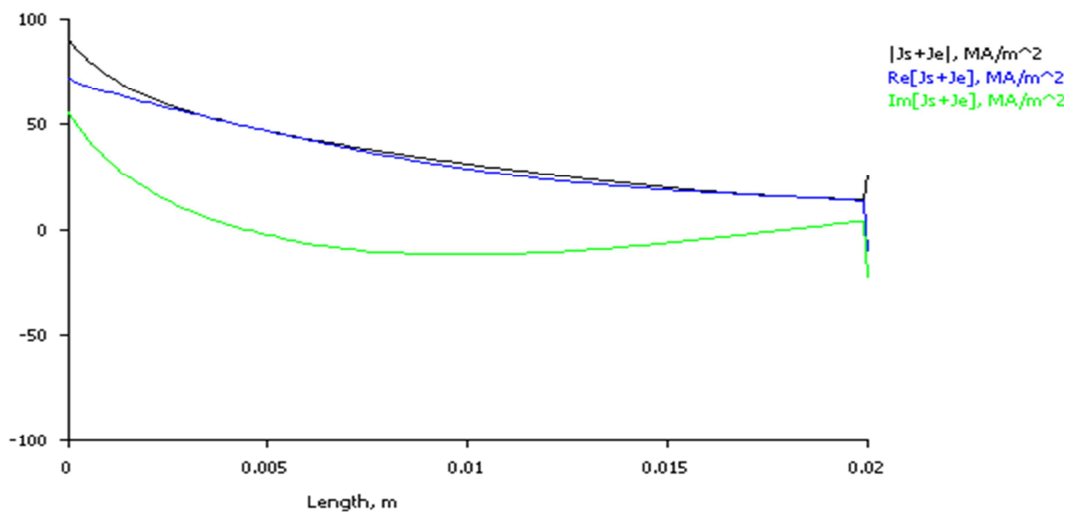
4.1.2 FEMM modelace činného odporu vírové rotorové tyče

V předchozí kapitole jsme zjistili, že frekvence, rozměr a materiál má vliv na rozptylovou reaktanci. Také na činný odpor je očekáván významný vliv. Činný odpor tyče je dán materiálem, tzn. měrným elektrickým odporem ρ , dále průřezem a délkou materiálu. Z těchto hodnot získáme odpor a měrnou elektrickou vodivost γ . Tuto hodnotu potřebujeme pro FEMM k zadání materiálových vlastností. Činný odpor není konstantou, ale je funkcí teploty, což budeme pro zjednodušení zanedbávat, ale u asynchronních strojů je také funkcí hloubky vniku (4-1), potažmo skluzu nebo rotorové frekvence a to již není možné zanedbat. Skinefekt a následně hloubka vniku je u asynchronních strojů velice významný jev. Významný je z toho důvodu, že reguluje bez našeho zásahu proud, tzn. dle následujícího, že při rozběhu zajistí menší proud, což především u velkých výkonů potřebujeme s ohledem na napájecí síť a také s ohledem na pokles napětí, což má negativní vliv na moment stroje. Proto by bylo dobré tento jev stručně vysvětlit.

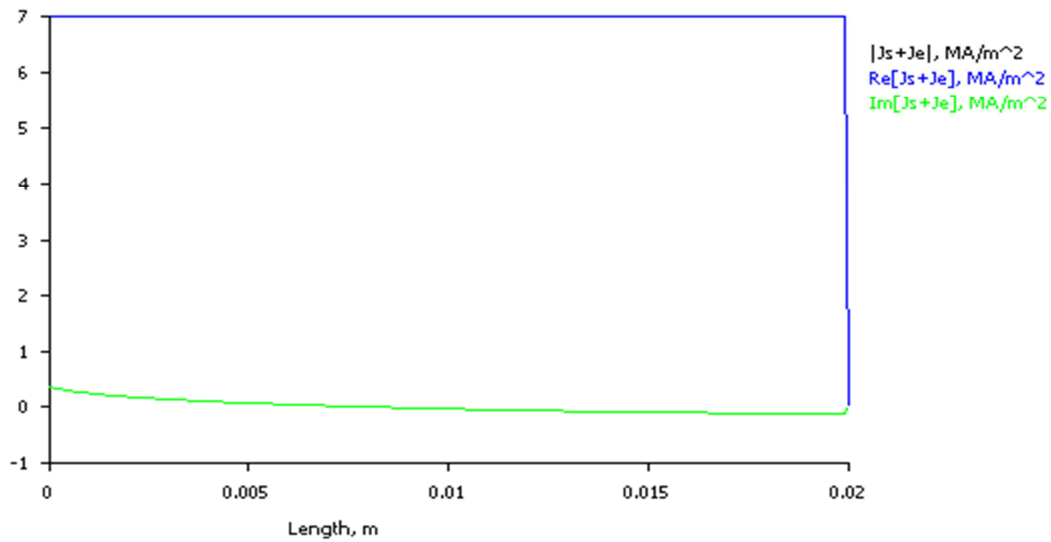
Skinefekt je jev jinak nežádoucí, který se projevuje tak, že zabraňuje průtoku proudu v celém průřezu tyče. Proud je vytlačen k hornímu okraji rotorové tyče, kde narůstá proudová hustota vyjádřená v A/m^2 obr. 4.5a, b, c, d. Grafy jsou jen jiným vyjádřením - obr. 4.6a.b., obr. 4.7.



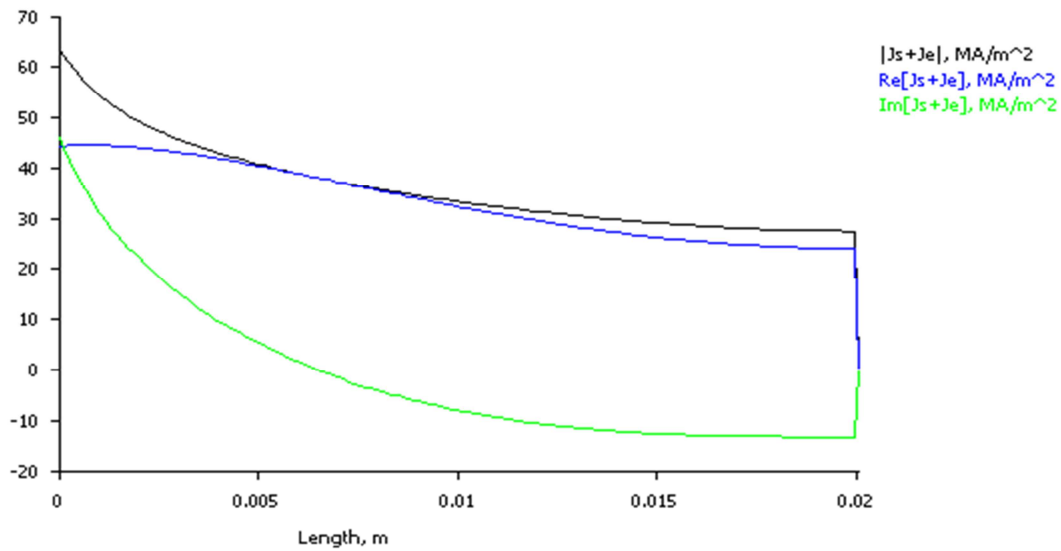
Obr. 4.5a Průběh proudové hustoty měděné tyče ve jmenovitém stavu



Obr. 4.5b: Průběh proudové hustoty v měděné tyči při rozběhu

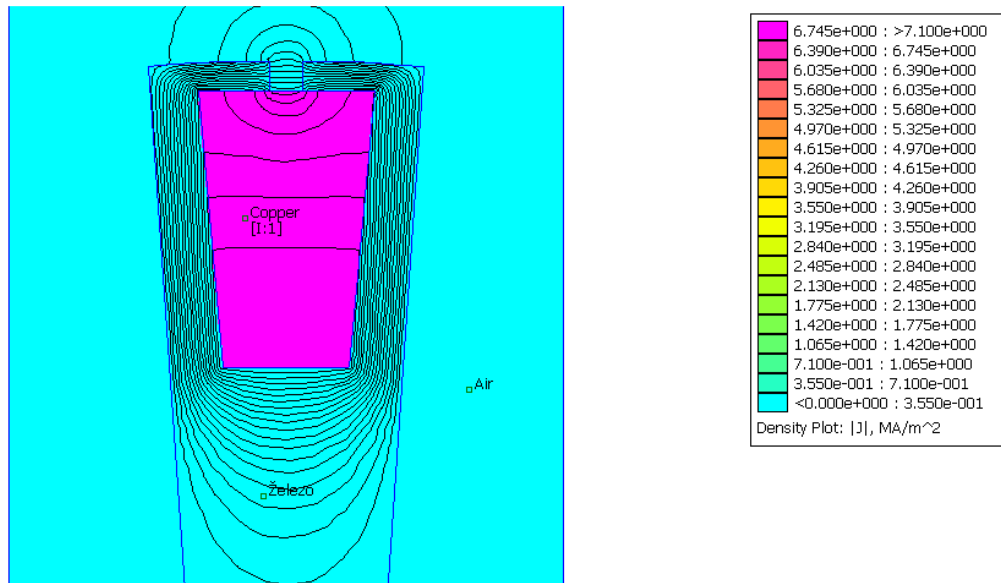


Obr. 4.5c: Průběh proudové hustoty hliníkové tyče ve jmenovitém stavu

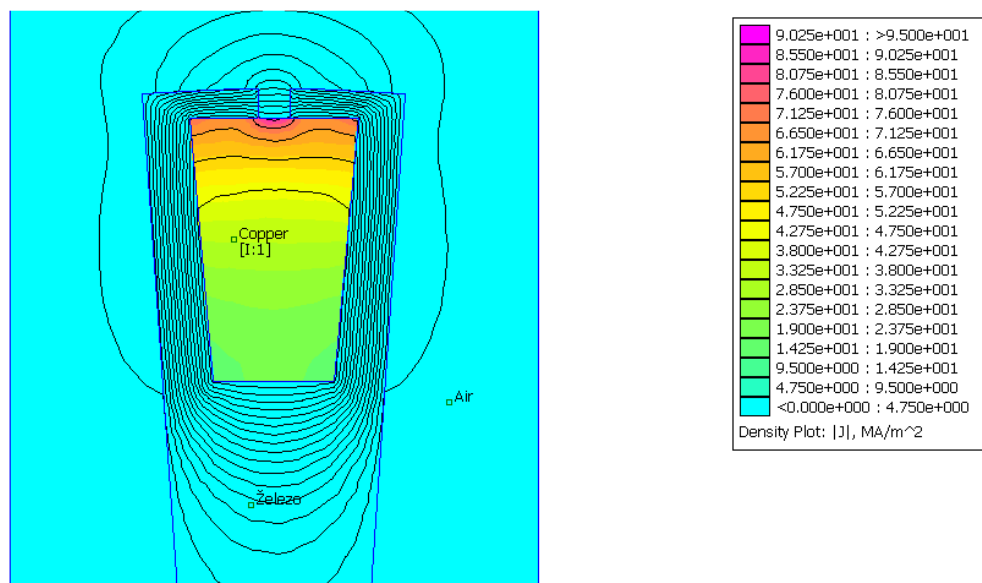


Obr. 4.5d: Průběh proudové hustoty v hliníkové tyči při rozběhu

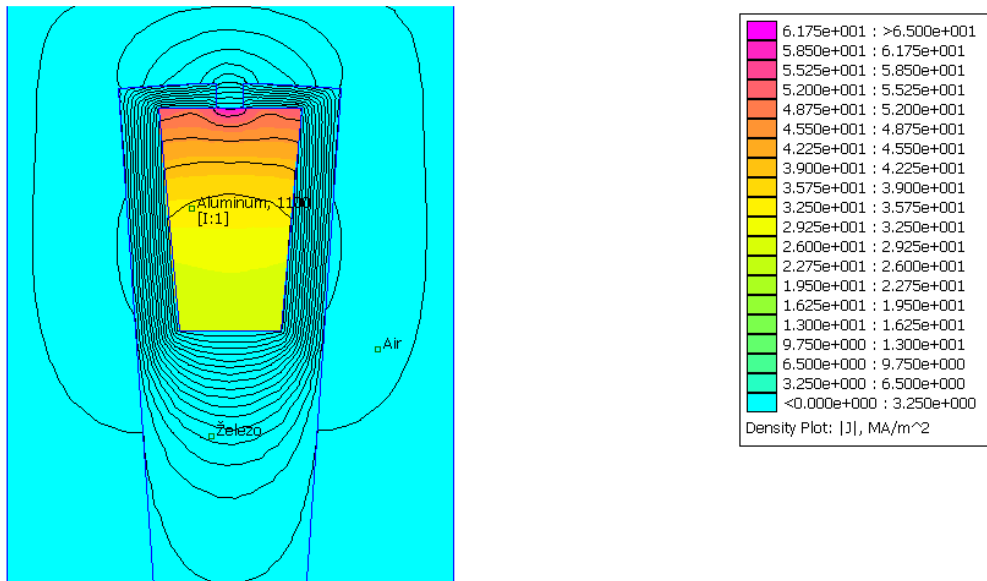
Porovnáním grafů je vidět odlišný průběh proudových hustot, především v rozběhovém stavu. Obrázky 4.5a, b, c, d ukazují proudovou hustotu v měděné a hliníkové rotorové tyči zadaných rozměrů při jmenovitém a rozběhovém stavu.



Obr. 4.6a: Rozložení proudové hustoty ve jmenovitém stavu měděné tyče o zadáných rozměrech



Obr. 4.6b: Rozložení proudové hustoty v rozběhovém stavu měděné tyče o zadáných rozměrech



Obr. 4.7: Rozložení proudové hustoty v rozběhovém stavu hliníkové tyče o zadaných rozměrech

Při rotorové frekvenci napětí a proudu 0.924 Hz již skin efekt nemá na tyč vliv a proto se nedá mluvit o hloubce vniku a proud je v tyči rozložen rovnoměrně, to znamená rovnoměrné rozložení proudové hustoty po celém průřezu tyče, obr.4.6a. Obrázek proudové hustoty ve jmenovitém stavu pro hliník jsme nepřiložili, protože vizuálně je naprosto stejný, což dokazuje přiložený graf obr. 4.5c. Obrázky 4.6b, 4.7 ukazují rozložení proudové hustoty při rozběhu, tedy rotorový proud má frekvenci 70 Hz a vlivem toho je hloubka vniku v tomto pracovním režimu 8,85 mm pro měď a pro hliník 11,5mm. Na průřezu tyče je vidět vliv skin efektu na hloubku vniku, čímž se zvýší činný odpor a také vidíme, že vypočtená hodnota není jasnou hranicí, za kterou proud neteče. Při porovnání hodnot proudové hustoty Cu a Al tyče obr. 4.6b a 4.7 je vidět rozdíl maximálních hodnot, kde Al tyč má vlivem větší hloubky vniku (4-1) při vlivu menší vodivosti cca 65 MA/m², oproti Cu která má cca 95 MA/m². Na grafech proudové hustoty je vidět významné navýšení proudové hustoty v horní části dle výše uvedeného.

Abychom zjistili, jak velký vliv má na činný odpor skin efekt, opět použijeme modely tří geometrických variant tyče a pomocí integrované hodnoty ΔP_j na průřezu tyče a vztahu (4-4) určíme činné odpory měděné a hliníkové tyče pro jmenovitý a rozběhový stav jednotlivých variant na jeden metr délky.

$$R_2 = \frac{2 \Delta P_j}{I^2} [\Omega] \quad (4-4)$$

Tabulka č. 4: Hodnoty činných odporů tří výšek měděných tyčí pro jmenovitý a rozběhový stav

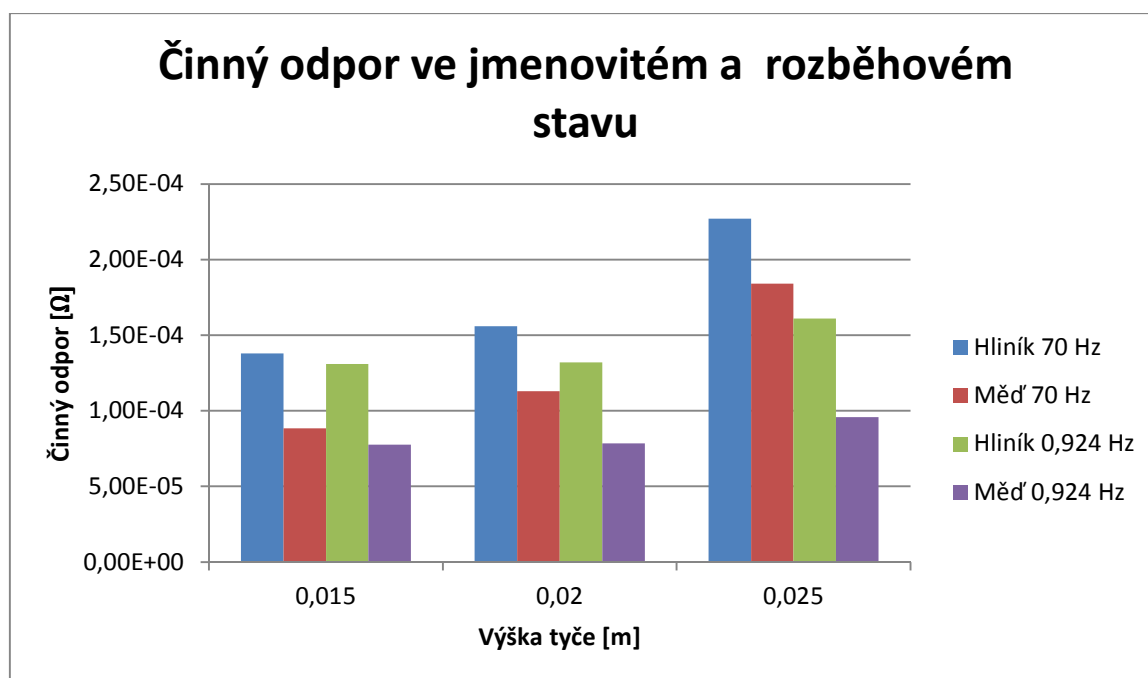
Měď				
f_2 [Hz]	I_{m2}	h tyče [m]	ΔP_j [W]	$R_{2\text{cu}}$ [Ω]
0.924	1537.28	0.015	$9.18 \cdot 10^1$	$7.77 \cdot 10^{-5}$
		0.02	$9.26 \cdot 10^1$	$7.84 \cdot 10^{-5}$
		0.025	$1.13 \cdot 10^2$	$9.59 \cdot 10^{-5}$
70	7537.28	0.015	$2.51 \cdot 10^3$	$8,85 \cdot 10^{-5}$
		0.02	$3.21 \cdot 10^3$	$1.13 \cdot 10^{-4}$
		0.025	$5.21 \cdot 10^3$	$1,84 \cdot 10^{-4}$
Zadané hodnoty		Zvolené hodnoty	FEMM hodnoty	Dopočtené hodnoty

Z rozběhových hodnot vyplývá, že čím vyšší je tyč, tím vyšší je činný odpor. Tento trend můžeme ale pozorovat i ve jmenovitém stavu, kde bychom čekali stejné hodnoty. Navýšení odporu je zde minimální.

Tabulka č. 5: Hodnoty činných odporů tří výšek hliníkových tyčí pro jmenovitý a rozběhový stav

Hliník				
f_2 [Hz]	I_{m2}	h tyče [m]	ΔP_j [W]	$R_{2\text{cu}}$ [Ω]
0.924	1537.28	0.015	$1.55 \cdot 10^2$	$1.31 \cdot 10^{-4}$
		0.02	$1.56 \cdot 10^2$	$1.32 \cdot 10^{-4}$
		0.025	$1.91 \cdot 10^2$	$1.61 \cdot 10^{-4}$
70	7537.28	0.015	$3.91 \cdot 10^3$	$1.38 \cdot 10^{-4}$
		0.02	$4.43 \cdot 10^3$	$1.56 \cdot 10^{-4}$
		0.025	$6.45 \cdot 10^3$	$2.27 \cdot 10^{-4}$
Zadané hodnoty		Zvolené hodnoty	FEMM hodnoty	Dopočtené hodnoty

V tabulce č. 5 vidíme, že trend měděné tyče z předchozí tabulky se opakuje i u hliníkové tyče, to znamená, že čím vyšší je tyč, tím vyšší je činný odpor. Pro snadnější orientaci v hodnotách tabulek č. 4 a 5 sestrojíme graf.

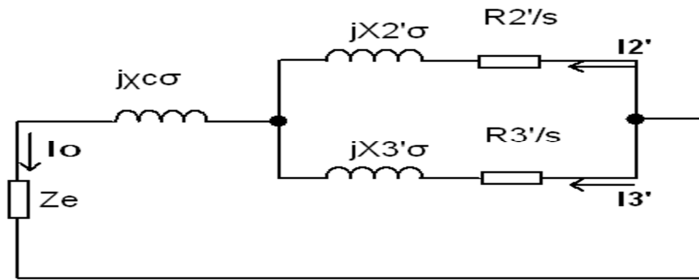


Obr. 4.8: Činný odpor pro tyče v hliníku a mědi ve jmenovitém a rozběhovém stavu dle tab. 4 a 5

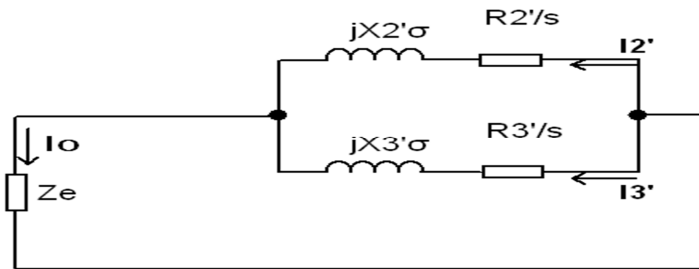
Tím se potvrzuje vliv skin efektu a měrné elektrické vodivosti na hloubku vniku. Činný odpor tyče má vliv na reálnou složku proudu, z toho plyne, že čím je vyšší odpor tyče ve jmenovitém stavu, tím vyšší je moment stroje od této složky. Z tabulek 4 a 5 a obr. 4.8 je evidentní, že snížení rozběhového proudu a navýšení záběrného momentu je možné také změnou materiálu tyče.

4.2 Dvojitá (Boucheratova) kotva

Dvojitá klec je ve své podstatě kombinací odporové a vírové klece kde jejich materiál a vzájemná poloha dává stroji požadované vlastnosti. Při rozběhu opět do vlastností zasahuje skin efekt, který vytlačí rozběhový proud do rozběhové tyče, která je vyrobena z materiálu o velkém odporu. Ve jmenovitém stavu do vlastností již skin efekt nezasahuje a rotorový proud se rozdělí do běhové i rozběhové tyče. Větší část proudu je v běhové tyči, protože obě tyče jsou v obvodu zapojeny paralelně obr. (4.9a), (4.9b) a rozběhová tyč má větší odpor.



Obr. 4.9a: Náhradní schéma rotoru s dvojitou klecí v sousém uspořádání [2]



Obr. 4.9b: Náhradní schéma rotoru s dvojitou klecí v mimoosém uspořádání [2]

Pro namodelování dvojité rotorové tyče potřebujeme znát geometrické a materiálové vlastnosti a pro oba provozní stavy rozdělení proudů do jednotlivých tyčí. Modelovat budeme jak sousou tak i mimoosou variantu, pro něž jsme materiálem zvolili mosaz pro rozběhovou a měď pro běhovou tyč. Aby bylo možné výsledky porovnávat s vírovou tyčí, je součtový proud tyčí stejný jako pro vírovou tyč (jmenovitý stav 1537,28 A, rozběhový 7537,28 A) a také součtový průřez tyčí je stejný jako u vírové (221 mm²). Ze vztahu (4-5) získáme odpor tyčí na metr délky a dále pomocí vztahů (4-6), (4-7) a (4-8) dostaneme velikosti proudů v jednotlivých tyčích pro jmenovitý stav. Rozložení rozběhových proudů jsme zvolili s ohledem na skinefekt.

$$R_2 = \frac{1}{G} \quad [\Omega] \quad (4-5)$$

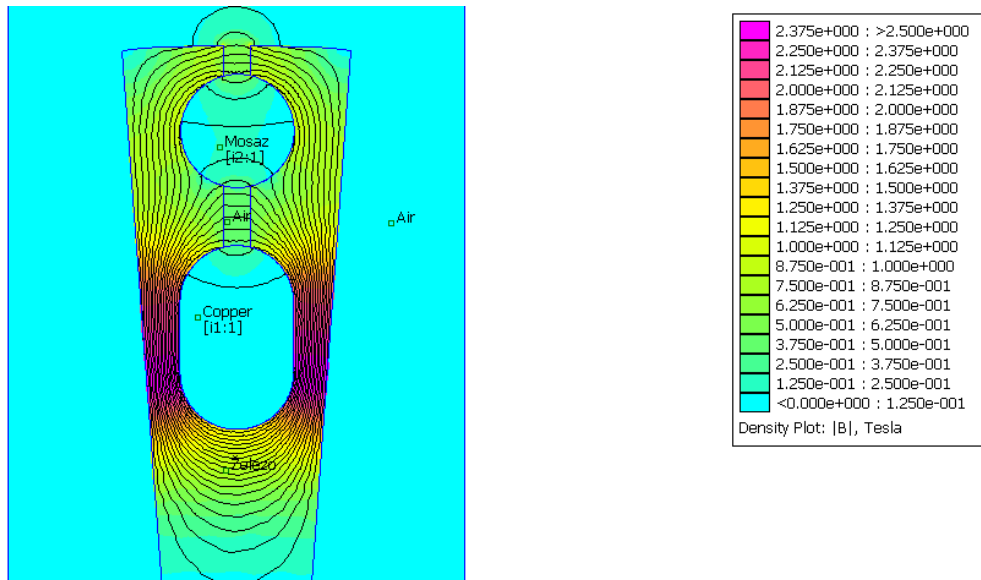
$$R_{2e} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad [\Omega] \quad (4-6)$$

$$U_2 = R_{2e} I_2 \quad [V] \quad (4-7)$$

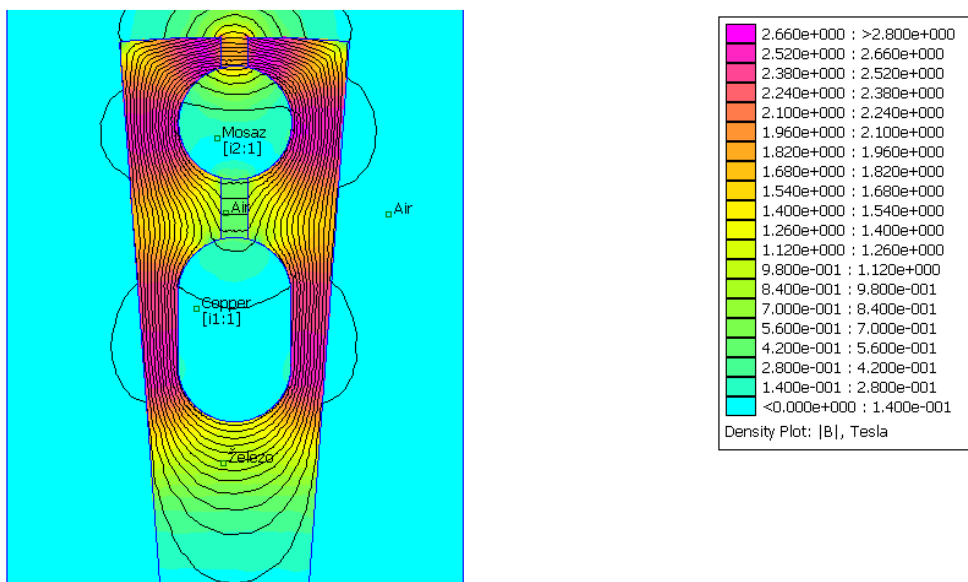
$$I_t = \frac{U_2}{R_{2(3)}} \quad [A] \quad (4-8)$$

4.2.1 FEMM modelace rozptylové reaktance dvojité rotorové tyče

Obrázky 4.10 a 4.11 ukazují sycení železa a velikost magnetické indukce v okolí tyčí pro jmenovitý stav, kde $I_{mos} = 298,2 \text{ A}$; $I_{Cu} = 1236,93 \text{ A}$, a rozběhový stav, kde $I_{mos} = 7000 \text{ A}$; $I_{Cu} = 537,28 \text{ A}$.



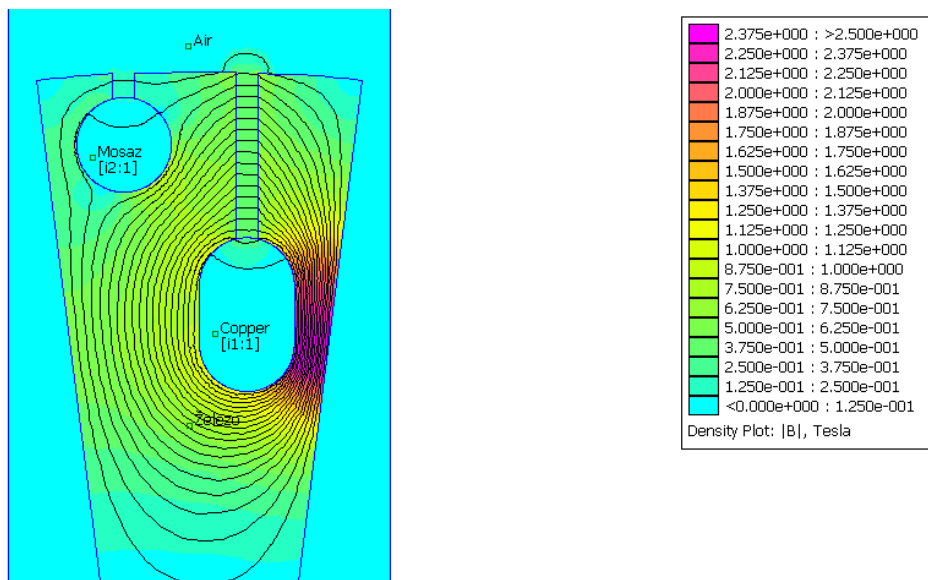
Obr. 4.10: Magnetická indukce pro jmenovitý stav



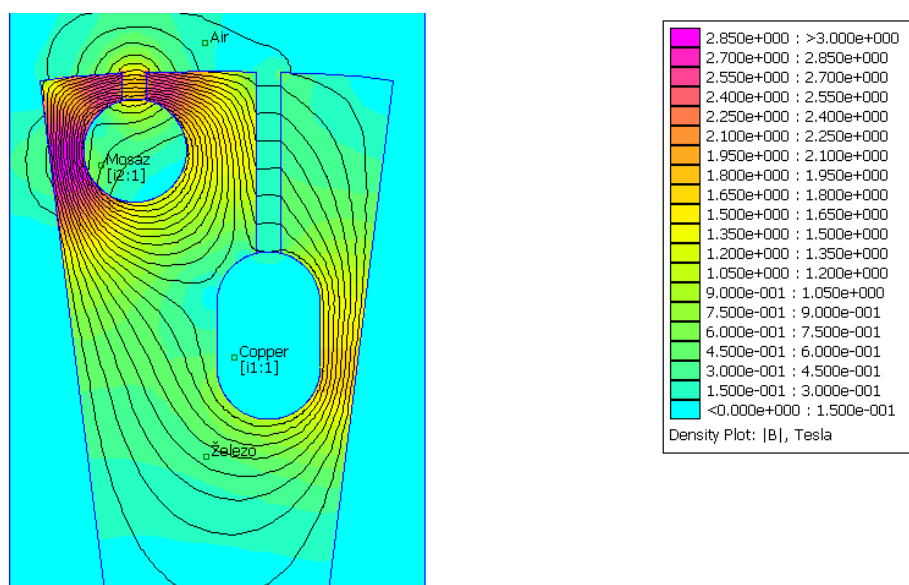
Obr. 4.11: Magnetická indukce pro rozběhový stav

Druhým typem, který budeme modelovat, je mimoosé uspořádání tyčí obrázek 4.12 a 4.13, které namodelujeme se stejným zadáním jako předchozí variantu. Jediné co musíme změnit,

je rotorová výseč modelu z důvodu vzájemné polohy tyčí. Protože nemodelujeme celý rotor, došlo by v místech výrazného přiblížení k hranici výseče k přesycení železa a to by vedlo ke zkreslení výsledků.



Obr. 4.12: Magnetická indukce pro jmenovitý stav



Obr. 4.13: Magnetická indukce pro rozběhový stav

Na obrázcích je vidět sycení železa, které je ve jmenovitém stavu v maximu cca 2,5 Tesla a při rozběhu 3 Tesla a to je v mimoosé variantě víc než by bylo v reálu.

Následující tabulka č. 6 obsahuje rozptylové hodnoty L_{σ} a $X_{2\sigma}$, vyjádřené pomocí integrované hodnoty W_m na průřezu jednotlivých tyčí pomocí vztahů (4-2) a (4-3).

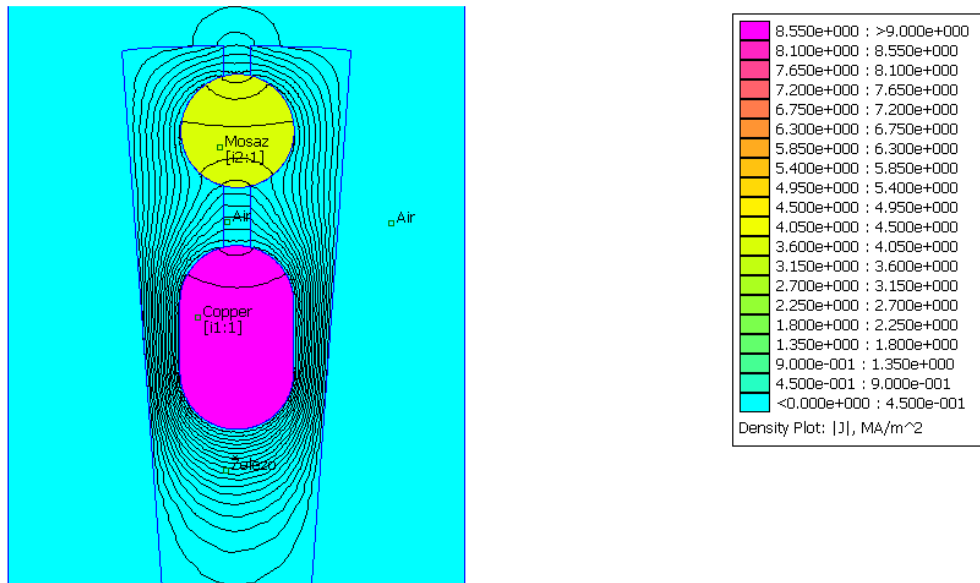
Tabulka č. 6: Hodnoty rozptylové reaktance pro dvě varianty uspořádání tyčí ve jmenovitém a rozběhovém stavu

			Souosé tyče		Mimoosé tyče	
f_2 [Hz]	I_{CU} [A]	I_{mos} [A]	$W_{m\ CU}$ [J]	$W_{m\ mos}$ [J]	$W_{m\ CU}$ [J]	$W_{m\ mos}$ [J]
0.924	1236.93	298.2	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$4,68 \cdot 10^{-1}$	$1,96 \cdot 10^{-1}$	$2,04 \cdot 10^{-2}$
			L_σ [H]	L_σ [H]	L_σ [H]	L_σ [H]
			$3,92 \cdot 10^{-7}$	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$5,12 \cdot 10^{-7}$	$9,17 \cdot 10^{-7}$
			$X_{2\sigma}$ [Ω]	$X_{3\sigma}$ [Ω]	$X_{2\sigma}$ [Ω]	$X_{3\sigma}$ [Ω]
			$2,28 \cdot 10^{-6}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$2,97 \cdot 10^{-6}$	$5,32 \cdot 10^{-6}$
70	537.28	7000	$W_{m\ CU}$ [J]	$W_{m\ mos}$ [J]	$W_{m\ CU}$ [J]	$W_{m\ mos}$ [J]
			$4,13 \cdot 10^{-1}$	$3,31 \cdot 10^0$	$7,21 \cdot 10^{-2}$	$3,89 \cdot 10^0$
			L_σ [H]	L_σ [H]	L_σ [H]	L_σ [H]
			$5,73 \cdot 10^{-6}$	$2,70 \cdot 10^{-7}$	$9,99 \cdot 10^{-7}$	$3,18 \cdot 10^{-7}$
			$X_{2\sigma}$ [Ω]	$X_{3\sigma}$ [Ω]	$X_{2\sigma}$ [Ω]	$X_{3\sigma}$ [Ω]
			$2,52 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-4}$	$4,40 \cdot 10^{-4}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$
Zadané hodnoty		FEMM hodnoty		Dopočtené hodnoty		

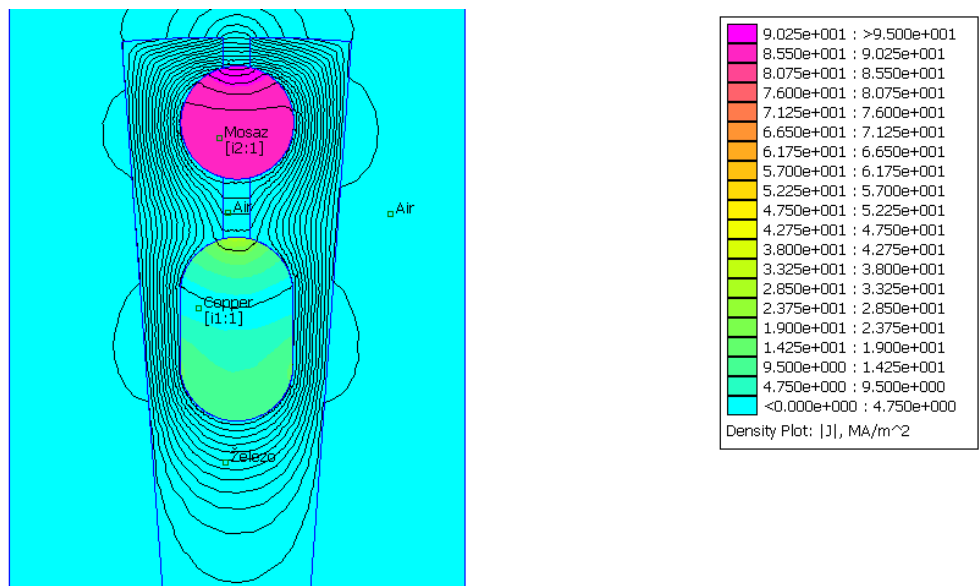
Pokud zkoumáme vliv rozptylové reaktance na rozběhový proud a záběrný moment, musíme se v tabulce č. 6 zajímat o poslední řádek hodnot. Z těchto hodnot je patrné, že celková rozptylová reaktance u souosé tyče je 4,56 x vyšší, než celková rozptylová reaktance u mimoosé tyče. Z hlediska vyššího záběrného momentu a nižšího rozběhového proudu od imaginární složky proudu je výhodnější souosé uspořádání.

4.2.2 FEMM modelace činného odporu dvojité rotorové tyče

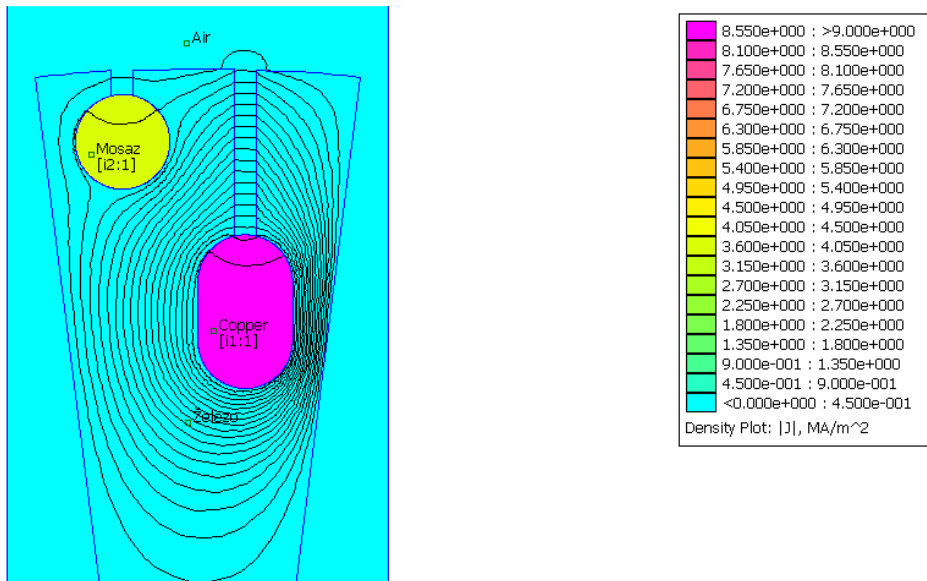
Tak jako u vírové tyče vyvolal skinefekt vytlačení proudu do horní části, u dvojité tyče bude proud vytlačen do horní části rozběhové, tedy mosazné tyče a tím v ní dojde k navýšení proudové hustoty. Namodelováním ve FEMMu obou variant dvojité tyče zjistíme integrované hodnoty ΔP_j na průřezu tyčí a následně dosazením do vztahu (4-4) dostaneme činné odpory jednotlivých tyčí. Obrázky 4.14 a 4.15 ukazují proudovou hustotu pro jmenovitý a rozběhový stav souosé varianty a obrázky 4.16 a 4.17 to samé u mimoosé varianty.



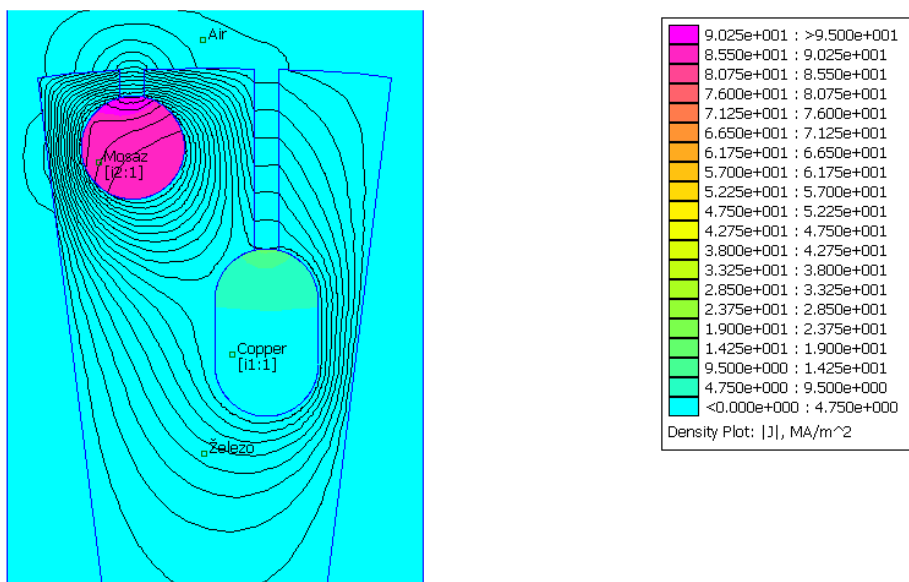
Obr. 4.14: Proudová hustota ve jmenovitém stavu



Obr. 4.15: Proudová hustota v rozběhovém stavu



Obr. 4.16: Proudová hustota ve jmenovitém stavu



Obr 4.17: Proudová hustota v rozběhovém stavu

Hodnoty činných odporů jsou zaznamenány v tabulce č. 7 pro jmenovitý a rozběhový stav obou variant

Tabulka č. 7: Hodnoty činného odporu pro dvě varianty uspořádání tyčí ve jmenovitém a rozběhovém stavu

			Souosé tyče		Mimoosé tyče	
f_2 [Hz]	I_{CU} [A]	I_{mos} [A]	$\Delta P_{j, CU}$ [W]	$\Delta P_{j, mos}$ [W]	$\Delta P_{j, CU}$ [W]	$\Delta P_{j, mos}$ [W]
0,924	1236,93	298,2	$9,39 \cdot 10^1$	$4,06 \cdot 10^1$	$9,39 \cdot 10^1$	$4,06 \cdot 10^1$
			R_2 [Ω]	R_3 [Ω]	R_2 [Ω]	R_3 [Ω]
			$1,23 \cdot 10^{-4}$	$9,13 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$	$9,13 \cdot 10^{-4}$
70	537,28	7000	$\Delta P_{j, CU}$ [W]	$\Delta P_{j, mos}$ [W]	$\Delta P_{j, CU}$ [W]	$\Delta P_{j, mos}$ [W]
			$1,17 \cdot 10^2$	$2,24 \cdot 10^4$	$3,28 \cdot 10^1$	$2,25 \cdot 10^4$
			R_2 [Ω]	R_3 [Ω]	R_2 [Ω]	R_3 [Ω]
			$8,10 \cdot 10^{-4}$	$9,16 \cdot 10^{-4}$	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$9,17 \cdot 10^{-4}$
Zadané hodnoty		FEMM hodnoty		Dopočtené hodnoty		

Z tabulky je vidět, že při srovnání činných odporů obou variant v rozběhovém stavu má měděná tyč 3,57 x vyšší odpor ve variantě souosé oproti mimoosé. To znamená, že v rozběhovém stavu i reálná složka proudu navýší díky většímu činnému odporu moment. Dále se ne zcela potvrdil předpoklad, že rozběhový proud bude vytlačen do horní části rozběhové tyče, protože na hloubku vniku má vliv kromě frekvence také vodivost materiálu. Tento fakt můžeme názorně vidět v odstavci 4.1.2 při srovnáním obrázků 4.6b a 4.7, což nám potvrzují výsledky z tabulky, kde se hodnota R_3 při rozběhu zvýšila jen nepatrně oproti jmenovitému stavu.

Závěr

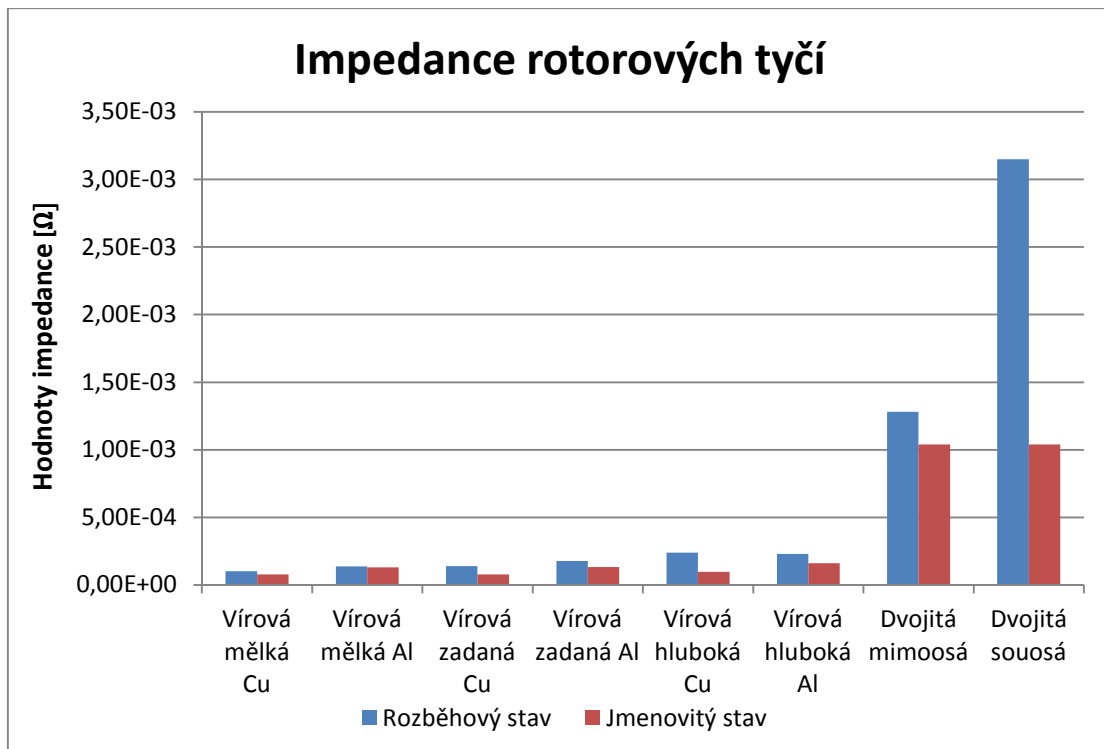
V předchozích odstavcích jsme modelací, výpočty a porovnáváním došli k výsledkům, které nyní shrneme. V práci jsme se soustředili na parametry ovlivňující vlastnosti asynchronního stroje, tzn., že jsme modelovali a počítali rozptylové reaktance a činné odpory pro dva provozní stavy, dva druhy speciálních rotorových tyčí a tři materiály. Abychom mohli porovnat získané a vypočtené hodnoty z předchozích kapitol, vyčíslíme impedance vírové tyče ve třech rozměrech a dvou materiálech vírové, dvojitě souosé a dvojitě mimoosé tyče pro jmenovitý a rozběhový stav. Hodnoty impedancí všech zkoumaných variant získáme pomocí vztahu (5-1).

$$Z = \sqrt{R^2 + X_G^2} \text{ } [\Omega] \quad (5-1)$$

Tabulka č. 8: Impedanční hodnoty pro všechny varianty modelovaných tyčí ve jmenovitém a rozběhovém stavu na jeden metr délky

f [Hz]		0,924			70		
Parametry tyčí (součtové hodnoty)		$X_{2\sigma}$ [Ω]	R_2 [Ω]	Z_2 [Ω]	$X_{2\sigma}$ [Ω]	R_2 [Ω]	Z_2 [Ω]
Vírová mělká tyč	Cu	$3.56 \cdot 10^{-6}$	$7.77 \cdot 10^{-5}$	$7.78 \cdot 10^{-5}$	$4.87 \cdot 10^{-5}$	$8.85 \cdot 10^{-5}$	$1.01 \cdot 10^{-4}$
	Al	$3.56 \cdot 10^{-6}$	$1.31 \cdot 10^{-4}$	$1.31 \cdot 10^{-4}$	$1.12 \cdot 10^{-5}$	$1.38 \cdot 10^{-4}$	$1.38 \cdot 10^{-4}$
Vírová zadaná tyč	Cu	$6.18 \cdot 10^{-6}$	$7.84 \cdot 10^{-5}$	$7.86 \cdot 10^{-5}$	$8.24 \cdot 10^{-5}$	$1.13 \cdot 10^{-4}$	$1.40 \cdot 10^{-4}$
	Al	$6.18 \cdot 10^{-6}$	$1.32 \cdot 10^{-4}$	$1.32 \cdot 10^{-4}$	$8.54 \cdot 10^{-5}$	$1.56 \cdot 10^{-4}$	$1.78 \cdot 10^{-4}$
Vírová hluboká tyč	Cu	$8.40 \cdot 10^{-6}$	$9.59 \cdot 10^{-5}$	$9.62 \cdot 10^{-5}$	$1.54 \cdot 10^{-4}$	$1.84 \cdot 10^{-4}$	$2.40 \cdot 10^{-4}$
	Al	$8.40 \cdot 10^{-6}$	$1.61 \cdot 10^{-4}$	$1.61 \cdot 10^{-4}$	$2.60 \cdot 10^{-5}$	$2.27 \cdot 10^{-4}$	$2.29 \cdot 10^{-4}$
Dvojitá mimoosá tyč		$8.30 \cdot 10^{-6}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$5.79 \cdot 10^{-4}$	$1.14 \cdot 10^{-3}$	$1.28 \cdot 10^{-3}$
Dvojitá sousá tyč		$1.24 \cdot 10^{-4}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$1.04 \cdot 10^{-3}$	$2.64 \cdot 10^{-3}$	$1.73 \cdot 10^{-3}$	$3.15 \cdot 10^{-3}$

Tabulka č. 9 ukazuje, že například rozběhová impedance sousé varianty je vyšší a to 2,46 x než impedance mimoosé, dále rozběhová impedance vírové hluboké je 2,37 x vyšší než vírové mělké, obě v provedení měď a například vírová zadaná v hliníku má 1,27 x vyšší rozběhovou impedanci než vírová zadaná v mědi. Je zde také na první pohled překvapující výsledek: vírová hluboká tyč má větší rozběhovou impedanci v provedení měď oproti provedení v hliníku. Toto je pochopitelné z důvodu menší vodivosti hliníku, což jsme dokázali a vysvětlili v odstavci 4.2.2. Pokud chceme srovnávat impedance ve jmenovitém stavu, lze vysledovat, že vírové tyče v provedení hliník mají vyšší impedanci než v provedení měď. To je výsledek očekávaný, protože ve jmenovitém stavu převládá činný odpor nad reaktancí, proto v tomto stavu určují velikost impedance materiálové vlastnosti. Sestrojením grafu (obr. 4.18) dostaneme představu o velikostech impedancí a tím i představu o rozběhových proudech a záběrných momentech, ale také o ztrátách ve jmenovitém stavu a tvrdosti stroje.



Obrázek 4.18: Ukazuje hodnoty impedancí pro jednotlivé rotorové tyče

Jak je možné vidět v grafu, při návrhu rotorové tyče jsou důležité nejen tvary, ale i konstrukční materiály a prostorové rozložení tyčí. Pokud by například projektant potřeboval stroj s velice tvrdou charakteristikou a vysokou účinností, musel by pracovat dle tabulky a grafu například s měděnou mělkou tyčí, kde může očekávat malý záběrný moment s velkým rozběhovým proudem, čímž musí při rozběhu počítat s proudovým rázem do sítě. Při zachování požadavku na účinnost, tvrdost a přidáním požadavku na větší záběrný moment by se mohl navrhnout stroj s měděnou hlubokou tyčí, kde oproti předcházející variantě rozběhový proud poklesne. Takto by se dalo pokračovat u dalších variant.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Uhlíř, I.: *Elektrické stroje a pohony*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2002. ISBN 80-01-02482-2.
- [2] Bartoš, V.: *Teorie elektrických strojů*. Západočeská univerzita v Plzni 2006. ISBN 80-7043-509-7
- [3] Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I.: *Teorie elektrických strojů*. Vydalo SNTL, Praha 1, 1968
- [4] http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf
- [5] https://portal.zcu.cz/wps/PA_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=40744
- [6] <http://www.femm.info/wiki/HomePage>