



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁVRH LINEÁRNÍHO MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY

DESIGN OF LINEAR MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Čech

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Knebl

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Jan Čech

ID: 182925

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Návrh lineárního motoru s permanentními magnety

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vytvořte model pomocí metody odporové sítě pro návrh synchronního lineárního motoru s permanentními magnety.
2. Proveďte zpětný návrh lineárního motoru.
3. Porovnejte výsledky vypočtené metodou odporové sítě s výpočty provedenými metodou konečných prvků a s měřením na vyrobeném motoru.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.3. Skriptum, FEKT, VUT Brno
- [2] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech – Linear synchronous motors, CRC Press
- [3] Ion Boldea, S.A.Nasar - Linear motion electromagnetic devices, Taylor&Francis

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Knebl

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce se ve své první části zabývá studiem lineárních motorů. Úvod práce se věnuje stručnému popisu lineárního motoru včetně jeho příslušenství. Je zde popsán princip lineárních motorů, jejich obecné výhody a nevýhody. Následuje přehled a rozdělení lineárních motorů, které mají v současné době praktické využití. Každý typ v současné době používaných lineárních motorů je stručně popsán a je objasněn jeho princip a charakteristické vlastnosti včetně konkrétní aplikace. Druhá část práce se zabývá návrhem modelu ekvivalentního magnetického obvodu lineárního motoru se železným jádrem. Návrh se poté využil pro simulaci rozložení a velikosti magnetického toku v lineárním motoru. Velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře se porovnala s hodnotami vypočtenými metodou konečných prvků. Z vypočtené magnetické indukce byla dále vypočtena tažná síla motoru, která byla porovnána s hodnotou v katalogovém listu.

Klíčová slova

Lineární motor, odporová síť, magnetický tok, odporový element, segment, magnetický odpor, příčný magnetický tok, hybridní, synchronní, asynchronní, železné jádro

Abstract

The first part of this thesis deals with the study of linear motors. The introduction of the thesis deals with the brief description of the linear motor, including its accessories. This part explains principle of linear motors, their general advantages and disadvantages. The next section contains an overview and division of the currently used linear motors. Each type of currently used linear motors is briefly introduced and also its principle and characteristics are described, including its specific application. The second part of the thesis deals with the design of an equivalent magnetic circuit model of a linear iron-core linear motor. Hereafter, the proposed design will be used to simulate the distribution of magnetic flux in the linear motor. The evaluated flux-density distribution in the air gap is later compared with the results obtained with finite element method. The thrust is then calculated from the flux-density and the estimated value is compared with the value listed in datasheet.

Keywords

Linear motor, reluctance network, magnetic flux, resistive element, segment, magnetic resistance, transverse magnetic flux, hybrid, synchronous, asynchronous, iron core

Bibliografická citace:

ČECH, J. *Synchronní lineární motory s permanentními magnety*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 59 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Ladislav Knebl.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma „Synchronní lineární motory s permanentními magnety“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne **28. května 2018**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Ladislavovi Kneblovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **28. května 2018**

.....
podpis autora

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Lineární motor.....	2
2.1 Historie.....	2
2.2 Obecný princip a konstrukce.....	2
2.3 Obecné výhody a nevýhody.....	3
2.3.1 Absence mechanického převodu.....	3
2.3.2 Cena.....	4
2.3.3 Chlazení.....	4
2.3.4 Tření.....	4
2.4 Příslušenství.....	5
2.4.1 Senzorická soustava.....	5
2.4.2 Odměřovací systémy.....	6
2.4.3 Řídící systémy.....	7
2.4.4 Mechanické vedení.....	7
2.5 Rozdělení lineárních motorů.....	8
3 Typy lineárních motorů.....	10
3.1 Asynchronní lineární motor.....	10
3.2 Synchronní lineární motor.....	11
3.2.1 Lineární motor s příčným magnetickým tokem.....	13
3.2.2 Reluktanční lineární motor.....	14
3.2.3 Tubulární lineární motor.....	14
3.2.4 Hybridní krokový lineární motor.....	15
3.2.5 Lineární motor se železným jádrem.....	16
3.2.6 Bez železného jádra.....	18
3.2.7 Bez drážek.....	19
4 Simulace pomocí odporové sítě.....	21
4.1 Magnetické obvody.....	21
4.2 Odporová síť.....	22
4.3 Návrh modelu LM pro metodu odporové sítě.....	23
4.4 Zjednodušení geometrie LM.....	26

4.5 Výpočet hodnot elementu.....	27
4.5.1 Zkoumaný motor	27
4.5.2 Primární díl	27
4.5.3 Vzduchová mezera	29
4.5.4 Sekundární díl	30
4.6 Simulace modelu v programu Ansys Simplorer	30
4.6.1 Tvorba nelineárního odporu	30
4.6.2 Sestavení	32
4.6.3 Export výsledků.....	34
5 Výpočet posuvné síly.....	37
5.1 Lorentzova síla a odvození vztahu	37
5.2 Výpočet.....	38
6 Vyhodnocení výsledků.....	39
6.1 Porovnání odporové sítě s metodou konečných prvků.....	39
6.2 Porovnání odporové sítě s katalogovým listem.....	40
7 Závěr	41
Literatura	43
Seznam symbolů, veličin a zkratek.....	47
Seznam příloh.....	50

Seznam obrázků

Obrázek 2-1: Princip lineárního motoru [6]	3
Obrázek 2-2: Sestava lineárního motoru, modifikováno z [8]	5
Obrázek 2-3: Topologie lineárních motorů, modifikováno z [11]	8
Obrázek 2-4: Dělení lineárních motorů podle principu, modifikováno z [11]	9
Obrázek 3-1: Jednostranný asynchronní lineární motor, modifikováno z [35]	11
Obrázek 3-2: Oboustranný asynchronní lineární motor, modifikováno z [35]	11
Obrázek 3-3: Lineární motor s příčným magnetickým tokem, modifikováno z [14]	13
Obrázek 3-4: Řez lineárního tubulárního synchronního motoru, modifikováno z [20]	15
Obrázek 3-5: Hybridní krokový lineární motor, modifikováno z [23]	16
Obrázek 3-6: Lineární motor se železným jádrem, modifikováno z [7]	17
Obrázek 3-7: Řez lineárním motorem bez železného jádra, modifikováno z [25] ..	18
Obrázek 3-8: Řez LSM bez drážek, modifikováno z [7]	20
Obrázek 4-1: Vodivostní a odporový element [31]	22
Obrázek 4-2: Ukázka analogie magnetického obvodu a elektrického obvodu [32]	23
Obrázek 4-3: Zjednodušený model LM se železným jádrem modifikováno z [33] ..	23
Obrázek 4-4: Ekvivalentní magnetický obvod primárního dílu, modifikováno z [33]	24
Obrázek 4-5: Ekvivalentní magnetický obvod vzduchové mezery, modifikováno z [33]	24
Obrázek 4-6: Ekvivalentní magnetický obvod sekundárního dílu, modifikováno z [33]	25
Obrázek 4-7: Ekvivalentní magnetický obvod LM, modifikováno z [33]	25
Obrázek 4-8: Princip zjednodušení drážky	26
Obrázek 4-9: Celkový zjednodušený model LM	26
Obrázek 4-10: Ilustrativní $U-\Phi$ křivka v prostředí Simplorer	31
Obrázek 4-11: Ukázka sestavení prvního segmentu	33
Obrázek 4-12: Výsledná magnetická indukce ve vzduchové mezeře LSM vypočtená pomocí metody odporové sítě	36
Obrázek 6-1: Porovnání odporové sítě s metodou konečných prvků	39

Seznam tabulek

Tabulka 2-1: Rozsahy síly pro jednotlivé motory s nepřetržitým provozem a bez přídavného chlazení [11]	9
Tabulka 3-1: Přehledová tabulka vlastností různých typů lineárních motorů [11]	10
Tabulka 3: Parametry zkoumaného LSM LSE10W.....	27
Tabulka 4: Hodnoty jednotlivých reluktancí R_{mg}	29
Tabulka 5: Výpočet magnetické indukce ve vzduchové mezeře.....	35

1 ÚVOD

Elektrické motory jsou jedny z nejpoužívanějších zařízení našich každodenních životů a počet jejich aplikací narůstá s vývojem a výzkumem. Elektrický motor můžeme najít téměř ve všem od auta až po elektrický zubní kartáček. Výzkum a vývoj je stimulován díky velké poptávce po nových a často i lepších typech motorů, a také po motorech s lepšími charakteristikami. Vývoj lineárních motorů také podpořilo objevení nových materiálů, jako je například vysokoteplotní supravodičový materiál, piezoelektrická keramika. V poslední době se také hodně dbá na ekologii, která vyvíjí tlak na maximální účinnost motorů. V neposlední řadě je třeba zmínit také nové trendy ve výkonové elektronice a mnoho další faktorů, které přispívají ke stále dokonalejším elektromotorům. Současné trendy v elektrotechnickém průmyslu ukazují, že existuje ještě mnoho oblastí, kde je prostor k inovacím. [1]

Jedním ze současných trendů je i lineární motor. Ten se stává nepostradatelným při manipulačních, výrobních a zpracovatelských činnostech a to díky své přesnosti, účinnosti, dynamice, regulovatelnosti a také tomu, že přímo generuje lineární sílu. Právě tyto vlastnosti spolu se stále klesajícími náklady na výrobu umožňují větší uplatnění těchto motorů. [2]

Tato bakalářská práce se zabývá ve své první části popisem jednotlivých typů lineárních motorů. U každého typu motoru je uvedeno jeho využití v praxi a jeho výhody i nevýhody.

V další části bakalářské práce jsou položeny teoretické základy k modelaci magnetických toků v lineárním motoru a je zde uvedena přímá aplikace této metody na skutečný motor. Výsledek metody odporové sítě je porovnán s metodou konečných prvků a také s hodnotami uvedenými v katalogovém listu.

2 LINEÁRNÍ MOTOR

Lineární elektrický motor (LM) je zařízení, které je na rozdíl od stroje rotačního, schopno přímo vykonávat lineární pohyb, a to bez mechanického převodu, který by měnil pohyb rotační na pohyb lineární. To je velkou výhodou oproti rotačním motorům, které jsou vybaveny mechanickým převodem na lineární pohyb. Lineární motor nepotřebuje převod, a tedy odpadají nevýhody s převodem spojené. V oboru lineárních motorů dochází během posledních několika desítek let k velkému rozvoji výroby, vývoje a uplatnění. Důvodem rozvoje LM jsou nesčetné aplikace v průmyslu, stavebnictví a dopravě, a to díky jeho technickým přednostem, ke kterým patří zejména rychlost posunu, přesnost, snadná údržba a životnost. [1]

2.1 Historie

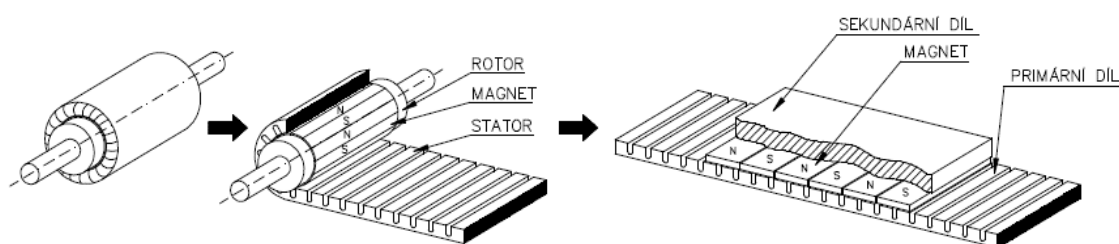
Princip lineárních motorů je znám stejně dlouhou dobu jako princip rotačních motorů. První zmínka o lineárním motoru je datována v Británii začátkem čtyřicátých let osmnáctého století v práci od Charlese Wheatstonea, ve které popsal princip indukčního lineárního motoru. Tento typ motoru byl však ještě velmi nepraktický. V roce 1905 získal německý vynálezce Alfred Zehden patent na první realizovatelný LM, který se měl využívat ve výtazích nebo ve vlacích. První funkční prototyp lineárního motoru sestrojil Němec Herman Kemper v roce 1935. Jedním z nejdůležitějších milníků pro LM je rok 1980, kdy anglický inženýr Hugh Peter Kelly přišel s návrhem lineárního motoru s permanentními magnety v trubce z nerezové oceli. Až v osmdesátých letech 20. století se stala praktická konstrukce a aplikace možná, a to díky dostupnosti permanentních magnetů ze vzácných zemin, polovodičovým součástkám a rozvoji supravodičů. Důvodem takřka stagnace vývoje byla až do nedávna neekonomičnost lineárních motorů oproti strojům rotačním srovnatelného výkonu. Dnes je LM rozšířený v mnoha průmyslových odvětvích. [3], [4]

2.2 Obecný princip a konstrukce

LM pracují analogicky jako klasické stroje rotační. LM si lze představit jako synchronní případně asynchronní motor rozvinutý do roviny, viz obrázek 2-1. Princip vzniku posuvné síly v lineárním motoru je stejný jako vznik elektromagnetické síly v motoru rotačním. Obecně lze říci, že v lineárním motoru dochází k interakci magnetického pole primárního a sekundárního dílu, a tím dojde

k vytvoření posuvné síly. Konkrétní způsoby vyvolání lineární posuvné síly se liší podle jednotlivého typu lineárního motoru. [5]

LM se skládá z dvou základních částí. První posuvná část se nazývá jezdec nebo také primární díl. Tato část je stejně jako u běžných rotačních strojů tvořena feromagnetickým svazkem, který je tvořený elektrotechnickými plechy a trojfázovým vinutím uloženým ve drážkách tohoto plechu. Také zde bývá umístěno teplotní čidlo a Hallova sonda, které jsou nezbytné pro řízení motoru. Sekundární část bývá označována jako stator, základna nebo lože. Sekundární část bývá zpravidla ta delší, ale o tom, která část se bude pohybovat rozhoduje konkrétně konstrukce daného stroje. U synchronních lineárních motorů je základna nejčastěji tvořena ocelovou podložkou, na kterou jsou přilepeny permanentní magnety (PM) ze vzácných zemin. V praxi se v naprosté většině konstrukcí využívá pohyblivá primární část, která se pohybuje po dráze, která se skládá z libovolného počtu sekundárních dílů. Na dlouhém sekundárním dílu může pracovat i více primárních dílů a díky tomu se dají snížit náklady. V tomto typu konstrukce, je ale zapotřebí primární díl připojit pohyblivým napájecím kabelem, snímačem polohy a často je i zapotřebí pohyblivý přívod a vývod chladicího média. Takový kabel musí odolat velkému mechanickému namáhání a zároveň musí mít i dostatečnou volnost a možnost pohybu. [6]



Obrázek 2-1: Princip lineárního motoru [6]

2.3 Obecné výhody a nevýhody

V této kapitole jsou podrobněji popsány obecné výhody a nevýhody LM. Některé přednosti LM už byly zmíněny dříve v úvodu 2. kapitoly. Pro rekapitulaci to byla absence převodu, přesnost a rychlost pohybu. Stejně tak je důležité popsat obecné nevýhody, jako je například relativně vysoká cena, nutnost chlazení a další technické problémy.

2.3.1 Absence mechanického převodu

Jeden z nejmarkantnějších rozdílů LM oproti lineárnímu pohonu poháněnému točivým elektrickým motorem je absence převodu rotačního pohybu na pohyb posuvný. Díky tomu, že LM nemá tento převod, tak se tím výrazně snižuje

mechanická složitost použitého pohonu a tím i údržba. Další výhodou je i to, že LM může díky tomu dosahovat velmi vysokých zrychlení a rychlostí. Rychlost je limitována pouze napětím sběrnice a rychlostí řídicí elektroniky. Typická maximální rychlost LM pro běžnou průmyslovou aplikaci je méně než $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nejrychlejší prakticky využívaná aplikace LM se nachází v Japonsku, kde podle [1] dosahuje železniční souprava Maglev rychlosti až $167,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($603 \text{ km}\cdot\text{hod}^{-1}$). [7]

Rovněž LM nemají mechanickou vůli, a to zvyšuje přesnost polohování. Přesnost polohování může být až v řádech jednotek mikrometrů. Přesnost, rozlišení a opakovatelnost operace lineárního motoru je řízena pomocí řídicí jednotky se zpětnovazebnou smyčkou. Díky široké škále takových jednotek a dobré dostupnosti můžeme říci, že přesnost je do jisté míry limitována jen rozpočtem. [7]

2.3.2 Cena

Jednou z největších překážek širšího uplatnění LM je jeho vysoká cena. Vysoká cena je způsobena vysokými výrobní náklady kvůli relativně nízkému objemu výroby. Jednou z nejdražších částí synchronního lineárního motoru (LSM) bývají PM ze vzácných zemin. Proto jsou LSM s dlouhou dráhou posunu drahé. Další nákladnou položkou v LM je enkodér pro zpětnou vazbu. Takové zařízení bývá několikrát dražší než obdobné u strojů rotačních. Podle [7] stojí 100 mm lineární enkodér okolo 500 \$ (cca 11000 Kč) a jeho cena roste se zvyšující se délkou. S novějšími typy enkodérů klesá jejich výrobní cena a tím roste jejich uplatnění. Další nákladnou položkou LM může být vodní chlazení, které potřebuje minimálně pumpu a chladič, a to vede opět ke zvýšení pořizovacích i provozních nákladů. Popularita LM i přesto roste a tím se zvětšuje jejich vyrobené množství. Díky velkému vyrobenému objemu pravděpodobně dojde v budoucnu k výraznému snížení výrobní ceny. [7]

2.3.3 Chlazení

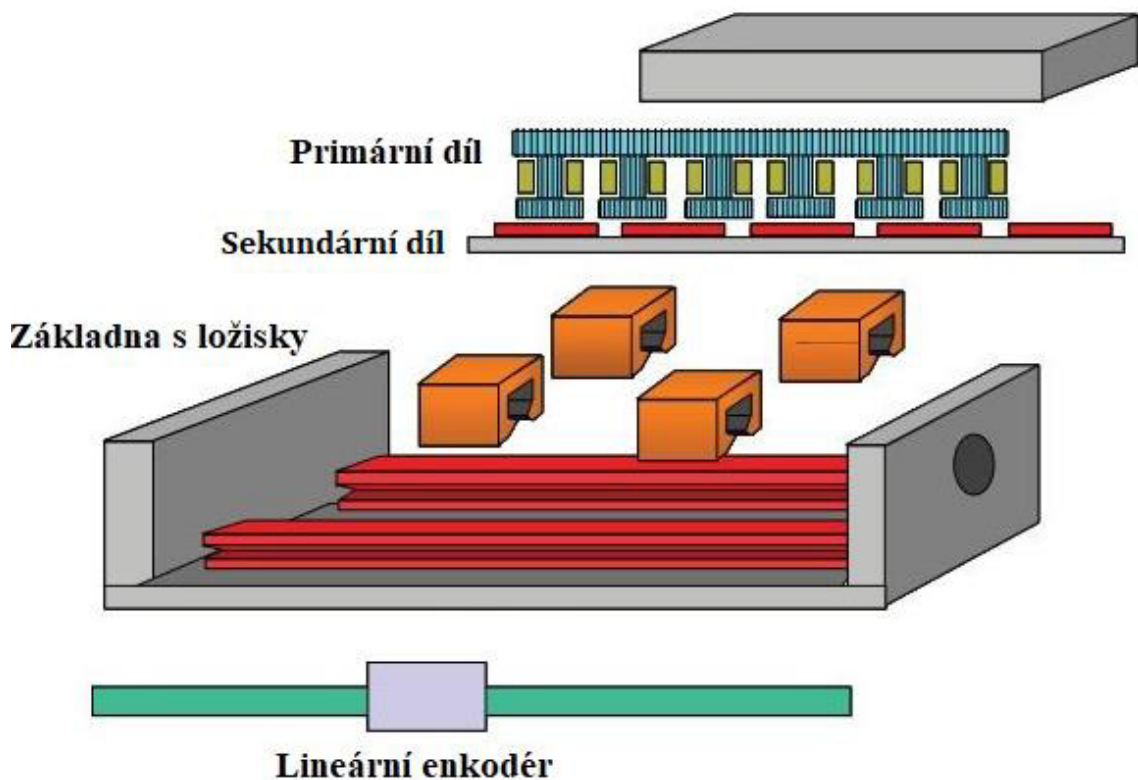
V každém reálném motoru se vyskytují ztráty způsobené hysterezí a vířivými proudy (ztráty v železe) a ztráty ve vinutí. Ve většině typů LM je na jezdec připojeno nějaké zařízení nebo nástroj, a to může být problémem, jestliže je zařízení citlivé na teplo. Pokud bychom motor nechladili, mělo by to negativní vliv na jeho výkon. Nepříjemné je také to, že nejčastěji musíme chladit pohyblivou část LM, což vyžaduje pohyblivý přívod chladícího média. Nejčastějším druhem chlazení je vodní a vzduchové. [7]

2.3.4 Tření

LM mají jen minimální tření, může se to zdát jako výhoda, ale jen do jisté míry. Pokud by během pohybu vypadl proud, bez pomocného brzdného systému by LM mohl narazit do konce základny a poškodit se. [7]

2.4 Příslušenství

V této kapitole jsou uvedeny jednotlivé komponenty nezbytné pro správný chod LM. Tento motor se skládá ze dvou základních částí, a to je samotný motor a napájecí zdroj. Další nepostradatelnou částí pro správný chod je soustava senzorů, jejíž úkolem je zajistit všechny důležité informace potřebné pro správný chod motoru. Příkladem takových senzorů jsou čidla polohy, teploty atd. LSM potřebuje navíc frekvenční měnič. K tomu všemu se ještě připojí mechanické vedení, mechanické dorazy a krytování. [6]



Obrázek 2-2: Sestava lineárního motoru, modifikováno z [8]

2.4.1 Senzorická soustava

Úkolem senzorické soustavy je zajistit správnou funkčnost, přesnost polohování a bezpečnost. Jsou to elektronické součástky, které nám převádí vstupní veličinu, kterou měříme na veličinu výstupní. Nejčastější výstupní veličinou je elektrický signál (napětí a proud), optická (změna barvy nebo jasů) nebo mechanická veličina (posunutí natočení). Tyto informace poté zpracovávají řídicí systémy. Téměř každý LM je vybaven čidlem k určení indukčnosti, teploty, jenž brání přehřátí motoru a senzory proudu. [5]

Čidlo přítomnosti je bezpečnostní zařízení bránící prudkému nárazu jezdce na mechanický doraz. Při konstrukci je nutno brát v úvahu i tyto havarijní situace.

Proto se doraz konstruuje z elastického materiálu, tak aby jezdec postupně zpomalil bez toho, aniž by došlo k přímému nárazu do konstrukce základny. Náraz můžeme dokonce i predikovat, pomocí indukčního spínače, který sepnutím zajistí reakci měniče v době, kdy je ještě možné bezpečně jezdec zastavit, aniž by došlo k nárazu. [5]

U motorů je nutné počítat s jejich zahříváním, způsobeným ztrátami ve vinutí a brzdými ztrátami, které jsou způsobeny generací proudu během brzdění. Energie vzniklá při brzdění motoru se maří na brzděním odporu, který přebytečnou energii vyzáří do okolí ve formě tepla. Brzděním odpor je postradatelnou komponentou, energie vzniklá při brzdění se může vyzářit na výkonových součástkách měniče. Pokud využijeme tuto variantu, je důležité sledovat teplotu vinutí, ale i teplotu měniče. Pro tyto účely se nejčastěji používají odporová polovodičová čidla. Nejlepší variantou je bezesporu rekuperace energie zpět do sítě. Možnost rekuperovat energii se odvíjí od typu LM. Možnosti jednotlivých typů motorů rekuperovat elektrickou energii zpět do sítě jsou uvedeny v přehledovém schématu, viz tabulka 3-1. [5]

2.4.2 Odměřovací systémy

Odměřovací systém je nepostradatelnou částí každého lineárního motoru, bez něj by nebylo možné docílit přesného polohování lineárního motoru. V dnešní době existuje spousta metod, jak vyrobit pohybovou zpětnovazebnou smyčku. Existují analogové převodníky, potenciometr na bázi pastorku a ozubeného řemene, laserové interferometry a mnoho dalších. Každá varianta má svůj vlastní typ přesnosti a také cenu. V drtivé většině aplikací se pro polohovací systém lineárního motoru používá lineární enkodér. Výstupem většiny lineárních enkodérů je skupina pulzů (ang. pulse train) generovaná pohybem čtecí hlavy po referenční lineární stupnici. Obvykle je čtecí hlava upevněna blízko poháněného jezdce a lineární stupnice je upevněna na základně. Během pohybu LM vysílá disktrétní signály zpět do kontroléru. Tyto signály poté zpracuje kontrolér. Nejčastější druhy lineárních enkodérů jsou optický a magnetický. [7]

První lineární enkodéry používané ve strojích s vysokou přesností byly enkodéry optické. Principem těchto snímačů je fotoelektrický jev. Existují dvě základní metody optického odměřování. První metoda je založena na principu odraženého paprsku, druhá metoda se nazývá transmisní. Elektrické signály se z optického enkodéru generují přerušováním nebo odrážením světelného paprsku přes optickou mřížkou. Jejich výhodou je totiž jednoduché dosáhnutí bezdotykového provedení bez tření a opotřebení. Další výhodou je spolehlivost, a hlavně vysoká přesnost a to až v řádech nanometrů. Dnes se využívají hlavně v těch

aplikacích, kde je zapotřebí precizní přesnosti. Optické odečítání patří stále mezi nejčastěji používané i přesto, že dnes existují i další technické možnosti. [1], [9]

Magnetické odměřování se skládá ze dvou základních částí: snímače a magnetické pásky. Magnetická páska se skládá z pravidelně střídajících se magnetických pólů. Páska je pak nalepena na kolejnici nebo přímo implementována do kolejnice. Druhou částí je enkodér, jehož primární součástí je nejčastěji Hallova sonda, která při posunu sondy nad magnetickou páskou generuje periodický signál. Magnetické odměřování je levnější variantou nežli optické odměřování. Nevýhodou této metody je nižší přesnost a rozlišení, které podle [8] typicky dosahuje hodnot 1 až 5 mikrometrů. [5]

Třetí variantou odměřování je použití sinusového lineárního enkodéru. Sinusový enkodér generuje analogový sinusový a kosinusový signál, místo diskrétního signálu u optického a magnetického odměřování. Mnoho moderních regulátorů pohybu má schopnost interpolovat tyto analogové signály s extrémně dobrým rozlišením. Sinusové regulátory dosahují rozlišení až na desítky nanometrů. [8]

2.4.3 Řídící systémy

Podle [6] se ve většině běžných aplikací využívají číslicové regulátory. Regulace se skládá ze tří zpětnovazebných smyček, proudové, rychlostní a polohové. V některých speciálních případech se k těmto základním regulacím přidává ještě regulace zrychlení a také pásmové propusti pro zlepšení mechanické stability pohonu. [6]

Základním stavebním kamenem regulačního obvodu je interpolátor a procesor s dostatečně vysokou operační rychlostí. Přenos informací mezi LM a řídicím systémem je obousměrný. LM pomocí své sensorické soustavy poskytuje informace o svém aktuálním stavu a zároveň přijímá řídicí instrukce z regulátoru. Díky sofistikované kombinaci sensorické soustavy a regulátoru lze signalizovat přetížení, vypadání ze synchronismu, narušení stability regulace atd. [6]

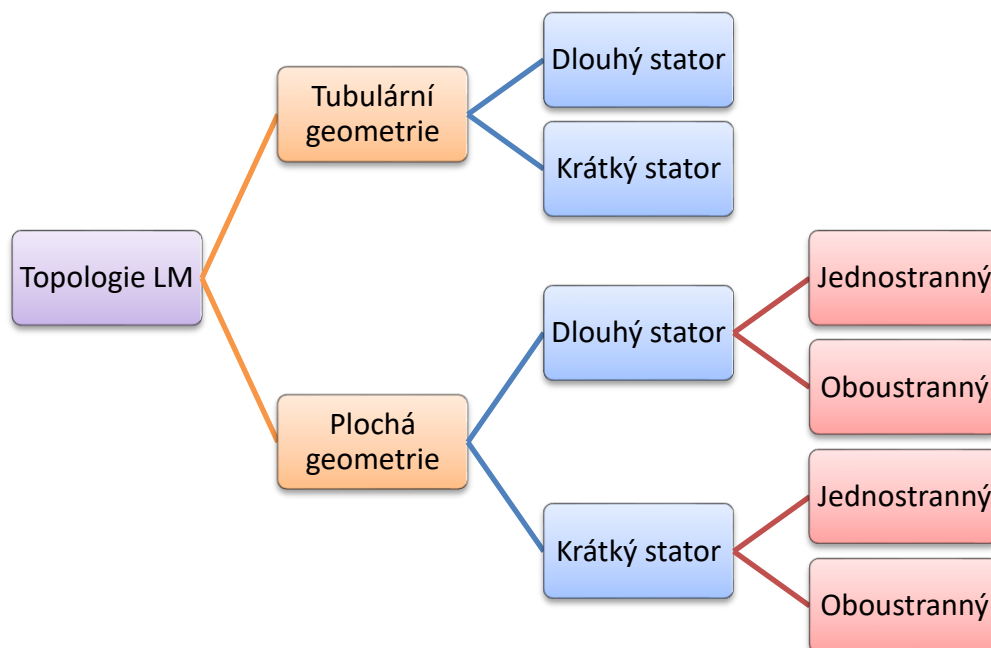
2.4.4 Mechanické vedení

Tažná síla LM je relativně vysoká, proto základna musí vydržet velké dynamické síly. Kvůli přesnosti polohování musí být rám odolný vůči nárazům a vibracím, které jsou způsobeny provozem motoru. Základna musí být konstruována tak, aby její vlastní mechanická frekvence nebyla mezi 50-500 Hz. Mechanická frekvence v tomto intervalu by mohla zmenšovat přesnost polohování, případně způsobovat rezonanci. Podle [10] platí pravidlo, že motorový systém by měl být pevně spojen s masivním tuhým tělesem, které je alespoň třikrát těžší nežli akcelerující hmota jezdce se zatížením. [10]

Nedílnou součástí mechanického vedení je lineární ložisko. Na lineární ložisko je kladeno mnoho požadavků. K nejvýznamnějším patří odolnost vůči vysoké rychlosti a velkému zrychlení, dlouhá životnost, přesnost, nízké provozní náklady, vysoká pevnost a tepelná roztažnost. To jsou jen některé vybrané nároky, které klademe na ložiska. V praxi se nejvíce používají vzduchová, kluzná a valivá ložiska. Pro aplikace s malými nároky na přesnost a maximální zatížení se mohou použít kluzná ložiska. Valivá ložiska poskytují dobrou tuhost a výbornou zatížitelnost. Také po celé délce dráhy dosahují výborné přímosti a rovinnosti pohybu. Pro nejnáročnější aplikace s vysokou přesností se volí vzduchová ložiska, která teoreticky nemají omezení pro maximální rychlost ani akceleraci. Vzduchová ložiska dosahují jen velmi malých třecích ztrát. [8]

2.5 Rozdělení lineárních motorů

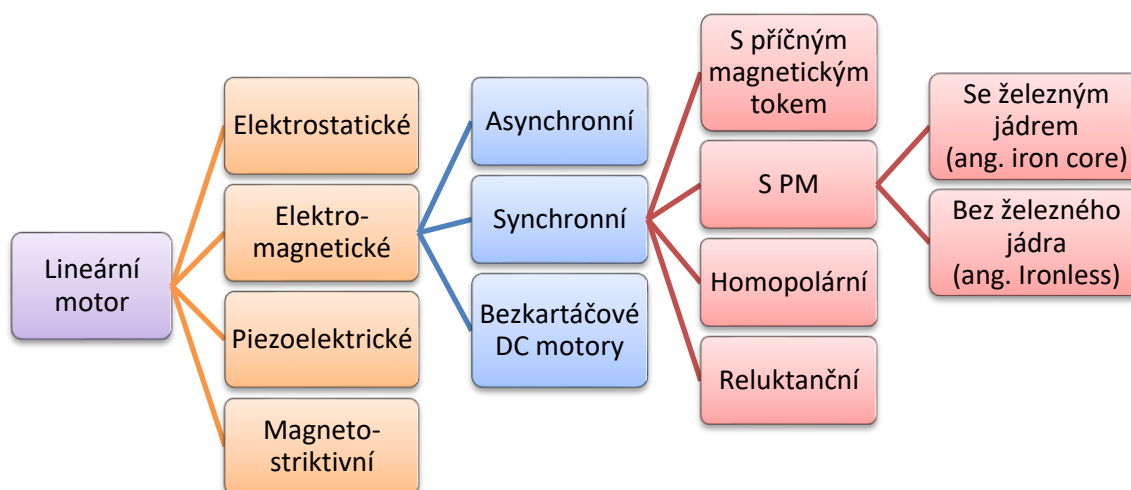
V této kapitole je uvedena stručná klasifikace jednotlivých lineárních motorů s cílem poskytnout přehled různých možností provedení. Rozdělení LM není přesně dané a může se mírně lišit podle autora. Klasifikace, která je použita v této kapitole se opírá o disertační práci [11]. Tato práce dělí LM podle topologie, viz obrázek 2-3 a podle fyzikálního principu, viz obrázek 2-4.



Obrázek 2-3: Topologie lineárních motorů, modifikováno z [11]

Každá konstrukce motoru má své vlastní výhody a nevýhody, které definuje oblasti aplikace. LM můžou být primárně děleny podle topologie jako tubulární nebo ploché. Tato základní geometrie se pak může vyrobit ve dvojnásobném provedení, a to s krátkým nebo dlouhým statorem. Rozdíl mezi dlouhým a krátkým statorem je

v délce napájecí části vůči budící. Motor s dlouhým státorem má primární část delší než sekundární část. Ve většině aplikací je sekundární část mobilní. V tomto případě je primární část s vinutím napájena ze zdroje a sekundární část zastává roli buzení. U krátkého statoru je tomu přesně naopak, primární část je kratší nežli sekundární část motoru. Mobilní částí motoru je v tomto případě primární část. Obě možnosti mají své uplatnění. Dlouhý stator se využívá například v železniční dopravě, protože není potřeba napájet jezdec. Krátký stator se využívá v běžných průmyslových aplikacích, příkladem můžou být některé osazovací automaty a CNC stroje. Nevýhodou je nutnost napájet pohyblivou část motoru. [11] [5]



Obrázek 2-4: Dělení lineárních motorů podle principu, modifikováno z [11]

Existuje několik základních fyzikálních principů, jak vytvořit elektrický LM. První možností je využití elektrostatiky k lineárního pohybu. Druhou možností je využití elektromagnetismu. Touto možností se zabývá i tato práce. Třetí a čtvrtá možnost k vytvoření lineárního pohybu je využití piezoelektrického a magnetostriktivního jevu. Tato dvě řešení se liší podle příslušného materiálu. Pro piezoelektrický jev je síla tvořena za přítomnosti zdroje elektrického pole a pro magnetostriktivní je síla tvořena díky přítomnosti zdroje magnetického pole. [11]

Tabulka 2-1: Rozsahy síly pro jednotlivé motory s nepřetržitým provozem a bez přídavného chlazení [11]

Druh motoru	Maximální síly na cm^{-2}
Asynchronní lineární motor	$2 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$
Synchronní lineární motor se železným jádrem	$6 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$
Synchronní lineární motor bez železného jádra	$3 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$
Reluktanční lineární motor	$1,5 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$
Lineární motor s příčným magnetickým tokem	$3 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$

3 TYPY LINEÁRNÍCH MOTORŮ

Tato kapitola se zabývá principem různých typů LM. U každého motoru jsou uvedeny jeho výhody a nevýhody. U jednotlivých typů motoru je uvedena i jeho současná reálná aplikace v praxi. Na začátku této kapitoly je uvedena přehledová tabulka jednotlivých LM a jejich vlastností, viz tabulka 3-1.

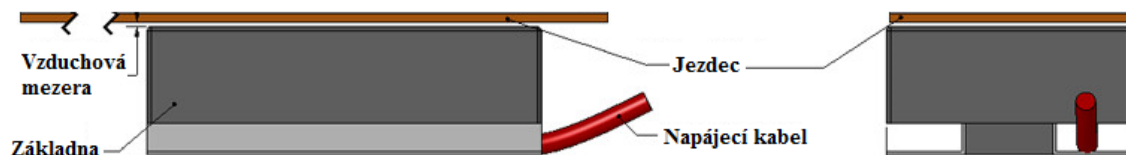
Tabulka 3-1: Přehledová tabulka vlastností různých typů lineárních motorů [11]

	LSM se železným jádrem	LSM bez železného jádra	LSM s příčným mag. tokem	Reluktanční LSM	Asynchronní lineární motor
Přitažlivá síla ($I=0$ A)	Nízká	Vysoká	Vysoká	Žádná	Žádná
Přitažlivá síla ($I\neq 0$ A)	Nízká	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Opačná
Cogging	Ne	Ano	Ano	Ne	Ne
Účinnost	Dobrá	Velmi dobrá	Velmi dobrá	Horší	Horší
Rekuperace energie	Snadná	Snadná	Snadná	Obtížnější	Obtížnější
Citlivost na změnu vzduchové mezery	Nízká	Vysoká	Vysoká	Velmi vysoká	Velmi vysoká

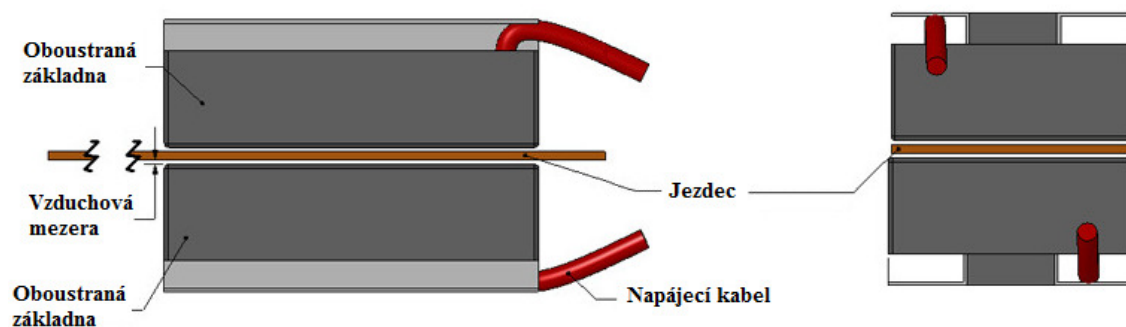
3.1 Asynchronní lineární motor

Asynchronní lineární motor (ALM) je konstrukčně velice jednoduchý, a tudíž i o něco levnější nežli většina ostatních motorů. Princip je stejný jako u rotačního třífázového asynchronního motoru. Jediný rozdíl je v tom, že u lineárního motoru se používá posuvné lineární magnetické pole, a nikoliv točivé jako u motorů rotačních. Základna je tvořena trojfázovým vinutím uloženým v drážkách z elektrotechnických plechů. Vinutí v základně vytváří již výše zmíněné posuvné magnetické pole ve vzduchové mezeře, které indukuje proud ve vodivém jezdcí. Jezdec je mnohem levnější a jednodušší oproti sekundárnímu dílu v synchronním lineárním motoru. Jezdec v tomto případě tvoří klec nakrátko. Klec nakrátko je tvořena buď hliníkovým, případně měděným pásem připevněným na ocelové podložce, nebo

vinutím uloženým do drážek. Základna může být provedena, buď jednostranně viz obrázek 3-1 nebo oboustranně, viz obrázek 3-2. Oboustranné uložení vinutí po obou stranách jezdec zajišťuje lepší rozložení radiálních sil. [11]



Obrázek 3-1: Jednostranný asynchronní lineární motor, modifikováno z [35]



Obrázek 3-2: Oboustranný asynchronní lineární motor, modifikováno z [35]

K dosažení dobrých výsledků z hlediska účinnosti, je nutné, aby ALM měl malou vzduchovou mezeru. Konkrétně se jedná o rozměr okolo 1 mm. Navíc pokud srovnáme tento druh lineárního motoru s motorem synchronním, zjistíme, že ALM potřebuje více energie k vyprodukování stejné síly. [11]

ALM se podle [6] využívá v průmyslových dopravních manipulátorech, podavačích, závorách, případně lze využívat k pohánění posuvných dveří, bran a tak dále. Literatura [3] uvádí možnosti využití ALM s krátkým statorem i pro železniční dopravu. Příkladem takovéto aplikace je metro v Japonském městě Yokohama. Zajímavou aplikací je čerpání tekutých kovů. V takové aplikaci tvoří primární část trubice s vinutím a sekundární část tvoří přímo roztavený kov. [6]

Výhodou těchto nenáročných motorů je možnost je přímo připojit do rozvodné sítě 3x 400 V bez nutnosti využití frekvenčního měniče. Další výhodou je, že v případě výpadku proudu se motor sám zastaví, což je výhoda oproti synchronnímu motoru. [6]

3.2 Synchronní lineární motor

Podle [1] je lineární synchronní motor (LSM) druh lineárního motoru jehož mechanický pohyb je synchronizován s magnetickým polem. To znamená, že

mechanická rychlost je stejná jako rychlost posuvného magnetické pole. Primární díl LSM bývá v anglické literatuře označován jako „armature“ nebo „forcer“. Primární díl vytváří posuvné magnetické pole. Sekundární díl LSM vytváří stejnosměrný magnetický tok. Tento magnetický tok se podle [1] může také označovat jako budící systém. Výjimkou jsou reluktanční motory, které pracují na principu změny magnetického odporu. Princip těchto motorů je detailněji popsán v kapitole 3.2.2. Synchronní rychlost LSM je definována vztahem:

$$v_s = 2 \cdot f \cdot \tau = \frac{\omega}{\pi} \cdot \tau \quad (3.1)$$

kde v_s je synchronní rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], f je vstupní frekvence napětí [Hz], τ je rozteč pólů [m] a ω je úhlová rychlost [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]. Synchronní rychlost LM nezáleží na počtu pólů (2p). [1]

Posuvná síla LSM s PM má dvě složky, první složka vzniká po interakci mezi posuvným magnetickým polem a statickým stejnosměrným magnetickým tokem. Druhá složkou vzniká při změně reluktance během posunu. Posuvná síla v ose x je podle [1] definována jako:

$$F_x = \frac{P_2}{v_s} \quad (3.2)$$

kde F_x je posuvná síla v ose x [N], P_2 je výkon LSM [W] a v_s je synchronní rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Primární díl obsahuje nejčastěji třífázové vinutí, které může mít dvě základní provedení, a to vinutí se železným jádrem a bez železného jádra, viz obrázek 2-4. Sekundární díl je složen z elektromagnetického buzení, případně mohou být použity PM. Stejnosměrné elektromagnetické buzení se v praxi často nahrazuje PM. Výjimkou jsou LSM pro pohyb na dlouhé vzdálenosti, tím se podle [1] myslí více než 10 m. Příkladem takovýchto aplikací jsou vozidla na bázi magnetické levitace. Zde je použití PM ekonomicky nevýhodné, proto se zde využívá elektromagnetické buzení.

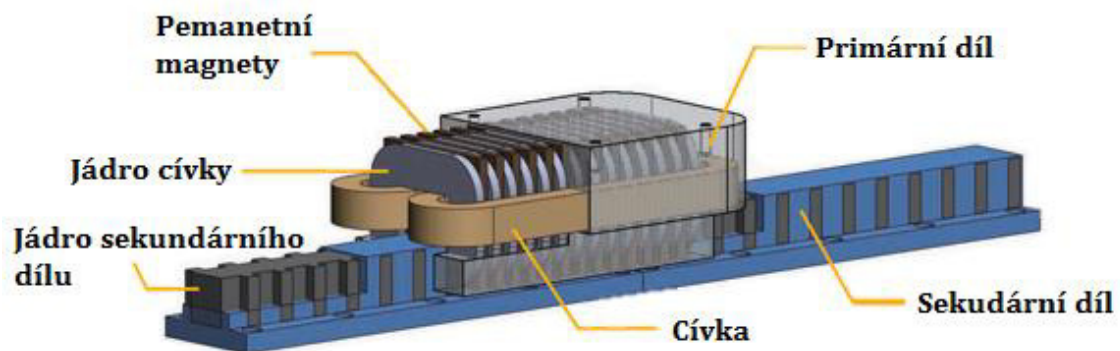
Pokud bychom otáčeli manuálně rotační motor s PM v kombinaci s cívkami na železném jádře nebo posunovali LM s PM, všimli bychom si, že během otáčení dochází k pravidelné změně síly potřebné k otočení rotoru, případně u lineárního motoru k posunutí. Tomuto jevu se říká cogging. Ten je způsoben přitažlivými silami mezi jádry cívek a permanentními magnety. Síla, která působí proti pohybu primární části, se nazývá zádržná síla a je způsobena přitažlivou silou mezi železným jádrem cívek a permanentními magnety. Funkce této síly v závislosti na pozici primární části vůči základně se periodicky opakuje a má sinusový tvar. Když začne vinutím primární části procházet proud, tato zádržná síla se přidá k síle posuvné. Skládání těchto sil způsobí vlnění posuvné síly. Vlnění posuvné síly zhoršuje přesnost rychlosti a kontroly pozice zejména při operacích za nízkých rychlostí. Také zvlnění síly může způsobovat nežádoucí vibrace a zvuky. Proto již při

návrhu LM je snaha tyto síly co nejvíce redukovat. Cogging a některé vyšší harmonické můžeme kompenzovat pomocí upravení konstrukce motoru, například zkoseným uložením permanentních magnetů nebo volbou materiálu primárního dílu, který není feromagnetický. Problematika návrhu motoru s ohledem na cogging je více rozvedena v literatuře [12]. [1], [5], [12]

3.2.1 Lineární motor s příčným magnetickým tokem

Název lineárního motoru s příčným magnetickým tokem (TFLM) je přeložen z anglického „Transverse flux linear motor“. Obrázek 3-3 ukazuje základní konstrukci TFLM. Primární díl je tvořený segmenty železných jader a PM. Primární díl je oddělený od sekundárního dílu vzduchovou mezerou. Vinutí je uložené v sekundárním dílu. TFLM má rozdílnou hodnotu počtu pólů na primární a na sekundární části. Posuvná síla se vytváří pomocí silového působení magnetických pólů primárního a sekundárního dílu, tyto síly se sčítají a vytvoří výslednou posuvnou sílu. [13]

Nevýhodou těchto motorů je jejich problematická a složitá konstrukce při použití více fází. Řeší se to tím, že se zkombinuje více jednofázových TFLM. U tohoto druhu motorů se podle [11] často vyskytuje silný cogging a reluktanční síly, které způsobují nerovnoměrnost posuvné síly.



Obrázek 3-3: Lineární motor s příčným magnetickým tokem, modifikováno z [14]

Tento druh motorů byl vyvinut do aplikací s vysokým výkonem jako například pohon vlaků, elektrodynamických vibračních přístrojů pro průmysl. Velmi zajímavou aplikací je TFLM generátor s volnými písty. Tento druh generátoru se podle [15] nyní vyvíjí v kombinaci se spalovacím dvoutaktním motorem. Tento druh generátoru vyvíjí Japonská Toyota pro hybridní auta. Návrh konstrukce spalovacího motoru přímo pro výrobu elektrické energie by mělo podle [15] zvýšit účinnost spalovacího motoru až na 42 %.

3.2.2 Reluktanční lineární motor

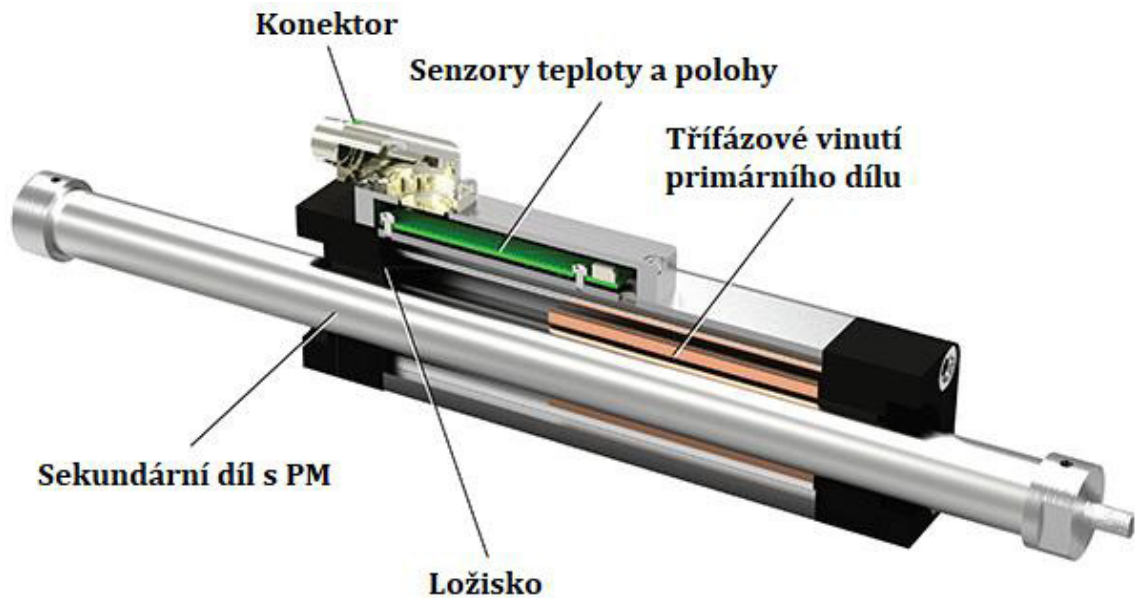
Na rozdíl od ostatních zmíněných motorů pracuje reluktanční lineární motor (RLM) na základě principu změny reluktance (magnetického odporu). Sekundární díl motoru se snaží dostat do polohy s nejmenším magnetickým odporem. Interakcí mezi magnetickým posuvným polem vytvořeným primárním vinutím a významným rozdílem magnetického odporu v oblastech sekundárního dílu dojde k vytvoření posuvné síly. Tento druh LM neobsahuje PM, což je velká ekonomická výhoda oproti LSM s PM. Výhodou RLM podle [16] je jejich robustní konstrukce, relativně nízká cena při sériové výrobě, nízké nároky na údržbu a velká tahová síla při široké škále rychlostí. Všechny magnetické části jsou vyrobeny z izolovaných dynamo plechů, kvůli snížení ztrát v železe RLM. Největším problémem těchto motorů je jejich složitý návrh, ve kterém je obtížné přesně stanovit magnetický tok. Jedna z velkých nevýhod těchto motorů spočívá ve velké hlučnosti během provozu, nižší účinnosti kvůli velké vzduchové mezeře a také kvůli kolísání posuvné síly. Podle literatury [16] je budoucnost těchto motorů ve vysokorychlostní železniční dopravě. Další možností aplikace RLM je vytvoření injekční pumpy poháněné tímto motorem, Tato možnost je detailně popsána v literatuře [17]. Podle [18] se RLM uplatňují jako pohony výtahů, nákladů a dveří díky své spolehlivosti a ceně. [1] [11]

3.2.3 Tubulární lineární motor

Tubulární synchronní lineární motor (TSLM) pracuje na stejném principu jako LSM. Jedná se o speciální typ topologie LM. V anglické literatuře je možné tento motor najít i pod pojmem „Cylindrical linear motor“. De facto se jedná o LSM, který je obtočen okolo osy rovnoběžně se směrem posuvného magnetického pole, tím pádem i rovnoběžně se směrem posuvné síly. Podle [7] našel tento druh LM jako jeden z prvních cestu do komerčních aplikací.

Primární část TSLM je nejčastěji tvořena třífázovým vinutím uloženým ve drážkách nemagnetické oceli. Sekundární část je nejčastěji pohyblivá tyč, uvnitř které jsou zapouzdřeny PM. Mezi primárním a sekundárním dílem je nejčastěji kluzné ložisko. V praxi je možné narazit i na variantu, kde je sekundární část statická a pohybuje se primární část s vinutím. [1], [7]

U TSLM se nevyskytuje pulzace tažné síly (cogging). Pulzace nevzniká, protože magnetické přitažlivé síly mezi primárním a sekundárním dílem jsou vykompenzované díky rotační symetrické konstrukci. Literatura [19] uvádí jako výhody TSLM jeho dobrou dynamickou charakteristiku, vysokou účinnost a relativně velkou posuvnou sílu. [6]



Obrázek 3-4: Řez lineárního tubulárního synchronního motoru, modifikováno z [20]

Jednou z největších nevýhod je limitovaná délka pohybu. Delší provedení nemusí být stabilní z důvodů vlastní hmotnosti sekundárního dílu. Tento motor díky své konstrukci je relativně těžký. Další nevýhodou TSLM je limitace škály rozměrů a síly. [21]

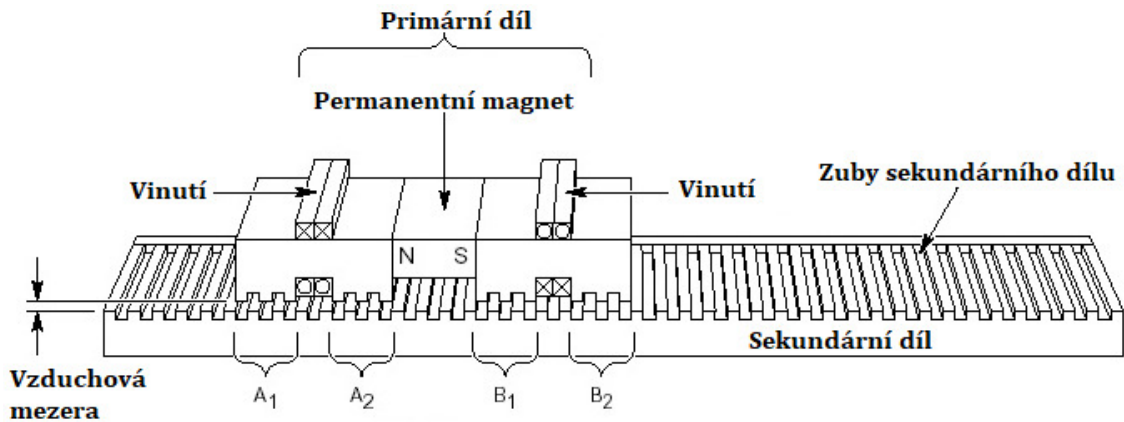
Podle [19] se TSLM využívá v mnoha průmyslových aplikacích jako lineární kompresor, pohon dveří od výtahu případně u robotů. Nejčastěji se s tímto motorem setkáme podle [6] v přesných přísuvech vyvrtávacích automatů desek tištěných spojů, v přísuvech obráběcích strojů nebo pohonů regulovatelných ventilů.

3.2.4 Hybridní krokový lineární motor

Podle literatury [1] nemá klasický krokový lineární motor praktické využití. Praktické využití má pouze hybridní krokový lineární motor (HLSM). Pod pojmem hybridní krokový motor se myslí motor, který v sobě kombinuje dva základní konstrukční principy. První možností vytvoření krokového motoru je využití rozdílné magnetické vodivosti – pasivní krokový motor. Druhou možností konstrukce je využití PM, čímž vznikne tzv. aktivní lineární krokový motor. [22]

HLSM se skládá, ze dvou částí a to primární (pohyblivá) a sekundární (statická). Obě části HLSM jsou vyrobené z oceli s velkou permeabilitou. Oba díly jsou vroubkovány se stejnou roztečí. Avšak vroubky jednoho pólu primární části jsou posunuty vůči druhému pólu o $\frac{1}{4}$ nebo $\frac{1}{2}$ velikosti rozteče. Díky tomuto uspořádání vroubků je možné pomocí cívek regulovat magnetický tok vyvolaný PM. [1]

Mezi primárním a sekundárním dílem je jen velmi malá vzduchová mezera, která je udržována pomocí silného proudu vzduchu z kompresoru. Průměrný tlak tohoto proudu vzduchu je podle literatury [1] okolo 300 až 400 kPa. [1]



Obrázek 3-5: Hybridní krokový lineární motor, modifikováno z [23]

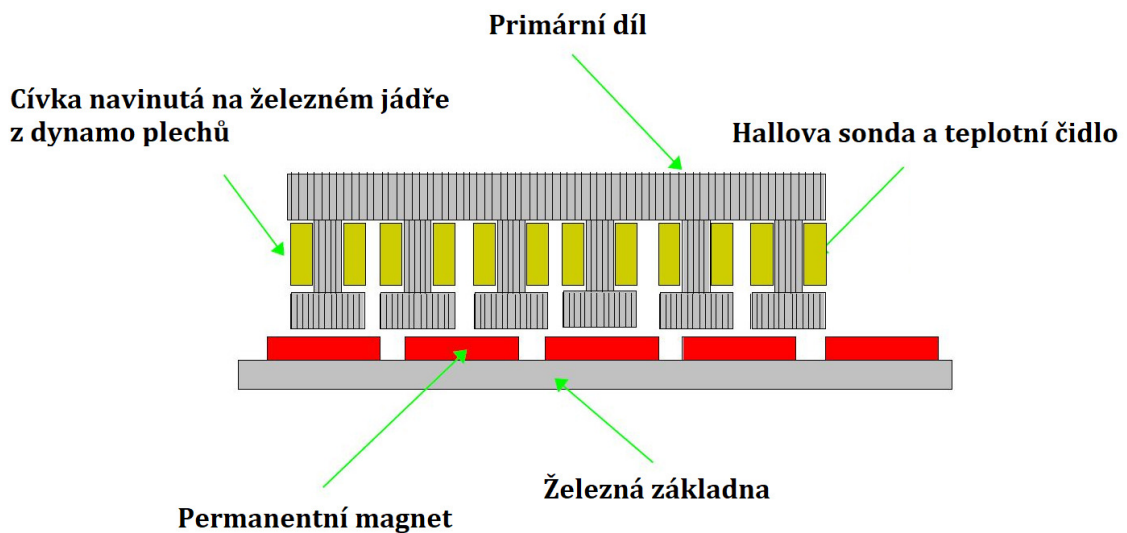
HLSM nachází uplatnění hlavně v aplikacích s mimořádně velkými nároky na přesnost polohování a na rychlou akceleraci. Pomocí mikroprocesorového kontroléru je možné podle [1] dosáhnout rozlišení krokového motoru až několik stovek kroků na milimetr. Hlavními výhodami tohoto typu motoru je vysoká účinnost, vysoká spolehlivost, malá setrvačnost systému. Díky těmto výhodám se tyto motory využívají v automatizaci, aplikacích s rychlým pozicováním, faxu, případně v zautomatizovaných medicínských nebo laboratorních přístrojích. Tento motor je zejména vhodný pro počítačově řízené manipulační aplikace, kde je rovněž potřeba vysoká přesnost manipulace a také opakovatelnost pohybu. [1]

3.2.5 Lineární motor se železným jádrem

Tento druh LM vychází z klasického konceptu synchronního motoru s PM. V anglické literatuře můžeme najít tento motor ještě pod označením „Toothed linear synchronous motor“ neboli lineární motor se „Zuby“. Pod pojmem zuby se rozumí výčnělky mezi drážkami, na kterých je navinuto vinutí primárního dílu. Konstrukce tohoto typu motoru je detailněji znázorněna na schématu, viz obrázek 3-5. Primární díl lineárního motoru se železným jádrem se skládá z vinutí okolo jádra z dynamo plechů. Hallova sonda a teplotní čidlo jsou umístěny uvnitř vinutí. Sekundární díl se skládá z PM ze vzácných zemin, které jsou upevněny na základnu. [7]

Lineární motor se železným jádrem dosahuje velmi dobrých měrných výkonů na objem, viz tabulka 2-1. Další výhodou těchto motorů je i dobré chlazení tohoto motoru, a to díky tomu, že vinutí je navinuto na železném jádře, které dobře odvádí teplo. Motor může být doplněn i vodním chlazením propleteným primárním dílem. [7]

Tento druh motoru můžeme podle [24] najít například ve vrtačkách desky plošných spojů od firmy Posalux. Kde se pomocí těchto motorů pohybuje vrtačka desky plošných spojů. V těchto aplikacích tyto motory pohybují s tělesy vážícím okolo 500 kg se zrychlením až 1G a rychlostí 1 m·s⁻¹. Další zajímavou aplikací těchto motorů je tiskárna od společnosti Arri, která rovněž využívá tento druh motorů. Využití těchto motorů umožnilo výrazné zrychlení tiskového procesu. LSM se železným jádrem je zde využitý opět na přesné polohování. Více o této aplikaci je možné se dočíst v literatuře [24].

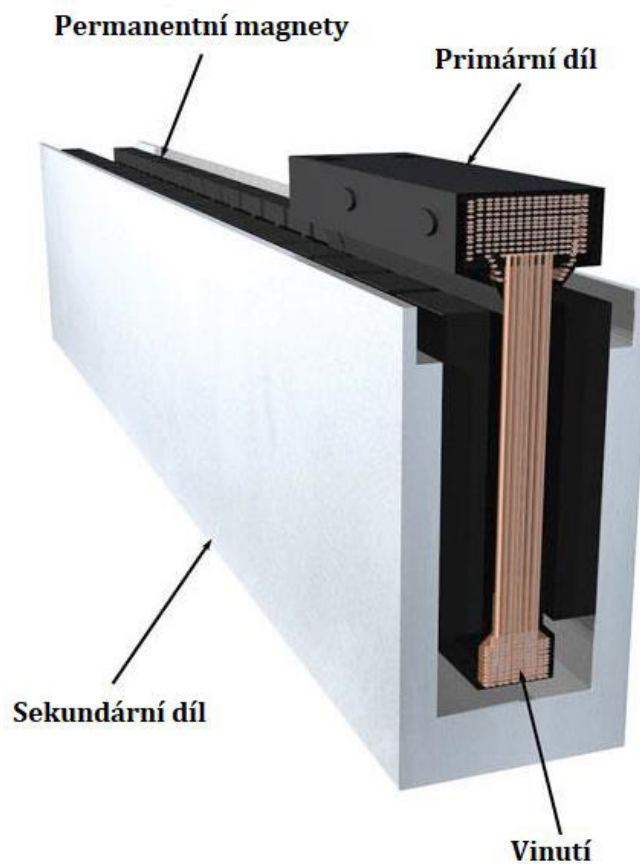


Obrázek 3-6: Lineární motor se železným jádrem, modifikováno z [7]

Nevýhodou těchto motorů je velká přitažlivá síla mezi primární a sekundární částí. Tato přitažlivá síla je způsobena interakcí mezi primárním dílem, který je vyrobený ze železa a PM na sekundárním dílu. Velikost přitažlivé síly je také způsobena malou vzduchovou mezerou mezi oběma díly, která má obvykle okolo 0,8 mm. Přitažlivá síla je podle [11] asi 5krát větší nežli síla posuvná u motorů bez přídavného chlazení. U motorů s přídavným vodním chlazením je přitažlivá síla přibližně 3krát větší nežli síla posuvná. Přitažlivou sílu je možné vykompenzovat tím, že použijeme oboustrannou geometrii. Tím dojde k vyrušení přitažlivé síly. Problémem je pak ale vyšší cena, kvůli dvojnásobnému počtu PM a taky vysoká citlivost na změnu velikosti vzduchové mezery. I malý rozdíl rozměru jedné a druhé vzduchové mezery způsobí nevyvážení přitažlivých sil a dojde k destabilizaci celého systému. Další nevýhodou je i cogging, který je způsoben konstrukcí motoru. Cogging může být při vhodném konstrukčním návrhu potlačen. [1]

3.2.6 Bez železného jádra

LM bez železného jádra z anglického „Ironless linear motor“, jak už název napovídá má vinutí primární části bez železného jádra cívky. V některé literatuře se označuje názvy „Aircore“, „Toothless“ případně „U-channel“. Nejčastější provedení je oboustranný LM s krátkým statorem, viz obrázek 3-7. Sekundární část je tvořena oboustrannou řadou proti sobě umístěných PM. Vinutí primární části je umístěno ve vzduchové mezeře mezi dvěma řadami magnetů. Protože jsou magnety proti sobě snižuje se tím unik magnetického toku. Vinutí je tvořeno z vinutých cívek, které jsou zalité epoxidem, díky tomu je primární část lehčí nežli u ostatních typů LM. Na konci je vinutí opatřeno hliníkovým rámem. Hliníkový rám má více funkcí: celou konstrukci zpevňuje, používá se na vedení primární části a zároveň pomáhá při odvodu tepla. [9]



Obrázek 3-7: Řez lineárním motorem bez železného jádra, modifikováno z [25]

Výhodou tohoto typu LM je absence přitažlivé síly mezi primární a sekundární části. To je důsledek toho, že primární část neobsahuje feromagnetické materiály a je umístěna mezi dvěma řadami PM. To je velkou výhodou pro ložiska a také pro ovládání a instalaci LM. Benefitem absence přitažlivé síly je ztráta coggingu.

To je výhodné u aplikací, u kterých je potřeba extrémní přesnosti řízení rychlosti zejména v malých rychlostech. [7]

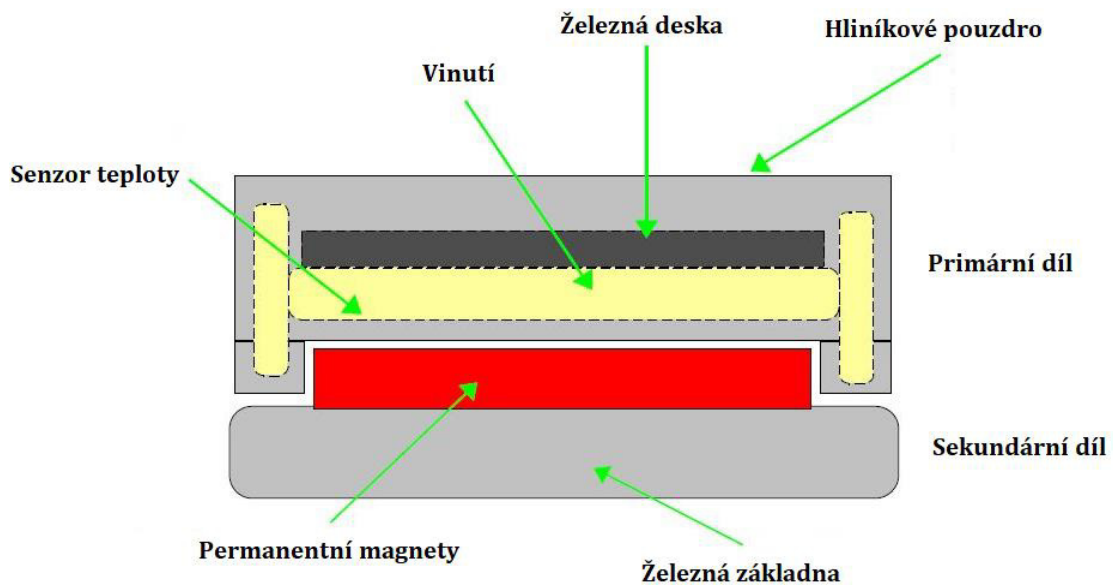
Nevýhodou těchto motorů je problematický odvod tepla z cívek primární části. Primární díl je tvořený z vinutých cívek, které jsou zalité epoxidem. Teplo vzniklé při provozu v cívkách se musí odvádět přes hliníkový rám a poté do chladiče. Teplo také uniká přes vzduchovou mezeru. Obě tyto cesty nejsou podle [7] moc účinné, protože mají velký tepelný odpor. Podle [26] je možné zlepšit chlazení primární části tím, že se primární vinutí rozdělí do dvou vrstev a mezi ně se vloží chladič systém. To umožňuje zvýšit výkon motoru. Mezi další nevýhody primárního dílu patří jeho relativně malá mechanická pevnost. Posuvná síla je generována v cívkách, což způsobuje, že všechna vyvíjená síla na posunutí primární části se objeví v opačném směru na vinutí a následně na epoxidu. Tento motor dosahuje v porovnání s LM se železným jádrem mnohem slabší strukturální tuhosti. Tato slabší konstrukce omezuje maximální velikost motoru a síly, kterou je schopen vyvinout. Podle [11] dosahuje tento motor nižší účinnosti nežli obdobný motor se železným jádrem, i přesto, že LM bez železného jádra téměř nemá ztráty v železe. Je to způsobeno velkou šířkou vzduchové mezery. Velikost této mezery je dána součtem šířky primární části a výškou magnetů. Na závěr je také třeba dodat, že díky oboustrannému provedení je potřeba dvakrát více magnetů a tím pádem je cena vyšší nežli u varianty se železným jádrem. [7], [11]

Motory bez železného jádra se díky velké rychlosti akcelerace a brždění, malé hmotnosti a přesnosti a plynulosti pohybu uplatňují v mnoha aplikacích. Podle [24] tyto motory se využívají v osazovacích automatech, kde se využívá jejich přesnost a rychlost. Literatura [27] uvádí možnost využití v textilním průmyslu, kde umožnil pohyb látky v osách x a y. Další velmi zajímavou aplikací LM bez železného jádra je podle [1] japonský vlak Maglev MLX001, který má na palubě supravodivé cívky bez železného jádra a stacionární třífázové vinutí také bez železného jádra je rozloženo podél trati.

3.2.7 Bez drážek

LSM bez drážek nebo jak bývá označován v anglické literatuře „Slotless linear motor“ je kombinací základních konstrukčních prvků předchozích dvou typů motorů (s železným jádrem a bez železného jádra). Primární díl neobsahuje drážky na uložení vinutí. Primární díl je velice podobný jako u LSM bez železného jádra, cívky primárního dílu jsou navinuty bez železného jádra. Na rozdíl od LSM bez železného jádra jsou ale umístěné na železné desce (ang. Back iron). Tato sestava je pak uložena do hliníkového pouzdra s otevřeným dnem. Pouzdro je poté vyplněno epoxidem, aby došlo k zpevnění a zajištění vinutí a také celé konstrukce primární části. Sekundární díl je tvořený stejně jako u LSM se železným jádrem základnou

s PM ze vzácných zemin. Proto je možné se o těchto motorech dočíst, že se jedná o hybridní motor mezi LSM se železným jádrem a bez železného jádra. [7]



Obrázek 3-8: Řez LSM bez drážek, modifikováno z [7]

Vzhledem k tomu že LSM bez drážek je kombinací dvou motorů, jsou i jeho vlastnosti kompromisem mezi vlastnostmi těchto dvou motorů. Výhodou je, že motor je jednostranný, a tudíž mu stačí budící magnety pouze v jedné řadě. To je velká výhoda, co se týče pořizovací ceny a také kvůli nižší hmotnosti. Díky hliníkové konstrukci má lepší odvod tepla nežli LSM bez železného jádra, ale horší nežli LSM se železným jádrem. Ztrátové teplo z cívek se přenáší kondukcí do železné desky a z ní do hliníkového pouzdra odkud se vyzáří do prostoru. Hliníková konstrukce primární části s kombinací s připevněným vinutím na železnou desku dosahuje lepší pevnosti nežli u LSM bez železného jádra. Díky tomu dosahuje LSM bez drážek větší síly a také to redukuje možnosti poruch spojených s únavou materiálu. Další výhodou je lehčí primární díl ve srovnání s LSM se železným jádrem. To je výhoda zejména pro aplikaci s dynamickou manipulací s lehkými náklady. Konstrukce primární části s použitím železné desky má za následek vznik přitažlivé síly mezi primární a sekundární částí motoru, nicméně stále je mnohem menší nežli u verze motoru se železným jádrem. Díky velké vzduchové mezeře mezi železnou deskou primární části a PM sekundární části se zde objevuje nižší cogging nežli u LSM se železným jádrem. Díky tomu je možné tento motor využít i pro aplikace s vysokými nároky a přesností polohování. Nevýhodou tohoto typu motoru je jeho velká citlivost na velikost vzduchové mezery. Další nevýhodou je menší účinnost v porovnání se základní variantou LSM bez železného jádra a s ním. [7]

Podle [28] je možné pro tento typ motorů nalézt uplatnění v kompresorech, v automatizaci, kde je nutná vysoká přesnost.

4 SIMULACE POMOCÍ ODPOROVÉ SÍTĚ

V této kapitole je uveden popis simulace LM se železným jádrem pomocí metody odporové sítě. Na úvod kapitoly je rekapitulována teorie magnetických obvodů. Následně je stručně přiblížena metoda odporové sítě. Dále je v této kapitole ukázán postup sestavení odporové sítě pro lineární synchronní motor se železným jádrem od společnosti Baumüller.

4.1 Magnetické obvody

Principem magnetických obvodů je soustředit magnetické pole do určitého pracovního prostoru, aby bylo možné jeho využití. Magnetické pole je nutné koncentrovat do vhodně tvarovaného prostoru za účelem jednoduchosti aplikace. Magnetické pole se vytvoří v okolí vodičů, kterými protéká. Nejčastějším zdrojem magnetického pole je cívka s určitým počtem závitů nebo PM. Další částí magnetického obvodu jsou magneticky dobře vodivé dráhy, které pak spolu se zdrojem magnetického pole vytváří disktrétní magnetický obvod. Disktrétní magnetický obvod je podle [29]: „*obvod v němž je cesta magnetického toku Φ ostře vytyčena a ohraničena v geometrickém smyslu*“. [30] [29]

Pro lineární disktrétní magnetický obvod lze zavést následující magneto-elektrické analogie. Pro výpočet magnetického napětí platí:

$$U_m = N \cdot I = H \cdot l \quad (4.1)$$

kde U_m je magnetické napětí („ampérvávitý“) [A], N je počet závitů cívky [-], I je proud procházející cívkou [A], H je intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$].

Pro výpočet magnetického proudu platí:

$$I_m \equiv \Phi = B \cdot S \quad (4.2)$$

kde I_m je magnetický proud [Wb], Φ je magnetický tok [Wb], B je magnetická indukce [T], S plocha příčného průřezu [m^2].

Pro výpočet magnetické vodivosti (permeance) platí:

$$\lambda_m = \frac{I_m}{U_m} \quad (4.3)$$

kde λ_m je magnetická vodivost [H], I_m je magnetický proud [Wb], U_m je magnetické napětí [A]. Rovnice (4.1) až (4.3) vyjadřují Hopkinsonův zákon. Pokud dosadíme pravé strany rovnic (4.1) a (4.2) do rovnice (4.3) dostaneme výraz pro výpočet magnetické vodivosti:

$$\lambda_m = \frac{I_m}{U_m} = \frac{B \cdot S}{H \cdot l} = \mu \cdot \frac{S}{l} \quad (4.4)$$

kde μ je permeabilita prostředí [$H \cdot m^{-1}$].

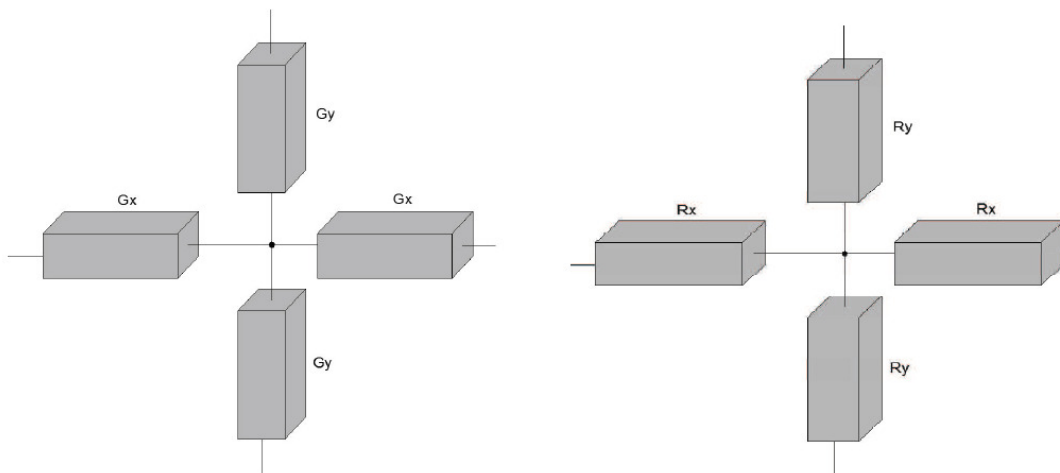
Magnetický odpor je převrácená hodnota magnetické vodivosti:

$$R_m = \frac{1}{\lambda_m} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{s} \quad (4.5)$$

kde R_m je magnetický odpor (reluktance) [H^{-1}]. [29], [30]

4.2 Odporová síť

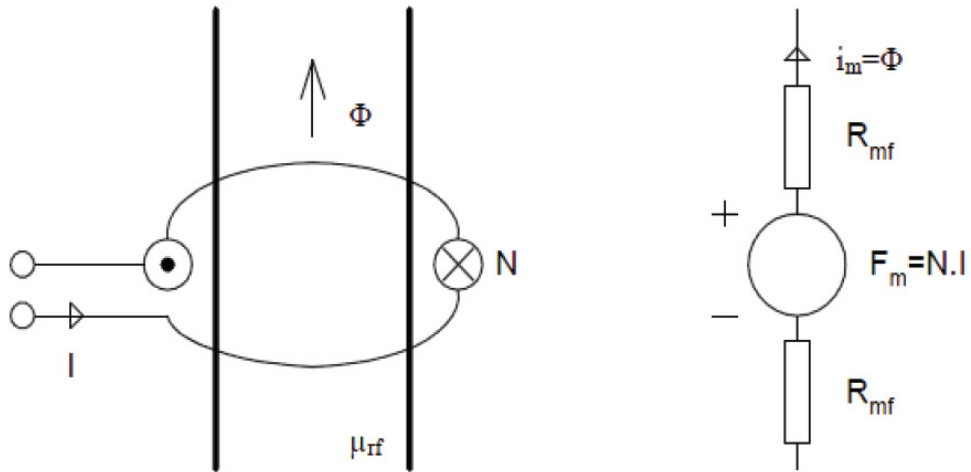
Simulace fyzikálních jevů pomocí aplikace metody odporové sítě je založena na vytvoření ekvivalentního elektrického modelu. Model pak následně lze vypočítat jako běžný elektrický obvod, díky analogii Hopkinsonova a Ohmova zákona. Pro aplikaci této metody je nezbytné znát přesně parametry motoru a jeho součástí. Mezi tyto parametry patří např. rozměry, materiál, konstrukce atd. Princip této metody spočívá v rozdělení zkoumaného předmětu na elementární řezy o zvolené šířce. Každý takový řez se poté rozdělí na více segmentů. Jednotlivé segmenty se poté nahradí odporovým elementem. Tím vytvoříme samotný odporový model. Každý model se skládá z určitého počtu segmentů o čtyřech odporech vzájemně spojených v uzlu, viz obrázek 4-1. Díky takovéto síti s mnoha elementy je možné analyzování magnetických a rozptylových toků v daném modelu. Je možné také použít místo odporů i vodivostní síť, výsledek to nijak neovlivní. [31]



Obrázek 4-1: Vodivostní a odporový element [31]

Na každém elementu určitého prostředí zkoumaného objektu se uvažuje konstantní permeabilita. Pro zvýšení přesnosti a objektivnosti je možné uvažovat každý odporový a vodivostní prvek jako nelineární. Tato možnost je výhodná pro aplikace, které mají za úkol sledovat změny magnetických toků při změně buzení. [31]

Zdroje magnetického napětí jsou v odporové síti reprezentovány jako zdroje elektrického napětí, viz obrázek 4-2. [32]

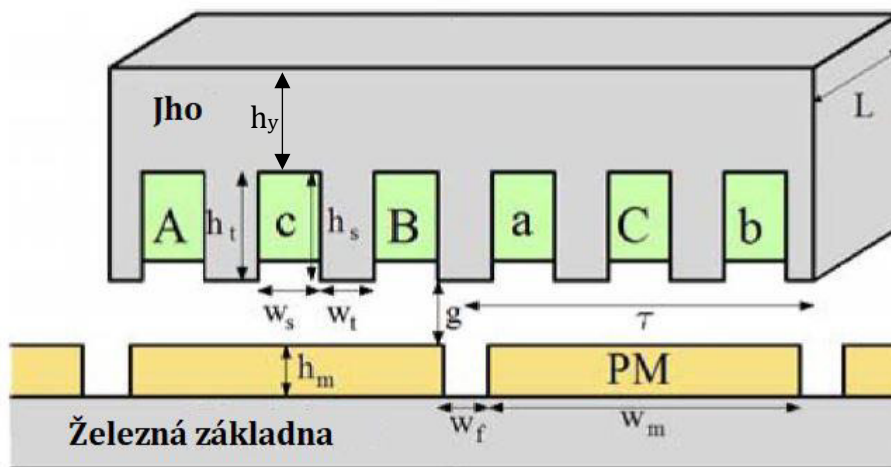


Obrázek 4-2: Ukázka analogie magnetického obvodu a elektrického obvodu [32]

4.3 Návrh modelu LM pro metodu odporové sítě

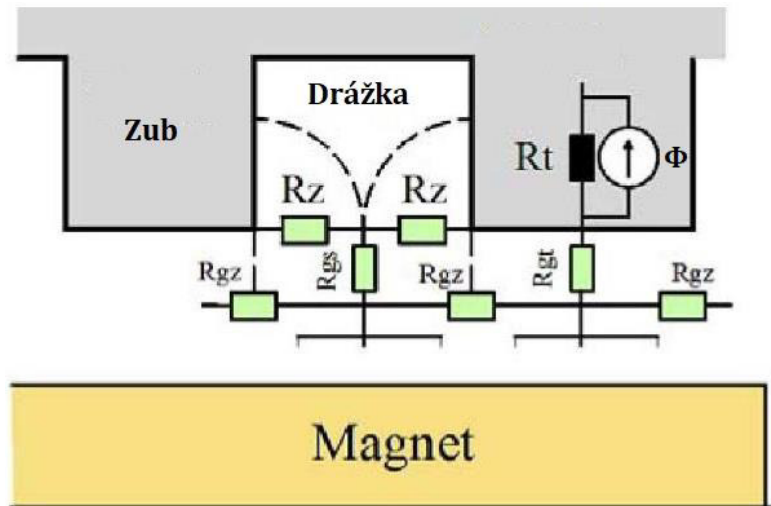
Návrhový model pro metodu odporové sítě použitý v této práci vychází z vědeckého článku [33], který se touto tematikou zabývá. Výsledky simulace v tomto článku byly potvrzeny pomocí metody konečných prvků. Srovnání ukázalo, že se správně volenou odporovou sítí je možné dosáhnout téměř stejné výsledků jako s metodou konečných prvků.

Model ekvivalentního magnetického obvodu použitý v této práci je složen ze tří základních částí. První dvě simulují primární a sekundární díl. Třetí část simuluje vzduchovou mezeru, přes kterou se v tomto motoru uzavírá magnetický tok. [33]



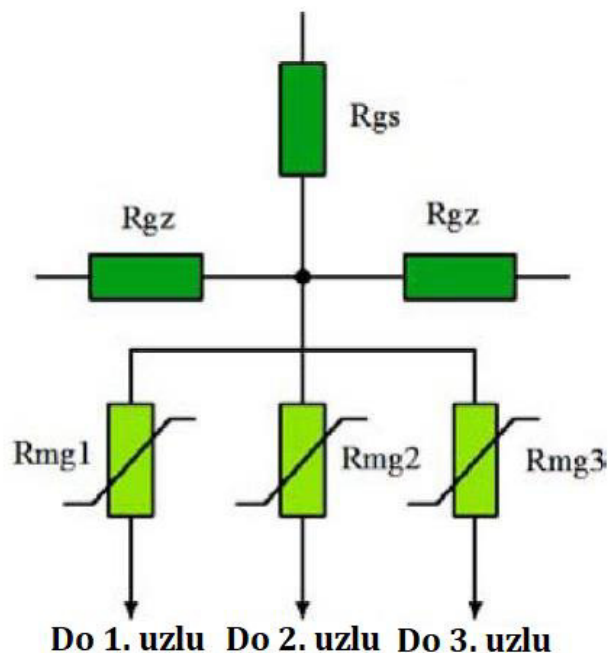
Obrázek 4-3: Zjednodušený model LM se železným jádrem modifikováno z [33]

Primární díl LM je nahrazen zdrojem magnetického toku a paralelně připojeným nelineárním odporem. Nelineární odpor odpovídá saturaci materiálu jha motoru. Jednotlivé zuby jsou mezi sebou spojené také oporem, viz obrázek 4-7. [33]



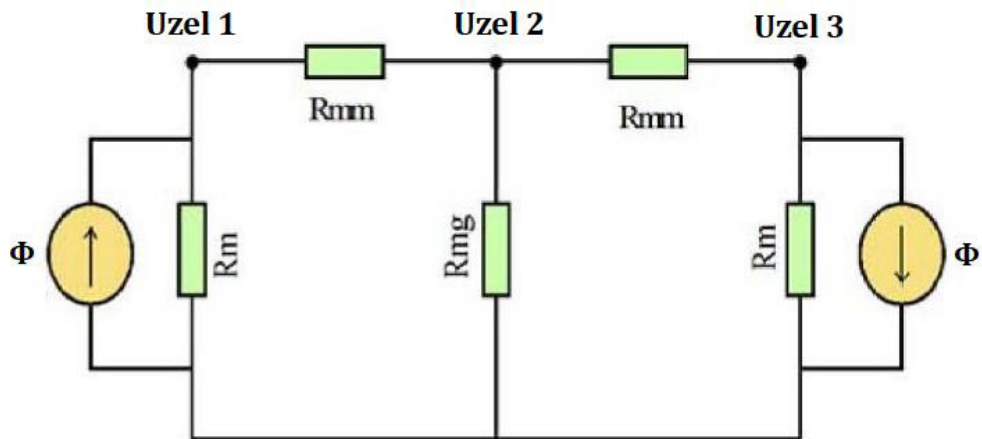
Obrázek 4-4: Ekvivalentní magnetický obvod primárního dílu, modifikováno z [33]

Vzduchová mezera je rozdělena na dvě části. První část je mezi primární částí a středem vzduchové mezery. Jedná se o podélnou část (tmavě zelená) reprezentující rozptylovou reluktanci ve vzduchové mezeře. Druhá část (světle zelená) reprezentuje část vzduchové mezery mezi sekundární částí LM a středem vzduchové mezery. [33]



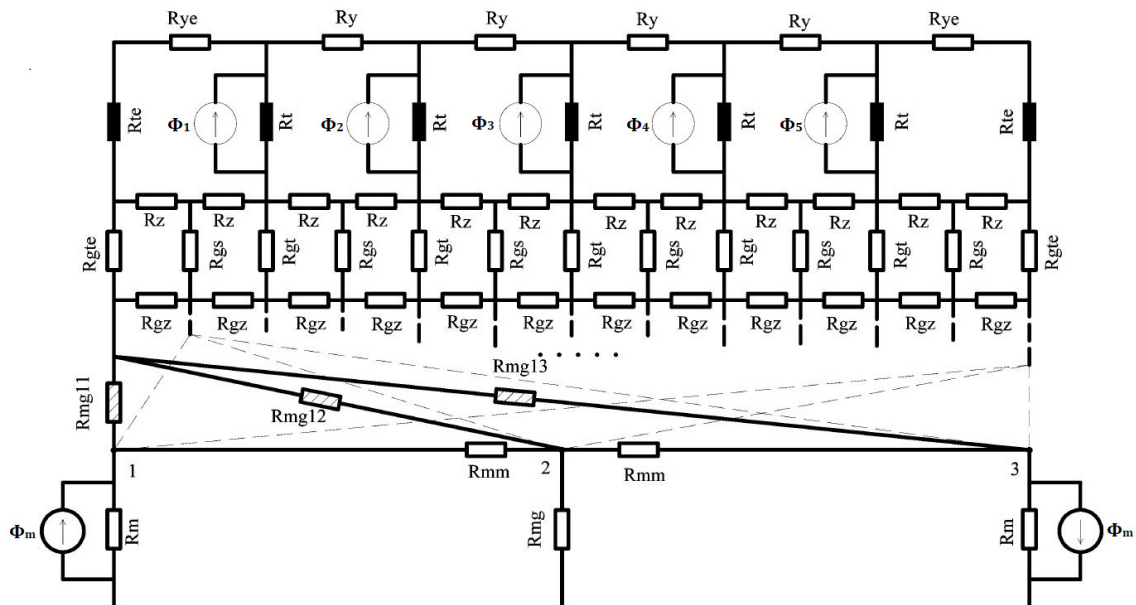
Obrázek 4-5: Ekvivalentní magnetický obvod vzduchové mezery, modifikováno z [33]

Vzduchová mezera je připojena přes regulovatelné reluktance k uzlům sekundárního dílu. Regulovatelné reluktance představují změnu magnetického odporu, při různém vzájemném posunu primárního a sekundárního dílu. Během posunu primární části LM vůči sekundární, se hodnota reluktance průběžně mění. Obrázek 4-6 představuje jednu pólovou dvojici. Skládá se ze dvou zdrojů magnetického proudu a reluktancemi, které představují rozptyl magnetického toku mezi dvěma přilehlými PM. [33]



Obrázek 4-6: Ekvivalentní magnetický obvod sekundárního dílu, modifikováno z [33]

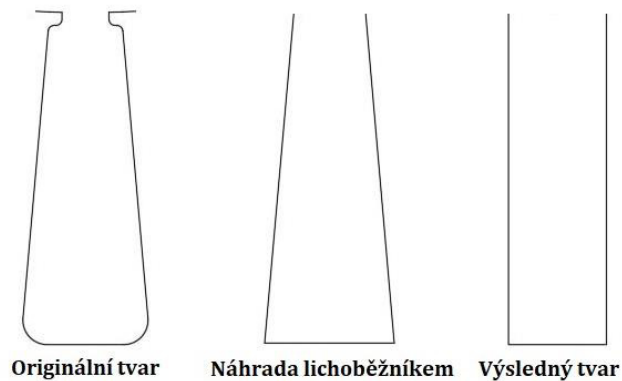
Složení těchto tří částí vznikne kompletní model LM pro metodu odporové sítě, viz obrázek 4-7.



Obrázek 4-7: Ekvivalentní magnetický obvod LM, modifikováno z [33]

4.4 Zjednodušení geometrie LM

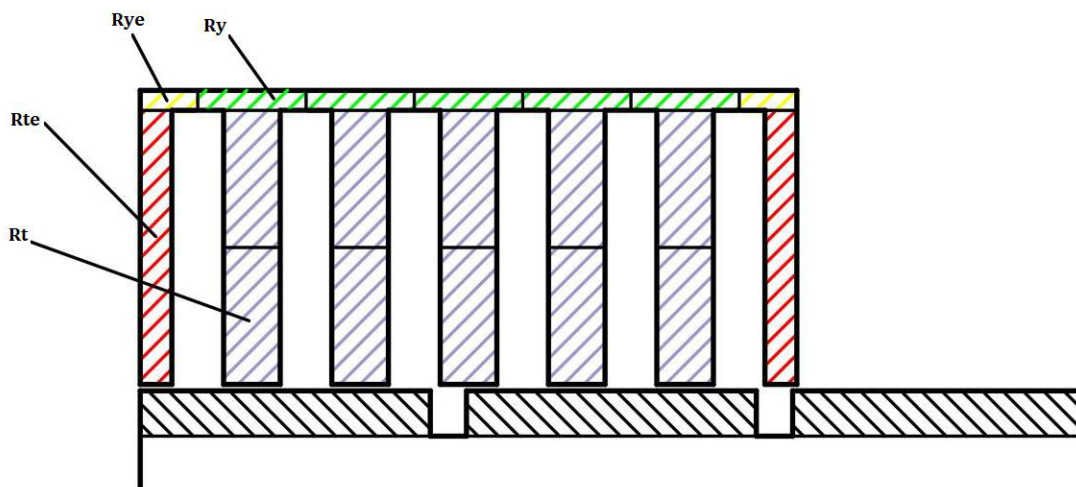
Před začátkem sestavení odporové sítě je nutné zjednodušit geometrii LM, ale zároveň zachovat základní rozměry, viz obrázek 4-3. Drážka je nahrazena lichoběžníkem, který rozměrově odpovídá originální drážce. Lichoběžník je poté nahrazen obdélníkem, který má stejnou plochu a výšku. Tímto způsobem je následně zjednodušený celý primární díl. Tím vznikne ortogonální model se kterým už je možné dále pracovat. Obdobně se postupuje i v případě sekundárního dílu.



Obrázek 4-8: Princip zjednodušení drážky

Primární část je rozdělena do elementů odporové sítě. Zde se postup odlišuje od literatury [33], v níž odpor R_t není rozdělený na dvě poloviny, to je z důvodů použití zdroje napětí namísto zdroje proudu. Tato problematika je více rozvedena v následující kapitole, viz kapitola 4.5.

Velmi důležitá pro další výpočty je výchozí vzájemná poloha primární a sekundární části motoru, protože tím ovlivňujeme odpor vzduchové mezery pod zuby motoru. Výchozí poloha má tedy vliv na výsledný magnetický obvod. V této práci byla zvolena poloha obou částí tak, aby začínaly ve stejné rovině.



Obrázek 4-9: Celkový zjednodušený model LM

4.5 Výpočet hodnot elementu

V této kapitole je uveden popis sestavení modelu odporové sítě. Protože v této práci se metoda odporové sítě aplikuje na skutečný motor od společnosti Baumüller není možné dosazovat konkrétní hodnoty a to kvůli možnému úniku citlivých dat.

4.5.1 Zkoumaný motor

Metoda odporové sítě je aplikovaná na lineární synchronní motor se železným jádrem a permanentními magnety. Základní parametry nezbytné pro další výpočty jsou uvedené v tabulce.

Tabulka 3: Parametry zkoumaného LSM LSE10W

Posuvná síla	Nominální proud	Počet pólů	Počet drážek
F_n	I_n	$2p$	Q_{dr}
[N]	[A]	[-]	[-]
650	5,5	5	15

4.5.2 Primární díl

Vztahy pro výpočet hodnot reluktancí elementů primární části vychází z Ampérova zákona. Hodnoty elementů primární části jsou dány vztahy:

$$R_y = \frac{w_s + w_t}{\mu_0 \cdot \mu_r(B_t) \cdot h_y \cdot L} \quad (4.6)$$

$$R_t = \frac{h_t}{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r(B_t) \cdot w_t \cdot L} \quad (4.7)$$

$$R_z = \frac{w_s}{\mu_0 \cdot h_s \cdot L} = 830 \cdot 10^3 \text{ H}^{-1} \quad (4.8)$$

kde R_t je reluktance zubu [H^{-1}], h_t je výška zubu [m], h_s je výška drážky [m], h_y je výška jha nad drážkou, μ_0 je permeabilita vakua [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1}$], $\mu_r(B_t)$ je relativní permeabilita materiálu [-] jako funkce magnetické indukce B_t [T], w_t je šířka zubu [m], w_s je šířka drážky [m] a L je šířka jha motoru [m]. Všechny rozměry jsou uvedené ve schématu, viz obrázek 4-3. [33]

Výjimkou jsou okrajové elementy R_{ye} a R_{te} u těchto koncových je nutné brát v potaz jejich odlišné rozměry. Jak je patrné z rovnice (4.6), relativní permeabilita je funkcí magnetické indukce. Tudíž hodnotu reluktance elementů R_t a R_y nelze jednoduše určit, jelikož tyto elementy nejsou lineární. Je nutné vytvořit nelineární odpor, který mění odpor podle hodnoty magnetické indukce v materiálu. Vytvoření takového nelineárního odporu je popsáno v kapitole 4.6.

Magnetické napětí v jednotlivých zubech primárního dílu vypočítáme dle následující vztahů:

$$U_{m1} = -N_c \cdot i_A = -480 \text{ A} \quad (4.9)$$

$$U_{m2} = N_c \cdot (-i_A + i_C) = -430 \text{ A} \quad (4.10)$$

$$U_{m3} = N_c \cdot (-i_A + i_C - i_B) = 100 \text{ A} \quad (4.11)$$

$$U_{m4} = N_c \cdot (-i_B + i_C) = 590 \text{ A} \quad (4.12)$$

$$U_{m5} = -N_c \cdot i_B = 535 \text{ A} \quad (4.13)$$

kde $U_{m,n}$ je magnetické napětí v n-tém zubu [A], N_c je počet závitů cívky [-] a $i_{A,B,C}$ jsou proudy v jednotlivých fázích [A].

Na rozdíl od článku [33] této práci byly použity zdroje magnetického napětí zařazené mezi dva odpory R_t .

Proudy $i_{A,B,C}$ vypočítáme podle následujících vztahů:

$$i_A = i_m \cdot \sin\left(\frac{x \cdot \pi}{\tau} + \Phi_0\right) = 6,37 \text{ A} \quad (4.14)$$

$$i_B = i_m \cdot \sin\left(\frac{x \cdot \pi}{\tau} - \frac{2 \cdot \pi}{3} + \Phi_0\right) = 0,68 \text{ A} \quad (4.15)$$

$$i_C = i_m \cdot \sin\left(\frac{x \cdot \pi}{\tau} + \frac{2 \cdot \pi}{3} + \Phi_0\right) = -7,05 \text{ A} \quad (4.16)$$

kde I_m je amplituda proudu vinutím [A], x je pozice primární části [m], τ je pólová rozteč [m] a Φ_0 je fázový posun [rad].

Fázový posun Φ_0 se získá pomocí parametrické analýzy. Byl hledán proto, aby výsledné průběhy magnetické indukce měly stejný fázový posun jako metoda konečných prvků a mohly být tyto dvě metody mezi sebou porovnány. Výchozí hodnotou fázového posunu Φ_0 je $\pi/2$. Při tomto fázovém posunu se vytváří maximální magnetický tok cívkou a tím pádem vzniká i maximální síla. Pólová rozteč τ je vzdálenost mezi středy jednotlivých pólů LM, jedná se tedy o vzdálenost mezi středy dvou přilehlých PM.

4.5.3 Vzduchová mezera

Definice hodnot reluktancí ve vzduchové mezeře, opět vychází z Ampérova zákona. Reluktance představující vzduchovou mezeru jsou definovány následovně:

$$R_{gz} = \frac{\tau_s}{2 \cdot \mu_0 \cdot L \cdot g} = 75 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1} \quad (4.17)$$

$$R_{gs} = \frac{g}{2 \cdot \mu_0 \cdot L \cdot w_s} = 540 \cdot 10^3 \text{ H}^{-1} \quad (4.18)$$

$$R_{gt} = \frac{g}{2 \cdot \mu_0 \cdot L \cdot w_t} = 500 \cdot 10^3 \text{ H}^{-1} \quad (4.19)$$

$$R_{mgi} = \frac{g}{2 \cdot \mu_0 \cdot L \cdot \alpha_i \cdot \tau_s} \quad (4.20)$$

kde R_{gz} je reluktance horizontálního elementu vzduchové mezery [H^{-1}], R_{gs} je reluktance vzduchové mezery pod drážkou [H^{-1}], R_{gt} je reluktance vzduchové mezery pod zubem [H^{-1}], R_{mgi} je reluktance vzduchové mezery v závislosti na vzájemné poloze i -tého zubu a PM [H^{-1}], τ_s je pólová rozteč [m], g je šířka vzduchové mezery, w_s je šířka drážky [m], w_t je šířka zubu [m], L je délka motorového svazku [m] a α_i je činitel vzájemné polohy zubu a PM [-]. [33]

U výpočtu R_{gt} je nutné brát v potaz odlišnou velikost koncového zubu je činitel vzájemné polohy zubu a PM je definován vztahem:

$$\alpha_i = \frac{w_{t,s-nad\ PM}}{w_{t,s}} \quad (4.21)$$

kde, $w_{t,s-nad\ PM}$ je šířka zubu nebo drážky nad PM [m] a $w_{t,s}$ je šířka zubu nebo drážky nad PM [m]. Z rovnice je patrné, že činitel dosahuje hodnot 0 až 1. Tímto činitelem se poté vynásobí příslušná reluktance R_{mgi} . [33]

Dosažením hodnot z rovnice (4.21) do rovnice (4.20), získáme R_{mg} pro jednotlivé uzly.

Tabulka 4: Hodnoty jednotlivých reluktancí R_{mg}

Uzel	i	[-]	1,2,3,4,5	6	7	12	13
Činitel polohy	α_i	[-]	1	0,81	0,536	0,83	0,13
Reluktance uzlu	R_{mgi}	[kH^{-1}]	260	320	480	310	2 010

4.5.4 Sekundární díl

Podle [33] jsou elementy odporové sítě definovány následovně:

$$R_{mm} = \left[\frac{\mu_0 \cdot L}{\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{\pi \cdot g}{w_f}\right) \right]^{-1} = 6300 \cdot 10^3 \text{ H}^{-1} \quad (4.21)$$

$$R_m = \frac{h_m}{2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rm} \cdot w_m \cdot L} = 65 \cdot 10^3 \text{ H}^{-1} \quad (4.21)$$

$$U_{m-pm} = \frac{B_r \cdot h_m}{\mu_r \cdot \mu_0} = 5000 \text{ A} \quad (4.21)$$

kde R_{mm} je rozptylová reluktance PM [H^{-1}], R_m je reluktance PM [H^{-1}], U_{m-pm} je magnetické napětí PM [A], w_f je šířka mezery mezi PM [m], h_m je výška PM [m], w_m je šířka PM [-], B_r je remanentní magnetická indukce PM [T] a μ_{rm} je relativní permeabilita PM [-].

Oproti článku [33] je proudový zdroj nahrazen napěťovým zdrojem U_{m-pm} . Tento napěťový zdroj je umístěn mezi dva odpory R_m , proto je ve jmenovateli rovnice (4.21) dvojka.

4.6 Simulace modelu v programu Ansys Simplorer

Pro simulaci odporové sítě byl zvolen program Ansys Simplorer. Výhodou tohoto programu je jeho snadná obsluha a obsahuje všechny potřebné funkce pro tvorbu odporové sítě.

4.6.1 Tvorba nelineárního odporu

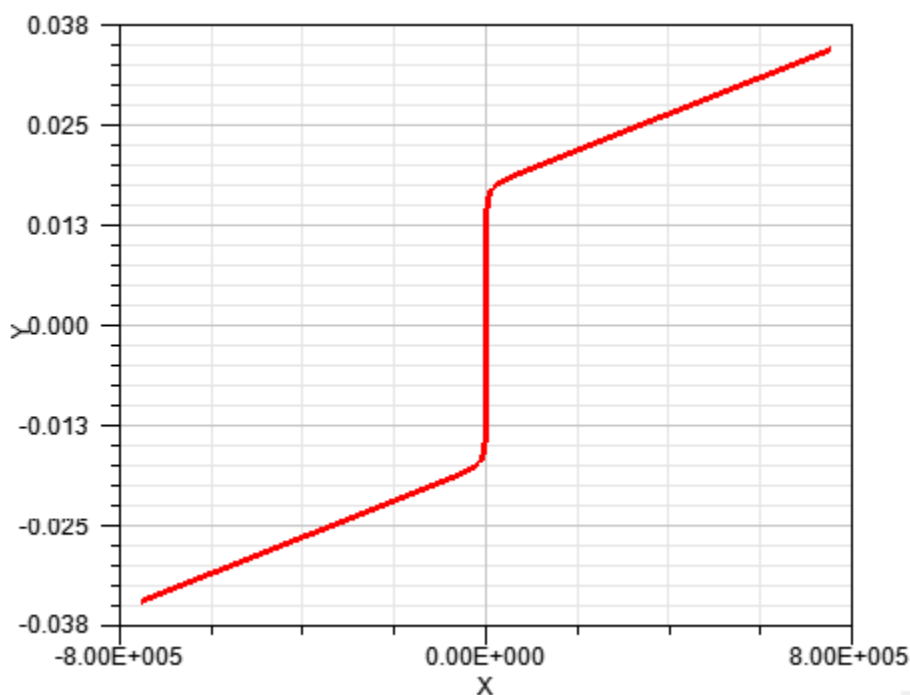
Jedna z možností jak vytvořit nelineární odpor v programu Simplorer je využití nelineárního odporu. Tuto funkci zastává součástka „Resistor“, v níž je možné nastavit nelineární voltampérovou charakteristiku. Zde je využita analogie mezi elektrickou V-A charakteristikou a magnetickou $U-\Phi$ charakteristikou. $U-\Phi$ charakteristika nelineární reluktance se získá z B-H křivky použitého materiálu za pomoci vztahů:

$$U_m = H \cdot l_{fe} \quad (4.22)$$

$$\Phi = B \cdot S_{fe} \quad (4.23)$$

kde U_m je magnetické napětí [A], H je intenzita magnetického pole [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$], l_{fe} délka střední siločáry [m], Φ je magnetický tok [Wb], B je magnetická indukce [T] a S_{fe} je plocha železa [m^2].

Voltampérová charakteristika, která představuje nelineární odpory primární části motoru, je pro každý druh odporu jiná. Prvním krokem při tvorbě nelineárního odporu je rozložení BH křivky materiálu primárního dílu do jednotlivých bodů. V této práci je BH křivka materiálu rozložena na 32 bodů. Je možné vytvořit diskrétní BH křivku i za pomoci mnohem méně bodů. Je však nutné dbát zvýšenou pozornost na místo ohybu křivky, kvůli možnému vzniku chyby. Následně pomocí rovnic (4.22) a (4.23) a znalosti geometrických rozměrů je z BH křivky vytvořena $U-\Phi$ křivka. K této výsledné $U-\Phi$ křivce je nutné vytvořit i její inverzní část pro záporné hodnoty magnetického napětí a magnetického toku. Pokud by se tak neučinilo, rezistor by v záporném směru nevedl magnetický tok, a to by neodpovídalo realitě. Takto je nutné postupovat u všech čtyř typů nelineárních rezistorů. Jak je zmíněno v kapitole 4.5.2, je nutné výšku elementu R_t uvažovat poloviční, protože mezi dva odpory R_t se vloží napěťový zdroj U_m . Posledním krokem je importování výsledné křivky do programu Simplorer. Program umožňuje přímý import voltampérové charakteristiky z programu Microsoft Excel. Simplorer načítá vždy jen první dva sloupce tabulky. Z prvního sloupce tabulky načítá magnetické napětí U_m a ze druhého sloupce příslušný magnetický tok Φ .



Obrázek 4-10: Ilustrativní $U-\Phi$ křivka v prostředí Simplorer

4.6.2 Sestavení

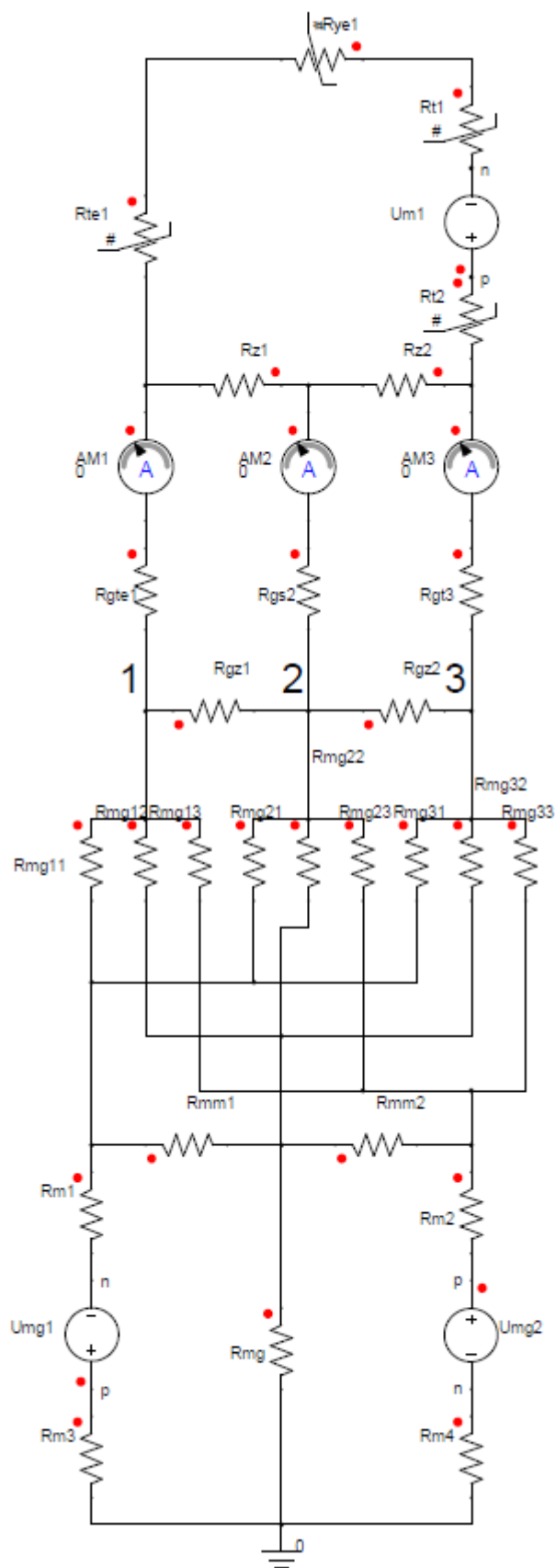
Celou sestavu odporové sítě je možné vidět na celkovém schématu, viz obrázek 4-7. Oproti této původní verzi došlo ke třem drobným úpravám.

První úpravou je využití zdrojů magnetického napětí místo zdrojů magnetického toku. K této úpravě bylo přistoupeno kvůli snadnějšímu výpočtu magnetického napětí. Napěťový zdroj je poté umístěn mezi dva souměrné odpory R_t .

Magnetický tok ve vzduchové mezeře je měřen ampérmetry AM1 až AM13 umístěné na odporech R_{gt} , R_{gs} a R_{gte} . Přidání těchto ampérmetrů není nutné. Je možné exportovat přímo hodnoty magnetického toku na jednotlivých odporech. Výhodou přidání ampérmetrů je lepší přehlednost.

Třetí a poslední úpravou původního schématu je opět nahrazení zdrojů magnetického toku zdroji magnetického napětí. Postup je analogický jako u primárního dílu, napěťový zdroj je vložen mezi dva odpory R_m .

Všechny tři úpravy je možné vidět na celkovém schématu, viz obrázek 4-11.



Obrázek 4-11: Ukázka sestavení prvního segmentu

4.6.3 Export výsledků

Hledaným výsledkem metody odporové sítě je průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Tento průběh není možné získat přímo z odporové sítě. Je nutné magnetický tok tekoucí přes jednotlivé ampérmetry vydělit příslušnou plochou železa podle rovnice (4.24). Pro výpočet se využil vztah:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (4.24)$$

kde Φ je magnetický tok [Wb], B je magnetická indukce [T] a S je příslušná plocha vzduchové mezery [m²].

Magnetický tok tekoucí přes jednotlivé ampérmetry je možné z programu Simplorer exportovat do souboru CSV. V tabulkovém softwaru následně stačí vydělit plochou železa jednotlivých reluktancí R_{gt} , R_{gs} a R_{gte} , viz obrázek 4-7.

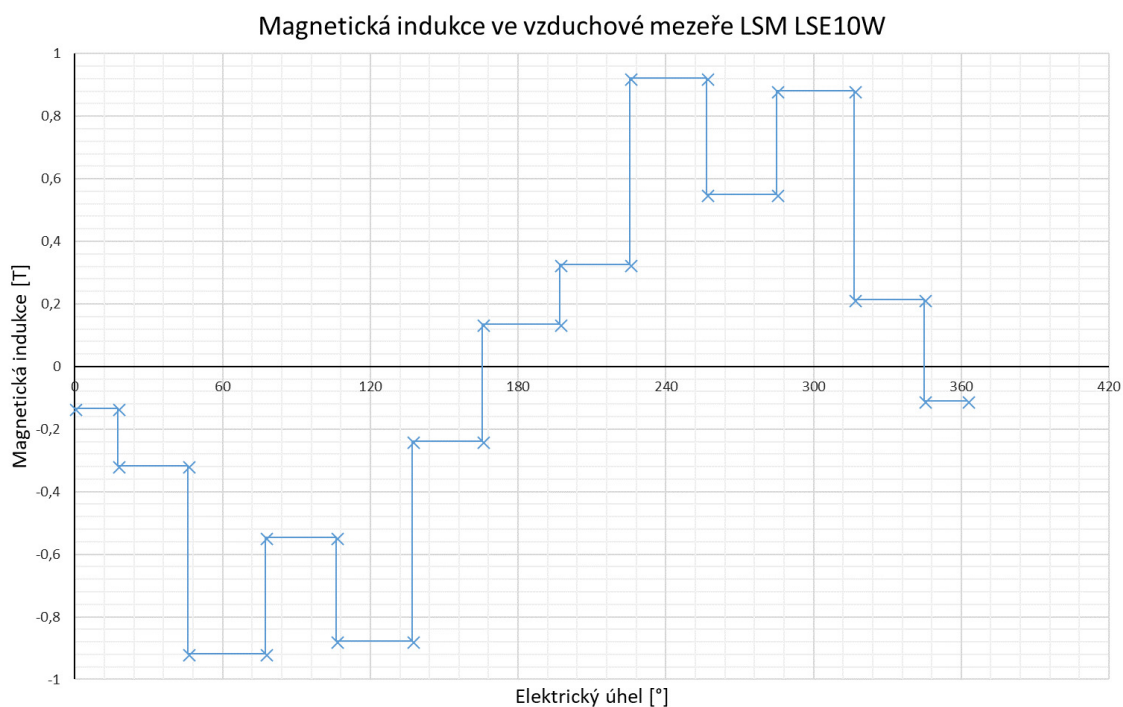
Tabulka 5: Výpočet magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Uzel	Magnetický tok	Odpor	Plocha	Elektrický úhel		Magnetická indukce
				od	do	
	Φ	R	S_{fe}	$\theta_{začátek}$	θ_{konec}	B
	[μWb]	[-]	[mm^2]	[$^\circ$]	[$^\circ$]	[T]
1	42	R_{gte}	320	0	18	0,13
2	160	R_{gs}	510	18	46	0,32
3	520	R_{gt}	560	46	78	0,92
4	280	R_{gs}	510	78	106	0,55
5	490	R_{gt}	560	106	137	0,88
6	120	R_{gs}	510	137	166	0,24
7	76	R_{gt}	560	166	197	0,14
8	170	R_{gs}	510	197	226	0,33
9	520	R_{gt}	560	226	257	0,92
10	280	R_{gs}	510	257	285	0,55
11	500	R_{gt}	560	285	317	0,88
12	110	R_{gs}	510	317	345	0,22
13	35	R_{gte}	320	345	363	0,11

Ukázka výpočtu pro první řádek tabulky 5 vycházející z rovnice (4.24):

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{42 \cdot 10^{-6}}{320 \cdot 10^{-6}} = 0,13 \text{ T} \quad (4.25)$$

Výsledné hodnoty magnetické indukce nejsou logicky spojitě, proto je nutné v závislosti na rozměrech reluktancí doplnit osu x. Je možné použít na osu x elektrický úhel nebo skutečné rozměry. Při využití závislosti magnetické indukce na elektrickém úhlu odpovídá 360° rozměru rozteče dvou pólů. Maximální magnetická indukce použitá pro další výpočet posuvné síly je 0,92 T.



Obrázek 4-12: Výsledná magnetická indukce ve vzduchové mezeře LSM vypočtená pomocí metody odporové sítě

Z průběhu magnetické indukce je patrné umístění zubů a drážek. Pod zubem primární dílu je magnetická indukce větší, kdežto pod drážkou vlivem velké reluktance je menší magnetická indukce. Krajními zuby teče jen velmi malý magnetický tok. U krajních zubů, je nutné poznamenat, že byly pro snadnější výpočet odporové sítě prodlouženy oproti skutečnosti. Ve skutečnosti je tedy tok krajními zuby ještě mnohem menší.

5 VÝPOČET POSUVNÉ SÍLY

V této kapitole je proveden výpočet posuvné síly lineárního motoru pomocí Lorentzova zákona. Vypočtená síla je následně srovnána s katalogovou hodnotou a je vypočtena odchylka.

5.1 Lorentzova síla a odvození vztahu

Podle [34] na pohybující se částici q o rychlosti \vec{v} v magnetické poli \vec{B} působí síla daná vztahem:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (5.1)$$

kde \vec{F} je Lorentzova síla [N], q je náboj částice [C], \vec{v} je vektor rychlosti [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] a \vec{B} je vektor magnetické indukce [T].

Výsledkem toho vztahu je opět vektor, protože ve výpočtu se provádí vektorový součin. Pro zjednodušení tohoto vztahu je uvažováno, že $\vec{v} \perp \vec{B}$. Pro výslednou velikost Lorentzovy síly poté platí podle [35] vztah:

$$F = q \cdot v \cdot B \quad (5.2)$$

Obecně platí vztah pro rychlost:

$$v = \frac{l}{t} \quad (5.3)$$

kde v je rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], l je dráha [m] a t je čas [s].

Spojením rovnice (5.2) a (5.3) vznikne:

$$F = q \cdot \frac{l}{t} \cdot B \quad (5.4)$$

Obecně známý vztah pro proud je:

$$I = \frac{q}{t} \quad (5.5)$$

kde I je proud [A], q je náboj [C] a t je čas [s].

Sloučením rovnice (5.4) a (5.5) vznikne hledaný vztah:

$$F_n = l_{fe} \cdot I_{tot} \cdot B_\delta \quad (5.6)$$

kde F_n je hledaná nominální posuvná síla [N], l_{fe} je aktivní délka železa [m], I_{tot} je celkový proud [A] a B_δ je magnetická indukce ve vzduchové mezeře.

5.2 Výpočet

Všechny dosazované hodnoty jsou uvedeny v přehledové tabulce, viz tabulka 3. Podle [29] celkový proud tekoucí vodiči vypočítáme podle vztahu:

$$I_{tot} = N_{dr} \cdot I_{ef} \cdot Q_{dr-aktiv} \quad (5.7)$$

kde I_{tot} je celkový proud tekoucí vodiči [A], I_{ef} je efektivní proud tekoucí jedním vodičem [A] a $Q_{dr-aktiv}$ je počet aktivních drážek [-].

Počet aktivních drážek je rozdíl celkového počtu drážek a počtu pólů a ještě mínus jedna. Odečtením jedničky je nutné z důvodu polovičního počtu závitů v první a poslední drážce motoru. Výsledný vztah je:

$$\begin{aligned} I_{tot} &= N_{dr} \cdot I_{ef} \cdot (Q_{dr} - 2p - 1) \\ &= 152 \cdot 5,5 \cdot (15 - 5 - 1) = 7524 \text{ A} \end{aligned} \quad (5.8)$$

kde Q_{dr} je celkový počet drážek a $2p$ je počet pólů [-].

Dosazením hodnoty z rovnice (5.8) do rovnice (5.6) a použitím maximální magnetické indukce z tabulky 5 dostaneme nominální posuvnou sílu LSM.

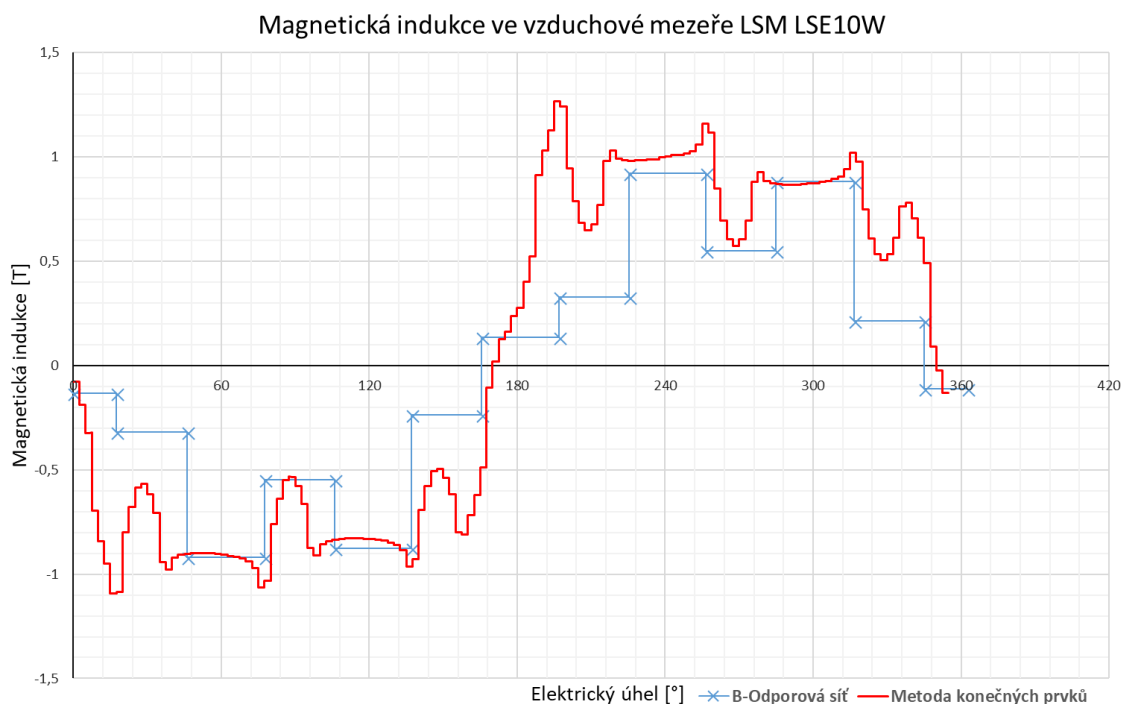
$$F_n = l_{fe} \cdot I_{tot} \cdot B_\delta = 0,09 \cdot 7524 \cdot 0,92 = 625 \text{ N} \quad (5.9)$$

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V této kapitole bude metoda odporové sítě porovnána s metodou konečných prvků (MKP) a s hodnotou uvedenou v katalogovém listu motoru.

6.1 Porovnání odporové sítě s metodou konečných prvků

Výsledky odporové sítě jsou porovnány s referenčními hodnotami metody konečných prvků. Výpočet magnetické indukce byl vytvořen na základě zjednodušeného modelu LM, viz obrázek 4-9. Tím pádem neodpovídá přesně realitě. Z průběhů jde vidět, že v klíčových segmentech se hodnoty shodují s velkou přesností. Největší odchylka nastává v místě (180° el.), kde se mění polarita magnetické indukce. Nevýhodou zvolené magnetické sítě je malý počet uzlů a tudíž i malý počet hodnot magnetické indukce. Odporová síť není schopná tudíž kopírovat přesně průběh magnetické indukce a v některých místech jsou její výsledky zavádějící.



Obrázek 6-1: Porovnání odporové sítě s metodou konečných prvků

6.2 Porovnání odporové sítě s katalogovým listem

Srovnání tedy je provedeno přes vypočtenou posuvnou sílu. Toto porovnání není tak vypovídající jako srovnání s MKP. Výpočet síly je totiž sám o sobě nepřesný, protože je zjednodušený.

Výpočet odchylky výpočtu:

$$\delta_F = \frac{F_{vyp.} - F_{Teor.}}{F_{Teor.}} \cdot 100 = \frac{625 - 650}{650} \cdot 100 = -3,85 \% \quad (5.10)$$

7 ZÁVĚR

Na začátku bakalářské práce je uveden obecný popis LM včetně jeho historie, obecných výhod i nevýhod a jeho příslušenství. Jedním z největších současných problémů LM je jejich malé výrobní množství a s tím spojená relativně vysoká cena. Největší výhodou LM je, že k posuvnému pohybu nepotřebují mechanický převod. To je velká výhoda pro aplikace s vysokými nároky na přesnost a kompaktnost. Následně se tato práce zabývala popisem jednotlivých druhů motorů používaných v praxi. Jelikož se jedná o relativně novou technologii, nebylo ještě stanoveno jednotné dělení LM. Rozdělení LM použité v této práci vychází z dizertační práce [11], protože bylo neobjektivnější. Rozdělení LM podle principu je patrné z přehledového schématu, viz obrázek 2-4. Každý LM má své jedinečné vlastnosti a z nich plynoucí možnosti aplikace. U každého motoru jsou uvedeny jeho charakteristické vlastnosti a konkrétní výhody a nevýhody. Vlastnosti jednotlivých LM jsou uvedeny v přehledové tabulce, viz tabulka 3-1. Jedny z nejzajímavějších aplikací, které stojí určitě za zmínění, je použití LM s příčným magnetickým tokem jako hybridní motor pro automobil, viz kapitola 3.2.1. Další neméně zajímavou aplikací je asynchronní LM, který je možné použít jako čerpadlo tekutého kovu nebo jako míchačku tekutého kovu v tavicí peci.

Prvním úkolem bakalářské práce bylo sestavení modelu lineárního motoru se železným jádrem pro metodu odporové sítě, viz kapitola 4. Při sestavování modelu LM bylo postupováno v souladu s teoretickými poznatky obsaženými ve článku [33], který se přímo touto problematikou zabývá. Tento postup byla vybrán na základně dvou elementárních aspektů. Prvním aspektem je dosažení dobrých výsledků. Druhým aspektem je jeho snadná aplikace. Princip metody odporové sítě, která simuluje magnetický obvod LM, je v rozdělení motoru na segmenty a ty na elementy. LM s železným jádrem má tři segmenty a to primární a sekundární díl a vzduchovou mezeru. Tyto segmenty poté rozdělíme na jednotlivé elementy. Vhodnou volbou odporové sítě a jejích parametrů je možné získat velmi přesné informace o rozložení magnetického toku a o úbytcích magnetického napětí v LM.

Druhým úkolem bylo provedení zpětného návrhu lineárního motoru. Zkoumaný motor byl lineární synchronní motor LSE10W od firmy Baumüller. Elementy odporové sítě se nastavily podle parametrů motoru. Detailní popis nastavení jednotlivých elementů je uvedeno v kapitole 4.5. Samotný výpočet odporové sítě byl realizován v programu Ansys Simplorer.

Třetím úkolem bylo porovnat výsledné vypočtené hodnoty z odporové sítě porovnat s MKP a taky s hodnotami uvedenými v katalogovém listu motoru. Hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře v porovnání s MKP jsou uvedeny v grafu, viz obrázek 6-1. Výsledky odporové sítě v důležitých místech

vzduchové mezery odpovídají hodnotám vypočítaným pomocí MKP. Větší odchylku je možné sledovat v místě změny polarity magnetické indukce. Chyba je pravděpodobně způsobena malým množstvím měřených bodů. Byla proto zvolena metoda porovnání výsledků pomocí hodnoty výsledné posuvné síly. Tato metoda je ale diskutabilní, kvůli nepřesnosti samotného výpočtu posuvné síly. Postup výpočtu je uveden v kapitole 5.2. Samotná odchylka vyšla 3,85 %. To je velmi dobrý výsledek na metodu odporové sítě.

Porovnání výsledků ukázalo, že metoda odporové sítě, může být dobrý nástroj pro návrh elektrických strojů. Přesnost této odporové sítě by bylo vhodné ještě v budoucnu ověřit na více LM, aby byla tato odporová síť případně vylepšena a odpovídala více reálnému vzorku. Velkou výhodou této metody je její rychlý a relativně přesný výpočet ve srovnání s MKP. Další výhodou je i snadné vytvoření parametrického modelu.

Velkou nevýhodou této metody je její obtížná konstrukce a odladění. Tvorba odporové sítě není uživatelsky přívětivá a je těžké v ní odhalit chybu, případně výrazně změnit atributy motoru.

Literatura

- [1] GIERAS, Jacek a Zbigniew PIECH. *Linear synchronous motors: transportation and automation systems*. Boca Raton, Fla: CRC Press, 1999. ISBN 08-493-1859-9.
- [2] HOLUB, Gustav. Přímé lineární motory – ano, či ne?. *ELEKTRO*. 2011, **2011**(06), 55.
- [3] HELLINGER, R. a P. MNICH. Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook. *Proceedings of the IEEE* [online]. USA: IEEE, 2009, **97**(11), 1892-1900 [cit. 2017-09-22]. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2030249. ISSN 0018-9219. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/5280196/>
- [4] Linear motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-09-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_motor
- [5] ROMAN, Jan. *Řízení lineární pohonů HIWIN* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014 [cit. 2017-09-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/33337>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Pavel Houška.
- [6] Lineární motory. In: [Http://www.vues.cz](http://www.vues.cz) [online]. b.r. [cit. 2017-09-30]. Dostupné z: http://www.vues.cz/file/424/CZ_LIN-OBECNE_020909.PDF
- [7] BARRETT, Jack, Tim HARNED a Jim MONNICH. Linear motor basics. In: *Parker Hannifin Corporation* [online]. b.r. [cit. 2017-10-05]. Dostupné z: <http://www.parkermotion.com/whitepages/linearmotorarticle.pdf>
- [8] Trilogy Linear Motor & Linear Motor Positioners. In: *Parker Hannifin Corporation* [online]. 2007 [cit. 2017-10-08]. Dostupné z: http://www.parkermotion.com/pdfs/Trilogy_Catalog.pdf
- [9] CHALOUPKA, Roman. *Návrh řízení osy s lineárním motorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [10] Dimensioning of linear motors. In: *Beckhoff* [online]. 2016 [cit. 2017-10-08]. Dostupné z: https://download.beckhoff.com/download/document/motion/al2000_dimensioning_en.pdf

- [11] CHEVAILLER, Samuel a Marcel JUFER. *Comparative study and selection criteria of linear motors*. Lausanne: EPFL (Lausanne), 2006. DOI: 10.5075/epfl-thesis-3569.
- [12] SUNG WHAN YOUN, , JONG JIN LEE, HEE SUNG YOON a CHANG SEOP KOH. A New Cogging-Free Permanent-Magnet Linear Motor. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2008, **44**(7), 1785-1790 [cit. 2017-10-01]. DOI: 10.1109/TMAG.2008.918921. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/4544938/>
- [13] ABD-RABOU, A, H HASANIEN a S SAKR. Design development of permanent magnet excitation transverse flux linear motor with inner mover type. *IET Electric Power Applications* [online]. Stevenage: The Institution of Engineering, 2010, **4**(7), 559-568 [cit. 2017-11-11]. DOI: 10.1049/iet-epa.2009.0209. ISSN 17518660. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/5530292/>
- [14] Transverse Flux Linear Moter, TF. In: *DM Technology* [online]. South Gyeongsang, b.r. [cit. 2017-11-11]. Dostupné z: <http://www.dmtec.net/en/product/linear-motors/>
- [15] JIA, Boru, Rikard MIKALSEN, Andrew SMALLBONE, Zhengxing ZUO, Huihua FENG a Anthony ROSKILLY. Piston motion control of a free-piston engine generator: A new approach using cascade control. *Applied Energy* [online]. Elsevier Ltd, 2016, **179**, 1166-1175 [cit. 2017-11-11]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.081. ISSN 0306-2619. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0306261916310224>
- [16] DALDABAN, Ferhat a Nurettin USTKOYUNCU. A novel linear switched reluctance motor for railway transportation systems. *Energy Conversion and Management* [online]. Elsevier Ltd, 2010, **51**(3), 465-469 [cit. 2017-11-12]. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.10.009. ISSN 0196-8904. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0196890409003975>
- [17] WAJDI, Zaafrane, Mahmoud IMED, Fathalah MOURAD a Rehaoulia HABIB. Control of linear switched reluctance motor for biomedical application. In: *Electrical Engineering and Software Applications (ICEESA) 2013 International Conference* [online]. Tunis: IEEE, 2013, s. 1-7 [cit. 2017-11-12]. DOI: 10.1109/ICEESA.2013.6578489. ISBN 978-1-4673-6302-0.
- [18] MASOUDI, Siamak, Mohammad FEYZI a Siamak MASOUDI. Force ripple and jerk minimisation in double sided linear switched reluctance motor used in elevator application. *IET Electric Power Applications* [online]. 2016, **10**(6),

- 508-516 [cit. 2017-11-12]. DOI: 10.1049/iet-epa.2015.0555. ISSN 1751-8660. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/stamp/stamp.jsp?arnumber=7501643>
- [19] ZHANG, Shujun, Lars NORUM a Robert NILSSEN. Analysis of tubular linear permanent magnet motor for drilling application. In: *Electric Power and Energy Conversion Systems, 2009. EPECS '09. International Conference on* [online]. Trondheim 7491 Norway: IEEE Publishing, 2009, s. 1-5 [cit. 2017-11-23]. ISBN 978-1-4244-5477-8.
- [20] Inside an ETT Linear Motor. In: *Machine design* [online]. 2016 [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <http://www.machinedesign.com/linear-motion/inside-ett-linear-motor>
- [21] Thrust tube linear motors: a unique approach to linear motion. *Plant automation* [online]. VertMarkets, Inc., b.r. [cit. 2017-11-23]. Dostupné z: <https://www.plantautomation.com/doc/thrust-tube-linear-motors-a-unique-approach-t-0001>
- [22] BĚLÍČEK, David. *Řízení krokového motoru mikrokontrolérem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [23] Linear Step Motor Systems. In: *Motion Control Systems* [online]. Charlotte, North Carolina: Parker Hannifin Corporation, b.r. [cit. 2017-11-26]. Dostupné z: http://www.compumotor.com/catalog/c75_78.pdf
- [24] STAMPFLI, Herve. Linear motor applications: Ironcore versus Ironless Solutions. In: *Control design* [online]. Schaumburg: Putman media, 2005 [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: https://www.controldesign.com/assets/Media/MediaManager/wp_035_ete_l_thompson.pdf
- [25] Linear Motor Magnetic Track. In: *Hangseng(Ningbo) Magnetech Co.,Ltd.* [online]. Ningbo, Zhejiang, China, b.r. [cit. 2017-11-04]. Dostupné z: <http://www.hsmagnets.com/product/linear-motor-magnetic-track/>
- [26] ZHANG, Lu, Baoquan KOU, Yinxi JIN, Yusheng CHEN a Yanjie LIU. Investigation of an Ironless Permanent Magnet Linear Synchronous Motor with Cooling System. *Applied Sciences* [online]. Basel: MDPI AG, 2016, 6(12), 422 [cit. 2017-11-04]. DOI: 10.3390/app6120422. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2076-3417/6/12/422>
- [27] BUDIG, P.-K. The application of linear motors. In: *Power Electronics and Motion Control Conference, 2000. Proceedings. IPEMC 2000. The Third*

- International* [online]. IEEE Publishing, 2000, 3, s. 1336-1341 [cit. 2017-11-04]. DOI: 10.1109/IPEMC.2000.883044. ISBN 7-80003-464-X.
- [28] MIN, S.G. a B. SARLIOGLU. Analytical Calculation of Back-EMF Waveform for Linear PM Motors in Slotted and Slotless Structures. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2017, (99), [cit. 2017-11-26]. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2743071. ISSN 00189464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/8015166/>
- [29] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek IV: Magnetické obvody ve výkonové elektronice, pulzní měniče s transformátorem*. Brno, 2008. Skriptum. VUT.
- [30] BRANČÍK, Lubomír. *Elektrotechnika 1*. Brno, b.r. Skriptum. VUT.
- [31] KOPECKÁ, Ivo. *Rozptylové ztráty v magnetických materiálech na konci statorového svazku*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [32] SPORNI, Peter. *Model synchronního stroje s PM založeného na ekvivalentní reluktanční síti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [33] SHEIKH-GHALAVAND, B., S. VAEZ-ZADEH a A. HASSANPOUR ISFAHANI. An Improved Magnetic Equivalent Circuit Model for Iron-Core Linear Permanent-Magnet Synchronous Motors. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2010, 46(1), 112-120 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1109/TMAG.2009.2030674. ISSN 0018-9464. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/5232839/>
- [34] Pohyb částic v magnetickém poli. In: *Fyzweb* [online]. b.r. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: http://fyzweb.cz/materialy/hvizdy/6_casticevmagn.pdf
- [35] VÍTEK, Ondřej. *Elektrické stroje 2: VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVODU BLDC MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY* [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://moodle.vutbr.cz/mod/folder/view.php?id=187290>. Studijní podklady. Vysoké učení technické v Brně.
- [36] *H2W Technologies* [online]. Santa Clarita, b.r. [cit. 2017-10-27]. Dostupné z: <https://www.h2wtech.com/category/linear-induction#technical1>

Seznam symbolů, veličin a zkratek

ALM	-	Asynchronní lineární motor
HLSM	-	Hybridní krokový lineární motor
LM	-	Lineární motor
LSM	-	Lineární synchronní motor
MKP	-	Metoda konečných prvků
PM	-	Permanentní magnet
RLM	-	Lineární reluktanční motor
TFLM	-	Lineární motor s příčným magnetickým tokem
TSLM	-	Tubulární synchronní lineární motor
h_m	-	Výška permanentního magnetu [m]
h_s	-	Výška drážky [m]
h_y	-	Výška jha [m]
\vec{B}	-	Vektor magnetické indukce [T]
B_r	-	Remanentní magnetická indukce PM [T]
B_t	-	Magnetická indukce v zubu [T]
B_δ	-	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře [T]
$F_{Teor.}$	-	Teoretická hodnota posuvné síly [N]
$F_{vyp.}$	-	Vypočítaná hodnota posuvné síly [N]
I_{ef}	-	Efektivní proud tekoucí jedním vodičem [A]
I_m	-	Magnetický proud [Wb]
I_{tot}	-	Celkový proud [A]
N_{dr}	-	Počet závitů v drážce [-]
R_{gs}	-	Magnetický odpor vzduchové mezery pod drážkou [H ⁻¹]
R_{gt}	-	Magnetický odpor vzduchové mezery pod zubem [H ⁻¹]
R_{gz}	-	Magnetický odpor simulující rozptylové ztráty [H ⁻¹]
R_m	-	Magnetický odpor [H ⁻¹]
R_{mgi}	-	reluktance vzduchové mezery v závislosti na vzájemné poloze i-tého zuby a PM [H ⁻¹]
R_{mm}	-	Rozptylová reluktance PM [H ⁻¹]
R_z	-	Magnetický odpor elementu vzduchové mezery mezi zuby [H ⁻¹]
S_{fe}	-	Plocha železa [m ²]
U_{m-pm}	-	Magnetické napětí PM [A]
$U_{m,n}$	-	Magnetické napětí v n-tém zubu [A]
U_m	-	Magnetické napětí [A]
l_{fe}	-	Aktivní délka železa [m]
v_s	-	Synchronní rychlost [m·s ⁻¹]

w_f	-	Mezera mezi permanentními magnety [m]
w_m	-	Šířka magnetu [m]
w_s	-	Šířka drážky [m]
$w_{t,s}$	-	Šířka zubu nebo drážky nad PM [m]
w_t	-	Šířka zubu [m]
Φ_0	-	Fázový posun [rad]
α_i	-	Činitel vzájemné polohy zubu a PM [-]
δ_F	-	Relativní odchylka výpočtu [-]
λ_m	-	Magnetická vodivost [H]
μ_0	-	Permeabilita vakua [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]
μ_r	-	Relativní permeabilita [-]
μ_{rm}	-	Relativní permeabilita permanentního magnetu [-]
$2p$	-	Počet pólů [-]
f	-	Vstupní frekvence napětí [Hz]
F_n	-	Nominální posuvná síla [N]
F_x	-	Posuvná síla v ose x [N]
$i_{A,B,C}$	-	Proudy v jednotlivých fázích [A]
I_m	-	Amplituda proudu [A]
I_n	-	Nominální proud [A]
N_c	-	Počet závitů cívky [-]
P_2	-	Výkon LSM [W]
q	-	Náboj částice [C]
Q_{dr}	-	Počet drážek [-]
R_t	-	Magnetický odpor zubu primární dílu [H^{-1}]
R_{te}	-	Magnetický odpor koncového zubu [H^{-1}]
R_y	-	Magnetický odpor elementu jha [H^{-1}]
R_{ye}	-	Magnetický odpor konce jha [H^{-1}]
t	-	Čas [s]
v	-	Rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
x	-	Pozice primární části [m]
θ	-	Elektrický úhel [°]
B	-	Magnetická indukce [T]
H	-	Intenzita magnetického pole [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$]
I	-	Elektrický proud [A]
L	-	Délku motorového svazku [m]
N	-	Počet závitů cívky [-]
S	-	Plocha [m^2]
g	-	Velikost vzduchové mezery [m]
Φ	-	Magnetický tok [Wb]

μ	-	Permeabilita prostředí [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]
τ	-	Rozteč pólů [m]
ω	-	Úhlová rychlost [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

Seznam příloh

Příloha 1: Celkové schéma odporové sítě

