

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh lineárního indukčního stroje se vznášivým účinkem

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří SVÍTEK**
Osobní číslo: **E09N0241P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Návrh lineárního indukčního stroje se vznášivým účinkem**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Uveďte principy lineárního indukčního motoru se vznášivým účinkem.
2. Navrhněte lineární indukční motor se vznášivým účinkem dle požadovaných parametrů.
3. Zhodnoťte možnosti použití lineárního indukčního motoru se vznášivým účinkem.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

1. BAŠTA, J.; CHLÁDEK, J.; MAYER, I.: Teorie elektrických strojů

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Karel Hruška**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh lineárního indukčního stroje se vznášivým účinkem. Obsahuje postup výpočtu vznášivé a tažné síly, výpočet základních hodnot, návrh vinutí, drážky a výpočet náhradního schématu stroje. Stroj byl navržen a modelován v programu FEMM. Výsledky modelu jsou porovnány s navrženými a vypočtenými hodnotami.

Klíčová slova

Lineární stroj, vinutí, drážka, zub, jho, magnetické pole, magnetická indukce, vznášivá síla, tažná síla, simulace, FEMM

Abstract

The thesis presents the design of the linear induction machine with the hovering effect. It contains the process of the calculation of hovering and towing power, the calculation of basic values, the design of winding and groove, the calculation of the equivalent circuit of the machine. The machine was proposed and modeled in software FEMM. The results of the model are compared with the proposed and calculated values

Key words

Linear machine, winding, groove, tooth, yoke, magnetic field, magnetic induction, hovering power, towing power, simulation, FEMM

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 22.3.2012

Jiří Svítek

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Karlovi Hruškovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během mého studia na vysoké škole.

Obsah

OBSAH.....	8
ÚVOD.....	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
TEORIE	13
1.1 PRINCIP LINEÁRNÍHO MOTORU.....	13
1.1.1 <i>Asynchronní lineární motor.....</i>	<i>14</i>
1.1.2 <i>Synchronní lineární motor.....</i>	<i>14</i>
1.1.3 <i>Stejnoseměrné lineární motory.....</i>	<i>15</i>
1.2 MAGNETICKÁ LEVITACE.....	16
1.2.1 <i>Magnetická levitace s permanentními magnety.....</i>	<i>16</i>
1.2.2 <i>Magnetické levitace s použitím diamagnetika.....</i>	<i>17</i>
1.2.3 <i>Levitace transformační.....</i>	<i>18</i>
1.2.4 <i>Elektromagnetická levitace.....</i>	<i>18</i>
1.2.5 <i>Elektrodynamická levitace.....</i>	<i>19</i>
2 VÝPOČET	20
2.1 NAVRŽENÉ PARAMETRY STROJE	20
2.2 VÝPOČET TAŽNÉ A VZNÁŠIVÉ SÍLY	20
2.3 VÝPOČET PARAMETRŮ MAGNETICKÉHO POLE.....	22
2.4 NÁVRH VINUTÍ.....	23
2.5 NÁVRH DRÁŽKY A VODIČŮ V DRÁŽCE	24
2.6 VÝPOČET PARAMETRŮ VINUTÍ.....	26
2.7 VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVODU	28
2.8 VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU	31
2.8.1 <i>Odpor vinutí statoru.....</i>	<i>31</i>
2.8.2 <i>Rozptylové reaktance vinutí.....</i>	<i>34</i>
3 MODEL NAVRŽENÉHO STROJE V PROGRAMU FEMM.....	37
ZÁVĚR.....	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	41
PŘÍLOHY	1

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh lineárního indukčního stroje se vznášivým účinkem.

Text je rozdělen do tří částí.

První část se zabývá teorií lineárních motorů a magnetické levitace. Jsou v ní popsány principy asynchronních, synchronních a stejnosměrných lineárních motorů. Jejich využití v praxi, výhody a nevýhody. Dále je zde popsán princip magnetické levitace. Popis levitace s permanentními magnety, levitace s použitím feromagnetika, transformační levitace, elektromagnetická a elektrodynamická levitace.

V druhé části je popsán samotný návrh lineárního indukčního motoru se vznášivým účinkem. Jsou zde uvedeny navržené parametry stroje ze kterých vychází samotný výpočet. Dále je zde uveden výpočet tažné a vznášivé síly, výpočet parametrů magnetického obvodu, návrh vinutí, drážky a vodičů, výpočet magnetického obvodu a výpočet náhradního schématu.

Třetí část se zabývá modelováním navrženého a vypočítaného stroje v programu FEMM.

Seznam symbolů a zkratek

A	Lineární proudová hustota	A/m
a	Počet paralelních větví vinutí	-
A_m	Amplituda povrchové proudové hustoty	A/m
b	Šířka soupravy	m
B	Délka přímé části cívky při výstupu z drážky	m
b	Šířka mědi cívky v čele	m
B'_{zl}	Magnetická indukce v hlavě zubu	T
b_c	Střední šířka cívky	m
b_d	Šířka drážky	m
b_v	Šířka vodiče	m
B_δ	Indukce ve vzduchové mezeře	T
C	Essovův činitel	VA/m ³ ot/min
f	Frekvence napájení	Hz
F_m	Celkové magnetické napětí	A
F_x	Tažná síla	N/m ²
F_y	Vznášivá síla	N/m ²
h_d	Hloubka drážky statoru	m
H_{jl}	Intenzita magnetického pole ve jhu statoru	A/m
h_{js}	Výška jha statoru	m
h_v	Výška vodiče	m
h_z	Výška zubu statoru	m
H_z	Intenzita magnetického pole v zubech	A/m
I_1	Fázový proud	A
I_v	Proud vodičem	A
I_μ	Magnetizační proud	A
J	Hustota proudu	A/m ²
k	Vlnové číslo	1/m
k_\sim	Činitel zvětšení odporu působením povrchového jevu	-
k_B	Činitel tvaru pole	-
k_c	Carterův činitel	-

k_E	Činitel pro indukované napětí	-
k_{Fe}	Činitel plnění železa	-
k_v	Činitel vinutí	-
k_μ	Činitel nasycení magnetického obvodu	-
l	Délka soupravy	m
L	Celková délka efektivních vodičů	m
l_{av}	Střední délka závitu vinutí	m
l_ξ	Délka čela vinutí	m
l_d	Délka drážkové části vinutí	m
l_e	Efektivní délka stroje	m
l_{j1}	Délka střední magnetické indukční čáry ve jhu statoru	m
l_v	Vyložení čel vinutí	m
m	Hmotnost soupravy	kg
m_f	Počet fází	-
n_d	Počet vodičů v drážce	-
N_p	Počet paralelních vodičů	-
N_s	Počet závitů jedné fáze v sérii	-
p	Počet pólových dvojic	-
P_i	Elektromagnetický výkon stroje	W
Q	Počet drážek	-
q	Počet drážek na pól a fázi	-
Q_p	Počet drážek na pól	-
R_1	Odpor vinutí statoru	Ω
s	Rychlost pohybu proudové vlny vzhledem k vodivému materiálu -	
S	Zdánlivý výkon	VA
S	Přípustná vzdálenost mezi mědi vodičů sousední cívky	m
S_{ef}	Průřez efektivního vodiče	m^2
S_v	Průřez vodiče	m^2
td_1	Drážková rozteč	m
t_p	Pólová rozteč	m
U_f	Fázové napětí	V
U_i	Indukované napětí	V

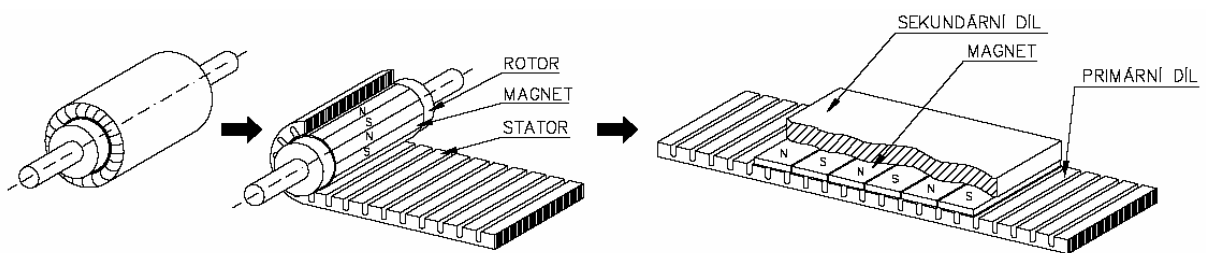
U_{mj}	Magnetické napětí ve jhu statoru	A
U_{mz}	Magnetické napětí v zubech	A
$U_{m\delta}$	Magnetické napětí ve vzduchové mezeře	A
U_n	Napájecí napětí	V
v	Rychlost stroje	m/s
v_f	Rychlost postupné vlny	m/s
X_σ	Rozptylová reaktance vinutí	Ω
y	Krok vinutí	-
z_1	Šířka zubu	m
α_δ	Činitel pólového krytí	-
β	Poměrné zkrácení kroku	-
γ_{Al}	Měrná elektrická vodivost hliníku	S/m
γ_{Cu}	Měrná elektrická vodivost mědi	S/m
δ	Vzduchová mezera	m
δ_{Al}	Hloubka vniku pro hliník	-
δ_{Cu}	Hloubka vniku pro měď	-
λ	Vlnová délka postupné vlny	m
λ	Činitel magnetické vodivosti	-
λ_ε	Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel	-
λ_d	Činitel magnetického drážkového rozptylu	-
λ_{dif}	Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu	-
μ_0	Relativní permeabilita vákua	-
ρ_θ	Rezistivita vinutí při uvažované teplotě	$\Omega.m$
Φ	Magnetický tok	Wb
ω	Úhlová rychlost	rad.s ⁻¹
EMS	Elektromagnetická levitace	
EDS	Elektrodynamická levitace	

Teorie

Lineární indukční stroj se vznášivými účinky využívá dva hlavní principy. Prvním je princip lineárního motoru a druhým je princip magnetické levitace. Lineární motory jsou založeny na stejných funkčních principech jako střídavé točivé motory. Jen s tím rozdílem, že místo otáčivého magnetického pole dostáváme pole postupné. Pojem magnetická levitace znamená stabilní umístění tělesa v prostoru bez jakéhokoliv kontaktu tohoto tělesa s pevnou zemí.

1.1 Princip lineárního motoru

První zmínky o lineárních motorech se objevily už na počátku devadesátých let 19. století. Jak už bylo zmíněno, lineární motor pracuje na stejném funkčním principu, jako střídavý točivý stroj. Můžeme si ho představit jako rozvinutý rotor a stator klasického točivého střídavého stroje do roviny. Tento postup je zobrazen na Obr. 1.1. Tím získáme z otáčivého magnetického pole klasických střídavých točivých strojů pole postupné. Stator zůstává nadále tvořen feromagnetickým svazkem složeným z elektrotechnických plechů a třífázovým vinutím uloženým v drážkách. Rotor je v případě asynchronního motoru ve formě klece nakrátko, v případě synchronního motoru je tvořen permanentními magnety. Stator je zpravidla u lineárních motorů označován za primární část stroje, rotor za sekundární část. Požadovanou délku lineárního motoru získáme sériovým spojením takto vytvořených rotorů či statorů. Podle konstrukce poháněného zařízení se bude rozhodovat která část lineárního motoru se bude pohybovat, zdali rotor či stator. Zásadní výhodou těchto pohonů je absence převodového ústrojí pro převod točivého momentu na posuvný. Dalšími výhodami jsou dobrá dynamika a velká přesnost.



Obr 1.1. Stavba lineárního motoru [8]

1.1.1 Asynchronní lineární motor

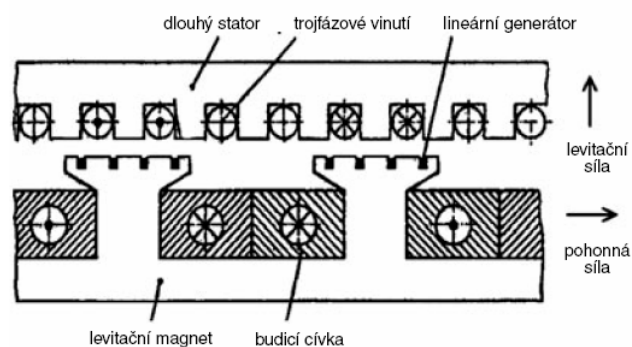
Asynchronní lineární motor se též nazývá lineární indukční motor. Tento typ lineárního motoru je nejčastěji používán. Existují dvě varianty provedení těchto motorů, provedení s krátkým a s dlouhým statorem. V provedení s dlouhým statorem je rozvinutý stator vytvořen po celé délce jízdní dráhy poháněného objektu a rotor je umístěn na něm [6].

V provedení s krátkým statorem je rotor jízdní dráhou a stator se stává poháněným tělesem. Uspořádání s krátkým statorem je výhodné pro lineární indukční motory. Nemusíme stavět ekonomicky náročný dlouhý stator, ale stačí na jízdní dráhu uložit úzký pruh vodivého materiálu (například hliník), který nám pro funkci pohonu postačí. Ušetří se tak na materiálu a nemusíme tuto desku zásobovat elektrickou energií.

V praxi se z důvodu snížení nákladů vyrábějí především lineární indukční motory s krátkým statorem. Stator je tvořen rozvinutým třífázovým statorem umístěným na spodku pohybujícího se objektu. Postupné pole jím vytvářené indukuje ve vodičích rotoru umístěného v jízdní dráze proudy, které vytvářejí magnetické pole interagující s polem statoru [6]. Výsledkem této interakce je pohyb statoru nad jízdní dráhou ve směru opačném, nežli je jeho postupné magnetické pole [6]. Napájecí frekvence řídí rychlost tohoto pole, a tím se řídí i rychlost pohybujícího se objektu.

1.1.2 Synchronní lineární motor

Rotor lineárního synchronního stroje může tvořit buď soustava elektromagnetů nebo soustava permanentních magnetů [6]. Rotor je tlačěn postupným magnetickým polem statoru vpřed ve směru pohybu tohoto pole. Aby nedocházelo k velkým ztrátám při provedení s dlouhým statorem je vždy napájena jen ta část dráhy na které se zrovna nalézá rotor synchronního lineárního motoru. Rychlost motoru lze regulovat dvěma způsoby, frekvencí napájení statoru,



Obr. 1.2. Uspořádání lineárního synchronního motoru s dlouhým statorem

nebo uzpůsobením jeho konstrukce.

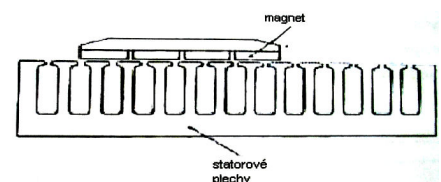
Řízení regulací frekvence je výhodnější. Konstrukce statoru je po celé délce jízdní dráhy stejná, výroba se tam může stát sériovou a lze ji automatizovat. Tím se náklady na výrobu snižují. Nevýhodou je potřeba drahých měření frekvence, které musí být umístěny po celé délce trati a které musí být řízeny.

Řízení rychlosti pomocí uzpůsobení konstrukce statoru je možné pouze u posuvu poháněného objektu vždy po stejné dráze a se stejnými dynamickými vlastnostmi. Tato koncepce probíhá změnou pólové rozteče mezi póly statoru. Tato konstrukce je náročná na výrobu, protože po celé délce trati se jen minimálně vyskytují úseky se stejnou pólovou roztečí. Výhodou je absence drahých měření frekvence podél trati, neboť stačí napájet tento stator klasickými transformátory.

1.1.3 Stejnoseměrné lineární motory

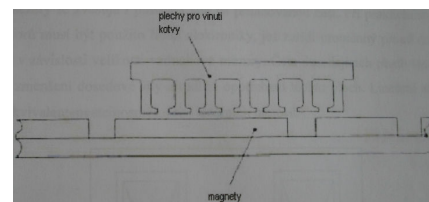
První stejnosměrný lineární motor byl zkonstruován v roce 1917 [5]. Stejnoseměrné lineární motory se skládají jako stejnosměrné točivé stroje z kotvy a budící soustavy. Kotva u lineárních strojů je napevno a pohyblivá část je tvořena budící soustavou. Kotva je obvykle složena z kruhových tyčí vyrobených z feromagnetického materiálu s tenkou vrstvou měděného drátu navinutého těsně na nich [5]. Tato vrstva měděného drátu se chová jednak jako vinutí na kotvě a jednak jako komutátor [5]. Stejnoseměrné lineární motory dělíme podle pohyblivých částí na motory s pohyblivým magnetem, s pohyblivou kotvou a s pohyblivými cívkami.

Lineární motory s pohyblivým magnetem se skládají z pohyblivého magnetu a magnetického obvodu složeného ze statorových plechů. Přes tento magnetický obvod protéká magnetický tok. Toto řešení je konstrukčně jednoduché. Aby nebyl magnet přitahován k Magnetickému obvodu, musíme použít řešení se dvěma statory. Každý stator bude umístěn na opačné straně pohyblivého magnetu, tím se vyruší vliv sil působících ve směru kolmém ke směru pohybu.



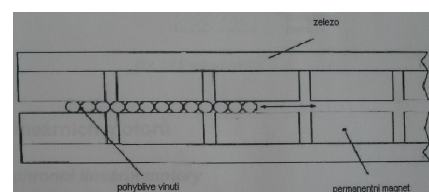
Obr. 1.3. Motor s pohyblivým magnetem [5]

Lineární motory s pohyblivou kotvou mají pohyblivé části a vinutí kratší než stator. Stator těchto strojů se skládá z dlouhé skupiny magnetů. Tyto magnety jsou uloženy na pevné podložce. Motory s pohyblivou kotvou mají větší účinnost než motory s pohyblivým magnetem. K jejich konstrukci je ale zapotřebí větší počet magnetů.



Obr. 1.4. Motor s pohyblivou kotvou [5]

Lineární motor s pohyblivými cívkami je podobný motoru s pohyblivou kotvou, jen s rozdílem, že zde jsou pohyblivé pouze cívky. Magnety jsou rozloženy rovnoměrně po obou stranách motoru, avšak přesto se magnetické toky navzájem neruší [5]. Tento typ motoru s odlehčenou kotvou má nejmenší setrvačnou sílu [5].



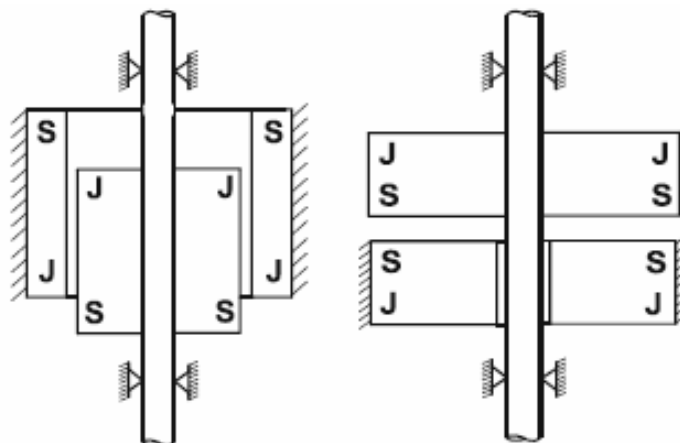
Obr. 1.5. Motor s pohyblivými cívkami [5]

1.2 Magnetická levitace

Levitace znamená stabilní umístění levitovaného objektu v prostoru bez jakéhokoliv kontaktu tohoto objektu s pevnou zemí. Magnetická levitace je umístění objektu v prostoru pomocí magnetického pole. Hlavní výhodou magnetické levitace je absence kontaktu levitujícího objektu s pevným podkladem. Tím nám odpadají komplikace s mechanickým pohybem objektu po podkladu, sníží se hlučnost při provozu a zvýší se spolehlivost. Magnetické levitační systémy jsou založeny na různých fyzikálních principech [4].

1.2.1 Magnetická levitace s permanentními magnety

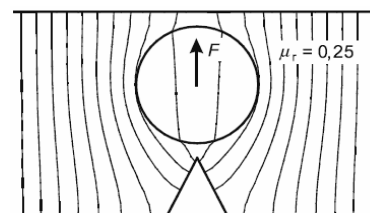
Základní ideou tohoto principu je odpuzování (přitahování) souhlasných (opačných) pólů permanentních magnetů [6]. Na Obr. 1.6 jsou zobrazeny dva způsoby magnetické levitace pomocí permanentních magnetů. Tato zařízení však nesplňují celkovou podstatu levitace, protože není splněna podmínka neexistence kontaktu levitovaného objektu s pevnou zemí, je totiž nutné zajistit polohu rotoru vodičnými ložisky, aby byla tato poloha stabilní. Tento typ magnetické levitace se využívá pro výrobu levitovaných ložisek.



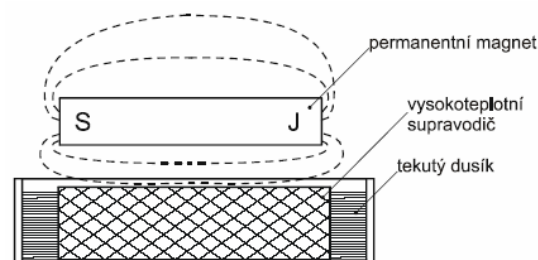
Obr. 1.6. Dva způsoby levitace pomocí permanentních magnetů [4]

1.2.2 Magnetické levitace s použitím diamagnetika

Diamagnetické materiály mají tu vlastnost, že ze svého objemu vypuzují nehomogenní magnetické pole. Tato vlastnost je zobrazena na Obr. 1.7. Vložíme-li tedy diamagnetické těleso do nehomogenního magnetického pole, bude z tohoto pole vypuzováno. Bude-li hmotnost tělesa a vypuzovací magnetická síla v rovnováze, zaujme toto těleso stabilní polohu. Aby byla vypuzující (levitační) síla dostatečně velká, nemůžeme použít materiály které se vyskytují volně v přírodě. Tyto materiály mají relativní permeabilitu jen o málo menší než jedna. Proto se pro levitaci s použitím diamagnetik používají supravodiče, jejichž relativní permeabilita se blíží nule. To znamená že se supravodič chová jako ideální diamagnetikum a je-li zdrojem nehomogenního magnetického pole permanentní magnet, působí na supravodič dostatečně veliká odpudiví síla a volně uložený magnet nad supravodičem je levitován. Tento jev se nazývá Meissnerův jev a je zobrazen na Obr. 1.8.



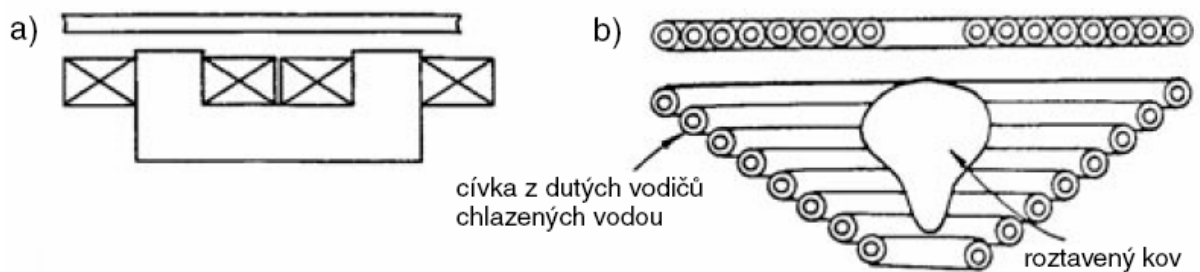
Obr. 1.7. Diamagnetikum vložené do nehomogenního magnetického pole



Obr. 1.8. Levitace permanentního magnetu nad supravodičem [4]

1.2.3 Levitace transformační

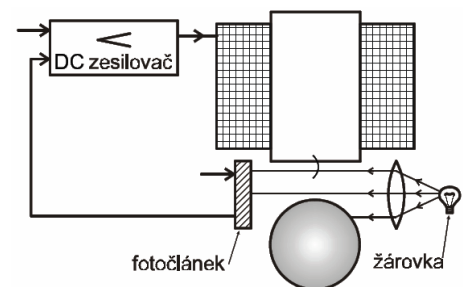
Vloží-li se do střídavého magnetického pole vybuzeného cívkou elektricky vodivé těleso, indukuje se v něm transformační napětí, které vyvolá vířivé proudy [4]. Tyto proudy jsou svým magnetickým polem v interakci s magnetickým polem budící cívky a levitují svého nositele, tj. vodivé těleso [4]. Transformační levitace se využívá k levitaci roztaveného kovu v indukční peci. Princip transformační levitace je zobrazen na Obr. 1.9.



Obr. 1.9. Princip transformační levitace a) levitace měděného kotouče, b) levitace roztaveného kovu v indukční peci [4]

1.2.4 Elektromagnetická levitace

Elektromagnetická levitace – EMS (Electro – Magnetic Suspension), jinak též levitace přitahováním. Princip je založen na magnetickém působení mezi feromagnetickým tělesem a elektromagnetem. Budeme-li uvažovat stejnosměrný elektromagnet, který bude přitahovat volně uložené feromagnetické těleso, bude se jednat o levitaci Obr. 1.10. Systém EMS s regulací [4] nestabilní. Pokud by došlo k vychýlení tělesa



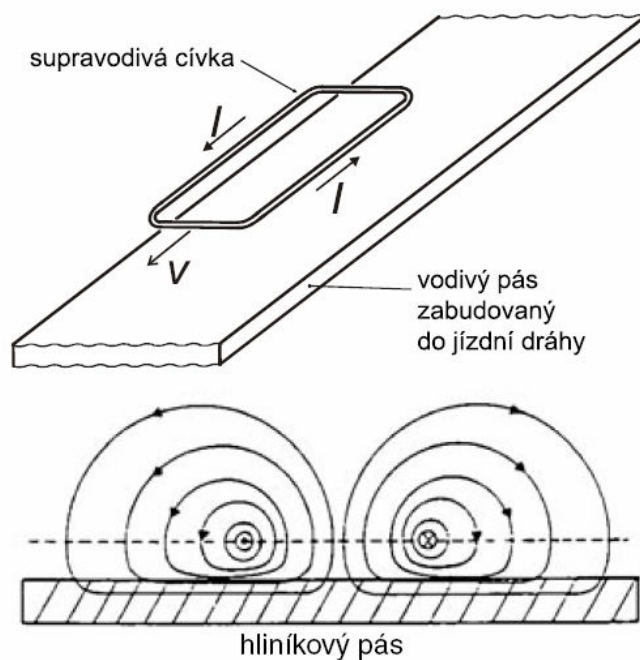
zavěšeného v magnetickém poli elektromagnetu z rovnovážné polohy, došlo by k odpadnutí nebo k přitažení tohoto tělesa. Pro dosažení stabilní levitace je potřeba trvalá regulace polohy, aby bylo dosaženo stálé rovnováhy mezi magnetickým tahem a hmotností tělesa. Jednoduchá

regulace pro systém EMS je zobrazena na Obr. 1.10. Hlavní výhodou EMS je, že objekt může levitovat i v klidovém stavu. Není zapotřebí supravodičů, proto není zapotřebí kryotechnického zařízení, čímž je tento systém levnější.

1.2.5 Elektrodynamická levitace

Elektrodynamická levitace – EDS

(Elektro – Dynamic Suspension), jinak též levitace odpuzováním, je založená na dynamickém chování dvou na sebe působících těles. Princip je založen na odpuzování permanentního magnetu (popřípadě elektromagnetu) od pohybujícího se vodivého pásu. Uvažujme permanentní magnet s dostatečnou intenzitou magnetického pole pohybující se nad hliníkovým pásem [6]. Pohyb magnetického pole takového magnetu indukuje do vodivého pásu vířivé proudy, které vyvolávají magnetické pole o opačné polaritě nežli je pole, které tyto proudy vyvolalo [6]. Interakcí mezi magnetickým polem magnetu a magnetickým polem vířivých proudů vzniká vznášivá síla působící na magnet. Zároveň však vzniká síla, která brzdí pohyb permanentního magnetu v před [6]. Tato síla se musí překonat, aby nedošlo k zastavení permanentního magnetu. Z principu je zřejmé, že k levitaci nemůže dojít, pokud bude těleso oproti podkladu v klidu.



Obr. 1.11. Princip EDS se supravodivým elektromagnetem [4]

2 Výpočet

2.1 Navržené parametry stroje

Délka soupravy : $l = 24m$

Šířka soupravy : $b = 2,8m$

Hmotnost soupravy : $m = 8000kg$

Rychlost stroje : $v = 150m / s$

Frekvence napájení : $f = 126,6Hz$

Vzduchová mezera : $\delta = 0,01m$

Pólová rozteč : $t_p = 0,6m$

Napájecí napětí : $U_n = 45000V$

Počet fází : $m_f = 3$

Účinnost : $\cos \varphi = 0,8$

2.2 Výpočet tažné a vznášivé síly

Pro výpočet vznášivé síly vycházíme ze vztahu

$$F_y = - \frac{A_m^2 \mu_0 s \cdot \operatorname{Re} \sqrt{-1 + js}}{4 \left[\left(\sqrt{1 + s^2} \cosh^2 k\delta + \sinh^2 k\delta \right) \operatorname{Re} \sqrt{1 + js} + \left(1 + \sqrt{1 + s^2} \right) \sinh k\delta \cdot \cosh k\delta \right]} \quad (2.1)$$

kde k je vlnové číslo vyjádřené vztahem

$$k = \frac{\pi}{t_p} = \frac{\pi}{0,6} = 5,236(1/m) \quad (2.2)$$

s je bezrozměrný parametr úměrný rychlosti pohybu proudové vlny vzhledem k vodivému materiálu, má tedy podobný význam jako skluz v indukčním motoru, není s ním však číselně shodný [1] a je dán vztahem

$$s = \frac{\gamma_{Cu} \cdot \mu_0}{k^2} \cdot (\omega - k \cdot v) = \frac{55,56 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{5,236^2} \cdot (795,451 - 5,236 \cdot 150) = 25,602 \quad (2.3)$$

Úhlová rychlost $\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 126,6 = 795,451 \text{ rad / s}$

Požadovanou vznášivou sílu získáme ze vztahu

$$F_y = \frac{m \cdot g}{l \cdot b} = \frac{8000 \cdot 9,80665}{24 \cdot 2,8} = 1167,458 \text{ N / m}^2 \quad (2.4)$$

Ze vztahu (2.1) získáme amplitudu lineární proudové hustoty

$$\begin{aligned} A_m &= \sqrt{\frac{4 \cdot F_y \cdot \left[\left(\sqrt{1+s^2} \cosh^2 k\delta + \sinh^2 k\delta \right) \operatorname{Re} \sqrt{1+js} + \left(1 + \sqrt{1+s^2} \right) \sinh k\delta \cdot \cosh k\delta \right]}{\mu_0 s \cdot \operatorname{Re} \sqrt{-1+js}}} = \\ &= \sqrt{\frac{4 \cdot 1167,458 \cdot \left[\left(\sqrt{1+25,602^2} \cdot \cosh^2 5,236 \cdot 0,01 + \sinh^2 5,236 \cdot 0,01 \right) \right]}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \operatorname{Re} \sqrt{-1+j25,602}}} \quad (2.5) \\ &= \sqrt{\frac{4 \cdot 1167,458 \cdot \left[\operatorname{Re} \sqrt{1+j25,602} + \left(1 + \sqrt{1+25,602^2} \right) \sinh 5,236 \cdot 0,01 \cdot \cosh 5,236 \cdot 0,01 \right]}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \operatorname{Re} \sqrt{-1+j25,602}}} = \\ &= 63045 \text{ A / m} \end{aligned}$$

Pro výpočet tažné síly použijeme vztah

$$\begin{aligned} F_x &= - \frac{A_m^2 \mu_0 s}{4 \left[\left(\sqrt{1+s^2} \cosh^2 k\delta + \sinh^2 k\delta \right) \operatorname{Re} \sqrt{1+js} + \left(1 + \sqrt{1+s^2} \right) \sinh k\delta \cdot \cosh k\delta \right]} = \\ &= - \frac{63045 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 25,602}{4 \cdot \left[\left(\sqrt{1+25,602^2} \cdot \cosh^2 5,236 \cdot 0,01 + \sinh^2 5,236 \cdot 0,01 \right) \right]} \quad (2.6) \\ &= - \frac{63045 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 25,602}{4 \cdot \left[\operatorname{Re} \sqrt{1+j25,602} + \left(1 + \sqrt{1+j25,602^2} \right) \sinh 5,236 \cdot 0,01 \cdot \cosh 5,236 \cdot 0,01 \right]} = \\ &= -332,735 \text{ N / m}^2 \end{aligned}$$

Lineární proudová hustota je rovna

$$A = \frac{A_m}{\sqrt{2}} = \frac{63045}{\sqrt{2}} = 44579 \text{ A / m}$$

2.3 Výpočet parametrů magnetického pole

Volíme indukci ve vzduchové mezeře $B_\delta = 0,9T$

Činitel pólového krytí, který je při sinusovém rozložení indukce po délce pólové rozteče stroje s rozloženým vinutím dán vztahem

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} = 0,637 \quad (2.7)$$

Poměr efektivní hodnoty indukce ke střední hodnotě, nebo-li činitel tvaru pole je pro magnetickou indukci ve vzduchové mezeře stroje se sinusovým průběhem

$$k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11 \quad (2.8)$$

Volíme činitel pro indukované napětí $k_E = 0,9$

Vlnová délka postupné vlny, která je rovna pólpárové rozteči je dána vztahem

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{5,236} = 1,2m \quad (2.9)$$

Rychlost postupné vlny určíme ze vztahu

$$v_f = -\frac{\omega}{k} = \frac{795,451}{5,236} = -151,92m/s \quad (2.10)$$

Elektromagnetický vnitřní výkon stroje

$$P_i = \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A \cdot k_v \cdot k_B \cdot b \cdot l \cdot v = 0,637 \cdot 0,9 \cdot 44579 \cdot 0,933 \cdot 1,11 \cdot 2,8 \cdot 24 \cdot 150 = 266,81MW \quad (2.11)$$

Zdánlivý výkon stroje

$$S = \frac{P_i}{k_E} = \frac{266,81 \cdot 10^6}{0,9} = 296,455MVA \quad (2.12)$$

Fázový proud určíme ze vztahu

$$I_1 = \frac{S}{U_n \cdot \sqrt{3}} = \frac{296,455 \cdot 10^6}{45000 \cdot \sqrt{3}} = 3,8035 \text{ kA} \quad (2.13)$$

2.4 Návrh vinutí

Volíme počet pólových dvojic $p = 20$ z toho vychází počet pólů $2p = 40$

Dále volíme počet paralelních větví vinutí $a = 5$

S ohledem na délku stroje a na napájecí napětí volíme drážkovou rozteč $td_1 = 100 \text{ mm}$

Počet drážek

$$Q = \frac{l}{td_1} = \frac{24}{0,1} = 240 \quad (2.14)$$

Počet drážek na pól a fázi

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} = \frac{240}{40 \cdot 3} = 2 \quad (2.15)$$

Počet závitů jedné fáze v sérii

$$N_s = \frac{l \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_1} = \frac{24 \cdot 44579}{2 \cdot 3 \cdot 3,8035 \cdot 10^3} = 46,882 \quad (2.16)$$

Počet vodičů v drážce určíme ze vztahu

$$n_d = \frac{a \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{5 \cdot 46,882}{20 \cdot 2} = 5,86 \quad (2.17)$$

Volíme počet vodičů v drážce $n_d = 6$

Počet závitů jedné fáze určený z počtu vodičů v drážce

$$N_s = \frac{n_d \cdot p \cdot q}{a} = \frac{6 \cdot 20 \cdot 2}{5} = 48 \quad (2.18)$$

Skutečná hodnota lineární proudové hustoty je dána vztahem

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1 \cdot N_s}{l} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 3,8035 \cdot 10^3 \cdot 48}{24} = 45642 A/m \quad (2.19)$$

2.5 Návrh drážky a vodičů v drážce

Při návrhu uvažujeme otevřenou obdélníkovou drážku tvaru M

Při zvolené drážkové rozteči td_1 vychází šířka zubu

$$z_1 = \frac{B'_\delta \cdot td_1}{B'_{z_1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,9 \cdot 0,1}{1,7 \cdot 0,92} = 57,54 mm \quad (2.20)$$

kde B'_{z_1} je zvolená hodnota magnetické indukce v hlavě zubu, v našem případě $B'_{z_1} = 1,7 T$

k_{Fe} je činitel plnění železa, v našem případě $k_{Fe} = 0,92$

Tomu odpovídá šířka drážky

$$b_d = td_1 - z_1 = 100 - 57,54 = 42,46 mm \quad (2.21)$$

Zvolíme si šířku drážky $b_d = 43 mm$

Skutečná šířka zubu poté bude

$$z_1 = td_1 - b_d = 100 - 43 = 57 mm$$

Při návrhu výšky vodiče vycházíme z výpočtu hloubky vniku pro měď při napájecí frekvenci

$$\delta_{Cu} = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma_{Cu}}} = \sqrt{\frac{2}{795,451 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 55,56 \cdot 10^6}} = 0,006 m \quad (2.22)$$

Volíme tedy výšku vodiče $h_v = 6mm$

Zvolíme si izolaci vodiče $h_i = 8mm$, kterou jsme získaly z datasheetu viz. Příloha 1, pro vyráběné kabely pro vvn napájení, a vyložení drážky $t_i = 1mm$

Šířka vodiče je pak dána vztahem

$$b_v = b_d - 2 \cdot t_i - 2 \cdot h_i = 43 - 2 \cdot 1 - 2 \cdot 8 = 25mm \quad (2.23)$$

Průřez tohoto vodiče je

$$S_v = b_v \cdot h_v = 25 \cdot 6 = 150mm^2 \quad (2.24)$$

Hustotu proudu ve vodiči určíme z proudové zatížitelnosti kabelu I_{org} a průřezu kabelu D_{org} které jsme získali z datasheetu viz. Příloha 1

$$J = \frac{I_{org}}{\pi \cdot \left(\frac{D_{org}}{2}\right)^2} = \frac{192}{\pi \cdot \left(\frac{9,4}{2}\right)^2} = 2,77 A / mm^2 \quad (2.25)$$

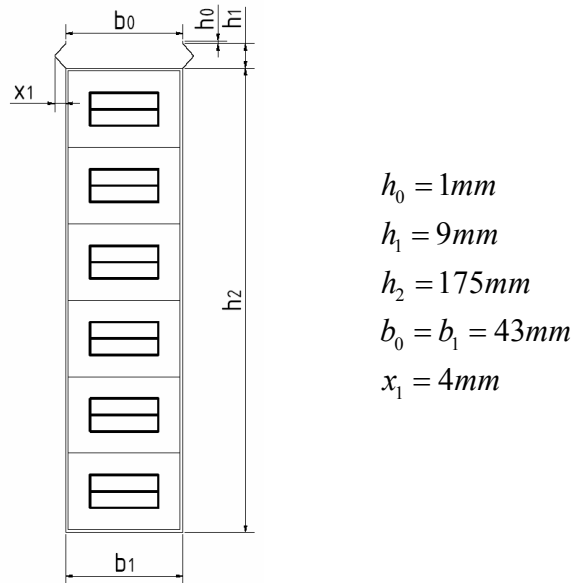
Z této hustoty proudu získáme proud, který protéká vodičem

$$I_v = J \cdot S_v = 2,77 \cdot 150 = 415,5 A \quad (2.26)$$

Zjistíme potřebný počet paralelních vodičů

$$N_p = \frac{I_1}{I_v} = \frac{3803,5}{415,5} = 1,83 \quad \text{volíme } N_p = 2 \quad (2.27)$$

Na obrázku (2.1) je zobrazena navržená drážka s izolací, vodiči a s vypočtenými rozměry



Obr. 2.1. Navržená drážka tvaru M

2.6 Výpočet parametrů vinutí

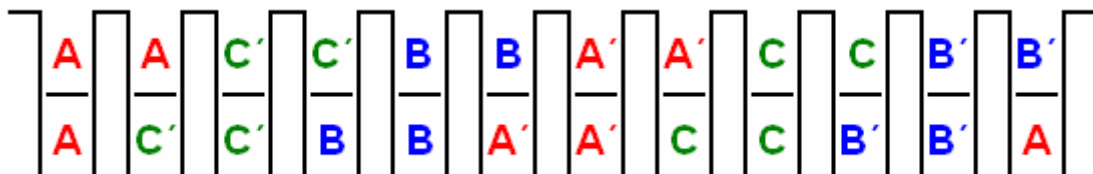
Vypočteme počet drážek na pól

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{240}{40} = 6 \tag{2.27}$$

Zvolíme si krok vinutí $y = 3$

Z tohoto kroku vinutí získáme cívkový krok

$$y_{1d} = \frac{y}{t_p} = \frac{3}{0,6} = 5 \tag{2.28}$$



Obr. 2.2. Schématické zobrazení rozložení vinutí

Poměrné zkrácení kroku je dáno vztahem

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{5}{6} = 0,833 \quad (2.29)$$

Činitel vinutí získáme ze vztahu

$$k_v = k_y \cdot k_r \quad (2.30)$$

kde k_y je činitel zkrácení kroku, uvažující zmenšení napětí indukovaného v závitu vlivem zkrácení kroku [2], a je dán vztahem

$$k_y = \sin\left(\frac{y_{1d}}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(\frac{5}{6} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,966 \quad (2.31)$$

k_r je činitel rozlohy, uvažující zmenšení indukovaného napětí vlivem rozložení vinutí do více drážek [2], a je dán vztahem

$$k_r = \frac{\sin\left(\frac{q}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{1}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{2}{6} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{1}{6} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} = 0,966 \quad (2.32)$$

Po dosazení do vzorce (2.30) dostaneme hodnotu činitele vinutí

$$k_v = k_y \cdot k_r = 0,966 \cdot 0,966 = 0,933$$

Dále určíme hodnotu Essonova činitele elektromagnetického využití stroje

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} AB_\delta k_{v1} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} 45,642 \cdot 0,9 \cdot 0,933 = 4458 VA / m^3 \cdot ot / min \quad (2.33)$$

Hodnotu magnetického toku v obvodu získáme ze vztahu

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_f}{4,44 \cdot f \cdot N_s \cdot k_v} = \frac{0,9 \cdot 25980,76}{4,44 \cdot 126,6 \cdot 48 \cdot 0,933} = 0,929 Wb \quad (2.34)$$

kde U_f je fázové napětí

$$U_f = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{45000}{\sqrt{3}} = 25980,76V \quad (2.35)$$

Z toho vychází efektivní délka stroje

$$l_e = \frac{\pi \cdot \Phi}{2 \cdot B_\delta \cdot t_p} = \frac{\pi \cdot 0,929}{2 \cdot 0,9 \cdot 0,6} = 2,702m \quad (2.36)$$

Dále můžeme určit výšku jha statoru

$$h_{js} = \frac{\Phi}{2 \cdot 0,9 \cdot B_{js} \cdot l_e} = \frac{0,929}{2 \cdot 0,9 \cdot 1,4 \cdot 2,702} = 0,137m \quad (2.37)$$

2.7 Výpočet magnetického obvodu

Magnetický obvod se počítá pro chod stroje naprázdno. V našem případě budeme počítat magnetický obvod pouze pro statorovou část stroje. Rotorová část stroje je tvořena pouze hliníkovou deskou.

Magnetické napětí ve vzduchové mezeře je dáno vztahem

$$U_{m\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_c \quad (2.38)$$

kde k_c je činitel vzduchové mezery, tzv. Carterův činitel

$$k_c = \frac{td_1}{td_1 - \gamma \cdot \delta} \quad (2.39)$$

kde γ určíme podle vztahu

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_0}{\delta}} \quad (2.40)$$

kde velikost δ bereme jako součet velikosti vzduchové mezery a výšky hliníkové

$$\text{desky, která nám slouží jako rotor } \delta = \delta_{mech} + h_{Al} \quad (2.41)$$

Velikost hliníkové desky si určíme ze vztahu pro hloubku vniku, kterou vynásobíme třikrát

$$\delta_{Al} = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma_{Al}}} = \sqrt{\frac{2}{795,451 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3,7 \cdot 10^7}} = 0,0117m$$

Volíme výšku $h_{Al} = 40mm$

Po dosazení do vzorce (2.42) získáme $\delta = 0,01 + 0,04 = 0,05m$

Po dosazení do vzorce (2.41)

$$\gamma = \frac{\left(\frac{0,043}{0,05}\right)^2}{5 + \frac{0,043}{0,05}} = 0,126$$

Po dosazení do vztahu (2.40) získáme velikost Carterova činitele

$$k_c = \frac{0,1}{0,1 - 0,126 \cdot 0,05} = 1,067$$

Po dosazení do vztahu (2.39) získáme velikost magnetického napětí ve vzduchové mezeře

$$U_{m\delta} = \frac{2}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,9 \cdot 0,01 \cdot 1,067 = 15284A$$

Magnetické napětí zubů statoru

$$U_{mz} = 2 \cdot h_z \cdot H_z \quad (2.42)$$

kde h_z je výška zubu statoru, v našem případě $h_z = 0,185m$

H_z je hodnota intenzity magnetického pole v zubech, která se vyhledá v magnetizační křivce použité elektrotechnické oceli pro známou hodnotu indukce (viz. Příloha 2)

Po dosazení hodnot do vztahu (2.43) získáme velikost magnetického napětí v zubech

$$U_{mz} = 2 \cdot 0,185 \cdot 1630 = 603,1 A$$

Magnetické napětí jha statoru

$$U_{mj1} = l_{j1} \cdot H_{j1} \quad (2.43)$$

kde l_{j1} je délka střední magnetické indukční čáry ve jhu statoru, která je dána vztahem

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,325 - 0,14)}{40} = 0,0145 m \quad (2.44)$$

H_{j1} je hodnota intenzity magnetického pole ve jhu statoru, která se vyhledá

v magnetizační křivce použité elektrotechnické oceli pro známou hodnotu indukce (viz. Příloha 2)

Po dosazení do vztahu (2.44) získáme velikost magnetického napětí ve jhu

$$U_{mj1} = 0,0145 \cdot 460 = 6,67 A$$

Výsledné magnetizační napětí celého magnetického obvodu

$$F_m = U_{mz} + U_{m\delta} + U_{mj1} = 603,1 + 15284 + 6,67 = 15894 A \quad (2.45)$$

Činitel nasycení magnetického obvodu

$$k_\mu = \frac{F_m}{U_{m\delta}} = \frac{15894}{15284} = 1,04 \quad (2.46)$$

Magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_s \cdot k_{v1}} = \frac{20 \cdot 15894}{0,9 \cdot 3 \cdot 48 \cdot 0,933} = 2629 A \quad (2.47)$$

2.8 Výpočet náhradního schématu

2.8.1 Odpor vinutí statoru

Odpor vinutí statoru získáme ze vztahu

$$R_1 = k_{\perp} \rho_g \cdot \frac{L}{S_{ef} \cdot a} \quad (2.48)$$

kde L je celková délka efektivních vodičů jedné fáze vinutí

ρ_g rezistivita materiálu vinutí při uvažované teplotě

a počet paralelních větví

k_{\perp} činitel zvětšení odporu působením povrchového jevu, jelikož se ve vodičích statorového vinutí projevuje povrchový jev nepatrně, uvažujeme $k_{\perp} = 1$

S_{ef} průřez efektivního vodiče daný vztahem

$$S_{ef} = S_v \cdot N_p = 150 \cdot 2 = 300 \text{ mm}^2 \quad (2.49)$$

Celková délka efektivních vodičů jedné fáze vinutí

$$L = l_{av} \cdot N_s \quad (2.50)$$

kde l_{av} je střední délka závitu vinutí, která je dána vztahem

$$l_{av} = 2 \cdot (l_d + l_{\varepsilon}) \quad (2.51)$$

kde l_d je délka drážkové části vinutí, která se rovná šířce soupravy

l_{ε} délka čela vinutí

$$l_{\varepsilon} = K_{\varepsilon} \cdot b_c + 2B + h_d \quad (2.52)$$

kde b_c je střední šířka cívky

$$b_c = \frac{l + \pi \cdot h_d}{2p} \cdot \beta = \frac{24 + \pi \cdot 0,185}{40} \cdot 0,833 = 0,512 \text{ m} \quad (2.53)$$

B je délka přímé části cívky při výstupu z drážky, kterou určíme z tabulky 2.1

Napětí U_N (V)	S (m)	B (m)
≤ 660	0,0035	0,025
3 000 až 3 300	0,005 až 0,006	0,035 až 0,04
6 000 až 6 600	0,006 až 0,007	0,035 až 0,05
$\geq 10\ 000$	0,007 až 0,008	0,06 až 0,065

Tab. 2.1. Pro výpočet rozměrů čel cívek vinutých z pásů [2]

K_ε je činitel daný vztahem

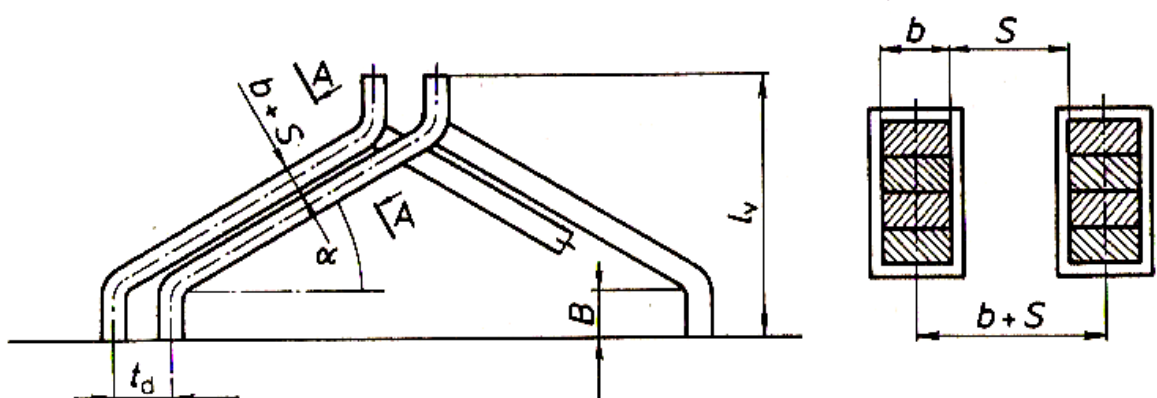
$$K_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \quad (2.54)$$

kde m vypočteme ze vztahu

$$m = \sin \alpha = \frac{(b+S)}{t_d} \quad (2.55)$$

kde b je šířka mědi cívky v čele

S přípustná vzdálenost mezi mědi vodičů sousedních cívek, kterou určíme z tabulky 2.1



Obr. 2.2. Rozměry čela cívky vinutí [2]

Po dosazení do vztahu 2.55 dostaneme hodnotu m

$$m = \frac{0,025 + 0,008}{0,1} = 0,33$$

Po dosazení do vztahu 2.54 dostaneme činitel K_ε

$$K_\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,33^2}} = 1,06$$

Po dosazení 2.54 a 2.53 do vztahu 2.52 dostaneme délku čel vinutí

$$l_\varepsilon = 1,06 \cdot 0,512 + 0,13 + 0,185 = 0,858m$$

Po dosazení 2.52 do vztahu 2.51 dostaneme střední délku závitu vinutí

$$l_{av} = 2 \cdot (2,8 + 0,858) = 7,316m$$

Po dosazení 2.51 do vztahu 2.50 dostaneme celkovou délku vodičů jedné fáze vinutí

$$L = 7,316 \cdot 48 = 351,168m$$

Po dosazení 2.50 a 2.49 do vztahu 2.48 dostaneme velikost odporu vinutí statoru

$$R_1 = 1 \cdot 1,8 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{351,168}{3 \cdot 10^{-4} \cdot 5} = 4,214 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Vyložení čel vinutí získáme ze vztahu

$$l_v = K_v \cdot b_c + B - 0,5 \cdot h_d \quad (2.56)$$

kde K_v je činitel daný vztahem

$$K_v = \frac{1}{2} \cdot K_\varepsilon \cdot m = \frac{1}{2} \cdot 1,06 \cdot 0,33 = 0,175 \quad (2.57)$$

Po dosazení do 2.56 získáme vyložení čel vinutí

$$l_v = 0,175 \cdot 0,512 + 0,065 - 0,5 \cdot 0,185 = 0,062m$$

2.8.2 Rozptylové reaktance vinutí

Rozptylové reaktance vinutí se počítají podle vztahu

$$X_{\sigma} = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{N_s}{100} \right)^2 \cdot \frac{b}{p \cdot q} \cdot (\lambda_d + \lambda_{\varepsilon} + \lambda_{dif}) \quad (2.58)$$

Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel je dán vztahem

$$\lambda_{\varepsilon} = 0,34 \cdot \frac{q}{b} \cdot (l_{\varepsilon} - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = 0,34 \cdot \frac{2}{2,8} \cdot (0,858 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 0,6) = 0,131 \quad (2.59)$$

Činitel magnetického drážkového rozptylu závisí na tvaru drážky a na uložení vinutí v drážce, pro otevřenou obdélníkovou drážku tvaru M a dvouvrstvé vinutí je dán vztahem

$$\lambda_d = \frac{h_2 - h_m}{3b_d} \cdot k_{\beta} + \frac{h_1}{b_d} \cdot k'_{\beta} + \frac{h_m}{4b_d} \quad (2.60)$$

kde $h_2 = 173mm$

$$h_1 = 11mm$$

$$h_m = 5mm$$

$$b_d = 43mm$$

činitelé k_{β} a k'_{β} závisejí na kroku vinutí, v našem případě

$$k'_{\beta} = 0,25 \cdot (1 + 3\beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,833) = 0,875 \quad (2.61)$$

$$k_{\beta} = 0,25 \cdot (1 + 3k'_{\beta}) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,875) = 0,906 \quad (2.62)$$

Po dosazení do vzorce (2.60) získáme

$$\lambda_d = \frac{173 - 5}{3 \cdot 43} \cdot 0,906 + \frac{11}{43} \cdot 0,875 + \frac{5}{4 \cdot 43} = 1,433$$

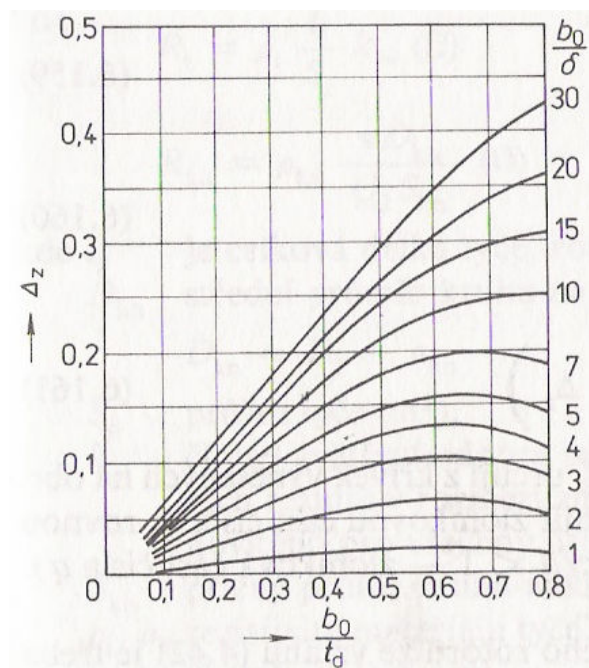
Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu

$$\lambda_{dif} = \frac{td_1}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi \quad (2.63)$$

kde ξ je činitel, který závisí na počtu drážek na pól a fázi, na zkrácení kroku vinutí a na vzájemných poměrech rozměrů vzduchové mezery a otevření drážek. V našem případě tento činitel dán vztahem

$$\xi = 2 + 0,022 \cdot q^2 - k_v^2 \cdot (1 + \Delta_z) \quad (2.64)$$

kde Δ_z je činitel v závislosti na $\frac{b_0}{td}$ a $\frac{b_0}{\delta}$. Tento činitel určíme z grafu 2.1



Graf 2.1. Pro výpočet činitele Δ_z k výpočtu magnetické vodivosti diferenčního rozptylu [2]

$$\begin{aligned} \frac{b_0}{td} &= \frac{0,043}{0,1} = 0,43 \\ \frac{b_0}{\delta} &= \frac{0,043}{0,01} = 4,3 \\ &\Rightarrow \Delta_z \approx 0,12 \end{aligned}$$

Po dosazení do vztahu 2.64 získáme velikost činitele ξ

$$\xi = 2 + 0,022 \cdot 2^2 - 0,933^2 \cdot (1 + 0,12) = 1,113$$

Po dosazení 2.64 do vztahu 2.63 dostaneme velikost činitele magnetické vodivosti diferenčního rozptylu

$$\lambda_{dif} = \frac{0,1}{12 \cdot 0,01 \cdot 1,067} \cdot 1,113 = 0,869$$

Po dosazení 2.59, 2.60 a 2.63 do vztahu 2.58 získáme velikost rozptylové reaktance vinutí

$$X_{\sigma} = 15,8 \cdot \frac{126,6}{100} \cdot \left(\frac{48}{100}\right)^2 \cdot \frac{2,8}{20 \cdot 2} \cdot (1,433 + 0,131 + 0,869) = 0,785\Omega$$

Velikost indukovaného napětí vypočteme ze vztahu

$$U_i = \frac{U_N}{\sqrt{3}} - \sqrt{R_1^2 + X_{\sigma}^2} \cdot I_{\mu} = \frac{45000}{\sqrt{3}} - \sqrt{(4,214 \cdot 10^{-3})^2 + 0,785^2} \cdot 2629 = 23917V \quad (2.65)$$

Z tohoto indukovaného napětí můžeme přepočítat činitel pro indukované napětí k_E

$$k_E = \frac{\sqrt{3} \cdot U_i}{U_N} = \frac{\sqrt{3} \cdot 23917}{45000} = 0,92 \quad (2.66)$$

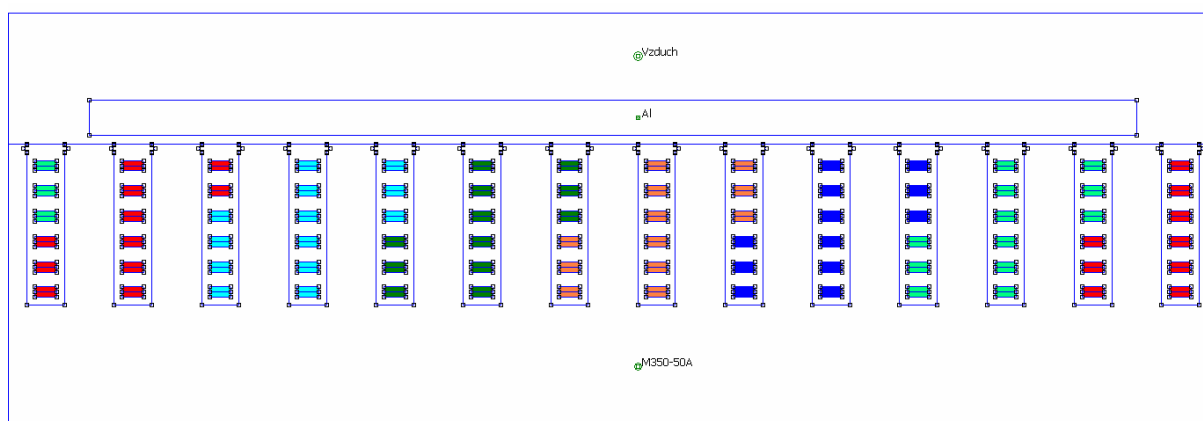
3 Model navrženého stroje v programu FEMM

Program FEMM (Finite Element Method Magnetics) je navržený pro řešení elektromagnetických problémů ve dvourozměrném prostředí pro malé frekvence. Dokáže řešit lineární a nelineární magnetické pole, elektrostatické pole a přechodové děje.

Program pracuje na principu metody konečných prvků. Tato metoda vychází z diskretizace spojitého problému do určitého konečného počtu elementárních prvků. Tím se vytvoří fyzikální model dané oblasti, ve které problém řešíme. Parametry modelu jsou určeny vlastnostmi uzlových bodů, které vzniknou střetem elementárních prvků. Tyto prvky mají tvar trojúhelníku. Čím budeme mít větší počet elementárních prvků v dané oblasti, tím získáme přesnější výpočet a výsledek. Základní výpočty jsou založeny na Maxwellových rovnicích. Tyto rovnice jsou zjednodušeny. Pro řešení daných problémů jsou však dostačující a urychluje se tím výpočet.

Pro náš model byl zvolen program FEMM verze 4.2

Model byl navržen pro jeden pólpár. Pro celý model dlouhý 24m a 240 drážek by model nebyl přehledný.



Obr. 3.1. Model stroje v programu FEMM s barevným rozlišením fází

Velikosti proudů s fázovým posunem
v jednotlivých fázích vycházející z Obr. 3.1

$$\mathbf{A} = 537,4 \text{ A}$$

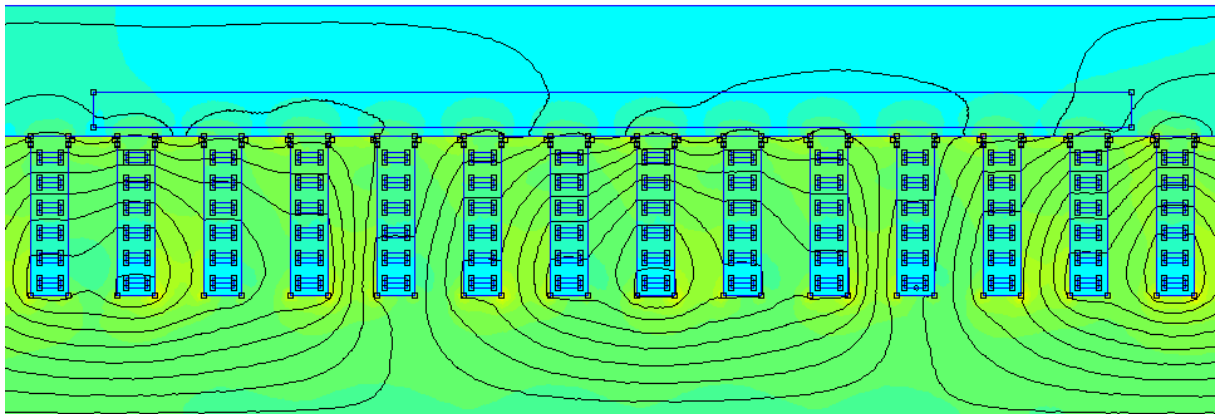
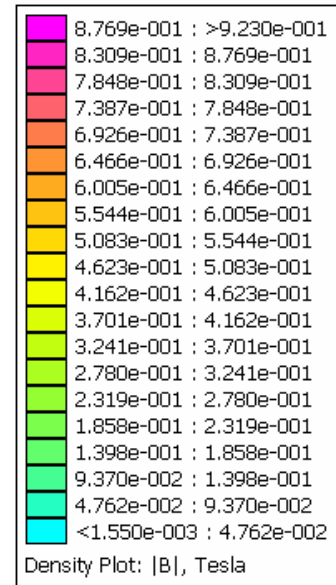
$$\mathbf{A}' = -537,4 \text{ A}$$

$$\mathbf{B} = -268,7 + i 465,405 \text{ A}$$

$$\mathbf{B}' = 268,7 - i 465,405 \text{ A}$$

$$\mathbf{C} = -268,7 - i 465,405 \text{ A}$$

$$\mathbf{C}' = 268,7 + i 465,405 \text{ A}$$



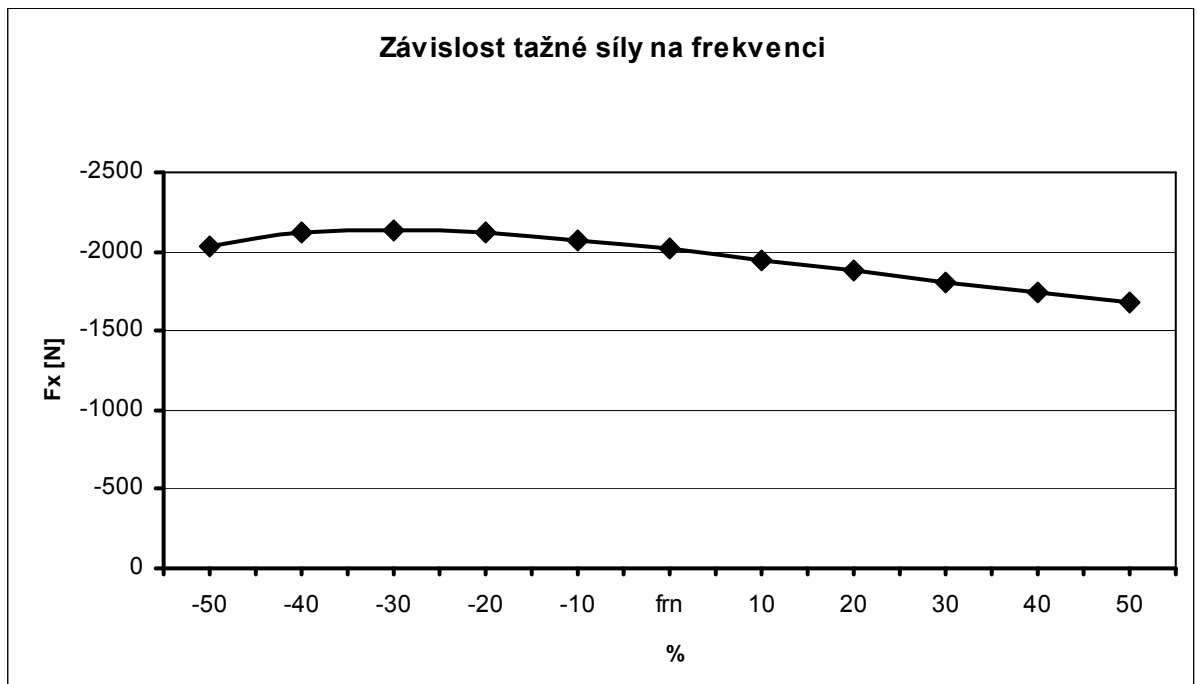
Obr. 3.2. Model stroje s vykreslenou magnetickou indukcí a magnetickými siločárami

Hodnoty tažné a vznášivé síly vypočtené z modelu programem FEMM

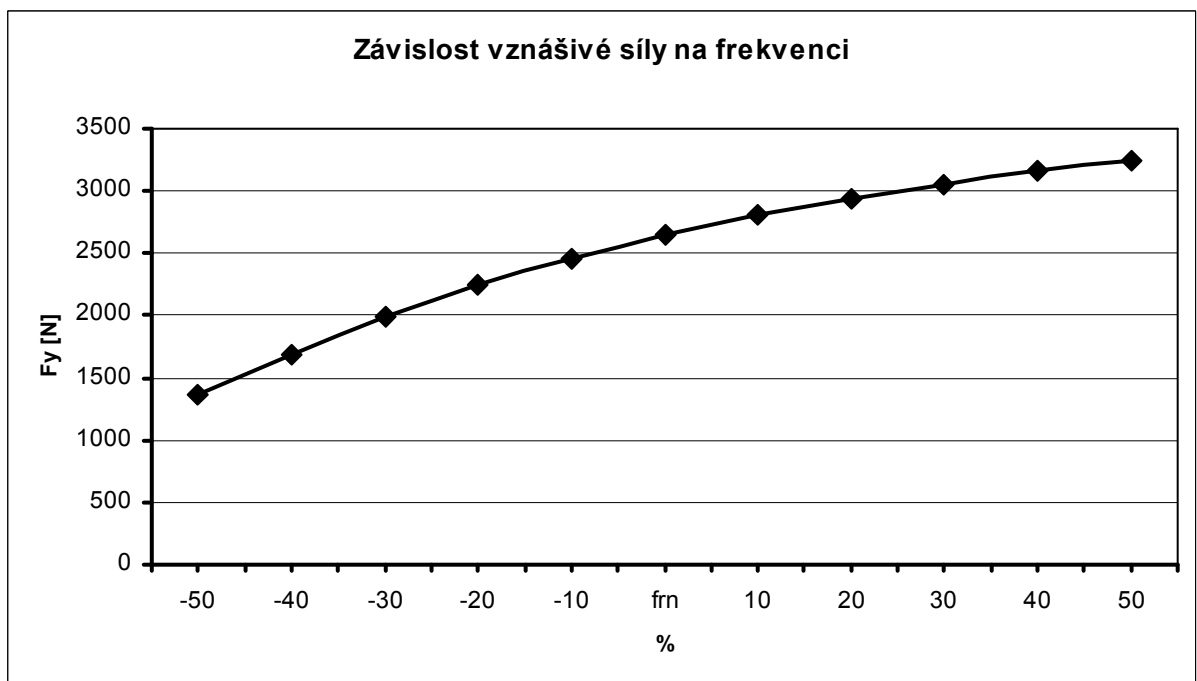
$$F_x = -2016,05 \text{ N}$$

$$F_y = 2648,9 \text{ N}$$

Závislosti tažné a vznášivé síly na velikosti frekvence při výpočtech v programu FEMM jsou zobrazené v grafu 3.1 a 3.2. Frekvence se měnila po 10% od jmenovité hodnoty na obě strany.



Graf. 3.1. Závislost tažné síly na velikosti frekvence



Graf. 3.2. Závislost vznášivé síly na velikosti frekvence

Závěr

Hlavním úkolem mé diplomové práce bylo navrhnout lineární indukční stroj se vznášivými účinky, který by byl vhodný pro dopravu. Navržený a vypočítaný stroj lze teoreticky realizovat, ale z ekonomického hlediska je to neuskutečnitelné. Počáteční investice se sníží tím, že můžeme kabinu a vagony vozidla postavit na hliníkové desce. Není zapotřebí magnetického obvodu a cívek uvnitř vozidla. Tím se sníží i hmotnost celé soupravy. I přesto jsme při výpočtech při malé hmotnosti vozidla (na délku 24m a šířku 2,8m jen 8 tun) dostali veliký vnitřní výkon stroje (266 MW). Tím by se provoz této soupravy enormně prodražil. Další výraznou položkou by byly řízené měnící frekvence, které by musely být umístěny po celé délce tratě. Tyto měnící mají za úkol spínat úseky, kde se souprava pohybuje, aby rychlost vlaku mohla být řízena frekvencí a aby nemusela být napájena celá délka trati. Z ekonomického hlediska jsou tedy výhodnější magneticky levitované soupravy typu Maglev, nebo Transrapid, které jsou již v provozu.

Dalším důležitým stanoviskem bylo navrhnout postup při návrhu lineárního indukčního stroje se vznášivými účinky. Z dosavadních zdrojů vyplývá, že se tímto návrhem doposud nikdo nezabýval. Proto bylo důležité navrhnout postup výpočtu, který by sloužil k dalším návrhům tohoto stroje a který by mohl být dále modifikován pro získání příznivějších výsledků. Hlavně z hlediska vnitřního výkonu navrhovaného stroje.

Při modelování navrženého a vypočteného stroje v programu FEMM, jsme dostali rozdílné hodnoty tažné a vznášivé síly. Tažná síla nám vyšla šestkrát menší než v modelu a vznášivá síla byla dvakrát menší. Při výpočtu jsme se dopustili určité chyby při zaokrouhlování hodnot. U modelu se jednalo o chybu způsobenou nepřesností výpočtu. Největší odchylka však nastala při určení skluzu, respektive frekvence použité při výpočtu modelu. Z uvedených grafů je vidět, že hodnota frekvence při výpočtu modelu nám značně ovlivňuje výsledek. Při výpočtu tažné síly tato změna hodnot není tak velká. Je vidět, že při zvyšování frekvence nám velikost tažné síly postupně klesá. Při výpočtu vznášivé síly je tento rozdíl značný. Při měření o $\pm 50\%$ od jmenovité frekvence je tento rozdíl více jak dvojnásobný. Vznášivá síla nám na rozdíl od tažné síly s rostoucí frekvencí stoupá. Abychom měli vznášivou sílu relativně stejně velkou jako při matematickém výpočtu, museli bychom frekvenci při výpočtu modelu snížit o 50 % od jmenovité hodnoty.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Rybář, J. : *Teorie lineárního indukčního motoru se vznášivým účinkem*. Elektrotechnický obzor 62, číslo 11, 1973
- [2] Kopylov, I. P. a kol. : *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988. 688 s.
- [3] Cigánek, L. : *Stavby elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1958. 716 s.
- [4] Mayer, D. : *Magnetická levitace a její využití*. Elektro, 2003, č.1, s.4-12.
- [5] Jedlička, M. : *Lineární motory, vlastnosti a užití*. Plzeň. Západočeská univerzita v Plzni. 2006.
- [6] Hruška, K. : *Elektrické stroje pro trakci*. Plzeň. Západočeská univerzita v Plzni. 2005.
- [7] Muška, M. : *Historie vývoje a perspektivy elektrických strojů*. Plzeň. Západočeská univerzita v Plzni. 2011
- [8] VUES Brno s.r.o. [online] www.vues.cz 20.4.2012
- [9] <http://www.femm.info> 3.5.2012
- [10] <http://www.draka.cz> 3.5.2012

Přílohy

Příloha 1 – Datasheet vvn kabelu použitého při výpočtu



35-CXEKVCEY 20/35 (40,5) kV

Kabely pro vysoké napětí | Medium Voltage Cables

Konstrukce

Jádro:	lanované, kulaté a komprimované měděné jádro podle ČSN EN 60228, třída 2
Dolní polovodivá vrstva:	vytlačovaná
Izolace:	XLPE, jmenovitá tloušťka 8,0 mm
Horní polovodivá vrstva:	vytlačovaná, nesloupatelná
Separátor:	polovodivá, vodu blokující páska
Koncentrický vodič:	žhané měděné dráty a protispirála z měděné pásky
Plášť:	PE, černý
Ochranný plášť:	bezolovnaté PVC, černý
Příklad značení:	35-CXEKVCEY 20/35 (40,5) kV 1 x 70 RM/16 DRAKA, rok výroby, číslo dílčí délky, číslo normy, metrování

Construction

Conductor:	Stranded, round and compacted copper acc. to ČSN EN 60228, class 2
Conductor screen:	Extruded
Insulation:	XLPE, nom. thickness 8.0 mm
Insulation screen:	Extruded bonded
Separator:	Semi conducting water blocking tape
Concentric conductor:	Annealed copper wires and counter spiral of copper-tape
Sheath:	PE, black
Protective covering:	Lead free PVC, black
Marking e.g.:	35-CXEKVCEY 20/35 (40,5) kV 1 x 70 RM/16 DRAKA, manufacturing year, number of particular length, number of standard, meter marking

Konstrukční norma

PNE 34 76 25

Design standard

PNE 34 76 25

Provozní teplota

V trvalém provozu max. +90 °C na jádře. Minimální teplota kabelu během pokládky: -10 °C. Pod 0 °C musí být učiněna speciální opatření.

Temperature range

In continuous operation max. +90 °C on conductor. Lowest cable temperature during installation: -10 °C and below 0 °C special precaution shall be taken.

Rázové napětí

180 kV

Impulse voltage

180 kV

Poloměr ohybu

Při pevném uložení: 10 x D
Při pokládce: 15 x D

Bending radius

At fixed mounting: 10 x D
At laying: 15 x D

Použití

Jednožilový distribuční kabel pro vnitřní i venkovní použití v 3-fázovém uspořádání. Instalace do trubek a pokládka do země/vzduchu. Kabely splňující požadavky PNE 34 76 25 je možno používat v prostoru IV, V a VI podle PNE 33 0000-2.

Use

Single-core, distribution cable for outdoors and indoors use in 3-phase formation. Installation in pipes and ground/air. Cables meeting requirements PNE 34 76 25 can be used in environments IV, V and VI according to PNE 33 0000-2.

35-CXEKVCEY 20/35 (40,5) kV**Technická data | Technical data**

Počet žil x průřez jádra (mm ²)	Průměr nad izolací (mm)	Celkový průměr (cca) (mm)	Váha (cca) (kg/100 m)	Standardní dodací délka (m)	Standardní velikost bubnu
Number of cores x cross-section of conductor (mm ²)	Diameter over insulation (mm)	Overall diameter (approx.) (mm)	Weight (approx.) (kg/100 m)	Standard delivery length (m)	Standard drum size
1 x 50/16	25,4	37	160	500	K16
1 x 70/16	27,0	39	175	500	K16
1 x 95/16	28,7	41	215	500	K18
1 x 120/16	30,0	42	245	500	K18
1 x 150/25	31,6	43	275	500	K18
1 x 185/25	33,3	45	320	500	K20
1 x 240/25	35,5	47	385	500	K20
1 x 300/25	37,9	50	440	500	K22
1 x 400/35	41,0	54	560	500	K22

Elektrická data při +20 °C | Electrical data at +20 °C

Počet žil x průřez jádra (mm ²)	Odpor jádra max. (Ω/km)	Odpor stínění max. (Ω/km)	Indukčnost v troj- úhelníku/rovině* (mH/km)	Kapacita (μF/km)	Nabíjecí proud/fáze (A/km)
Number of cores x cross-section of conductor (mm ²)	Conductor resistance max. (Ω/km)	Screen resistance max. (Ω/km)	Inductance in trefoil/in plane* (mH/km)	Capacitance (μF/km)	Charging current/phase (A/km)
1 x 50/16	0,387	1,15	0,42/0,61	0,24	1,50
1 x 70/16	0,268	1,15	0,40/0,58	0,27	1,65
1 x 95/16	0,193	1,15	0,38/0,56	0,31	2,00
1 x 120/16	0,153	1,15	0,36/0,55	0,33	2,15
1 x 150/25	0,124	0,727	0,35/0,54	0,36	2,25
1 x 185/25	0,0991	0,727	0,34/0,53	0,40	2,60
1 x 240/25	0,0754	0,727	0,33/0,51	0,44	2,90
1 x 300/25	0,0601	0,727	0,31/0,50	0,49	3,20
1 x 400/35	0,0470	0,524	0,31/0,49	0,55	3,55

* Trojúhelník se stíněním uzemněným na obou koncích. | * Trefoil with screen grounded in both ends.

Číselné údaje jsou pouze informativní, technické změny vyhrazeny. | Numerical data are only informative, subject to technical changes.

35-CXEKVCEY 20/35 (40,5) kV

Jmenovitý proud | Current rating



Počet žil x průřez jádra (mm ²)	Proudová zatížitelnost při teplotě jádra 65 °C v zemi* (A)	Proudová zatížitelnost při teplotě jádra 65 °C na vzduchu* (A)	Proudová zatížitelnost při teplotě jádra 90 °C na vzduchu* (A)	Max. zkratový proud jádra během 1 s při počáteční teplotě 65 °C (kA)	Max. zkratový proud jádra během 1 s při počáteční teplotě 90 °C (kA)
Number of cores x cross-section of conductor (mm ²)	Current rating at core temp. 65 °C under ground* (A)	Current rating at core temp. 65 °C in air* (A)	Current rating at core temp. 90 °C in air* (A)	Max. short-circuit current on the conductor during 1 s at initial temp. 65 °C (kA)	Max. short-circuit current on the conductor during 1 s at initial temp. 90 °C (kA)
1 x 50/16	187	192	234	8,1	7,3
1 x 70/16	250	237	291	11,1	10,1
1 x 95/16	297	291	354	15,2	13,7
1 x 120/16	336	334	407	19,0	17,3
1 x 150/25	377	376	462	23,8	21,6
1 x 185/25	411	429	527	29,3	26,6
1 x 240/25	485	505	620	37,7	34,4
1 x 300/25	562	590	720	48,1	43,7
1 x 400/35	669	715	872	60,1	54,6

* Trojúhelník se stíněním uzemněným na obou koncích. | * Trefoil with screen grounded in both ends.

Číselné údaje jsou pouze informativní, technické změny vyhrazeny. | Numerical data are only informative, subject to technical changes.

.....

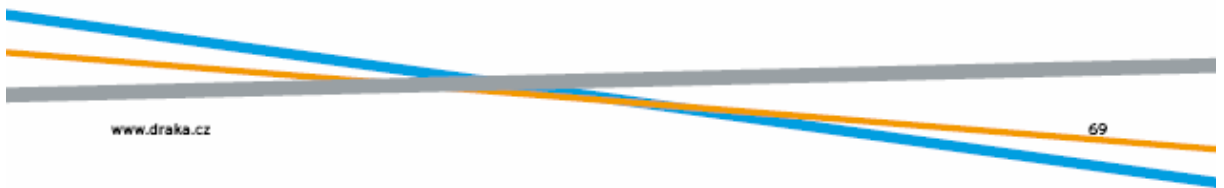
.....

.....

.....

.....

.....



Příloha 2 – Magnetizační charakteristiky oceli 2411

B(T)	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H (A.m ⁻¹)									
0,4	48	48	49	50	51	51	52	53	53	54
0,5	55	56	56	57	58	59	60	61	61	62
0,6	63	64	65	66	67	68	69	69	70	71
0,7	72	72	73	74	75	76	76	77	78	79
0,8	81	82	83	84	85	87	88	90	92	94
0,9	96	98	100	102	104	105	107	109	112	114
1,0	116	118	121	124	126	129	132	136	139	143
1,1	146	150	154	158	162	167	172	176	182	188
1,2	192	198	204	210	216	222	230	238	246	260
1,3	272	288	300	316	330	340	358	370	386	399
1,4	410	440	460	490	530	570	610	660	710	770
1,5	820	890	960	1 030	1 100	1 170	1 230	1 310	1 400	1 480
1,6	1 560	1 640	1 730	1 820	1 920	2 000	2 100	2 260	2 440	2 600
1,7	2 800	2 960	3 100	3 260	3 400	3 580	3 740	3 900	4 100	4 300
1,8	4 500	4 700	5 000	5 300	5 500	5 800	6 100	6 400	6 800	7 200
1,9	7 600	8 000	8 500	9 100	9 700	10 300	11 100	11 900	13 100	14 200
2,0	16 000	18 000	20 000	22 000	23 800	25 500	27 600	29 600	31 500	33 800

Magnetizační charakteristika oceli 2411, pro jha asynchronních strojů [2]

B(T)	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	H (A.m ⁻¹)									
0,4	72	73	74	75	77	78	79	80	81	82
0,5	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92
0,6	93	94	95	96	97	98	99	101	102	104
0,7	105	106	108	110	111	113	115	117	118	120
0,8	122	124	126	128	130	132	134	136	138	140
0,9	142	144	147	149	151	155	158	160	163	165
1,0	168	171	175	177	180	184	188	191	196	200
1,1	204	207	212	216	222	227	232	237	242	247
1,2	254	259	265	272	277	284	291	298	307	316
1,3	323	333	341	351	361	372	383	394	404	421
1,4	425	432	461	480	497	518	537	554	573	596
1,5	622	644	673	700	728	756	795	828	859	890
1,6	932	976	1 020	1 070	1 130	1 180	1 260	1 350	1 440	1 520
1,7	1 630	1 740	1 870	2 020	2 130	2 300	2 450	2 630	2 830	3 040
1,8	3 190	3 410	3 590	3 830	4 100	4 400	4 600	4 800	5 100	5 400
1,9	5 700	5 900	6 300	6 600	6 900	7 200	7 700	8 100	8 300	8 700
2,0	9 200	9 700	10 000	10 500	10 900	11 400	12 000	12 700	13 100	13 700
2,1	14 200	15 000	15 800	16 500	17 200	17 900	18 700	19 800	20 600	21 600
2,2	22 600	23 700	24 600	26 100	26 900	28 700	30 000	31 400	33 200	35 400
2,3	37 600	39 900	42 200	44 600	47 000	49 500	52 000	54 600	57 200	59 800

Magnetizační charakteristika oceli 2411, pro zuby asynchronních strojů [2]

Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje diplomová práce byla půjčována k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum:

Podpis:

Uživatel stvrzuje svým čitelným podpisem, že tuto diplomovou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno	Fakulta/katedra	Datum	Podpis