

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Trakční elektromotor pro pohon motokáry

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš MERTL**
Osobní číslo: **E11B0059P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Trakční elektromotor pro pohon motokáry**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

Předmětem bakalářské práce je rešerše současného stavu elektropohonů pro elektromobily. Práce bude dále obsahovat problematiku dynamiky mobilních vozidel. Následně bude provedeno porovnání výhod a nevýhod jednotlivých druhů trakčních motorů. V práci bude také zmíněna problematika napájení motoru pomocí polovodičových měničů včetně problematiky trakčních baterií.

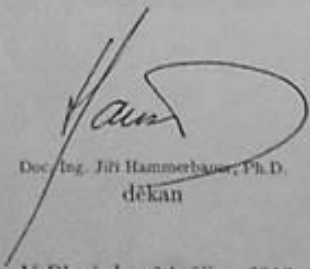
1. Proveďte literární rešerši trakčních motorů používaných v elektromobilech.
2. Uveďte základní vlastnosti, principy, parametry a konstrukční řešení daných strojů.
3. Uveďte základní principy a možnosti elektromotorů v elektromobilech.
4. Zhodnoťte vývoj trakčních motorů v elektromobilech v blízké budoucnosti.

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

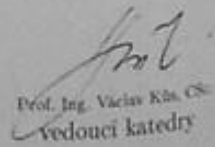
1. Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I.: Teorie elektrických strojů, 1968.
2. Toliyat, A. H., Kliman, B. G.: Handbook of electric motors, CRC Press, 2004, ISBN: 100-8247-4105-6.
3. Veřejně dostupné informační zdroje, databáze www.ieee.org

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Luboš Streit
Regionální inovační centrum elektrotechniky

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


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




Prof. Ing. Václav Kša, CSc.
Vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na rozdělení a porovnání vhodných trakčních motorů pro pohon motokáry...

Klíčová slova

Trakční pohon, asynchronní motor, synchronní motor, stejnosměrný motor, BLDC, měnič, trakční baterie, ...

Abstract

The master theses, is focused on comparison and differences of traction motors suitable for electric karts...

Key words

Traction motors, asynchronous motor, synchronous motor, dc motor, BLDC, converter, traction batteries, ...

Prohlášení

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 8.6.2014

Tomáš Mertl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lubošovi Streitovi, za jeho věnovaný čas, cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD	10
2 TRAKČNÍ POHON	11
2.1 DEFINICE TRAKČNÍHO POHONU.....	11
2.2 DRUHY TRAKČNÍCH POHONŮ	11
2.3 STŘÍDAVÉ MOTORY.....	12
2.3.1 <i>Asynchronní motory</i>	12
2.3.2 <i>Synchronní motory</i>	14
2.4 SPECIÁLNÍ MOTORY	19
2.4.1 <i>BLDC motor</i>	19
2.4.2 <i>Stejnoseměrný motor s permanentními magnety</i>	21
2.4.3 <i>Reluktanční motor</i>	22
3 DRUHY POLOVODIČOVÝCH MĚNIČŮ	23
3.1 SNIŽUJÍCÍ PULZNÍ MĚNIČ	23
3.2 REKUPERAČNÍ PULZNÍ MĚNIČ	26
3.3 ZVYŠUJÍCÍ PULZNÍ MĚNIČ.....	27
3.4 STŘÍDAČ	28
3.4.1 <i>Trojfázový střídač</i>	28
4 PROBLEMATIKA TRAKČNÍCH BATERIÍ	29
4.1 HISTORIE TRAKČNÍCH BATERIÍ.....	29
4.2 TYPY LITHIOVÝCH BATERIÍ.....	30
4.2.1 <i>Lithium nikl kobalt oxid hliníku (LiNiCoAlO₂)</i>	31
4.2.2 <i>Lithium oxid manganu (LiMn₂O₄)</i>	31
4.2.3 <i>Lithium fosfát železa (LiFePO₄)</i>	33
4.2.4 <i>Lithium nikl-mangan oxid kobaltu (LiNiMnCoO₂)</i>	33
4.2.5 <i>Lithium oxid titanu (Li₄Ti₅O₁₂)</i>	34
4.3 MOŽNOSTI NABÍJENÍ	35
ZÁVĚR	36
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	37

Seznam symbolů a zkratk

f	Frekvence [Hz]
M	Moment motoru [Nm]
Ψ	Programový úhel [$^{\circ}$]
AM.....	Asynchronní motor
SM.....	Programový úhel [$^{\circ}$]
DC.....	Stejnoseměrný motor
RM.....	Reluktanční motor
PM.....	Permanentní magnet
PMSM.....	Stejnoseměrný motor s permanentními magnety
DDE	Direct drive engine
BLDC.....	Bezkartáčový stejnosměrný motor
IGBT	Tranzistor s izolovaným hradlem
R.....	Elektrický odpor [Ω]
L.....	Indukčnost [H]
C.....	Kapacita [F]
U_i	elektrické napětí indukované [V]
I.....	Elektrický proud [A]
p	počet pólových dvojic
PWM.....	Pulzně šířková modulace
ω	Otáčivá rychlost [$rad.s^{-1}$]
ω_1	Otáčivá rychlost statoru [$rad.s^{-1}$]
ω_2	Otáčivá rychlost rotoru [$rad.s^{-1}$]
V.....	Spínací prvek
t_z	Čas sepnutí
U_{dAv}	střední hodnota stejnosměrného napětí
LCO	Lithium kobalt oxid
LMO.....	Lithium mangan oxid
LFP.....	Lithium železo fosfát
NMC	Lithium nikl mangan kobalt oxid
NCA.....	Lithium nikl kobalt aluminium oxid
LTO.....	Lithium titanát

1 Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na pohony motokár, různé druhy pohonů včetně řízení a napájení samotných pohonů z pohledu nejpoužívanějších baterií.

Text je rozdělen do tří částí; první se zabývá rozdělením a vlastnostmi trakčních pohonů vhodných pro pohon motokáry, druhá uvádí možnosti řízení zvolených pohonů. Třetí část popisuje problematiku trakčních baterií pro trakční pohony.

2 Trakční pohon

2.1 Definice trakčního pohonu

Trakční motor je elektromotor, který se vyznačuje nějakou speciální konstrukcí. Je to motor, který pohání buď jedno kolo, nebo soukolí vozidla. Tyto motory jsou většinou napájeny z trakčního vedení. V našem případě nahradí trakční vedení vhodně zvolená baterie s dostatečnou pohonnou energií.

Řazení trakčních motorů

Hnací vozidla elektrické trakce mají obvykle dvě možnosti zapojení trakčních motorů:

- sériové
- sérioparalelní

Trakční motory jsou rozděleny do skupin po dvou motorech (tj. motory jednoho podvozku), nazývaných motorové skupiny.

Dva motory v rámci jedné motorové skupiny jsou trvale zapojeny v sérii. Tyto skupiny lze řadit sériově, nebo paralelně (sérioparalel). Přejít ze série na paralel se realizuje postupně několika jízdními stupni (podle maximální rychlosti vozidla).

2.2 Druhy trakčních pohonů

Trakční pohony dělíme na několik druhů, které se pak dále větví na konkrétní typy z hlediska konstrukčního řešení.

Stejnoseměrné motory

- *Sériové*
- *Cíze buzené (budícími cívkami nebo permanentními magnety)*
- *Derivační*
- *Kompaundní*

Střídavé

- *Jednofázové*
- *Třífázové*
- *Synchronní*
- *Asynchronní*

- **Komutátorové**

Speciální stroje

- **BLDC**
- **Synchronní s permanentními magnety**
- **Stejnoseměrné s permanentními magnety**
- **Reluktanční**

2.3 Střídavé motory

Jako základ točivého střídavého stroje můžeme považovat elektromechanický měnič. Aby takový stroj splňoval praktické podmínky (poměr cena, výkon, hmotnost) musí být dostatečně elektricky i magneticky využit. To znamená, že místo jedné cívky obsahuje celé soustavy uspořádaných vodičů (vinutí stroje).

Tyto soustavy se dělí podle dvou hledisek:

- Z hlediska magnetického pole, které vznikne ve stroji, probíhá-li jím určitý proud. Zde sledujeme tzv. prostorový průběh. To znamená průběh indukce, resp. magnetického napětí po obvodu stroje. Časová závislost je dána plně časovou závislostí proudů ve vinutí.
- Z hlediska maximálního indukovaného napětí (jeho velikosti i časového průběhu) [1].

2.3.1 Asynchronní motory

Asynchronní motory dále jen AS, patří mezi nejpoužívanější stroje. Je to dáno relativní jednoduchostí a nízkou cenou. Vzhledem k jejich vlastnostem se dříve používaly pro pohon tam, kde nebyla potřeba řízení rychlosti.

To sice platí i dnes, ale častěji se používají pro náročnější regulační pohony. Mohou dosáhnout stejných, nebo lepších vlastností, než klasické regulační pohony se stejnosměrnými stroji. Tato skutečnost však plyne z jejich použití společně se střídači.

Jakékoliv řízení rychlosti je spojeno se zvýšením ztrát nebo nárůstem některých nevhodných vlastností. Výkonový rozsah se může pohybovat od jednotek Wattů až po desítky Megawattů (ale to až u velkých pomaloběžných motorů) [2].

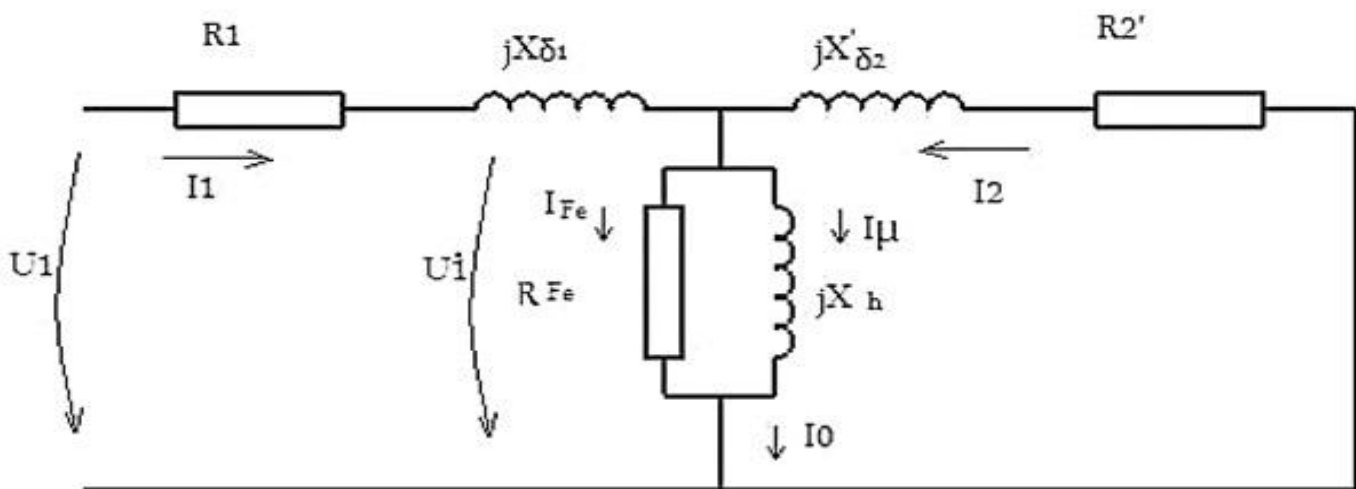
Stroj má zásadně dvojí provedení:

- Stroj s vinutým rotorem
- Stroj s klecovou kotvou

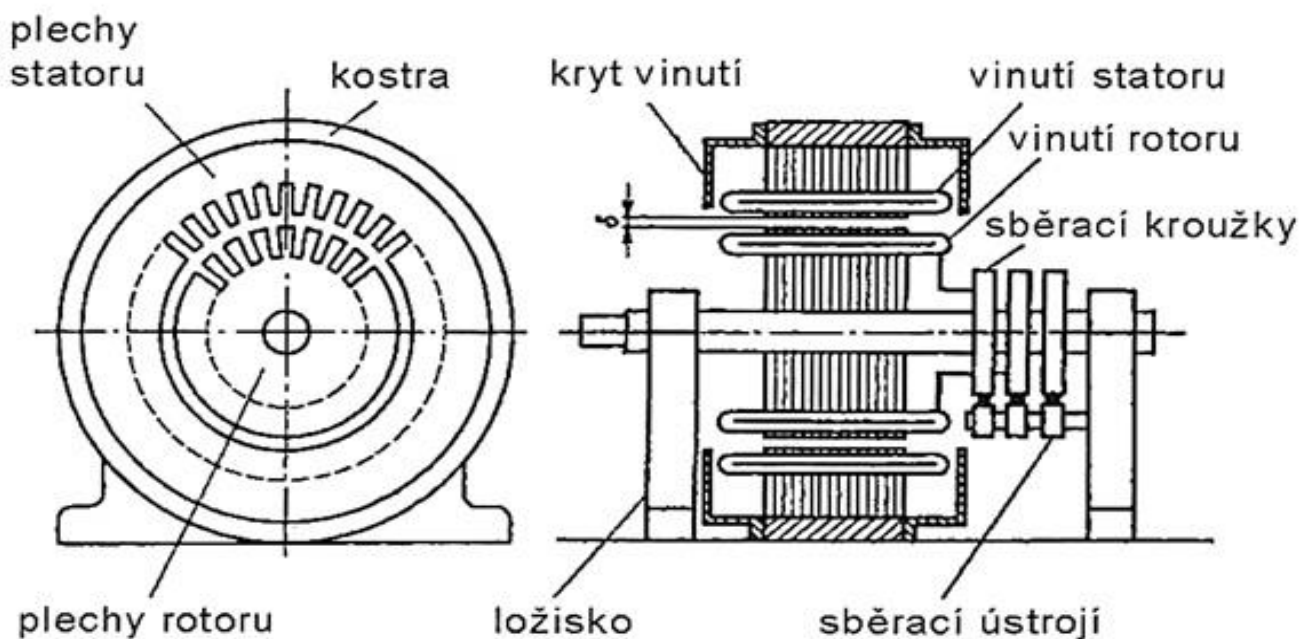
Stroje s vinutým rotorem mají vinutí podobné statorovému, které je vyvedeno na svorkovnici přes sběrací kroužky a uhlíkové kartáče. Má tedy jeden velký nedostatek a tím je kluzný kontakt.

Tomuto problému se vyhneme použitím stroje s klecovou kotvou, kterou tvoří soustava tyčí uložených v drážkách rotoru. Ty jsou pak pomocí kroužků spojeny nakrátko.

Stroje s klecovou kotvou (někdy také s kotvou nakrátko) nemají žádný kluzný kontakt a jsou mnohem častěji používané než stroje s vinutou kotvou. Pro regulační pohony s polovodičovými měniči jsou používány téměř výhradně [1].



obr 1. Schéma AS motoru s kotvou nakrátko [3]



obr 2. Konstrukční řešení AS motoru v řezu [3]

2.3.2 Synchronní motory

Synchronní motory (dále SM) jsou podobně jako AM založeny na základě využití točivého magnetického pole. Základní rozdíl mezi oběma typy těchto strojů spočívá v tom, že jejich pracovní režim probíhá v tzv. synchronní otáčivé rychlosti, pro kterou platí $\omega_2 = \omega_1$, tj. rychlost pole statoru se rovná rychlosti pole rotoru. Proto stroje synchronní.

Při změně jedné z rychlostí dochází k vypadnutí ze synchronismu, čímž motor ztratí točivý moment a zastaví se. Díky možnosti pracovat jako kapacitní zátěž se využívají jako kompenzátory účinníku v energetice.

Touto rychlostí se stroj za normálního režimu otáčí. Když ω_1 je určena kmitočtem napájecího systému, tedy $\omega_1 = 2\pi f_1$. Počet pólových dvojic p znamená, že se situace po obvodu p -krát opakuje.

Synchronní motory můžeme rozdělit a dvě skupiny:

- SM s hladkým rotorem – stroje rychloběžné $2p = 2-4$. Vyznačují se relativně malým průměrem, ale velkou délkou.
- Synchronní stroj s vyniklými póly – dosahují velkých průměrů v porovnání s motory s hladkým rotorem. Vzduchová mezera je proměnná a $2p = \gg 4$. Z toho vyplývá, že otáčivá rychlost takového stroje je několikanásobně nižší než v předešlém případě.

SM se vyznačují vysokou účinností a vyrábí se v širokém rozmezí výkonů od motorů s výkonem pod jeden Watt až po motory s výkonem kolem desítek MW.

Moment SM může při regulaci rychlosti kmitat, proto se větší stroje vybavují tzv. tlumičem. Tlumič je prakticky kotva AM nakrátko. Do vodičů tlumiče se indukuje napětí, které protlačuje proud vyvolávající magnetické pole v opačném smyslu, než je u magnetického pole kotvy a tím moment stabilizuje.

Velkou nevýhodou SM je rozběh. Vzhledem k tomu, že pole rotoru i statoru musí být shodné rozběhový moment M_r je nulový, a proto se rozběh provádí speciálními způsoby.

Důvodem shodnosti rychlostí vinutí maximální výkyvy polohy rotoru od statoru, při kterém může ještě motor pracovat, jsou dány maximálním zátěžným úhlem. Proto se rozběh zpravidla provádí pomocí naddimenzovaného tlumiče, který při rozběhu plní funkci klece AM nakrátko, případně přídatným stejnosměrným, nebo asynchronním rozběhovým motorem (to je však pro použití v trakci nevýhodné).

S příchodem vektorového řízení (řízení proudu v závislosti na poloze rotoru) bylo umožněno rozbíhání SM bez použití speciálních režimů.

SM se uplatňují spíše v místech, kde není nutné časté rozbíhání motoru a v trakci se vyskytuje spíše sporadicky, ale v poslední době se v trakci objevuje stále častěji SM buzený permanentními magnety [1].

2.3.2.1 Synchronní motor s permanentními magnety

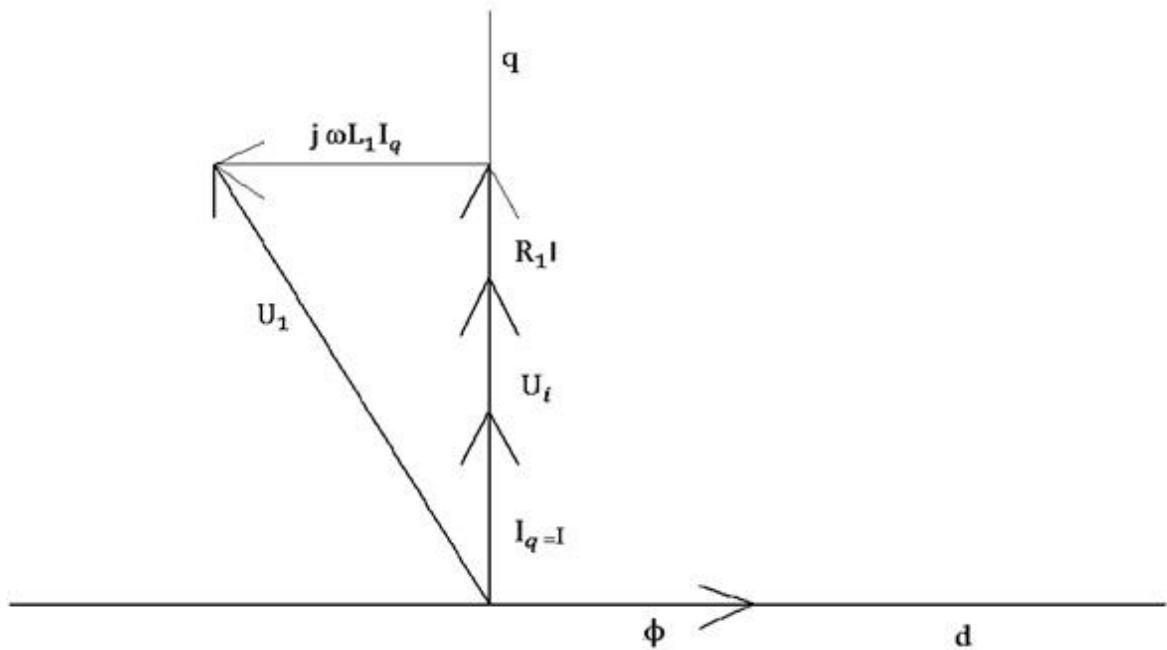
Synchronní motor s permanentními magnety (dále PMSM) se nejprve využívaly v modelářství k pohonu automobilů a letadel z důvodu velké úspory hmotnosti a rozměrů oproti SM při zachování výkonu (jednalo se o motory o výkonu od jednotek W až po jeden kW).

V pohonech větších vozidel se začaly používat poměrně nedávno a uplatňuje se zejména v bez převodovkových pohonech, (například motokára), kde se motor umísťuje přímo k poháněným kolům vozidla a v některých případech dokonce i přímo do samotného poháněného kola (DDE motory – direct drive engine).

Takové motory se používají pro pomaloběžné pohony s vyšším počtem pólů (řádově desítky). Absence jouleových ztrát v rotoru v kombinaci s konstrukcí bez převodovky přináší vysoké zvýšení účinnosti stroje (dosahuje hranice 90%), což je velice výhodné zvláště pro napájení z baterií. Naopak poměrně závažným nedostatkem stroje je složitá konstrukce a vysoká pořizovací cena z důvodu nákladnosti PM vyrobených ze vzácných zemin (např. SCO, NdFeB).

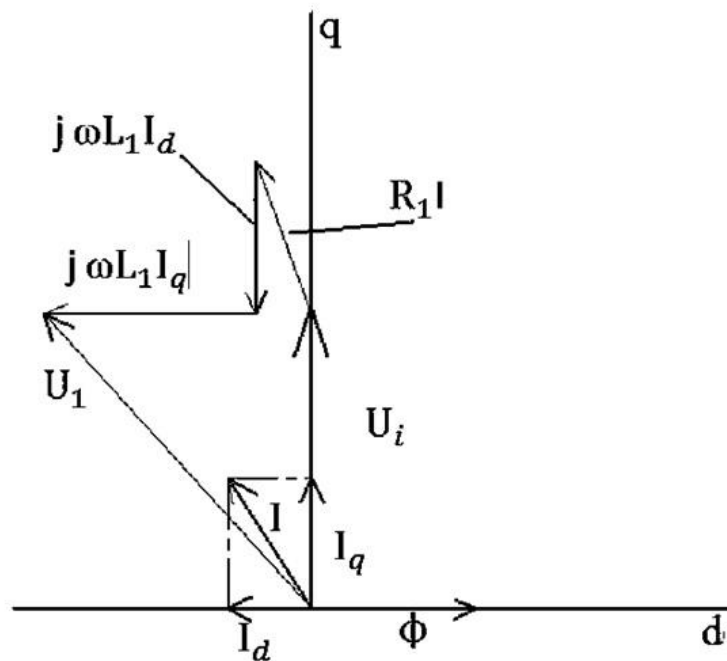
V trakci jsou nejčastěji používány motory s lineární zpětnovazební regulací vycházející z vektorového řízení AM. Pro dosažení lineární závislosti celého proudu na momentu, je okamžitá hodnota proudu řízena na základě polohy rotoru, proto je nutné motor vybavit dostatečně přesným čidlem.

U SM se používá pravoúhlá soustava souřadnic d, q , přičemž poloha d je dána polohou rotoru a rychlost otáčení této soustavy je dána rychlostí otáčení rotoru. V režimu vektorového řízení je složka d rovna 0 a regulovaný proud má tedy pouze složku q , která je ve fázi s indukovaným napětím a o 90° posunuta oproti magnetickému toku. Toto je možné pozorovat na obr. 5 [2].



Obr 5. Fázorový diagram PMSM při vektorovém řízení

Pokud vzneseme požadavek na vyšší otáčky, než jsou jmenovité, přecházíme do tzv. odbuzovacího režimu (podobně jako u AM), kde již nelze ponechat složku prostorového vektoru d rovnou nule viz obr. 6.

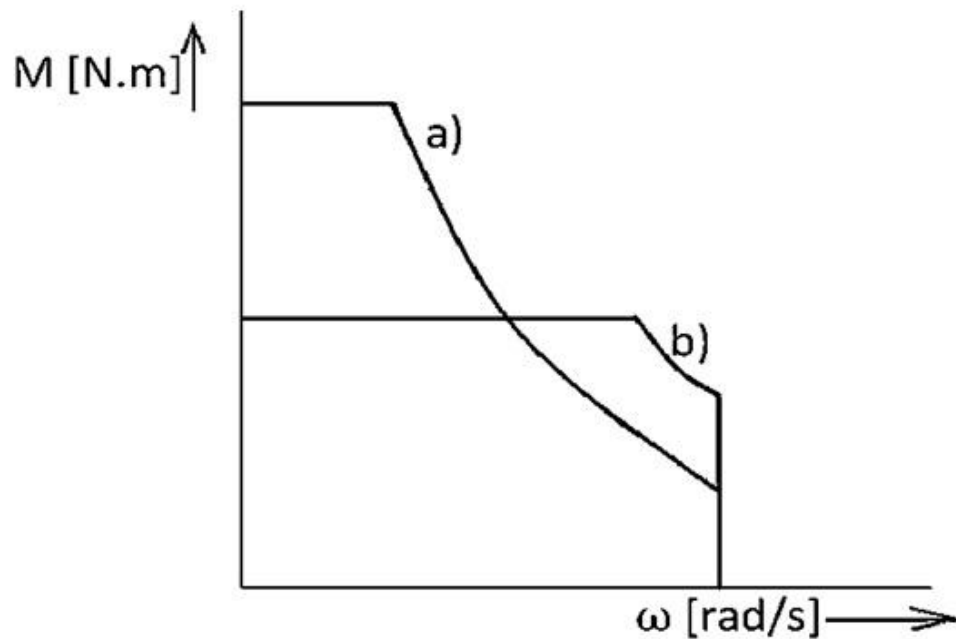


Obr 6. Fázorový diagram PMSM při odbuzování

Důvodem je indukované napětí, které je závislé na rychlosti otáčení rotoru. V odbuzovacím režimu roste napětí až na nežádoucí mez (překročení maximálního napájecího napětí) a proudová složka d působí proti smyslu magnetického toku permanentních magnetů.

Následkem toho se indukované napětí snižuje a výsledný moment se tedy také snižuje. Režim odbuzování u PMSM má ale jisté nevýhody, a to kdyby došlo k výpadku střídače, by vektorová složka proudu d přestala omezovat indukované napětí a to by se pak objevilo v plné velikosti na svorkách střídače. Proto musí být střídače, napájející PMSM značně předdimenzované, aby mohly odolávat těmto poruchovým stavům.

Další nevýhodou je, že pro zvýšení maximálního momentu PMSM musíme zvýšit počet závitů vinutí na statoru a tím pádem dojde ke zvýšení odporu vinutí. Spolu se zvýšením proudu o nenulovou složku d dochází ke zvýšení ztrát a tím i snížením účinnosti stroje. Z toho důvodu je nutné upravit momentovou charakteristiku stroje viz obr. 7.

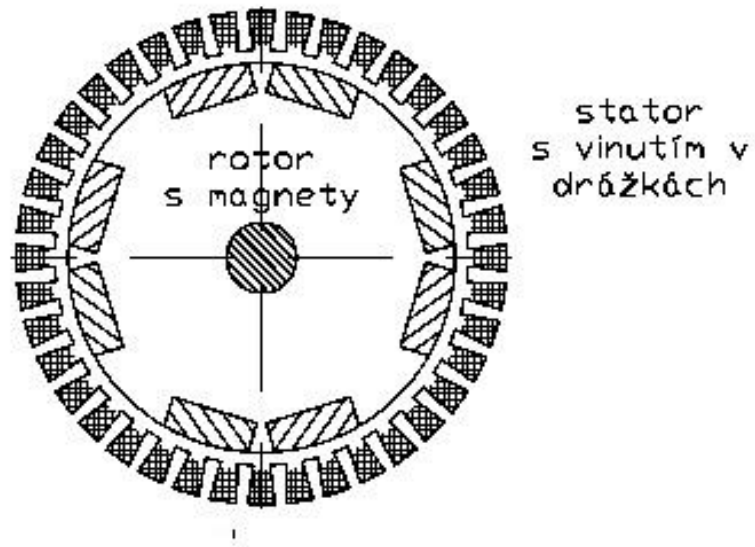


Obr. 7 Ideální momentová charakteristika a) pohon s AM

b) pohon s PMSM [3]

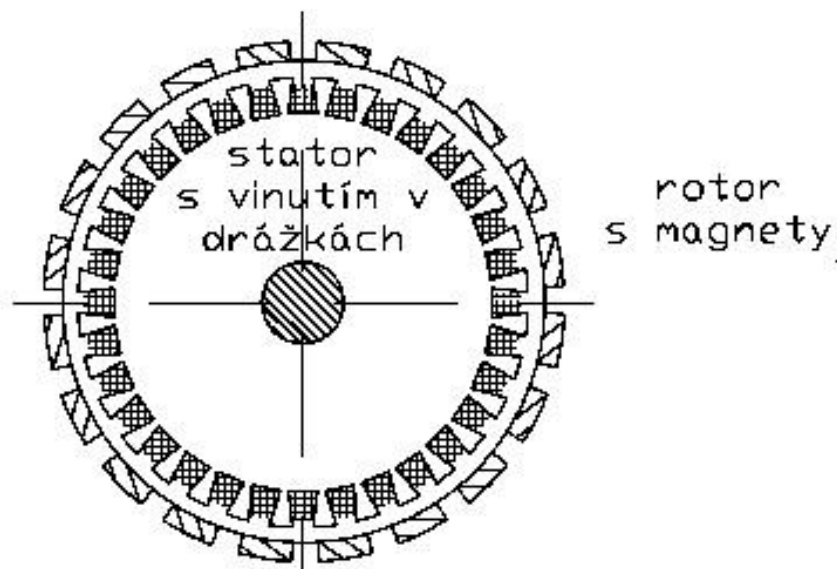
Podle konstrukce dělíme PMSM do tří skupin:

- S vnitřním rotorem viz obr. 8.



Obr 8. PMSM s vnitřním rotorem [3]

- S rotorem vně – Rotor je zkonstruován kolem statoru. Tato koncepce se v poslední době hojně využívá v automobilovém průmyslu pro pohon elektromobilů a další silniční trakce viz obr....



Obr 9. PMSM s vnějším rotorem [3]

- S otočným rotorem i statorem

2.4 Speciální motory

Pod pojmem speciální motory uvažujeme motory, které využívají méně běžných principů přeměny, resp. stroje speciálního provedení a vlastností. Takových strojů existovalo velké množství, ale větší část jich v průběhu let zanikla.

Dále je pro tyto stroje většinou charakteristická kooperace s prostředky výkonové elektroniky. Některé motory se bez těchto prostředků stávají částečně, nebo zcela nefunkční, proto u nich nelze rozdělovat část elektromechanickou (vlastní stroj) a část napájecí a řídicí. Příkladem takového stroje je třeba BLDC motor.

Z hlediska využívání nových materiálů jsou to stroje s permanentními magnety na bázi vzácných zemin (NdFeB, resp SmCo). Tyto materiály způsobily velký kvalitativní skok ve využívání permanentních magnetů pro elektrické stroje [2].

2.4.1 BLDC motor

Brushless DC motor (dále BLDC) je motor, který přímo nepracuje na stejnosměrný proud, ale základní principy jsou podobné stejnosměrným motorům. BLDC má rotor s permanentními magnety a stator, který obsahuje vinutí.

Je to prakticky stejnosměrný motor, který je obrácen vzhůru nohama. Uhlíky a komutátor byly odstraněny a statorové vinutí je připojeno přímo na řídicí elektroniku. Ta nahrazuje funkci komutátoru a napájí vinutí stroje. Vinutí stroje je napájeno proudem o určitém průběhu, který roztáčí rotor.

Komutace tohoto stroje se provádí elektronicky podle natočení rotoru stroje. Pro snímání polohy rotoru se používají tři Hallovy sondy a komutace se provádí na základě informací dodaných těmito sondami.

Motor je poháněn obdélníkovým nebo trapézovým průběhem spárovaným s určitou pozicí rotoru. Napěťové koryky musí být přesně uspořádány tak, aby úhel mezi rotorovým a statorovým tokem zůstal přibližně 90°, aby se dosáhlo maximálního generovaného výkonu.

Požadované senzory pozice mohou být velice jednoduché, protože je potřeba snímat pouze 6 pulzů za otáčku (u třífázového stroje). Typicky se používají Hallovy sondy, jak už bylo zmíněno v předchozím odstavci. Tyto sondy jsou připojeny do zpětné vazby stroje. V bezsenzorové kontrole plní zpětná vazba funkci komutátoru [6].

Hlavní výhody BLDC:

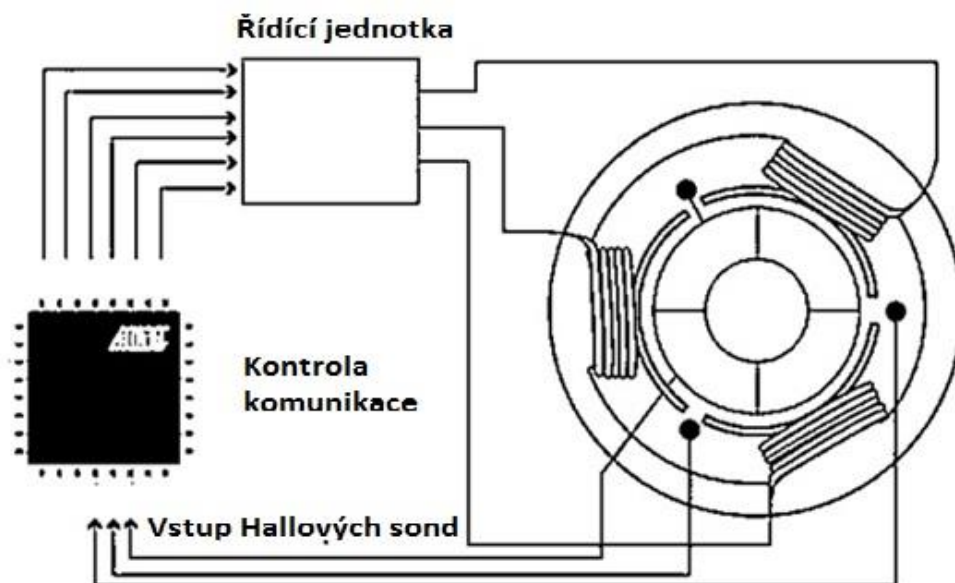
- Protože stroj neobsahuje uhlíky, nevznikají zde také žádné jiskry.
- Stroj je rychlejší, efektivnější, méně hlučný a spolehlivější než DC motor.
- Lepší odvod tepla, které se generuje pouze ve statoru.
- Stroj je celkově lehčí kvůli absenci komutátoru a cívek. Snadněji se rozbíhá a brzdí.
- Relativně nízká výrobní cena.
- Slibný poměr momentu vůči napájení je vhodný pro hladký rozběh motoru i dlouhodobě dodávaný moment.

Nevýhody BLDC:

- Nutnost elektronického řízení. Bez něj není možné motor provozovat.

BLDC se dělí na dvě hlavní skupiny:

- BLDC vybavené senzory polohy

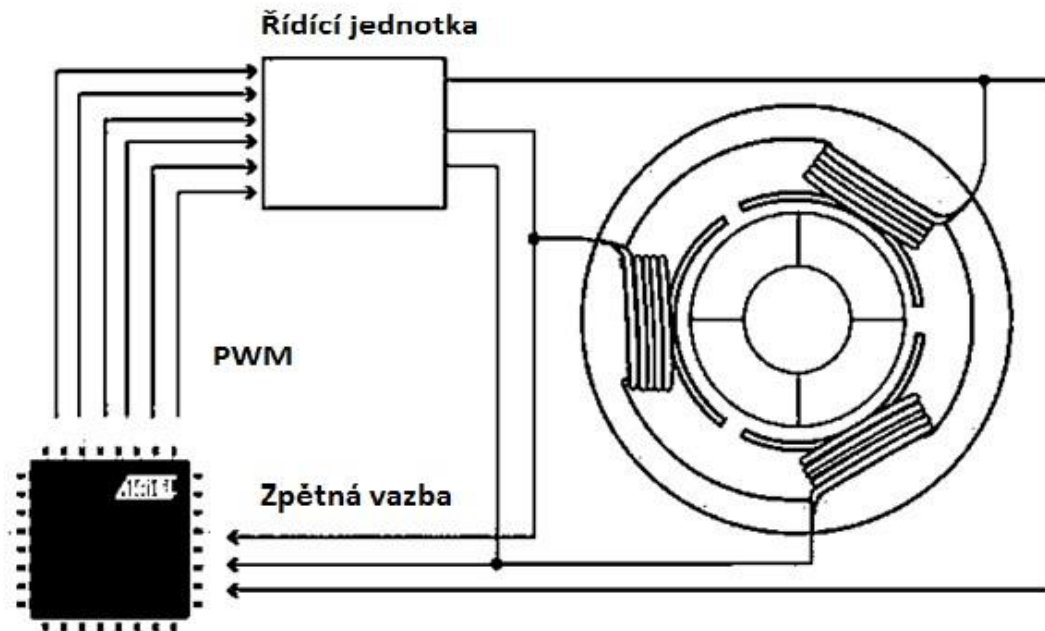


Obr 3. BLDC vybavený senzory polohy [6]

- BLDC bez senzorů polohy

Výhodou těchto motorů oproti BLDC vybavených senzory polohy je nižší pořizovací cena z důvodu absence senzorů. Je vhodnější pro aplikace, které vyžadují periodické zastavení a opětovné rozbíhání motoru.

Za nevýhodu můžeme považovat to, že motor bez senzorů je mnohem složitější na chod, protože postrádá zpětnou vazbu a zdroj napětí musí být velice přesný pro bezchybný chod motoru [6].



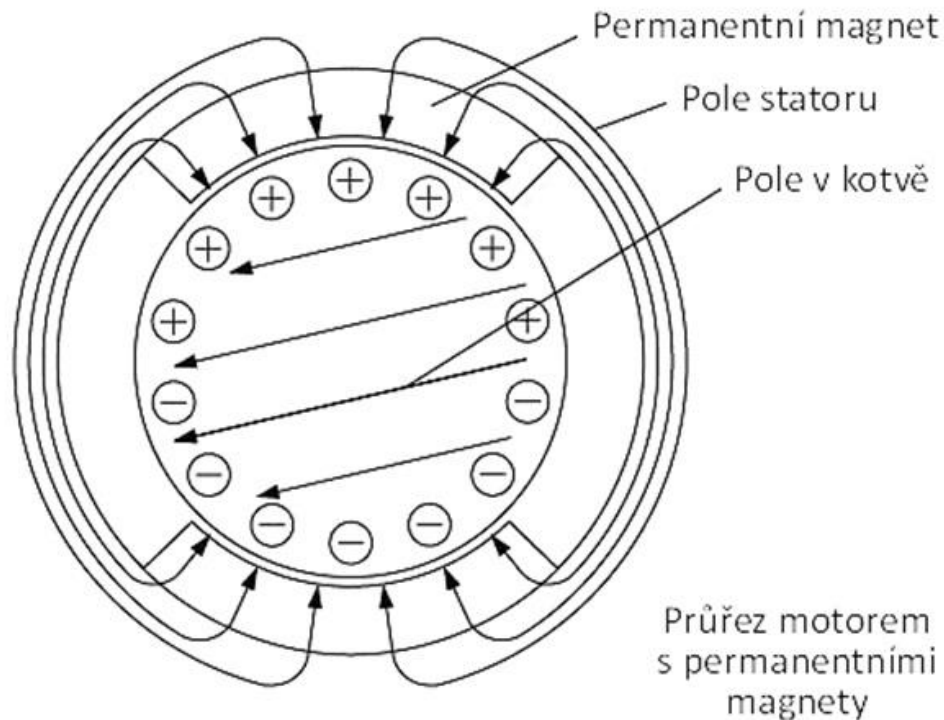
Obr 4. BLDC v provedení bez senzorů polohy [6]

2.4.2 Stejnoseměrný motor s permanentními magnety

Kotva (rotor) stejnosměrného motoru s permanentními magnety (dále PMSM) může mít klasické provedení s komutátorem, pak budící magnety jsou umístěny na statoru, nebo je možné tzv. opačné uspořádání. To znamená, že budící magnety jsou na rotoru a kotva je na statoru. To však vyžaduje tzv. elektrickou komutaci.

Klasický komutátor je nahrazen polovodičovými spínacími prvky. Pro některá použití strojů s PM je vyžadován minimální moment setrvačnosti, pak se tedy používají speciální kotvy.

Kotvu tvoří destička z izolačního materiálu a vinutí včetně komutátoru je tvořeno technologií plošných spojů.



Obr 10. Schéma PMSM v řezu [4]

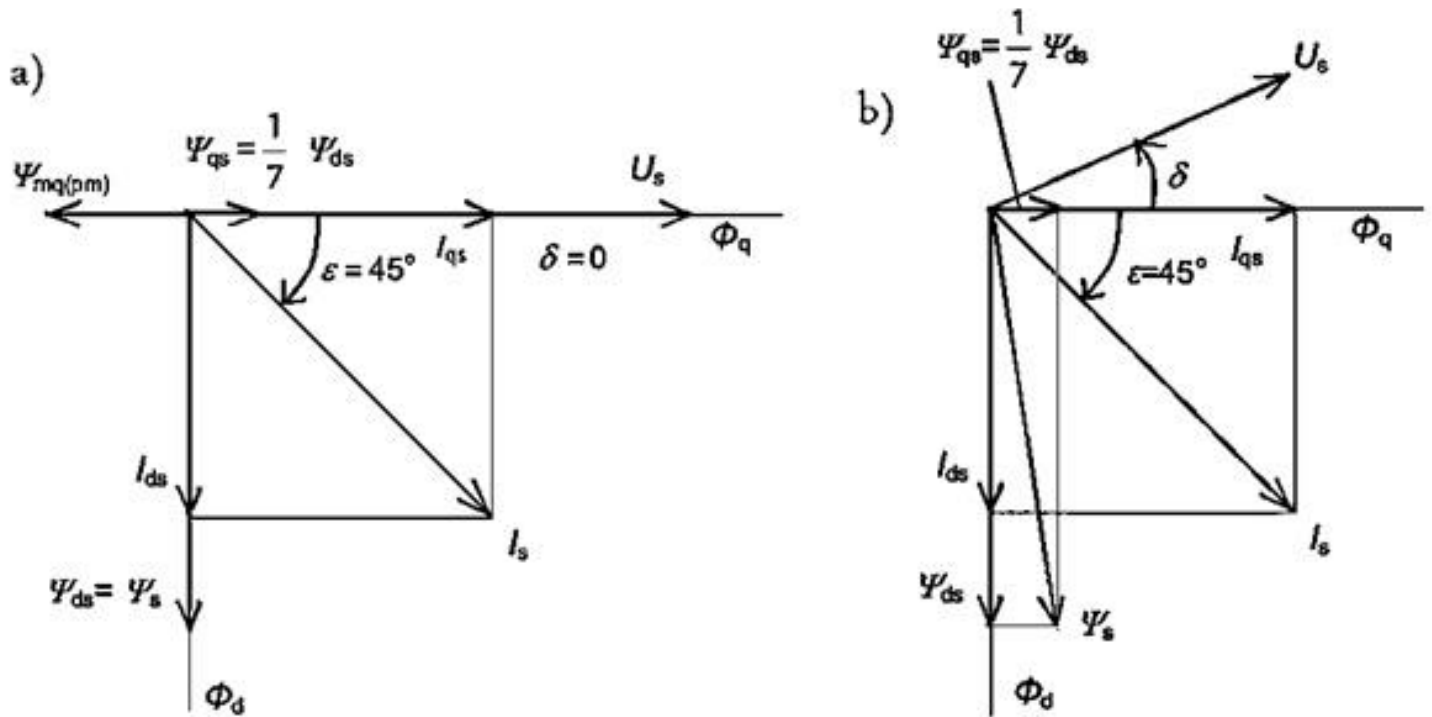
2.4.3 Reluktanční motor

Reluktanční motor (dále jen RM) byl vynalezen v minulém století, dnes jsou spíše využívány pro speciální aplikace, například jako krokové motory nebo v aplikacích jako pohony disků a pásek, nebo v tiskařských hlavách. Myšlenka použití RM jako trakční motor je poměrně nový nápad, ale s velkým potenciálem do budoucnosti.

Princip RM

Princip vzniku točivého momentu je zcela odlišný od klasických indukčních strojů. Stator je velice podobný. Nejčastěji je tvořen třífázovým vinutím a magnetickým obvodem. Rotor je tvořen pouze magnetickým obvodem, přičemž počet pólů nebývá stejný jako u statoru (z důvodu nepravidelného chodu momentu). Točivý moment vzniká působením magnetických siločar procházejících rotorem a snaha o zmenšení reluktance (zkrácení délky siločar) rotor roztočí, viz obr. 11.

Pro zvýšení efektivity elektromagnetické přeměny energie je možné do rotoru přidat permanentní magnety, které jsou umístěny mezi plechy tak, aby vytvářely magneticky vyniklé póly, které jsou magnetovány tak, aby magnetický tok v ose q byl co nejmenší oproti toku v ose d [1].



Obr 11. Fázorový diagram synchronního RM a) s PM

b) bez PM

3 Druhy polovodičových měničů

Účel:

- změna velikosti střední hodnoty stejnosměrného napětí U_{dAV}

Užití v pohonech:

- řízení stejnosměrných motorů napájených ze stejnosměrné sítě:
 - elektrická trakce
 - automobilový průmysl
 - automatizační technika [7]

3.1 Snižující pulzní měnič

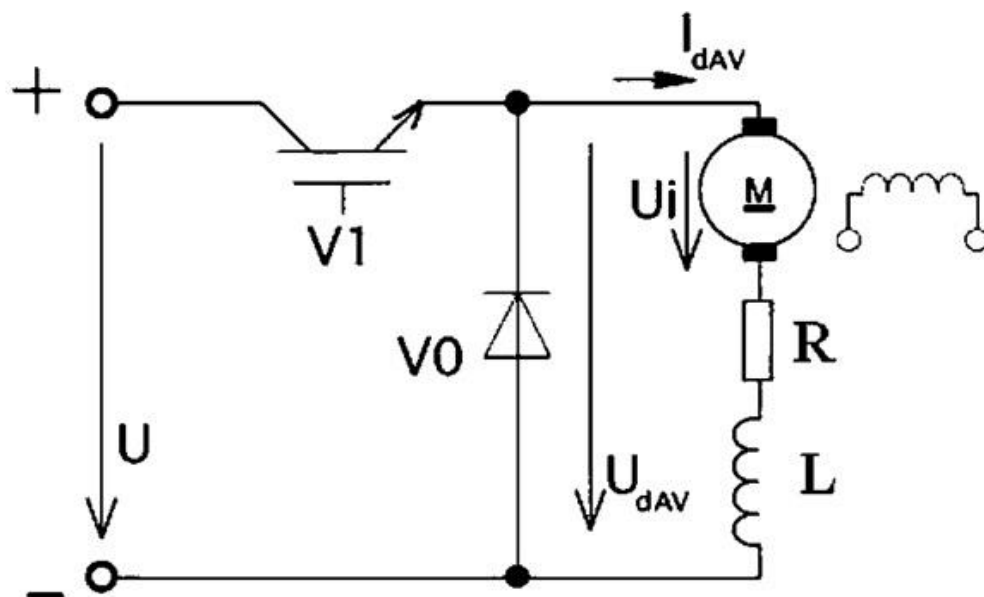
Snižující pulzní měniče (chopper step-down) řídí střední hodnotu napětí na zátěži od nuly do napětí zdroje.

Základní zapojení pulsního měniče:

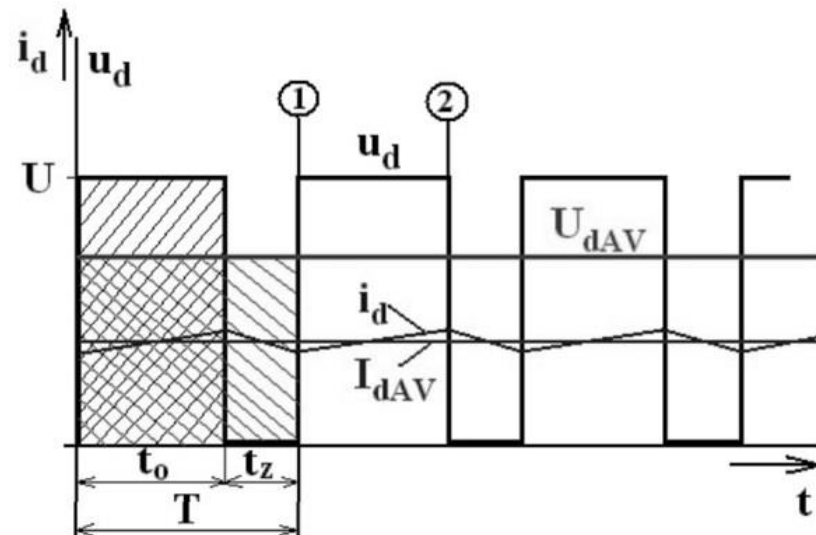
- stejnosměrný zdroj – síť
- hlavní součástka - spínací prvek V1 viz obr. 12.
- obvykle to bývá tranzistor IGBT
- nulová dioda V₀
- stejnosměrný cize buzený motor (kotva, buzení)
- kotva indukuje protinapětí U_i
- v náhradním schématu kotvy je i její R a L
- v obvodu může být i vyhlazovací tlumivka (zahrnuta v L)

Činnost:

- V₁ je periodicky zapínán a vypínán s periodou T
- V₁ je zapnut po dobu t_o a vypnut po dobu t_z
- po zapnutí V₁ v okamžiku 1 je na zátěži napětí zdroje U
- do zátěže teče proud i_d, část energie se akumuluje v L
- po vypnutí V₁ v okamžiku 2 se stává zdrojem L
- proud i_d teče dále v původním směru a uzavírá se přes V₀
- průběh okamžitých hodnot napětí na zátěži u_d je pulsující
- střední hodnota výstupního napětí je U_{dAV}
- U_{dAV} se určí z rovnosti šrafovaných obdélníků $U_{dAV} \cdot T = U \cdot t_o$ [7]



Obr 12. Schéma snižujícího pulsního měniče [7]

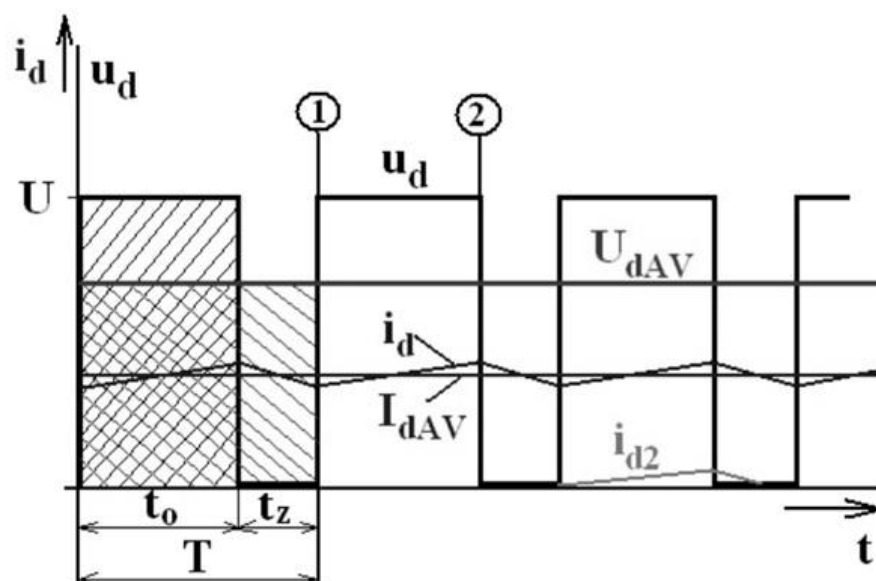


Obr 13. Znázornění průběhu napětí a proudů snižujícího pulzního měniče [7]

Řízení U_{dAV} :

- změnou doby otevření t_o při konstantní periodě T
- změnou periody T při konstantní době otevření t_o
- kombinací obou způsobů

Z hlediska motoru je nejvýhodnější nepřerušovaný proud pokud možno co nejvíce vyhlazený. K vyhlazení může dopomoci sériová vyhlazovací tlumivka. Při malém zatížení motoru nebo chodu naprázdno je proud přerušovaný (i_{d2} na obr. 14), indukčnost obvodu nemá po vypnutí V_1 dostatek energie pro udržení proudu po celou periodu [7].

Obr 14. Znázornění průběhu proudu i_{d2} snižujícího pulzního měniče [7]

3.2 Rekuperační pulzní měnič

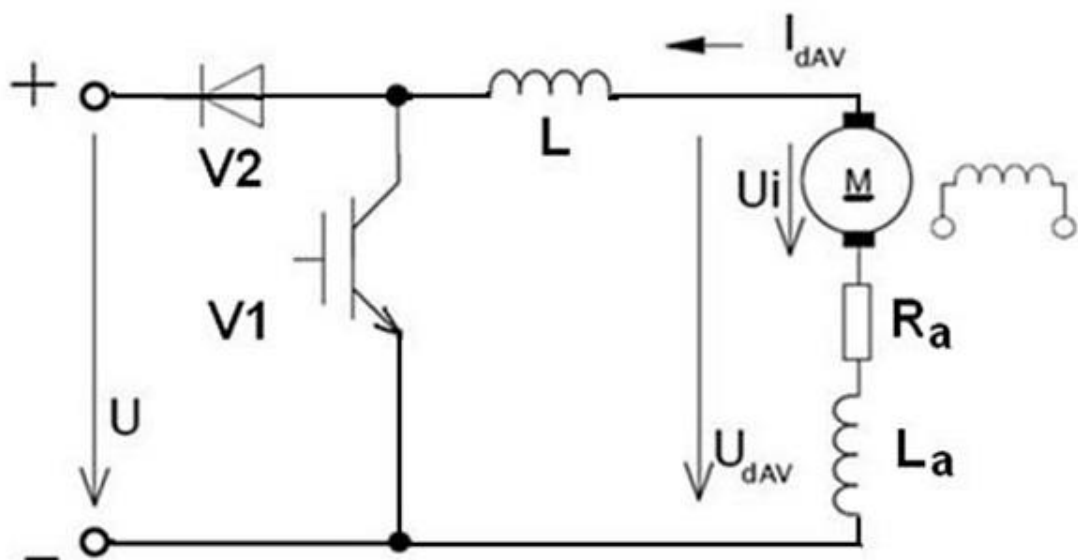
Rekuperační pulzní měnič (the second quadrant step-up chopper) umožňuje generátorické brzdění elektrického pohonu (rekuperaci), tedy provoz v 2. kvadrantu. Pohybová energie pohonu se mění ve stroji na elektrickou a dodává do sítě.

Základní zapojení rekuperačního pulsního měniče:

- stejnosměrný cize buzený motor (kotva U_i , L_a , R_a , buzení)
- tlumivka L
- spínací tranzistor V_1
- dioda V_2
- stejnosměrná síť U

Činnost:

- sepnutím V_1 se kotva motoru připojí paralelně k tlumivce L
- zdrojem se stává indukované napětí kotvy
- proud i_L narůstá, tlumivka (a indukčnost kotvy) akumuluje energii a indukuje protinapětí
- po vypnutí V_1 se L brání změně a indukuje napětí, které se přičítá k U_i stroje
- součet u_L a U_i je větší než napětí sítě U , proud i_L teče přes diodu V_2 do sítě
- energie nahromaděná v tlumivce přechází do sítě
- síť musí být schopna proud a výkon při rekuperaci přijmout [7]



Obr 15. Schéma rekuperačního pulzního měniče [7]

3.3 Zvyšující pulzní měnič

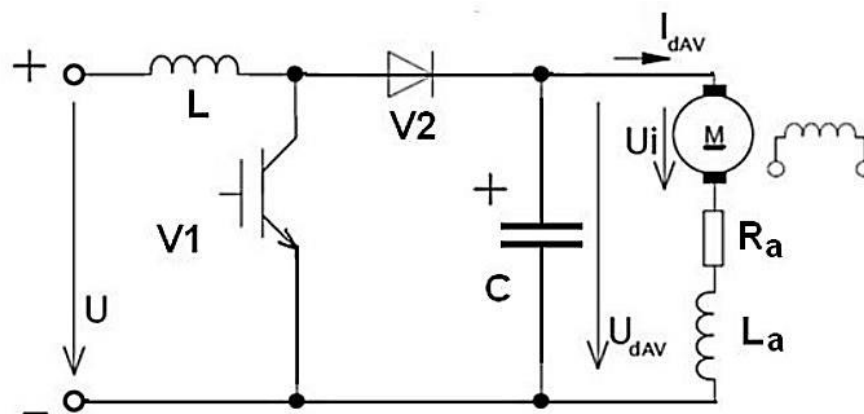
Zvyšující pulzní měnič (chopper step-up) řídí střední hodnotu napětí na zátěži od napětí zdroje výše. Principiálně je velice podobný rekuperačnímu měniči. Největší rozdíl je v tom, že tento měnič nemá zpětnou vazbu,

Základní zapojení zvyšovacího pulsního měniče:

- stejnosměrný zdroj – síť
- tlumivka L
- spínací tranzistor V_1
- dioda V_2
- kondenzátor C
- stejnosměrný cize buzený motor (kotva U_i , L_a , R_a , buzení)

Činnost:

- po sepnutí V_1 je na tlumivce L napětí u_L prakticky rovné napětí zdroje
 - tlumivka akumuluje energii, její proud i_L narůstá
 - mezitím je kotva motoru napájena z kondenzátoru C
 - dioda je v závěrném směru a nevede proud
 - po době t_z se vypne V_1 , L indukuje napětí opačné polarity, to se přičítá k napětí zdroje
 - přes diodu V_2 teče do motoru proud a dobíjí se kondenzátor
 - energie nahromaděná v tlumivce se přelévá na výstup
 - napětí výstupu U_{dAV} se řídí změnou poměru s doby t_z a periody T $s = \frac{t_z}{T}$
- zvětšováním s roste U_{dAV} [7]



Obr 16. Schéma zvyšujícího pulzního měniče [7]

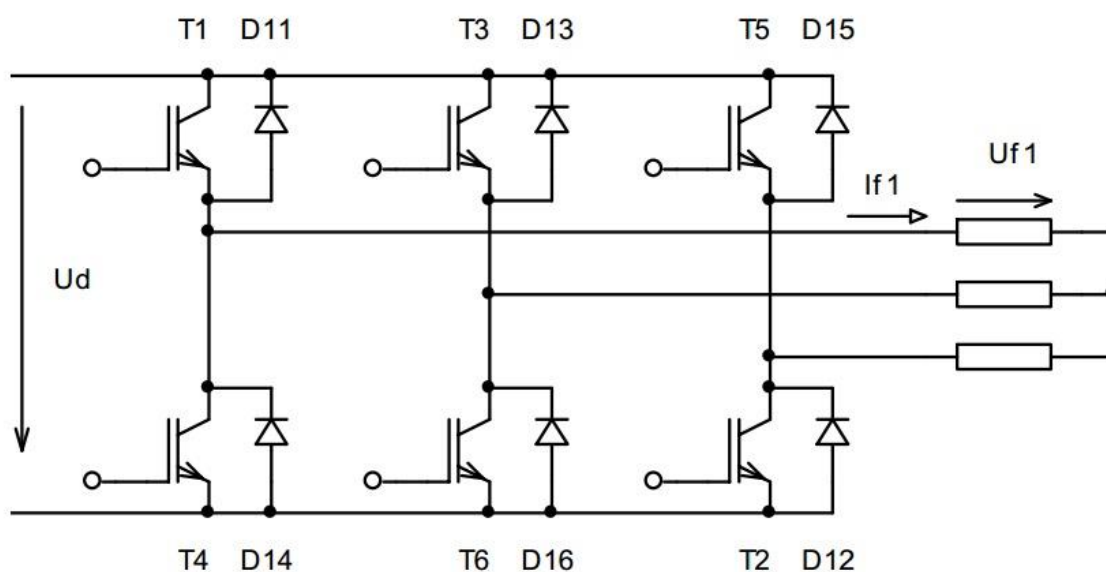
3.4 Střídač

Střídače jsou měniče určené k přeměně stejnosměrných napětí a proudů na střídavé. Střídače tvoří velkou skupinu měničů a v této práci se zaměřím, na pro naši problematiku lépe využitelný trojfázový střídač.

3.4.1 Trojfázový střídač

Základní uspořádání trojfázového napěťového střídače je na obr. 17.

T1 - T6 jsou hlavní spínače a D11 - D16 jsou jejich zpětné diody. Zátěž je spojena do hvězdy s nevyvedeným uzlem.



Obr. 17 Základní uspořádání trojfázového střídače [8]

Cílem je stanovení průběhů fázového a sdruženého napětí na odporové zátěži. Pro dosažení symetrické trojfázové soustavy je nutno spínače T1 - T6 zapínat se vzájemným fázovým posunem 60° . Vypnutí spínače bude následovat s fázový zpožděním daným programovým úhlem Ψ .

Z výsledku měření je zřejmé, že fázové napětí dosahuje velikost $\pm 1/3 U$ a $\pm 2/3 U$. Je to dáno tím, že v každém intervalu vedou tři spínače. Jeden lichý a dva sudé nebo naopak. Tím jsou fáze zátěže zapojeny tak, že dvě jsou vždy paralelně a třetí je k nim do série. Vzniká tak napěťový dělič.

Napětí na samostatné fázi tedy bude $2/3 U$ a na paralelní kombinaci $1/3 U$. Tento tvar napětí je typickým průběhem i pro RL zátěž s velkou časovou konstantou, kdy vlivem vedení zpětných diod nezáleží na velikosti programového úhlu Ψ .

Při programových úhlech $\Psi < \pi$ však dochází ke stavům, kdy vedou pouze dva spínače. Fázové napětí pak dosahuje velikosti $\frac{1}{2} U$ v případě, že vede jeden lichý a jeden sudý, nebo 0, pokud vedou dva liché nebo sudé. Jedním ze způsobů řízení výstupního napětí je pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation PWM).

Tento způsob řízení spočívá v tom, že každý spínač periodicky zapíná a vypíná během každé půlperrody. Doba sepnutí se však během této periody mění tak, aby se střední hodnota napětí během periody měnila sinusově. Tímto způsobem lze nejen měnit velikost efektivní hodnoty výstupního napětí střídače, ale současně příznivě ovlivnit i obsah vyšších harmonických v jeho spektru.

Toto má význam zejména při napájení motoru nízkým kmitočtem, kdy se odstraní tzv. krokování [8].

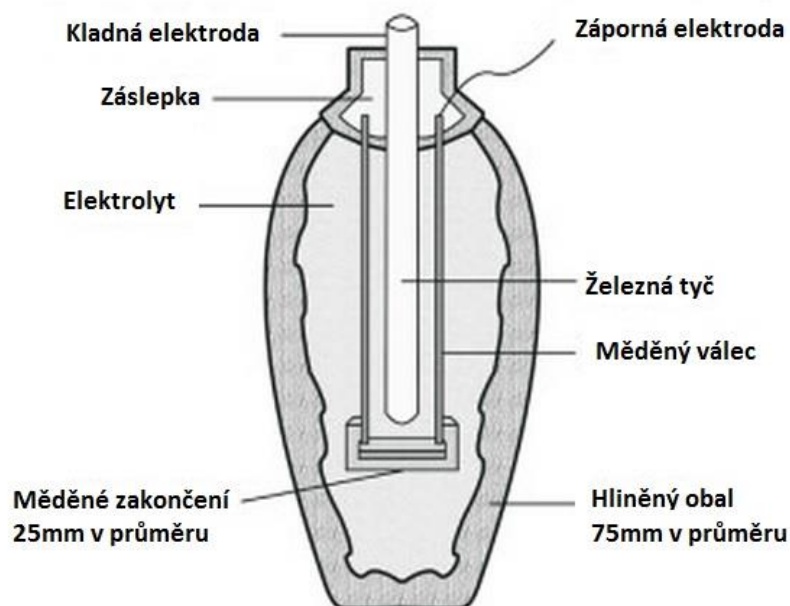
4 Problematika trakčních baterií

V této kapitole se může zohlednit nepřeberné množství typů a druhů baterií. Já se budu zabývat bateriemi na bázi lithia, které jsou v tomto odvětví nejpoužívanějšími bateriemi na trhu [9].

4.1 Historie trakčních baterií

Baterie jsou známy přes 400 let, ale pro první praktické využití se začaly využívat v druhé polovině osmnáctého století, ale archeologické nálezy potvrdily, že baterie jako takové byly používány starými Egypťany a Babyloňany.

Nejstarší nalezená baterie zvaná Bagdádská baterie byla náhodou nalezena při stavbě kolejiště poblíž Bagdádu. Odhadované stáří této baterie je 2000 let. Skládala se z hliněné nádoby, která byla naplněna octovým roztokem sloužícím jako elektrolyt, železné tyče a měděného válce, který byl ovinut okolo železné tyče obr. 16 [9].



Obr17. Zobrazení Bagdádské baterie [9]

Někteří vědci zpochybňují, že by tyto baterie mohly sloužit, jako zdroj energie, ale domnívají se, že sloužily k pokovování například nanášení tenkých vrstev zlata na šperky a zbraně [9].

4.2 Typy lithiových baterií

Obecně se názvy různých baterií označují zkratkou jejich chemického složení. V tabulce 1 je znázorněn přehled nejpoužívanějších baterií včetně jejich zkratky a zkráceného názvu [9].

Chemický název	Materiál	Zkratka	Zkrácená forma	Poznámka
Lithium Kobalt Oxid¹ Také lithium-ion-kobalt)	LiCoO_2 (60% Co)	LCO	Li-cobalt	Vysoká kapacita, vhodná pro mobilní telefony, notebooky a podobně
Lithium Mangan Oxid¹ Také Lithium Mangan nebo lithium-ion-mangan	LiMn_2O_4	LMO	Li-manganese	Nejbezpečnější; nižší kapacita než u Li-kobalt ale vyšší okamžitá energie a dlouhá životnost. Elektrické náradí,

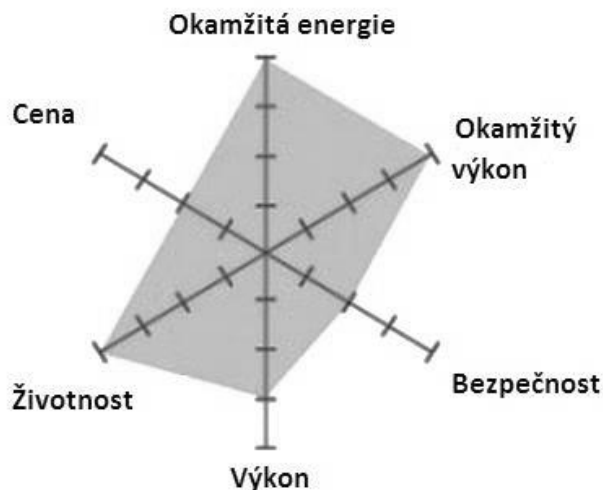
Lithium Železo Fosfát¹	LiFePO ₄	LFP	Li-phosphate	lékařství, modelářství, elektrická kola a podobně.
Lithium Nikl Mangan Kobalt Oxid¹, také lithium- mangan-kobalt-oxid	LiNiMnCoO ₂ (10–20% Co)	NMC	NMC	
Lithium Nikl Kobalt Aluminium Oxid¹	LiNiCoAlO ₂ (9% Co)	NCA	NCA	Nabývá významu v mřížovém skladování a elektrických pohonných jednotkách
Lithium Titanát²	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	LTO	Li-titanát	

Tab. 1 Přehled nejpoužívanější lithiových baterií [9]

4.2.1 Lithium nikl kobalt oxid hliníku (LiNiCoAlO₂)

Baterie na této bázi zkráceně NCA, jsou na trhu méně běžné. Nicméně pro svou vysokou měrnou energii a výkon získávají stále větší oblibu v automobilovém průmyslu.

Jako velkou nevýhodu však můžeme považovat nízkou bezpečnost a vysokou pořizovací cenu. Těchto nevýhod si můžeme všimnout na obr. 17.

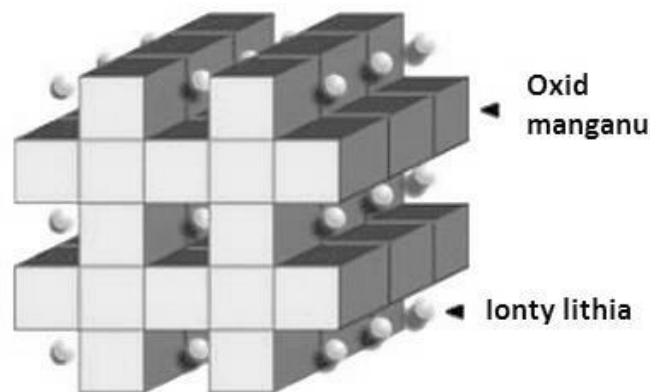
Obr 18 Parametry LiNiCoAlO₂ [9]

4.2.2 Lithium oxid manganu (LiMn₂O₄)

Spojení Lithia a manganu bylo prvně použito v roce 1983. V roce 1996 přišla na trh baterie Li-ion, kde byl mangan použit jako katodový materiál. Konstrukční řešení této baterie zlepšuje tok iontů v elektrodě, což snižuje vnitřní odpor. Další výhodou této baterie je vysoká tepelná stabilita a bezpečnost, ale velkou nevýhodou je omezená životnost.

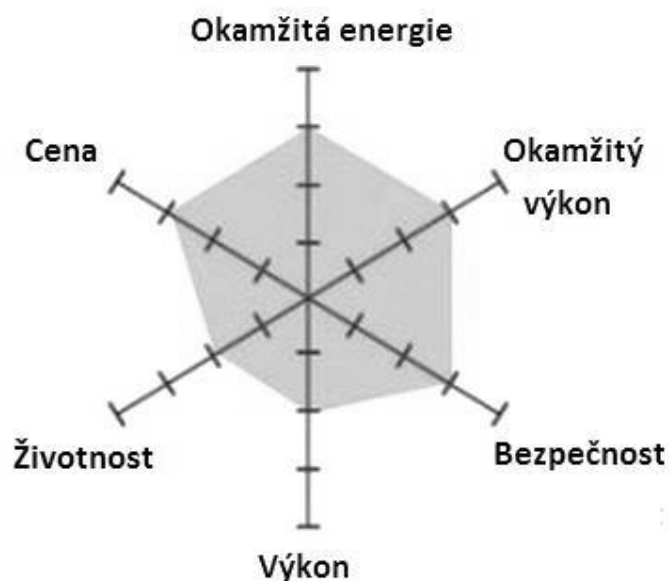
Nízký vnitřní odpor je klíčem k rychlému nabíjení a vysokému okamžitému výkonu dodávaném do obvodu. Vnitřní struktura může produkovat proud až 30A s pouze malým celkovým oteplením baterie. Při jednorázovém použití baterie je možné vyprodukovat až 50A. Při kontinuálním napájení tímto proudem však může dojít k velkému tepelnému namáhání a následnému zničení, proto nesmí teplota baterie překročit teplotu 80 ° C

Li-mangan se používá pro elektrické nářadí, lékařské nástroje a také hybridní a elektrická vozidla [9].



Obr. 19 Struktura Li-mangan [9]

Při porovnání Li-mangan s Li-kobalt dosáhneme až o 50% vyšší množství energie než u baterií na bázi kobaltu. Konstrukční flexibilita nám také umožní optimalizaci baterie pro prodloužení životnosti, maximální proudové zatížení a kapacitu baterie [9].

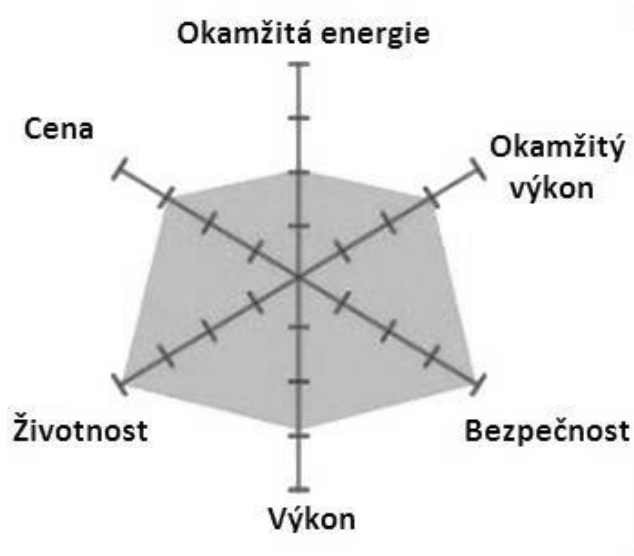


Obr. 20 Parametry LiMn2O4 [9]

4.2.3 Lithium fosfát železa (LiFePO_4)

V roce 1996 na univerzitě v Texasu výzkumníci zjistili, že použití fosfátu železa jako materiálu katody pro dobíjení lithiové baterie. Li-fosfát nabízí dobrý elektromechanický výkon s nízkým odporem.

Hlavní výhody jsou zvýšená bezpečnost, tepelná stabilita, vysoký dodávaný proud a dlouhá životnost. Po plném nabití a uložení dochází k minimálním ztrátám energie. Jako nevýhodu můžeme považovat, ztrátu akumulované energie a snižování životnosti při příliš vysoké teplotě při skladování [9].



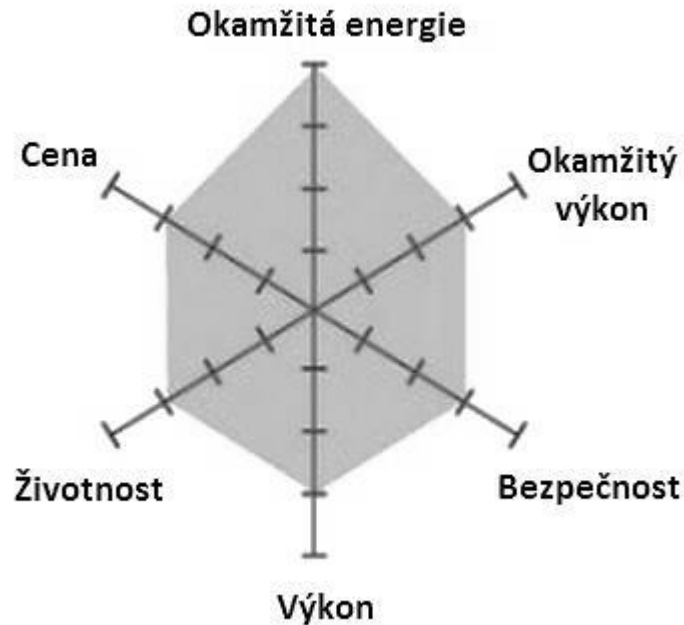
obr. 21 Parametry LiFePO_4 [9]

4.2.4 Lithium nikel-mangan oxid kobaltu (LiNiMnCoO_2)

Nejčastěji se výrobci při výrobě katody zaměřují na kombinaci niklu, manganu a kobaltu (NMC). Podobně jako u Li-mangan mohou být tyto baterie navrženy tak, aby dodávaly vysoký výkon, nebo disponovaly vysokou energií. Nikdy však obojí najednou.

Tajemství NMC spočívá v kombinaci niklu a manganu. Nikl je známý pro svou velkou okamžitou energii, ale vyznačuje se vysokou nestabilitou. Díky manganu můžeme dosáhnout velmi nízkého vnitřního odporu, ale má malou okamžitou energii. Kombinací těchto dvou prvků dosáhneme eliminace nepříznivých vlastností obou prvků.

NMC se nejčastěji používá pro elektrické nářadí a pohonných jednotek vozidel. Katoda je složená jednou třetinou niklu, třetinou manganu a třetinou kobaltu. To nám nabízí jedinečnou kombinaci, která snižuje pořizovací cenu díky snížení obsahu kobaltu. Optimální kombinace prvků katody je přísně střežené tajemství každého výrobce baterií [9].

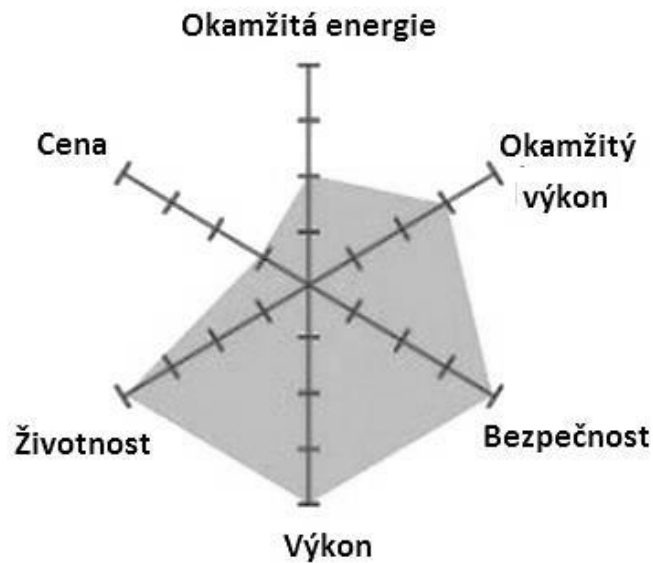


Obr. 22 Parametry LiNiMnCoO₂ [9]

4.2.5 Lithium oxid titanu (Li₄Ti₅O₁₂)

Baterie s anodou vyrobenou z titanu jsou známy již od roku 1980. Baterie na bázi titanu má vysokou nominální hodnotu napětí, může být rychle nabitá a má velký vybíjecí proud, který může dosáhnout až desetinásobku jmenovité kapacity baterie.

Počet cyklů nabíjení a vybíjení se v průběhu vývoje technologie zvyšuje a tím se také prodlužuje životnost baterie. Disponuje vysokou bezpečností a dobrou odolností proti nízkým teplotám prostředí. V porovnání s ostatními bateriemi na bázi lithia má nejvyšší bezpečnost, ale nízkou okamžitou energii [9].

Obr. 23 Parametry $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ [9]

4.3 Možnosti nabíjení

Nabíječka Li-ion baterií je zařízení, které omezuje nabíjecí napětí. Pracuje na podobném principu, jako u systému pro olověné baterie. Hlavní rozdíl je ve velikosti nabíjecího napětí na článek, nižší tolerance nabíjecího napětí a absence udržovacího napětí při plném nabití.

Zatímco u olověných baterií existuje určitá flexibilita nabíjecího napětí u Li-ion článků je kladen velký důraz na správnou velikost napětí, protože lithiové baterie nesmí být přebity.

Baterie na bázi lithia jsou totiž náchylné na správné nabíjení, pokud dojde k přebití baterií, dramaticky se snižuje životnost a zvyšuje se nebezpečí trvalého poškození nebo dokonce výbuchu [9].

Závěr

Trakční motor je elektromotor, který se vyznačuje nějakou speciální konstrukcí. Je to motor, který pohání buď jedno kolo, nebo soukolí vozidla. Tyto motory jsou většinou napájeny z trakčního vedení. V našem případě nahradí trakční vedení vhodně zvolená baterie s dostatečnou pohonnou energií. V kapitole 1 je uveden přehled elektromotorů a jejich bližší seznámení včetně motorů speciálních buzených elektromagnety na bázi drahých zemin. Tyto elektromagnety mají velký vliv na konstrukci a celkové parametry motoru (patrně na obr. 11).

Přehled polovodičových měničů uvedený v kapitole 2 je primárně zaměřen na motory, se kterými bylo možno se seznámit v kapitole 1. Jako jeden z nejpotřebnějších měničů se jeví střídač. A to z toho důvodu, že trakční baterie dodává pouze stejnosměrné napětí a proud. Proto je důležité použít střídač v kombinaci s jiným měničem, pokud uvažujeme o použití motoru pracujícím na střídavé napětí a proud.

V kapitole 3 je přehled trakčních baterií od nejstarší nalezené baterie až po nejpoužívanější baterie současnosti, baterie na bázi lithia. Kombinace lithia s jiným prvkem (tab. 1) získává vlastnosti používané v rozličných odvětvích elektroniky a elektrotechniky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 219 s. ISBN 80-7043-332-9.
- [2] BARTOŠ, Václav, ČERVENÝ, Josef, HRUŠKA, Josef, KOTLANOVÁ, Anna, SKALA, Bohumil. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 139 s. ISBN 80-7043-444-9.
- [3] www.google.cz
- [4] <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/servo-motor>
- [5] [http://www.nmbtc.com/brushless-dc motors/engineering/brushless_dc_motors_engineering.html](http://www.nmbtc.com/brushless-dc%20motors/engineering/brushless_dc_motors_engineering.html)
- [6] [HTTP://WWW.MICROCHIP.COM/PAGEHANDLER/EN-US/TECHNOLOGY/MOTORCONTROL/MOTOR-TYPES/BLDC.HTML](http://WWW.MICROCHIP.COM/PAGEHANDLER/EN-US/TECHNOLOGY/MOTORCONTROL/MOTOR-TYPES/BLDC.HTML)
- [7] <http://p.kobrlle.sweb.cz/pohony/blok11.p>
- [8] http://homen.vsb.cz/~hav278/Vykonove_polovodicove_systemy_I/Cviceni/4_Stridace.pdf?
- [9] <http://batteryuniversity.com/>

