

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Pohony pro elektrickou trakci**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Luboš TALAFOUS**  
Osobní číslo: **E10B0399P**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Pohony pro elektrickou trakci**  
Zadávající 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 přehled pohonů pro elektrickou trakci se zaměřením na moderní systémy.

1. Přehled v současné době používaných systémů pohonů.
2. Výhody a nevýhody v současné době používaných systémů pohonů.
3. Možnosti použití v hybridních vozidlech.

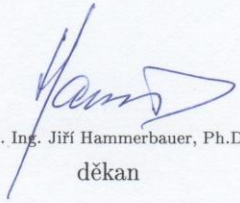


Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


**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: **15. října 2012**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na vypracování přehledu pohonů pro elektrickou trakci se zaměřením na moderní systémy. V úvodu je krátké seznámení s touto bakalářskou prací. První kapitola pojednává o rozdělení elektrické trakce a její využití. Následují tři kapitoly, zabývající se používanými pohony v elektrické trakci a jejich principy. Konce významných kapitol jsou zakončeny výhodami, nevýhodami a konkrétním použitím v elektrické trakci. Poslední kapitola je zaměřena na možnost použití moderních systémů pohonů v hybridních vozidlech.

## **Klíčová slova**

Elektrická trakce, vozba, stejnosměrný stroj, asynchronní stroj, synchronní stroj, permanentní magnet, motor, rotor, stator, střídavý, stejnosměrný, komutátor, hybrid, trolejbus, tramvaj, metro

**Abstract**

Submitted bachelor's thesis is focused on developing of A general knowledge of drives for electric traction, aimed on modern systems. In the introduction is a brief explanation of the thesis. The first chapter is concerning the sorting of electric traction and its use. The three following chapters are dealing with applied drives in electric traction and the functional principles. In conclusions of key chapters are enlisted the advantages, disadvantages and particular usage of the drives in electric traction. The last chapter is focused on the possibility of applying modern drive systems in hybrid vehicles.

**Key words**

Electric traction, chariot, DC machine, asynchronous machine, synchronous machine, permanent magnet, engine, rotor, stator, AC, DC, commutator, hybrid, trolleybus, tram, underground

## **Prohlášení**

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

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Luboš Talafous

## **Poděkování**

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

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ELEKTRICKÁ TRAKCE</b> .....	<b>12</b>
1.1 <b>NEZÁVISLÁ ELEKTRICKÁ TRAKCE</b> .....	12
1.1.1 Akumulátorová vozba .....	12
1.1.2 Deselektrická vozba .....	13
1.2 <b>ZÁVISLÁ ELEKTRICKÁ TRAKCE</b> .....	13
1.2.1 Stejnoseměrná trolej .....	13
1.2.2 Střídavá trolej .....	13
1.3 <b>ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÉ TRAKCE PODLE DRUHU EL. VOZBY</b> .....	14
1.3.1 Městská hromadná doprava .....	14
1.3.1.1 Tramvaj .....	14
1.3.1.2 Trolejbus.....	15
1.3.1.3 Metro.....	15
<b>2 POUŽÍVANÉ SYSTÉMY POHONŮ</b> .....	<b>16</b>
2.1 <b>STEJNOSMĚRNÉ STROJE</b> .....	16
2.1.1 Komutátor.....	17
2.1.2 Princip činnosti motoru .....	17
2.1.3 Rozdělení stejnosměrných motorů.....	18
2.1.3.1 Stejnoseměrný motor se sériovým buzením.....	19
2.1.3.2 Stejnoseměrný motor s cizím buzením .....	20
2.1.4 Použití stejnosměrného motoru v trakci.....	20
2.2 <b>ASYNCHRONNÍ STROJE</b> .....	21
2.2.1 Princip činnosti motoru .....	22
2.2.2 Rotor s klecovou kotvou .....	24
2.2.2.1 Dvojitá klec.....	24
2.2.2.2 Vírová klec .....	25
2.2.3 Použití asynchronního motoru v trakci .....	25
2.2.4 Výhody a nevýhody asynchronních motorů.....	26
2.3 <b>SYNCHRONNÍ STROJE</b> .....	27
2.3.1 Rozběh synchronního motoru.....	27
2.3.2 Princip synchronního motoru .....	27
2.3.3 Konstrukční uspořádání synchronních strojů .....	28
2.3.3.1 Stroj s hladkým rotorem .....	28
2.3.3.2 Stroj s vyniklými póly.....	28
2.3.4 Použití v elektrické trakci.....	30
2.4 <b>SYNCHRONNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY</b> .....	30
2.4.1 Permanentní magnety pro PMSM .....	31
2.4.2 PMSM v elektrické trakci .....	31
2.4.2.1 PMSM s vnitřním rotorem.....	31
2.4.2.2 PMSM s vnějším rotorem.....	32
2.4.3 Koncepce a použití PMSM v elektrické trakci.....	33
2.4.4 Výhody a nevýhody PMSM .....	35
<b>3 SYNCHRONNÍ STROJE V SYSTÉMECH SE SPALOVACÍM MOTOREM</b> .....	<b>35</b>
3.1 <b>ELEKTRICKÝ PŘENOS VÝKONU SPALOVACÍHO MOTORU</b> .....	36
3.2 <b>ALTERNATIVNÍ POHONY S PMSM</b> .....	36



---

3.3	<b>HYBRIDNÍ POHON S PMSM</b> .....	37
3.3.1	Sériová hybridní konfigurace .....	37
3.3.2	Paralelní hybridní konfigurace .....	37
3.3.3	Kombinovaná hybridní konfigurace .....	38
3.4	<b>POUŽITÍ HYBRIDNÍCH POHONŮ</b> .....	38
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>40</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>42</b>

## Seznam symbolů a zkratek

<b>symbol</b>	<b>veličina</b>	<b>jednotka</b>
B	magnetická indukce	[T]
F	síla	[N]
f	kmitočet	[Hz]
I	elektrický proud	[A]
$I_a$	elektrický proud kotvy	[A]
$I_b$	elektrický proud buzení	[A]
k	konstanta motoru	[-]
L	indukčnost cívky	[H]
l	délka	[m]
M	moment	[N.m]
n	otáčky	[s <sup>-1</sup> ]
$n_s$	synchrónní otáčky	[s <sup>-1</sup> ]
P	elektrický výkon	[W]
$P_p$	počet pólových dvojic	[-]
$R_a$	elektrický odpor kotvy	[ $\Omega$ ]
$R_b$	elektrický odpor buzení	[ $\Omega$ ]
s	skluz	[-]
t	čas	[s]
$U_i$	indukované napětí	[V]
$U_b$	budící napětí	[V]
$\beta$	zátěžný úhel	[rad]
$\omega$	úhlový kmitočet	[rad.s <sup>-1</sup> ]
$\phi$	magnetický tok	[Wb]

## **Úvod**

Závěrečná práce mého bakalářského studia se zabývá elektrickou trakcí, konkrétně pohony pro elektrickou trakci. Elektrická trakce je velmi rozsáhlé téma, proto jsem se po konzultaci se svým vedoucím práce rozhodl zabývat tzv. lehkou elektrickou trakcí. V té jsou především zahrnuty vozidla městské hromadné dopravy.

Bakalářská práce je rozdělena do třech hlavních kapitol o celkovém počtu 44 stran. První kapitola se zabývá samotnou elektrickou trakcí, její rozdělení a využití. Druhá část této práce se zabývá pohony, které se využívají v elektrické trakci. Podrobněji jsou popsány stejnosměrné, asynchronní, synchronní a synchronní stroje s permanentními magnety. Pod každou z těchto částí je i praktické použití v provozu. Třetí kapitola popisuje moderní systémy pohonů, které se využívají v hybridních vozidlech.

# 1 Elektrická trakce

Elektrická trakce je charakteristická tím, že pro pohon soupravy využívá přeměny elektrické energie z baterie či z vnějšího zdroje na energii kinetickou a naopak. Řízený pohyb kolejového vozidla se nazývá vozba. Podle přivedení elektrické energie se trakce rozděluje dále do skupin závislé a nezávislé trakce, popřípadě kombinované. [28]

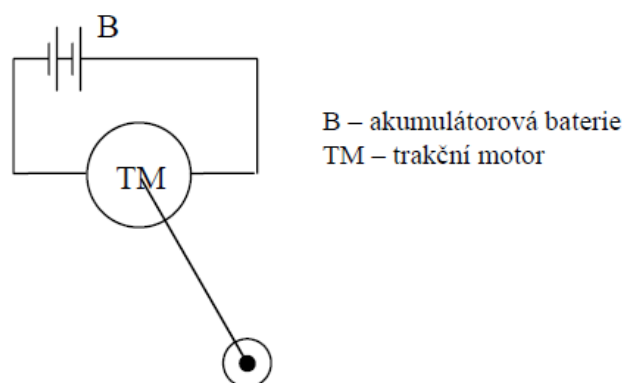
## 1.1 Nezávislá elektrická trakce

U nezávislé elektrické trakce je zdroj energie umístěn přímo ve voze. V tom případě není závislý na jakémkoliv přívodu elektrické energie. V nezávislé elektrické trakci se můžeme setkat s několika druhy zdrojů.

- Akumulátorové
- Dieselelektrické
- Benzinoelektrické
- Setrvačnickové
- Parní – turboelektrické

### 1.1.1 Akumulátorová vozba

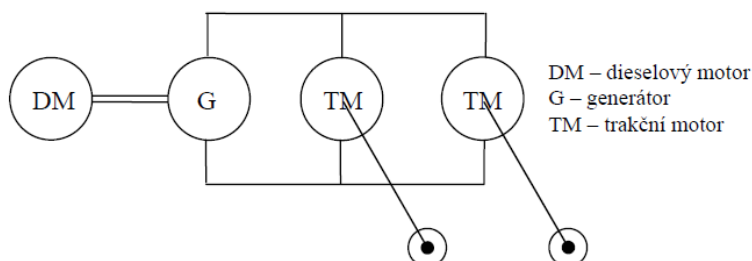
Princip akumulátorové vozby je založen na dodávce proudu do motoru z akumulátorové baterie. Tento způsob se objevuje spíše u malých vozidel, jako jsou přepravní vozíky ve skladištích a také na nádražích, kde malé lokomotivy slouží k posunování vagónů. Mají omezený výkon a díky baterii mají velkou hmotnost i cenu. Kvůli častému dobíjení se také zkracuje životnost samotné baterie. Dojezd těchto vozidel se odhaduje na 20-40km.



Obr.1. Princip akumulátorové vozby [27]

### 1.1.2 Dieselelektrická vozba

Dieselelektrické lokomotivy se využívají na místech, kde není zatrolejované území. Jejich použití je tedy posunování vagónů na vlečkách, ale i u drah, kde není potřeba velké přepravní kapacity, jako jsou například takzvané „motoráčky“. Tato vozba je přednostně využívána při poruchách a haváriích na trolejovém vedení.



Obr.2. Princip dieselelektrické vozby [27]

U hybridních vozidel se nejčastěji vyskytuje kombinace elektricky závislého pohonu s jedním z výše uvedených způsobů vozby. Toto téma bude podrobněji vysvětleno v poslední kapitole, která se bude právě zabývat možnostmi hybridního využití v elektrické trakci. [24], [25]

## 1.2 Závislá elektrická trakce

Už z názvu je patrné, že vozidla jsou závislé na dodávce elektrické energie. Jako zdroj slouží trakční vedení, ze kterého pomocí sběrače přivedeme elektrický proud přímo do vozidla. Trakční vedení se rozděluje na dvě části. Pro vozidla na stejnosměrné nebo střídavé soustavě.

### 1.2.1 Stejnosměrná trolej

Napájení ze zdroje stejnosměrného proudu se bere jako historicky nejstarší. S požadavkem na výkon vozidel se zvyšovalo napětí troleje. V současné době se nejčastěji používají hladiny napětí 600V pro tramvaje a pozemní dráhy, 750V pro metro a podzemní dráhy, 1500V pro železnice a městské rychlodráhy a 3000V pro hlavní dráhy na severu Čech.

### 1.2.2 Střídavá trolej

Ve srovnání se stejnosměrným systémem napájení nám střídavá trolej umožňuje využití vyšších napětí pro přenos větších výkonů při malých ztrátách na delší vzdálenosti mezi napájecími stanicemi. Tento systém je výhradně využíván pro železniční dopravu, kde je nezbytné použití transformátoru. To způsobuje zvětšení hmotnosti soupravy. [24]

### 1.3 Rozdělení elektrické trakce podle druhu el. vozby

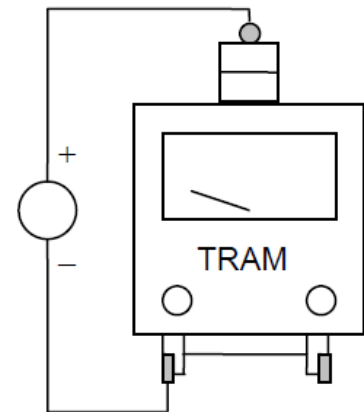
- Hlavní dálkové dráhy
- Podzemní dráhy (Metro)
- Městská hromadná doprava
- Rychlá speciální vozidla

Jak bylo v úvodu sděleno, rozhodl jsem se věnovat právě městské hromadné dopravě.

#### 1.3.1 Městská hromadná doprava

##### 1.3.1.1 Tramvaj

Tramvajová doprava je nejrozšířenější druh kolejové dopravy v MHD. Vyznačuje se tím, že k jejímu pohybu se používá elektrický pohon. Elektrickou energii získává z trolejového vedení pantografovým sběračem. Trolej vytváří kladný pól vedení a pomocí kolejnice (záporný pól), po které se tramvaj pohybuje, se proud uzavírá zpět ke zdroji. Od klasické železniční dopravy se tramvaj liší tím, že je vedena přímo v ulicích měst, provozováním pouze osobní dopravy, lehčími



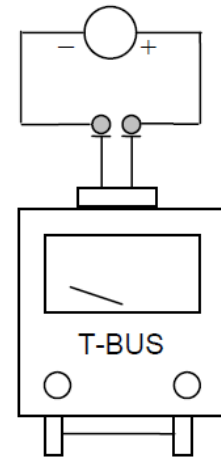
Obr.3. Princip napájení tramvaje [27]

vozidly a jízdou mezi zastávkami na kratší vzdálenosti. U tramvaje se vyskytují různé modifikace zapojení, buď jako samostatné vozidlo (souprava) nebo spojení více vagónů za sebe, které jsou společně řízeny řidičem. U nově stavěných tramvajích se dbá na co největší podíl „nízké podlahy“ a dostatečně dimenzovaném nástupním prostoru, který zajistí rychlý nástup a výstup cestujících. U klasických tramvajích je část elektrické výzbroje umístěna v podlaze a část na střeše. U nízkopodlažních tramvajích je z nedostatku místa jen na střeše a systém pohonu je řešen kolovými motory. Tramvaje se většinou staví pro jednosměrný provoz, ale můžeme se setkat i s tramvajemi pro obousměrný provoz. U druhého případu dochází ke zmenšení kapacity pro sezení. [24], [26]

### 1.3.1.2 Trolejbus

Trolejbusová doprava je nedílnou součástí městské hromadné dopravy středních a velkých měst a příměstských oblastí. Trolejbus má charakteristické vlastnosti silničního vozidla spojené s vozidlem drážním. Vzhledově i rozměrově bývá shodný s klasickým autobusem, avšak místo primárního naftového motoru je vybaven elektromotorem. Ten pro svoji funkci potřebuje dodávku elektrického proudu, který je přiváděn prostřednictvím trolejového vedení přes tyčové sběrače. V nynějších letech se využívají

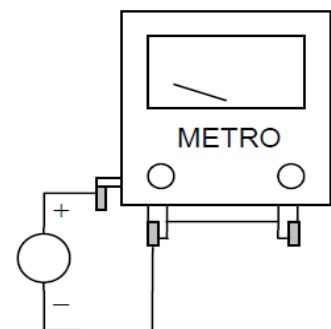
Obr.4.Princip napájení trolejbusu [27]



tzv. duobusy, které jsou navíc vybaveny dieslovým motorem pro přejezd nezatrolejovaných území. Výhody trolejbusové dopravy spočívají v ekologičnosti a jízdních vlastnostech oproti autobusům a možnosti rekuperace brzděné energie. Nevýhodou je nutná dostupnost trolejového vedení. [29]

### 1.3.1.3 Metro

Doprava pomocí metra je v české republice možná jen v hlavním městě v Praze. V ostatních státech je využívána ve velkých rozlehlých městech, kde usnadňuje a zrychluje přepravu cestujících. Nejrozsáhlejší systém metra, který čítá 25 linek, je možné najít v New Yorku. Napájení vozidla metra je obdobné jako u tramvaje, pouze s tím rozdílem, že není použito trolejové vedení, ale třetí pomocná kolej, umístěná z boku soupravy. Koleje, po kterých



Obr.5. Princip napájení metra [27]

se metro pohybuje, představují záporný pól napájecí soustavy. Kladný pól je pak tvořen právě pomocnou kolejnicí, která je uložena izolovaně. Bezkonkurenční výhoda metra je rychlost a přepravní kapacita. Nevýhoda spočívá ve velmi nákladné výstavbě nebo přepravě na krátké vzdálenosti. [29], [30]

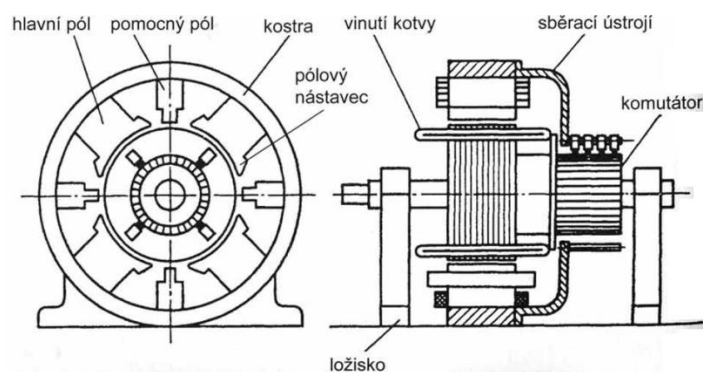
## 2 Používané systémy pohonů

### 2.1 Stejnosměrné stroje

Stejnosměrné stroje se řadí mezi nejstarší pohony. Prakticky byly využívány jako zdroje elektrické energie – dynama, nebo za účelem přeměny elektrické energie na mechanickou – motory. Za více jak sto let prošly vývojem a zdokonalováním, až na hranici poloviny 20. století, kde se jejich možnosti zastavily. [1] Díky rozvoji polovodičové techniky jsou stejnosměrné stroje ve výkonové elektronice vytlačovány konstrukčně jednoduššími asynchronními motory se střídači. [5]

I přes jejich nahrazování mají stejnosměrné stroje své kladné vlastnosti. Mezi ně patří velmi dobré regulační vlastnosti, se kterými se dají snadno realizovat potřebné řídicí obvody. Výkony stejnosměrných motorů se pohybují řádově od  $10^{-3}$  W do cca  $5 \cdot 10^6$  W. V praxi se uvádí tato hranice, která lze brát za horní hranici proveditelnosti takovýchto strojů. [1]

Stejnosměrný stroj je sestaven ze statoru (pevná část) a rotoru (pohyblivá část - kotva). Stator je obvykle vytvořen odlitím, svařením nebo mechanickým spojením z dílců, které vytváří celistvý nedělený materiál. Na statoru nalezneme vyniklé (hlavní) póly, na kterých je navinuto takzvané budící vinutí. Polarita těchto pólů se po obvodu střídá. Kromě hlavních pólů může být stator vybaven i komutačními (pomocnými) póly. Ty se umísťují právě mezi hlavní póly také se střídající se polaritou. Jejich úkolem je zlepšit chod stroje. Rotor je zhotoven z plechů, které jsou od sebe navzájem odizolované a uchycené pevně na hřídeli. V drážkách je uloženo vinutí rotoru a všechny cívky, které ho obsahují, jsou vyvedeny a připojeny na komutátor. [3]



Obr.6. Konstrukční schéma stejnosměrného motoru [31]



### 2.1.1 Komutátor

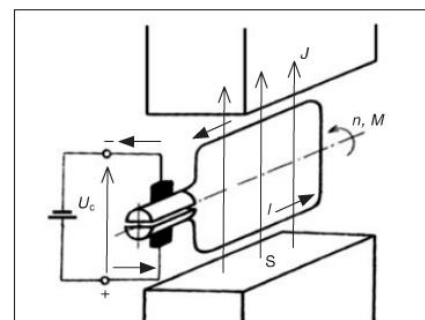
Komutátor je základním prvkem stejnosměrných strojů. Je složen z měděných plechů, které jsou navzájem od sebe izolované slídovou izolací. Vývody cívek vinutí kotvy jsou připojeny k lamelám a vytváří dutý válec, který je také elektricky odizolovaný od hřídele. Povrch komutátoru je při otáčení v kontaktu s uhlíkovými kartáči. Počet těchto kartáčů se rovná počtu hlavních pólů. Opět zde dochází ke střídání kladných a záporných kartáčů. Pomocí komutátoru se přivádí elektrický proud do vinutí rotoru. [3][6] Hlavním úkolem komutátoru je zabezpečit, aby úhel mezi magnetickým polem statoru a rotoru byl roven  $90^\circ$ . To má za následek maximální točivý moment. [1]



Obr. 7. – 1-hřídel, 2-komutátor, 3-rotor [32]

### 2.1.2 Princip činnosti motoru

Princip stejnosměrného motoru je založen na silovém působení magnetického pole mezi státorem a rotorem. Jednodušeji lze tento princip vysvětlit na smyčce (rotoru), která je napájena stejnosměrným napětím a otáčí se mezi póly statoru, které vytváří magnetické pole. Toto napájecí napětí je připojeno přes uhlíkové kartáče ke komutátoru.



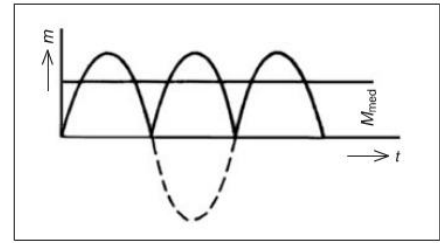
Obr. 8. Princip SS motoru [33]

Ve smyčce vlivem napájecího napětí začne protékat proud, který vytvoří vlastní magnetické pole. Toto pole ovlivňuje pole statoru. Tím vznikne výsledné pole, které je v částech zhuštěné a má za následek působení síly  $F$  na vodič. Síla  $F$  vytváří točivý moment  $M$ , pomocí kterého se smyčka roztočí otáčkami  $n$ . Otáčky jsou závislé na velikosti indukovaného napětí. Předpokládáme, že protékající proud smyčkou má konstantní velikost a tak podle rovnice r.1.

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

je konstantní i síla  $F$ . Jelikož se mění úhel, který svírají síla  $F$  a rameno síly, mění se tak

točivý moment. Průběh momentu  $M$  bude sinusový, avšak nikdy nebude nabývat záporných hodnot. To zajistí komutátor, který změní směr toku proudu a výsledná střední hodnota momentu je větší než nula. Splní se tak podmínka, aby mohl stroj pracovat v motorickém režimu.



Obr.9. Průběh momentu při komutaci [33]

Výkon motoru vychází z rovnice r.2:

$$P = M \cdot \omega \quad (W; N \cdot m; rad \cdot s^{-1}) \quad (r.2)$$

kde  $M$  – Moment SS motoru

$\omega$  – úhlová rychlost

Dále pak rovnice r.3 a r.4 popisují Moment motoru  $M$  a indukované napětí  $U_i$ :

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_a \quad (N \cdot m; -; Wb; A) \quad (r.3)$$

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

kde  $k$  – konstanta motoru

$\Phi$  – magnetický tok buzení

$I_a$  – proud kotvy

[7]

### 2.1.3 Rozdělení stejnosměrných motorů

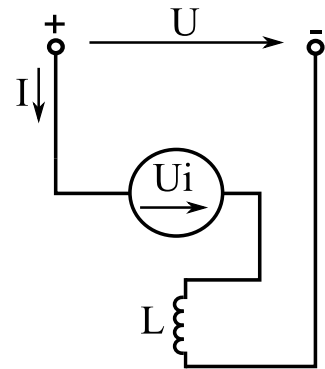
Stejnosměrné motory se dále dělí podle způsobu buzení magnetického pole:

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

V trakci se můžeme setkat výhradně s motory s cizím buzením a sériovým buzením. Proto bych tyto dva způsoby vysvětlil podrobněji. Oba dva druhy motorů byly nasazovány z důvodu jednodušší regulace a vhodné momentové charakteristiky. [5], [7]

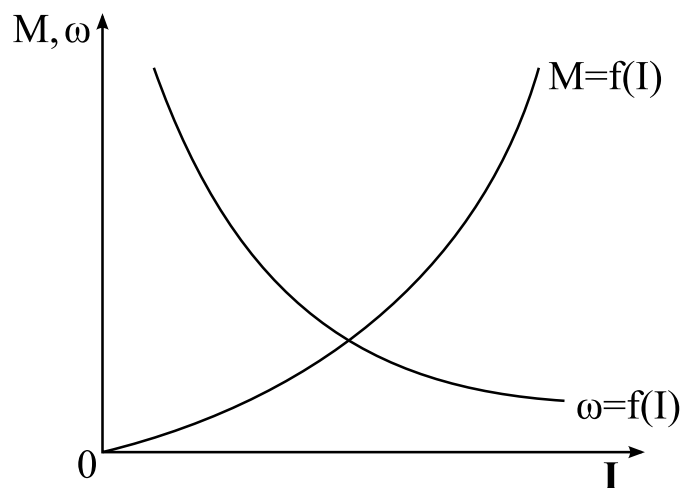
### 2.1.3.1 Stejnosemřný motor se sériovým buzením

SS motor se sériovým buzením patří historicky mezi nejstarší a nejpoužívanější typ buzení. Podle obrázku (Obr.10.) je patrné, že budící vinutí je zapojeno do série k rotoru. Tím tedy protéká stejný proud budícím vinutím i rotorem. To má za následek hyperbolickou charakteristiku rychlostní křivky.(Obr.11.)



Velkou výhodou sériového motoru je velký záběrný moment a úhlová rychlost, která se samočinně mění podle zatížení. Změnou napájecího napětí nebo zařazení odporu se dá regulovat velikost kroutícího momentu a tím i rychlost otáčení motoru. Momentová charakteristika je měkká a při zvyšujícím se zatížení otáčky klesají. Motor pracuje velmi dynamicky, a to tak, že na malou změnu zatížení reaguje značnou změnou točivého momentu. Směr otáčení motoru lze změnit opačnou polaritou proudu rotorem nebo změnou směru magnetického toku v pólech. Stejnosemřný sériově buzený motor se nesmí příliš odbudit, neboť by mohlo dojít k nekontrolovanému nárůstu otáček. To může zapříčinit přerušení budícího proudu nebo zcela odlehčení motoru. Jako jediný je tento typ stejnosemřného motoru použitelný i na střídavé síti. V praxi práci usměrňovače přebral komutátor, a aby nedocházelo k tak velkému jiskření, snížila se provozní frekvence z 50 Hz na  $16^{2/3}$ Hz.

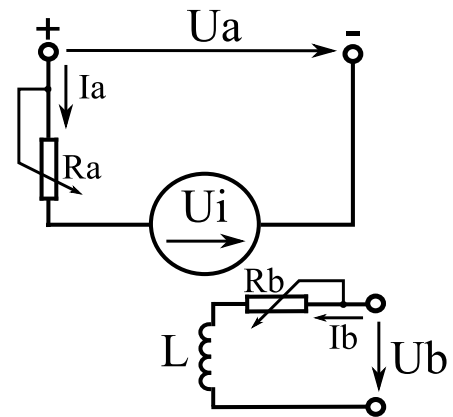
Uplatnění stejnosemřného sériově buzeného motoru se ujalo v trakčních pohonech, které využívají tramvaje, metro, elektromobily nebo elektrické lokomotivy. [1], [5], [7]



Obr.11. Zatěžovací charakteristiky SS sériového motoru [3]

### 2.1.3.2 Stejnsměrný motor s cizím buzením

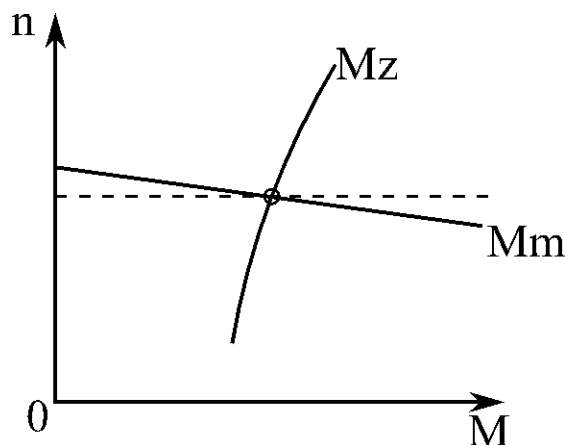
Zapojení tohoto motoru demonstruje obrázek (Obr.12.). Zdroj stejnosměrného napětí napájí přes spouštěcí rezistor rotor kotvy. Budící vinutí je taktéž napájeno ze samostatného zdroje stejnosměrného napětí v sérii s regulačním rezistorem. Jelikož jsou oba zdroje stejnosměrné s konstantní velikostí, je nutné použít v obvodu kotvy právě spouštěcí rezistor. Jeho činnost je zde jako omezovač záběrných proudů.



Pomocí regulačního rezistoru v obvodu

Obr.12. Schéma SS cizebuzeného motoru [7]

buzení se mění proud buzení a tím tedy i otáčky stroje. Tyto rezistory se používaly v době, kdy nebyly k dispozici výkonové polovodičové součástky. Jak je patrné z rovnice (r.4), velikost otáček stroje je přímo úměrná velikosti indukovaného napětí rotoru a nepřímo úměrná magnetickému toku (budícímu proudu). Velikostí napájecího napětí (od 0V do  $U_N$ ) kotvy se dají otáčky měnit v celém svém rozsahu. Při odbuzování dochází ke zvyšování otáček motoru nad jmenovitou hodnotu a budící proud by neměl být menší než 1/3 jmenovitého budícího proudu. Stejnsměrný cize buzený motor má tvrdou momentovou charakteristiku. [1], [7]



$M_m$  – Moment motoru

$M_z$  – Moment zatěžovací

Obr.13. Momentová charakteristika SS cize buzeného motoru [7]

### 2.1.4 Použití stejnosměrného motoru v trakci

Tramvaj typu T3 představuje zástupce stejnosměrných motorů v elektrické trakci. Byla vyrobena podnikem ČKD Praha za účelem snížení hmotnosti oproti svému předchůdci tramvaji T2. Jedná se o jednosměrný čtrnáct metrů dlouhý čtyřnápravový motorový tramvajový vůz vycházející z americké koncepce PCC (President's Conference Committee car).

V době vzniku se T3 řadily mezi nejmodernější vozidla, které obsahovaly nové lehké materiály, jako je například plast či sklolaminát. Váha prázdného vozu se pohybovala kolem 16 tun. Soustava je napájena ze stejnosměrného napájecího napětí o velikosti 600V, kterou pohánějí čtyři trakční motory s cizí ventilací s výkonem 40 kW. Pomocí kloubové hřídele je přes převodovku přenášěn kroutící výkon. Vůz obsahuje zjednodušenou elektrickou odporovou výzbroj typu TR 37 a je vybaven třemi druhy brzd. Jedná se o elektrodynamickou, čelist'ovou a elektromagnetickou kolejnicovou brzdu. Díky vzájemnému elektrickému a mechanickému propojení lze vozy řadit do série a z jednoho místa všechny řídit. Maximální rychlost vozu je 65 km/h, což je pro městský provoz dostačující. Modernizace tramvají T3 umožnila pohyb těchto souprav i v dnešní době. Postupem času vzniklo několik modernizovaných verzí. [44]



Obr.14. Tramvaj typu T3 [44]

## 2.2 Asynchronní stroje

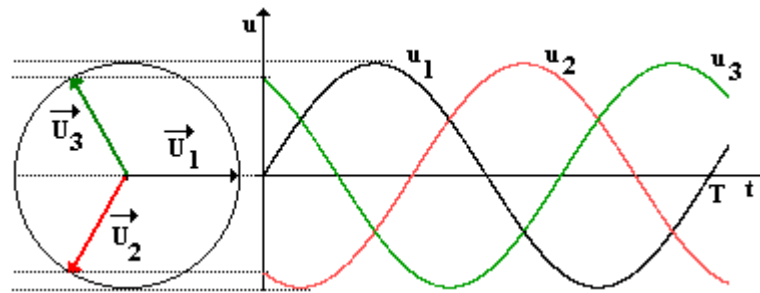
Mezi nejrozšířenější elektrické stroje samozřejmě patří stroje asynchronní, které umožňují přeměnu elektrické energie na energii mechanickou. Tyto stroje se nazývají asynchronní motory. Asynchronní stroje mohou být i ve funkci generátoru, kde mění mechanickou energii na elektrickou.

Asynchronní stroj, též zvaný jako indukční stroj, je točivý elektrický stroj, jehož magnetický obvod rozděluje malá mezera na dvě části, a to na stator a rotor. Obě tyto části jsou opatřeny vinutími. Stator asynchronního stroje je shodný jak pro motor s klecí nakrátko, tak i s vinutou kotvou. Neliší se ani od statoru synchronního motoru. Vinutí statoru jsou

uložené v drážkách magnetického obvodu, který je tvořen složením jednotlivých navzájem od sebe izolovaných plechů. Rotor asynchronního stroje je taktéž složen z plechů s drážkami, které jsou rozloženy po vnějším obvodu rotoru. Můžeme se setkat s dvojnásobným rozdělením rotoru, a to s klecovou kotvou nebo vinutou kotvou. [3]

### 2.2.1 Princip činnosti motoru

Princip činnosti asynchronního motoru je založen na silovém působení magnetického pole statoru a rotoru. Točivé pole statoru lze jednoduše vyrobit třemi cívkami, které jsou v prostoru i čase posunuty o  $120^\circ$  a jsou napájeny ze symetrického střídavého zdroje. (Obr.15)



Obr.15. Vzájemný posun fází jednotlivých napětí [39]

Superpozicí těchto pulzujících magnetických polí vzniká otáčivé pole, které probíhá po obvodu statoru synchronní úhlovou rychlostí, závislou na počtu polpárů stroje a napájecí frekvence. To popisuje rovnice r.5:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p_p} [\text{ot/min}], \quad (\text{r.5})$$

kde  $n_s$  – synchronní otáčky motoru,

$f$  – frekvence sítě,

$p_p$  – počet pólových dvojic (polpárů).

Z rovnice (r.5) vyplývá, že maximální otáčky statorového pole asynchronního motoru připojeného na síť o velikosti frekvence  $f = 50\text{Hz}$  mohou být maximálně 3000 ot/min. V poli statoru je umístěn rotor, kde jeho pole je protínáno siločárami, které do vodičů rotoru indukují elektrický proud. To vyvolá kolem rotoru magnetické pole, které ovlivňuje pole statoru a deformuje tak jeho siločáry. Tím vzniká moment, který způsobuje otáčení motoru. Rychlost pole statoru musí být větší než rychlost otáčení rotoru. Pokud by nastalo, že se rotor začne otáčet stejnou rychlostí jako je rychlost magnetického pole statoru, pak by se rotor a magnetické pole vůči sobě nepohybovali a tím by nastal jev, kdy se neindukuje žádné napětí a

následně by nevznikla ani točivá síla. Rozdíl otáček pole statoru a otáček rotoru popisuje takzvaný skluz a je definován jako:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} [-], \tag{r.6}$$

Nebo v praxi více používaný vztah:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} [-], \tag{r.7}$$

kde  $s$  – skluz [-],

$\omega_1$  – úhlová rychlost statoru  $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$ ,

$\omega$  – úhlová rychlost rotoru  $\left[\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right]$ ,

$n_1$  – otáčky statoru  $\left[\frac{\text{ot}}{\text{min}}\right]$ ,

$n$  – otáčky rotoru  $\left[\frac{\text{ot}}{\text{min}}\right]$ .

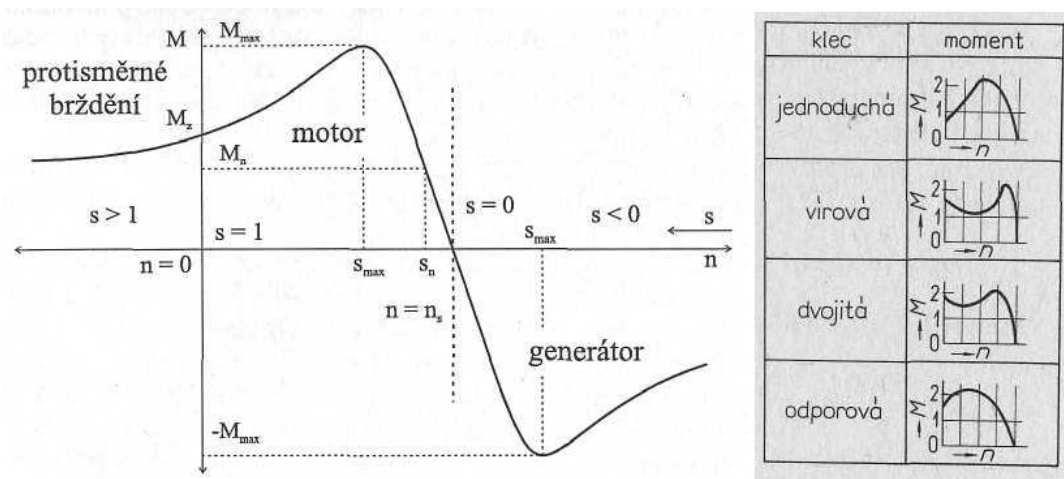
Hodnota skluzu nám jasně definuje, v jakém režimu se asynchronní stroj nachází.

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

$s \in (0, 1)$  – motorický chod

$s \in (1, \infty)$  – brzda

Při rozběhu asynchronního motoru dochází ke značným proudovým rázům, které se dají omezovat zvýšením odporu vinutí v rotoru. Díky tomu lze dosáhnout měkčí momentové charakteristiky asynchronního stroje. [36], [37]



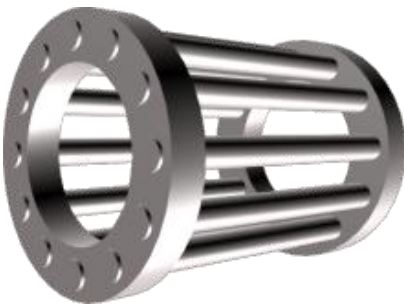
Obr.16. Momentová charakteristika AM; průběhy charakteristik podle druhu klece [40]

V trakci se výhradně používají třífázové motory s kotvou nakrátko, které jsou napájeny z měničů proměnným napětím a kmitočtem. Tím problematiku pohonu přebírá měnič a jeho řízení. Oproti stejnosměrným strojům se použitím asynchronního trakčního motoru zvětšuje spolehlivost soustavy a díky kompaktní konstrukci a snadné údržbě stačí jen v poměrně dlouhých intervalech domazávat ložiska. Jinak je to u motorů s vinutou kotvou, kde vinutí rotoru je vyvedené na kroužky, ke kterým je připojen např. rotorový spouštěč.

Tento systém pohonu se v trakci nevyužívá, proto bych se zde zaobíral právě v trakci využívaným rotorem s klecovou kotvou. [5]

## 2.2.2 Rotor s klecovou kotvou

Rotor s klecovou kotvou, nazýván také jako klec nakrátko. Tato klec je složena z vodivých



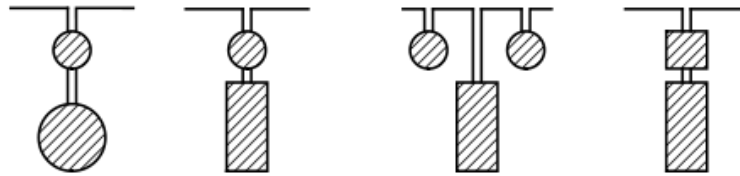
tyčí tak, že jejich konce jsou v rotorových plechách vsazeny po obvodu do drážek a jsou kruhem spojeny nakrátko. Jak je patrné z obrázku *Obr.17*, její uplatnění je velké kvůli jednoduchosti a cenovému rozdílu oproti vinuté kotvě. Díky tomu přispívá k celkovému zjednodušení asynchronního stroje. Má také ale nevýhodu v tom, že je nemožné aktivně

*Obr.17. Klecová kotva* [38] regulovat odpor vinutí. Proto se vyrábí různé druhy speciálních konstrukcí klecových vinutí, jako například klasické s kulatým průřezem tyčí, dvojitě nebo vírové. [37]

### 2.2.2.1 Dvojitá klec

Klec s dvojitými vodivými tyčkami nad sebou slouží ke zvýšení odporu rotoru při rozběhu stroje. Jedná se tedy o dvě klece nad sebou. Rozběhovou a běhovou. U rozběhové klece mají vnější tyčky menší průřez s větším odporem. Běhová klec může mít odlišný tvar, jako například obdélníkový či eliptický. Kolem tyček naindukováním proudu vzniká magnetické pole. Podle Lenzova pravidla se rozptylová pole, která indukují zpětné napětí, snaží zmenšit původní střídavé proudy v tyčkách a dochází k vytlačování proudové hustoty k povrchu rotoru do rozběhové klece. Ta díky svému většímu odporu zvyšuje záběrný moment a dochází k omezení proudových rázů. Po roztočení motoru vliv skin-efektu ustane a dojde opět k rovnoměrnému rozložení proudu v celém průřezu. Výhodou oproti ostatním uspořádáním je největší záběrný moment při nízkém rozběhovém proudu. Má však i své mínus, a to že maximální moment má z nich nejnižší. [34]

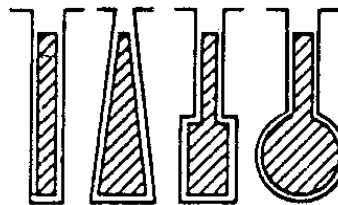




Obr.18. Příklady dvojitých klecí [41]

### 2.2.2.2 Vírová klec

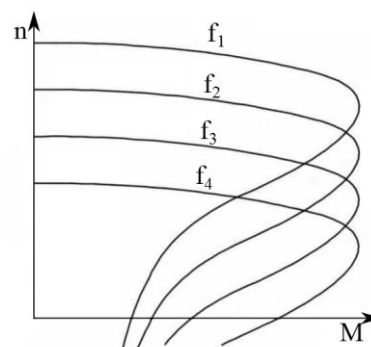
Vírová klec je založena na stejném principu jako klec dvojitá, je však jinak konstrukčně provedená. Tato klec je nazývána jako hluboko-drážková a to naznačuje, že průřez vodiče není kruhový, ale protáhlý k jádru rotoru. Tvar průřezu může být obdélníkového či lichoběžníkového tvaru. U většiny případů se používají drážky, které mají vnitřní část s větším průřezem, než je část u povrchu rotoru. Princip je opět založen na skin-effektu, tedy k vytlačování proudové hustoty k povrchu, kde je menší průřez vodiče, což má za následek zvětšení odporu a následné zmenšení rozběhového proudu. [35]



Obr.19. Druhy vírových klecí [42]

### 2.2.3 Použití asynchronního motoru v trakci

Mezi moderní pohony využívané v lehké elektrické trakci se řadí asynchronní motory s měniči frekvence. Díky těmto měničům lze snadno regulovat otáčky nebo rozběh samotného motoru. Z obrázku (Obr.20.) je patrné, že i za snížené rychlosti je moment přibližně stejně velký. [47]



Obr.20. Momentové charakteristiky [45]

Příkladem použití asynchronního motoru je například Trolejbus 31 Tr. Jedná se o osmnáctimetrový plně nízkopodlažní kloubový trolejbus, který byl vyroben na konci roku 2010. Karoserie byla vyrobena firmou SOR Libchavy a elektrickou výzbroj dodala plzeňská společnost Škoda Electric. Elektrická výzbroj je uložena ve střešních kontejnerech. Pokud se trolejbus bude pohybovat i v místech, kde není trolejové vedení, může být vybaven pomocným dieslovým agregátem s výkonem 100 kW, který se umísťuje do zadní části vozidla. Trolejbus je vybaven asynchronním trakčním motorem o výkonu 250 kW s mikroprocesorově řízeným napěťovým střídačem, který umožňuje rekuperaci brzděné energie a tím tedy snížení energetické náročnosti na provoz vozidla a náklady na jeho údržbu. [46]



Obr.21. Trolejbus 31 Tr [46]

#### 2.2.4 Výhody a nevýhody asynchronních motorů

- Výhody:
- Stroje neobsahují komutátor
  - Mechanická robustnost
  - Konstrukční jednoduchost
  - Menší požadavky na údržbu
  - Vyšší mezní výkony
  - Nižší cena

Nevýhoda - Bez použití výkonové elektroniky jsou špatně říditelné

[1], [2]

## 2.3 Synchronní stroje

Synchronní stroje patří bezesporu k nejdůležitějším elektrickým strojům pro výrobu střídavé elektrické energie. Právě tyto synchronní generátory, taktéž zvané alternátory jsou největší vyráběné točivé stroje, dosahující výkonu i přes tisíc MVA. Generátory lze rozdělit do dvou skupin, a to na rychloběžné a pomaloběžné. Mezi rychloběžné, neboli turboalternátory, lze zařadit parní a spalovací turbíny, točící se rychlostí 3000 ot/min. Naopak pomaloběžné, nazývané také hydroalternátory, se nacházejí ve vodních a větrných elektrárnách, které mají podstatně nižší otáčky.

Výkon synchronních motorů se pohybuje v rozmezí jednotek W do MW. Oproti asynchronním motorům mají synchronní motory výhodu možnosti regulace jejich účinnku. Nevýhodou nastává ale fakt, že je potřebný zdroj napájení budícího obvodu. Další a podstatnou nevýhodou je obtížnější spouštění samotného motoru, jelikož se sám nerozběhne. [1], [3]

### 2.3.1 Rozběh synchronního motoru

Nevýhoda rozběhu synchronního motoru se řeší několika způsoby. Lze použít rozběh pomocí asynchronního motoru, který je mechanicky připojen ke hřídeli synchronního motoru. Ten se roztočí na své jmenovité otáčky, které odpovídají otáčkám synchronního motoru. Teprve až synchronní stroj dosáhne jmenovitých otáček, může se stroj spustit. Následně dojde k synchronizaci motoru. Další způsob spouštění motoru je pomocí vlastního asynchronního rozběhu. Ten je řešen podobně jako u asynchronních motorů, kde se používá klec nakrátko. U synchronního motoru se využije tlumič kývání a následné spojení budícího vinutí do krátko. Vinutí musí být dostatečně dimenzované, aby nedošlo k jeho destrukci. Třetí způsob rozběhu synchronního motoru se uvádí jako frekvenční rozběh, kde je motor napájený z měniče kmitočtu. Pomocí měniče se zvyšuje frekvence napájecího zdroje až na jmenovitou hodnotu motoru. Se zvyšováním frekvence se musí zvyšovat také napájecí napětí, neboť poměr efektivní hodnoty napětí a frekvence musí být konstantní. [2], [5]

### 2.3.2 Princip synchronního motoru

Jak již bylo uvedeno v úvodu, synchronní stroj může pracovat jako generátor nebo motor. Při funkci motoru je pomocí trojfázového proudu napájeno vinutí statoru. To vytvoří točivé magnetické pole, točící se synchronní rychlostí. (princip asynchronního stroje viz strana 21). Po vytvoření magnetického toku je rotor vtažen do točivého pole statoru, neboli

vtažen do synchronismu. Nyní se otáčí synchronní rychlostí, kterou popisuje rovnice (r.8.). Moment synchronního motoru je v závislosti na rychlosti konstantní. Závislý je pouze na záporném úhlu vychýlení rotoru (zpožďuje se) s magnetickým polem. Při úhlu  $-\pi/2$  nastává mezní maximální moment  $M_{\max}$ . Pokud dojde k jeho překročení, stroj vypadne ze synchronismu a motor se následně zastaví. Tento stav je následován proudovými a momentovými rázy. [3], [8]

$$\omega_s = \frac{\omega_1}{p} [\text{rad.s}^{-1}] \quad (\text{r.8})$$

kde  $\omega_s$  je synchronní úhlová rychlost,

$\omega_1$  je úhlová rychlost napájecího systému,

$p$  je počet pólů.

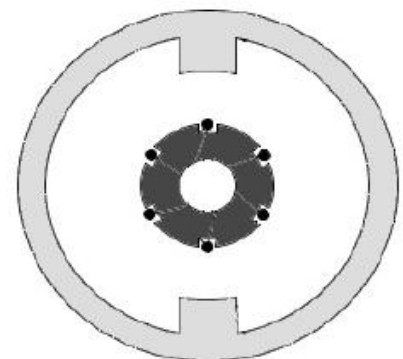
### 2.3.3 Konstrukční uspořádání synchronních strojů

Synchronní motor má stator prakticky shodný s asynchronním motorem. Taktéž je složen z izolovaných plechů a v drážkách jsou rozložena trojfázová vinutí.

Rotor se u synchronních motorů neskládá z plechů, ale je vytvořen z plné ocele. Na rotoru je umístěno budící vinutí, které je napájeno stejnosměrným proudem. Taktéž zde můžeme najít tlumící vinutí. Z konstrukčního hlediska rotoru se synchronní stroj rozlišuje na dvě skupiny. Stroj s hladkým (válcovým) rotorem a stroj s vyniklými póly. [3]

#### 2.3.3.1 Stroj s hladkým rotorem

Rotor má tvar hladkého válce, který je vyroben z jednoho kusu oceli. Budící vinutí je ukládáno po obvodu válcového rotoru do drážek a je zajištěno klíny. Drážky jsou souměrně rozloženy ve  $2/3$  obvodu rotoru. Rotor se vyrábí obvykle dvoupólový a používá se u rychlých turboalternátorů. [3][9]

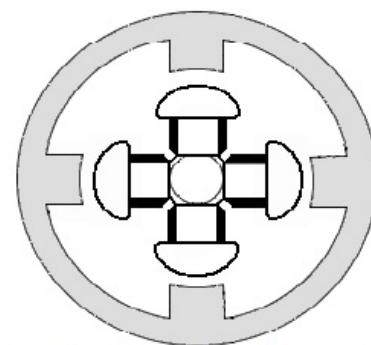


Obr.22. Stroj s hladkým rotorem [10]

#### 2.3.3.2 Stroj s vyniklými póly

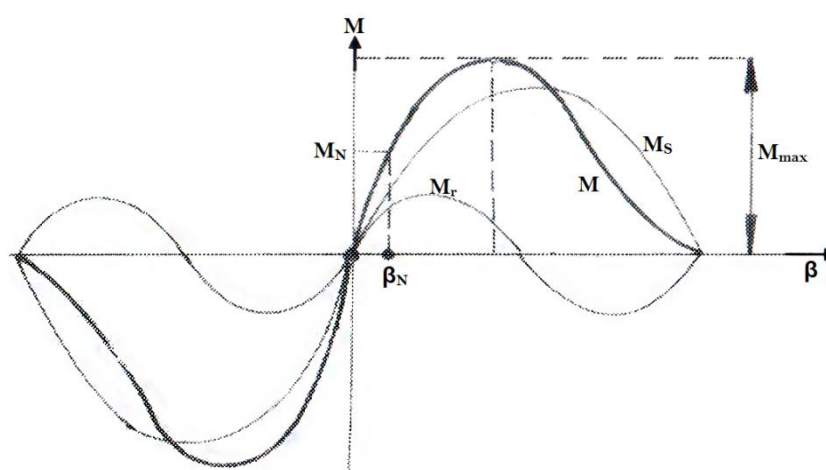
Stroj s vyniklými póly má po obvodu rotoru vytvořeny několik pólových dvojic, na kterých jsou umístěna budící vinutí. Ta jsou napájena stejnosměrným proudem a vytváří tak

s rotorem rotující elektromagnet. Moment synchronního stroje vzniká přitahováním elektromagnetu k pólům točivého pole. Mezi pólovými nástavci statoru a nad nimi, vzniká vlivem rozdílné velikosti vzduchové mezery další tzv. reluktanční moment. Tento moment vzniká v důsledku akumulace energie v místě, kde je vzduchová mezera podstatně větší než pod póly statoru. Reluktanční moment mění tvar výsledné momentové charakteristiky. Výsledný moment synchronního motoru je dále součtem



Obr.23. Stroj s vyniklými póly [10]

synchronního momentu s reluktančním momentem. To je patrné na obrázku (Obr.24.). Stroj s vyniklými póly se používá u hydroalternátorů. [3], [5]



Obr.24. Zatěžovací charakteristika synchronního motoru [2]

kde	$M_N, \beta_N$	jmenovitý moment, jmenovitý zátěžný úhel
	$M_r$	reluktanční moment
	$M_s$	moment synchronního motoru
	$M$	výsledný moment motoru
	$M_{max}$	maximální moment motoru
	$\beta$	zátěžný úhel

### 2.3.4 Použití v elektrické trakci

Tradičně je konstrukce synchronních strojů předpokládána tak, že rotor s budícím vinutím je napájen stejnosměrným proudem. Takto sestavené stroje se využívají jako alternátory v automobilové technice. Velké uplatnění si našly také pro elektrický přenos výkonu spalovacího motoru, a to u lokomotiv. V elektrické trakci se jako trakční motory s budícím vinutím v rotoru uplatňovaly jen ojediněle. [11]

Příkladem použití synchronních motorů s budícím vinutím jsou vysokorychlostní vlaky TGV Atlantique od firmy Alstom, která je dodávala pro francouzské železnice v letech 1989 až 1992 v celkovém počtu 105 souprav. Pohonná mašina je složena z osmi 3-fázových motorů pracujících na napěťové hladině 25kV o frekvenci 50Hz. Výkon jednoho trakčního motoru je 1,1MW. Každý z motorů je samostatně napájen z tyristorového střídače s napěťovým vstupem. Souprava je složena z deseti vagonů vložených mezi dvě tažné mašiny. Maximální rychlost vlaku TGV Atlantique je 300 km/h. [11], [13]



Obr.25. TGV Atlantique [14]

## 2.4 Synchronní motor s permanentními magnety

Aplikace permanentních magnetů ze speciálních slitin přinesla velký skok u motorů s malým a středním výkonem, a to kvůli velké magnetické indukci těchto magnetů. Synchronní motory s permanentními magnety, dále jen PMSM (z anglického Permanent Magnet Synchronous Motor) se používají v malých motorech v servotechnice, automatizaci a robotice o výkonech stovek W do desítek kW již desítky let. Zde PMSM nahradily krokové a stejnosměrné motory. V posledních letech se PMSM ujaly jako nová koncepce pohonů trakčních a dopravních prostředků. Intenzivnější výskyt PMSM shrneme do tří kategorií.

Náhrada synchronních strojů s budícím vinutím o výkonech stovek kW, které se používají s primárním spalovacím motorem.

V automobilové technice jde o náhradu pomocných stejnosměrných motorů

s permanentními magnety o výkonu desítek wattů do jednotek kilowattů.

Třetí, a pro trakční techniku důležité odvětví je náhrada asynchronních a stejnosměrných motorů, které pohání kolejová i nekolejová vozidla.

K tomu přispělo velké zdokonalení vlastností permanentních magnetů. [11], [12]

### 2.4.1 Permanentní magnety pro PMSM

Klíčovým prvkem PMSM jsou permanentní magnety vyrobené ze speciálních slitin vzácných zemin na bázi dvou skupin materiálů. První skupinu tvoří prvky Neodym-Železo-Bór (dále uváděno NdFeB). Druhá skupina je složena na bázi prvků Samarium-Kobalt (SmCo).

Výhoda těchto magnetů na bázi výše uvedených prvků je jejich velká remanentní indukce. Běžné permanentní magnety vyrobené na bázi feritů mají remanentní magnetickou indukci přibližně velkou 0,3 T. U slitin SmCo se tato hodnota pohybuje do 1 T. Ještě vyšší hodnotu mají magnety z NdFeB, a to 1,25 T. Častěji používanou skupinou je první z uvedených slitin magnetů NdFeB. Nejen kvůli vyšší remanentní magnetické indukci, ale také z důvodu příznivější ceny. Nevýhodou oproti slitinám SmCo je jejich menší životnost, která se udává na desítky let. Příčinou je menší odolnost vůči korozi. Velká pozornost se musí klást na provozní teploty permanentních magnetů. Při vyšší teplotě (provozní teplota u SmCo okolo 300°C a u NdFeB přibližně 100°C) dochází ke ztrátě magnetických vlastností. Je to charakteristická vlastnost magnetů ze speciálních slitin. [12]

### 2.4.2 PMSM v elektrické trakci

Konstrukce PMSM v elektrické trakci se rozděluje do dvou skupin. Konstruuje se motory s vnějším nebo s vnitřním rotorem.

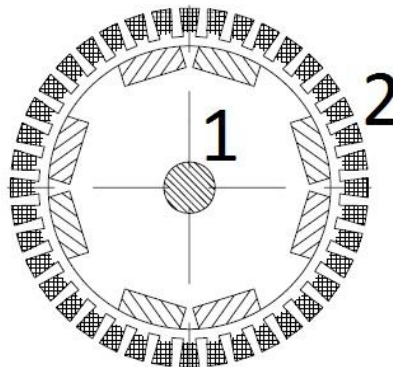
#### 2.4.2.1 PMSM s vnitřním rotorem

Stator je obdobně jako u asynchronního motoru složen z třífázového vinutí, které je umístěno v drážkách magnetického obvodu. Rotor, nesoucí permanentní magnety je umístěn uvnitř statoru. U PMSM se magnetický tok uzavírá v povrchové vrstvě, proto je možná rotor odlehčit dutinami. Po obvodu rotoru jsou dílčí segmenty (viz. Obr.26) vytvořené póly permanentních magnetů. U výkonných motorů jsou tyto segmenty omezeny na desetiny, maximálně jednotky centimetrů.



Obr.26. Segment permanentního magnetu z NdFeB [15]

Permanentní magnety se na rotor upevňují lepením a následnou bandáží kvůli zpevnění. Výroba rotorů se rozděluje na dva postupy. V prvním případě se magnety magnetují před upevněním na rotor, což sebou nese komplikace při usazování na rotor v důsledku působení magnetických sil. Druhá možnost je lepení nezmagnetizovaných permanentních magnetů na rotor a následné zmagnetování. U tohoto způsobu je nutné použít speciální přípravky. Princip PMSM s vnitřním rotorem spočívá v napájení statorového vinutí, ve kterém se vytvoří točivé magnetické pole. Účinky tohoto pole jsou obdobné jako účinky otáčejícího se magnetu. Velikostí frekvence napájecího napětí a konstrukcí stroje je dána rychlost otáčení točivého pole. Rychlost otáčení rotoru je shodná s rychlostí točivého pole. Tato podmínka je charakteristická pro synchronní stroje, které jsou vysvětleny v úvodu. Trakční pohony se synchronními motory jsou vždy napájeny z výkonových polovodičových měničů napětí s říditelnou výstupní frekvencí, neboť rychlost otáčení rotoru je možno řídit změnou frekvence napájecího napětí statoru. [11], [12]



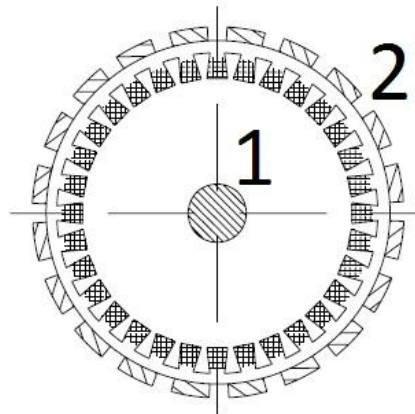
Obr.27. PMSM s vnitřním rotorem [12]  
(1- rotor s PM; 2- stator s vinutím v drážkách)

#### 2.4.2.2 PMSM s vnějším rotorem

Varianta PMSM s vnějším rotorem je konstruována tak, že trojfázově napájený stator je obepínán rotorem, který je tvořený pomocí permanentních magnetů. Jedná se o tzv. Nábojové motory. Motor tohoto typu má v praxi kratší rozměry s větším průměrem. Použití



lze nalézt v aplikacích, kde je nutné přímé uložení motoru v kolech. V těchto případech je stator spojen s osou kola. Rotor je pak součástí samotného kola. Princip funkce je shodný s PMSM s vnitřním rotorem. [11], [12]



Obr.28. PMSM s vnějším rotorem [12]  
(1- stator s vinutím v drážkách; 2- rotor s PM)

### 2.4.3 Koncepce a použití PMSM v elektrické trakci

Existuje několik koncepcí bezpřevodkových pohonů se PMSM, které se uplatňují u silničních či kolejových vozidel. Výkon těchto trakčních motorů se pohybuje v rozmezí od stovek wattů do stovek kilowattů.

U silničních vozidel se spíše preferuje řešení se PMSM s vnějším rotorem, neboť se aplikují přímo do kol. Příkladem využití tohoto systému je automobil značky Toyota Prius, který je poháněn hybridním motorem.

Konstrukce motoru s vnějším rotorem u kolejových vozidel přináší nevýhody v tom, že by docházelo ke zvyšování neodpružené hmoty a dále pak při jízdě ke zvýšení mechanických rázů v trati a její blízkosti. Proto se u kolejového vozidla s individuálním pohonem kol používá systém PMSM s vnitřním rotorem. Velkou výhodou to přináší nízkopodlažním tramvajím, kde absence nápravy kol zvětšuje prostor pro plochu podlahy. Příkladem kolejových vozidel, která využívají PMSM je japonský příměstský vlak e-train. Vlak je realizován s přímými pohony náprav, kde jeden motor má výkon 160 kW. Příklad užití v tramvajové dopravě je tramvaj Citadis od firmy Alstom (Obr.30.), která má výkon jednoho motoru 100 kW.



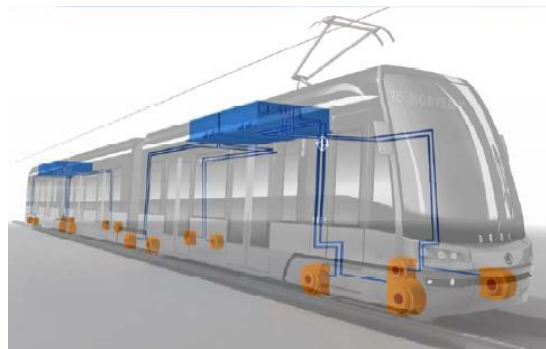
Obr.30. Tramvaj Citadis [16]

Jako zajímavost použití PMSM lze také představit vozy metra od firmy Siemens, které mají kolové pohony vozů o výkonu motoru 65 kW a jezdí na pneumatikách. V české republice se můžeme setkat jen s jedním typem trakčního vozidla se PMSM, které zde bylo vyrobeno. [12]

Jedná se o plně nízkopodlažní tramvaj typu 15T ForCity od plzeňské firmy Škoda Transportation a.s.. Tramvaj byla vyrobena s ohledem na nejnáročnější provozní podmínky velkých evropských měst. Pohon zajišťuje šestnáct trakčních PMSM s vnitřním rotorem o výkonu 45 kW, zajišťující individuální pohon všech kol. Velká výhoda této tramvaje spočívá v otočných podvozcích. Ty jsou šetrné ke kolejím a snižují tím náklady na údržbu a opravy infrastruktury i vozidla samotného. Oproti starším typům tramvají je 15T ForCity mnohem tišší. Pohonné jednotky jsou tvořeny trakčním kontejnerem s IGBT měniči, umístěným na střeše vozidla a čtyřmi trakčními motory. Umístění kontejnerů je výhodné pro montáž i demontáž s běžně dostupnou technikou. Trakční motory nepotřebují převodovku, neboť disponují s velkým točivým momentem přenášeným přímo přes mechanicky rozpojitelné zubové spojky. Trakční výzbroj je opatřena elektrodynamickou brzdou, která umožňuje rekuperaci brzdové energie zpět do sítě. Pokud nelze provést rekuperaci brzdové energie, je následně část této energie využita k napájení pomocných spotřebičů u vozidla a zbytek je zmařen v brzdovém odporu. Kromě elektrodynamické brzdy je ve voze také třecí kotoučová brzda, která se používá také jako parkovací brzda. Jak již bylo zmíněno v úvodu, tramvaj je 100% nízkopodlažní. To umožňuje snadný výstup a nástup cestujícím se sníženou pohyblivostí a hlavně pro rychlou výměnu pasažérů v poměrně krátké době. [17]



Obr.31. Tramvaj 15T ForCity [17]



Obr.32. Uspořádání el. Výzbroje [43]

#### 2.4.4 Výhody a nevýhody PMSM

Tak jako byl srovnáván stejnosměrný motor (SSM) s motorem asynchronním (ASM), nastává obdobná situace při porovnávání vlastností a konstrukce asynchronního motoru se synchronním motorem s permanentními magnety (PMSM).

Výhody PMSM lze shrnout do několika bodů:

- Až 3krát větší úspora objemu a hmotnosti oproti ASM a SSM
- Velká momentová přetížitelnost motoru (až 3krát)
- Vyšší účinnost (až o jednotky %) oproti ASM (kvůli absenci Joulových ztrát v rotoru)
- Velký poměr mezi výkonem a hmotností motoru
- Nižší ztráty elektrického stroje
- Lze konstruovat výkonné pomaloběžné motory pro bezpřevodovkové pohony
- Nepřetržitá pohotovost při přechodu do režimu elektrodynamické brzdy
- Absence budícího vinutí v rotoru a zdroje stejnosměrného napětí
- Použití v kolových pohonech nízkopodlažních tramvají

Nevýhody PMSM:

- Konstrukční a technologická náročnost výroby a oprav oproti ASM
- Vyšší pořizovací cena
- Narušení magnetických vlastností permanentních magnetů v poruchových stavech
- Při vzniku zkratu stroj pracuje v generátorickém režimu do tohoto zkratu = proudové a momentové rázy = nemožnost odbuzení stroje [11], [12]

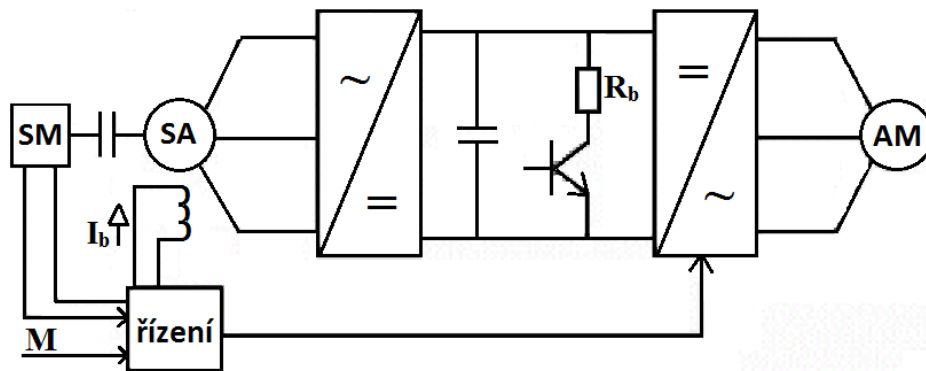
### 3 Synchronní stroje v systémech se spalovacím motorem

V současné době se jako alternátory používají synchronní stroje s budícím vinutím na rotoru. V oblastech, kde se vyskytuje tato problematika, narazíme na automobilové alternátory, trakční alternátory pro přenos elektrického výkonu u lokomotiv či výkonných silničních vozidel. Výhodou u obou případů je vhodné využití možnosti změny výstupního napětí alternátoru změnou budícího proudu. V posledních letech se regulace proudu pro dobíjení akumulátoru provádí pomocí tyristorového usměrňovače, který se objevuje u nově nasazovaných alternátorů s permanentními magnety. Speciálně konstruované synchronní stroje s permanentními magnety jsou novým řešením tzv. startéralternátorů u automobilů. Ve

funkci startéru umožňuje dosáhnout velkých poměrů otáček a momentu (stovky otáček za minutu a velký moment). Ve funkci alternátoru jde o tisíce otáček za minutu. [11]

### 3.1 Elektrický přenos výkonu spalovacího motoru

Z obrázku (Obr.33.) je patrné, že spalovací motor (SM) pohání synchronní alternátor (SA), pomocí kterého se přes diodový usměrňovač napájí vstupní napěťový obvod trakčního střídače. Z výstupu tohoto střídače je napájen střídavý trakční motor (AM). V režimu elektrodynamické brzdy je pomocí odporu  $R_b$  mařena brzdná energie.



Obr.33. Elektrický přenos výkonu spalovacího motoru [11]

Charakteristickým znakem této soustavy je nemožnost v libovolném okamžiku dosáhnout libovolné tažné síly. Dosáhnutí libovolného okamžitého výkonu je spojeno s otáčkami spalovacího motoru. To vychází z faktu, že trakční pohon je limitován výkonem spalovacího motoru. Proto je důležité sladit požadavky trakčního pohonu s motorem spalovacím. Možnost řízení magnetického toku synchronního alternátoru nám umožňuje udržovat vstupní napětí trakčního střídače s konstantní hodnotou nebo jej také regulovat v závislosti na režimu trakčního pohonu. Řízení budícího proudu synchronního alternátoru zohledňuje okamžité otáčky spalovacího motoru a rychlost vozidla. [11]

### 3.2 Alternativní pohony s PMSM

PMSM našly také uplatnění v alternativních pohonech vozidel. Z elektrické trakce sem patří tzv. duobusy. Jsou to trolejbusy, které mají trakční pohon doplněn spalovacím motorem. To jim umožňuje přejezd úseku, který není zatrolejovaný.

Zajímavý příklad představuje americké město Boston, které využívá na své lince kloubový duobus řady DMA. Dodavatelem se stala společnost Neoplan. Elektrickou výzbroj pro tyto duobusy poskytla česká firma Škoda Electric z Plzně. Linka je složena z napájených

úseků, které tvoří podzemní a pozemní části. Zbytek trasy není opatřen napájecím vedením. V úsecích, kde není duobus napájen z vedení je použit jako primární pohon spalovací motor s výkonem 373 kW, který napájí alternátor tvořený permanentními magnety. Tam, kde je možnost využívat elektrickou energii, jsou využity dva trakční asynchronní motory o jmenovitém výkonu 120 kW.



Obr.34. Duobus řady DMA [19]

Závěrem tohoto článku bych vyzdvihl skutečnost, že u těchto duobusů byly použity jedny z nejvýkonnějších strojů využívající permanentní magnety. [11]

### 3.3 Hybridní pohon s PMSM

Synchronní stroje s permanentními magnety našly také velké uplatnění v tzv. hybridních pohonech. Druh tohoto pohonu se používá z části nebo zcela pro elektrický přenos výkonu spalovacího motoru a je zároveň doplněn o akumulční člen (akumulátor) elektrické energie. Tak jako u elektrického přenosu výkonu bylo možné sladit optimální chod spalovacího motoru s požadavky trakčního pohonu, hybridní pohon tuto možnost také umožňuje. Akumulátor elektrické energie využívají hybridní pohony pro pokrytí špičkových odběrů energie, jako je například prudké rozjíždění či předjíždění. Navíc nám umožňuje nižší dimenzování spalovacího motoru nebo použití čistě elektrického provozu. Obrovskou výhodou je také možnost rekuperace brzděné energie. [11]

#### 3.3.1 Sériová hybridní konfigurace

U konfigurace tohoto typu není spalovací motor přímo spojen s pohonným ústrojím, nýbrž pohání generátor, ze kterého se napájí elektromotor či dobíjí baterie. Kola jsou proto poháněna výhradně elektromotorem. Tento systém využívá například trolejbus s agregátem, který není momentálně připojen na síť. [20]

#### 3.3.2 Paralelní hybridní konfigurace

Paralelní kombinace vychází z přímého napojení spalovacího motoru i elektromotoru na převodovku tak, aby bylo možné zajišťovat pohyb vozidla jak samostatně, tak obou společně. Paralelní hybridní konfigurace je účinnější a mnohem praktičtější než sériová, a to z důvodu přímého pohonu kol mechanickou cestou. [20]

### 3.3.3 Kombinovaná hybridní konfigurace

Z názvu již vyplývá, že jde o kombinaci sériové a paralelní konfigurace. První kombinace se nazývá přepínatelná, která umožňuje práci čistě v sériovém zapojení při rozpojené spojce. Pokud dojde k sepnutí spojky, pak stroj pracuje v čistě paralelní konfiguraci, nazývaní se jako pohon s dělením výkonu. [21]

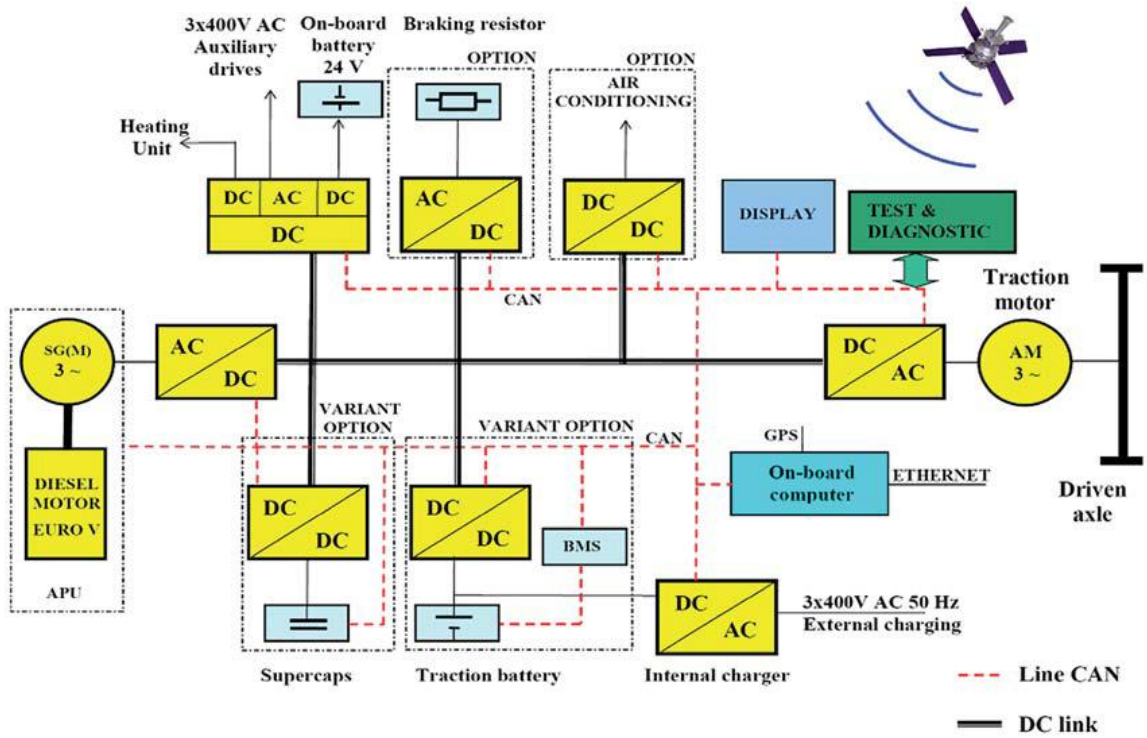
### 3.4 Použití hybridních pohonů

Spoluprací plzeňské firmy Škoda Electric a polského výrobce Solaris vznikl hybridní autobus, který nese označení Škoda H12 Solaris. Hybridbus byl sestaven se sériovým řešením hybridního pohonu (viz. Obr.36.), který je efektivnější v hustém provozu městského centra, kde dochází k častým rozjezdům či brzdění. Přednost sériového řešení také vyplývá z možnosti vybavení vozidel s více poháněnými



Obr.35. Hybridbus H12 [18]

nápravami, které paralelní hybrid neumožňuje. Obrázek (Obr.36.) demonstruje konstrukci vozidla. Ve vozidle je použit dieslový motor s výkonem 184 kW, který pohání synchronní generátor s vodním chlazením (SG) o výkonu 188 kW, vyrábějící střídavé napětí. Vyrobene napětí se usměrní (600-750 V) a pomocí pulzního měniče (DC/DC) je předáváno pro nabíjení Li-ion baterií s kapacitou 69 Ah. Baterie, které jsou uloženy pod sedačkami cestujících, doplňuje sada superkondenzátorů, které se využívají zejména pro rozjezd vozidla. Pomocí rekuperace, generátoru či veřejné sítě lze baterie a superkondenzátory dobíjet. Pohon hybridního autobusu zajišťuje třífázový asynchronní motor (AM) o výkonu 130 kW, který je napájen z trakčního měniče (DC/AC). Řídící automatika systému dává v praxi přednost jízdě na akumulátory, které se svojí kapacitou vystačí na ujetí cca 10 km. Úspory paliva se pohybují mezi 10 až 25 % v závislosti na druhu trasy. Na tříletém vývoji hybridního autobusu H12 se také nemalou měrou podílela Fakulta elektrotechnická ze Západočeské univerzity v Plzni, Univerzita z Pardubic a také Regionální Inovační Centrum Elektrotechniky (RICE). [22], [23]



Obr.36. Schéma provedení hybridního autobusu H12 [18]

## Závěr

Elektrická trakce patří mezi nejvýznamnější skupinu v dopravě. Jedná se o velmi rozsáhlé téma, které zahrnuje hlavní dálkové dráhy, podzemní dráhy, rychlá speciální vozidla a neméně důležitou skupinu známou pod názvem městská hromadná doprava. Právě poslední téma, tedy lehká elektrická trakce, mě velice zaujalo, a to z důvodu každodenního používání pro přepravu osob. Do městské hromadné dopravy jsou zahrnuty tramvaje, trojebusy a metro. Jedná se o dopravní prostředky, které využívají ke svému pohonu elektřinu odebíranou ze speciálních drážních těles a trolejových vedení. Výhoda těchto elektrických dopravních vozidel spočívá v ekologii a velké přepravní kapacitě osob. Ve velkých městech umožňuje rychlý transport a komfort cestujících. Bohužel má elektrická trakce i své nevýhody v podobě velké finanční náročnosti na výstavbu tratí a následný provoz. Předchůdcem dnešní klasické elektrické trakce byly koněspřežky a parní tramvaje.

Systémy pohonu elektrické trakce prošly značným vývojem a zdokonalováním. Jako pohon byly využívány stejnosměrné i střídavé stroje. V minulosti byly velmi rozšířeny pohony se stejnosměrnými motory. Díky jejich jednoduchému řízení a velkému rozsahu výkonů a otáček se staly nedílnou součástí elektrické trakce. Rozvoj výkonové elektroniky zapříčinil v polovině 20. století zastavení vývoje stejnosměrných strojů. Ty byly následně vytlačovány konstrukčně jednoduššími asynchronními motory, známými také pod názvem indukční stroje. Díky výkonové elektronice se charakteristiky asynchronních motorů vyrovnávají v požadovaném rozsahu charakteristikám stejnosměrných motorů. Odpadá zde i nevýhoda používání komutátoru. Asynchronní motory se díky svým menším rozměrům, snadné údržbě a malé poruchovosti staly nejpoužívanějšími motory vůbec. Synchronní stroje se uplatňují v elektrické trakci jako alternátory a stroje pro přenos elektrického výkonu spalovacího motoru, zejména pak u lokomotiv. Jako trakční motory s budícím vinutím v rotoru se uplatňovaly jen ojediněle. Velký převrat synchronních motorů nastal při použití permanentních magnetů, u kterých došlo ke zdokonalení jejich vlastností. Jako pohon se používá PMSM s vnitřním rotorem, který je použit přímo v kole nápravy. Výhoda spočívá v maximalizování užitečného prostoru a následné stavbě nízkopodlažních vozidel. Příkladem je tramvaj 15T ForCity (str. 34), která je jediným typem v české republice využívající pohon pomocí PMSM.

Synchronní stroje s permanentními magnety jsou také využívány ve vozidlech s hybridním pohonem. Jedná se o elektrický přenos výkonu spalovacího motoru doplněného o akumulací člen elektrické energie. Této části je věnována třetí kapitola bakalářské práce.



Hybridní pohon je šetrnější k životnímu prostředí a umožňuje úsporu paliva o 10 až 25%. Příkladem hybridního pohonu je Hybridbus H12, popsáný na straně 38. Zajímavá otázka nastává, proč není použit PMSM jako pohon zmíněného Hybridbusu H12. Základní důvod nepoužití motoru s PM je cena, chování v havarijních stavech a jejich řádné ošetření.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav et al. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006, 139 s. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [2] KŮS, Václav. *Elektrické pohony a výkonová elektronika*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006, 182 s. ISBN 80-704-3422-8.
- [3] UHLÍŘ, Ivan. *Elektrické stroje a pohony*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 120 s. ISBN 80-010-2482-2.
- [4] PISKAČ, Luděk. *Elektrické pohony: principy a funkce*. 2., upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008, 119 s. ISBN 978-80-7043-688-2.
- [5] HRUŠKA, Karel. *Elektrické stroje pro trakci*. Plzeň, 2005. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Bohumil Skala.
- [6] Komutace. In: [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/terminolog/eterminologitem.2005-05-22.0782698837>
- [7] Elektrické motory. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2013. ISSN ISSN 1210-0889.
- [8] KOCMAN, Stanislav a Václav VRÁNA. *SYNCHRONNÍ STROJE*. [online]. 2005. vyd. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab\\_synchronni\\_stroje\\_bc.pdf](http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/hgf/elektrotechnika/sylab_synchronni_stroje_bc.pdf)
- [9] Elektrické stroje. In: [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://ok1zed.sweb.cz/s/el\\_generator.htm](http://ok1zed.sweb.cz/s/el_generator.htm)
- [10] RŮŽIČKA, Luboš. *Synchronní stroje s permanentními magnety pro trakční účely*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Karel Hruška
- [11] NOVÁK, Jaroslav. *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice*. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., roč. 2006, č. 6. ISSN 1210-0889. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=26832](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26832)
- [12] ČERNÝ, Ondřej, Radovan DOLEČEK a Jaroslav NOVÁK. *Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel*. [online]. 2010, s. 9 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.cd rail.cz/VT S/CLANKY/vts29/2908.pdf>
- [13] TGV Atlantique míří k Atlantiku. In: [online]. 2000 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://rail.sk/tgv/tgv8.htm>
- [14] Paris reliée à Figueras en TGV. In: [online]. 2010 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.oopartir.com/actualite-voyage,23-2500.htm>
- [15] NdFeB magnets-Segment Shape. In: [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://www.tjskl.org.cn/images/czad51a5-pz246f0fb-ndfeb\\_magnets\\_segment\\_shape.html](http://www.tjskl.org.cn/images/czad51a5-pz246f0fb-ndfeb_magnets_segment_shape.html)
- [16] Model. In: [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.tramshop.amsterdamsetram.nl/UKmodel3.html>
- [17] Tramvaj ForCity Praha: Produktový katalog. In: [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/tramvaje/tramvaj-forcity-praha/Contents.3/0/6171EDE800323AFE8E7E7A6EAD357F30/resource.pdf>
- [18] Hybridbus H12. Prospekt Škoda Electric a.s.
- [19] USA Corp. kloubový. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://trolejbusy.plzenskamhd.net/?page=prehledtrol0.html>
- [20] Allison Transmission - tradice v hybridních technologiích. [online]. 2010 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.busportal.cz/modules.php?name=article&sid=7159>

- [21] ČEŘOVSKÝ, Z., Z. HALÁMKA, P. HANUŠ, P. MINDL a V. PAVELKA. *Hybridní pohony automobilů a výzkumné pracoviště hybridních pohonů* [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2002/k314-SYMEP.pdf>
- [22] Autobusy – Hybridní autobus Škoda H12 Solaris. [online]. 2012 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://www.automobilrevue.cz/rubriky/truck-bus/predstavujeme/autobusy-hybridni-autobus-skoda-h12-solaris\\_41404.html](http://www.automobilrevue.cz/rubriky/truck-bus/predstavujeme/autobusy-hybridni-autobus-skoda-h12-solaris_41404.html)
- [23] Hybridní autobus v ulicích Plzně. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://rice.zcu.cz/aktuality/18.xhtml>
- [24] DANZER, Jiří. *Elektrická trakce*. Vyd. 1. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009, 77 s. ISBN 978-80-7043-769-8.
- [25] Elektrická trakce. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://coptel.coptkm.cz/reposit.php?action=0&id=4978>
- [26] Tramvajová doprava. In: [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Tramvajová\\_doprava](http://cs.wikipedia.org/wiki/Tramvajová_doprava)
- [27] KOSTKA, Tomáš. *Užití elektrické energie: Elektrická trakce*. [online]. 2004 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna\\_eltech/uee/trakce\\_teplo\\_svetlo.pdf](http://www.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/uee/trakce_teplo_svetlo.pdf)
- [28] Základní pojmy z oblasti mechaniky v dopravě. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Zakladni\\_pojmy.htm](http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Zakladni_pojmy.htm)
- [29] Elektrická trakce v městské hromadné dopravě včera, dnes (a zítra). [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.turistika.cz/rady/elektricka-trakce-v-mestske-hromadne-doprave-vcera-dnes-a-zitra>
- [30] Přívodní kolejnice - napájení vozů metra. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.metroweb.cz/metro/TECH/kolejnice.htm>
- [31] Princip stejnosměrných motorů. [online]. 2008 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/princip-stejnosmernych-motoru>
- [32] Rotory: Komutátor. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.sopo.cz/cz/fotogalerie/2/>
- [33] Elektrické motory: Stejnoseměrné motory [online]. 2013 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2013/01/Elektro\\_01\\_2013\\_output/web/flipviewerexpress.html?pn=0064](http://www.odbornecasopisy.cz/flipviewer/Elektro/2013/01/Elektro_01_2013_output/web/flipviewerexpress.html?pn=0064)
- [34] Motory. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://www.myinfo.sk/download/SKOLA/002-Motory\\_TYPY\\_33str.pdf](http://www.myinfo.sk/download/SKOLA/002-Motory_TYPY_33str.pdf)
- [35] HRUBÝ, Ladislav. *Asynchronní stroje pro trakční účely*. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Karel Hruška
- [36] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2*. Vyd. 1. Překlad Břetislav Benda. Praha: Academia, 1982, 728 s. ISBN 21-055-82.
- [37] Asynchronní (indukční) stroje (motory). [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/VS/kap23.pdf>
- [38] Asynchronní motor s kotvou nakrátko. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici\\_systemy\\_akcni\\_cleny/](http://www.e-automatizace.cz/ebooks/ridici_systemy_akcni_cleny/)
- [39] Generátor střídavého proudu. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/324-generator-stridaveho-proudu>
- [40] Mechanická charakteristika asynchronního motoru. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni\\_materialy/motory/indukcni\\_motor/asynchr\\_motor\\_teorie.pdf](http://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/indukcni_motor/asynchr_motor_teorie.pdf)
- [41] Druhy kotev s dvojitou klecí. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronní\\_motor](http://cs.wikipedia.org/wiki/Asynchronní_motor)

- [42] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2002. 135 s. ISBN 80-248-0025-X.
- [43] SOBOTKA, Ladislav. *Moderní trakční pohony* [online]. Škoda Eletric a.s.[cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.railvolution.net/czechraildays/2009/seminare/kv06.pdf>
- [44] Typy tramvajových vozů - novostavby. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.mhdcr.biz/tram/tramvaj,typy-novostavby.htm>
- [45] Řízení rychlosti otáčení indukčního motoru: Momentové charakteristiky. [online]. 2008 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/rizeni-rychlosti-otaceni-indukcniho-motoru>
- [46] Trolejbus 31 Tr. [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.skoda.cz/cs/produkty/trolejbusy/trolejbus-31-tr-sor/>
- [47] PAVELKOVÁ, Naděžda. *Moderní pohony s asynchronními motory a měniči frekvence*. Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2010, roč. 2010, č. 5. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/41060.pdf>