

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rešerše elektromotorů v trakci

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan SKOUMAL**
Osobní číslo: **E10B0394P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Rešerše elektromotorů v trakci**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Vypracujte rozbor používaných elektromotorů v trakci.


1. Provedte rozbor historického vývoje.
2. Definujte metriku pro porovnávání strojů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

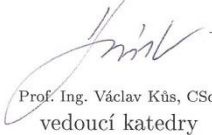
Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Řezáček, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 14. října 2013
Termín odevzdání bakalářské práce: 9. června 2014


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vypracování historie elektrické trakce na železnici, typy používaných motorů a rozbor jejich vlastností. V úvodu je uvedeno rozdělení elektrické trakce z hlediska napájení. V druhé kapitole pak jsou popsány počátky jednotlivých druhů trakcí. Ve třetí je rozbor funkce jednotlivých typů strojů a souhrn jejich vlastností. Poslední kapitola je zaměřena na definování důležitých parametrů pro trakční elektromotor. Je zde také vypsán další předpokládaný vývoj v elektrické trakci na železnici.

Klíčová slova

elektrická trakce, elektromotor, maglev, historie, stejnosměrný proud, střídavý proud, asynchronní, synchronní, lineární motor, momentová charakteristika, princip, rotor, stator, kotva, komutátor

Abstract

This bachelor thesis is concentrate to write out a history of electric railways traction, types of using engines and analysis of their properities. In a preface is written distribution of electric traction according to a power supply. In the second chapter there're described a beginning of types of electric tractions. In the third chapter there's analysis function of individual machines types and a summary of their properities. The last chapter is focused to defining of important parameters for electric traction motor. Also there's written supposed following development in electric traction of railways in the future.

Key words

electric traction, electric motor, maglev, history, direct current, alternating current, asynchronous, synchronous, linear motor, moment characteristic, princip, rotor, stator, anchor, commutator

Prohlášení

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

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

V Plzni dne 4.6.2014

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Řezáčkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval svým rodičům za veškerou podporu, kterou mi během studia dopřáli. Že se mnou měli trpělivost, věřili mi a byli chápaví při všech situacích, které mě během studia potkaly.

Poděkování také patří mé přítelkyni, která se mnou měla trpělivost při psaní této práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 DRUHY ELEKTRICKÉ TRAKCE	11
1.1 NEZÁVISLÁ ELEKTRICKÁ TRAKCE.....	11
1.1.1 Akumulátorová vozba	11
1.1.2 Deselektická vozba	12
1.1.3 Setvačnicková vozba	12
1.2 ZÁVISLÁ ELEKTRICKÁ TRAKCE	12
1.3 MAGLEV	13
2 POČÁTKY ELEKTRICKÉ TRAKCE.....	14
2.1 ELEKTRICKÁ LOKOMOTIVA – NEZÁVISLÁ TRAKCE.....	14
2.2 ELEKTRICKÁ LOKOMOTIVA – ZÁVISLÁ TRAKCE	14
2.3 PRVNÍ PRAVIDELNÝ PROVOZ ELEKTRICKÉ LOKOMOTIVY	15
2.4 LOKOMOTIVY S ASYNCHRONNÍM MOTOREM	15
2.5 LOKOMOTIVY SE SYNCHRONNÍMI MOTORY	17
2.6 BENZÍNOELEKTRICKÁ TRAKCE	18
2.7 DIESELELEKTRICKÁ TRAKCE	18
2.8 POČÁTKY MAGLEVVU – LINEÁRNÍ MOTOR	19
2.9 POČÁTKY ELEKTRICKÉ TRAKCE NA ÚZEMÍ ČR.....	19
3 DRUHY MOTORŮ VYUŽÍVANÝCH V ELEKTRICKÉ TRAKCI.....	21
3.1 STEJNOSMĚRNÉ STROJE	21
3.1.1 Konstrukce	21
3.1.1.1 Komutátor	22
3.1.2 Princip funkce	22
3.1.3 Rozdělení stejnosměrných motorů.....	23
3.1.4 Stejnosměrný motor se sériovým buzením	24
3.1.5 Stejnosměrný motor s cizím buzením	25
3.1.6 Nevýhody stejnosměrného stroje	25
3.2 ASYNCHRONNÍ STROJE.....	26
3.2.1 Konstrukce	26
3.2.2 Princip funkce	27
3.2.3 Druhy klecí asynchronního stroje	28
3.2.3.1 Vírová klec.....	28
3.2.3.2 Dvojitá klec	29
3.2.4 Asynchronní motor v trakci	29
3.2.5 Nevýhody a výhody asynchronního stroje	29
3.3 SYNCHRONNÍ STROJE	30
3.3.1 Konstrukce	30
3.3.1.1 Stroj s vyniklými póly na rotoru	31
3.3.1.2 Stroj s hladkým rotorem.....	32
3.3.2 Princip synchronního stroje	32
3.4 MAGLEV – LINEÁRNÍ MOTOR	33
3.4.1 Princip funkce	33
4 HLAVNÍ PARAMETRY ELEKTRICKÉHO TRAKČNÍHO STROJE PRO ŽELEZNICI.....	34
ZÁVĚR	36
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	37

Seznam symbolů a zkratek

symbol/zkratka	název	jednotky
TM	trakční motor	
DM	dieselový motor	
G	generátor	
U_c	napájecí napětí	V
U_i	indukované napětí	V
U_a	napětí kotvy	V
n	otáčky	ot/min
n_s	synchronní otáčky	ot/min
M	moment	Nm
M_{med}	střední hodnota momentu	Nm
M_m	moment motoru	Nm
M_z	moment zatěžovací	Nm
M_N	jmenovitý moment	Nm
M_S	moment synchronní	Nm
M_R	moment reluktanční	Nm
F	síla	N
B	magnetická indukce	T
I	proud	A
I_b	budící proud	A
l	délka	m
P_m	mechanický výkon	W
P_{el}	elektrický výkon	W
ω	úhlová rychlost	rad/s
ω_s	synchronní úhlová rychlost	rad/s
ω_1	úhlová rychlost statorového pole	rad/s
k	konstanta motoru	-
ϕ	magnetický tok	Wb
f	frekvence	Hz
p	počet pólových dvojic	-
s	skluz	-

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá elektromotory používanými v elektrické trakci. Elektrická trakce je poměrně obsáhlé téma a proto jsem se rozhodl pro zpřehlednění a také po poradě s mým vedoucím práce zaměřit se na trakční motory a jejich historii používání v železniční dopravě.

Bakalářská práce má čtyři hlavní části. V první jsou rozebrány druhy elektrické trakce, které se využívají v železniční dopravě. V druhé se zabývám historií elektromotorů na železnici, konkrétně pak začátky užívání jejich jednotlivých typů. Zde je také zmíněn počátek elektrifikace na území ČR. Další část podrobněji popisuje principy fungování jednotlivých typů elektromotorů, jejich konstrukce a vlastnosti. V poslední části jsou popsány důležité vlastnosti pro trakční elektromotor a předpokládaný směr dalšího vývoje.

1 Druhy elektrické trakce

1.1 Nezávislá elektrická trakce

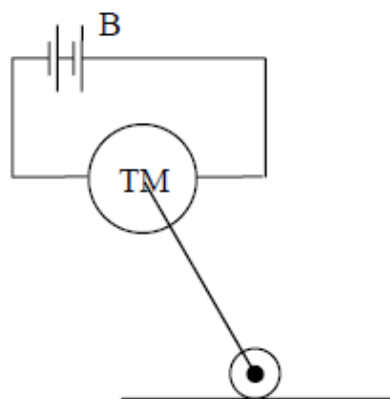
V případě nezávislé trakce není vůz závislý na přívodu elektrické energie z vnějších zdrojů. Zdroj energie je umístěn přímo ve vozidle ve formě baterií nebo generátoru elektrické energie. Výhodou takového řešení jsou menší náklady na infrastrukturu v okolí železnice (troleje, měnírny...).

Druhy nezávislé elektrické trakce:

- benzínoelektrická
- dieselelektrická
- parní – turboelektrická
- akumulátorová
- setrvačnicková

1.1.1 Akumulátorová vozba

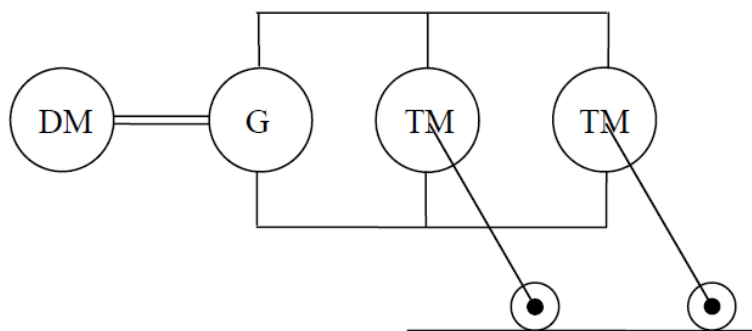
Hnací vozidlo si nese zásobu energie. Proto sice nepotřebuje další infrastrukturu, ale dojezd je značně omezen vahou a kapacitou akumulátorů. Akumulátorová vozidla se však dlouho používala k posunu nebo na krátkých tratích, jako jsou třeba doly.



Obr. 1 Princip akumulátorové vozby [14]

1.1.2 Dieselelektrická vozba

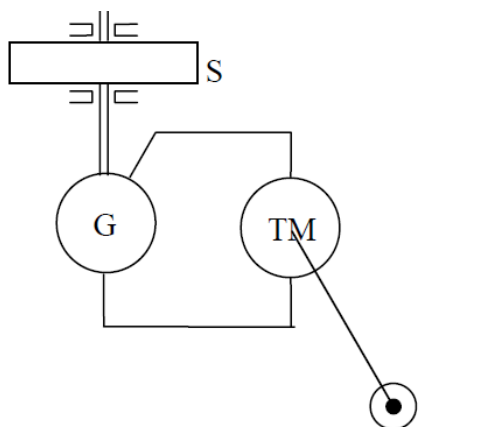
Dieselelektrické lokomotivy se používají zejména v místech, kde není trolejové vedení, pro posunování a pro přepravu osob na vedlejších tratích. Také slouží jako záloha pro hlavní elektrifikované tratě v případě havárií elektrických zařízení. V poslední době je dieselelektrická vozba využívána soukromými dopravci na elektrifikovaných tratích z důvodu malých pořizovacích nákladů lokomotiv a relativně levnému palivu.



Obr. 2 Princip dieselelektrické trakce [14]

1.1.3 Setrvačnicková vozba

Tato vozba využívá nahromaděnou kinetickou energii v roztočeném setrvačnicku o velké hmotnosti. Setrvačnick se v napájecí stanici roztočí elektromotorem. Po odpojení pohání setrvačnick elektrický generátor. Uplatnění nachází zejména v hlubinných dolech a v kyvadlové dopravě (mezi sklady atd.).

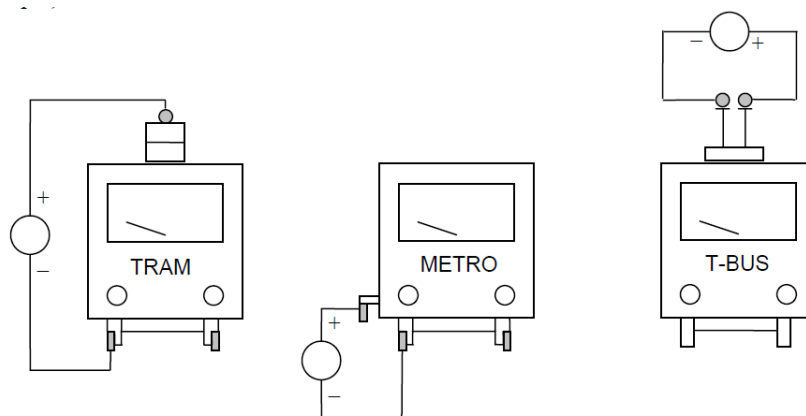


Obr. 3 Princip setrvačnickové vozby [14]

1.2 Závislá elektrická trakce

Proud se přivádí ze stabilního vedení. Vedení může být nadzemní (trolej), pozemní (kolej) nebo podzemní. Vozidlo je plně závislé na vnějším zdroji elektrické energie.

Napájecí napětí může být střídavé nebo stejnosměrné. [11] [12] [13] [14]



Obr. 4 Způsoby napájení závislé trakce [14]

Závislou trakci bychom také mohli rozdělit z hlediska použitého napájecího napětí. Vzhledem k rozdílnému názoru na napájení trolejí se v Evropě ustálila následující napětí:

Stejnosemřné:

- 250 V pro důlní hlubinné dráhy
- 600 V pro městské dráhy
- 750 V pro metro
- 1500 V železnice
- 3000 V železnice

Střídavé:

- 25 kV 16 a 2/3 Hz
- 25 kV 50 Hz

Snížená frekvence 16 a 2/3 Hz se dříve používala z důvodů vysokého opotřebení uhlíků na komutátoru při vyšších frekvencích. [13]

1.3 Maglev

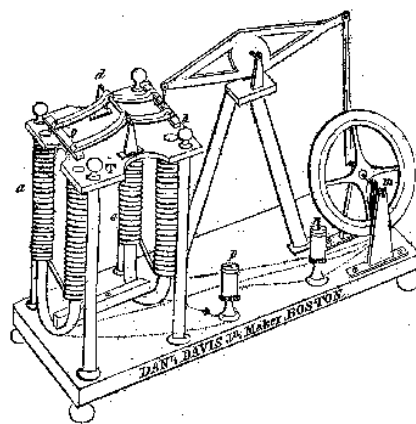
Jedná se o zvláštní druh vlaků, který se působením elektromagnetů vznáší nad speciálními kolejnicemi. O pohyb se potom starají lineární motory umístěné přímo v kolejnicích. Podrobněji je princip fungování těchto vlaků je popsán v kapitole 3.4 .[45]

2 Počátky elektrické trakce

2.1 Elektrická lokomotiva – nezávislá trakce

První elektrická lokomotiva vyrobená Robertem Davidsonem provedla svoji první jízdu v září roku 1842. Jednalo se o stroj poháněný reluktančním elektromotorem s jednoduchým komutátorem o výkonu 0,74 kW, který napájely galvanické články. Lokomotiva vážila 5 tun, byla 4,8 metru dlouhá a během testu dosáhla rychlosti 6,4 km/h.

Další důležitý pokrok v nezávislé železniční trakci proběhl v dubnu roku 1851, kdy Američan Charles Grafton Page provedl jízdu z Washingtonu DC do Baltimoru a zpět s pasažéry. 10 tun vážící lokomotiva byla poháněna dvěma elektromotory, každý o výkonu 15 kW. Motory využívaly síly elektromagnetů, která se poté převedla na rotační pohyb. Energie pro motory byla dodávána z baterií. Lokomotiva dosáhla rychlosti okolo 30 km/h. [1] [2] [3] [10]



Obr. 5. Elektromotor Ch.G.Page [3]

2.2 Elektrická lokomotiva – závislá trakce

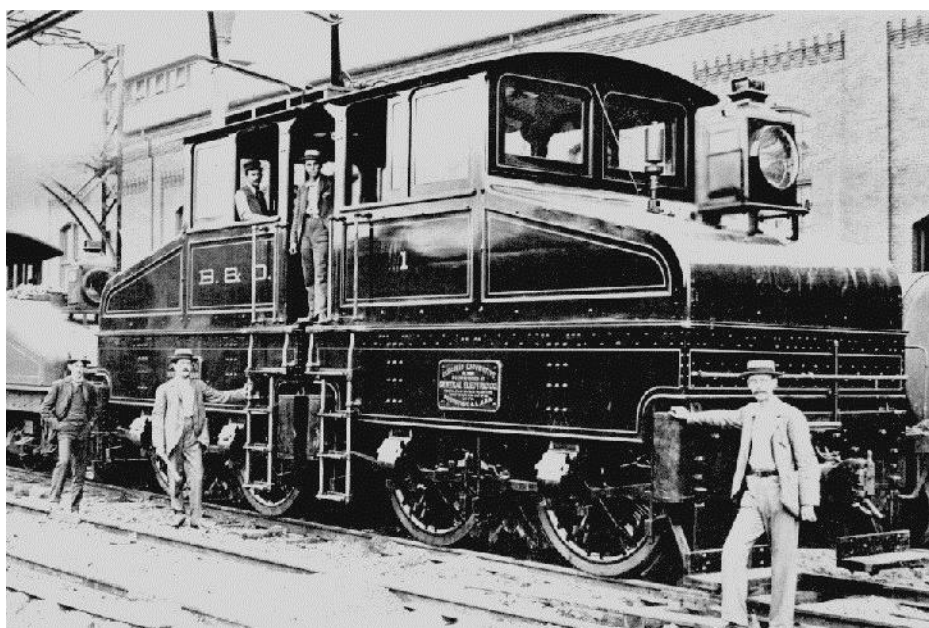
Elektrická lokomotiva napájená přes sběrač byla předvedena veřejnosti Wernerem von Siemensem 31. května 1879 na průmyslové výstavě v Berlíně. Lokomotiva, která byla původně určena důlní železnici, jezdila po 300 metrů dlouhé kruhové dráze a za sebou táhla tři vozičky. Proud byl odebírán z prostřední vyvýšené kolejnice. Miniaturní lokomotiva byla poháněna sériovým elektromotorem o výkonu 2,5 kW, který byl napájen stejnosměrným proudem o napětí 150 V. [2] [4] [5] [6]



Obr. 6 Siemensova lokomotiva na výstavě v Berlíně [5]

2.3 První pravidelný provoz elektrické lokomotivy

První pravidelný provoz byl zahájen v červenci roku 1895 na úseku městské dráhy Baltimore & Ohio v délce 7 km. Elektrifikace byla provedena z důvodu značné zakouřenosti tunelu při průjezdu parních lokomotiv. Lokomotiva LE - 1s firmy General Electric s hmotností 90 tun se skládala ze dvou čtyřkolových jednotek trvale spojených dohromady. Jednotky byly vybaveny stejnosměrnými motory o celkovém výkonu 800 kW. Proud pro lokomotivu byl přiváděn přes pantografový sběrač z kolejnice ve tvaru U umístěné nad lokomotivou. [2] [7] [8] [9]



Obr. 7. Elektrická lokomotiva Baltimorské železnice [7]

2.4 Lokomotivy s asynchronním motorem

První pokusy s asynchronním motorem na železnici provedl Kálmán Kandó v roce 1896, kdy vybudoval 800 metrů dlouhou zkušební dráhu, na které prováděl se zkušební vozidlem trakční zkoušky.

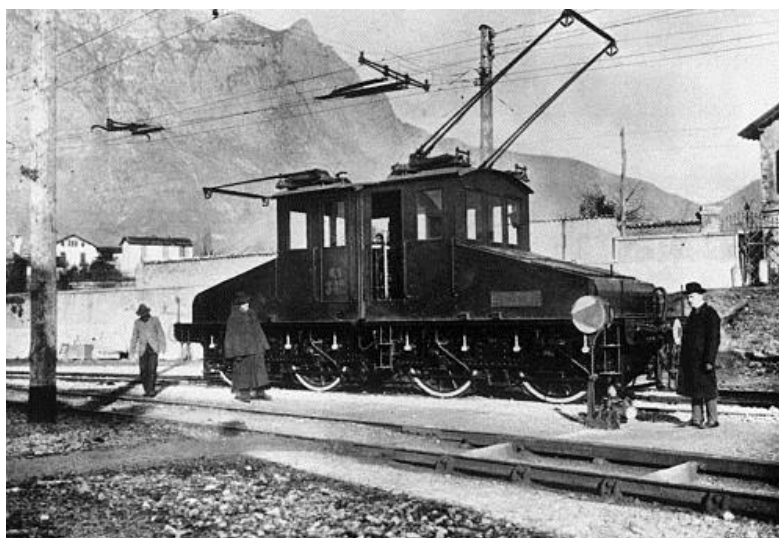
K prvnímu nasazení asynchronního motoru na železnici došlo roku 1899 na 40 km dlouhém úseku Burgdorf-Thun Bahn ve Švýcarsku. Lokomotiva měla dvě fixní rychlosti (17.5 a 35 km/h), které bylo možné měnit za klidu. K napájení byl využit třífázový proud o frekvenci 40 Hz. Proud byl přiváděn přes dvě troleje, jako třetí sloužily koleje. Lokomotiva je na obrázku 15. [15] [2]



Obr. 8 Lokomotiva Burgdorf-Thun Bahn [15]

K dalšímu rozšíření asynchronního motoru došlo roku 1902 při elektrifikaci Valtellinské dráhy v Itálii. Trať vedla těžkým horským úsekem a použití páry proto bylo nevhodné.

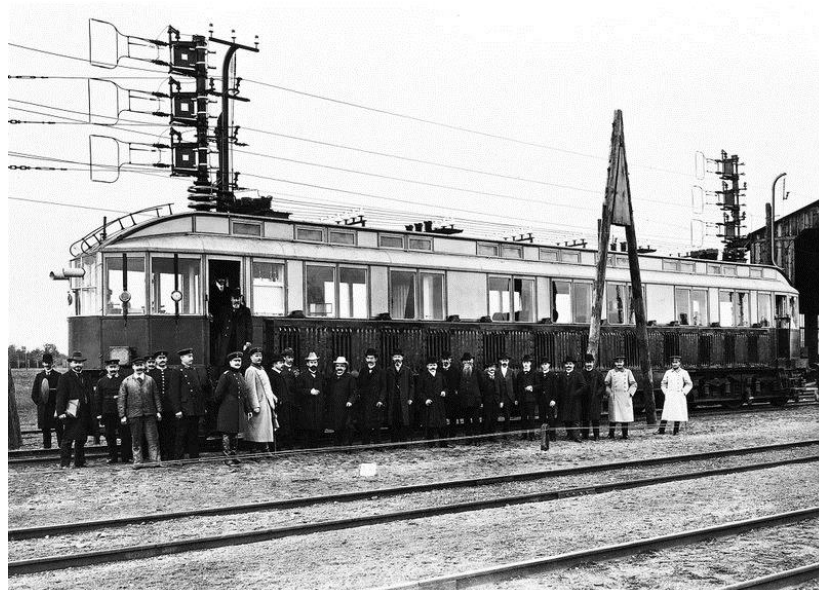
O elektrifikaci se staral Kálmán Kanó. Jeho lokomotivy byly napájeny 3 fázovým střídavým proudem o napětí 3 kV a frekvenci 15Hz. Proud pro motory byl přiváděn přes dvě troleje a koleje. [17] [2]



Obr. 9 lokomotiva Veltellinské dráhy [16]

Roku 1899 začala firma Siemens, AEG ve spolupráci s dalšími firmami vyvíjet třífázové železniční vozidlo. Představení proběhlo v roce 1903 na vlastní testovací trati u Lichterfelde.

Na zkušební trati Marienfelde-Zossen pak vůz stanovil rychlostní rekord 206,7 km/h. Proud pro elektromotory byl přiváděn přes tři troleje umístěné nad sebou. [5] [23]



Obr. 10 Lokomotiva firmy Siemens na Marienfelde-Zossen testovací trati [22]

2.5 Lokomotivy se synchronními motory

Synchronní motory se v minulosti používaly jen jako alternátory v elektrických přenosech výkonu, nejčastěji u dieselelektrických lokomotiv. K jejich rozšíření v elektrické trakci došlo až s nástupem polovodičových měničů.

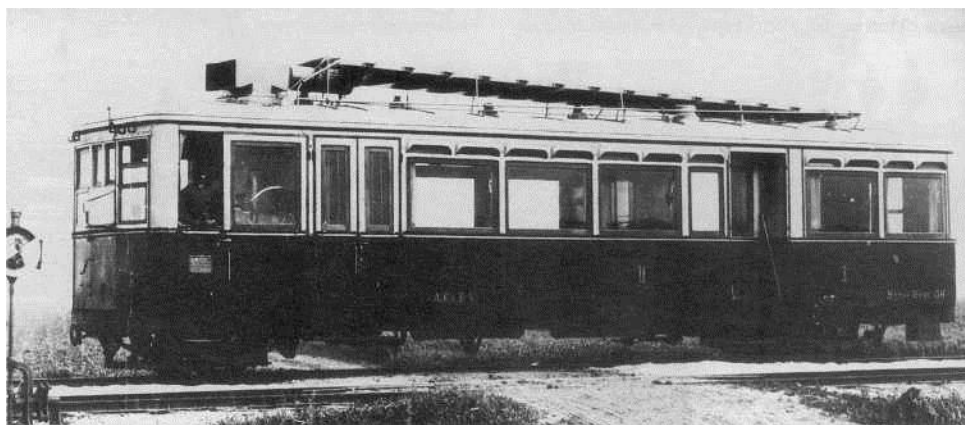
Synchronní motor s budicím vinutím na rotoru byl v trakčních pohonech poprvé použit na vysokorychlostním vlaku TGV Atlantique, který byl v celkovém počtu 105 souprav dodáván pro francouzské železnice firmou Alstom v letech 1989 až 1992. Synchronní motory byly individuálně napájeny z tyristorových střídačů s napěťovým vstupem. [18] [19]



Obr. 11 TGV Atlantique [19]

2.6 Benzínoelektrická trakce

Benzínoelektrická trakce byla předchůdcem diesel-elektrické. První benzínoelektrická lokomotiva vznikla roku 1903. Benzínový motor dodala francouzská firma De Dion-Bouton, elektromotory potom německá firma Siemens-Schuckert. Čtyřválcový motor, umístěný za místem strojvedoucího, poháněl elektrický generátor. Ten potom poháněl dva elektromotory (každý na jedné nápravě) umístěné pod podlahou. [20] [21]



Obr. 12 První benzínoelektrická lokomotiva [20]

2.7 Dieselelektrická trakce

První funkční dieselelektrické železniční vozidlo bylo uvedeno do provozu roku 1914. O výrobu se postaral podnik Waggonfabrik Rastatt a elektrické vybavení dodaly firmy Brown, Boveri & Cie, dieselový motor firma Swiss Sulzer AG. Vznětový motor umístěný na trojosém podvozku poháněl generátor stejnosměrného proudu, který dodával energii motoru umístěnému uprostřed dvouosého podvozku. [20] [24]



Obr. 13 První funkční dieselelektrické železniční vozidlo vyrobené ve spolupráci švýcarských a německých firem [20]

V dalších fázích vývoje se pro diesel-elektrickou trakci používaly lodní motory (1924-1930), které byly těžké, dosahovaly malých výkonů (600 až 900 kW) a v neposlední řadě byly rozměrné. V letech 1935 až 1940 se již zlepšil poměr hmotnost/výkon a výkonová hranice dosahovala 1500 kW. Výkony v dieselelektrické trakci stoupají dodnes. [4]

2.8 Počátky maglevu – lineární motor

První pokusy s magneticky levitujícími vlaky byly prováděny již roku 1968 v New Yorku v USA. Další krok ve vývoji tohoto typu vlaku nastal v roce 1979 otevřením 908 m dlouhé dráhy v Německu. Dráha byla otevřena při příležitosti Mezinárodní přepravní výstavy. V tom samém roce padl na testovací dráze v Japonsku rychlostní rekord 517 km/h, který je dnes již překonán.

K prvnímu komerčnímu využití došlo roku 1984 na mezinárodním letišti v Birminghamu v UK. Jednalo se o 600 m dlouhou dráhu, na které se železniční vozidla pohybovala s nízkou rychlostí. Ve stejném roce se v Německu otevřela 31,5 km dlouhá testovací dráha, na které soupravy běžně dosahovaly rychlosti 420 km/h. [45]



Obr. 14 Německá souprava typu maglev na testovací trati [45]

2.9 Počátky elektrické trakce na území ČR

V roce 1897 uskutečnil první pokus s elektrickou trakcí na našem území František Křížík. Zkouška proběhla na železniční trati Praha – Dobříš. V letech 1899–1901 pak jezdil v úseku Modřany – Zbraslav tramvajový akumulátorový vůz. Vůz byl pro tento účel vybaven nákolky železničního profilu. Proud pro motor byl dodáván baterií 250 článků s kapacitou 50 Ah. [25] [26]

První provoz elektrického vlaku na našem území byl zahájen v roce 1903 na trati Tábor –

Bechyně. V počátku bylo napájení prováděno dvěma trolejemi se stejnosměrným napětím, mezi trolejemi 1400 V a mezi trolejí a kolejnicí pak 700 V.

Motorové vozy Bechyňské dráhy měly čtyři trakční motory s výkonem 22,5 kW. Motory byly čtyřpólové s axiální a radiální vlastní ventilací, s dvoudílnou ocelolitinovou kotrrou, bez komutačních pólů, s ozubenou předlohou 15/75 zubů, s dvojitým pružným závěsem motoru a s tlakovými ložisky na nápravách. Motor navrhoval Fischer-Hinnen, později profesor na technice ve Winterthuru. [27]



Obr. 15 Elektrický vůz bechyňské dráhy [26]

V roce 1905 vyrobil František Křižík elektrickou lokomotivu E 225.001 pro pouliční dráhu ve Vídni. Měla velmi silný tah a vzhledem k malé adhezní hmotnosti (29 t) pomalý rozjezd.



Obr. 16 Lokomotiva E 225.001 pro pouliční dráhu ve Vídni.

Mezi hlavní výrobce elektrických lokomotiv v další letech na našem území patřila Škoda Plzeň, ČKD.

3 Druhy motorů využívaných v elektrické trakci

3.1 Stejnosměrné stroje

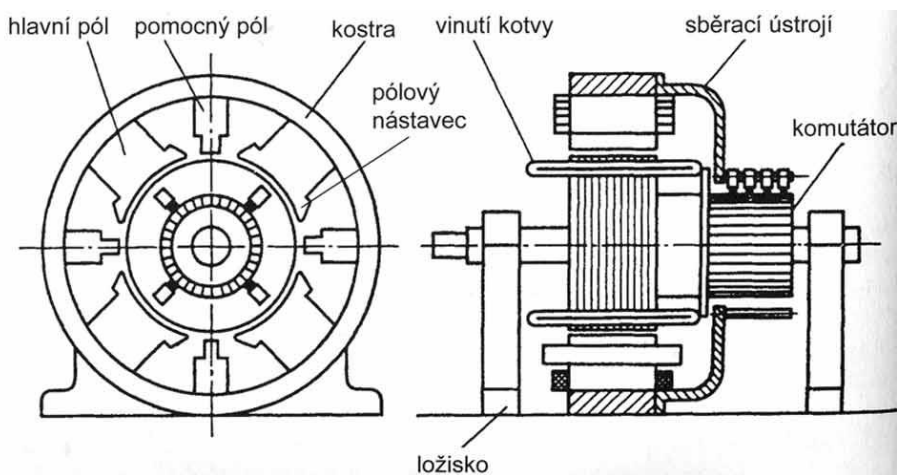
Stejnosměrné stroje jsou historicky nejstaršími stroji, které byly prakticky využívány jako zdroje elektrické energie – dynamy i jako motory při přeměně elektrické energie na mechanickou. Přibližně v druhé polovině 20. století se dostaly k mezím svých schopností. S rozvojem polovodičové techniky se jejich používání, jako zdrojů elektrické energie zásadně omezovalo. Jako motory se sice používají nadále, avšak v omezené míře. Důvod, proč se nadále používají, plyne zejména z dobré možnosti regulace a snadné realizace řídicích obvodů.

Například sériový motor lze celkem bez problémů řídit stupňovitou změnou napětí. Pro tyto své vlastnosti byl posléze používán i při napájení střídavým napětím se sníženou frekvencí (15 kV, 16 a 2/3 Hz) a později stejnosměrným, ale zvlněným proudem (střídavá vozidla s usměrňovačem).

Výkony se pohybují v řádech od 10 mW až do cca 5 MW. [28] [29] [30] [31]

3.1.1 Konstrukce

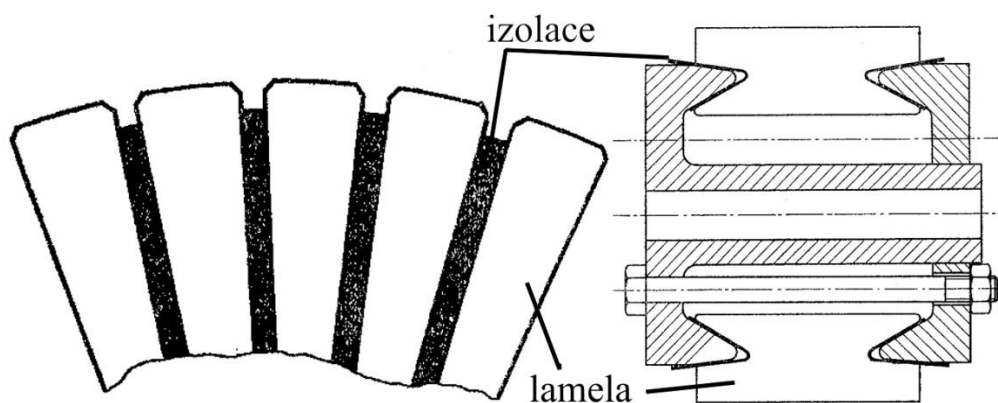
Hlavními částmi stejnosměrného stroje jsou rotor (pohyblivá část - kotva) a stator (pevná část). Kostra statoru, která vede stejnosměrný budicí tok, je vyrobena z lité oceli svařením nebo mechanickým spojením dílců. Na statoru se dále nachází hlavní póly, které mohou být masivní nebo z výrobních důvodů i listěné. Na statoru se dále nacházejí pomocné póly, které bývají masivní. Jsou zde z důvodu zajištění bezjiskrové komutace. Rotor (kotva) je vždy listěný protože v jeho vinutí protéká střídavý, přibližně lichoběžníkový proud. Vinutí kotvy je uloženo v drážkách a jeho konce jsou vyvedeny na komutátor. [28] [29] [30] [31]



Obr. 17 Konstrukční schéma stejnosměrného motoru [32]

3.1.1.1 Komutátor

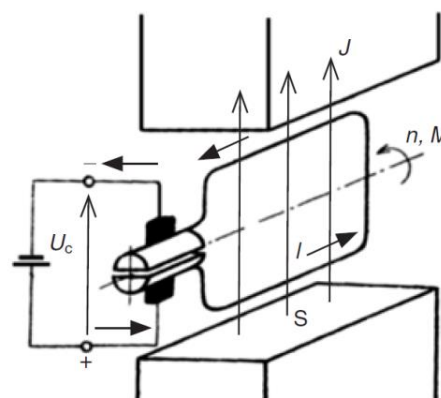
Komutátor je základní prvek stejnosměrného stroje. Jedná se o mechanický střídač (u motorů) nebo mechanický usměrňovač (u dynam), který zabezpečuje, že úhel mezi magnetickým polem statoru a rotoru bude 90° . Díky tomu bude vznikající točivý moment maximální. Komutátor je tvořen lamelami z tvrdé mědi lichoběžníkového tvaru. Lamely jsou navzájem izolovány broušeným mikanitem přesného rozměru. Konce vinutí jsou připojeny na komutátor přes tzv. praporkky, které se zapájí do vyfrézovaných zářezů v lamelách. [28][34]



Obr. 18 Ukázka uložení lamel komutátoru z čelního pohledu a v příčném řezu [35]

3.1.2 Princip funkce

Princip stroje lze předvést na smyčce rotující v homogenním magnetickém poli, které je vytvářeno permanentními magnety. Konce smyčky jsou vyvedeny na komutátor, který má dvě lamely. Vlivem působení napájecího napětí U_c vzniká ve smyčce proud I daného směru. Proud vytváří kolem vodiče své magnetické pole, které se složí s původním homogenním magnetickým polem statoru. Napravo od horního



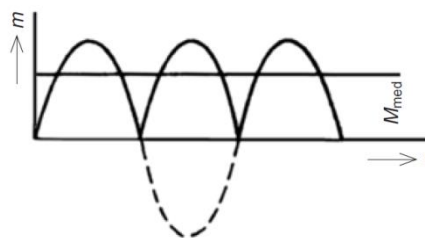
Obr. 19 Princip SS motoru [36]

vodiče a nalevo od dolního vodiče vzniká zhuštění pole, které působí na vodiče silou F (r.1) naznačeným směrem

$$F = B \cdot I \cdot l \quad (N; T; A; m) \quad r.1$$

Díky tomu vzniká točivý moment M , který roztáčí smyčku n otáčkami daným směrem. Otáčky jsou dány velikostí indukovaného napětí U_i , které je po zanedbání úbytků rovno napětí

U_c . Vlivem otáčení se mění poloha smyčky k siločarám a za předpokladu, že proud je konstantní, bude podle rovnice r.1 konstantní i síla F . Měnit se bude moment, protože se mění úhel, který navzájem svírá síla F a rameno síly.



Z tohoto důvodu je průběh momentu sinusový viz obr.19. Díky komutátoru pak moment nabývá pouze kladných hodnot. Při nulové hodnotě momentu totiž dochází ke komutaci (změně toku proudu), takže znaménko síly zůstává stejné a moment nemění svůj směr. Díky tomu je střední hodnota momentu nenulová a motor může pracovat v motorickém režimu. Zvlnění se u reálných motorů vyhlazuje rozprostřením většího počtu smyček na rotoru a použitím minimálně 4 pólů na statoru.

Obr. 20 Průběh momentu při komutaci

Výkon motoru je popsán rovnicemi r.2, r.3

$$P_m = P_{el} (W; W) \quad r.2$$

$$M \cdot \omega = U_i \cdot I (N \cdot m; rad \cdot s^{-1}; V; A) \quad r.3$$

Rovnicemi r.4 a r.5 je pak popsáno indukované napětí a moment motoru.

$$U_i = k \cdot \Phi \cdot \omega (V; -; Wb; rad \cdot s^{-1}) \quad r.4$$

$$M = k \cdot \Phi \cdot I (N \cdot m; -; Wb; A) \quad r.5$$

Rychlost stroje v motorickém režimu je pak odvozena v rovnici r.6

$$\omega = \frac{U_i}{k \cdot \Phi} (rad \cdot s^{-1}; V; -; Wb) \quad r.6$$

[28] [36]

3.1.3 Rozdělení stejnosměrných motorů

Stejnoseměrné motory rozdělené dle typu buzení:

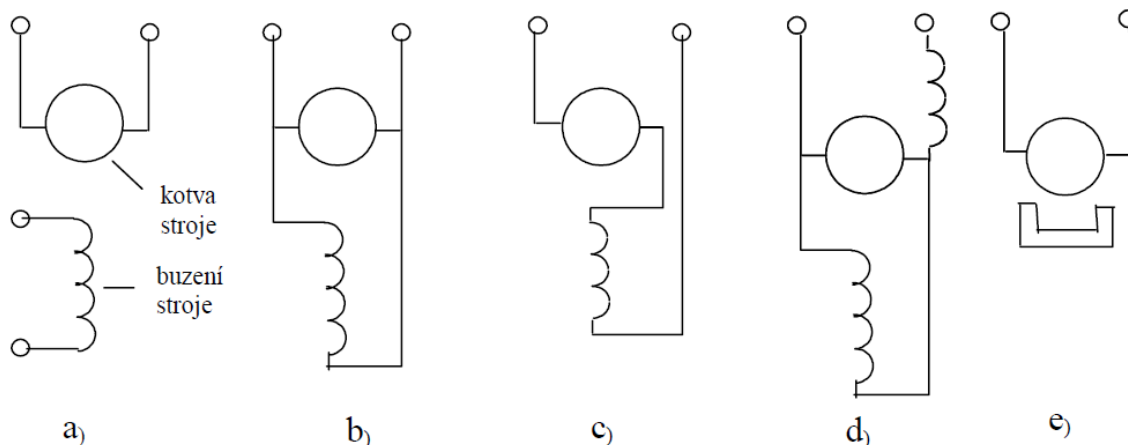
1. Ss motory s cizím buzením
2. Ss motory s vlastním buzením
 - a. Sériové buzení
 - b. Derivační (paralelní buzení)
 - c. Kompandní (sdružené) buzení

Zapojení jednotlivých druhů buzení je zobrazeno na obrázku 21.

Stejnoseměrný sériový trakční motor byl v elektrické trakci využíván od jejich počátků až do zavedení měničové techniky, která umožnila plynulou regulaci cize buzeného stejnosměrného

motoru. Proto jsou tyto dva motory rozebrány v dalších kapitolách podrobněji.

[36][31]



Obr. 21 Druhy buzení Ss strojů: a) cizí, b) derivační, c) sériové, d) kompandní, e) s permanentními magnety [37]

3.1.4 Stejnoseměrný motor se sériovým buzením

Stejnoseměrný sériový motor je klasickým trakčním motorem a pro trakční účely byl využíván výlučně až do zavedení měničové techniky. Jak je patrné z obrázku 20 (varianta c), tak budící vinutí je zapojeno do série s kotvou. Díky tomu je proud budící také proudem kotvy. Jak plyne z obrázku 21 tak velikost budícího proudu je závislá na zatížení stroje. Z toho také plyne že pro odlehčený stroj je:

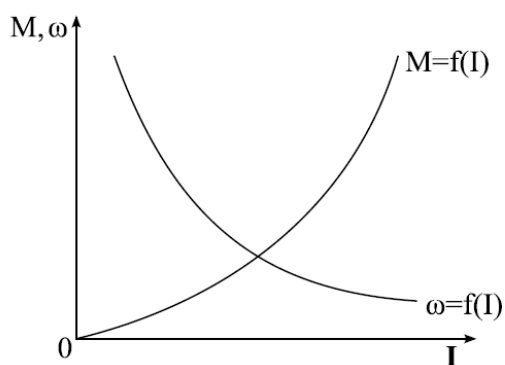
$$M \rightarrow 0 \quad \text{z toho také} \quad I \rightarrow 0 \quad \text{a rychlost} \quad \omega \rightarrow \infty$$

Takže sériový motor nesmí být odlehčen! Jinak by mohlo dojít k roztočení motoru nad maximální povolené otáčky a tím k poškození rotoru nebo komutátoru.

Motor se dá řídit buďto změnou napětí, nebo předřazováním odporů. Další možností řízení výkonu je skupinové řazení motorů (paralelně, sériově). Takto se dají řídit otáčky pouze v hrubých krocích a proto se používá například s předřadnými odpory.

Stejnoseměrný sériový motor je jako jediný z ss strojů funkční i při střídavém napájení.

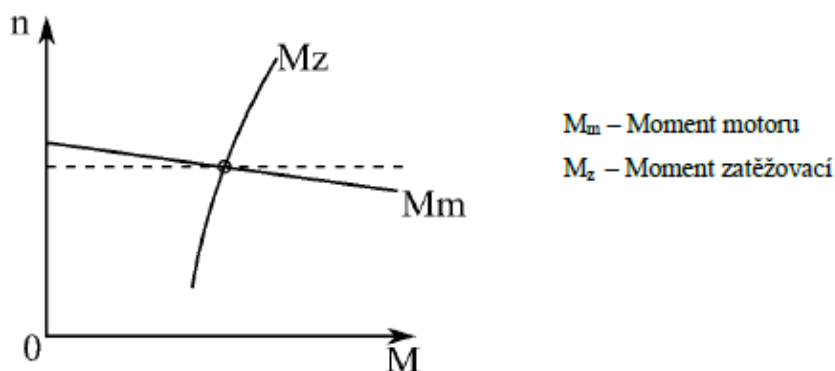
Vyžaduje to ovšem určitá konstrukční opatření. Například stator musí být listěný pro omezení ztrát. Dalším problémem při střídavém napájení je opotřebení uhlíků, jak je již zmíněno na konci kapitoly 1.2 . [28] [30] [31]



Obr. 22 Zatěžovací charakteristika Ss motoru[30]

3.1.5 Stejnosměrný motor s cizím buzením

Tímto názvem se rozumí stejnosměrný stroj, u kterého jsme schopni nezávisle na sobě řídit napětí kotvy U_a a budící proud statoru I_b . Zapojení je zobrazeno na obrázku 20, varianta a). Motor je při tomto zapojení ideálním zdrojem regulovaného točivého momentu z hlediska regulačních vlastností. U stacionárních strojů se regulace momentu prováděla s pomocí rotačních soustrojí. U vozidel byla tato regulace možná až po zavedení polovodičových součástek. Cize buzený motor má na rozdíl od sériového tvrdé momentové charakteristiky. To znamená, že i malé změny napětí působí velké změny proudu a při stálém buzení i tomu odpovídající změny momentu. To je u vozidla nepřijatelné, a proto je pro napájení kotev cize buzených motorů nezbytné plynulé řízení napětí. Odbuzení motoru je možné pouze na 1/3 jmenovitého budícího proudu. Při odbuzování se zvyšují otáčky nad hodnotu otáček jmenovitých. [28][30][31]



Obr. 23 Momentová charakteristika SS cize buzeného motoru [30]

3.1.6 Nevýhody stejnosměrného stroje

U stejnosměrných strojů je hlavní nevýhodou komutace a komutátor. Tento mechanický střídač přináší hlavní omezení:

- Omezení doby zatížení v klidu, kdy dochází k ohřevu lamel, na nichž stojí kartáče. Díky tomu může následně dojít k deformaci komutátoru a tím ke zhoršení komutace.
- Omezení maximálních otáček stroje vzhledem ke složité konstrukci lamel (ale i vinutí kotvy). Odstředivé síly mohou způsobit poškození nebo uvolnění lamel.
- Omezení napětí stroje velikostí lamelového napětí, pro které ještě bude přijatelná komutace.
- Komutátor a sběrací ústrojí představuje neizolované části pod napětím, které jsou vystaveny vlivům okolního prostředí.
- Komutátor a sběrací ústrojí vyžadují pravidelnou kontrolu a údržbu

- Větší rozměry stroje

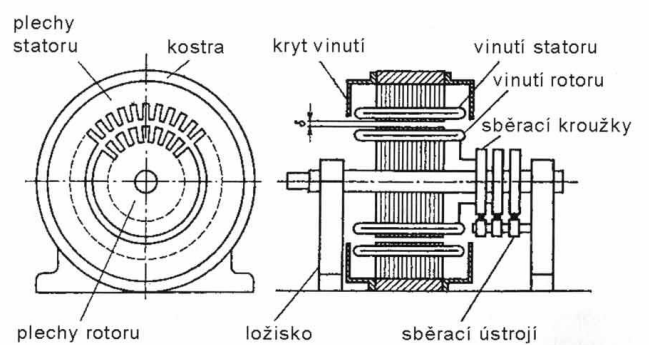
[31] [33]

3.2 Asynchronní stroje

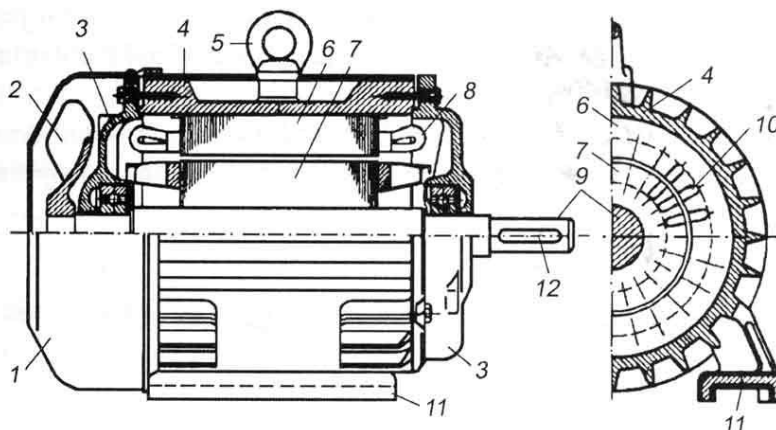
Snaha o využití asynchronního stroje pro pohon železničních vozidel se datuje od jeho objevu. V provedení s kotvou nakrátko totiž představuje velice jednoduchý, téměř bezúdržbový a odolný trakční motor. Jediná jeho údržba sestává z domazávání ložisek v intervalech cca 500 000 až 1 000 000 km). Zásadní překážkou v minulosti byl problém s plynulou a hospodárnou regulací. K takovéto regulaci je totiž zapotřebí, aby se měnil jak napájecí kmitočet tak i napětí. Přijatelné řešení tohoto problému přinesl až nástup polovodičových součástek, které nahradily jiné, mnohdy důmyslné systémy. Pro trakční účely se téměř výhradně využívá třífázových asynchronních motorů s kotvou nakrátko, napájených z měničů. [28] [33] [38]

3.2.1 Konstrukce

Asynchronní motor se skládá z rotoru a statoru. Stator je složen z plechů pro omezení ztrát vířivými proudy. V plechách jsou drážky (uzavřené, otevřené nebo polouzavřené) a v nich je uloženo zpravidla trojfázové vinutí. Jednotlivé fáze jsou posunuty o 120° mechanicky i elektricky. Rotor je také složený z plechů. Rotorové vinutí může být buď vinuté (motor s kotvou kroužkovou), nebo klecové (motor s kotvou nakrátko). U motorů s kotvou kroužkovou se k vinutí rotoru přes kartáče připojuje spouštěcí odpor, čímž se omezuje záběrný proud a také se dosahuje lepších spouštěcích charakteristik. Po rozběhu se odpor vyřadí, popřípadě se kroužky spojí nakrátko a kartáče se mohou odklopit, aby se při chodu stroje zbytečně neopotřebovávaly. Klecové vinutí tvoří tyče uložené v drážkách, jejichž konce jsou na čelech rotoru spojené kruhy. Klecové vinutí se vyrábí z mědi nebo z hliníku. [28] [34] [38]



Obr. 24 Asynchronní motor s vinutou kotvou [39]



Obr. 25 Asynchronní motor s klecovou kotvou. [40]

3.2.2 Princip funkce

Po připojení statorového vinutí ke zdroji vzniká točivé pole statoru, které protíná stojící rotorové vodiče. Jeho rychlost popisuje rovnice r.7. Podle indukčního zákona se do vodičů indukuje napětí a protože vodiče tvoří uzavřený galvanický celek, začne protékat i rotorový proud. Ten vytváří vlastní magnetické pole. Působením těchto dvou polí vznikne vnitřní elektromagnetický moment. Rotor se začne rozbíhat.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ (} ot \cdot min^{-1}; \text{---}; Hz; \text{---)} \quad r.7$$

V případě, že by se rotor roztočil na otáčky rovnající se otáčkám synchronním (r.7), pak by se magnetická pole statoru a rotoru vůči sobě nepohybovala a indukovalo by se nulové napětí. Díky tomu by zanikl i moment.

Rozdíl otáček rotoru a statoru je definován jako skluz:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \text{ (} \text{---}; rad \cdot s^{-1} \text{)} \quad r.8$$

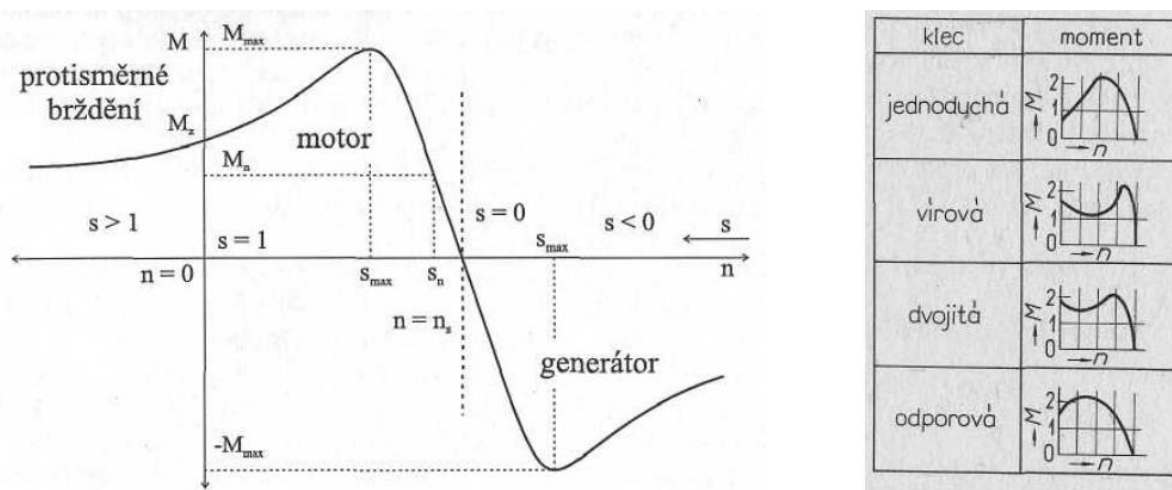
Z hodnoty skluzu se dále dá určit režim, v jakém asynchronní stroj pracuje:

$s \in (-\infty, 0)$ – generátorický režim

$s \in (0, 1)$ – motorický režim

$s \in (1, \infty)$ – brzda

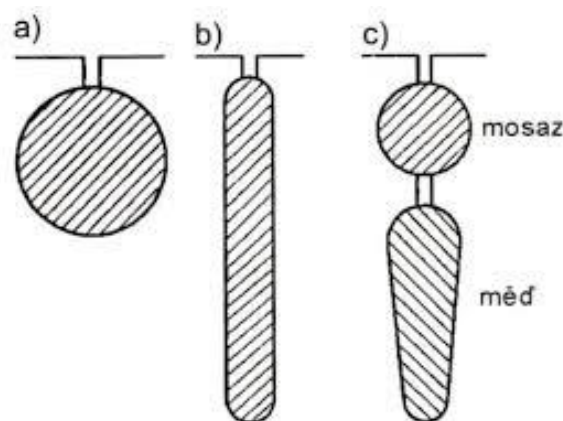
[38] [28] [30] [40]



Obr. 26 Vlevo momentová charakteristika asynchronního motoru, vpravo pak typické průběhy pro různé druhy klecí. [41]

3.2.3 Druhy klecí asynchronního stroje

Pro potlačení příliš velkého rozběhového proudu a malého záběrného momentu, zároveň při zachování nízké úrovně ztrát, se začaly zkonstruovat klece za použití vodičů jiných tvarů než kruhového. Druhy klecí jsou vyobrazeny na obrázku 27. Zleva je to klec jednoduchá, vírová a dvojitá. [30] [52] [54]



Obr. 27 Druhy klecí asynchronního stroje [54]

3.2.3.1 Vírová klec

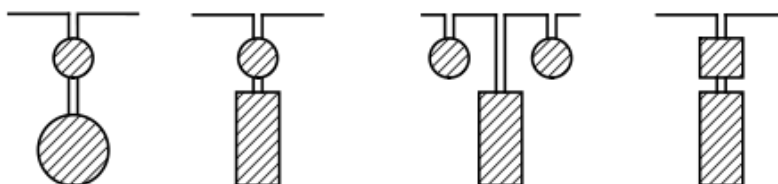
Vírová klec využívá k omezení rozběhového proudu skin efektu. Ve většině případů se používá takový tvar drážky, kdy vnitřní část má větší průřez než část blíže k povrchu rotoru. Vlivem skin efektu při rozběhu motoru, kdy frekvence proudu v rotorovém vinutí je nejvyšší, dojde k vytlačování proudové hustoty k povrchu rotoru. Zde je menší průřez vodiče a díky tomu je procházejícímu proudu kladen větší odpor. Příklady jejího provedení jsou na obrázku 28. [30] [52]



Obr. 28 Příklady vírových klecí [30]

3.2.3.2 Dvojitá klec

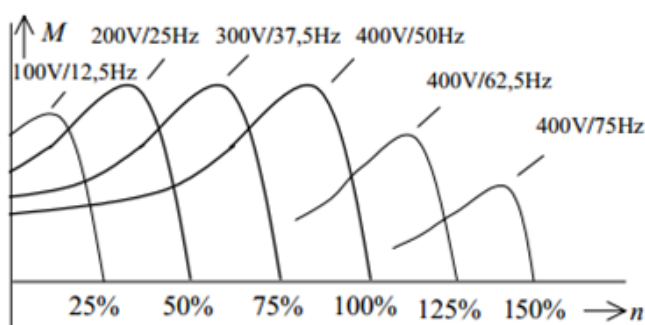
Dvojitá klec je tvořena z klece rozběhové (vnější) a klece běhové (vnitřní). Vnější klec má menší průřez tyčí a často je i z materiálu s větší rezistivitou. Vnitřní klec má větší průřez tyček a z pravidla je vyrobena z lépe vodivého materiálu. Při rozběhu motoru s dvojitou kotvou dochází k vytlačování proudové hustoty k povrchu rotoru, do rozběhové klece s větším odporem, a díky tomu dochází ke zvýšení záběrného momentu a snížení proudových rázů. Po rozběhu vliv skin efektu pomine a proud se opět rozloží rovnoměrně po průřezu vodičů. Díky rozdílu průřezů, popřípadě i materiálů, opět proud poteče převážně běhovou klecí. Výhodou takovéto konstrukce je nízký rozběhový proud spolu s velikým momentem. Nevýhodou je, že maximální moment je nejnižší. [30] [52]



Obr. 29 Příklady vírových klecí [53]

3.2.4 Asynchronní motor v trakci

V dnešní době se k řízení asynchronních motorů používají měniče frekvence a napětí. Tím se reguluje výsledný moment motoru a jeho otáčky. Na obrázku 26 pak je vyobrazen přibližný průběh momentových charakteristik. Pokles momentu v oblasti malých kmitočtů je dán tím, že nelze zajistit konstantní magnetický tok. V oblasti vyšších kmitočtů pak už nelze dodržet poměr napětí/frekvence a díky tomu dochází k poklesu momentu. [38] [42]



Obr. 30 Momentové charakteristiky asynchronního stroje při změně napětí a frekvence [42]

3.2.5 Nevýhody a výhody asynchronního stroje

K hlavním nevýhodám asynchronního stroje patří:

- Způsob vytváření napětí pro motor ovlivňuje obsah vyšších harmonických a tím i ztráty a oteplení jimi způsobené.

- Napájení z měniče působí zvýšené ztráty.
- Problém s přenosem momentu na nápravu
- Připájení tyčí rotoru do kruhů nakrátko

Výhody:

- Stroje neobsahují komutátor
- Mechanická robustnost
- Konstrukčně jednoduché
- Menší požadavky na údržbu.
- Vyšší mezní výkony.
- Nižší výrobní cena.

[38][30]

3.3 Synchronní stroje

Synchronní stroje nacházeli v minulosti své uplatnění zejména jako generátory elektrické energie. Později našli uplatnění u zařízení, kde bylo potřeba velkých výkonů a nebylo vyžadované časté spouštění. Tedy taková zařízení, která pracují konstantní rychlostí s málo proměnným zatížením. Jsou to zejména pohony velkých čerpadel a kompresorů. Jejich výhodou je dobrý účinek a možnost výroby jalové energie. Jejich využití v železniční trakci k pohonu začalo až v roce 1989. Jinak se používají zejména v dielelektrické trakci jako generátory. [19] [28] [33] [34] [43]

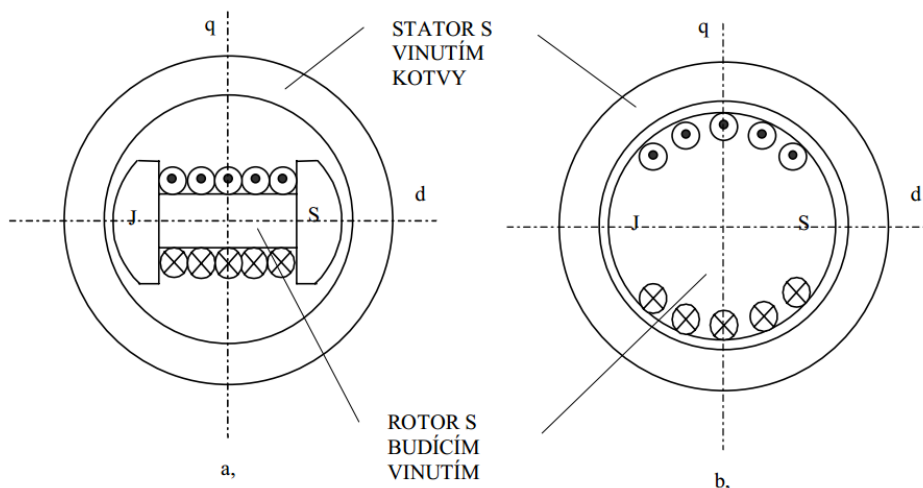
3.3.1 Konstrukce

Konstrukce statoru synchronního stroje se prakticky neliší od stroje asynchronního. Je složen z izolovaných plechů a v drážkách je uloženo střídavé trojfázové vinutí, které se nejčastěji spojuje do hvězdy.

Z hlediska konstrukce rotoru můžeme synchronní stroje rozdělit na:

- stroje s vyniklými póly (hydrostroje)
- stroje s hladkým rotorem (turbostroje)

[34]

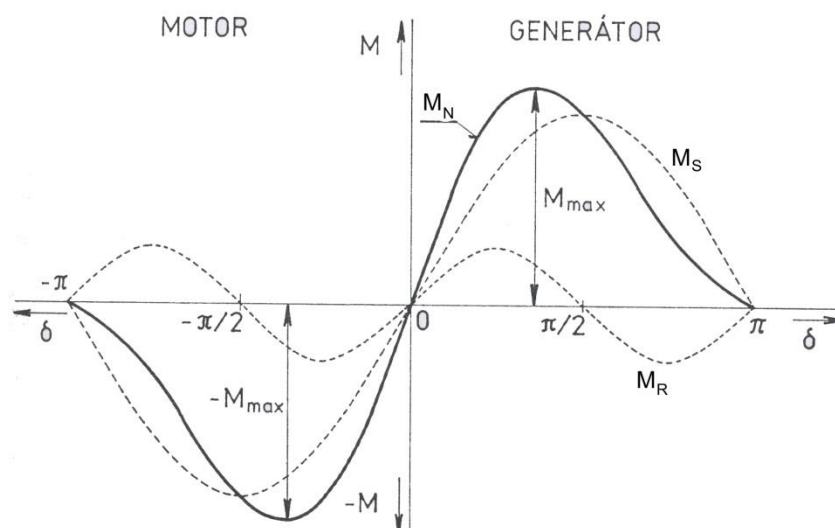


Obr. 31 Konstrukční typy synchronních strojů a) s vyniklými póly b) s hladkým rotorem [44]

3.3.1.1 Stroj s vyniklými póly na rotoru

Rotor má po svém obvodu rozmístěny póly, na kterých je budící vinutí. Vinutí je vyvedeno na kroužky na koncích rotorů. Póly jsou buď z dynamových plechů, nebo jsou masivní ocelolitinové. Na pólech jsou potom pólové nástavce, které jsou z dynamových plechů. V pólových nástavcích také bývá umístěno tlumící vinutí, které se spojuje čelními spojkami do krátka.

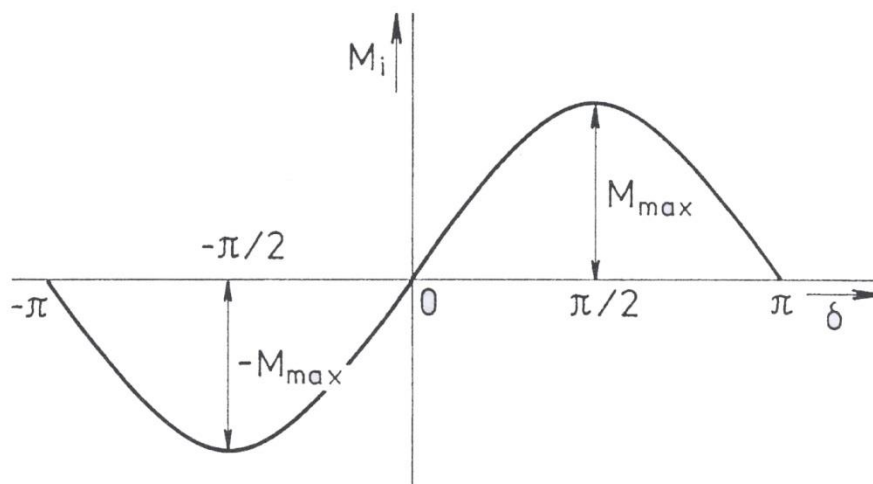
Moment se skládá ze dvou složek. Momentu synchronního a reluktančního. Reluktanční moment vzniká v důsledku akumulace energie v místě, kde je vzduchová mezera podstatně větší než pod póly statoru [30] [34]



Obr. 32 Momentová charakteristika synchronního motoru s vyniklými póly [34]

3.3.1.2 Stroj s hladkým rotorem

Rotor má ve $2/3$ obvodu vyfrézované drážky, ve kterých je uloženo budící vinutí. Zbývající část je obvykle bez drážek a prochází jí hlavní magnetický tok. Vinutí v drážkách se zajišťuje kovovými klíny. Budící vinutí je vyvedeno na kroužky. [34]



Obr. 33 Momentová charakteristika synchronního motoru s hladkými póly [34]

3.3.2 Princip synchronního stroje

Synchronní stroj, jak již bylo zmíněno, může pracovat jako motor i generátor. V případě motoru se na satorové vinutí přivede střídavý proud o úhlové rychlosti ω_1 , který vytvoří točivé magnetické pole o synchronní rychlosti ω_s (viz rovnice r.9)

$$\omega_s = \frac{\omega_1}{p} \text{ (rad} \cdot \text{s}^{-1}, \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}, -) \quad \text{r.9}$$

Na rotor je přiveden stejnosměrný proud, který vytvoří konstantní magnetické pole. Vzájemným působením těchto dvou polí je rotor vtažen do synchronismu.

V případě, že bude rotor brzděn momentem zátěže, tak se bude zpožďovat o zátěžový úhel. Tento úhel se se zatížením zvětšuje a při překročení úhlu $\pi/2$ (u dvojpólového stroje) rotor vypadne ze synchronismu, protože při velikosti zátěžového úhlu $\pi/2$ je u dvojpólového stroje moment největší.

Při využití synchronního stroje jako generátoru se do satorového vinutí přivádí stejnosměrné napětí a stator je poháněn vnější silou. Působením magnetického pole rotoru se ve satorovém vinutí indukují napětí.

[28] [34]

3.4 Maglev – lineární motor

Maglev (zkratka anglických slov magnetic levitation) je poměrně novým druhem rychlovlaků, který nevyužívá koleje, ale magnetické levitace.

Existují tři druhy levitace a pohonu, které se používají u vlaků maglev:

1. permanentní magnety (inductrack)
2. elektromagnetická
3. elektrodynamická

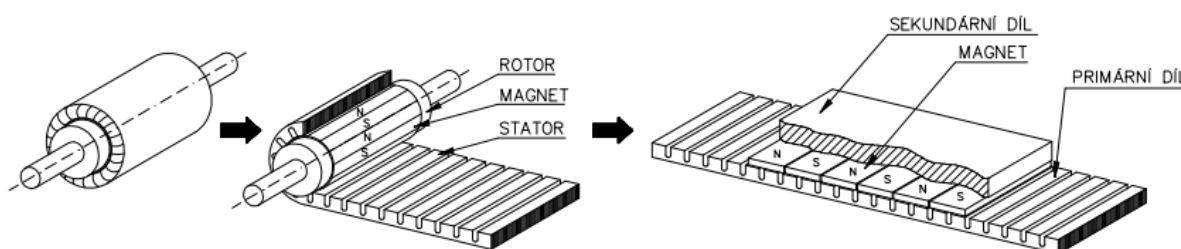
Základní znaky vlaků maglev:

- Provozní rychlost do 400-500 km/h.
- Bezkontaktní levitace bez opotřebení, technologie vedení a pohonu nezávislá na tření.
- Velké zrychlení, vysoký brzdný výkon.
- Bez kontaktu s vodící drahou a díky plynulé regulaci rychlosti (ne po krocích) je jízda stabilní a pohodlná.
- Nižší hlučnost ve srovnání s jinými dopravními prostředky pohybujícími se stejnou rychlostí.
- Nízká specifická spotřeba energie a nízké provozní náklady, ale velké náklady na stavbu trati.
- Flexibilní volba trasy vodící dráhy vzhledem k malým poloměrům zakřivení a vysoké stoupavosti (10 %).
- Minimální územní nároky na vodící dráhu.

[45] [46] [47] [48] [49]

3.4.1 Princip funkce

Lineární motor si můžeme představit jako klasický synchronní nebo asynchronní motor rozvinutý do roviny jak je znázorněno na obrázku 29.



Obr. 34 Znázornění principu lineárního motoru [50]

Statorem je zpravidla označována primární část a rotorem sekundární část. Primární část je

tvořena stejně jako u klasických strojů feromagnetickým svazkem složeným z elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí uloženého v jeho drážkách. U synchronních motorů je proti primárnímu dílu konstrukčně uspořádaná sekundární část tvořená permanentními magnety ze vzácných zemin (např. Nd-Fe-B), které jsou nalepeny na ocelovou podložku. U asynchronní verze je sekundární díl tvořen klecí nakrátko uloženou buď do drážek feromagnetického svazku, nebo aspoň připevněnou na ocelovou podložku poháněného zařízení. O tom, která část lineárního motoru se bude pohybovat, rozhoduje konstrukce poháněného zařízení. [50] [51]

4 Hlavní parametry elektrického trakčního stroje pro železnici

Mezi hlavní parametry pro výběr vhodného elektrického trakčního stroje pro železnici se řadí:

- Velikost výkonu.
- Velikost momentu.
- Možnosti řízení momentu.
- Účinnost přeměny elektrické energie na mechanický pohyb.
- Velikost stroje a jeho cena.
- Časové úseky mezi údržbou.

Jak plyne z historie popsané ve druhé části tak dříve těmto požadavkům nejlépe vyhovoval stejnosměrný stroj. Ovšem s nástupem polovodičových součástek se v současné době využívají asynchronní motory s kotvou na krátko. Příkladem využití tohoto druhu motorů je lokomotiva řady 380 firmy ŠKODA TRANSPORTATION a.s. [55]



Obr. 35 Lokomotiva řady 380 [55]

Vlivem zvyšování nároků na rychlost a pohodlí v osobní vlakové dopravě se dá předpokládat vývoj a rozšiřování vlaků fungujících na principu magnetické levitace. Tyto vlaky totiž mají při vyšších rychlost výrazně nižší spotřebu energie než vlaky využívající rotačních strojů. Ovšem rozvoji tohoto druhu dopravy brání v současné době veliká počáteční cena tratí. [48]

Závěr

Pokusy o využití elektromotorů v železničních vozidlech jsou stejně staré jako elektromotory samotné. Z počátku bránila jejich využití velikost a nedostupnost infrastruktury potřebné pro jejich provoz. Dalším problémem byl jejich omezený výkon a problémy s regulací. Postupný vývojem se zvětšovala velikost výkonů a vylepšovali se vlastnosti regulace. To vedlo k rozšiřování působení elektrických strojů na železnici.

V dřívějších dobách, díky jednoduché regulaci, dominovali elektrické trakci stroje stejnosměrné. Prováděly se také pokusy se stroji střídavými. Avšak rozšíření těchto strojů bránila jejich složitá regulace a také složitý systém napájení třemi vodiči. Tento problém byl vyřešen až s příchodem polovodičové techniky. V dnešní době jsou na vzestupu stroje asynchronní díky jejich minimálním požadavkům na údržbu. Stroje stejnosměrné se sice stále provozují, ale jejich počet se postupně snižuje. Staré lokomotivy se stejnosměrnými pohony jsou modernizovány a vybavují se polovodičovým řízením výkonu. Díky tomu se omezují ztráty při řízení.

V této práci jsou zmíněny klady a zápory jednotlivých druhů elektromotorů, z kterých jasně plyne že ideální elektromotor pro elektrickou trakci neexistuje. Buď můžeme mít elektromotor s jednoduchou regulací za cenu vyšších ztrát a nutnosti častější údržby. Nebo složitější regulaci s menšími ztrátami a relativně bezúdržbový stroj. V současné době se díky možnostem jaké nám dává polovodičová technika preferuje druhá možnost.

Budoucnost vývoje elektrické trakce na železnici bude směřovat ke zvyšování účinnosti a vývoji pohonů, které nám pomohou dosáhnout vysokých rychlostí vlaků pro osobní dopravu. Nejdále jsou v tomto směru vlaky maglev, které využívají lineárních motorů. V nákladní dopravě se využití těchto vlaků nedá předpokládat pro malé využitelné zatížení soupravy.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Robert Davidson. *Wikipedia*. [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Davidson_\(inventor\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Davidson_(inventor))
- [2] Electric locomotive. *Wikipedia*. [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_locomotive#History
- [3] The invention of the electric motor. *KIT*. [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: <http://www.eti.kit.edu/english/1376.php>
- [4] JANSÁ, František. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1980. 311 s.
- [5] History – Electrifying Trains. *SIEMENS*. [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: http://www.siemens.com/innovation/en/publikationen/publications_pof/pof_spring_2004/electric_trains_article.htm
- [6] Elektrické lokomotivě je letos 130 let. *ELEKTRO časopis pro elektrotechniku*. [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=39226
- [7] *Wikipedia*. *Baltimore Belt Line*. [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Baltimore_Belt_Line
- [8] GENERAL ELECTRIC. *History*. [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: <http://www.ge.com/about-us/history/1878-1904>
- [9] REYNOLDS, Kirk a Dave OROSKI. *Baltimore* [online]. Minneapolis, MN: Voyageur Press, 2008, 160 p. [cit. 2014-03-15]. MBI railroad color history. ISBN 07-603-2929-X. Dostupné z: <http://www.worldcat.org/title/baltimore-ohio-railroad/oclc/222666612>
- [10] Charles Grafton Page. *Wikipedia*. [online]. [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Grafton_Page
- [11] *Wikipedia*. *Elektrická trakce*. [online]. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_trakce
- [12] *Wikipedia*. *Nezávislá trakce*. [online]. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Nez%C3%A1visl%C3%A1_trakce
- [13] Elektrická trakce. [online]. [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=4978>

- [14] KOSTKA, Tomáš. *Užití elektrické energie: Elektrická trakce*. [online]. 2004 [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/uee/trakce_teplo_svetlo.pdf
- [15] ABB. . [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/629326ee2cdd977dc125777500346148/\\$file/88-94%20m022_eng_72dpi.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot271.nsf/veritydisplay/629326ee2cdd977dc125777500346148/$file/88-94%20m022_eng_72dpi.pdf)
- [16] Wikipedia. *Electric locomotive*. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1lm%C3%A1n_Kand%C3%B3
- [17] *Stejnosměrný versus střídavý proud..* [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://home.tiscali.cz/cz399521/kando/DCvsAC.htm>
- [18] NOVÁK, Jaroslav. ELEKTRO, časopis pro elektrotechniku. *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice (1. část)*. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/uplatneni-synchronnich-stroju-v-dopravni-technice-1-cast-26832.html>
- [19] Wikipedia. SNCF TGV Atlantique. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/SNCF_TGV_Atlantique
- [20] Wikipedia. Diesel locomotive. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Diesel_locomotive#cite_note-FOOTNOTEChurella199812-9
- [21] Wikipedia. Weitzer railmotor. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Weitzer_railmotor
- [22] Wikipedia. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Siemens_Drehstromtriebwagen01.jpg
- [23] SIEMENS. Transportation. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.siemens.com/history/en/innovations/transportation.htm#toc-2>
- [24] Sächsischer DET 1–2. Wikipedia. [online]. [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://de.wikipedia.org/wiki/S%C3%A4chsischer_DET_1%E2%80%932
- [25] Železniční trať Praha – Vrané nad Vltavou – Čerčany/Dobříš. Wikipedia. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Tra%C5%A5_210
- [26] Elektrická dráha Tábor–Bechyně. Wikipedia. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_dr%C3%A1ha_T%C3%A1bor_-_Bechyn%C4%9B

- [27] KOHUTKA, Jiří Ing. František Křížík. ELEKTRO časopis pro elektrotechniku. [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=36790
- [28] BARTOŠ, Václav et al. *Elektrické stroje*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [29] HULCOVÁ, Kateřina. *Stejnoseměrný stroj*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Jiří Srb.
- [30] TALAFOUS, Luboš. *Pohony pro elektrickou trakci*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Petr Řezáček.
- [31] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce I*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. 198 s. ISBN 80-7082-633-9.
- [32] ROUBÍČEK, Ota. *Princip stejnosměrných motorů*. Elekrika.cz. [online]. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnosemernihych-motoru>
- [33] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005. 180 s. ISBN 80-7043-422-8.
- [34] MĚŘIČKA, Jiří, HAMATA, Václav a VOŽENÍLEK, Petr. *Elektrické stroje*. Vyd. 2, dotisk. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 311 s. ISBN 80-01-02109-2.
- [35] ŠÍPAL, J. [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://sipal.fvtm.ujep.cz/EIEI/EIEI_09.pdf
- [36] Elektrické motory: Stejnoseměrné motory [online]. 2013 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2013/01/Elektro_01_2013_output/web/flipviewerxpress.html?pn=0064
- [37] [online]. 2/2006 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_stejnosemerne_stroje_bc.pdf
- [38] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce II*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. 167. ISBN 80-7082-814-5.
- [39] ROUBÍČEK, Ota. Elekrika.cz. [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/motor-s-krouzkovym-rotorem>
- [40] KREJČÍ, František. Elekrika.cz. [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/asynchronni-elektromotory>
- [41] Mechanická charakteristika asynchronního motoru. [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/indukcni_motor/asynchr_motor_teorie.pdf

- [42] KOČMAN, Stanislav. [online]. [cit. 2014-05-21]. Dostupné z: <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>
- [43] BENEŠ, Kryštof. *Vývoj synchronních strojů*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Michaela Vachtlová.
- [44] KOČMAN, Stanislav. [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_synchronni%20stroje_bc%20FS.pdf
- [45] Maglev. *Wikipedia*. [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Maglev#New_York,2C_United_States,2C_1968
- [46] Maglev. *Wikipedia*. [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Maglev>
- [47] Šanghajský vlak Maglev. . [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.svazdopravy.cz/html/cz/maglev.html>
- [48] maglev rychlovlaky. Vysokorychlostní železnice. [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.vysokorychlostni-zeleznice.cz/maglev-rychlovlaky/>
- [49] MIKUTA, Petr. *Magneticky levitované dopravní systém - zhodnocení a prognóza*. Plzeň, 2012. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Daniel Mayer.
- [50] [online]. [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: http://www.vues.cz/file/424/CZ_LIN-OBECNE_020909.PDF
- [51] MAYER, Daniel Mayer. [online]. 2003/1 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010304.pdf>
- [52] HRUBÝ, Ladislav. *Asynchronní stroje pro trakční účely*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce Karel Hruška.
- [53] Asynchronní motor. *Wikipedia*. [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronn%C3%AD_motor
- [54] ROUBÍČEK, Ota. Motor s klecovým rotorem. *Elektrika.cz*. [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/motor-s-klecovym-rotorem/view>
- [55] Atlas lokomotiv. 380. [online]. [cit. 2014-06-02]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-380.html>