

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická



BAKALÁRSKA PRÁCA

2018

Róbert Hriňa

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Základy lineárních motorů

máj 2018

Bakalant: Hriňa Róbert
Vedúci práce: Ing. Koblík Pavel, Ph.D.

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne s príspevom vedúceho práce a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržiavání etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác. Ďalej prehlasujem, že nemám námietky proti požičiavaniu alebo zverejňovaniu mojej bakalárskej práce alebo jej časti so súhlasom katedry.

Dátum:

.....
podpis bakalanta

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hriňa** Jméno: **Róbert** Osobní číslo: **453019**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Základy lineárních motorů

Název bakalářské práce anglicky:

Basics of the linear machines

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou lineárních motorů a vypracujte rešerši se zaměřením hlavně na jejich dělení, způsoby konstrukce a použití.
2. Zvolte si jeden typ lineárního motoru a podrobně vysvětlete princip jeho činnosti.
3. Vybraný typ motoru popište matematicky.
4. Prostudujte problematiku tzv. koncového efektu, vysvětlete jeho příčiny a důsledky.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Boldea, I.: Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook. CRC Press, 2013, ISBN 9781439845141.
- [2] Lu, J., Ma, W.: Research on End Effect of Linear Induction Machine for High-Speed Industrial Transportation, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 39, no. 1, Jan. 2011.
- [3] Duncan, J.: Linear induction motor-equivalent-circuit model. IEE Proceedings B - Electric Power Applications, vol. 130, issue 1, Jan. 1983.
- [4] Woronowicz, K., Safaee, A.: A Novel Linear Induction Motor Equivalent-Circuit with Optimized End-Effect Model including Partially-Filled End Slots, IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, June 2014.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Koblre, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **13.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **25.05.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Pavel Koblre, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

4.5.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá delením lineárnych motorov podľa rôznych kritérií, princípom ich fungovania a problémami spojenými s týmto druhom motorov. V práci je obsiahnutý stručný popis jednotlivých typov lineárnych motorov, zahŕňajúci ich spôsob prevedenia, špecifické znaky a ich praktické využitie. Sú v nej porovnané všeobecné vlastnosti lineárnych motorov oproti točivým strojom a vyvedené dôvody pre rozvoj a použitie lineárnych motorov v budúcnosti. Ďalej je v nej podrobnejšie popísaný, teoreticky aj matematicky, lineárny indukčný motor, spolu s rušivými vplyvmi na jeho princíp fungovania. V bakalárskej práci je tiež vysvetlená kvázi jednodimenzonálna teória koncového efektu spojeného s konečnou dĺžkou lineárneho motoru a možnosťami jeho kompenzácie.

Kľúčové slová

Lineárny motor, lineárny indukčný motor, koncový efekt

Abstract

This bachelor thesis deals with the division of linear machines according to different criteria, principles of their behavior and problems associated with this type of machines. A brief description of individual types of linear machines is included in the thesis, including their way of execution, specific features and their practical use. It compares the general properties of linear motors with rotary machines and the rationale behind the development and use of linear engines in the future. In addition, a linear induction motor is described, theoretically and mathematically, in more detail, along with interfering influences on its operating principle. The bachelor thesis also explains the quasi-one-dimensional theory of the end-effect associated with the finite length of the linear motor and the possibilities of its compensation.

Key words

Linear machines, linear induction motor, end-effect

Podakovanie

Týmto by som chcel poďakovať svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Pavlovi Kobrlemu, Ph.D. za vedenie, odborné konzultácie a cenné rady poskytnuté nielen počas mojej bakalárskej práce ale aj počas štúdia. Tiež by som chcel poďakovať svojej rodine, ktorá mi poskytovala oporu a pozitívne myslenie počas celého môjho štúdia a priateľom, ktorí ma dokázali v ťažkých chvíľach rozptýliť.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	História	1
1.2	Základná konštrukcia	2
2	Delenie lineárnych motorov	3
2.1	Rozdelenie podľa fyzikálneho princípu	4
2.1.1	Lineárne synchrónne motory	4
2.1.2	Lineárne krokové motory	6
2.2	Rozdelenie podľa tvaru konštrukcie	7
2.2.1	Lineárne motory tubulárneho tvaru	7
2.2.2	Lineárne motory plochého tvaru	8
2.2.3	Lineárne motory s vodiacim kanálom v tvare U	8
3	Porovnanie vlastností točivých motorov s prevodovkou	10
3.1	Rýchlosť	10
3.2	Presnosť	11
3.3	Trenie	11
3.4	Zhodnotenie výhod a nevýhod	12
3.5	Aplikácie	13
4	Lineárne indukčné motory	15
4.1	Delenie lineárnych indukčných motorov	15
4.2	Konštrukcia plochých LIM	15
4.2.1	Primár	16
4.2.2	Sekundár	17
4.2.3	Vzduchová medzera	19
4.3	Konštrukcia tubulárnych LIM	20
5	Princíp činnosti LIM	21
5.1	Sklz LIM	23
5.2	Ekvivalentné veličiny	24
5.2.1	Skin efekt	24
5.2.2	Edge-efekt	25
5.2.3	Drážkovanie primára	25
5.2.4	Okrajové pole magnetického toku	26
5.2.5	Dôsledok	26
5.3	Koncový efekt	26
5.3.1	Statický koncový efekt	27
5.3.2	Goodness faktor	27
5.3.3	Dynamický koncový efekt	27
5.3.4	Náhradné schéma	31
5.3.5	Kompenzácia	33
6	Záver	35

1 Úvod

Lineárny motor je elektrické zariadenie, ktoré pracuje na princípe elektromagnetickej indukcie. Oproti točivým motorom, ktoré vykonávajú lineárny pohyb pomocou rôznych druhov prevodovky, lineárny motor vykonáva priamočiary pohyb priamo. Môžeme si pri ňom predstaviť vlaky pracujúce na princípe magnetickej levitácie, dopravníky dosahujúce veľmi vysoké rýchlosti, extra presné stroje pracujúce s presnosťou desiatín mikrometrov a iné. V nasledujúcich kapitolách si spomenieme a podrobnejšie popíšeme typické druhy lineárnych motorov a ich využitie v praxi.

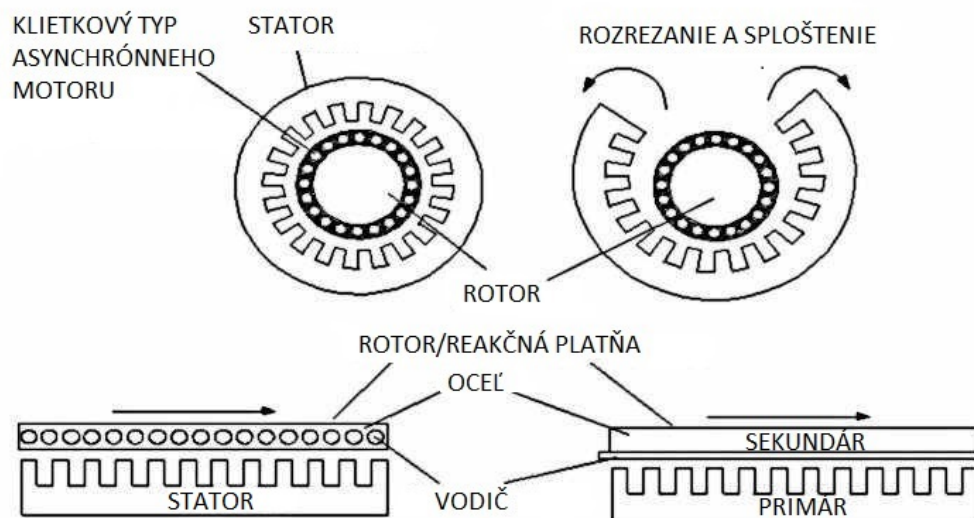
Treba podotknúť, že ku každému typu točivého motoru vieme vytvoriť jeho lineárnu verziu, nie všetky však svojimi kvalitami prevyšujú točivé stroje.

Čiže existujú aj ďalšie typy prevedení lineárnych motorov, ktoré v tejto bakalárskej práci nie sú uvedené. V tejto bakalárskej práci sa budeme venovať len tým najčastejšie používaným typom, ktoré našli uplatnenie najmä v priemysle a v doprave.

Výnimočnú pozornosť budeme venovať lineárnym indukčným motorom. Preberieme si ich rozdelenie, konštrukčné vlastnosti, princíp ich fungovania a vplyv koncového efektu, ktorý sa pri tomto druhu motorov prejavuje. V závere si odvodíme náhradné schéma lineárneho motoru s rešpektovaním strát spôsobených koncovým efektom.

1.1 História

Vývoj lineárnych motorov začal v polovici devätnásteho storočia, ale prvé praktické prototypy sa objavili až začiatkom dvadsiateho storočia. Za otca lineárnych motorov a magnetickej levitácie sa považuje profesor, Erik Laithwaite, ktorý ako prvý skonštruoval lineárny motor pracujúci za pomoci magnetickej levitácie v textilnom priemysle. Problematika magnetickej levitácie bola v tej dobe známa, ale zatiaľ nebola zavedená do komerčnej praxe. Bol prvý, kto použil lineárny motor pre mechanizáciu, ako aj na transport.



Obr. 1.1: Rozrezanie a sploštenie motoru. (Prevzaté z [6] a upravené).

1.2 Základná konštrukcia

Lineárny motor si môžeme predstaviť tak, že motor priečne rozrežeme a sploštíme (viď Obr. 1.1). Zo statoru nám tak vznikne aktívna časť **primár**, tiež nazývaná budič a z rotoru pasívna časť **sekundár**.

Pojem aktívny a pasívny nie je v tomto prípade viazané na pohyb, ale na produkciu elektromagnetického poľa. V závislosti na druhu aplikácie môže byť teda pohyblivou časťou primár alebo sekundár. Vo väčšine prípadoch sa však stretávame s pohyblivým primárom a statickou dráhou sekundára. Dôvody sú uvedené pri jednotlivých typoch motorov v kapitolách 2 a 4.

Magnetické obvody lineárnych motorov bývajú zložené z mäkkých magnetických alebo feromagnetických materiálov pre elektrotechniku s malou hysteréznou slučkou. Bývajú poskladané z usporiadaných a izolovaných plechov pre zníženie strát vírivými prúdmi.

Niektoré lineárne motory na tvorbu magnetických obvodov využívajú permanentné magnety (viď kap. 2.1.1), čím znižujú nároky na údržbu a spotrebu energie.

Pre vinutie primára sa využíva najčastejšie meď alebo hliník.

Sekundár je časť lineárneho motoru, ktorá svojou konštrukciou špecifikuje typ motoru.

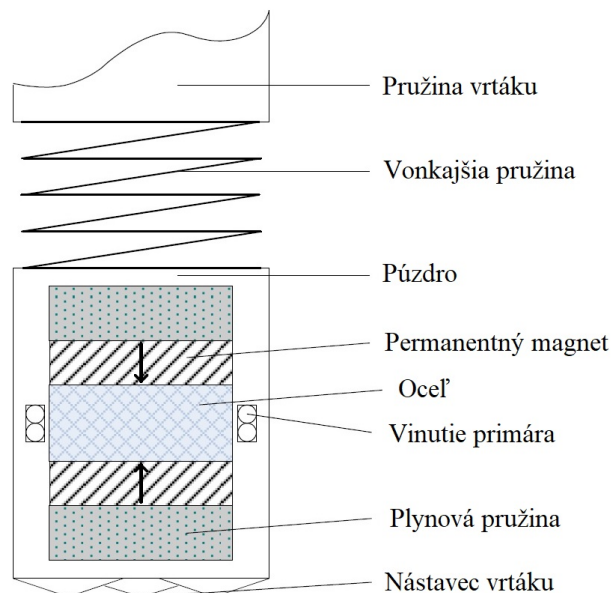
V praxi sa lineárne motory primárne využívajú na presun nákladu v podobe dopravných pásov, alebo vysokorýchlostných dopravných prostriedkov. Ďalším druhom využitia je presná manipulácia s pevne upnutými nástavcami v tzv. H-shape prevedení (viď kap. 3.5).

2 Delenie lineárnych motorov

Lineárne motory môžeme rozdeliť podľa nasledujúcich kritérií:

Podľa druhu vykonávaného pohybu na lineárne motory vykonávajúce:

- Progresívny pohyb - pohyb po dráhe v oboch smeroch, ale pohyb nie je periodický. Progresívne pohybujúce sa motory sú napríklad trojfázové synchronne motory na transport.
- Oscilačný pohyb - periodicky sa opakujúci rezonančný pohyb podobný správaniu sa pružiny. Motory pracujúce týmto spôsobom sú väčšinou jednofázové a sú závislé na frekvencii elektrického poľa. Do tejto skupiny môžeme zaradiť napríklad tubulárny lineárny motor určený na vrtanie vytvárajúci svojim pohybom príklep (viď Obr. 2.1) alebo vnútorný mechanizmus reproduktora.



Obr. 2.1: Mechanizmus príklepového vrtáku. (Prevzaté z [7] a upravené)

Podľa fyzikálneho princípu na:

- Lineárne indukčné motory
- Lineárne synchronne motory
- Lineárne krokové motory

Podľa tvaru na:

- Tubulárne motory
- Ploché lineárne motory
- Lineárne motory s kanálom v tvare U

Toto je nami zvolené delenie. Samozrejme existujú aj ďalšie rozsiahlejšie kritériá, ale pre základnú predstavu so zameraním na zariadenie využívané v priemysle a na transport nám toto delenie bude stačiť.

2.1 Rozdelenie podľa fyzikálneho princípu

Lineárne indukčné motory tiež nazývané lineárne asynchrónne motory budú podrobne prebraté v kapitolách 4 a 5.

2.1.1 Lineárne synchrónne motory

Lineárne synchrónne motory môžeme ďalej deliť na motory:

Používané na transport osôb

Lineárne synchrónne motory (LSM) pracujúce ako dopravné prostriedky sú väčšinou vlaky. V minulosti prebiehali pokusy o zavedenie lineárnych motorov do mestskej hromadnej dopravy ale tento pokus sa neujal najmä z finančných dôvodov.

Keďže pri lineárnych motoroch máme možnosť zvoliť si, či bude pohyblivou časťou primár alebo sekundár, vedú sa dohady o tom, čo je výhodnejšie z ekonomického a praktického hľadiska.

- Vlaky s aktívnou vodiacou dráhou

Súčasťou funkčnej paluby vlaku je jednosmerné budenie magnetických obvodov nachádzajúcich sa v spodnej a bočnej časti. Tieto obvody nemenia svoju polaritu a mohli by byť nahradené silnými permanentnými magnetmi.

Paluba ďalej obsahuje riadiace obvody a príslušenstvo potrebné pre smerovanie dopravného prostriedku a na udržanie magnetickej levitácie.

Samotný pohyb dopravného prostriedku je teda vytváraný striedavým poľom aktívnej dráhy. Tá je rozdelená na jednotlivé úseky dĺžky stoviek metrov alebo niekoľko kilometrov. Pokiaľ sa v tomto danom úseku nachádza vlak, táto časť dráhy je napájaná a ostatné úseky dráhy môžu byť odpojené, čím sa znižuje spotreba. Zároveň sa môže na trati nachádzať niekoľko nezávisle sa pohybujúcich dopravných prostriedkov, každý na vlastnom aktívnom úseku.

Napájanie dráhy je riadené priamo z paluby dopravného prostriedku.

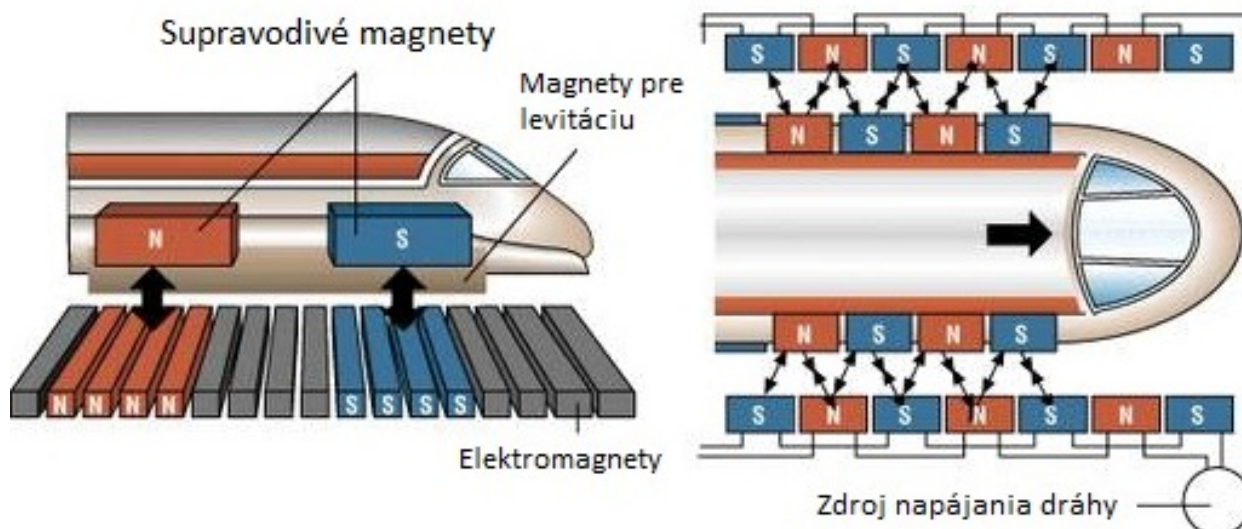
Výhodou tohto typu je, že na palube sa môže nachádzať zariadenie, ktoré využíva aktívnu dráhu ako zdroj elektrickej energie.

Jeho hmotnosť, v porovnaní s potrebným vybavením bežných vlakov, je relatívne nízka, čo umožňuje niť väčší náklad a znižuje veľkosť potrebnej dodávky energie na magnetickej levitáciu. Väčšina riadenia a transformácie energie je realizovaná z pozemných staníc, ktoré sú pravidelne rozmiestnené pozdĺž aktívnej dráhy. Dráha teda odoberá elektrickú energiu len v úsekoch, kde sa nachádza vlak.

V tomto prípade nie je potrebné riešiť správne vedenie napájacieho kábla, narozdiel od synchrónnych motorov využívaných v priemysle, ktorý je súčasťou dráhy.

Výhodou je tiež veľká maximálna dosiahnuteľná rýchlosť a zrýchlenie. Vďaka väčšej vzduchovej medzere (5-10 cm) nie sú kladené také prísne nároky na stavbu trate a presnú polohu primára voči sekundáru. Toho sa využíva najmä v doprave, ale aj v priemysle.

Moderné vlaky pracujúce na princípe lineárneho pohonu ako Transrapid MAGLEV dosahujú rýchlosť 300 km/h na dráhe 5 km a oproti tomu ICE (intercity express) túto rýchlosť dosiahne na 30 km. Maximálna dosiahnuteľná rýchlosť vlaku TGV a ICE je približne 300 km/h, kde opäť dominuje MAGLEV dosahujúci rýchlosť nad 500 km/h.



Obr. 2.2: Princíp funkcie MAGLEVu s aktívnou vodiacou dráhou. (Prevzaté z [10] a upravené)

- Vlaky s pasívnou vodiacou dráhou

Tieto vlaky sa ukázali byť menej praktické a finančne nákladnejšie najmä v porovnaní s lineárnymi indukčnými motormi, kde cena za kilometer pasívnej vodiacej dráhy je podstatne lacnejšia (viď kap. 4).

Dráha sa skladá z pólov budených jednosmerným prúdom, alebo z lacnejších feromagnetických pevných segmentov s premennou reluktančnou zložkou.

Paluba obsahuje jednosmerné budenie pre magnetickú levitáciu, ktoré mení polaritu v závislosti na rýchlosti pohybu. Toto vinutie môže byť vyrobené z jedného alebo dvoch dlhých vinutí, ktoré krížením vytvárajú pravidelné striedanie severného a južného magnetického pólu, tak aby výsledná sila spôsobovala nadnášanie dopravného prostriedku.

Samotný pohyb súpravy je zabezpečovaný samostatným obvodom, ktorý za pomoci striedavého napätia vytvára striedavé magnetické pole.

V kombinácii s dráhou, kde sa pravidelne strieda severný a južný magnetický pól, vzniká sústava, ktorá levituje a zároveň vykonáva synchrónny pohyb.

Tento motor má veľký potenciál pre magnetickú levitáciu, ale napriek vypracovaniu niekoľkých projektov sa tento typ motoru ukázal byť nepraktický.

Použitie je možné najst' ako levitujúci dopravný prostriedok na kratšie vzdialenosti v čistých priestoroch.

Používané v priemysle

Lineárne synchrónne motory používané v priemysle väčšinou vykonávajú pohyb v rozsahu 2-3 m, pričom vykonávajú pohyb priamočiary, alebo najmodernejšie pohyb v dvoch smeroch $x - y$.

Pokiaľ je pohyblivou časťou primár, ktorý pre svoju činnosť nutne potrebuje zdroj napájania a riadiace impulzy, je nutné riešiť správne vedenie kábla. Táto požiadavka je prekvapivo veľmi komplikovaná na realizáciu. Väčšinou je to jediná časť lineárneho motoru, ktorá vyžaduje pravidelnú údržbu a výmenu.

Káble sú väčšinou uložené v ohybnej plastovej ochrannej konštrukcie, v tvare reťaze. Táto reťaz pri práci lineárneho motoru zabezpečuje správne vedenie kábla. Zároveň sa ale kábel počas bežnej prevádzky neustále

ohýba, čím sa poškodzuje izolácia a vnútorná štruktúra kabeláže.

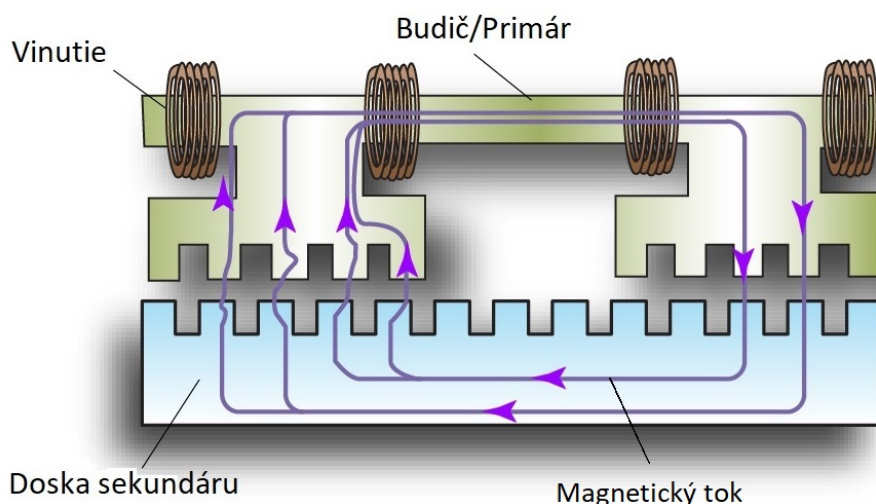
Kábel teda musí spĺňať požiadavky na dostatočnú odolnosť voči opotrebeniu vplyvom ohýbania a zároveň dobrú ohybnosť. Taktiež musí spĺňovať všetky požiadavky na izoláciu a tienenie.

V minulosti sa v priemysle primárne používali točivé servopohony a krokové motory, s rôznymi druhmi prevodovky, ktoré premieňala točivý pohyb na lineárny.

V praxi sa stretávame s tromi spôsobmi premeny točivého na lineárny pohyb: pomocou remeňa a napínacej kladky, pomocou ozubenej hriadele a ozubenej pohyblivej lišty s vodiacimi tyčami a spôsobom šróbovania tyče s vyfrézovanými závitmi. V kapitole 3 budú tieto spôsoby a ich vlastnosti postupne porovnané s vlastnosťami lineárnych motorov.

2.1.2 Lineárne krokové motory

Lineárne krokové motory sa vyrábajú v dvoch prevedeniach: premenné reluktančné a hybridné. Staršie premenné reluktančné lineárne krokové motory (viď Obr. 2.3) sú väčšinou trojfázové, riadené pomocou spätnoväzbovej riadiacej slučky. V tomto prípade je dĺžkou kroku vzdialenosť medzi dvoma zubami dosky sekundáru.



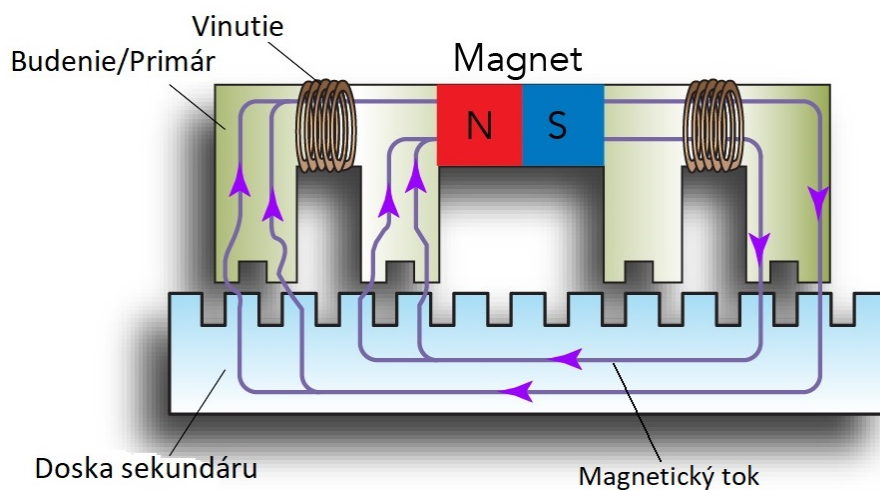
Obr. 2.3: Premenný reluktančný lineárny krokový motor. (Prevzaté z [11] a upravené)

Moderné hybridné lineárne krokové motory (viď Obr. 2.4) sú napájané dvoj alebo štvorfázovo s otvorenou reguláciou.

Zuby primára (budiča) sú rozmerovo zhodné so zubami dosky sekundáru, ale jednotlivé segmenty zubov sú posunuté o polovicu alebo štvrtinu kroku. Okrem toho môžu pracovať pri tzv. mikrokrokování. Správnou kombináciou spínania jednotlivých fáz sa tak dá dosiahnuť ešte vyššieho rozlíšenia ako pri plnom kroku $1/4$ pozn. Všetky segmenty primára sú pri tomto spôsobe riadenia v medzi priestore. Narozdiel od reluktančných lineárnych motorov sú súčasťou konštrukcie neodymové permanentné magnety, ktoré zvyšujú účinnosť a dynamiku krokového motoru.

Často sa pre tento typ motorov využívajú vzduchové ložiská. Za pomoci pravidelne rozmiestnených „kanálikov“ je do medzery medzi primárom a sekundárom vháňaný stlačený plyn, ktorý povrchy oddeľuje tenkým filmom šírky desiatok mikrometrov a dosahuje o dva až tri rády vyššiu presnosť ako pri valivých ložiskách. Zároveň tento systém zvyšuje účinnosť chladenia.

Obe tieto prevedenia sú napájané pomocou riadeného modulátora jednosmerného prúdu. V dnešnej dobe sa používajú len bezkomutátorové krokové motory. Tieto motory veľké rozlíšenie najmä pri mikrokrokaní a to 10–250 krát väčšiu ako pri plnom kroku. Majú všetky výhody spojené s lineárnymi motormi (viď kap. 3.4).



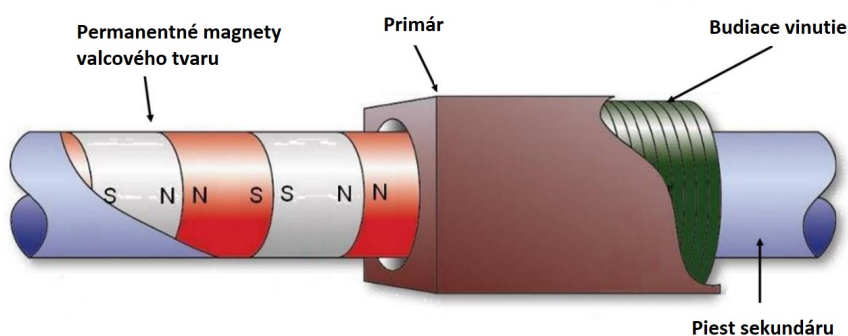
Obr. 2.4: Premenný reluktančný lineárny krokový motor. (Prevzaté z [11] a upravené)

2.2 Rozdelenie podľa tvaru konštrukcie

Tvar motoru závisí na spôsobe aplikácie a požiadavkám okolitého prostredia.

2.2.1 Lineárne motory tubulárneho tvaru

Tubulárne motory (viď Obr. 2.5) sa používajú ako ramená strojov pre manipuláciu s predmetmi. V dnešnej dobe sa vyvíja lineárne točivý pohyb, ktorý umožňuje vykonávať lineárny pohyb a zároveň otáčať s upevneným nástrojom. Nevýhodou týchto motorov je obmedzená dĺžka ramena.



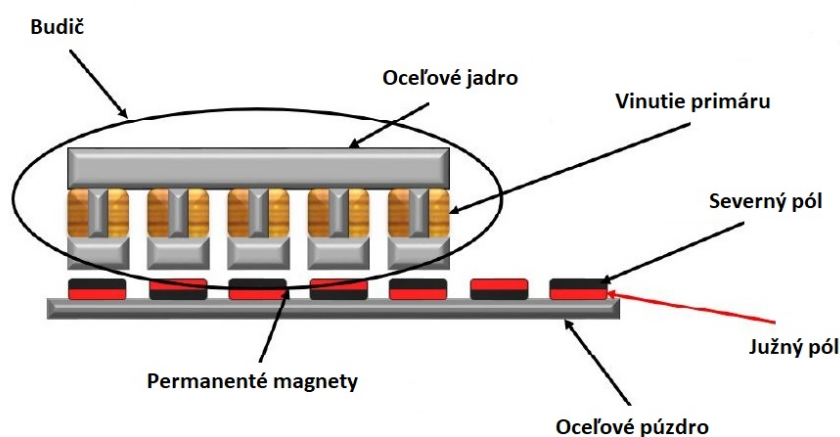
Obr. 2.5: LSM tubulárneho tvaru. (Prevzaté z [12] a upravené)

2.2.2 Lineárne motory plochého tvaru

Lineárne motory plochého tvaru majú oproti tubulárnemu tvaru výhodu, že dráhy sa dajú v prípade potreby spojovať. Vyrábajú sa v troch základných prevedeniach: bezdrážkové bezocelové, bezdrážkové ocelové a drážkové ocelové.

Bezdrážkové bezocelové prevedenie má plynulý chod, ale vyvíja najmenšiu silu. Je vhodné napríklad pre pohyb skenovacích zariadení.

Bezdrážková ocelová konštrukcia je podobná bezdrážkovej bezocelovej, ale vďaka striedaniu hliníkových a ocelových plátov vzniká medzi primárom a sekundárom silnejšia príťažlivá sila, čo sa prejaví na zvýšení hnacej sily.



Obr. 2.6: LSM plochého tvaru s drážkami a ocelovou konštrukciou. (Prevzaté z [12] a upravené)

Posledný **drážkový ocelový** typ (viď Obr. 2.6) dosahuje najvyššiu hnaciu silu. V dôsledku zníženia strát z rozptyľového toku, vďaka drážkam vyrobených z magneticky mäkkého materiálu, ktorý má nízky magnetický odpor, sa podstatne znížia straty a vďaka tomu sa zvýši aj veľkosť hnacej sily.

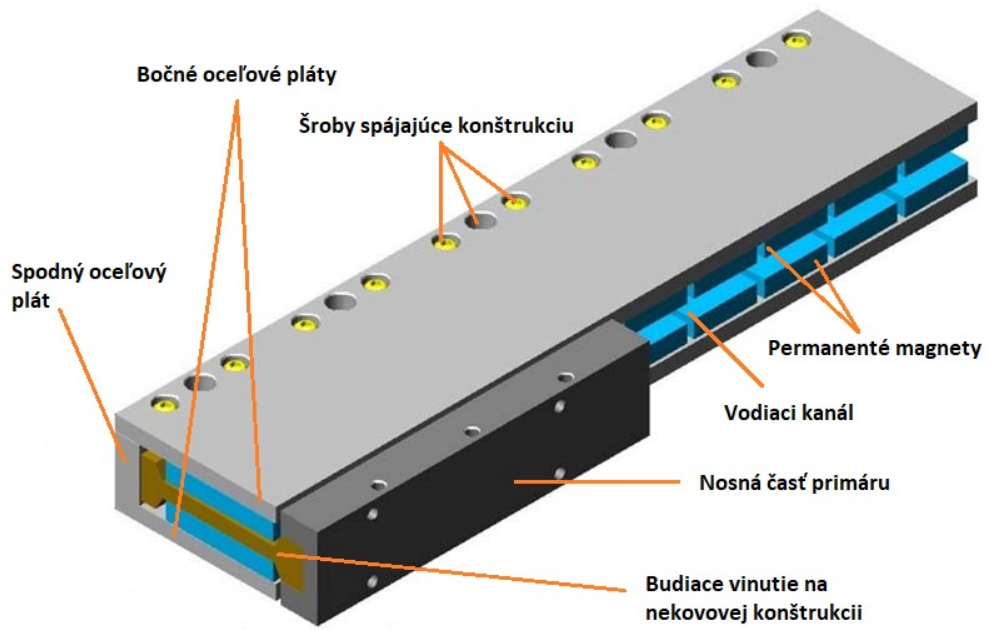
Nevýhodou tohto tvaru motoru je pomerne vysoký rozptyľ magnetického toku, čo v praxi znamená straty a možné ovplyvňovanie svojho okolia.

2.2.3 Lineárne motory s vodiacim kanálom v tvare U

Lineárne motory s vodiacim kanálom sekundáru v tvare U alebo podkovy sú tvorené paralelne usporiadanými permanentnými magnetmi.

Väčšina magnetického toku sa vďaka tomuto usporiadaniu uzatvára vo vnútri kanálu a nerozptyľuje sa do okolia. Tvar U umožňuje dobré podmienky pre cirkuláciu chladiaceho plynu.

Pohyblivý primár je vložený medzi tieto magnety a upevnený za pomoci ložísk. Primár je vyrobený z nekovových materiálov, často z epoxidového lepidla držiaceho vinutie v správnej polohe, takže svojim pohybom nenarušuje magnetický obvod kanálu. Okrem toho sa tým zníži jeho hmotnosť, čo pozitívne vplyva na dynamiku pohybu. Tento motor sa používa v rôznych polohách, kde otvor vzduchovej medzery býva v horizontálnej alebo vertikálnej polohe.



Obr. 2.7: LSM v tvare podkovy v horizontálnej polohe. (Prevzaté z [13] a upravené)

3 Porovnanie vlastností točivých motorov s prevodovkou

V priemysle často dochádza ku konkurenčnému boju medzi lineárnymi motormi a točivými motormi s prevodom na lineárny pohyb. V zásade existujú tri druhy prevodu točivého motoru na lineárny pohyb. Sú to:

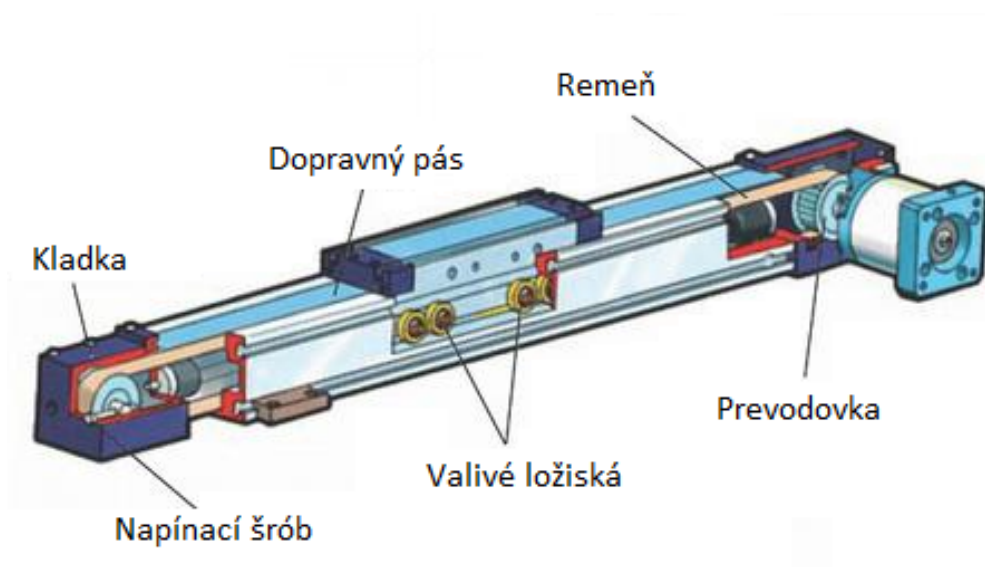
- Prevod pomocou napínacej kladky a remeňa, ktorý môže byť hladký alebo zúbkovaný ¹ (Obr. 3.1)
- Prevod pomocou ozubenej hriadele (Obr. 3.2)
- Prevod pomocou šróbovacieho piestu (Obr. 3.3)

V tejto kapitole si porovnáme hlavné výhody lineárnych motorov oproti točivým motorom s prevodovkou na lineárny pohyb.

3.1 Rýchlosť

Rýchlosť motoru a dobrá dynamika je v dnešnej rýchlej dobe, veľmi podstatná.

Veď si napríklad točivý motor s maximálnou dosiahnuteľnou rýchlosťou otáčok 3 000 ot/min, s prevodovkou 5:1, s remeňom a kladkou v priemere 10 cm. V prepočte takýto dopravníkový pás môže dosahovať rýchlosť 3,14 m/s. Oproti tomu bežne dostupné lineárne motory sú schopné dosahovať rýchlosť 5-10 m/s. [2]



Obr. 3.1: Motor s lineárnou prevodovkou na princípe remeňa a napínacej kladky. (Prevzaté z [15] a upravené)

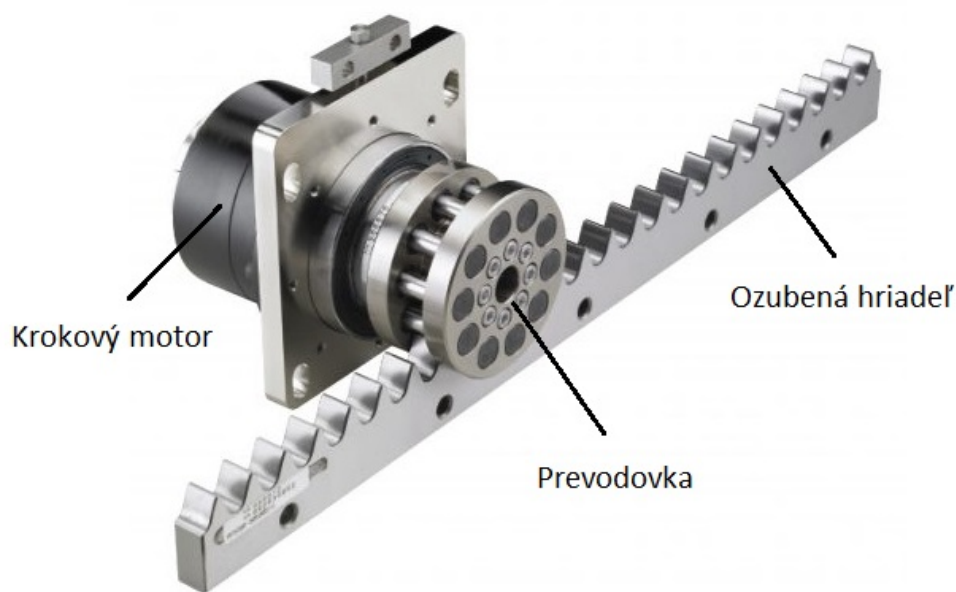
¹zúbkovaný remeň znižuje riziko preklzu

3.2 Presnosť

Ďalším faktorom ovplyvňujúcim použiteľnosť v priemysle je presnosť. Točivé motory majú čidlá, ktoré snímajú uhol natočenia hriadele.

Ak by polohové čidlo v točivom motore z predchádzajúceho príkladu snímalo s frekvenciou 10 000 pulzov/ot, teoreticky by bolo schopné dosiahnuť presnosti $6,3 \mu\text{m}$.

To ale ešte nezahŕňa ďalšie faktory ovplyvňujúce presnosť, ako je napríklad napnutie remeňa pri položení bremena na pás, preklz remeňa atď. Presnosť takéhoto zariadenia sa znižuje so zvyšovaním dĺžky remeňa.



Obr. 3.2: Motor s lineárnou prevodovkou na princípe ozubenej hriadele. (Prevzaté z [14] a upravené)

Z tejto úvahy vyplýva, že opakovateľná presnosť takéhoto zariadenia je menšia z toho dôvodu, že regulátor riadi motor len na základe polohy hriadele a pokiaľ dôjde k malému vychýleniu z tejto polohy, senzor túto chybu nezaznamená.

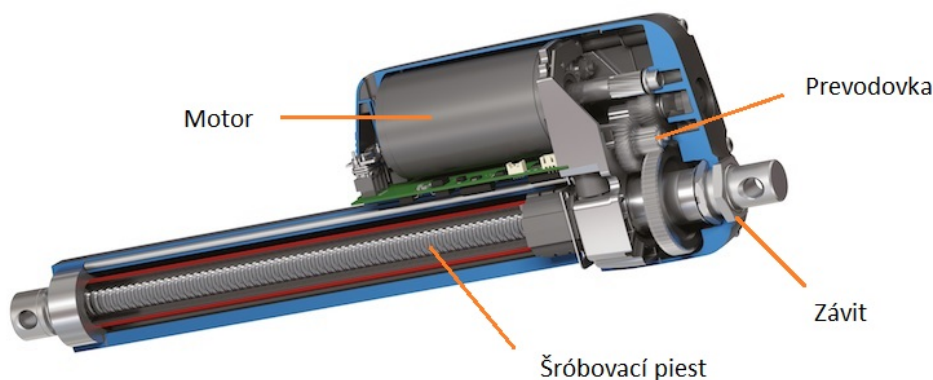
Riešením by mohlo byť nainštalovanie druhého čidla polohy, ktoré by priamo snímalo polohu prepravovaného nákladu, čo by z finančného a praktického hľadiska bolo zbytočne zložité a nákladné.

Ak ide o aplikácie, v ktorých je vysoká presnosť zásadným požiadavkom, tak sa z praktického aj finančného hľadiska oplatí zakúpiť lineárny motor.

Lineárne motory vďaka tomu, že priamo snímajú a regulujú vlastnú polohu, nepriamo snímajú polohu svojho nákladu, ktorý je na nich pevne upevnený. Vďaka tomu sú schopné dosahovať opakovateľnú presnosť menej ako $0,1 \mu\text{m}$.

3.3 Trenie

Ďalším ovplyvňujúcim faktorom, ktorý sa prejavuje u všetkých, ale najmä pri závitovom prevedení lineárneho prevodu, je trenie. Trenie v takomto mechanizme spôsobuje nie len straty, čo má za následok zvyšovanie teploty, ale aj opotrebenie stroja a ďalšie postupné zvyšovanie nepresnosti. Odhadnutie pravidelnej údržby a počtu cyklov pre výmenu závitového mechanizmu je veľmi náročné.



Obr. 3.3: Motor s lineárnou prevodovkou na princípe šróbovacieho závitú. (Prevzaté z [16] a upravené)

Lineárny motor pracuje prakticky bez trenia. Niektoré lineárne motory využívajú princíp magnetickej levitácie a ostatné používajú podporné ložiská, ktoré slúžia len ako opora pri väčších nákladoch, a zároveň prispievajú k presnosti pohybu v požadovanom smere. Na to sa používajú v zásade krížové valčekové ložiská, vodiace dráhy rôznych tvarov alebo vzduchové ložiská, ktoré znižujú veľkosť trenia takmer na nulu.

Technológia vzduchových ložísk pracuje za pomoci kompresora, ktorý do vzduchovej medzery vháňa vzduch tlakom 300 - 400 kPa, čím vzniká medzera len niekoľko desiatín milimetra, v závislosti na hmotnosti nákladu a tlaku vháňaného vzduchu. Motor tak pracuje prakticky bez trenia, čo sa s obľubou využíva najmä pri lineárnych krokových motoroch ale aj iných typoch lineárnych motorov (viď kap. 2.1.2).

Náročnosť údržby takéhoto motoru sa podstatne zníži, v niektorých prípadoch sa údržba prakticky nepožaduje.

3.4 Zhodnotenie výhod a nevýhod

Na základe argumentov a úvah uvedených v predchádzajúcom texte môžeme zhodnotiť, že lineárne motory majú veľa výhod, ktoré sú použiteľné v špecifických aplikáciách. Tie vedú k rozsiahlemu vývoju lineárnych motorov rôznych dĺžok, tvarov a prevedení.

Hlavnými výhodami sú:

- vysoká rýchlosť – ktorá je limitovaná frekvenciou spínania zdroja, a veľkosťou privedeného napätia
- veľké zrýchlenie
- presnosť opakovania
- rýchla odozva – vďaka priamemu prevodu z polohového čidla na pohyb
- nulová údržba – žiadne prevody, prakticky nulové trenie, bez komutátora
- žiadny spätný ráz – žiadne prevody
- použiteľnosť v čistých priestoroch

Nevýhody lineárnych motorov:

- cena² – použitie vzácnych permanentných magnetov sa odrazí na cene; menšia hromadnosť výroby; čidlo vzdialenosti je drahšie oproti točivému a je závislé na vzdialenosti.
- nízky ukazovateľ pomeru sila/hmotnosť oproti točivým motorom
- tepelné straty – pracujú pri vyššom menovitom prúde a aktívna časť sa vplyvom Jouleových strát prehrieva; väčšina zariadení má aktívnu časť priamo prepojenú s nákladom (pri aplikáciách citlivých na teplo musí byť riešená otázka chladenia a odvodu tepla)

3.5 Aplikácie

Doprava

Lineárne motory sa používajú ako vysoko rýchlostné vlaky (MAGLEV - Šanghaj, prefektúra Aiči), v mestskej hromadnej doprave v mestách Toko, Ósaka, Vencouver, atď., ako letiskové linky napr. v mestách New York a Pekinging. Tiež sa používajú vo výrobných halách na prepravu osôb ako levitačné plošiny.

Priemysel

V priemysle sa s lineárnymi motormi stretávame ako s plošinami prenášajúcimi náklad rôznych druhov s veľkou presnosťou polohy a dynamikou. Tiež sa často používa kombinácia troch a viac motorov v takzvanom „H - shape“ zapojení, ktoré umožňuje pohyb v osách x , y a z .

Takéto zariadenie je vhodné v aplikáciách „pick and place“, ale aj na ďalšie druhy úkonov. V tomto prípade záleží na druhu nástroja, ktorý je upevnený na ramene motoru. Používa sa napríklad vo farmácii ako osadzovač tabliet do plastového púzdra, ako nástroj na laserové alebo plazmové vyrezávanie presných tvarov do kovu, atď.



Obr. 3.4: Laserová rezačka v H-shape zapojení. (Prevzaté z [8] a upravené)

Používa sa tiež ako siedma osa robota, vo výrobných linkách. Je to hlavne kvôli presnosti, pretože pokiaľ nie je podstava robota v presnej polohe, malá nepresnosť môže spôsobiť veľkú chybu konečného procesu.

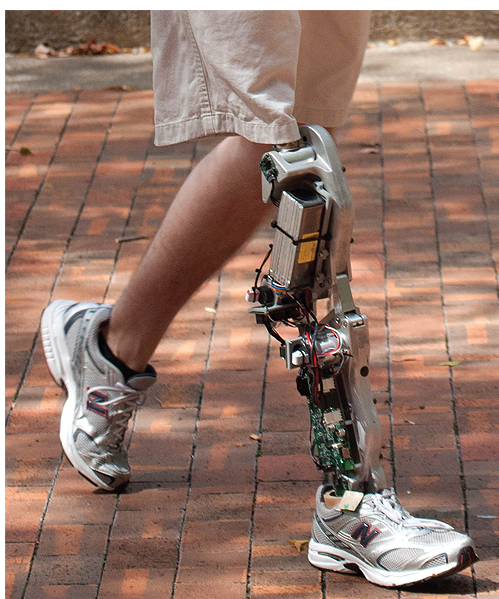
²rozsiahlym vývojom lineárnych motorov ceny postupne klesajú a v blízkej budúcnosti nebude rozhodujúcim faktorom

Čisté priestory

Výroba polovodičov a polovodičových súčiastok je náročná na čisté prostredie, kde lineárne motory dominujú, vďaka svojej nulovej potrebe údržby. Používajú sa aj ako dopravníky alebo s upevneným nástrojom.

Zdravotníctvo

V zdravotníctve sa lineárne motory používajú pri operáciách očí, kde sa presným vedením rezacieho nástroja narezáva rohovka, ale aj pri iných druhoch operácií. Ďalej sa vyvíjajú technológie, ktoré umožňujú nahradiť amputované končatiny umelými svalmi pracujúcimi za pomoci lineárnych motorov, ktoré plnia funkciu svalov. Postupne sa táto technológia vyvíja v robotike.



Obr. 3.5: Protéza na nohu s lineárnym motorom. [9]

Potravinárstvo

V potravinárstve majú lineárne motory podobne ako v priemysle veľkú rôznorodosť v možnosti využitia. Používajú sa na krájanie, dávkovanie, zarovnávanie ako príprava na balenie, samotné balenie, vyradovanie vadných kusov a na veľa ďalších medziprocesov pri výrobe a spracovaní potravín.

4 Lineárne indukčné motory

Lineárne indukčné motory, tiež nazývané lineárne asynchrónne motory fyzikálnym princípom ich fungovania pripomínajú asynchrónne motory s kotvou nakrátko. Ako už bolo spomenuté, narezaním a sploštením nám vznikne primár a sekundár plochého tvaru. Následným zrolovaním primára okolo sekundára valcového tvaru nám vznikne tubulárny lineárny indukčný motor.

Lineárne indukční motory používajú pre svoj pohyb výhradne aktívny primár a pasívny sekundár. V počiatkoch vývoja sa používal aj statický primár a pohyblivý sekundár, ale s príchodom synchronných lineárnych motorov s aktívnou vodiacou dráhou dosahoval synchronný motor lepšie dynamické aj elektromagnetické vlastnosti s minimálnym cenovým rozdielom.

Hlavnou výhodou usporiadania pasívnej dráhy resp. sekundáru v porovnaní s dráhami iných lineárnych motorov je podstatne nižšia cena dráhy za kilometer, čo je hlavnou výhodou tohoto usporiadania. Pri tomto usporiadaní sa nedosahuje tak veľkej presnosti ako pri ostatných typoch lineárnych motorov, ale zachováva si výhody lineárnych motorov v oblasti dynamiky a jednoduchosti pohybu pri nízkych a vysokých rýchlostiach.

4.1 Delenie lineárnych indukčných motorov

Lineárne indukčné motory môžeme rozdeliť nasledovne:

Ploché

Používajú sa ako letiskové dopravné linky, vyhlídkové vlaky, ako atrakcie v zábavných parkoch (napr. Disney Land, Tomorrow Land, atď.).

- Jednostranné (Single-sided Linear Induction Motors = SLIM)
- Dvojstranné (Double-sided Linear Induction Motors = DLIM)

Tubulárne

Tubulárne lineárne indukčné motory sa využívajú v aplikáciách, kde nie je potreba magnetickej levitácie a potreba vykonávaného pohybu sa pohybuje približne do 2 m. Tubulárne LIM sa používajú v priemysle ako obrábacie stoly, pumpy čerpadiel alebo kompresorov alebo ako vibrátory pri nízkych frekvenciách. Patria teda do skupiny pomalobežných strojov.

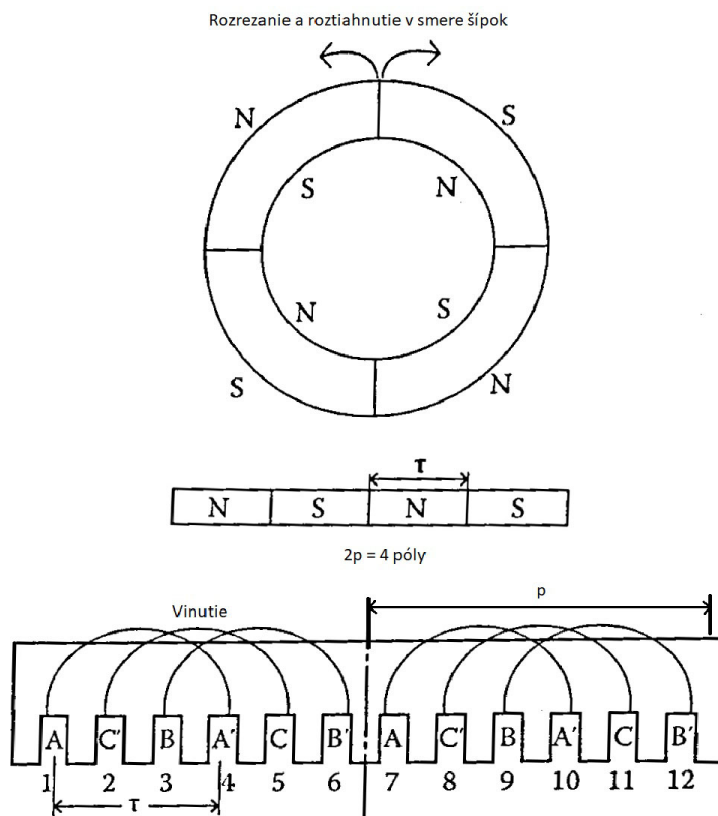
4.2 Konštrukcia plochých LIM

Ako už bolo zmienené v predchádzajúcom texte, motor sa skladá z dvoch základných častí. Pohyblivý primár, je konštrukčne viazaný na pohybujúci sa prostriedok a statický sekundár predstavuje nízko nákladovú dráhu. Keďže tento typ lineárneho indukčného motoru sa používa najmä v doprave, pojem dráha sekundáru, alebo sekundár v tejto kapitole budeme nazývať tiež trať.

4.2.1 Primár

Primár je poskladaný z vrstiev oceľových plechov pre elektrotechniku z mäkkej magnetickej ocele. V drážkach je uložené vinutie,³ ktoré zabezpečuje tvorbu magnetického toku.

Točivý asynchrónny motor, ktoré má rovnomerne rozložené vinutie po celom obvode statoru, prípadne rotoru, je napájané symetrickým ideálnym zdrojom striedavého napätia indukuje vo vzduchovej medzere magnetický tok, ktorý je po celom obvode vzduchovej medzery rovnomerne rozložený. Je to vďaka tomu, že rotor aj stator sú kruhového tvaru a v podstate tvoria nekonečne dlhý primár a sekundár.



Obr. 4.1: Typické jednovrstvé vinutie s plnou výplňou koncových pólů. (Prevzaté z [1] a upravené)

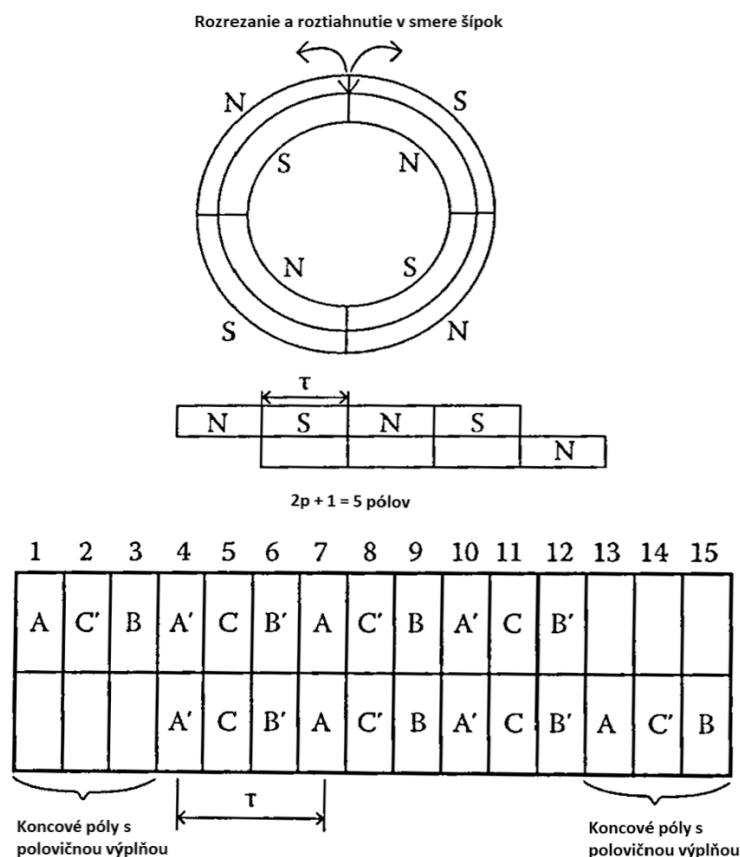
Lineárny asynchrónny motor narozdiel od točivého motoru má konečnú dĺžku primára a sekundára. V okolí primára je vytvorená otvorená magnetická slučka.

Keby bolo teda vinutie lineárneho motoru rozložené rovnomerne, na koncoch primára by sa vytváral magnetický tok odlišnej veľkosti ako v strede.

Z toho dôvodu sa pre lineárne indukčné motory upravuje vinutie tak, aby bol tento jav v čo najväčšej miere eliminovaný.

Pre vinutie sa používajú dve metódy. Jednovrstvé vinutie sa využíva na párny počet pólů $2p$ (Obr. 4.1) a dvojvrstvé vinutie s polovičnou výplňou koncových drážok (Obr. 4.2) sa využíva na nepárny počet pólů $2p + 1$. Na špeciálne aplikácie sa vyrábajú trojvrstvé vinutia alebo vinutia s otvorenými koncovými pólmi, ale my sa nimi ďalej nebudeme zaoberať.

³väčšinou sa využíva trojfázové vinutie



Obr. 4.2: Typické dvojrstvové vinutie s polovičnou výplňou koncových pól. (Prevzaté z [1] a upravené)

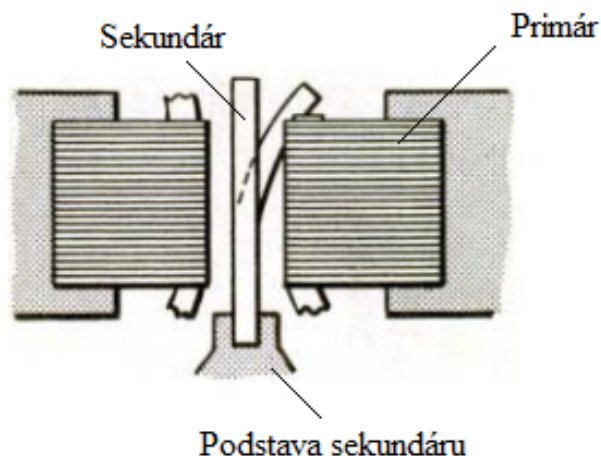
4.2.2 Sekundár

Sekundár podobne ako primár, má konštrukčné odlišnosti medzi SLIM a DLIM.

Dvojstranný lineárny indukčný motor je tvorený jedným kusom vodivého plechu, ktorý je upevnený tak, aby prechádzal stredom primára a tvoril z obidvoch strán rovnomernú vzduchovú medzeru. Tento typ lineárneho motoru sa používal v počiatočných zavádzaniach lineárnych motorov do praxe, ale mal konštrukčné nedokonalosti, ktoré spôsobovali komplikácie pri jeho prevádzke. Hlavné problémy boli spojené práve s nízkonákladovou traťou. V zásade sa jednalo o dva druhy problémov, ktoré spôsobili, že sa DLIM neosvedčili vo vysokorýchlostných aplikáciách.

Prvým problémom bola správna poloha trate voči primáru. Prírodzene stavba dlhej trate je spojená s malými nepresnosťami a nerovnosťami. Pre dosiahnutie presnej polohy primára, tak aby bola medzi primárom a sekundárom relatívne malá vzduchová medzera (10-15 mm), museli byť podniknuté zložité opatrenia. Predpokladom bolo, že tieto vlaky budú dosahovať maximálnu rýchlosť 400 km/h, kde aj malá nerovnosť trate môže spôsobiť poškodenie alebo haváriu vlaku. Muselo sa teda počítať s veľkými otrasmi ale aj odstredivými silami. Okrem toho je potrebné, aby dráha sekundáru mala dostatočnú výšku (vlak je v priehlbine \cup) a zároveň aby bol primár v dostatočnej výške nad dráhou (vlak je v sedle kopca \cap).

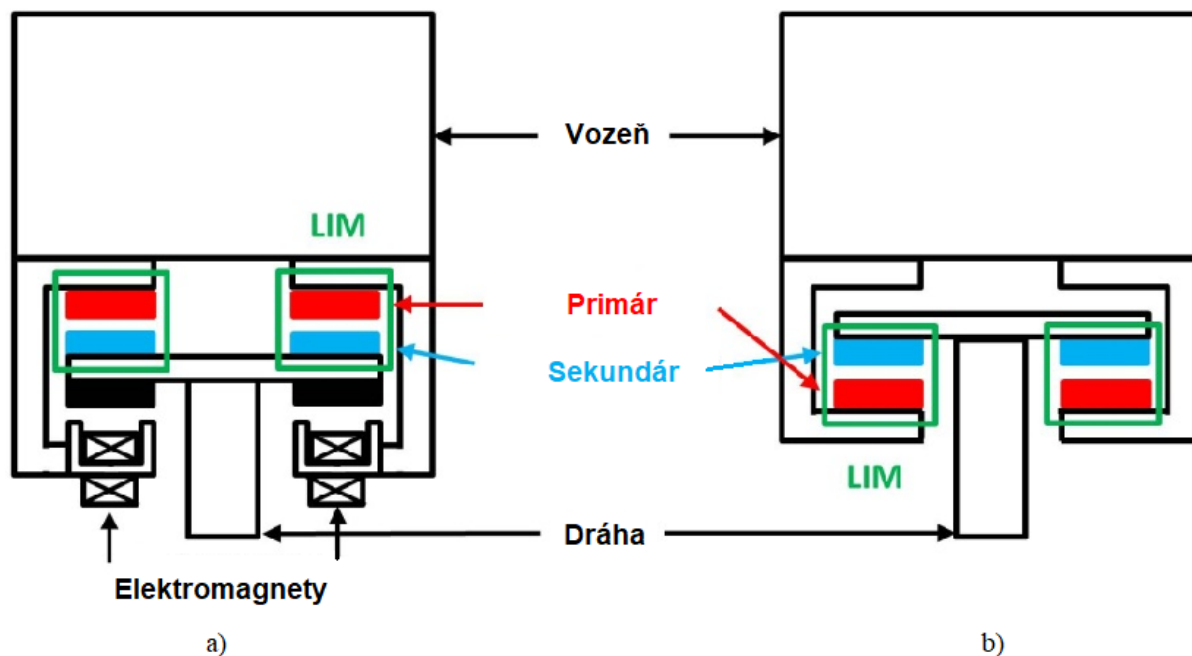
Ďalším problémom bol samotný materiál. Hliník narozdiel od oceli nemá takú pevnosť a stálosť a jeho zváranie je náročnou záležitosťou aj v dnešnej dobe. Riziko spočíva hlavne v tom, že zvar vplyvom zmeny teploty praskne, a následne sa vyhne do strany, čím môže vážne poškodiť trať, ale aj vozidlo s celým svojim nákladom a spôsobiť tak haváriu (viď Obr. 4.3).



Obr. 4.3: Rozpojený a zahnutý zvar hliníkového sekundára na DLIM. (Prevzaté z [4] a upravené)

Jednostranný lineárny indukčný motor tieto problémy odstraňuje za cenu vyššej nákupnej ceny trate. Jednou z výhod tohoto usporiadania je, že okrem pohybovej zložky sily sa objavuje aj zložka normálová, ktorá v závislosti na sklze môže byť príťažlivá alebo odpudivá. Na základe toho, či pohon pracuje v oblasti príťažlivej alebo odpudivej sily, sa volí poloha primára nad alebo pod sekundárom (viď Obr. 4.4).

Normálová zložka v niektorých prípadoch (kietkového tvaru sekundáru) môže dosahovať až šesťnásobne väčšiu hodnotu ako pohybová zložka. Pri správnom návrhu konštrukcie pohonu môže zariadenie niesť väčšinu alebo aj celú hmotnosť vozidla s nákladom. Zvyšok hmotnosti nákladu nesú buď značne odľahčené kolesové ložiská, alebo je konštrukcia doplnená elektromagnetickým levitačným obvodom.



Obr. 4.4: Varianty konštrukcie trate a) odpudivá, b) príťažlivá sila. (Prevzaté z [17] a upravené)

Pre konštrukciu sekundáru jednostranného motoru sa používa plech z vodivého materiálu, v kombinácii s oceľovou konštrukciou. V zásade sa používajú tri typy sekundáru. Hliníkový plát nalisovaný na plný oceľový blok je základná varianta prevedenia.

Na dlhšie trate sa namiesto jedného ocelového bloku začali používať 3-4 vrstvy menších ocelových blokov naskladaných vedľa seba, čím sa zníži cena trate vďaka menšej náročnosti na výrobu aj prepravu takýchto blokov. Zníži sa aj konduktivita ocele a spolu s ňou sa zvýši hĺbka prieniku striedavého poľa, čo má za následok lepšie magnetické vlastnosti (viď kap 5.2.1).

Posledný typ sekundáru je klieťkový tvar. Skladá sa z hliníkového plechu v tvare rebríku s otvormi vyplnenými ocelovou konštrukciou. Tento typ umožňuje zmenšiť vzduchovú medzeru a zvyšuje podiel normálovej sily na viac ako dvojnásobok oproti základnému prevedeniu. Preto sa tento typ používa v aplikáciách s magnetickou levitáciou.

4.2.3 Vzduchová medzera

Vzduchová medzera charakterizuje mechanické a magnetické vlastnosti motoru a je dôležitým faktorom pri návrhu motoru. Pri lineárnych indukčných motoroch uvažujeme dva odlišné pojmy pre vzduchovú medzeru. Vzduchová medzera g , s akou sa stretávame pri ostatných typoch motorov, predstavuje vzdialenosť medzi primárom a sekundárom.

Magnetická vzduchová medzera g_m predstavuje veľkosť vzduchovej medzery g zväčšenú o hrúbku hliníkového plechu h_{Al} . Je dôležitým prvkom pri výpočte kvalitatívneho faktoru (viď 5.3.2). Táto vzdialenosť ovplyvňuje veľkosť magnetických strát a teda aj veľkosť účinníku.

Vypočíta sa ako:

$$g_m = K \cdot g + h_{Al} \quad (4.1)$$

kde K je konštanta, pre SLIM $K = 1$ a pre DLIM $K = 2$.

Vedľajším účinkom indukcie prúdov v hliníkovom pláte je tzv. decentralizačná zložka sily v osy z . Dochádza k tomu pri vyosení primára z dráhy (nad jednou polovicou sekundáru sa nachádza väčšia plocha primára ako nad druhou). Výsledná sila je väčšia na strane s väčšou aktívnou plochou primára a tým pádom spôsobuje ďalšie vychýľovanie. Preto sa táto sila nazýva **decentralizačná**.

Oproti tejto sile pôsobí sila centralizačná, ktorá vzniká v magnetickom obvode ocelového plátu. Táto sila pôsobí v takom smere, aby sa magnetický tok uzatváral čo najkratšou dráhou. Takáto vzájomná poloha primára a zadného ocelového plátu je dosiahnutá, keď je plocha primára rovnobežná s plochou zadného ocelového plátu. Z toho dôvodu sa nazýva silou **centralizačnou**.

Preto je primár a zadný ocelový plát približne rovnakej šírky.

Veľkosť vzduchovej medzery na základe aplikácie

Pomalobežné aplikácie vyžadujú malú vzduchovú medzeru približne 1 mm. Pre dosiahnutie požadovaných vlastností, pri tak malej vzduchovej medzere, sa používa klieťkový typ sekundáru. V priemysle sa využívajú ako pohyblivé strojárenské stoly. Ako pomalobežné motory pracujú väčšinou tubulárne lineárne indukčné motory.

Dopravné prostriedky s maximálnou rýchlosťou do 10 m/s pracujú so vzduchovou medzerou 6-8 mm. Stroje pracujúce v takýchto rýchlostiach predstavujú napríklad mestskú hromadnú dopravu alebo vyhlídkové vlaky.

Vysokorýchlostné vozidlá nad 20 m/s používajú vzduchovú medzeru šírky viac ako 10 mm. Ako bolo uvedené v kap. 4.2.2, DLIM nie sú vhodné pre vysokorýchlostné aplikácie, a preto sa pre konštrukciu vlakov ako MAGLEV a Transrapid používajú SLIM.

Veľkosť vzduchovej medzery na základe prevedenia sekundáru

Základný typ z hliníkového plátu a oceľových blokov má veľkosť magnetickej vzduchovej medzery 16-18 mm. Klietkový typ sekundáru umožňuje znížiť magnetickú vzduchovú medzeru na 10-12 mm. Dvojstranný LIM má veľkosť magnetickej vzduchovej medzery dvojnásobnú oproti SLIM až 26-40 mm, čo sa prejaví na účinnosti ($\eta < 0,4$).

4.3 Konštrukcia tubulárnych LIM

Konštrukcia tubulárnych LIM narozdiel od plochých LIM sa používa iba v jednom prevedení. Sekundár je tvorený hriadeľov, na ktorú je upevnená oceľová konštrukcia z oceľových prstencov. Tie tvoria magnetický obvod motoru. Šírka prstencov sa strieda a vytvára tak drážky do ktorých sú upevnené hliníkové alebo medené prstence. Vodivé prstene tvoria elektrický obvod, v ktorom sa indukuje napätie. Pre ďalší výklad nie sú dôležité, preto sa nimi nebudeme v tejto kapitole ďalej zaoberať.

5 Princíp činnosti LIM

Lineárne indukčné motory pracujú podobne ako ich točivé náprotivky, na princípe indukcie magnetomotorického napätia v sekundári a pohybujú sa sklzovou rýchlosťou. V predchádzajúcich kapitolách boli popísané vlastnosti jednotlivých konštrukčných usporiadaní, ale nebol vysvetlený princíp. V tejto kapitole podrobnejšie objasníme princíp činnosti lineárnych indukčných motorov.

V magnetickom obvode LIM, ktorý je tvorený magnetickým obvodom primáru (konštrukcia zo skladaných plechov z mäkkého magnetického materiálu), magnetickou vzduchovou medzerou (vzduchová medzera zväčšená o hrúbku vodivého materiálu) a v prípade jednostranných LIM plným oceľovým blokom.

Vinutím primáru preteká striedavý prúd v ose z , ktorý vytvára pulzujúce elektromagnetické pole v smere pohybu (v ose x). Zmenou magnetického toku sa podľa Faradayovho zákona o magnetickej indukcii v sekundári indukuje elektromotorické napätie, ktoré vytvára silu pôsobiacu proti zmene magnetického toku. Pre určenie sily vyvolanej týmto poľom si musíme definovať niekoľko pojmov.

Predpokladáme, že vinutím preteká symetrický prúd.

Vzhľadom na frekvenciu napájania primáru vieme určiť synchrónnu rýchlosť v_s :

$$v_s = 2 \cdot \tau \cdot f_1 \quad (5.1)$$

kde τ je pólový rozostup, ktorý sa meria od stredu jedného pólu po stred druhého, a f_1 je frekvencia napájania primáru.

Podobne ako točivé asynchrónne motory, tak aj LIM pracujú pri sklze. Narozdiel od točivých asynchrónnych motorov, LIM potrebujú na vytvorenie dostatočnej hustoty toku vyšší prúd, takže pracujú pri o niečo vyššom sklze ($s \approx 5 - 10\%$), pričom vyvinú silu $1-2 \text{ N/cm}^2$. Sklz pre LIM je definovaný ako:

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} = 1 - \frac{v}{v_s} \quad (5.2)$$

kde v je vzájomná polohová rýchlosť primáru k sekundáru v smere osy x .

V závislosti na sklze platí:

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (5.3)$$

kde f_2 je frekvencia prúdu (nakrátko) sekundáru vybudeneho magnetickým poľom.

Magnetomotorickú silu primáru môžeme popísať všeobecnou vlnovou rovnicou:

$$\theta(x, t) = \theta_m \cdot \cos\left(\omega_1 \cdot t - \frac{\pi}{\tau} x\right), \text{ pre } 0 < x < 2p\tau \quad (5.4)$$

$$\theta(x, t) = 0; \text{ pre } 0 < x, x > 2p\tau \quad (5.5)$$

Pre jednostranné LIM platí:

$$F_m = \frac{3\sqrt{2} \cdot W_1 \cdot I_1 \cdot k_{\omega 1}}{\pi p} \quad (5.6)$$

kde $\omega_1 = 2\pi f_1$ je uhlová frekvencia primáru,

τ je pólový krok, W_1 je počet závitov na jeden pól jednej fázy,

I_1 je efektívna hodnota prúdu,
 p je počet polpárov.

Sila, ktorá vznikne má dve zložky. Hnacia sila je vyvíjaná v smere pohybu v ose x a normálová sila $F_y = F_n$, ktorá túto zložku oslabuje, ale prispieva pri magnetickej levitácii, čo sa využíva pri vysokorýchlostných jednostranných LIM ako už bolo spomenuté v kap. 4.2.2.

Okamžitá hodnota vybudenej sily je:

$$F(x, t) = F_m \cdot e^{s\omega t - \frac{\pi}{\tau}x} = F_x + j \cdot F_y \tag{5.7}$$

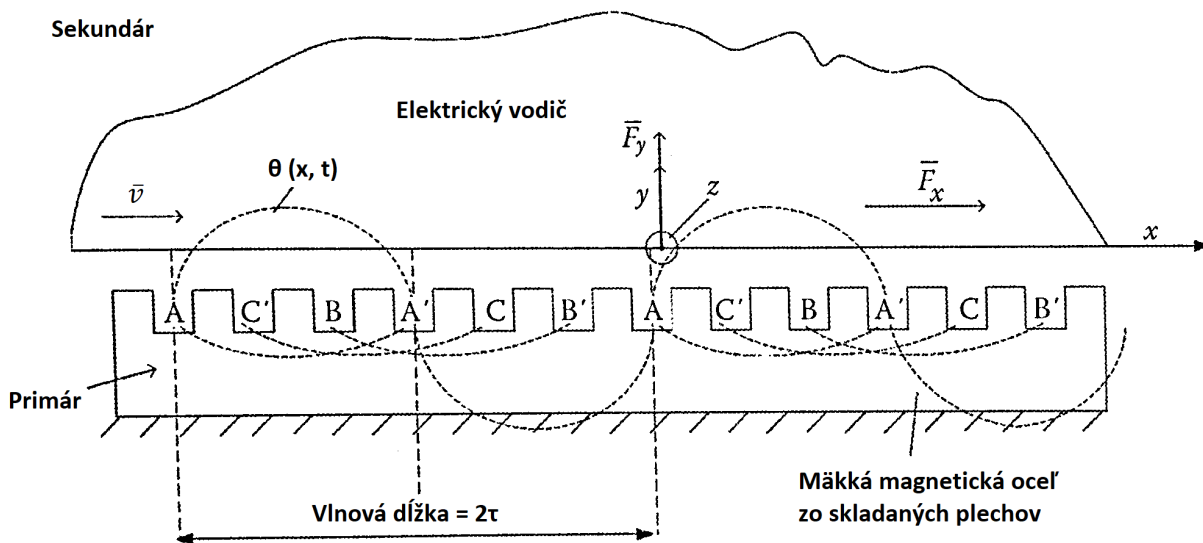
Po odvodení, dostaneme jednotlivé zložky sily pre jednu vlnovú dĺžku:

$$F_{x(2\tau)} = \mu_0 \cdot \frac{l \cdot F_{xm}^2}{4} \cdot \left(\frac{s'}{\sqrt{1 + s'^2}} \right) \tag{5.8}$$

$$F_{y(2\tau)} = -\mu_0 \cdot \frac{l \cdot F_{xm}^2}{4} \cdot \left(\frac{\sqrt{1 + s'^2} - 1}{\sqrt{1 + s'^2}} \right); s' = \mu_0 \cdot \sigma \cdot s \cdot \omega_1 \cdot \frac{\tau^2}{\pi^2} \tag{5.9}$$

kde permeabilita vákua je $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m,
 l je šírka primáru v osy z ,
 σ (S/m) je konduktivita vodiča,
 a F_m je maximálna veľkosť sily.

Celá situácia je znázornená na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Rozloženie síl v LIM. (Prevzaté z [1] a upravené)

5.1 Sklz LIM

Z uvedených rovníc 5.8 a 5.9 môžeme vidieť, že zmenou napájacej frekvencie vieme meniť veľkosť hnacej sily a tým rýchlosťou akou sa stroj pohybuje. V závislosti na tom sa mení synchronná rýchlosť v_s a teda aj sklz.

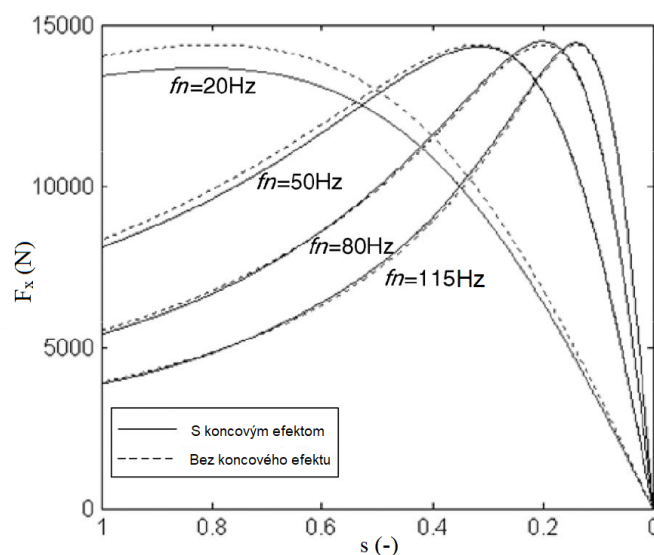
Pokiaľ je sklz $s > 0$ stroj pracuje v motorickom režime, $v < v_s$ a $f_x > 0$. LIM v motorickom režime pracujú pri sklze $s \approx 0,05 - 0,1$.

Ak motor zvýši svoju rýchlosť nad synchronnú alebo znížením frekvencie dosiahneme, že $v > v_s$ potom stroj prejde do generátorového režimu, čím začne spomaľovať (rekuperačné brzdenie).

Zmenou polarít napájania, sa zmení aj smer sily $F_x < 0$ ktorá má smer opačný voči smeru pohybu a motor brzdí. Sklz je pri tomto brzdení $s > 1$. Bežne sa tento spôsob používa pri brzdení.

Z rovnice 5.2 očakávame, že pokiaľ sa motor pohybuje synchronnou rýchlosťou, $s = 0$ a $s' = 0$, čo po dosadení do rovníc 5.8 a 5.9 vyplýva, že nevzniká hnacia ani levitačná sila. V skutočnosti sú primár aj sekundár konečnej dĺžky a prejavuje sa statický aj dynamický koncový efekt (viď kap. 5.3), ktorý môže mať propulzívny alebo brzdný charakter.

Obdobou momentovej charakteristiky točivých strojov je závislosť sily na rýchlosti, resp. sily na sklze. Na obrázku 5.2 je naznačená táto charakteristika pre rôzne frekvencie napájania, s uvažovaním koncového efektu a bez neho. Môžeme vidieť, že typické charakteristiky majú rovnaký tvar ako točivé asynchrónne motory.



Obr. 5.2: Závislosť výslednej hnacej sily F_x na sklze s . (Prevzaté z [1] a upravené)

Zmenou polohy primára pri synchronnej rýchlosti sa mení poloha aktívnej plochy sekundáru a na vstupe a výstupe do tejto zóny vzniká zmena magnetického toku. To vyvolá tvorbu prúdov, ktoré sa od koncov aktívnej plochy smerom do jej stredu znižujú. Prúdy vytvorené v dôsledku konečnej dĺžky motoru všeobecne znižujú silu F_x , účinnosť motoru aj jeho účinník. Tento efekt sa nazýva pozdĺžny dynamický koncový efekt (viď kap. 5.3.3).

5.2 Ekvivalentné veličiny

V doterajšom texte sme sa zaoberali veličinami, ktoré vznikajú za ideálnych podmienok. V tejto kapitole si preberieme dôsledky hlavných vedľajších účinkov na funkciu reálneho LIM, ktoré vznikajú na základe konečnej dĺžky lineárneho motoru. S niektorými týmito účinkami sa môžeme stretnúť aj pri točivých strojoch alebo transformátoroch.

Ako bolo naznačené na začiatku kapitoly 5, funkcia lineárneho motoru sa dá popísať elektrickými a magnetickými veličinami. Pre magnetický obvod bude charakteristická ekvivalentná magnetická vzduchová medzera g_e a pre elektrický bude podstatná ekvivalentná konduktivita sekundáru (hliníkového plátu) σ_e .

Prívlastok ekvivalentná vystihuje to, že táto veličina zahŕňa vplyv skin-efektu, edge-efektu, drážkovania primára a tlmenia toku vzduchovej medzery. V nasledujúcich podkapitolách budú jednotlivé vplyvy stručne vysvetlené.

5.2.1 Skin efekt

Vo všeobecnosti je hrúbka vodivého materiálu (v tomto prípade hliníkového plechu sekundáru) relatívne malá, za účelom čo najviac znížiť náklady na dlhú dráhu sekundáru. Hrúbka vodiča h_{Al} sa pohybuje okolo 6 - 8 mm.

Vplyvom striedavého elektromagnetického poľa sa hustota prúdu zvyšuje smerom k povrchu vodiča. Tento vplyv sa dá charakterizovať pomocou koeficientu skin-efektu.

Ekvivalentnú konduktivitu σ_{eq} , ktorá rešpektuje vplyv skin-efektu môžeme vypočítať podľa rovnice 5.10. Z nej vidíme, že koeficient skin-efektu k_{skin} znižuje konduktivitu vodiča σ_{Al} :

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_{Al}}{k_{skin}} \quad (5.10)$$

Pre výpočet koeficientu skin-efektu potrebujeme poznať hĺbku prieniku striedavého poľa δ_{Al} , ktorú vypočítame pomocou nasledujúcej rovnice:

$$\delta_{Al} = \text{Re} \left(\frac{1}{\sqrt{(\pi/\tau)^2 + j \cdot s \cdot f_1 \cdot 2\pi \cdot \mu_0 \cdot \sigma_{Al}}} \right) \quad (5.11)$$

kde permeabilita vákua $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

$$k_{skin} = \xi \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)} \quad (5.12)$$

$$\xi = \frac{h_{Al}}{\delta_{Al}} \quad (5.13)$$

Hrúbka vodiča h_{Al} pre DLIM sa v rovnici 5.13 nahrádza $\frac{h_{Al}}{2}$ pretože magnetický pole preniká vodičom z dvoch strán.

Hĺbka prieniku hrá rolu aj v magnetickom obvode, konkrétne v pevnom oceľovom jadre sekundáru jednostranného LIM. Súvisí so špičkovou hodnotou magnetickej indukcie B_{gl} . Nasledujúce rovnice 5.14 a 5.15 charakterizujú ich vzájomný vzťah:

$$\delta_{ocel} = \operatorname{Re} \left(\frac{1}{\sqrt{(\pi/\tau)^2 + j \cdot s \cdot f_1 \cdot 2\pi \cdot \mu(B_{ocel}) \cdot \sigma_{ocel}}} \right) \quad (5.14)$$

kde $B_{t \max} \approx 2 T$ predstavuje tangenciálnu zložku magnetickej indukcie na povrchu pevného oceľového jadra.

Platí pre ňu:

$$B_{t \max} \cdot \delta_{ocel} (1 - e^{-1}) \approx B_{gl} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \tau \quad (5.15)$$

Po dosadení reálnych hodnôt $S \cdot f_1 = 10 \text{ Hz}$, $\tau = 0,15 \text{ m}$, $\sigma_{ocel} = 3,5 \cdot 10^6 (\Omega m)^{-1}$, $\mu_{ocel} = 60 \cdot \mu_0$ (pri $B_{t \max} \approx 2 \text{ T}$ a $H_{ocel} = 26,54 \text{ A/m}$) (z [1], str. 62) je hĺbka prieniku $\delta_{ocel} = 11 \text{ mm}$ a špičková hodnota magnetickej indukcie je iba $B_{gl} = 0,209 \text{ T}$.

Rozdelením oceľového bloku na 3-4 časti zmenšíme konduktivitú oceľového bloku a zvýšime tak hĺbku prieniku na približne $\delta_{ocel} = 20 \text{ mm}$. To sa prejaví na zvýšení špičkovej hodnoty magnetickej indukcie $B_{gl} \approx 0,4 \text{ T}$.

5.2.2 Edge-efekt

Koeficient edge-efektu závisí na na geometrickom rozložení stroja. Prejavuje sa nerovnomerným rozložením magnetickeho toku vo vzduchovej medzere v ose z , teda nerovnomerným rozložením hnacej a normálovej sily. Vypočítame ho ako:

$$k_{edge} = \frac{1 + \tanh\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot a_e\right) \tanh\frac{\pi}{\tau} (c - a_e)}{1 - \frac{\tanh\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot a_e\right)}{\frac{\pi}{\tau} \cdot a_e}} \quad (5.16)$$

kde a_e je polovica šírky primára a c je polovica šírky hliníkového plátu v ose z .

5.2.3 Drážkovanie primára

Vplyv drážkovania je definovaný tzv. Carterovým koeficientom a má vplyv na veľkosť magnetickej vzduchovej medzery. Môže sa vypočítať ako:

$$k_c = 1 + \frac{\tau_s}{2\pi g_m} ((1 + \alpha) \cdot \log(1 + \alpha) + (1 - \alpha) \cdot \log(1 - \alpha)) \quad (5.17)$$

$$\alpha = \frac{b_s}{\tau_s} \quad (5.18)$$

kde τ_s je krok drážkovania a b_s je hĺbka otvoru drážok.

5.2.4 Okrajové pole magnetického toku

Vzniká v dôsledku prítomnosti vzduchovej medzery v magnetickom obvode. Prejavuje sa rozdielnou hustotou spriahnutého magnetického toku vo vzduchovej medzere oproti hustote toku v ocelevej konštrukcii a rôznou dĺžkou siločiar.

Vplýva na veľkosť magnetickej vzduchovej medzery a jeho konštanta sa vypočíta ako:

$$k_{\text{tok}} = \frac{\sinh\left(\frac{\pi}{\tau}\right)}{\frac{\pi}{\tau}} \quad (5.19)$$

5.2.5 Dôsledok

Vplyv jednotlivých efektov vyjadrených pomocou koeficientov, ako sme uviedli v kap. 5.2.1 - 5.2.4 sa nám prejaví na pomyselnom zväčšení magnetickej vzduchovej medzery a znížení konduktivity. Stroj tak bude musieť vynaložiť viac energie, aby dosiahol rovnaký požadovaný účinok.

Pre ekvivalentnú magneticú vzduchovú medzeru g_e a ekvivalentnú konduktivitu σ_e platí:

$$g_e = k_{\text{tok}} \cdot k_c \cdot (g + h_{A1}) = k_{\text{tok}} \cdot k_c \cdot g_m \quad (5.20)$$

$$\sigma_e = \frac{\sigma_{Al}}{k_{\text{skin}} \cdot k_{\text{edge}}} \quad (5.21)$$

kde k_{skin} a $k_{\text{edge}} \geq 1$.

Z rovníc 5.20 a 5.21 môžeme vidieť, že vplyv drážkovania primáru a tlmeného magnetického toku zväčšuje ekvivalentnú magneticú vzduchovú medzeru g_e a vplyv skin-efektu a edge-efektu znižuje konduktivitu.

5.3 Koncový efekt

V spojitosti s lineárnymi indukčnými motormi sa stretávame s tzv. koncovým efektom, z angličtiny „**end-effect**“. Koncový efekt je jav, ktorý vzniká z dôvodu konečnej dĺžky lineárneho motoru. Jeho dôsledkom je demagnetizácia stroja, čo sa prejaví na znížení účinníku, účinnosti a vzniku asymetrie napájacieho systému.

Rozlišujeme dva druhy koncového efektu: **statický** a **dynamický**. V dnešnej dobe existujú viaceré teórie vzniku a dôsledkov tohoto javu, ktoré sa líšia v množstve uvažovaných rušivých vplyvov. V nasledujúcich kapitolách si koncový efekt bližšie popíšeme.

5.3.1 Statický koncový efekt

Pre riadenie pohybu LIM sa najčastejšie používajú frekvenčné meniče, ktoré zabezpečujú plynulý chod motoru. Z kapitoly 4.2.1 vieme, že kvôli konečnej dĺžke LIM sú vytvorené opatrenia, ktoré súvisia s úpravou vinutia.

Na obrázku 4.1 a 4.2 si môžeme všimnúť, že jedna fáza C má zmenenú polaritu oproti ostatným. Zmenou polaritu jednej fázy sa mení vzájomná indukčnosť fráz a spolu s ňou aj ich celková indukčnosť, čo má za následok nesymetrické napájanie.

Z časti sa tento problém dá zmenšiť použitím riadeného zdroja prúdu s PWM, ale aj napriek tomu mierna asymetria pretrváva. Tento jav sa nazýva **statický koncový efekt**, pretože vzniká aj pri nepohybujúcich sa LIM a nie je možné ho úplne odstrániť.

5.3.2 Goodness faktor

Kvalitatívny faktor, z angličtiny „goodness faktor“, je jedna z kľúčových veličín, ktoré charakterizujú výkon LIM podobne ako počet polpárov, sklz, frekvencia napájania, atď.

Bol odvodený prof. E. Laithwaitom a stal sa dôležitou veličinou pri zisťovaní, či je nutné uvažovať vplyv dynamického koncového efektu (viď kap. 5.3.3).

Ekvivalentný kvalitatívny faktor G_e , s použitím ekvivalentných veličín z kap. 5.2.5, môžeme vypočítať ako:

$$G_e = \frac{\mu_0 \cdot \tau^2 \cdot \omega_1}{\pi^2} \cdot \frac{h_{A1}}{g_e} \cdot \sigma_e ; \omega_1 = 2\pi f_1 \quad (5.22)$$

kde g_e je ekvivalentná vzduchová medzera,

σ_e je ekvivalentná konduktivita vodič,

ω_1 je synchronná frekvencia,

τ je krok drážkovania,

a $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H · m⁻¹) je permeabilita vákuu.

Z rovnice (5.22) môžeme vidieť, že kvalitatívny faktor G_e je závislý na veličinách, ktoré sú dané konštrukčným usporiadaním: τ , g_e , σ_e a predpokladáme, že sú počas prevádzky relatívne konštantné. Podstatným zistením je ale, že zmenou frekvencie, resp. synchronnej rýchlosti, čo je najčastejším spôsobom riadenia lineárnych motorov, sa mení veľkosť kvalitatívneho faktoru.

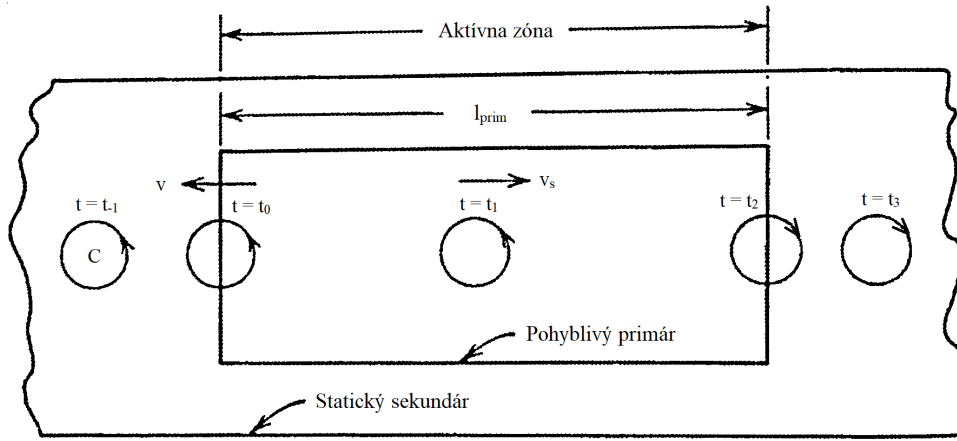
V kapitole 5.3.3 bude tento poznatok podstatný pri delení LIM na rýchlobežné a pomalobežné.

5.3.3 Dynamický koncový efekt

Teórií dynamického koncového efektu je niekoľko. My sa v tejto kapitole pokúsime objasniť tzv. kvázi-jednodimenzionálnu teóriu. Tá sa zakladá na predpoklade, že lineárny motor je napájaný symetrickým prúdom a vytvára tak symetrické elektromagnetické pole.

Uvažujeme pohyblivý krátky primár a dlhú dráhu sekundáru.

Ďalej sa predpokladá, že v sekundári pre polohu $x < 0$, pred príchodom aktívnej plochy primára, je nulový magnetický tok a teda nulové indukované napätie. Primár pracuje v motorickom režime $v < v_s$.



Obr. 5.3: Usporiadanie pre kvázi 1D teóriu koncového efektu. (Prevzaté z [1] a upravené)

Situácia je znázornená na obrázku 5.3. V čase t_{-1} sa v elementárnom bode C nenachádza žiadny magnetický tok, a teda indukované napätie je nulové.

V čase t_0 vstupuje tento bod pod hranu primára, čím nastane prudká zmena magnetického toku, a tým sa v sekundári indukujú vírivé prúdy. Vírivý prúd je opačnej polaroty ako magnetizačný prúd a spôsobuje, že magnetomotorická sila (MMF) vzduchovej medzery, nad elementárnym bodom C, bude v čase t_0 nulová. Následne vírivý prúd exponenciálne zaniká, čím umožňuje exponenciálny nárast MMF. Pre dĺžku života vírivých prúdov môžeme vypočítať časovú konštantu T_2 :

$$T_2 \approx \frac{L_m(g_m)}{R'_2} = \frac{G_e}{\omega_1} \quad (5.23)$$

Z rovnice (5.23) môžeme vyvodit' alternatívny vzťah pre vyjadrenie kvalitatívneho faktoru:

$$G_e = \frac{L_m(g_m)}{R'_2} \cdot \omega_1 \quad (5.24)$$

kde $L_m(g_m)$ je magnetizačná indukčnosť závislá na veľkosti magnetickej vzduchovej medzery a R'_2 je ekvivalentný odpor prepočítaný na primár.

Veličiny sú prepočítané podobným spôsobom ako pre točivé stroje, pričom sa zachovávajú geometrické parametre lineárneho motoru.

Jav koncového efektu môžeme považovať za ukončený pri trojnásobku časovej konštanty $3T_2$.

Ak poznáme parametre stroja, vieme vypočítať dĺžku dráhy, na ktorej budú prúdy vyvolané koncovým efektom vplývať na primár. Kvôli prehľadnosti prepíšeme známe vzťahy:

$$v = 2\tau f_1 (1 - s) = v_s (1 - s) \quad (5.25)$$

Pre dĺžku primára l_{prim} platí:

$$l_{\text{prim}} = 2p\tau \quad (5.26)$$

Pre dĺžku dráhy koncového efektu l_2 platí:

$$l_2 = v \cdot 3T_2 \quad (5.27)$$

Z rovnice 5.27 vidíme, že dĺžka dráhy, na ktorej sa koncový efekt, pri vstupe do aktívnej zóny primára prejaví je závislá na rýchlosti pohybu lineárneho stroja. Čím je táto dráha dlhšia, tým viac koncový efekt ovplyvní funkciu primára a tým väčšie straty spôsobí.

Pri vysokorýchlostných strojoch dochádza k zániku niekedy až za dvojnásobkom dĺžky primára.

Keďže vzniká pri vstupe do aktívnej zóny primára, môžeme ho nazvať **čelný dynamický koncový efekt**.

Po prejazde aktívnej plochy primára ponad bod C, v čase t_2 , vzniká ďalšia zmena hustoty magnetického toku, čím sa opäť indukujú vírivé prúdy s opačnou polaritou ako prúdy na čele primára. Tieto prúdy však spôsobujú len malé sekundárne straty. Tiež dĺžka dráhy l_{exit} je podstatne kratšia, ako pri vstupe do aktívnej plochy. Všeobecne pre jej časovú konštantu platí $3T_{\text{exit}} < T_2$.

Pretože vzniká na konci primára, budeme ho nazývať **chvostový dynamický koncový efekt**.

Časovú konštantu pre chvostový dynamický koncový efekt T_{exit} vypočítame ako:

$$T_{\text{exit}} \approx \frac{L_m \left(\frac{\tau}{\pi} \right)}{R'_2} = \frac{G_{\text{exit}}}{\omega_1} ; g_m = \frac{\tau}{\pi} \quad (5.28)$$

Pokiaľ poznáme časovú konštantu čelného koncového efektu, môžeme zjednodušene písať:

$$T_{\text{exit}} = T_2 \cdot \frac{g_m}{\frac{\tau}{\pi}} \quad (5.29)$$

Veľkosť vzduchovej medzery g_m na konci primára odpovedá priemernej dĺžke magnetickej siločiar, ktorá je približne τ/π .⁴ Dĺžka dráhy zániku vírivého prúdu vyvolaného chvostovým koncovým efektom sa vypočíta rovnako ako v rovnici (5.27).

Pokiaľ je veľkosť chvostového koncového efektu l_{e2} menšia ako 10% dĺžky primára môžeme dynamický koncový efekt zanedbať (rov. 5.46). Táto podmienka rozdeľuje motory na pomalobežné, kedy sa neuvažuje dynamický koncový efekt a na rýchlobežné, kedy je jeho vplyv podstatný.

Podmienka je znázornená nasledujúcou rovnicou:

$$2\tau f_1 \cdot \frac{L_m}{R'_2} = \frac{\tau}{\pi} \cdot G < \frac{l_{\text{prim}}}{10} \quad (5.30)$$

Pre lepšie znázornenie priebehu vzniku a zániku koncového efektu si definujeme pomerný čas x vzťahujúci sa na časovú konštantu T_2 :

⁴pre DLIM je táto veľkosť dvojnásobná

$$x = \frac{t}{T_2} \quad (5.31)$$

$$T_v = \frac{l_{\text{prim}}}{v} \quad (5.32)$$

Priebeh magnetizačného prúdu v pomernom čase I_{me} môžeme potom popísať rovnicou 5.33 a priebeh vírivého prúdu I_{2e} rovnicou 5.34:

$$I_{me} = I_m \cdot (1 - e^{-x}) \quad (5.33)$$

$$I_{2e} = I_m \cdot e^{-x} \quad (5.34)$$

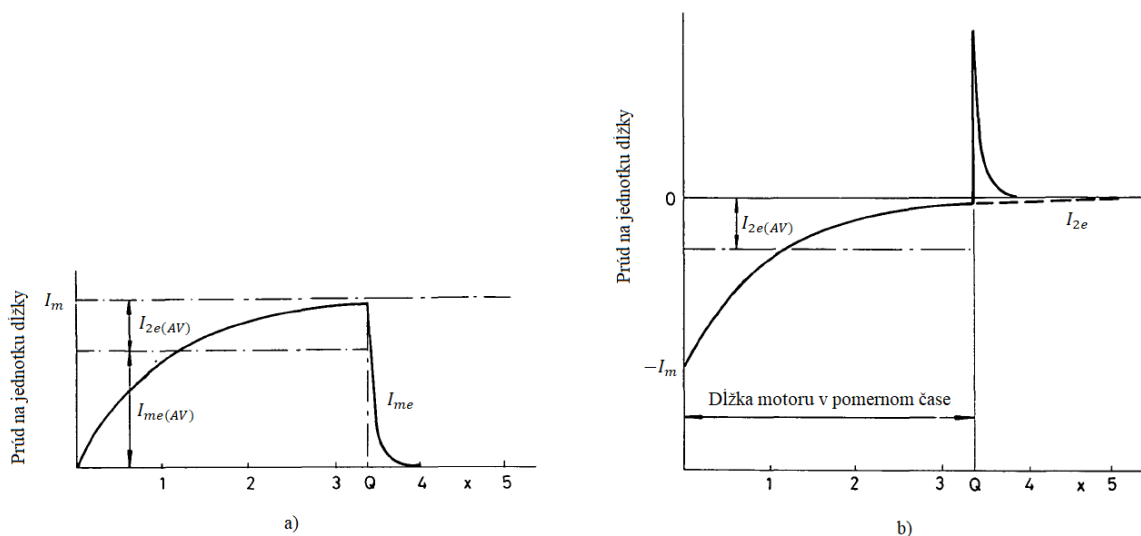
Ak si čas T_v premietneme do pomerného času x , dostaneme tak veličinu, ktorá reprezentuje dĺžku primára v pomerných časových jednotkách Q :

$$Q = \frac{T_v}{T_2} = \frac{l_{\text{prim}}}{v} \cdot \frac{R'_2}{L_m + L'_2} \quad (5.35)$$

kde $L_m(g_m)$ z rovnice 5.23 bolo rozdelené na magnetizačnú indukčnosť L_m a indukčnosť sekundáru prepočítanú na primár L'_2

Z rovnice 5.35 si môžeme všimnúť, že táto bezrozmerná veličina je podobná prevrátenej hodnote kvalitatívneho faktoru G_e z rovnice 5.24. Z rovnice 5.35 je tiež zrejmé, že Q sa mení v závislosti na rýchlosti stroja v , resp. Qv je konštanta, ktorá je závislá na parametroch primáru a sekundáru. Z toho vyplýva, že zvyšovanie rýchlosti má za následok znižovanie Q .

Možné znázornenie dynamického koncového efektu v bode C po prejazde aktívnej plochy primára je znázornené na obrázku 5.4. Pri znižovaní hodnoty Q nastane nárast zmena polarít prúdu pri menšom pomernom čase x .



Obr. 5.4: Vplyv koncového efektu, a) magnetizačný prúd, b) vírivé prúdy vytvorené koncovým efektom. (Prevzaté z [3] a upravené)

5.3.4 Náhradné schéma

Doteraz sme uvažovali vplyv koncového efektu na elementárny bod. Pokiaľ budeme uvažovať všetky elementárne body pod aktívnou plochou primára, vieme odvodiť strednú hodnotu vírivých prúdov $I_{2e(AV)}$, vyvolaných vplyvom čelného koncového efektu. Vplyv chvostového koncového efektu v prípade magnetizačného účinku môžeme považovať za zanedbateľný, keďže pôsobí len na veľmi malú plochu primára. Následne môžeme odvodiť výslednú strednú hodnotu magnetizačného prúdu sekundára $I_{me(AV)}$:

$$I_{2e(AV)} = \frac{I_m}{Q} \int_0^Q e^{-x} dx = I_m \cdot \frac{1 - e^{-Q}}{Q} \quad (5.36)$$

$$I_{me(AV)} = I_m - I_{2e(AV)} = I_m \cdot \left(1 - \frac{1 - e^{-Q}}{Q}\right) \quad (5.37)$$

Z prvej časti rovnice 5.37 vyplýva, že celkový magnetizačný prúd I_m sa delí na dve zložky: efektívnu $I_{me(AV)}$ a stratovú $I_{2e(AV)}$.

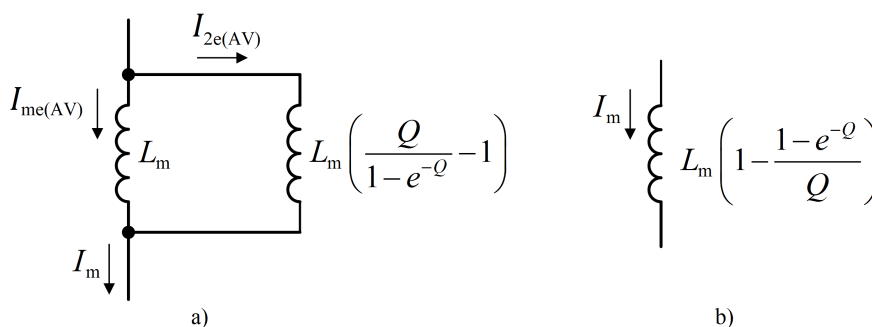
Demagnetizačný prúd $I_{2e(AV)}$ môže byť v náhradnom obvode reprezentovaný zapojením paralelnej indukčnosti L_{2e} k magnetizačnej indukčnosti L_m (viď Obr. 5.5 a)).

Jej veľkosť vypočítame ako:

$$L_{2e} = L_m \cdot \frac{I_{me(AV)}}{I_{2e(AV)}} = L_m \cdot \left(\frac{Q}{1 - e^{-Q}} - 1\right) \quad (5.38)$$

Tento paralelný obvod (Obr. 5.5 b)) sa dá zjednodušiť a môže byť vyjadrený ako:

$$L_m \cdot \left(1 - \frac{1 - e^{-Q}}{Q}\right) \quad (5.39)$$



Obr. 5.5: Náhradné schéma indukčnosti magnetizačného obvodu, a) s paralelnou indukčnosťou, b) zjednodušené.

Vírivé prúdy vytvorené po prechode aktívnej plochy zaniknú vplyvom odporu sekundáru ako Jouleove straty W_J . V tomto prípade je potrebné uvažovať aj vplyv chvostového koncového efektu, ktorý vytvára dodatočné

straty vírivými proudmi.

Na odvození náhradního odporu potřebujeme poznať efektívnu hodnotu prúdu vyvolaného koncovým efektom $I_{2\text{eef}}$:

$$I_{2\text{eef}} = \sqrt{\frac{I_m^2}{Q} \int_0^Q e^{-2x} dx} = I_m \sqrt{\frac{1 - e^{-2Q}}{2Q}} \quad (5.40)$$

Celková stratová energia ΔW_J sa delí na straty, ktoré vzniknú pod aktívnou plochou primáru vo forme vírivých prúdov ΔW_{exit} a na výstupné straty, ktoré zaniknú za aktívnou plochou ΔW_{vir} :

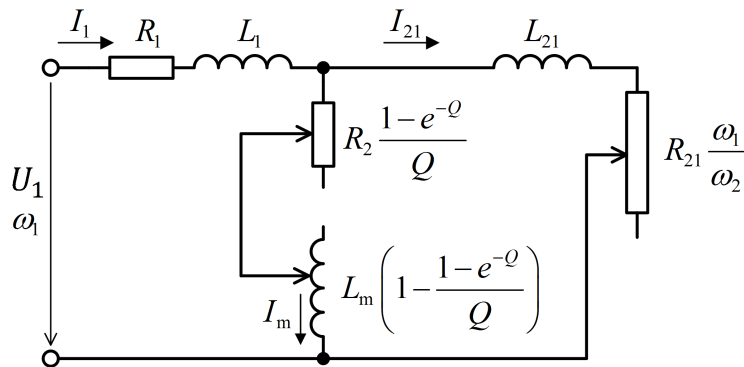
$$\Delta W_{\text{vir}} = I_{2\text{eef}} \cdot R'_2 = I_m^2 \cdot R'_2 \cdot \frac{1 - e^{-2Q}}{2Q} \quad (5.41)$$

$$\Delta W_{\text{exit}} = \frac{L_m + L'_2}{2} \cdot I_m^2 \cdot \frac{(1 - e^{-Q})^2 \cdot v}{D} = I_m^2 \cdot R'_2 \cdot \frac{(1 - e^{-Q})^2}{2Q} \quad (5.42)$$

$$\Delta W_J = \Delta W_{\text{vir}} + \Delta W_{\text{exit}} = I_m^2 \cdot R'_2 \cdot \frac{1 - e^{-Q}}{Q} \quad (5.43)$$

Z rovnice 5.43 sme si odvodili náhradný odpor, ktorým preteká magnetizačný prúd I_m , ktorý bude v náhradnej schéme zapojený do série s náhradnou magnetizačnou indukčnosťou.

Odvodili sme tak náhradné schéma pre magnetizačnú časť obvodu s rešpektovaním koncového efektu. Zvyšok náhradného obvodu je podobný ako pre točivý asynchronný motor (viď Obr. 5.6).



Obr. 5.6: Náhradný obvod lineárneho indukčného motoru s rešpektovaním koncového efektu.

Výsledná sila koncového efektu F_{xe} bude vždy opačného smeru ako smer pohybu primára. Vypočítame ju ako:

$$F_{xe} = \frac{3 \cdot I_m^2 \cdot R'_m \cdot (1 - e^{-Q})}{vQ} \cdot N \quad (5.44)$$

Veľkosť hnacej sily, na základe odvodenej náhradnej schémy, môžeme vypočítat' nasledovne:

$$F_{xh} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot R_2' \cdot \frac{\pi}{\omega_2 \tau} \cdot N \quad (5.45)$$

kde N je počet závitov na fázu.

5.3.5 Kompenzácia

Výslednú silu F_x , ktorá poháňa stroj v smere osy x pri uvažovaní koncového efektu rozdeľujeme na dve zložky: silu hnaciu F_{xh} a koncového efektu F_{xe} :

$$F_x = F_{xh} + F_{xe} \quad (5.46)$$

Ako bolo spomenuté v kap. 4.2.1, na kompenzáciu konečnej dĺžky LIM, a teda aj koncového efektu, sa používajú dva základné typy úpravy vinutia: s polovičnou výplňou koncových drážok (viď Obr. 4.2) a so zámenou jednej fázy (viď Obr. 4.1). Obidve úpravy majú podobné vlastnosti, ale vinutie s polovičnou výplňou má vplyv len pokiaľ je dĺžka dráhy čelného koncového efektu kratšia ako pólóvy krok primára τ .

Pri návrhu stroja sa určuje pomer F_{xh}/F_{xe} . Pri optimálnom návrhu, v ktorom je zahrnutá úprava vinutia $2p$, kvalitatívny faktor G_e a sklz s , tento pomer dosahuje hodnoty približne 0,2-0,6. Výsledný optimálny dizajn však dokáže znížiť vplyv koncového efektu len o 10-25%. Z toho dôvodu sa vyvíjajú ďalšie možnosti kompenzácie.

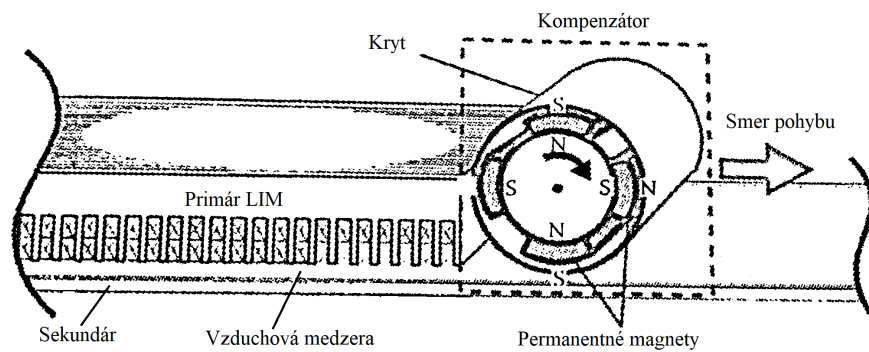
Jednou z dvoch doteraz známych kompenzácií je usporiadanie, v ktorom sa primár v osy x rozdelí na niekoľko samostatných častí, ktorých vinutie je prepojené do série.

Ako bolo spomenuté, vírivé prúdy čelného a chvostového koncového efektu majú opačnú polaritu. Na základe toho sa volí rozostup medzi primármi tak, aby odpovedal dĺžke dráhy chvostového dynamického koncového efektu l_{e2} . Tým sa dosiahne to, že čelný koncový efekt sa čiastočne vyruší.

Návrh je možné dosiahnuť pri známej hodnote menovitého sklzu s_n .

Existujú viaceré druhy kombinácií sledu fáz a pólóvého kroku, ktoré dokážu zredukovať vplyv koncového efektu o približne 10%. Táto kompenzácia je ale spojená so znížením účinníku a má vplyv na normálovú zložku sily, resp. na magnetickú levitáciu.

Druhým spôsobom kompenzácie je upevnenie veľkého kovového valca s permanentnými magnetmi na čelo primára (viď Obr. 5.7). Koleso sa otáča rýchlosťou mierne vyššou ako je rýchlosť pohybu a pólóvy krok je približne rovnaký ako primára. Tento druh kompenzácie má výrazne väčší účinok, ale je problémový, čo sa týka výroby, montáže, hmotnosti, údržby a samozrejme nákupnej ceny.



Obr. 5.7: Valec s permanentnými magnetmi na kompenzáciu koncového efektu. (Prevzaté z [1] a upravené)

6 Záver

Výsledkom tejto bakalárskej práce je náučný text, zameraný na lineárne motory. V jednotlivých kapitolách sme si prebrali problematiku delenia, princípu funkcie a špecifických vlastností lineárnych motorov.

V úvode sme si načrtli históriu lineárnych motorov, stručne sme si popísali stavbu lineárneho motoru a spomenuli sme si najčastejšie spôsoby využitia tohto druhu motorov.

V ďalšej kapitole sme si lineárne motory rozdelili podľa druhu vykonávaného pohybu, podľa fyzikálneho princípu a podľa tvaru. Pri jednotlivých typoch motorov sme si vymenovali charakteristické znaky, výhody ich zapojenia a použitia a typické aplikácie, kde sa používajú.

V tretej kapitole sme sa venovali porovnávaniam vlastností točivých motorov s prevodovkou oproti lineárnym motorom. Zhodnotili sme vlastnosti, v ktorých lineárne motory dominujú a vymenovali ich nedostatky.

V nasledujúcich dvoch kapitolách sme sa zamerali na lineárny indukčný alebo asynchrónny motor (LIM), ktorý v oblasti prepravy osôb a nákladu na dlhé vzdialenosti dominuje najmä vďaka svojej nízkonákladovej dráhe a veľkej normálovej sile, ktorá prispieva k magnetickej levitácii.

Podobne ako v druhej kapitole sme si v prvej z týchto dvoch častí lineárne indukčné motory rozdelili podľa konštrukčných rozdielov a stručne sme tieto typy lineárnych indukčných motorov opísali.

Následne sme sa zamerali na plochý lineárny indukčný motor a popísali sme si jeho hlavné časti.

Popísali sme princíp činnosti lineárneho indukčného motoru spolu s rušivými vplyvmi, ktoré sú spojené s týmto druhom motoru.

V poslednej časti sme sa venovali vzniku a dôsledkom koncového efektu na lineárny indukčný motor a možnostiam jeho kompenzácie.

Činnosť motoru sme popísali matematicky a do popisu sme zahrnuli aj rušivé vplyvy spôsobené koncovým efektom. Na základe toho sme odvodili náhradné schéma lineárneho indukčného motoru s rešpektovaním jeho vplyvu na lineárny indukčný motor.

Literatúra

- [1] Boldea, I. (2013), *Linear Electric Machines, Drivers, and MAGLEVs Handbook*. CRC Press, ISBN: 9781439845141
- [2] Aerotech Inc. (2010), *Linear Motors Application Guide*. [Online]
URL: <https://www.aerotech.com/media/136335/linear-motors-application-en.pdf>
- [3] Duncan, J., *Linear induction motor - equivalent-circuit model*, IEE PROC., Vol. 130, No. 1. január 1983, str. 302 – 308
- [4] Eric Laithwaite (28.6.1973), *Linear motors for high-speed vehicles.*, New Scientist, Vol. 58, No. 852, str. 802 - 805
- [5] Hamzehbahmani, H. (2013), *MODELING AND SIMULATING OF SINGLE SIDE SHORT STATOR LINEAR INDUCTION MOTOR WITH THE END EFFECT*, Journal of ELECTRICAL ENGINEERING, Vol. 62, No. 5, 2011, str. 51 – 57
- [6] Aroundegypt (2011), *Linear Motor and its use in Transportation*. [Online]
URL: <https://mohagami.wordpress.com/2011/08/11/linear-motor-and-its-use-in-transportation-1/>
- [7] Zhang S., Norum L., Nielsen R. (2009), *Analysis of Tubular Linear Permanent Magnet Motor for Drilling Application*. Department of Electric Power Engineering Norwegian University of Science and Technology. [Online]
URL: <http://www.elkraft.ntnu.no/eno/Papers2009/zhang-EPECS.pdf>
- [8] Alternative Machinery Sales,
textitIPG Photonics' LaserCube, 24.4.2017, [Online]
URL: <http://www.amadaonline.com/new-machines/lasers/lasercube-ipg-photonics-lasercube.html>
- [9] Motion Control Tips (2015),
textitMaxon Motors prosthetic leg. [Online]
URL: <https://www.motioncontroltips.com/wp-content/uploads/2015/05/maxon-motors-prosthetic-leg.jpg>
- [10] Physics 212 Webpage Project, *THE TRAIN AND TRACK DESIGN*. 24.4.2017, [Online]
URL: http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2017/Mark_Credito/22296248558fd7e8535875/the-train-and-tracks-design.html
- [11] ZAK KHAN, *FAQ: What's the difference between variable-reluctance linear and hybrid linear steppers?*, 21.7.2015, [Online]
URL: <https://www.motioncontroltips.com/faq-whats-the-difference-between-variable-reluctance-linear-and-hybrid-linear-steppers/>

- [12] Nippon Pulse America, Inc., *Linear Motor Systems*. [Online]
URL: <https://www.nipponpulse.com/articles/view/linear-motor-systems-iron-core-u-channel-and-tubular-linear-motors>
- [13] ASLM, Inc., *LINEAR MOTORS - U-SHAPE*. [Online]
URL: <http://www.aslm.com/LinearMotorsUShape.aspx>
- [14] Design ENGINEERING, *Picking the Right Linear Positioning Device*. 2.8.2016, [Online]
URL: <https://www.design-engineering.com/features/linear-positioning-device/>
- [15] Globalspec, *Linear Actuators Information*. [Online]
URL: https://www.globalspec.com/learnmore/motion_controls/linear_actuators/linear_actuators
- [16] Design ENGINEERING, *Linear Actuators*. 2.8.2016, [Online]
URL: <https://www.design-engineering.com/products/linear-actuators-4/>
- [17] Kotani Y., Morizane T., Tsujikawa K. (2015), *Simultaneous thrust and attractive force control of linear induction motor driven by power source with frequency component synchronous with motor speed*. 2015, pp. 1-10