



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

KONCEPCE ELEKTROMOTORŮ POUŽÍVANÝCH V DOPRAVNÍCH PROSTŘEDCÍCH

THE CONCEPT OF ELECTRIC MOTORS USED IN VEHICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Polnický

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michael Böhm

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Vít Polnický**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Michael Böhm**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Koncepce elektromotorů používaných v dopravních prostředcích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Nabídka elektrických vozidel a vozítek se v současnosti velmi dynamicky rozšiřuje. Existuje na trhu několik koncepcí elektrických pohonů, kdy je volen kompromis pro splnění zadaných parametrů vozidla. Práce rešeršní povahy se zaměřuje na současná řešení elektrických pohonů vozidel a vozítek s důrazem na popis základního konceptu pohonu a následné konstrukce.

Cíle bakalářské práce:

Přehled současných koncepcí elektrických pohonů.

Uvedení konkrétních vozidel/vozítek s těmito variantami.

Kritické zhodnocení jednotlivých koncepcí.

Srovnání jednotlivých koncepcí z hlediska výkonových parametrů, dojezdu a nákladů.

Seznam doporučené literatury:

BOLDEA, Ion a Syed A NASAR. Electric Drives. Boca Raton: CRC Press, 2017. ISBN 9781498748209. Dostupné z: doi:10.1201/9781315368573.

LINK, Albert, Alan O'CONNOR a Troy SCOTT. Battery Technology for Electric Vehicles. London: Routledge, 2015. ISBN 9781138811102. Dostupné z: doi:10.4324/9781315749303.

HUGHES, Austin a Bill DRURY. Electric Motors and Drives. Oxford: Elsevier Science & Technology, 2013. ISBN 0080983324.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá popisem koncepcí elektrických pohonů využívaných v současných vozidlech. V první části je vysvětlen základní princip fungování elektromotoru a jednotlivé druhy elektromotorů jsou následně podrobně popsány. V další části práce jsou elektrifikovaná vozidla rozdělena do tří skupin podle podílu výkonu elektrického motoru na pohon vozidla. Skupiny jsou dále rozděleny podle uspořádání pohonné jednotky ve vozidle s uvedením výhod a nevýhod jednotlivých koncepcí. Ve třetí část jsou uvedena a porovnána konkrétní vozidla z jednotlivých skupin z hlediska výkonu, dojezdu a ceny. V závěru jsou koncepce zhodnoceny a je zde nastíněn možný vývoj do budoucna.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrický pohon, elektromotor, hybridní elektrické vozidlo, plně elektrické vozidlo,

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the description of electric drives concepts in current vehicles. In the first part, the basic principle of the electric motor is explained, and different types of electric motors are described in detail. In the next part of the thesis, the electrified vehicles are divided into three groups according to the power share of electric motor for vehicle propulsion. The groups are further subdivided according to the powertrain arrangement in the vehicle, indicating the advantages and disadvantages of each concept. In the third part, specific vehicles from each group are presented and compared in terms of performance, range and price. Finally, the concepts are evaluated and a possible development is outlined.

KEYWORDS

Electric drive, electromotor, hybrid electric vehicle, all-electric vehicle

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLNICKÝ, Vít. Koncepce elektromotorů používaných v dopravních prostředcích [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139756>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Michael Böhm.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Michaela Böhma a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 20. května 2022

.....

Vít Polnický

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Michaelu Böhmovi za cenné rady a vřelou pomoc při psaní mé bakalářské práce. Další dík patří mé rodině, převážně mým rodičům, kteří mi umožnili studium na této škole.

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| Úvod | 6 |
| 1 Elektrický pohon..... | 7 |
| 1.1 Kartáčový stejnosměrný motor | 8 |
| 1.2 Indukční motor | 13 |
| 1.3 Bezkartáčový stejnosměrný motor..... | 18 |
| 1.4 Spínavý a synchronní reluktanční motor | 20 |
| 1.4.1 Spínavý reluktanční motor..... | 21 |
| 1.4.2 Synchronní reluktanční motor | 22 |
| 1.4.3 Synchronní reluktanční motor s permanentními magnety..... | 22 |
| 2 Dělení elektrifikovaných vozidel | 23 |
| 2.1 Hybridní vozidla (HEV) | 23 |
| 2.1.1 Rozdělení HEV podle uspořádání elektromotoru..... | 24 |
| 2.1.2 Rozdělení podle hybridizačního faktoru..... | 26 |
| 2.2 Plug-in hybridní vozidla (PHEV) | 27 |
| 2.3 Plně elektrická vozidla (AEV) | 28 |
| 2.3.1 Elektrická vozidla s palivovými články (FCEV)..... | 29 |
| 2.3.2 Bateriová elektrická vozidla (BEV) | 30 |
| 3 Vybraná vozidla | 33 |
| 3.1 Vybrané plně elektrické automobily | 33 |
| 3.1.1 Vozidla s jedním nebo dvěma elektromotory | 33 |
| 3.1.2 Automobily se třemi nebo čtyřmi elektromotory | 37 |
| 3.2 Vybrané hybridní automobily | 41 |
| 3.2.1 HEV se sériovým uspořádáním (s prodlužovačem dojezdu) | 41 |
| 3.2.2 HEV s Paralelním uspořádáním | 42 |
| 3.2.3 HEV s power-split uspořádáním..... | 43 |
| 3.3 Ostatní elektrifikovaná vozidla | 44 |
| 3.3.1 Hybridní a plně elektrické autobusy | 44 |
| 3.3.2 Plně elektrické motocykly | 46 |
| 3.3.3 Elektrická vozítka | 47 |
| Závěr | 49 |
| Použité informační zdroje..... | 51 |
| Seznam použitých zkratk a symbolů..... | 57 |

ÚVOD

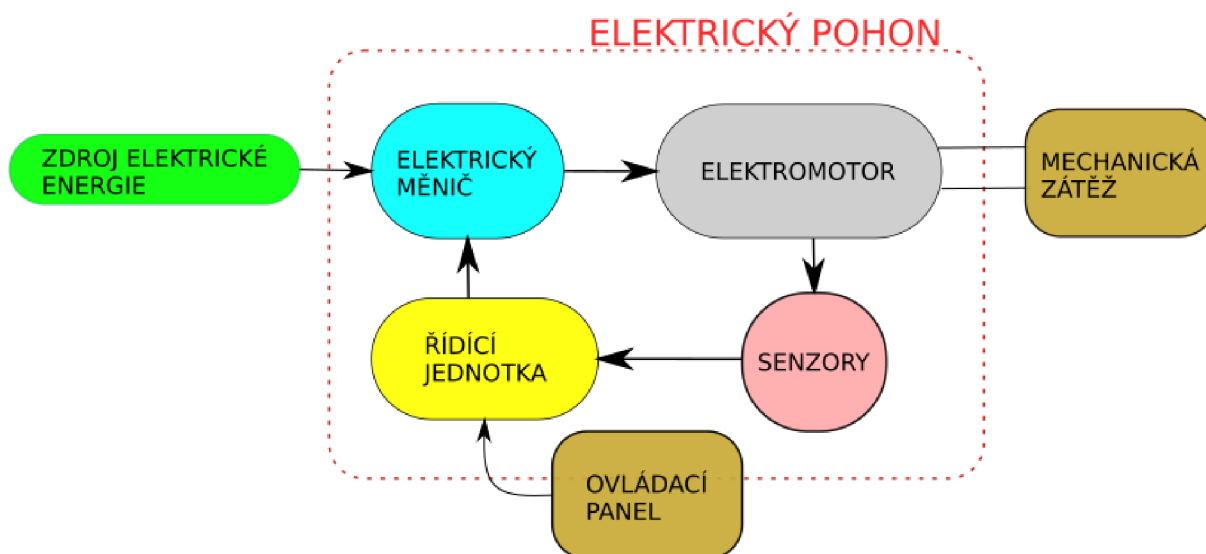
Elektrické pohony existují na trhu srovnatelně dlouho jako spalovací motory a od svého vzniku našly uplatnění ve všech odvětvích průmyslu. Pro pohon vozidel dominoval ve 20. století spalovací motor, který prošel mnoha inovativními změnami za účelem snížení spotřeby a množství škodlivých látek vypouštěných do okolí. Nicméně se stále narůstajícím zájmem veřejnosti o ekologická témata a politickým nátlakem na snižování emisí, se proces elektrifikace pohonných jednotek ve vozidlech začal progresivně rozvíjet. Vzniklo a stále vzniká mnoho odlišných koncepcí, které nahrazují „emisně nečisté“ konvenční motory elektrickými motory společně s kombinací dostupných technologií pro výrobu a ukládání elektrické energie.

S novými možnostmi, které elektrické pohony nabízejí, se mezi výrobci vozidel s dlouholetou tradicí objevují nové společnosti, které svým vizionářským přístupem dynamicky urychlují proces elektrifikace. Mezi takové společnosti patří například Tesla Motors, Rivian Automotive LLC, Lucid Motors nebo Energica Motor Company. Podle posledních prohlášení řady velkých evropských automobilových výrobců a politických plánů Evropské unie by se měl rok 2035 stát přelomový. Do toho roku je navrženo, aby všechny vyráběná vozidla nemohla produkovat žádné emise CO₂.

V bakalářské práci jsou uvedeny jednotlivé typy elektrických motorů, od kartáčových DC motorů až po IPM-SynRM motory, které se využívají v dnešních dopravních prostředcích. Motory jsou popsány z hlediska konstrukčního uspořádání, výkonových a trakčních vlastností. Dále se práce zabývá rozdělením elektrifikovaných vozidel podle podílu elektromotorů na pohonu vozidla HEV, Plug-in HEV a EV. Pro jednotlivé kategorie jsou zobrazeny možné variace umístění elektromotorů ve vozidlech, popsány jsou také jejich výhody a nevýhody. V poslední části práce jsou porovnány zástupci různých kategorií elektrifikovaných vozidel. Jako hlavní faktory pro porovnání jsou zohledněny výkonové charakteristiky, dojezd a cena vozidla.

1 ELEKTRICKÝ POHON

Elektrický pohon je systém několika součástí sloužící k přeměně elektrické energie na mechanickou energii. Jejich využití najdeme téměř v každém odvětví průmyslu – domácí spotřebiče, vozidla pro přepravu osob a zboží, čerpadla, hračky, roboty atd. Elektrické pohony rozlišujeme podle možnosti měnit jejich rychlost otáčení na elektrické pohony s konstantní rychlostí a s plynule proměnou rychlostí. Jelikož pro praktické využití ve vozidlech mají smysl pouze s plynule proměnou rychlostí, budu se dále zabývat jen jimi.



Obr. 1 Blokové schéma elektrického pohonu

Typický elektrický pohon obsahuje elektrický motor, elektrický měnič, senzory, řídicí jednotku a ovládací panel, přičemž nejpodstatnější a největší částí je právě elektrický motor, který může být poháněn stejnosměrným nebo střídavým proudem. Dříve byl velmi oblíbený stejnosměrný elektromotor, ale s poměrně rychlým vývojem elektrických měničů na konci 20. století, které usnadnily ovládání a zvýšily účinnost motorů, se podíl střídavých elektromotorů rapidně zvýšil [1]. S rostoucí poptávkou a požadavky na výkon, rychlost otáčení, cenu, hmotnost a zástavbový prostor vzniklo velké množství typů elektromotorů s odlišnými charakteristikami.

ZÁKLADNÍ PRINCIPY FUNGOVÁNÍ A POPIS ELEKTROMOTORU

V elektrickém motoru můžeme vždy nalézt dvě základní části – stator a rotor. Stator je nepohyblivá část, na které je navinuto budící vinutí, nebo jsou zde upevněny permanentní magnety k vytvoření magnetického pole uvnitř statoru. Otáčivého pohybu rotoru je u většiny elektromotorů docíleno silovými účinky magnetického pole na elektricky vodivou část, která se nachází uvnitř magnetického pole a prochází jím proud. Výsledná síla působící na vodič se určí podle vztahu (1.1), kde B je magnetická indukce udávaná v jednotkách [T], I je proud ve vodiči v [A] a l je délka vodiče v [m]:

$$F = B \cdot I \cdot l. \quad (1.1)$$

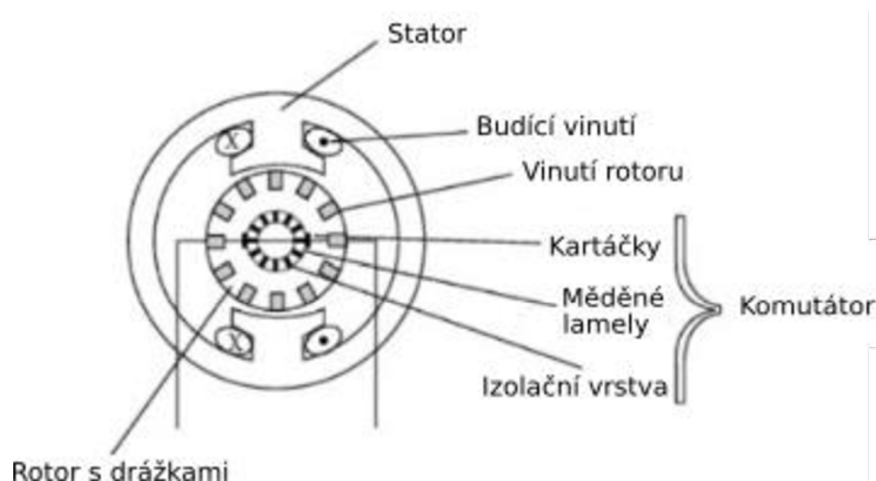
Na výsledné síle se podílí veličiny charakterizující jak elektrické, tak i magnetické pole. K maximalizování velikosti magnetické indukce B musí být mezi rotorem a státorem minimální vrstva vzduchu, která díky své vysoké reluktanci (magnetickému odporu) brání

průchodu magnetického toku, a snižuje tak účinky magnetického pole na vodič. Proto jsou v rotoru vytvořeny drážky, ve kterých je uloženo vinutí a minimalizují se ztráty magnetického toku. Pro plynulou rotaci rotoru je zapotřebí, aby se pravidelně měnila buď orientace magnetického pole nebo směr proudu ve vodiči. Toho lze docílit například pomocí mechanických komutátorů nebo elektronických měničů [2].

Jelikož samotné tělo statoru a rotoru je vyrobeno z kovových elektricky vodivých materiálů, dochází uvnitř vlivem měnícího se magnetického indukčního toku k indukci proudu a vzniku vířivých proudů, které mohou snižovat účinnost motoru. Proto se stator i rotor vyrábí z transformátorových plechů – kovové plechy jsou spojeny nevodivým materiálem a tím se účinky indukovaného napětí a proudu sniží a téměř neovlivňují chod motoru.

1.1 KARTÁČOVÝ STEJNOSMĚRNÝ MOTOR

Kartáčový stejnosměrný motor, někdy také nazýván komutátorový nebo konvenční, patří mezi nejpoužívanější elektromotory minulého století. Jejich oblíbenost byla způsobena jednoduchým konstrukčním řešením, nízkou cenou a širokým rozsahem výstupního výkonu a otáček, které jsou ovlivněny vstupním napětím. Pro menší motory s nižším výkonem se častěji používají permanentní magnety ve statoru, naopak ve středně a vysoce výkonných motorech nalezneme elektromagnety. Permanentní magnety mají tu výhodu, že nepotřebují samostatný elektrický obvod a zabírají méně místa než vinutí. Na druhou stranu jejich magnetické pole je neměnné, čímž ztrácíme jednu z možností řízení motoru, a mají omezenou pracovní teplotu. Například jedny z nejsilnějších magnetů Nd-Fe-B mohou pracovat maximálně do 150 °C. Cívky (vinutí), uložené v drážkách na rotoru, jsou napájeny stejnosměrným proudem přes lamely měděného komutátoru a kartáčky, mezi kterými dochází ke skluznému kontaktu. Schéma stejnosměrného kartáčového motoru je zobrazeno na Obr. 2 [2].



Obr. 2 Schéma kartáčového stejnosměrného motoru (podle **Chyba!**
Nenalezen zdroj odkazů.)

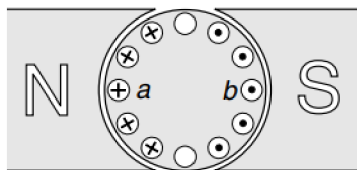
KROUTÍCÍ MOMENT

Komutátor je v podstatě mechanický měnič elektrického proudu, díky kterému dochází ke změně polarity pólů na rotoru. Jeho způsob fungování se nejlépe vysvětlí u statoru se dvěma magnetickými póly a několika vinutími na rotoru, viz. **Obr. 3Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..** Při kontaktu kartáčku, který je připojen ke zdroji, s lamelou komutátoru se vytvoří

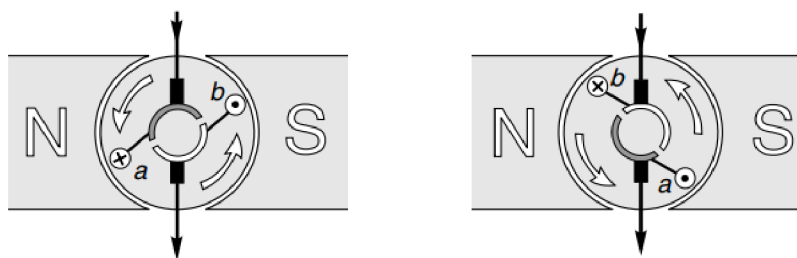
uzavřený obvod a proud prochází přes cívku na rotoru a vychází zpět přes druhou lamelu a kartáček do zdroje. Na schématu vstupuje proud do vodiče „a“ směrem od nás a opačným směrem proudí ve vodiči označeném písmenem „b“. Na vodič „a“ u severního pólu statoru působí elektromagnetická síla směrem dolů (kolmo na vodič), kdežto na vodič „b“ směrem nahoru. Síla na rameni vytváří kroutící moment T a rotor se začne otáčet. Jeho velikost se dá mimo jiné také vyjádřit vztahem (1.2), kde r je poloměr rotoru, K_T je konstanta pro vybraný motor, Φ představuje velikost magnetického toku, a I označuje velikost proudu ve vodiči

$$T = F \cdot r = K_T \cdot \Phi \cdot I. \quad (1.2)$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že pro udržení stálého točivého momentu při proměnných otáčkách je zapotřebí udržet konstantní velikost proudu ve vinutí. Zároveň je ale jasné, že pokud se vodiče „a“ a „b“ částečně pootočí, velikost síly a tím i točivý moment poklesne. Navíc v momentě, kdy se vodiče dostanou do horní polohy, síly mají společnou nositelku a nevzniká žádný moment. Proto je zapotřebí, aby na rotoru bylo navinuto co nejvíce cívek. Nicméně pokud se rotor vlivem setrvačných sil otočí o více jak půl otáčky, vodič „a“ by se vyskytl u jižního pólu a síla by stále působila směrem dolů a vytvářela by opačný točivý moment. Zde se uplatní komutátor, který při průchodu vodiči horní (respektive spodní) pozici změni směr protékání proudu a nevznikne žádný brzdný moment, viz Obr. 3 a Obr. 4. Abychom dosáhli plynulého točivého momentu, a tedy i plynulého chodu motoru, je zapotřebí většího počtu vinutí na rotoru, stejně jako počtu lamel na komutátoru [2].



Obr. 3 Schéma vinutí rotoru ve dvoupólovém stejnosměrném motoru [2]



Obr. 4 Zobrazení změny směru proudu ve vinutí díky komutátoru [2]

Při rotaci rotoru se ve vinutí indukuje podle Faradayova zákona napětí. Toto napětí se označuje E (v anglické literatuře se uvádí pojem EMF – Electromotive force). Indukované napětí je závislé na magnetické indukci B , délce vodiče l , jeho rychlosti v a počtu závitů na cívce N_c . Jeho velikost určíme podle vztahu

$$E = N_c \cdot B \cdot l \cdot v \quad (1.3)$$

Význam indukovaného napětí nejlépe objasním na elektrickém obvodu jednoduchého stejnosměrného elektromotoru podle **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Pokud si vyjádříme napětí rovnicí pomocí Kirchhoffových zákonů, dostaneme vztah pro velikost napětí na

zdroji, z kterého si dále můžeme vyjádřit velikost proudu v daném obvodu, rovnice (1.4) a (1.5) kde U je napětí na zdroji, E je indukované napětí, I je velikost proudu a R představuje odpor vodiče.

$$U = E + I \cdot R \quad (1.4)$$

$$I = \frac{U - E}{R} \quad (1.5)$$

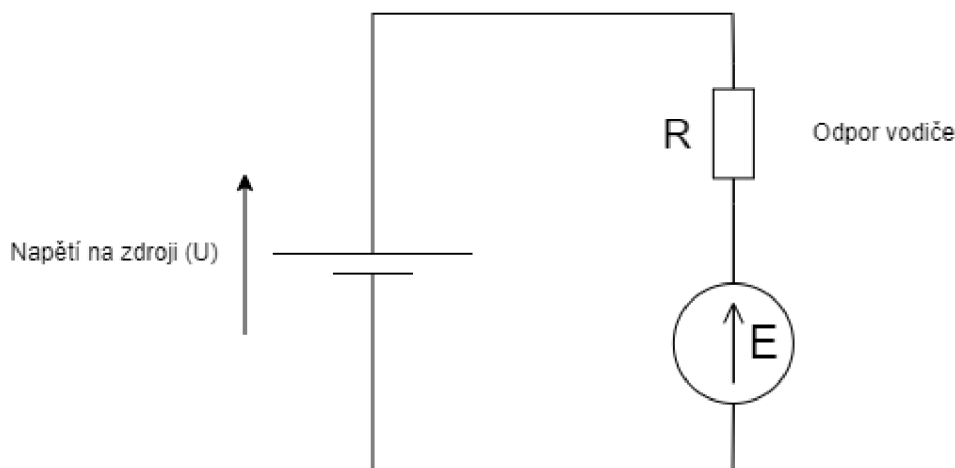
Z rovnice (1.5) vyplývá, že pokud bude indukované napětí U menší než vstupní napětí, proud I nabývá kladných hodnot a teče směrem ze zdroje – systém se chová jako motor. V opačném případě bude proud nabývat záporných hodnot a poteče opačným směrem, tedy zpět do zdroje. Energie je dodávána zpět do zdroje a systém se chová jako generátor. Pokud rovnici (1.4) vynásobíme proudem I , dostaneme vztah pro výkony.

$$\begin{aligned} \text{Vstupní výkon } (U \cdot I) &= \text{Mechanický výstupní výkon } (E \cdot I) \\ &+ \text{tepelné ztráty vodiče } (I^2 \cdot R) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Z hlediska účinnosti motoru je požadováno, aby co největší množství vstupního elektrického výkonu bylo přeměněno v mechanický výkon a docházelo co k možná nejmenším ztrátám. Snížením proudu sice omezíme tepelné ztráty, ale na jeho velikosti je závislý točivý moment (rovnice (1.2)), který je jeden z hlavních parametrů motoru. Z toho důvodu je podstatné dosahovat co nejvyšších hodnot indukovaného napětí. Pro reálnější zobrazení motoru nahradíme ve schématu na Obr. 5 rezistor cívkou o určité inductanci a odporu [2]

U motoru je podstatná jeho provozní rychlost, když na motor není vyvíjena žádná zátěž. Při rotaci naprázdno je třeba překonat pouze slabé třecí silové účinky, které můžeme zanedbat, a tím pádem obvodem nepoteče žádný proud (nulový kroučící moment). Z rovnice (1.4) vyplývá, že se napětí na zdroji rovná indukovanému napětí. Při nahrazení obvodové rychlosti rotoru v rovnici (1.3), lze vyjádřit otáčky motoru v závislosti na vstupním napětí U . Veličiny charakteristické pro daný motor jako je poloměr rotoru r , délka vodiče l a počet závitů N nahradí jediná konstanta K_E . Z dané rovnice je patrné, že rychlost otáčení motoru je přímo úměrná na velikosti vstupního napětí U [2].

$$U = E = N_c \cdot B \cdot l \cdot 2\pi \cdot n \cdot r = K_E \cdot \Phi \cdot n \rightarrow n = \frac{U}{K_E \cdot \Phi} \quad (1.7)$$



Obr. 5 Schéma obvodu jednoduchého elektrického stejnosměrného motoru (podle [2])

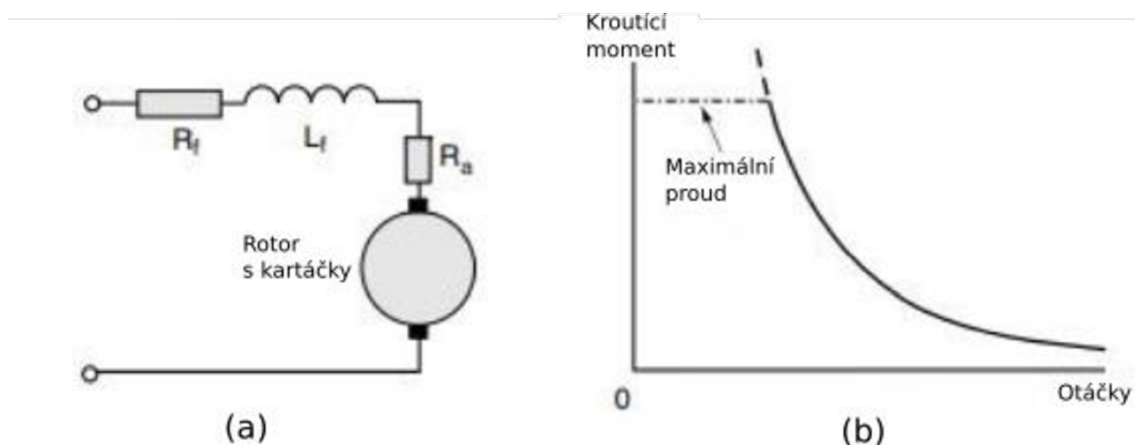
Ve většině případů je výhodnější použít ve statoru elektromagnety. Pokud je budící vinutí napájeno ze samostatného zdroje, jedná se o motory s cizím buzením. Motory, které mají budící vinutí napojeny na stejný zdroj, jako je vinutí kotvy, dělíme podle způsobu zapojení na sériové, derivační (paralelní) a kompaundní. Sériové a derivační motory jsou si velmi podobné, co se vstupních i výstupních parametrů týče [2]. Mezi hlavní rozdíly, pokud neuvažujeme typ zapojení, patří charakter budícího vinutí. Derivační motory většinou mívají větší počet závitů, zatímco sériovým motorům stačí nižší počet, ale s větším průměrem drátu, protože vinutím protéká větší proud. Motory kompaundní obsahují oba výše zmíněné typy zapojení a jejich vlastnosti jsou kombinací obou motorů. Více detailněji si rozebereme sériový motor, protože se poměrně hojně využívá jako pohonná jednotka v lokomotivách a tramvajích [3].

SÉRIOVÝ KARTÁČOVÝ STEJNOSMĚRNÝ MOTOR

Vinutí statoru a rotoru je zapojeno sériově, za sebou. Změna proudu protékající vinutím na rotoru, také nazývané kotvou, přímo ovlivňuje velikost magnetického toku. Podle rovnice (1.2) je zřejmé, že točivý moment je úměrný druhé mocnině proudu. Po menších úpravách vztahu (1.7) dostaneme závislost točivého momentu na vstupním napětí a otáčkách motoru s tím, že odpory ve vinutích zanedbáme

$$T \approx \left(\frac{U}{n}\right)^2. \quad (1.8)$$

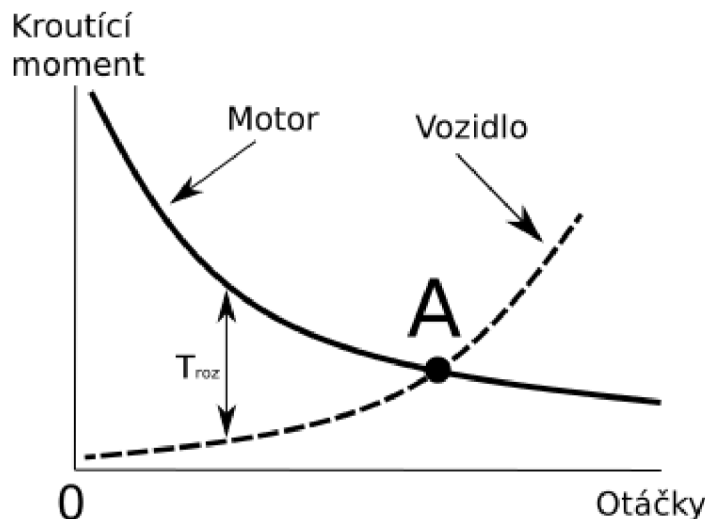
Z rovnice (1.8) a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** (b) je patrné, že při rozběhu motoru nastává problém. Při nízkých rychlostech se indukuje velmi malé zpětné napětí a většina energie ze zdroje se přemění na teplo. Vinutími protéká vysoký proud, stejně jako točivý moment dosahuje vysokých hodnot. Aby nedošlo k přetížení vodičů, zapojuje se při startu u většiny motoru rozběhový odpor, který omezí maximální dovolenou hodnotu proudu [2].



Obr. 6 a) Schéma zapojení sériového stejnosměrného motoru (b) Závislost točivého momentu na rychlosti motoru (podle [2])

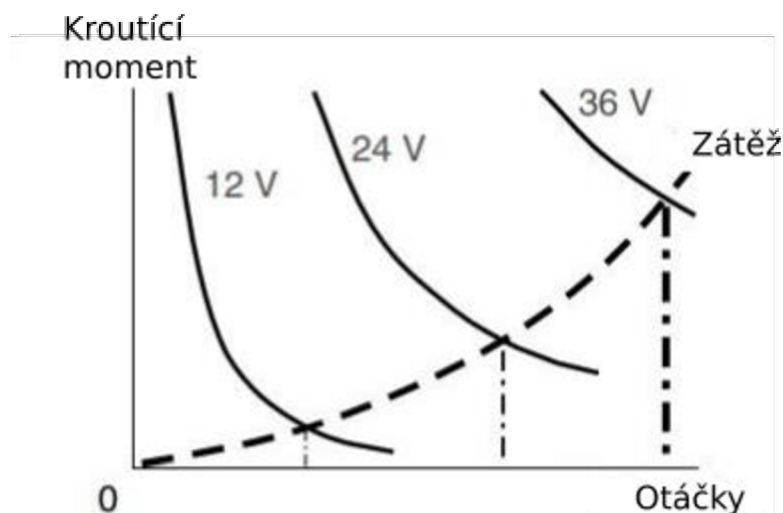
Vysoký počáteční kroučící moment není výhradou pouze sériových motorů, stejných hodnot dosahují všechny stejnosměrné motory. Hlavním důvodem, proč jsou sériové motory využívány pro pohon trakčním vozidel, je průběh křivky závislosti točivého momentu na rychlosti, zobrazené na Obr. 6 (b). Při rozjezdu disponuje motor velkým kroučícím momentem k uvedení vozidla do pohybu (překonání valivého odporu, statického tření atd.) a je tedy schopen rychlého zrychlení a dosažení požadované rychlosti. Konkrétní ukázkou

průběhu křivky motoru a vozidla – vlaku si můžeme prohlédnout na Obr. 7. Čárkovaná křivka představuje kroutící moment potřebný k udržení vozidla na určité rychlosti. S rostoucí rychlostí klesá rozdíl T_{roz} mezi kroutícím momentem motoru a zátěžným momentem, zrychlení se snižuje, až dospěje do bodu A, kde se křivky protnou a vlak dosáhl maximální rychlosti [2].



Obr. 7 Porovnání průběhu křivky závislosti kroutícího momentu na rychlosti pro motor a vozidlo (podle [2])

Pro zvýšení intervalu, ve kterém se pohybuje rychlost motoru lze zvýšit pomocí několika způsobů. Mezi nejběžnější patří způsob zapojení článků mezi sebou ve vícečlánkové baterii (zdroji). Při změně z paralelního propojení na sériové se skokově navýší výstupní napětí a tím i kroutící moment. Ukázka změny závislosti kroutícího momentu na otáčkách při skokové napětí je na Obr. 8 [2].



Obr. 8 Ovládání rychlosti pomocí skokové změny napětí (podle [2])

SHRNUTÍ

Výstupní kroutící moment je závislý na velikosti proudu protékající kotvou, naopak otáčky motoru jsou regulovány vstupním napětím na zdroji [3]. Mezi hlavní výhody, oproti

střídavým motorům, patří téměř neomezený rozsah otáček. U stejnosměrných motorů jsme limitováni velikostí zdroje (vstupního napětí), nýbrž u střídavých motorů jsme omezeni frekvencí vstupního napětí, která bývá často 50 Hz [2]. Naopak velkou slabinou je samotný komutátor. Během provozu dochází k jeho opotřebení a motor vyžaduje častější údržbu. Dále díky skluznému kontaktu mezi kartáčky a komutátorem dochází k jiskření a tvorbě malých částecek uhlíku, které narušují elektromagnetické pole [1].

1.2 INDUKČNÍ MOTOR

Indukční motory jsou považovány za jedny z nejlepších motorů vůbec. Pro jejich jednoduchost a využitelnost se rozšířily do všech odvětví průmyslu, kde v mnoha případech nahradili stejnosměrné motory. Jejich dominance je převážně u strojů a výrobků s neměnnou rychlostí, ale s rozvojem měničů frekvence se uplatní i v aplikacích s řízenou rychlostí. Radíme je mezi střídavé asynchronní motory [1]. Stejně jako u stejnosměrného motoru, indukční motor obsahuje stator a rotor oddělený vzduchovou mezerou. Na statoru je budící vinutí napájené střídavým proudem (3 fázemi), které generuje otáčivé magnetické pole. Na rozdíl od stejnosměrného motoru na rotoru není navinuto vinutí a proud se zde generuje pomocí elektromagnetické indukce. Z hlediska hmotnosti se téměř neliší oproti stejnosměrným motorům, při stejném výkonu a otáčkách. Rozdíl je ale v ceně, kdy indukční motory jsou díky jednodušší konstrukci levnější [2].

VZNIK TOČIVÉHO MAGNETICKÉHO POLE

Na statoru, tvořený tenkými izolovanými elektrotechnickými plechy, jsou navinuty cívky, které jsou připojeny přes 3 fáze ke zdroji střídavého napětí o frekvenci f_1 . Vinutí, o stejném počtu závitů, jsou umístěna do drážek, buď po jedné nebo dvou vrstvách a jsou vzájemně izolovány. Jejich uspořádání pak ovlivňuje počet pólů p vzniklých ve statoru, například čtyřpólový motor má dva severní a dva jižní magnetické póly. Počet pólů ovlivňuje rychlost otáčení magnetického pole, kterou označujeme N_s , někdy nazývána jako synchronní rychlost, případně synchronní otáčky, a je určena vztahem (1.9), kde f_1 je frekvence střídavého napětí zdroje uváděna v [Hz] a p je počet pólů. Synchronní otáčky pro běžné počty pólů jsou uvedeny v *Tab. 1*. Cívky se dají zapojit k 3 fázovému vedení ve dvou různých variacích – zapojení do hvězdy (star) nebo do trojúhelníku (delta), čímž ovlivní velikost vstupního napětí. Magnetický tok, který prochází vzduchovou mezerou mezi státorem a rotorem, mění svoji polaritu s frekvencí změny proudu v cívce. Průběh změny polarity probíhá v ideálním případě jako sinusová křivka [2].

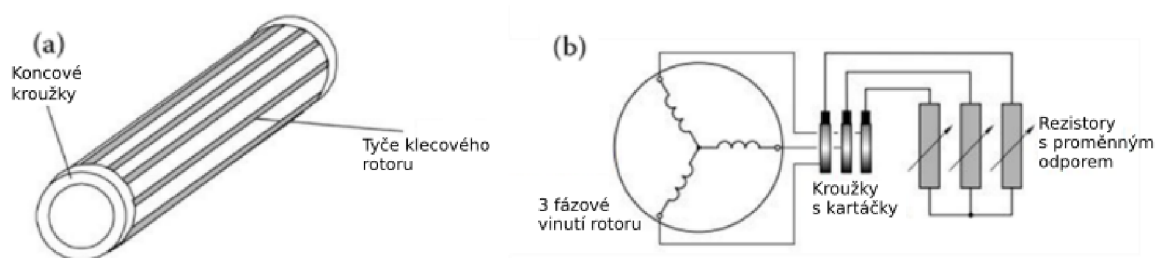
$$N_s = \frac{120 \cdot f_1}{p} \quad (1.9)$$

Tab. 1 Přehled synchronních rychlostí pro různý počet pólů

| Počet pólů (p) | Synchronní otáčky N_s [ot/min] pro zdroj o frekvenci 50 [Hz] |
|----------------|---|
| 2 | 3000 |
| 4 | 1500 |
| 6 | 1000 |
| 8 | 750 |
| 10 | 600 |
| 12 | 500 |
| 16 | 375 |

VZNIK KROUTÍCÍHO MOMENTU

Nejprve je třeba se zaměřit na samotný rotor indukčního motoru. Používají se dva typy rotorů – s kotvou nakrátko a s kroužkovou kotvou. Jednotlivé názvy se v různých literaturách liší, můžeme se také setkat například s označením klecový rotor a kroužkový rotor. V obou případech jsou základem tenké elektrotechnické plechy, ve kterých jsou zhotoveny drážky různých tvarů. V případě klecového rotoru jsou zde uloženy vodivé tyče (hliníkové nebo měděné), které jsou na obou koncích spojeny kroužky, aby došlo k uzavření elektrického obvodu. Kvůli snížení hluku rotoru se tyče umísťují pod úhlem. U rotoru s kroužkovou kotvou je v drážkách navinuto vinutí, podobně jako u statoru. Většinou se vinutí zapojuje do hvězdy a konce fází jsou spojeny s kroužky, na které dosedají uhlíkové kartáčky. Aby došlo k uzavření obvodu rotorového vinutí, kartáčky jsou propojeny a ve většině případech se připojují k rezistorům s proměnným odporem, aby došlo k navýšení impedance v obvodu. V praxi se spíše používá klecový motor, protože je levnější, spolehlivější a konstrukčně jednodušší. Jak jsem zmiňoval, drážky na rotoru mají různé tvary a tím ovlivňují charakteristiky motoru, jako je výkon, rychlost otáčení a počáteční kroučící moment. Jejich tvar je koncipován tak, aby byly částečně otevřené a vznikl zde prostor pro vzduchovou mezeru [2].



Obr. 9 (a) Klecový rotor [1] (b) Kroužkový rotor [2]

Otáčivé magnetické pole statoru indukuje v rotoru napětí a spojenými tyčemi začíná protékat indukovaný proud, někdy nazýván rotorový. Frekvence indukovaných veličin závisí na rychlosti otáčení magnetického pole. Na rotor začne působit síla od magnetického pole statoru, která vyvolá kroučící moment a rotor začne rotovat. Pokud by se rotor otáčel se stejnou rychlostí jako magnetické pole, v rotoru by se přestalo indukovat napětí, zanikla by síla působící na tyče a rotor by začal zpomalovat. Tím opět dojde k indukci proudu a rotor je

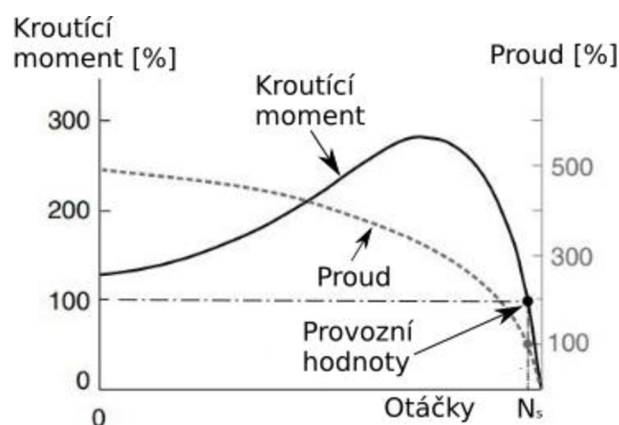
znovu urychlován. Je tedy zřejmé, že rotor se bude otáčet asynchronně, oproti magnetickému poli. K udržení rychlosti rotoru je zapotřebí neustálého rozdílu rychlosti (otáček) mezi rotorem a otáčivým magnetickým polem. Tento rozdíl označujeme jako skluz s a při označení otáček rotoru jako N se určí velikost skluzu následovně

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (1.10)$$

Velikost skluzu se pohybuje řádově v procentech, u menších motorů dosahujeme hodnoty až 10 %. Frekvence indukovaného napětí a proudu f_2 přímo souvisí s velikostí skluzu a frekvencí střídavého napětí zdroje, hodnotu určíme podle vztahu (1.11). Výsledný kroučící moment T se určí obdobně, jako u stejnosměrného motoru a závisí na velikosti indukovaného proudu (I_r), magnetické indukci B , dále na veličinách jako je délka kotvy (l), počet tyčí a poloměr rotoru, které shrneme do jedné konstanty k . Velikost magnetické indukce B je závislá na napětí ve vinutí statoru a velikost indukovaného proudu I_r je ovlivněna skluzem s . Při nízkých hodnotách skluzu se indukované napětí, proud I_r a magnetická indukce B mění se stejnou fází. Při vyšších hodnotách jsou magnetická indukce a indukovaný proud fázově posunuty a kroučící moment nedosahuje maximálních hodnot. Vliv fázového posunu určuje úhel Φ_r . Na Obr. 10 vidíme momentovou charakteristiku v závislosti na otáčkách rotoru s průběhem proudu ve statorovém vinutí. Stav označený černým, respektive šedým puntíkem označuje provozní stav se zátěží, kdy se otáčky rotoru blíží synchronním otáčkám. Je patrné, že při startu motoru prochází budícím vinutím vysoký proud, téměř až pětinasobná hodnota oproti provoznímu stavu, přičemž kroučící moment si zachovává nízké hodnoty. Vysoké hodnoty proudu způsobí značný úbytek napětí ve zdroji. Abychom překonali tento negativní jev, je zapotřebí při startu použít „startér“, který by snížil hodnoty proudu [2].

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (1.11)$$

$$T = k \cdot B \cdot I_r \cdot \cos \phi_r \quad (1.12)$$



Obr. 10 Momentová charakteristika indukčního motoru a průběh proudu ve vinutí statoru (podle [2])

Metody pro startování indukčního klecového motoru

V praxi se využívá 6 základních metod pro spouštění indukčního motoru

- Přímým připojením (DOL nebo DTL)
- Přepínačem Y/D (hvězda/trojúhelník)
- Autotransfornátorem
- Odporovým nebo reaktančním startérem
- Softstartérem
- Frekvenčním měničem.

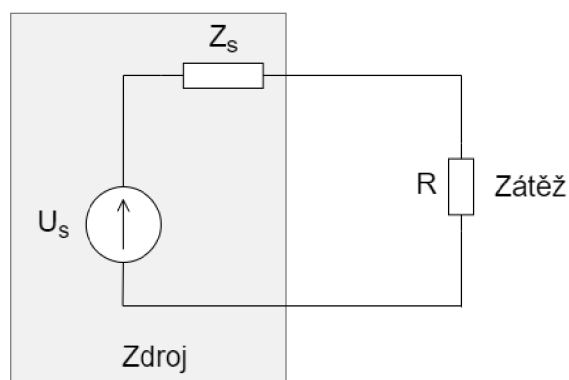
Ovlivnění proudové křivky se dá docílit i pomocí úprav tvaru a materiálu klece rotoru. Jedná se o kotvu s dvojitou klecí, odporovou klec a vírovou klec. U indukčních motorů s kroužkovou kotvou je rozběh motoru řízen regulací odporu rezistorů připojených ke kartáčkům [4].

Metoda přímým připojením

Jedná se o nejjednodušší metodu možného spuštění motoru. Pokud uvažíme, že zdroj střídavého napětí není ideální a k vyjádření jeho ztrát použijeme sériově zapojený rezistor o určité impedanci, poté zjednodušené schéma obvodu se zdrojem a zátěží (motorem) bude vypadat jako na Obr. 11. Výsledné napětí zdroje (U) stanovíme následovně, kde (U_s) představuje ideální napětí zdroje, (I) protékající proud obvodem a (Z_s) impedanci zdroje.

$$U = U_s - I \cdot Z_s \quad (1.13)$$

Je jasné, že při vysokých hodnotách proudu při startu impedance způsobí vysoký úbytek napětí a pokud je na jeden zdroj připojeno více motorů, náhlý pokles napětí naruší jejich chod. Proto je snaha docílit co nejnižších hodnot vnitřní impedance zdroje. Hodnota startovacího proudu je z větší části ovlivněna velikostí motoru, respektive jeho výkonem. Existují různé normy, které stanovují maximální výkon motoru – většinou do 3 kW. Tato metoda se tedy primárně používá pro menší motory a někdy se označuje zkratkou DOL nebo DTL („direct-on-line“, „direct-to-line“) [2].



Obr. 11 Zjednodušené schéma připojení zátěže ke zdroji napětí. (podle [2])

Přepínač Y/D

Metoda změny typu zapojení do hvězdy/trojúhelníku je velmi rozšířená metoda. Princip spočívá ve změně velikosti napětí na fázi statoru při startu motoru. Při spuštění jsou jednotlivé fáze zapojeny do hvězdy, kdy hodnota napětí nabývá zhruba 57,8 % hodnoty napětí při zapojení do trojúhelníku. Snížení napětí zapříčiní pokles startovacího proudu, ale i kroutícího momentu. Po určité době, kdy motor dosáhne požadovaných otáček se zapojení přepne do trojúhelníku a točivý moment opět dosahuje maximálních hodnot, aniž by došlo k velkému proudovému rázu [2]. Nevýhodou je však pokles kroutícího momentu při startu, kdy je nutné uvážit, jestli je moment dostačující k překonání zátěže. Přepnutí zapojení je možné provádět manuálně či automaticky, kdy k přepnutí dojde po dosažení předem stanovených hodnot otáček rotoru nebo proudu ve vinutí. Způsob rozběhu se používá spíše pro menší motory s normální a nízkou zátěží [5].

Autotransformátor

Mezi zdroj napětí a motor je připojen transformátor, který zvolením vhodného převodu redukuje hodnotu napětí na fázích statoru. Průběh je velmi podobný jako u přepínače Y/D, kdy po určité době dojde ke zpětnému přepnutí na plné napětí. Převod (k) označuje podíl vstupního a výstupního napětí. Při redukci napětí dojde ke snížení rozběhového proudu i momentu úměrně druhé mocnině převodu. Metoda se používá převážně pro výkonné motory [2].

Odporový a reaktanční startér

Snížení startovacího proudu je docíleno připojením rezistoru nebo induktoru ke každé fázi statoru. Tato metoda se využívá pouze zřídka [2].

Softstartér

Částečně s odlišným způsobem startu motoru oproti předešlým metodám pracuje softstartér. Jedná se o systém tří páru tyristorů zapojených antiparalelně a start motoru je řízen pomocí měnící se velikosti fázových napětí [2]. S rostoucím napětím se postupně navyšuje startovací proud, moment motoru a otáčky. Softstartér se většinou využívá u aplikací s vysokým počátečním proudem [6].

Frekvenční měnič

Další oblíbená a často používaná metoda je start pomocí frekvenčního měniče. Frekvenční měnič mění rozsah rozsah frekvence proudu vstupujícího do motoru a tím přímo urychluje/zpomaluje rychlost otáčení podle vztahu (1.9) [4]. Mezi jejich výhody patří, že se dají použít k plynulému rozjezdu motoru, ale i k následnému řízení otáček motoru během jeho provozu [2].

Řízení otáček indukčního motoru

Úpravou vztahu (1.10) vyplývá, že otáčky rotoru N závisí na počtu pólů p , frekvenci proudu f_1 ve statoru a velikosti skluzu s

$$N = \frac{N_s - s}{N_s} = \frac{120 \cdot f_1}{p} \cdot (1 - s).$$

Řízení rychlosti motoru lze měnit třemi různými způsoby [2]:

- změnou počtu pólů
- změnou velikosti skluzu
- změnou frekvence f_1 .

Změna počtu pólů

Na statoru mohou být navinuta dvě vinutí s různým počet cívek – pólů. Při přepnutí mezi jednotlivými vinutími dojde ke skokové změně otáček. Řízení motoru je tedy značně omezené a je využitelné pouze u motorů s klecovým rotorem [2].

Změna velikosti skluzu

Tato metoda je použitelná pouze pro kroužkové motory. Velikost skluzu je ovlivněna velikostí impedance v obvodu rotorového vinutí, která se dá regulovat pomocí proměnného odporu rezistorů. S rostoucím odporem rezistorů se skluz zvětšuje a dochází k poklesu otáček rotoru [2].

Změna frekvence

Velmi praktická metoda řízení motoru je využití frekvenčního měniče k regulaci frekvence proudu a tím i k plynulé změně synchronních otáček motoru. Zároveň také umožňuje měnit fázové napětí statoru. Úměrným zvyšováním frekvence a napětí lze dosáhnout konstantního maximálního kroutícího momentu při proměnných otáčkách [4]

1.3 BEZKARTÁČOVÝ STEJNOSMĚRNÝ MOTOR

Jako další vývojový stupeň stejnosměrných motorů můžeme označit bezkartáčový stejnosměrný motor (BLDC – brushless d.c. motor), někdy označován pod názvem elektricky komutovaný motor (ECM – Electronically commutated motor). Jak název vypovídá, ke změně směru proudu nedochází mechanickým komutátorem s kartáčky, ale komutace je řízena elektronicky pomocí napěťového střídače. Princip fungování je téměř stejný jako u kartáčového motoru. Oproti kartáčovému motoru je vinutí napájené stejnosměrným proudem navinuto na statoru a stacionární magnetické pole tvořené permanentními magnety se nachází na rotoru. Komutační proud se ve statorovém vinutí vytváří otáčivé magnetické pole, které způsobí rotaci rotoru [7]. Ve většině případech jsou na statoru vytvořeny tři magnetické póly, tedy třífázové vinutí.

BLDC motory spadají do kategorie synchronních motorů s permanentními magnety, které se rozdělují podle průběhu indukovaného napětí na statoru na 2 typy [8]:

- BLDC motor s lichoběžníkovým (trapezoidním) průběhem
- PMSM motor (Permanent magnet synchronous motor) se sinusoidním průběhem,

bohužel terminologie pro PSMS motory není jednotná a je možné se proto setkat s názvy jako je bezkartáčový synchronní motor s permanentními magnety, bezkartáčový střídavý motor (brushless a.c. motor – BLAC) nebo servomotor s permanentními magnety [2].

Aby docházelo k tvorbě kroutícího momentu, je zapotřebí včasné přepnutí proudu ve vinutí. Spínání jednotlivých fází se provádí na základě signálů ze senzorů nebo z dat průběhu napětí,

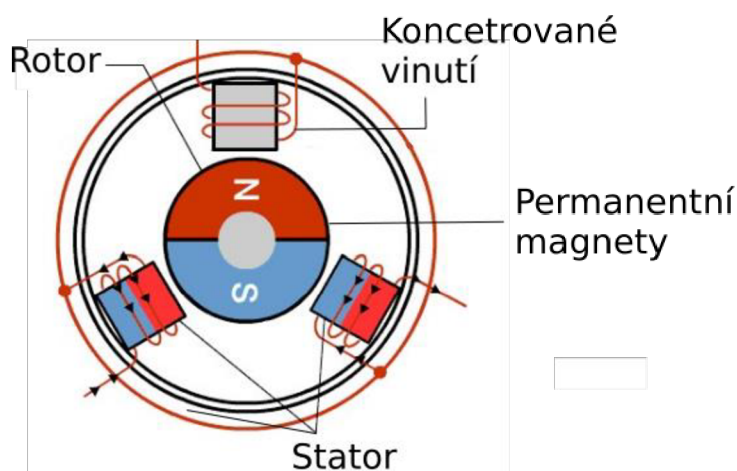
tzv. bezsenzoricky. Pro senzorické ovládání je nutné znát polohu rotoru vůči točivému magnetickému poli. K určení polohy se používají Hallovy sondy u BLDC motorů a složitější enkodéry u PMSM [8]. Bezsenzorické ovládání je u BLDC motorů umožněno díky lichoběžníkovému průběhu napětí. Jedna z možností je například určení polohy rotoru podle změny kladné/záporné hodnoty napětí, tedy kdy napětí poklesne na nulovou hodnotu. Bezsenzorické řešení je sice levnější, ale při nižších rychlostech nabývá elektromotorické napětí nižších hodnot a řízení je méně přesné [9].

Porovnání BLDC a PMSM

Rozdílný průběh indukovaného napětí je způsoben odlišným uspořádáním budícího vinutí. PMSM motory využívají složitější distribuované typ vinutí a BLDC konstrukčně jednodušší koncentrovaná vinutí – jednotlivá vinutí jsou navinuta samostatně na výstupcích statoru. Rozdíly způsobené průběhem napětí jsou uvedeny v Tab. 2. Ačkoliv synchronní motory s permanentními magnety dosahují většího točivého momentu, oba motory jsou vhodné pro trakční aplikace, kdy je možné při nízkých otáčkách překonat vysoký točivý moment zátěže [8]. Dalším důvodem využití těchto motorů pro pohon vozidel je poměrně nenáročný chlazení, protože tepelné ztráty se tvoří převážně na statoru. Je patrné, že PMSM motory se více uplatní v aplikacích vyžadující vyšší výkony a větší zátěžné momenty [2].

Tab. 2 Porovnání PMSM a BLDC motoru [8], [10]

| BLDC | PMSM |
|---------------------------------|------------------------------------|
| Lichoběžníkový průběh | Sinusoidní průběh |
| Koncentrované vinutí | Distribuované vinutí |
| Sepnutí maximálně 2 fází | Možnost sepnutí všech 3 fází naráz |
| Zvlnění křivky točivého momentu | Hladký průběh točivého momentu |
| Nižší výkon a účinnost | Vyšší účinnost a výkon |
| Jednodušší řízení | Obtížnější a dražší řízení |



Obr. 12 Schéma BLDC motoru. (podle [11])

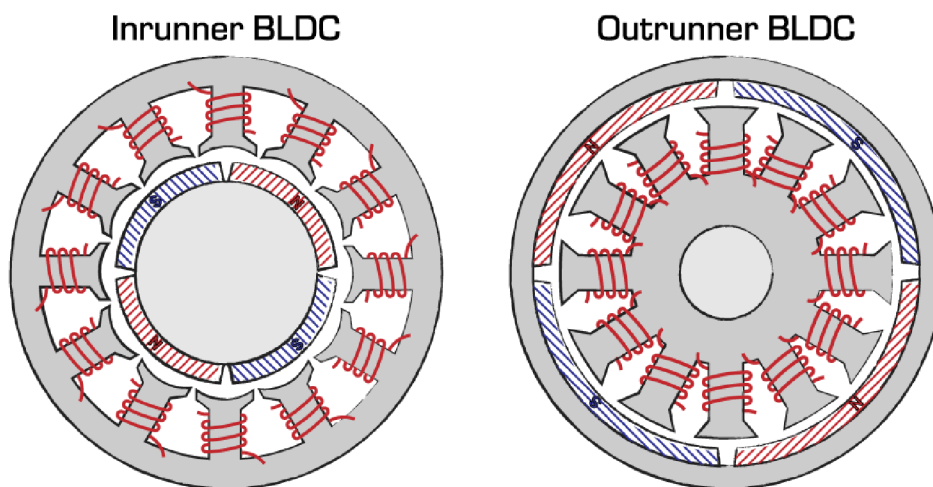
Porovnání BLDC a kartáčového stejnosměrného motoru

Bezkartáčové motory jsou téměř ve všech ohledech lepší než jejich kartáčový konkurent. Díky absenci komutátoru je jejich chod tišší, není zapotřebí údržba kartáčků, mohou dosahovat vyšších otáček a jejich životnost je prodloužena. Díky elektronickému řízení obecně dosahují vyšší účinnosti, přes 95 %, a průběh točivého momentu a rychlosti je plynulejší. Hodnoty otáček a momentu jsou stejně jako u kartáčových motorů závislé na velikost proudu ve vinutí a vlastnostech permanentních magnetů [10]. Dále dosahují vyššího výkonu při stejném objemu motoru, rotor s permanentními magnety má nižší setrvačnost a je schopen většího zrychlení. Mezi nevýhody lze zařadit vyšší pořizovací cenu kvůli složitějšímu řízení motoru [9].

Jelikož je napájené vinutí připojeno na nehybný stator, rotor s permanentními magnety se může nacházet uvnitř i vně statoru. Podle uspořádání rozlišujeme BLDC motory s

- BLDC s vnitřním rotorem (in-runner)
- BLDC s vnějším rotorem (out-runner).

Výhodou vnějších rotorů je možnost přímého vestavění celého motoru například do kola motocyklu a ušetření zástavbového prostoru. Zobrazení typů jednotlivých rotorů je na *Obr. 13*.



Obr. 13 Typy BLDC motoru podle uspořádání rotoru [13]

1.4 SPÍNAVÝ A SYNCHRONNÍ RELUKTANČNÍ MOTOR

Mezi další zástupce synchronních motorů patří reluktanční motor. Je zřejmé, že hlavní roli v principu fungování motoru představuje magnetický odpor – reluktance rotoru. Stator se nijak neliší od BLDC nebo indukčního motoru, kde točivé magnetické pole vytváří tři fázové vinutí. Rozdílná je konstrukce rotoru, kde se nenachází vinutí ani permanentní magnety. Rotor je tvořen pouze z laminovaných plechů a tvarován tak, aby zde vznikaly magnetické póly. Magnetický tok tvořený statorovým vinutím prochází přes vzduchovou mezeru mezi rotorem a státorem a dále samotným rotorem. Jelikož má vzduch oproti rotoru vysoký magnetický odpor, začne na póly rotoru působit síla, která otáčí rotorem tak, aby došlo k překrytí pólů rotoru a statoru a tloušťka vzduchové mezery klesne na minimum, stejně jako reluktance. Včasným sepnutím fází statoru dojde k plynulému otáčení rotoru [2]

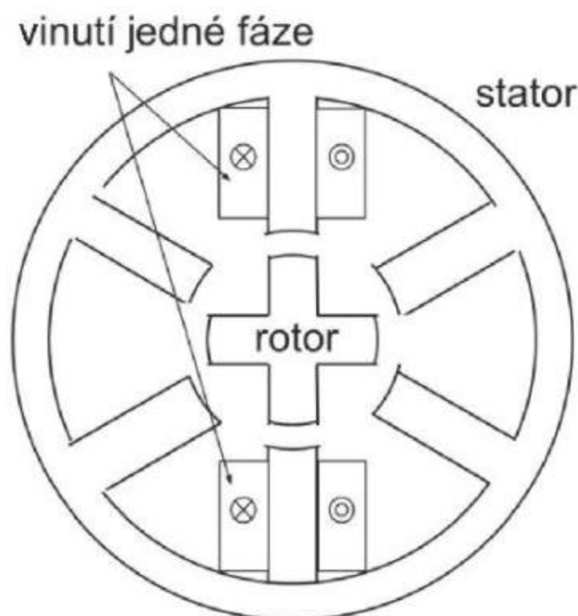
Reluktanční motory se rozdělují podle typu rotoru na

- synchronní reluktanční motory (SynRM) a
- spínavé reluktanční motory (SRM),

kdy rozdíl je v počtu pólů statoru a rotoru a tvaru rotoru. Je nutné zmínit, že do kategorie reluktančních motorů náleží ještě krokové motory, které se nicméně nevyužívají jako pohony vozidel. Oba motory, SynRM a SRM, díky absenci magnetů, vinutí na rotoru, komutátoru a kartáčků představují konstrukčně jednoduché a efektivní řešení. S rozvojem měničů a výkonové elektroniky, která je podobná jako u indukčních motorů a synchronních motorů s permanentními magnety, se využívání těchto motorů rapidně zvýšilo a reluktanční motory postupně nahrazují PMSM, BLDC i indukční motory [2].

1.4.1 SPÍNAVÝ RELUKTANČNÍ MOTOR

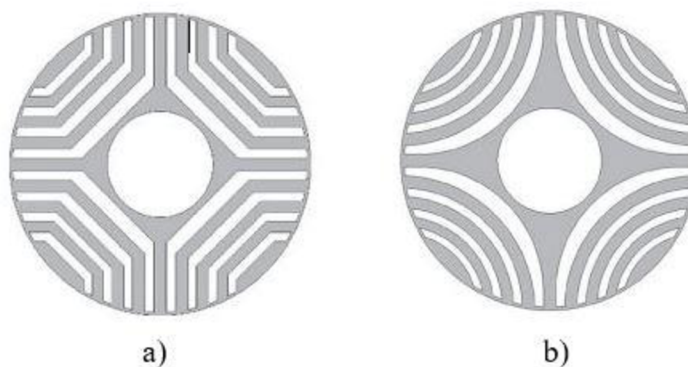
Spínavý reluktanční motor má vyniklé magnetické póly na rotoru i statoru, ale jejich počet je různý. Častým uspořádáním je 6/4 nebo 12/8, kde první číslo představuje počet pólů na statoru a druhé na rotoru. Různý počet pólů zajišťuje, že při překrytí dvou pólů se další pól rotoru vždy nachází mezi póly statoru a přitažlivá síla mezi nimi způsobí další natočení rotoru [2]. Na rotoru jsou umístěny polohové senzory a podle jejich signálů je ve správný moment sepnuta další fáze – cívky. Průběh momentu během jedné otáčky rotoru je nevyrovnaný a chod motoru může být hlučný. K vyrovnaní vlnovitého průběhu kroutícího momentu je nutné vysoké napětí na fázích rotoru, které udrží v oblastech mimo maximální kroutící moment konstantní proud i moment, nicméně zařízení, která toto umožňují jsou drahá [11] Schéma SRM je zobrazeno na *Obr. 14*. Rotorové plechy se chovají jako poměrně tuhé těleso, a proto mohou SRM dosahovat vysokých otáček [15].



Obr. 14 Řez synchronním reluktančním motorem [13]

1.4.2 SYNCHRONNÍ RELUKTANČNÍ MOTOR

Rotor SynRM obsahuje plechy se speciálními otvory, které vytváří na rotoru magnetické póly. Vzduchové mezery ovlivní reluktanci a tím určují cestu nejmenšího odporu pro magnetický tok. Počet pólů na statoru a rotoru je stejný a rotor tedy po překrytí pólů v této poloze zůstává a rotuje synchronně s otáčivým magnetickým polem. Při připojení zátěže se póly statoru a rotoru vychýlí o zatěžovací úhel. Pokud zátěž překročí dovolené hodnoty nebo se nemění frekvence otáčení magnetického pole, dojde k utržení a motor se zastaví. Nevýhodou synchronního reluktančního motoru je nutnost snížení frekvence otáčivého pole při startu motoru. Při rozběhu motoru na vyšší frekvence se kvůli setrvačnosti nestihne rotor ustálit na synchronních otáčkách a bude pouze střídavě kmitat kvůli střídajícím se přitažlivým a odpudivým silám způsobené magnetickými póly otáčivého pole [16]. Oproti SRM není rotor tak robustní, a proto se motor využívá více pro nízko-otáčkové aplikace, ale průběh momentu je více plynulý a provoz motoru je tišší [15]. Často používané typy rotorů jsou zobrazeny na *Obr. 15*.



*Obr. 15 Rotorový plech SynRM a) příčně laminovaný
b) axiálně laminovaný [17]*

1.4.3 SYNCHRONNÍ RELUKTANČNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY

Jeden z nejnovějších typů motorů představuje kombinaci synchronního reluktančního motoru a synchronního motoru s permanentními magnety, kdy do drážek reluktančního rotoru jsou vloženy permanentní magnety. Na výsledném kroučícím momentu se podílí reluktanční moment a moment vzniklý interakcí magnetických polí statoru a rotoru. Motor se označuje anglickou zkratkou IPM-SynRM (Internal permanent magnet – synchronous reluctance motor). Stejně jako reluktanční motory je jejich účinnost poměrně vysoká, protože ztráty na rotoru jsou minimální. Aby nedocházelo k vzájemnému rušení jednotlivých momentů, řízení motoru vyžaduje komplexní řídicí systém. Tento motor se dostal do popředí hlavně díky použití jako pohonné jednotky v sériové výrobě automobilu Tesla Model 3, ačkoliv se nejednalo o první využití daného typu motoru ve vozidle [18]. Náklady na motor jsou vysoké, proto se využívají převážně pro velkosériové aplikace [2].

2 DĚLENÍ ELEKTRIFIKOVANÝCH VOZIDEL

Pojem elektrifikace vozidel představuje zavedení elektromotoru do pohonného systému vozidla za účelem zvýšení podílu využití elektrické energie pro pohon vozidla a snížení produkce emisních plynů. Propojení elektrické pohonné jednotky se zdrojem elektrické energie lze provést třemi způsoby [19]:

- přímé propojení s vnějším zdrojem umístěným mimo vozidlo,
- propojení s vlastním generátorem elektrické energie umístěným ve vozidle,
- propojení s akumulátorem elektrické energie umístěným ve vozidle.

První způsob nalezneme u vozidel, které se pohybují po předem určené trase, na které je vytvořen systém trakčního vedení pro přenos elektrické energie. Mezi nejčastější typy patří trolejové vedení a napájecí (třetí) kolejnice. Trolejové vedení, označované také jako trolej, tvoří soustava jednoho nebo dvou vodičů zavěšenými nad jízdní dráhou a pro propojení vozidla s vodičem je použit sběrač. Oproti troleji se systém napájecí kolejnice nachází pod vozidlem ve vozovce mezi kolejnicemi. Napájecí kolejnice je členěna na krátké úseky, které jsou vzájemně izolované. Proud v jednotlivých segmentech napájecí kolejnice je automaticky spínán a vypínán tak, aby byl vždy celý segment překryt vozidlem a zabránilo se přímému kontaktu osoby s vodičem. Tato propojení se vyskytují u vlaků a vozidel městské dopravy, jako je tramvaj, trolejbus nebo metro [19].

U druhého způsobu není vozidlo vázáno na žádný vnější trakční systém a potřebnou energii zajišťuje generátor ve vozidle. Generátory vyrábí elektrickou energii z různých druhů paliv a samotný typ generátoru je ovlivněn velikostí vozidla a prostředím, ve kterém se pohybuje. Generátor může pracovat na motorovou naftu, palivové články, jaderné palivo nebo solární energii. Naftové (dieselové) generátory jsou často využívány v lokomotivách. U automobilů, motocyklů a autobusů mohou být využity palivové články, nejčastěji vodíkové, a tato vozidla jsou označována zkratkou FCEV (Fuel cell electric vehicle). S tímto způsobem propojení se lze setkat i v jaderné ponorce nebo ve vozidlech se solárními panely [19].

U posledního typu propojení nedochází k výrobě vlastní elektrické energie pomocí generátoru, ale pouze k jejímu ukládání do akumulátorů jako jsou baterie, setrvačníky nebo superkapacitory (ultrakapacitory). Nejčastějším typem je ukládání energie pomocí chemické reakce, tedy použití bateriových článků. Typická vozidla pro způsob propojení elektropohonu s akumulátorem jsou automobily, autobusy, motocykly, skútry nebo elektrokoloběžky [19].

Silniční elektrifikovaná vozidla lze rozdělit do následujících kategorií:

- hybridní vozidla (HEV – hybrid electric vehicle),
- plug-in hybridní vozidla (PHEV – plug-in electric vehicle),
- plně elektrická vozidla (AEV – all electric vehicle nebo pouze EV – electric vehicle),

kteřé se dají dále podrobněji dělit podle uspořádání hnacího systému [20]. Jednotlivé kategorie jsou pospány v následujících kapitolách.

2.1 HYBRIDNÍ VOZIDLA (HEV)

Hybridní vozidla mohou být poháněna elektromotorem, spalovacím motorem nebo kombinací obou pohonů dohromady. Baterie, respektive akumulátory, nedisponují velkými kapacitami

v porovnání s AEV a nelze je nabíjet z externího zdroje. Dobíjení/akumulace energie probíhá během brzdění pomocí rekuperace energie.

2.1.1 ROZDĚLENÍ HEV PODLE USPOŘÁDÁNÍ ELEKTROMOTORU

Podle uspořádání spalovacího motoru a elektromotoru se u HEV rozlišují dvě základní varianty – **sériové** a **paralelní**.

SÉRIOVÉ USPOŘÁDÁNÍ (S-HEV)

U sériového uspořádání se pohonné jednotky nacházejí za sebou, přičemž pohon vozidla zajišťuje pouze elektromotor, Spalovací motor je spojen s generátorem a při poklesu uložené energie v baterii na určitou hladinu se motor spustí a dobíjí akumulátor [20]. Toto uspořádání je vhodné převážně pro městský provoz s častými rozjezdy, kde účinnost elektromotoru převyšuje účinnost spalovacích motorů. Jednou z hlavních výhod sériového uspořádání je, že spalovací motor, oproti konvenčnímu uspořádání, pracuje pouze v optimálním omezeném rozsahu otáček, vyžaduje menší zástavbový prostor a produkuje méně škodlivých látek [21]. Zástupcem sériového uspořádání je například automobil Karma Fisker. Schéma uspořádání je vidět na Obr. 17 a).

Hybridní vozidla se sériovým uspořádáním se někdy označují jako **elektrická vozidla s prodlužovačem dojezdu (R-EEV – Range-extended electric vehicle)**. Rozdíl je pouze ve velikosti kapacity baterie, která je u R-EEV vyšší [20].

PARALELNÍ USPOŘÁDÁNÍ (P-HEV)

Paralelní uspořádání umožňuje využít k pohonu vozidla obou motorů dohromady, ale i každého motoru zvlášť. Mechanického propojení elektromotoru, spalovacího motoru a hnané nápravy je docíleno pomocí převodovky umístěné mezi motory, která slouží také k přerozdělování vstupního výkonu z obou motorů. Při využití pouze jednoho motoru se druhý motor otáčí volně nebo je odpojen pomocí spojky, aby nedocházelo ke zbytečným ztrátám třením. Paralelní uspořádání je efektivnější pro vyšší rychlosti. Schéma paralelního uspořádání je zobrazeno na Obr. 17 b). Pro uložení elektromotoru v paralelním hybridním vozidle existuje pět základních variant, které ovlivňují, jakým způsobem se elektromotor podílí na pohonu vozidla. Jednotlivé varianty se označují P0 až P4 a jsou zobrazeny na Obr. 16 [22]. Zástupci hybridních vozů s paralelním uspořádáním jsou Honda Civic nebo Mercedes-Benz S400 BlueHybrid.

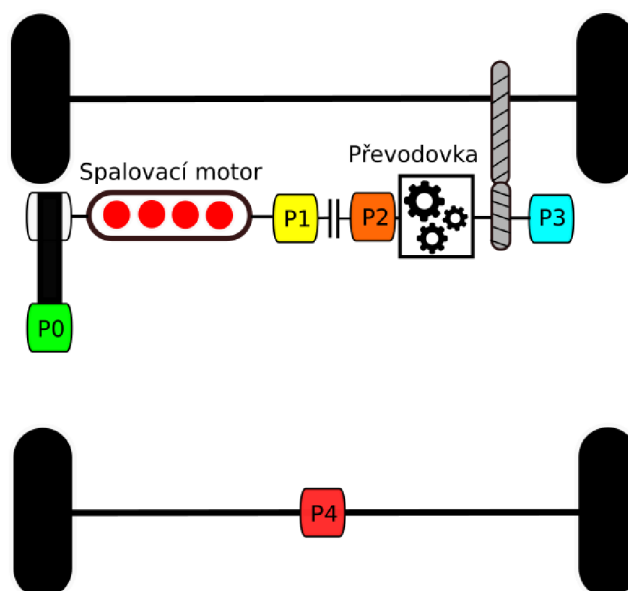
U varianty P0 je elektromotor umístěn před spalovacím motorem a k přenášení výkonu na hnací hřídel je použit řemenový převod. Pomocí řemenového převodu není vhodné přenášet velké výkony, a proto se elektromotor používá převážně pro startování motoru a generování elektrické energie pro ostatní komponenty ve vozidle. V omezeném rozsahu může přispívat ke zvýšení výkonu a zajišťovat rekuperaci energie [22]. Výrobci variantu P0 využívají často v kombinaci s dalšími, protože se jedná o levné a jednoduché řešení. Nevýhodou jsou ztráty třením při rekuperaci energie, protože spojení mezi elektromotorem a spalovacím motorem je stále [23].

U varianty P1 je už motor umístěn na samotnou klikovou hřídel za spalovací motor. Výkon elektromotoru závisí mimo jiné i na jeho velikosti a u uspořádání P1 je zástavbový prostor za spalovacím motorem značně omezen. Proto se elektromotor většinou nevyužívá pro samostatný pohon vozidla, ale slouží převážně ke startu motoru, rekuperaci energie a ke krátkodobému zvyšování špičkového výkonu pohonného systému pro lepší akceleraci [22].

Mezi nejpoužívanější patří varianty P2 a P3. Elektromotory jsou umístěny na vstupní, respektive výstupní straně převodovky u varianty P2, respektive P3. Elektromotory dosahují vyšších výkonů a jsou schopny samostatně pohánět vozidlo. Zároveň plní funkci pomocného pohonu pro spalovací motor a zajišťují rekuperaci energie [22].

Poslední variantou je P4 u které elektromotor není v přímém spojení se spalovacím motorem a je umístěn na zadní nápravu nebo je přímo integrován do kola. V případě in-wheel uspořádání jsou použity dva elektromotory, každý pro jedno kolo. Takové to uspořádání umožňuje pohon všech čtyř kol [22].

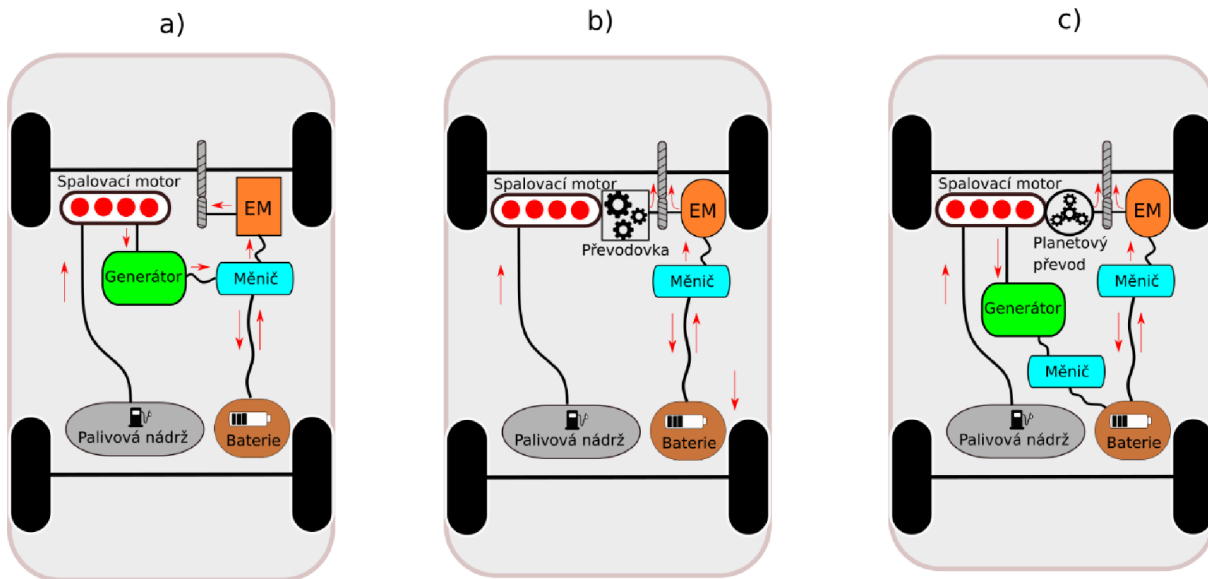
Jednotlivé varianty se dají vzájemně kombinovat, tak aby výrobci dosáhli požadovaných vlastností. Například varianta P4 se často kombinuje s variantami P0 až P3, protože další elektromotory umožňují rekuperovat energii a tím lze zajistit pohon všech kol na dlouhé vzdálenosti [23].



Obr. 16 Uspořádání elektromotoru varianty P0 až P4 v P-HEV

POWER-SPLIT USPOŘÁDÁNÍ (PS-HEV)

U power-split uspořádání, známé také jako sériově-paralelní uspořádání, je možné měnit v průběhu jednotlivé propojení a tím i měnit vlastnosti vozidla. Součástí uspořádání jsou dva elektromotory, jeden spalovací motor, jedna nebo více planetových převodovek a spojky. Planetový převod nahrazuje klasickou převodovku a chová se jako CVT převodovka (variátor). Na ni je připojen spalovací motor a jeden elektrický motor. Výkon ze spalovacího motoru je rozdělován na dvě části, část výkonu je přenášena na kola a pohání vozidlo, druhá část výkonu pohání druhý elektromotor, který slouží jako generátor a nabíjí akumulátor. Při nízkých rychlostech a rozjezdech je využito sériové uspořádání a veškerý výkon ze spalovacího motoru jde do generátoru a první elektromotor pohání vozidlo. Při vyšších rychlostech je naopak zapojeno paralelní uspořádání [24]. Mezi zástupce PS-HEV patří Lexus RX 400h nebo Toyota Prius. Schéma uspořádání je na Obr. 17 c).



Obr. 17 Uspořádání HEV a) sériové b) paralelní c) power-split

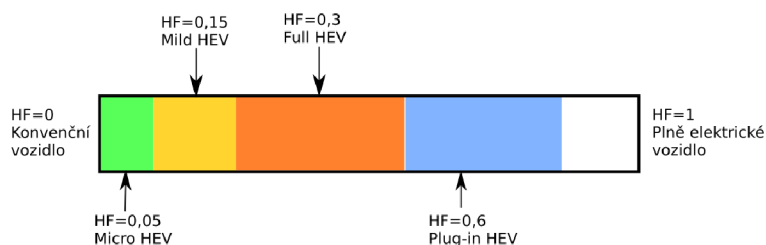
2.1.2 ROZDĚLENÍ PODLE HYBRIDIZAČNÍHO FAKTORU

Hybridní vozidla se dají dále dělit podle hybridizačního faktoru HF, který určuje podíl výkonu elektromotoru z celkového výkonu vozidla a je určen podle následujícího vztahu:

$$HF = \frac{P_{EM}}{P_{EM} + P_{ICE}} = \frac{P_{EM}}{P_{HEV}} \quad (2.1)$$

kde P_{EM} označuje výkon elektromotoru, P_{ICE} výkon spalovacího motoru a P_{HEV} představuje celkový výkon HEV vozidla. HF faktor nabývá hodnot od 0 do 1, kde 0 představuje klasické spalovací vozidlo a hodnota 1 plně elektrické vozidlo [25]. Podle hybridizačního kritéria se rozlišují následující typy hybridních vozidel:

- Micro HEV
- Mild HEV
- Full HEV
- Plug-in HEV [22].



Obr. 18 Rozdělení HEV podle hybridizačního faktoru HF

MICRO HEV

Micro HEV jsou vozidla s HF zhruba do hodnoty 0,1. Obsahují malý elektromotor, který slouží pouze pro funkci start-stop a není využíván pro pohon vozidla [22].

MILD HEV

U Mild HEV mají oproti Micro HEV větší a výkonnější elektromotor, který je schopný vypomáhat spalovacímu motoru a rekuperací energie snižuje náklady na provoz vozidla. Zároveň díky konstantnímu kroutícímu momentu je elektromotor schopen vyrovnávat výkyvy točivého momentu spalovacího motoru a zlepšit tak odezvu plynového pedálu [22]. Hybridizační faktor se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,25.

FULL HEV

Oproti oběma výše zmíněným variantám mají Full HEV výkonnější elektromotory a baterie s větší kapacitou, díky které se při jízdě na krátké vzdálenosti mohou chovat jako čistě elektrická vozidla [22]. S většími rozměry elektromotorů i akumulátorů narůstá ale i celková hmotnost vozidla a jejich cena. Hybridizační faktor se pohybuje v rozmezí 0,25 až 0,5.

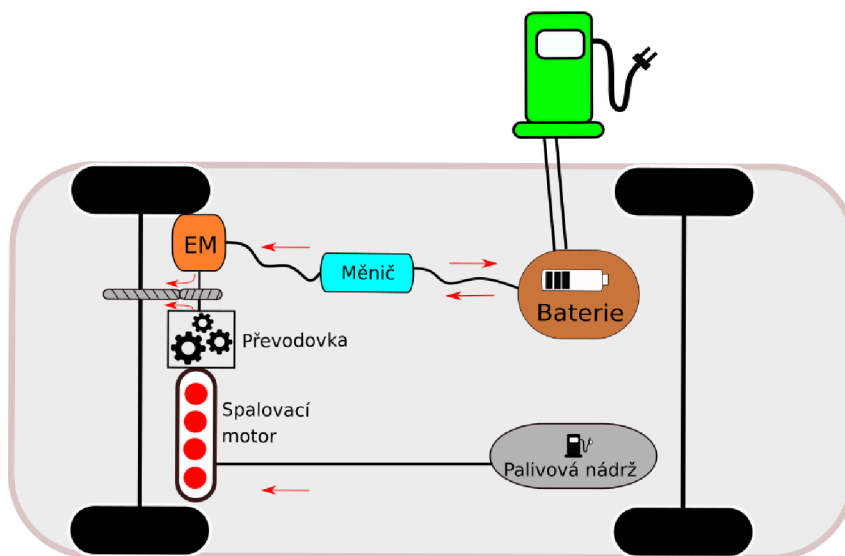
PLUG-IN HEV

Do kategorie paralelních HEV lze zařadit i plug-in HEV, které jsou více popsány v kapitole 2.2. Hybridizační faktor nabývá hodnot větších jak 0,5.

2.2 PLUG-IN HYBRIDNÍ VOZIDLA (PHEV)

Z hlediska uspořádání jsou Plug-in hybridy téměř identické s HEV s rozdílem, že PHEV mají navíc nabíjecí adaptér, který umožňuje nabíjení baterie z externího zdroje (Obr. 19). Jedná se o hybridní vozidla s největším hybridizačním faktorem. Díky výkonnějším elektromotorům a větší kapacitě baterie v porovnání s HEV ujedou PHEV větší vzdálenosti na čistě elektrický pohon [24]. U HEV se čistě elektrický dojezd pohybuje do 10 km, u PHEV se udává v desítkách kilometrů, například Polestar 1 z roku 2021 udává dojezd až 84 km. Mezi další vozidla s PHEV uspořádáním patří Škoda Octavia iV a Superb iV, Toyota RAV4 Plug-in Hybrid a další.

Díky kombinaci konvenčního a elektrického pohonu nabízí PHEV nové varianty způsobu jízdy. Při jízdě na kratší vzdálenosti (do 50 km – cesta do práce, na nákupy apod.) lze jezdit pouze na elektrický pohon s velmi nízkými náklady na provoz vozidla. Naopak pro delší trasy lze využít spalovací motor, který zaručí dojezd na stovky km bez nutnosti zastávek kvůli nabíjení baterie.



Obr. 19 Schéma Plug-in hybridního elektrického vozidla

2.3 PLNĚ ELEKTRICKÁ VOZIDLA (AEV)

Poslední skupinu elektrifikovaných vozidel tvoří plně elektrická vozidla. Jedná se o vozidla s hybridizačním faktorem rovným jedné, protože k pohybu vozidla přeměňují pouze elektrickou energii na mechanickou. Jejich hlavním rozdílem oproti hybridním vozidlům je absence spalovacího motoru. Podle způsobu uložení elektrické energie se AEV rozdělují na

- bateriová elektrická vozidla (BEV),
- elektrická vozidla s palivovými články (FCEV).

KONFIGURACE POHONNÉHO SYSTÉMU AEV

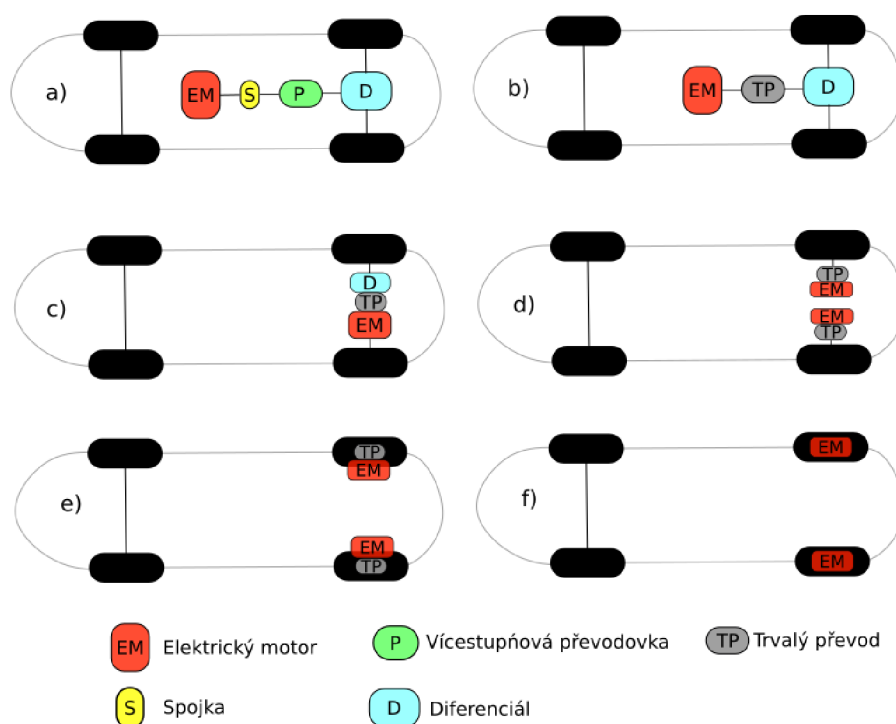
U obou typů BEV a FCEV lze nalézt 6 různých způsobů propojení pohonného systému s koly vozidla. Všechny varianty jsou schematicky zobrazeny na Obr. 20. Jednotlivá řešení mají vliv na charakteristiky a chování daného vozidla.

První varianta (Obr. 20 a)) vychází z uspořádání klasického spalovacího motoru. Řešení s vícešupňovou převodovkou je vhodné pro vozidla o větších výkonech a požadavcích na vyšší rychlosti a dojezdy [26].

U druhého a třetího uspořádání (Obr. 20 b) a c)) je spojka i vícešupňová převodovka nahrazena trvalým převodem, jednostupňovou převodovkou. Řízení rychlosti vozidla je zcela pokryto rozsahem otáček elektromotoru. Celá konstrukce je jednodušší a redukuje se hmotnost i objem celého systému [27].

Na Obr. 20 d) je odstraněn diferenciál a každé kolo je napojeno na samostatný elektromotor s jednostupňovou převodovkou. Oba motory pracují nezávisle na sobě a umožňují přenášení rozdílných točivých momentů na jednotlivá kola podle potřeby. Řízení je prováděno elektronicky a je složitější oproti klasickému mechanickému rozdělení pomocí diferenciálu [27].

Poslední dvě varianty (Obr. 20 e) a f)) představují vestavění motoru do samotného kola vozidla (in-wheel uspořádání), kde u uspořádání e) je motor doplněn o trvalý převod – nejčastěji s planetovým převodem kvůli úspoře místa [26]. Tyto varianty se hodí převážně pro městský styl jízdy s častými rozjezdy a nízkými rychlostmi. Výhodou je nízká hmotnost a absence mechanických převodů, které snižují celkovou účinnost pohonného systému. Zároveň ale kvůli poměrně velkému krouticímu momentu při rozjezdu vozidla je do motoru dodáváno velké množství energie a dochází k větším tepelným ztrátám. Častou volbou pro tato uspořádání jsou BLDC motory [27].



Obr. 20 Schematické zobrazení uspořádání AEV (nakresleno podle [25])

2.3.1 ELEKTRICKÁ VOZIDLA S PALIVOVÝMI ČLÁNKY (FCEV)

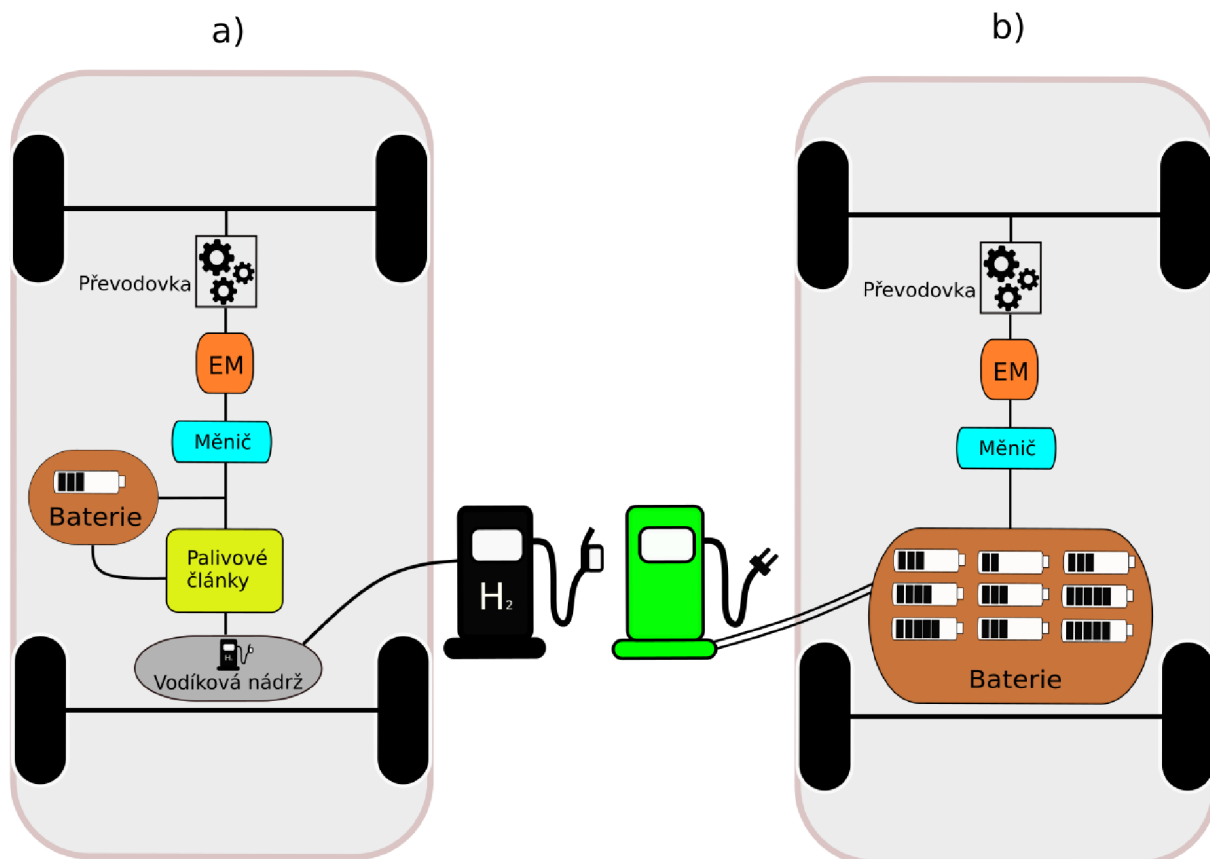
Elektrická vozidla s palivovými články jsou poháněna z elektrické energie generované elektrochemickou reakcí mezi vodíkem a kyslíkem, která probíhá mezi elektrodami. Odpadním produktem je pouze pára. S dostatečným přísunem vodíku a kyslíku může probíhat reakce neustále a vzniklá energie se může ukládat do akumulátorů. Proto se u FCEV kromě elektromotoru, baterie a trakčního měniče vyskytuje i nádrž na tekutý vodík [22]. Schéma pohonného systému je na Obr. 21 a).

FCEV měly obdobně jako hybridní a bateriová elektrická vozidla přispět ke snížení emisních plynů. Ačkoliv měly mnoho výhod oproti spalovacím i bateriovým elektrickým vozidlům, nevzniklo mnoho velkosériově vyráběných modelů osazených touto pohonnou jednotkou. Oproti BEV se dojezd na jedno natankování pohybuje běžně přes 450 km a plná nádrž lze natankovat do 4 minut. Nicméně s rychlým rozvojem v oblasti akumulátorů se rozdíl v dojezdu mezi BEV a FCEV rapidně snížily. Celý pohonný systém FCEV je objemnější i těžší v porovnání s BEV i konvenčními vozidly [28]. Výrobní náklady samotného vozidla jsou vyšší oproti BEV a výroba i uskladnění kapalného vodíku je nákladný a technicky poměrně obtížný proces. Další nevýhodou je velmi malá síť čerpacích stanic pro

tekutý vodík. K roku 2022 se v České republice nachází pouze dvě vodíkové čerpací stanice. Podle Národního akčního plánu čisté mobility a plánů ministerstva by se v roce 2025 mělo provozovat celkem 15 vodíkových stanic a k roku 2030 by měl počet narůst na 80 stanic [29].

2.3.2 BATERIOVÁ ELEKTRICKÁ VOZIDLA (BEV)

Bateriová elektrická vozidla mají ze všech ostatních zmíněných hybridních i čistě elektrických typů vozidel největší akumulátory, které tvoří až jednu čtvrtinu celkové hmotnosti vozidla. K dobíjení akumulátorů slouží pouze externí elektrická síť a energie získaná rekuperací při brždění. Díky snadnému propojení elektromotorů s akumulátorem pomocí kabelů existuje více možností umístění pohonné jednotky ve vozidle oproti HEV, Plug-in i FCEV. Schéma uspořádání je na Obr. 21 b).



Obr. 21 Schéma uspořádání a) FCEV b) BEV

BATERIE ELEKTRICKÝCH VOZIDEL

Pro pohon každého vozidla s elektrickým pohonem je nutné dodávat elektrickou energii do elektromotoru. K napájení slouží bateriové boxy (battery packs) uložené v elektromobilu, které nejprve přivádí stejnosměrný proud do střídače (inventoru), kde dochází ke změně na střídavý proud a změně frekvence, na který je připojen samotný motor. Opakované uložení energie zajišťují akumulátory (sekundární články). Akumulace probíhá pomocí vratných chemických reakcí mezi elektrodami jednotlivých článků. Články jsou vzájemně spojeny sériově k dosažení požadovaného napětí a paralelně pro navýšení kapacity do modulů, které dohromady vytvářejí bateriový box [30].

Samotné články se rozdělují podle typu použitého materiálu katody a anody a vyrábějí se v různých provedeních z hlediska jejich tvaru. V prvním desetiletí 21. století se hojně využívaly NiMh akumulátory, které byly ideální pro vozidla s hybridním pohonem. Oproti předešlým oloveným bateriím dosahovaly vyšších napětí, kapacity a počtu nabíjecích cyklů. Jejich dominanci ale postupně přebírají lithium-iontové akumulátory (Li-ion), které našly hlavní uplatnění v plně elektrických vozidlech a přenosné elektronice, ale částečně i v aplikacích s hybridními pohony [31].

Jelikož bateriové boxy obsahují tisíce jednotlivých článků, je nutné řídit proces jejich nabíjení a vybíjení a zároveň zajistit ochranu před jejich poškozením. Články jsou proto připojeny elektrickému obvodu složeného z řídicích systémů, senzorů a spínačů, který se označuje BMS (Battery Management System). BMS nejsou univerzální a obsahují specifické prvky pro různé typy článků. Mezi hlavní funkce BMS patří ochrana před přehřátím, nadměrnému vybíjení a nabíjení a kontrola napětí. Dále také optimalizují výkon a životnost článků [30].

LI-ION AKUMULÁTORY

Lithium-iontové akumulátory se vyznačují oproti NiMH akumulátorům delší životností a vysokou hustotou energie, díky kterým dosahují stejných parametrů při menším objemu a hmotnosti. Dále disponují nízkým efektem samo-vybíjení a vyšším nominálním napětím v rozpětí 3,2 až 3,8 V oproti 1,2 až 1,5 V u NiMh [30]. Obecně jsou Li-ion baterie citlivé na přebíjení a dochází ke značnému snižování kapacity vlivem stárnutí baterie. Některé typy jsou značně výbušné [32].

Chemické složení anody a katody ovlivňuje parametry jednotlivých článků. Z hlediska hustoty energie vycházejí nejlépe akumulátory NMC a NCA. Oba akumulátory vykazují vysoké napětí a dříve byly častou volnou výrobců elektromobilů [33]. V dnešní době se však od těchto akumulátorů ustupuje z důvodu vysokých nákladů na kobalt a horší bezpečnosti [30].

Akumulátory LMO stále nabízí poměrně vysoké hodnoty hustoty energie a výkonu, nicméně jejich slabinou je životnost, která se pohybuje okolo 500 cyklů. Samostatně se tedy nevyužívají v EV, ale v kombinaci s NMC akumulátory dojde k navýšení nejen životnosti, ale i hustoty energie a výkonu. Kombinaci NMC a LMO najdeme například v elektromobilu značky BMW i3 [33].

Lithium titaničitý akumulátor (LTO) má v porovnání s ostatními Li-ion akumulátory nízké jmenovité napětí i hustotu energie. Naopak s životností 4000 a více cyklů se řadí mezi lepší akumulátory. LTO akumulátory pracují ve větším rozsahu teplot a spolu s LFP se řadí mezi nejbezpečnější akumulátory. Hlavní nevýhodou LTO je vysoká cena [33].

Jako poslední zbývá akumulátor na bázi lithium železo fosfátu (LFP). Hustota energie je nižší v porovnání s ostatními Li-ion akumulátory a životnost se pohybuje okolo 1500 cyklů. Díky absenci vzácných kovů jsou náklady nízké a LFP se stává častou volbou automobilových výrobců [30]. Oblíbenosti také přispívá fakt, že se jedná o nejbezpečnější baterii na bázi lithia, která při překročení napětí nebo přehřátí nevybuchuje. Mezi nevýhody lze zařadit náchylnost na přebíjení a snižování životnosti rychlým dobíjením [32].

Souhrnný přehled a porovnání parametrů vybraných typů lithium iontových akumulátorů jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 3 Srovnání základních typů Li-ion akumulátorů (podle [30])

| | Lithium železo fosfátový | Lithium titaničitý | Lithium oxid manganičitý | Lithium nikl mangan oxid kobaltnatý | Lithium nikl kobalt oxid hlinitý |
|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--|--|---|
| Označení | LFP | LTO | LMO | NMC | NCA |
| Hustota energie [Wh/kg] | 80-130 | 70 | 105-120 | 140-180 | 80-220 |
| Měrná energie [Wh/l] | 220-250 | 130 | 250-265 | 325 | 210-600 |
| Hustota výkonu [W/kg] | 1400-2400 | 750 | 1000 | 500-3000 | 1500-1900 |
| Počet nabíjecích cyklů | 1000-2000 | >4000 | >500 | 1000-4000 | >1000 |
| Napětí na článku [V] | 3,2 - 3,3 | 2,2 - 2,3 | 3,8 | 3,6 - 3,7 | 3,6 |
| Aplikace | Tesla Model 3 (od 2021) | Mitsubishi i-MiEV | Chevrolet Volt, Audi e-tron (GE), BMW i3 | | Tesla Model Y, S, X |

3 VYBRANÁ VOZIDLA

V této kapitole jsou představeny a porovnány jednotlivá vozidla s různým uspořádáním a počtem pohonných jednotek. Vozidla jsou rozdělena do kategorií, ve které jsou vždy dva nebo tři zástupci detailně popsáni z hlediska parametrů pohonné jednotky, jejího uspořádání, akumulátoru a následně jsou vzájemně porovnání.

3.1 VYBRANÉ PLNĚ ELEKTRICKÉ AUTOMOBILY

V dnešní době jsou elektromobily na velmi rychlém vzestupu a objevuje se mnoho nových výrobců, kteří se soustředí pouze na výrobu čistě elektrických vozidel. Vybraná skupina se dále dělí kategorie s různým počtem elektromotorů.

3.1.1 VOZIDLA S JEDNÍM NEBO DVĚMA ELEKTROMOTORY

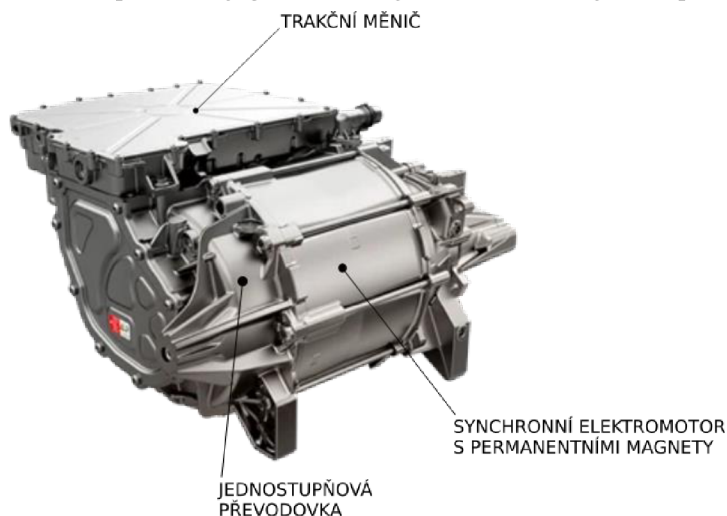
Mezi nejjednodušší varianty patří uspořádání s jedním elektrickým motorem. Výrobci však často do svých modelů přidávají další elektromotor ke zlepšení výkonosti, rekuperace energie a zajištění pohonu všech kol. Porovnání vybraných vozidel je v *Tab. 4* a *Tab. 5*.

ŠKODA ENYAQ iV 80 A iV 80x

Model Enyaq představila česká automobilka roku 2020 ve 3 základních provedeních iV 60, iV 80, iV 80x a o 2 roky později uvedla na trh sportovní verzi Enyaq Coupé RS iV 80x. Základním stavebním prvkem elektrických vozů Škoda je modulární platforma MEB. Jedná se o systém obsahující baterii, elektromotory, řídicí elektroniku, převodovku, asistenční prvky a palubní ovládací systém., která je koncipována s cílem snadné záměny jednotlivých prvků a sestavení vozidla s různými parametry.

U **modelu iV 80** je pohonná jednotka (Obr. 22) umístěna na zadní nápravě vozu a je přímo připojena ke kolům (uspořádání Obr. 20 c)). Pohon vozidla zajišťuje synchronní elektromotor s permanentními magnety o výkonu 150 kW. Součástí elektromotoru je jednostupňová převodovka, která přenáší kroučící moment o velikosti 310 Nm přímo na kola s převodovým poměrem 4,389. Součástí celého bloku je také trakční měnič a řídicí jednotka [34].

Nejobtavnější částí MEB platformy je bateriový box, umístěný ve spodní části vozu mezi

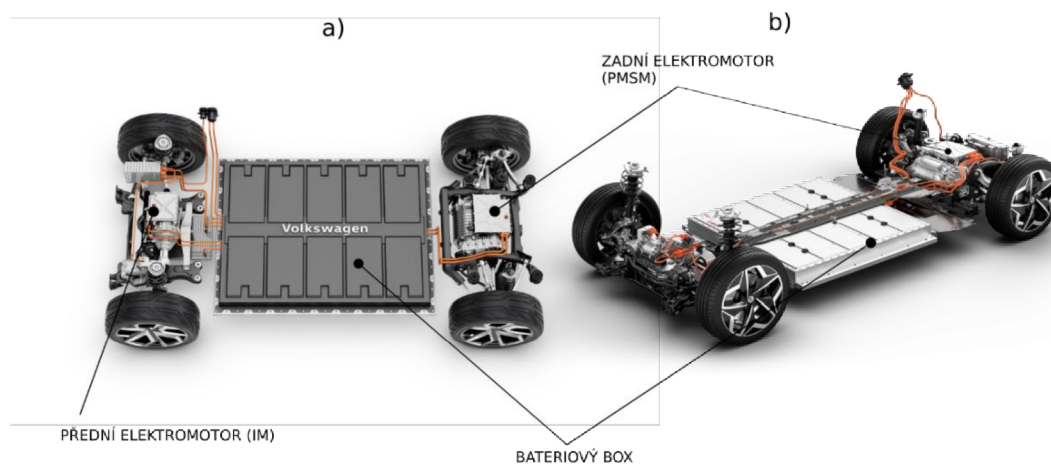


Obr. 22 Pohonná jednotka vozu Škoda Enyaq iV 80 [33]

nápravami, složený z 12 bateriových modulů s 24 Li-ion články. Baterie disponuje využitelnou trakční kapacitou 77 kWh z celkové kapacity 82 kWh. Baterie je jako celek uložena v hliníkovém rámu společně se chladícím systémem a BMS [34].

U **modelu iV 80x** je obdobně jako u iV 80 využit stejný motor pro pohon zadních kol. K navýšení celkového výkonu na 195 kW je přidán asynchronní (indukční) motor na přední nápravu a vůz tedy disponuje pohonem všech 4 kol. Oproti jednomotorové verzi došlo také k navýšení kroutícího momentu na 425 Nm. K oběma motorů je napojena jednostupňová převodovka, kde převodový poměr u PMSM motoru je 3,90 a u indukčního motoru 2,76. Baterie se nijak neliší oproti verzi iV 80 [35].

Mezi další společné znaky obou verzí patří široká nabídka nabíjecích výkonů, kdy baterii je možné napájet pomocí kabelů Mode 2,3 a 4 a je možné využít i rychlonabíjecích kabelů se stejnosměrným proudem o výkonu až 125 kW.



Obr. 23 Schéma uspořádání motorů vozů a) Enyaq iV 80x b) Enyaq iV 80 [35]

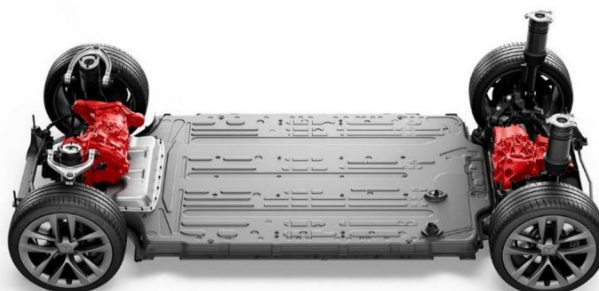
TESLA MODEL S P85 A P85D

Automobilka Tesla Motors uvedla na trh svůj Model S P85 s jedním elektromotorem v roce 2012 a o dva roky později následovala verze P85 D. Jedná se o průlomový vůz své kategorie, který výkonovými parametry a dojezdem předčil konkurenční modely. Tesla vsadila na výběr indukčních motorů pro pohon svých modelů, které později začala kombinovat se synchronními motory s permanentními magnety.

Tesla model S P85 je osazena 3-fázovým 4-pólovým indukčním motorem umístěným na zadní nápravě. Rotor je klecový a obsahuje 74 měděných tyčí. Motor poskytuje výkon 310 kW, s jednostupňovou převodovkou dosahuje kroutící moment hodnoty 600 Nm a otáčky jsou řízeny pomocí trakčního (frekvenčního) měniče. Pohonná jednotka je napájena napětím 346 V generované akumulátorem uloženým v podlaze vozu. Bateriový box je složený ze 7104 Li-ion článků typu 18 650, které jsou po 444 kusech spojeny do 16 modulů. Celková kapacita akumulátoru je 85 kWh, přičemž využitelných je 81 kWh. K chlazení jednotlivých článků je využita chladící směs entylen-glycol G-48 [37].

U **Modelu S P85D** písmeno „D“ označuje uspořádání Dual, tedy použití dvou elektromotorů pro pohon vozidla. U Modelu S P85D se vyskytují opět dva indukční (asynchronní) motory umístěné na zadní a přední nápravě, které zajišťují pohon všech 4 kol. Pro pohon zadní nápravy je použit motor s výkonem 350 kW Nm a pohon předních kol zajišťuje 165 kW

motor. Celkový kroučící moment přenášený na kola je 967 Nm. Statory obou motorů jsou společně s trakčními měniči chlazeny kapalným chladivem [37].



Obr. 24 Pohonné jednotky (označeny červeně) Tesla Model S P85D [36]

PORSCHE TAYCAN TURBO S

Německá automobilka Porsche, spadající do koncertu Volkswagen Group, s dlouholetou tradicí výroby sportovních vozů představila v září roku 2019 svůj první plně elektrický vůz Porsche Taycan. Model se vyrábí v různých variantách, například Taycan 4S, Taycan Turbo, Taycan GTS a nejvýkonnější verze Taycan Turbo S. Tento model je často brán jako přímý konkurent Tesly Modelu S, nicméně Porsche se při tvorbě vozu nesoustředilo hlavně na dosažení špičkových výkonů, ale hlavně na jejich opakovatelnost [38].

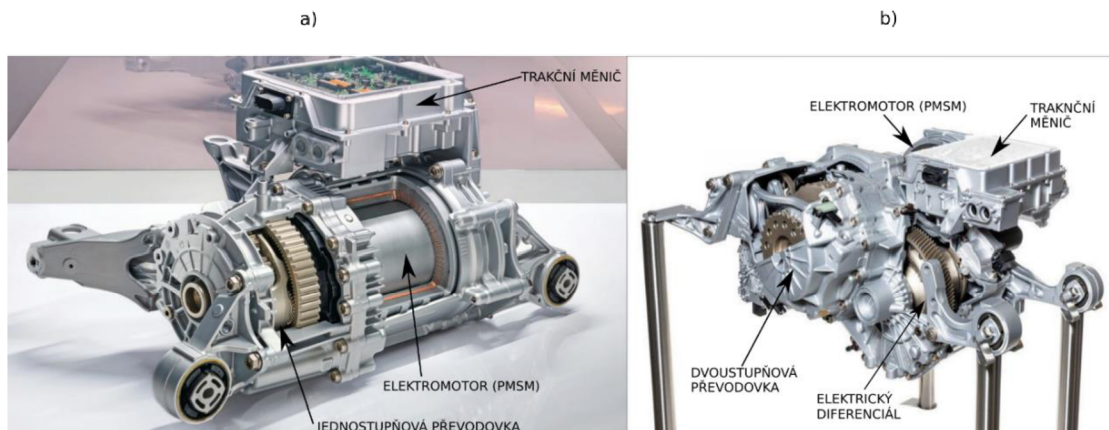
Model Taycan Turbo S je poháněn dvěma synchronními elektromotory s permanentními magnety o celkovém výkonu 560 kW schopných dodávat 1050 Nm točivého momentu na všechna čtyři kola. Na rozdíl od Tesly a Škody je zde použita dvoustupňová automatická převodovka, u které první převodový stupeň s převodovým poměrem 16 slouží k dosažení optimální akcelerace při rozjezdu a nižších rychlostech a druhý stupeň s poměrem 8:1 zaručuje vysokou akceleraci ve vyšších rychlostech. Druhý stupeň kompenzuje nižší účinnost PMSM při vyšších otáčkách [39].

Z důvodu úspory místa je uspořádání pohonných modulů různé na přední a zadní nápravě. Zadní pohonný systém se skládá z elektromotoru (PMSM), trakčního měniče a dvoustupňové převodovky, jejíž součástí je i elektronicky řízený diferenciál s omezeným prokluzem. PMSM je výkonnější (335 kW) oproti přednímu motoru a při běžném provozu zajišťuje většinu pohonu vozidla samostatně. Přední pohonná jednotka taktéž obsahuje PMSM, trakční měnič, ale oproti zadnímu pohonu je zde použit pouze jednostupňový převod s převodovým poměrem rovný 8. Přední elektromotor je připojován převážně při vyšších rychlostech a výkonech, kdy je zapotřebí rychlé akcelerace vozu. Rekuperaci energie zajišťuje po většinu času právě přední motor. Obě uspořádání přední a zadní pohonné jednotky je zobrazeno na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Rotory obou motorů jsou klasicky tvořeny Ne-Fe-B magnety a u vinutí statoru je použita speciální technologie tzv. „vlásenkového“ vinutí. U vlásenkového vinutí jsou měděné vodiče ohýbány to tvaru „U“ a tím dochází k navýšení počtu cívek ve statoru a zesílení účinků otáčivého magnetického pole při zachování stejného objemu motoru. Samotné vodiče mají trojúhelníkový průřez [39].

Pro modely Taycan existují dvě verze baterií, kde pro verzi Turbo S je použita výkonnější se zvýšenou kapacitou (baterie Performance Plus), která je uložena ve spodní části vozu a její celková kapacita je 93,4 kWh, přičemž využitelných je zhruba o 10 kWh méně, tedy 83,7 kWh. Bateriový box je složen z 33 modulů s 396 články, celkem tedy 13 068 článků.

Články jsou lithium-iontové a jsou chlazeny kapalných chladivem [38]. Napájecí napětí baterie je 800 V, což je oproti ostatním elektrickým automobilům zhruba dvojnásobná hodnota. Vyšší napětí navyšuje nabíjecí výkon a snižuje průřez kabelů [39].

Pro modely Taycan je symbolický mód Overboost. Při aktivaci módu dojde k využití obou motorů najednou a vozidlo je schopno zrychlit z 0 na 100 km/h za 2,8 s, přičemž mód lze použít postupně až do maximální rychlosti. Za normálních podmínek pracuje vozidlo s částečně sníženým výkonem na 460 kW z důvodu úspory energie a prodloužení dojezdu.



Obr. 25 Pohonná jednotka Porsche Taycan Turbo S a) přední nápravy b) zadní nápravy [39]

Tab. 4 Parametry EV s jedním elektromotorem

| | | Škoda Enyaq iV 80 [33] | Tesla Model S P85 [36] | BMW i3s [40] | Tesla Model 3 (2019) [36] |
|--|---------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------------------|
| Typ karoserie | | SUV | Sedan | Hatchback | Sedan |
| Počet a typ elektromotorů | Přední | - | - | - | - |
| | Zadní | 1x PMSM | 1x PMSM | 1x PMSM | 1x PMSRM |
| Max. výkon [kW] | | 150 | 310 | 135 | 175 |
| Max. kroutící moment [Nm] | | 310 | 600 | 270 | 375 |
| Celková/využitelná kapacita baterie [kWh] | | 82/77 | 85/81 | 42,2/37,9 | 54/50 |
| Typ baterie | | Li-ion | Li-ion | Li-ion | Li-ion |
| Převodovka / převodový poměr | Přední | - | - | - | - |
| | Zadní | 1°/4,389 | 1°/9,7 | 1°/9,7 | 1°/9 |
| Maximální rychlost [km/h] | | 160 | 210 | 160 | 210 |
| Zrychlení 0-100 km/h [s] | | 8,7 | 4,4 | 6,9 | 5,9 |
| Max. dojezd [km] | WLTP | 537 | 450 | 283 | - |
| | EPA | - | 426,5 | - | 354 |
| Kombinovaná spotřeba energie [kWh/100 km] | | 15,9-18,0 | 24 | 16,2 | 16 |
| Pohotovostní hmotnost [kg] | | 2107-2148 | 2108 | 1365 | 1752 |
| Startovací cena [Kč] (k 1.5.2022) | | 1 254 900 | 2 089 000 | 1 149 200 | 1 1369 900 |

Tab. 5 Parametry EV s dvěma elektromotory

| | | Škoda Enyaq iV 80 [33] | Tesla Model S P85 [36] | Porsche Taycan Turbo S [38] | VolkswagenI D.4 GTX [41] |
|--|---------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Typ karoserie | | SUV | Sedan | Sedan | SUV |
| Počet a typ elektromotorů | Přední | 1x PMSM | 1x IM | 1x PMSM | 1x IM |
| | Zadní | 1x PMSM | 1x IM | 1x PMSM | 1x PMSM |
| Max. výkon [kW] | | 195 | 515 | 560 | 220 |
| Max. kroutící moment [Nm] | | 425 | 967 | 1050 | 460 |
| Celková/využitelná kapacita baterie [kWh] | | 82/77 | 85/81 | 93,4/83,7 | 82/77 |
| Typ baterie | | Li-ion | Li-ion | Li-ion | Li-ion |
| Převodovka / převodový | Přední | 1°/3,9 | 1°/9,34 | 1°/8 | 1°/- |
| | Zadní | 1°/2,76 | 1°/9,734 | 2°/16 a 8 | 1°/- |
| Maximální rychlost [km/h] | | 160 | 250 | 260 | 180 |
| Zrychlení 0-100 km/h [s] | | 6,9 | 3,2 | 2,8 | 6,2 |
| Max. dojezd [km] | WLTP | 498 | 440 | 412 | 474 |
| | EPA | - | 407 | - | - |
| Kombinovaná spotřeba energie [kWh/100 km] | | 17,3-18,7 | 22 | 24,3-25,6 | 18,6 |
| Pohotovostní hmotnost [kg] | | 2195-2380 | 2239 | 2295 | 2276 |
| Startovací cena [Kč] (k 1.5.2022) | | 1 254 900 | 2 820 000 | 5 270 000 | 1 517 900 |

3.1.2 AUTOMOBILY SE TŘEMI NEBO ČTYŘMI ELEKTROMOTORY

Se stále navyšující se nároky na dosažení co nejvyššího výkonu a dojezdu vozidel se jednotliví výrobci uchylují k navyšování počtu pohonných jednotek. S vyšším počtem elektromotorů narůstají náklady, hmotnost a obtížnost vytvoření řídicího softwaru, který zajistí, aby docházelo k rovnoměrnému a plynulému rozdělení výkonu mezi elektromotory. Na druhou stranu s možností vektorování točivého momentu na jednotlivých jednotkách mohou výrobci docílit nových jízdních vlastností a paradoxně lze docílit i úspory místa, protože jednotlivé motory mohou být umístěny blíže kolům a mechanické spojení mezi kolem a elektromotorem se minimalizuje.

Jako jeden z prvních vozů se třemi elektromotory by se měl v běžném provozu objevit Model S Plaid od Tesla Motors, který by měl podle plánů dorazit k zákazníkům v červnu roku 2022. Mezi další automobilky, které plánují výrobu vozidel se třemi motory patří Audi s modelem Audi e-tron S a e-tron S Sportback, General Motors s Hummer EV Edition 1 a v neposlední řadě model Cybertruck od Tesly. U těchto vozů však zatím nejsou potvrzeny výsledné parametry. Porovnání vybraných vozidel je v Tab. 6.

TESLA MODEL S PLAID

Jedná se o nového zástupce z modelové řady S s výrazným navýšením výkonu a dojezdu. Oproti předešlým verzím jsou indukční (asynchronní) motory nahrazeny synchronními motory s permanentními magnety, přičemž dva pohánějí zadní nápravu, každé kolo zvlášť, a třetí motor je umístěn vpředu. Celkově všechny motory produkují 760 kW a oficiálně uváděné zrychlení z 0 na 100 km/h je 2,1 s. Podle měření, které provedl Jay Leno z magazínu MotorTrend při specifických podmínkách na trati Club Speedway v Kalifornii, je vůz schopen zrychlit za neuvěřitelných 1,98s, nicméně tato měření nejsou oficiálně potvrzena. I přesto se jedná o sériově vyráběný automobil s největší akcelerací na světě ve své kategorii [37].

Na docílení těchto hodnot má převážně vliv nová technologie u PMSM. Nově jsou rotory s měděnými vodiči obvinuty karbonovými vlákny, díky kterým jsou motory schopny rotovat rychlostí až 20 000 ot/min. Díky výborným tuhostním a pevnostním vlastnostem karbonových vláken se omezuje zvětšování průměru rotoru vlivem odstředivých sil. Motor lze dimenzovat na menší vzduchovou mezeru mezi rotorem a státorem, tím se zesiluje vliv točivého magnetického pole a zvyšuje se celková účinnost motoru [43].

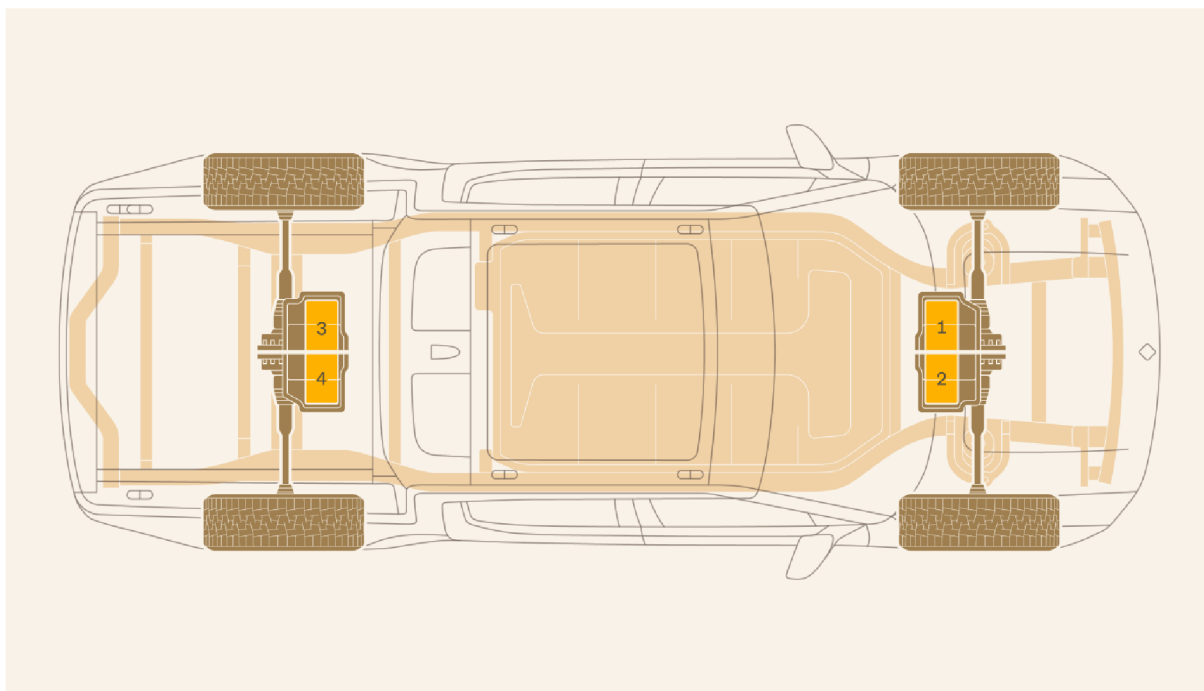
Ačkoliv je maximální rychlost 322 km/h, jednotlivé pohonné jednotky jsou opatřeny jednostupňovou převodovkou s převodovým číslem 7,5. Dojezd až 637 km zajišťuje Li-ion baterie o kapacitě 100 kWh s využitelnými 95 kWh o napětí 407 V [38]. V baterii je uloženo 7920 článků, které jsou stejné z předchozí verze, typ 18650 od firmy Panasonic, ale jsou uspořádány do pěti velkých modulů vždy po 1584 člancích [44].

RIVIAN R1T

Americká automobilka Rivian, založena teprve v roce 2009, předběhla konkurenční výrobce Tesla a GM Motors a v roce 2021 představila první plně elektrický sériově vyráběný pick-up na světě. Pro model Rivian R1T jsou dostupné varianty se dvěma nebo čtyřmi elektromotory (Dual-Motor a Quad-Motor) a obě verze mají pohon všech kol. Dále se zabývá pouze verzí se čtyřmi motory, jejíž uspořádání je na Obr. 26.

U Rivian R1T je každé kolo poháněno samostatně synchronním motorem s permanentními magnety, přičemž celkový výkon všech motorů je 623 kW a kroutící moment 1231 Nm. Rozložení výkonu není rovnoměrné, na přední kola je přiváděn výkon o velikosti 310 kW a na zadní 313 kW. Motory jsou uprostřed nápravy, obdobně jako je vyobrazeno na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** d). Lithium-iontovou baterii, uloženou uprostřed vozu v podlaze, je možné nabít na 135 kWh a maximální dojezd je až 505 km. Ačkoliv se jedná o téměř 2,8 tunový pick-up, zrychlit z 0 na 100 km/h je schopný za 3 s a dosahuje maximální rychlosti 200 km/h [45].

Samostatné řízení jednotlivých elektromotorů umožňuje zcela nový druh pohybu. Vektorováním kroutícího momentu lze docílit, aby se kola na každé straně vozidla točila opačným směrem. Pokud se vozidlo nachází na vhodném sypkém povrchu, dokáže se otočit na místě o 360° aniž by došlo k natočení předních kol. Pohyb se dá přirovnat k otáčení pásových vozidel [46].



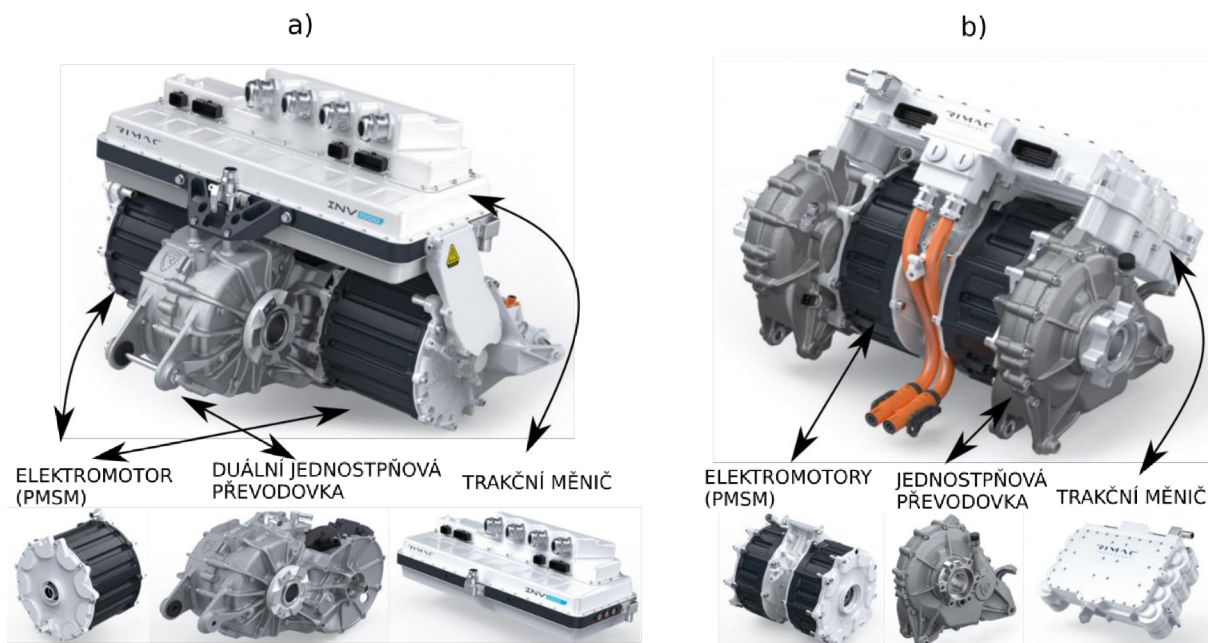
Obr. 26 Schématické zobrazení umístění čtyř elektromotorů v Rivian R1T [45]

RIMAC NEVERA

Mezi další zástupce AEV se čtyřmi motory patří model Nevera od chorvatské automobilky Rimac. Tato malá automobilka se specializuje na výrobu supersportů s využitím elektropohonů. Model Nevera byl představen v roce 2018 a vyrábět se začal v srpnu roku 2021, přičemž se má vyrobit pouhých 150 kusů. Nevera navazuje na předchozí model Rimac C Two, který se jako první představil s koncepcí čtyř elektrických motorů.

Každé kolo je poháněné samostatnou pohonnou jednotkou obsahující synchronní motor s permanentními magnety, trakční měnič a převodovku. Zadní motory s označením AXL_1800 produkují výkon 450 kW každý, jsou schopny přenést na kolo kroučící moment o hodnotě 900 Nm a maximální rychlost otáčení je 17 700 ot/min. Oba motory mají jednostupňové převodovky s převodovým poměrem 5,75, které jsou uloženy společně mezi motory v jednom krytování. Přední motory AXL_560 produkují nižší výkon, 220 kW každý, točivý moment 270 Nm a maximální otáčky dosahují až 17 800 ot/min. Jednostupňové převodovky s převodovým poměrem 5,5 jsou uloženy samostatně na vnější straně motoru. Všechny rotory jsou obaleny karbonovými vlákny a motory dosahují účinnost nad 97 %. Pohonné jednotky s jednotlivými komponenty jsou vyobrazeny na Obr. 27.[47]

Bateriový box modelu Nevera se liší od klasického skateboardového uložení v podlaze vozu. Rimac vytvořil speciálně tvarovaný kryt do tvaru „H“ pro uložení jednotlivých lithium mangan niklových článků. Jedním z důvodů tvarování krytu je navýšení celkové tuhosti podvozku vozidla a optimalizace rozložení hmotnosti. Baterie obsahuje 6960 článků cylindrického typu 21700, které dohromady dosahují úložné kapacity 120 kWh. Výstupní napětí je 730 V a celá baterie i s BMS je chlazena kapalinou [47].



Obr. 27 Pohonné jednotky a komponenty Rimac Nevera na a) zadní nápravě b) přední nápravě (podle [45])

Tab. 6 Parametry EV se třemi a čtyřmi elektromotory

| | | Tesla Model S Plaid [43] | Rivian R1T [44] | Rimac Nevera [45] |
|--|---------------|--------------------------|-----------------|-------------------|
| Typ karoserie | | Sedan | Pick-up | Supersport |
| Počet a typ elektromotorů | Přední | 1x PMSM | 2x PMSM | 2x PMSM |
| | Zadní | 2x PMSM | 2x PMSM | 2x PMSM |
| Max. výkon [kW] | | 760 | 623 | 1400 |
| Max. kroutící moment [Nm] | | - | 1231 | 2360 |
| Kapacita baterie/využitelná [kWh] | | 100/95 | 135/128,9 | 120/- |
| Typ baterie | | Li-ion | Li-ion | Li-ion |
| Převodovka / převodový poměr | Přední | 1°/7,5 | 1°/- | 1°/5,5 |
| | Zadní | 1°/7,5 | 1°/- | 1°/5,75 |
| Maximální rychlost [km/h] | | 322 | 200 | 412 |
| Zrychlení 0-100 km/h [s] | | 2,1 | 3,0 | 1,97 |
| Max. dojezd [km] | WLTP | 628 | - | 550 |
| | EPA | 560 | 505 | - |
| Kombinovaná spotřeba energie [kWh/100 km] | | - | 28,3 | - |
| Pohotovostní hmotnost [kg] | | 2316 | 2699 | 2150 |
| Cena od [Kč] (k 1.5.2022) | | 3 499 000 | 1 580 000 | 50 800 000 |

3.2 VYBRANÉ HYBRIDNÍ AUTOMOBILY

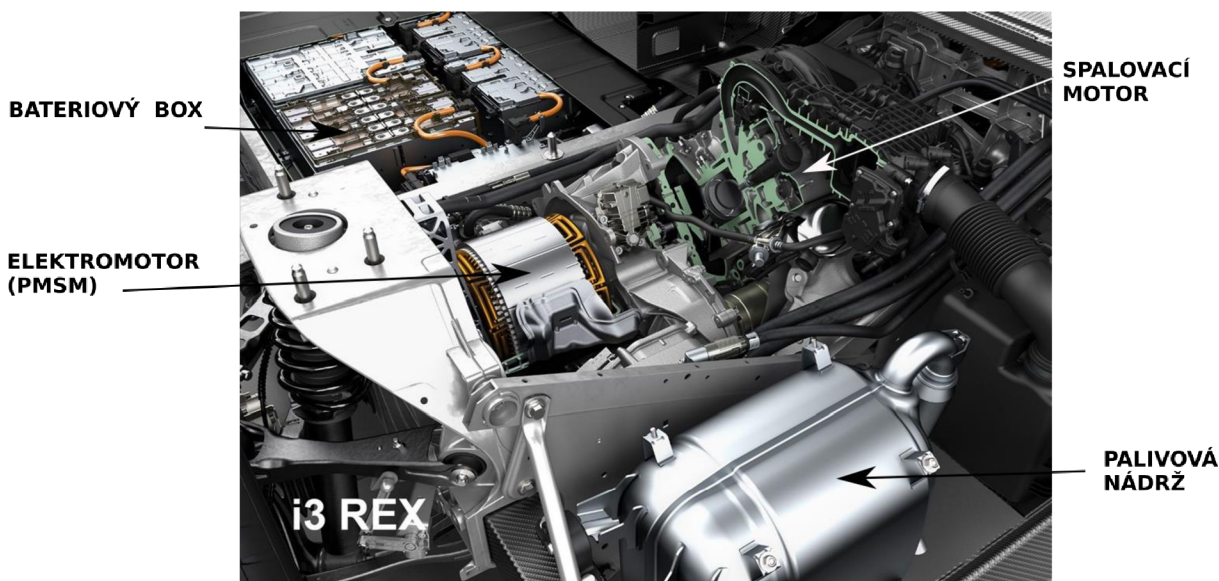
Další velkou kategorií tvoří hybridní automobily, které jsou rozděleny do kategorií podle uspořádání elektrického pohonu ve vozu. V každé kategorii jsou detailněji popsáni jeden až dva zástupci a v tabulkách na konci jednotlivých kapitol jsou porovnání společně s dalšími hybridy.

3.2.1 HEV SE SÉRIOVÝM USPOŘÁDÁNÍM (S PRODLUŽOVAČEM DOJEZDU)

Sériové uspořádání není u výrobců automobilů časté řešení, proto jsou vybrány a porovnány také vozidla, která se už dnes nevyrábějí. Porovnání S-HEV je uvedeno v *Tab. 7*.

BMW i3 REX

Elektrické vozy s označením i3 německé automobilky BMW jsou osazeny jedním synchronním elektromotorem s permanentními magnety, který u základní verze produkuje výkon 125 kW. Varianty i3 REx jsou navíc osazeny dvouválcovým zážehovým motorem 647cc W20K06A, který s výkonem 25kW slouží k nabíjení akumulátoru. Elektromotor i spalovací motor se nachází na zadní nápravě a celkový kroutící moment, přenášený přes jednostupňovou převodovku s převodovým poměrem 9,655, je 250 Nm. Modely od roku 2019 mají zvýšenou kapacitu Li-ion akumulátoru na 42,2 kWh. Bateriový box je složen z 8 modulů po 12 článcích. Benzínová nádrž pojme až 9 litrů paliva a celkový dojezd vozidla činí 308 km [48]. Uspořádání elektromotoru a spalovacího motoru ukazuje Obr. 28.



Obr. 28 Pohled na zadní nápravu BMW i3 REx (podle [48])

FISKER KARMA

V roce 2012 představila finská automobilka Fisker Automotive jeden z prvních plug-in hybridních elektrických vozidel se sériovým uspořádáním, model Karma. Nicméně se nejednalo o velmi úspěšný projekt, protože výroba byla zastavena hned v roce 2013 kvůli vyhlášení bankrotu dodavatele baterií. V roce 2016 vyšel předělaný model s názvem Karma Revero [49].

Model Karma má zadní nápravu osazenou dvěma PMSM, každý s výkonem 150 kW a kroutícím momentem 479 Nm. K dobíjení 20,1 kWh akumulátoru přes generátor je byl využit čtyřválcový zážehový motor s přímým vstřikováním a objemem dvou litrů. Kroutící moment je přenášen přes jednostupňovou převodovku a diferenciál s omezeným prokluzem. Celkový dojezd vozidla je 370 km, přičemž akumulátor umožňuje dojezd 51 km bez využití spalovacího motoru. Kromě nabíjení generátorem a z nabíjecích stanic (zásuvek) lze energii dodávat do akumulátoru i pomocí fotovoltaických panelů, které tvoří část střechy vozidla [49].

Tab. 7 Parametry vybraných hybridních vozidel s prodlouženým dojezdem

| | BMW i3 REx [47] | Fisker Karma [49] | Lotus Evora 414e [50] |
|--|----------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Počet a typ elektromotorů | 1x PMSM | 2x PMSM | 2x PMSM |
| Výkon spalovacího motoru | 25 | 194 | 35 |
| Max. výkon [kW] | 125 | 300 | 304 |
| Max. kroutící moment [Nm] | 250 | 959 | 800 |
| Kapacita baterie/využitelná [kWh] | 42,2/37,9 | 20,1 / - | 15/ - |
| Typ baterie | Li-ion | Li-ion | Li-ion |
| Převodovka / převodový poměr | 1°/9,655 | 1°/4,1 | 1°/ - |
| Maximální rychlost [km/h] | 150 | 200 | 215 |
| Zrychlení 0-100 km/h [s] | 7,3 | 5,9 | 4,4 |
| Čistě elektrický/ celkový dojezd [km] | 203/308 | 51/370 | 48/435 |
| Startovací cena [Kč] (k 2.5.2022) | 1 149 100 | - | - |

3.2.2 HEV S PARALELNÍM USPOŘÁDÁNÍM

Paralelní uspořádání patří mezi velmi oblíbené varianty hybridního pohonu. Vybrány jsou zástupci automobilek Škoda Auto, BMW a Volkswagen. Porovnání uvedených modelů je v Tab. 8.

ŠKODA OCTAVIA IV

Škoda Octavia iV byla představena na konci roku 2019. Vůz je poháněn PMSM motorem o výkonu 85 kW a zážehovým čtyřválcovým motorem o objemu 1,4 litru a výkonu 110 kW. Oba motory lze používat samostatně i společně, kdy celkový výkon dosahuje hodnoty 150 kW a kroutící moment 250 Nm. Elektromotor je uložen podle varianty P2, tedy mezi motorem a převodovkou. Díky Li-ion baterii s poměrně nízkou kapacitou 13 kWh se Octavia iV řadí mezi Mild hybridní vozidla, ale díky nabíjecímu adaptéru ji lze zařadit i do skupiny Plug-in hybridů. Nicméně na čistě elektrický pohon ujede 55 km, s palivovou nádrží o objemu 45 litrů a průměrnou spotřebou 5,6 l/100 km, je celkový dojezd okolo 800 km. Převodovka je mechanická, šestistupňová [52].

BMW ACTIVEHYBRID 3

V roce 2012 byl uveden na trh hybridní model ActiveHybrid 3, který byl postaven na základě modelu BMW 335i se zážehovým šestiválcovým motorem o objemu 3 litrů s přímým

vstřikováním. Synchronní elektromotor s permanentními magnety o výkonu 40 kW je uspořádán podle varianty P2 na přední nápravě a produkuje kroutící moment 210 Nm. Energii elektromotoru dodává Li-ion akumulátor o celkové kapacitě 1,35 kWh. Čistě elektrický dojezd je pouhých 4 km a pouze při rychlosti do 75 km/h [53]. V roce 2016 byl tento model nahrazen verzí 330e, která disponuje výkonnějším elektromotorem a plug-in technologií.

Tab. 8 Parametry vybraných hybridních vozidel s paralelním uspořádáním

| | Škoda Octavia iV [47] | BMW ActiveHybrid 3 [49] | Volkswagen Jetta [53] |
|--|----------------------------------|--|----------------------------------|
| Počet a typ elektromotorů | 1x PMSM | 1x PMSM | 1x PMSM |
| Výkon spalovacího motoru | 110 | 225 | 110 |
| Max. výkon [kW] | 150 | 250 | 125 |
| Max. kroutící moment [Nm] | 250 | 450 | 250 |
| Kapacita baterie/využitelná [kWh] | 13/ - | 1,5/ - | 1,1/ - |
| Typ baterie | Li-ion | Li-ion | Li-ion |
| Převodovka / převodový poměr | 6°/ | 8° | 7° |
| Maximální rychlost [km/h] | 220 | 250 | 210 |
| Zrychlení 0-100 km/h [s] | 7,7 | 5,3 | 8,6 |
| Čistě elektrický/ celkový dojezd [km] | 55/850 | 4/ - | 2/1340 |
| Startovací cena (k 2.5.2022) | 909 900 | - | - |

3.2.3 HEV S POWER-SPLIT USPOŘÁDÁNÍM

Power-split uspořádání patří mezi konstrukčně nejnáročnější variantu. Tuto technologii velmi dobře zvládla automobilka Toyota, která toto uspořádání používá u všech svých hybridních vozidel. K porovnání ke dvěma modelům Toyota je přidán zástupce automobilky Ford Motor Company a výsledky jsou uvedeny v Tab. 9.

TOYOTA PRIUS A PRIUS PRIME

Modely Prius patří mezi nejznámější hybridní vozidla, které se začaly vyrábět už v roce 1997. Obecně všechny HEV a PHEV modely od značky Toyota se vyrábějí v uspořádání power-split. Pohon zajišťuje čtyřválcový zážehový motor o objemu 1,8 litru společně s dvěma PMSM motory. Celkový výkon a točivý kroutící moment pohonné soustavy je 90 kW a 163 Nm. Elektrické pohony jsou umístěny v kombinaci P2+P3 a oba fungují i jako generátory [55]. Všechny motory se nacházejí na přední nápravě a jsou propojeny s děličem výkonu (PSD – power split device), který dále přenáší výkon přes diferenciál na přední kola. PSD s planetovým soukolím se zároveň chová jako CVT převodovka. Oproti klasické převodovce má PSD řadu výhod. Umožňuje přepínat mezi paralelním a sériovým uspořádáním, nahrazuje startér motoru, převodový poměr je plynulý a snižuje spotřebu vozidla. Pro čistě elektrický pohon je využit převážně druhý, výkonnější (60 kW)

elektromotor usazený za PSD (varianta P3). První, slabší elektromotor o výkonu 40 kW primárně plní funkci generátoru [56].

Akumulátory u modelu Prius jsou na rozdíl od předešlých generací složeny z Li-ion článků o celkové kapacitě 1,3 kWh, u plug-in verze Prius Prime je celková kapacita 8,8 kWh [55]. Nejnovější modely Prius už nejsou dostupné pro evropský trh.

Tab. 9 Parametry vybraných hybridních vozidel s power-split uspořádáním

| | Toyota Prius [54] | Toyota Prius Prime [54] | Ford Kuga (PHEV) [56] |
|--|-----------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Počet a typ elektromotorů | 2x PMSM | 2x PMSM | 1x PMSM |
| Výkon spalovacího motoru | 73 | 73 | 140 |
| Max. výkon [kW] | 90 | 90 | 165 |
| Max. kroutící moment [Nm] | 163 | 163 | 230 |
| Kapacita baterie/využitelná [kWh] | 1,3/ - | 8,8/ - | 14,4/ - |
| Typ baterie | Li-ion | Li-ion | Li-ion |
| Převodovka / převodový poměr | CVT | CVT | CVT |
| Maximální rychlost [km/h] | 180 | 180 | 200 |
| Zrychlení 0-100 km/h [s] | 10,2 | 10,2 | 9,2 |
| Čistě elektrický/ celkový dojezd [km] | 20/870 | 40/1030 | 64/750 |
| Startovací cena (k 2.5.2022) [Kč] | 590 000* | 670 000* | 848 900 |

*Přepočteno z cen pro trh v USA s kurzem 1 USD=23,453 CZK

3.3 OSTATNÍ ELEKTRIFIKOVANÁ VOZIDLA

V této kapitole jsou představeni zástupci elektrifikovaných vozidel a vozítek vyjma automobilů. Jsou zde uvedeny elektrifikovaná vozidla od nejmenších jednokolek až po vozidla hromadné městské dopravy.

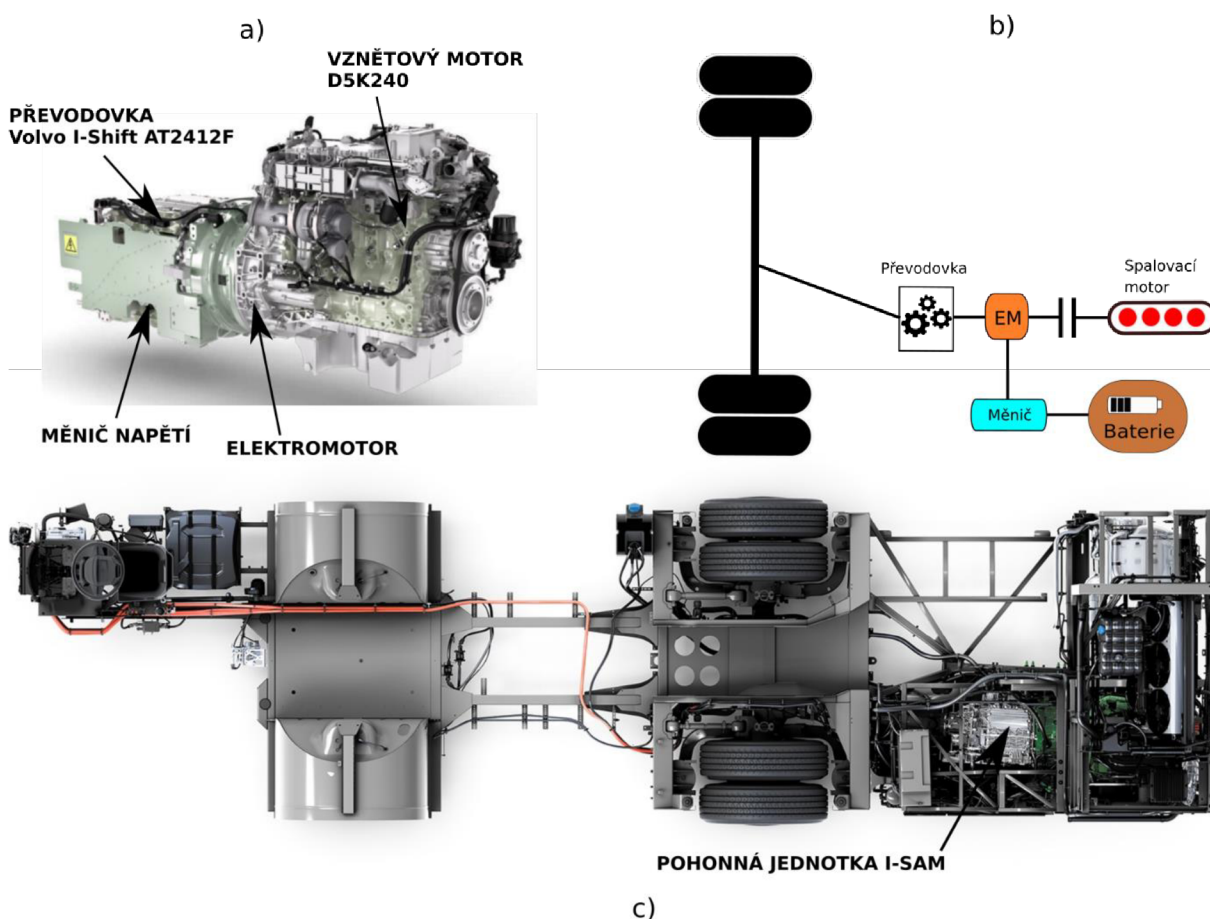
3.3.1 HYBRIDNÍ A PLNĚ ELEKTRICKÉ AUTOBUSY

V poslední době se dbá na snižování emisních zátěží a zlepšování kvality ovzduší ve velkých aglomeracích. Elektrifikace městské veřejné dopravy je jedním z hlavních kroků, jak přispět ke snížení uvolňování emisních plynů do okolí. Pro srovnání jsem vybrány tři zástupci hybridních a plně elektrických autobusů, jejich vzájemné porovnání je uvedeno v Tab. 10.

VOLVO 7900 S-CHARGE

Autobus Volvo 7900 S-Charge od švédské automobilky Volvo Buses je plně hybridní vozidlo. Konstrukce autobusu je vystavěna na podvozku s označením Volvo B5L S-charge, který má v sobě zabudovaný vznětový čtyřválcový motor Volvo D5K240 s přímým vstříkáváním a elektromotor o výkonu 110 kW a kroutícím momentu 800 Nm. Spalovací motor o objemu 5,1 litrů produkuje 180 kW a 918 Nm. Motory tvoří jednu komplexní pohonnou jednotku s označením I-SAM (Integrated Starter, Alternator, Motor), která plní funkci startéru, alternátoru i motoru. Energie je ukládána do Li-ion akumulátoru o kapacitě

8,9 kWh s aktivním vodním chlazením. V plně elektrickém módu lze ujet 1 km a maximální rychlost nesmí překročit 50 km/h. Jako palivo pro spalovací motor může být použito biopalivo a úspora paliva s paralelním uspořádáním dosahuje až 39 % [58]. Platforma B5L S-Charge a I-SAM jednotka je zobrazena na Obr. 29.



Obr. 29 a) Pohonná jednotka I-SAM b) schéma uspořádání pohonu Volvo 7900 S-Charge c) podvozek Volvo B5L S-Charge (upraveno podle [58])

VOLVO 7900 ELECTRIC

Další model od společnosti Volvo Buses je plně elektrický autobus Volvo 7900 Electric. U plnohodnotném podvozku Volvo BZL Electric je možný výběr mezi uspořádáním s jedním nebo dvěma elektromotory. V prvním případě pohon zajišťuje jednotka EPT 402 o výkonu 200 kW a točivém momentu 425 Nm, v dual uspořádání s označením EPT 802 je využit tento motor dvakrát. Motor/y jsou napojeny na dvoustupňovou převodovku. Baterie je složena z Li-ion článků typu NCA a bateriový box dosahuje kapacity 94 kWh. Baterie jsou umístěny na střeše autobusu, kde je možné umístit tři až pět bateriových boxů, na výběr jsou tedy varianty s 282, 376 nebo 470 kWh. Přesný dojezd ještě není uveden, ale očekává se dojezd až 200 km [59].

Tab. 10 Parametry vybraných autobusů s elektrickým pohonem

| | Volvo 7900 S-Charge [57] | Volvo 7900 Electric [57] | Enviro 400EV [58] |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Typ pohonu | HEV | EV | EV |
| Výkon elektromotoru [kW] | 110 | 200 (2x200) | 2x 150 |
| Výkon spalovacího motoru [kW] | 180 | - | - |
| Kroutící moment [Nm] | 918 | - | 425 |
| Kapacita baterie [kWh] | 8,9 | 282–470 | 382 |
| Elektrický dojezd [km] | 1 | až 200 | 260 |

3.3.2 PLNĚ ELEKTRICKÉ MOTOCYKLY

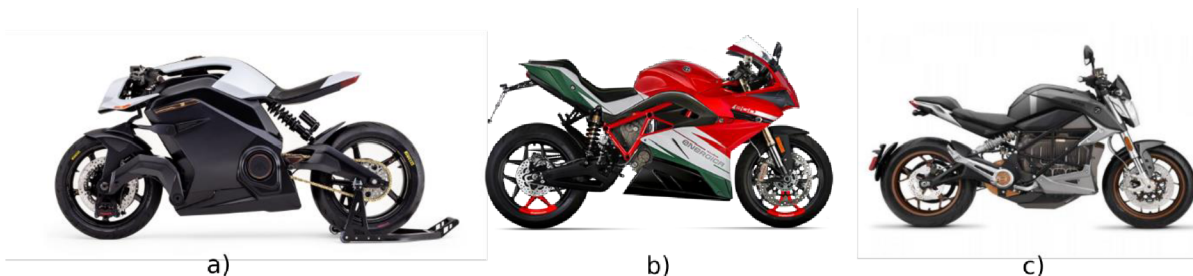
Elektrifikace není pouze výhradou automobilů nebo větších dopravních prostředků, ale projevuje se i v oblasti motocyklů. Pro porovnání jsou zvoleny plně elektrické bateriové motocykly od různých výrobců. Porovnání jednotlivých parametrů je v *Tab. 11*.

ZERO SR/F

Americký výrobce Zero Motorcycles se zabývá výrobou elektrických motocyklů od roku 2006. Nejvýkonnější model SR/F je poháněn BLDC motorem o výkonu 82 kW a kroutícím momentu 190 Nm. Motor je pasivně chlazený vzduchem. Jako zdroj energie je použita baterie o využitelné kapacitě 12,6 kWh z celkových 14,4 kWh. Díky elektromotoru není zapotřebí převodovky a výkon je přenášen přes synchronní řemen. Maximální rychlost je 200 km/h a kombinovaný dojezd je 227 km podle normy SAE J2982 [61].

ENERGICA EGO

Model Energica Ego je vyráběn italskou společností Energica Motor Company založenou v roce 2010. K dosažení maximální rychlosti 240 km/h slouží olejem chlazený BLDC motor o maximálním výkonu 126 kW, kroutícím momentu 200 Nm. Základní verze disponuje 13,4 kWh akumulátorem, přičemž využitelných je pouze 11,7 kWh. Kombinovaný dojezd je 230 km [62]



Obr. 30 a) Arc Vector [63] b) Energica Ego [62] c) Zero SR/F [61]

Tab. 11 Parametry vybraných plně elektrických motocyklů

| | Zero SR/F [60] | Energica Ego [61] | Arc Vector [62] |
|--|----------------|-------------------|-----------------|
| Typ elektromotoru | BLDC | BLDC | BLDC |
| Výkon [kW] | 82 | 126 | 95 |
| Kroutící moment [Nm] | 190 | 200 | 148 |
| Celková/využitelná kapacita | 14,4/12,6 | 13,4/11,7 | 16,8/ |
| Kombinovaný dojezd [km] | 227 | 230 | 436 |
| Maximální rychlost [km/h] | 200 | 240 | 200 |
| Váha [kg] | 227 | 258 | 220 |
| Startovací cena [Kč] (k 7.5.2022) | 524 628 | 797 600 | 2 600 000 |

3.3.3 ELEKTRICKÁ VOZÍTKA

Tato kapitola je zaměřena na malá elektrická vozítka sloužící převážně pro přepravu maximálně jedné osoby na kratší vzdálenosti. Většina těchto vozítek najde uplatnění převážně v městských oblastech, nicméně s rostoucí poptávkou se rozšiřuje i nabídka terénních variant. Vybraná vozítka jsou zobrazena na *Obr. 31* a vzájemně porovnány v *Tab. 12*.

ONEWHEEL GT

Onewheel GT je elektrická jednokolka, která tvarem částečně připomíná klasický skateboard. Vozítko je poháněno BLDC motorem vestavěným do kola o výkonu 750 W. V ploché části je umístěna Li-ion baterie typu NMC. Jedná se o válcové články typu 21700. S plně nabitou baterií lze ujet až 52 km a dosáhnout maximální rychlosti 32 km/h. Hmotnost celé jednokolky je necelých 16 kg [64].

NINEBOT Z10

Dalším typem jednokolky je Ninebot Z10. BLDC motor o výkonu 1800 W je opět vestavěný do hracího kola. Li-ion baterie o kapacitě 995 Wh s BMS systémem umožňuje dojezd 90 km a maximální rychlost až 45 km/h. Vozítko váží 24 kg [65].

HOVERBOARD VEGA VIRON GPX-04

Hoverboard, též kolonožka, je dvoukolové vozítko s dvěma BLDC elektromotory o výkonech 400 W. Li-ion baterie o napětí 36 V a kapacitě 4,4 Ah. Udávaná vzdálenost dojezdu až 20 km a maximální rychlost nepřekračuje 15 km/h. Hoverboard váží pouhých 14 kg [66].

ECOWHEEL 2WD K95 3200W

Elektrická terénní koloběžka EcoWheel disponuje pohonem obou kol pomocí dvou elektromotorů o výkonech 1600 W. Motory lze vzájemně přepínat. Maximální rychlost je 85 km/h a celková hmotnost 35 kg. Motory jsou napájeny Li-ion baterií s kapacitou 26 Ah [67].



Obr. 31 a) Onewheel GT [68] b) Ninebot Z10 [65] c) Hoverboard Viron GPX-04 [66]
 d) Elektrokoloběžka 2WD EcoWheel K95 3200W [66][67]

Tab. 12 Parametry vybraných elektrických vozítek

| | Onewheel GT [63] | Ninebot Z10 [64] | VeGa Viron GPX-04 [65] | EcoWheel 2WD K95 3200W [66] |
|----------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Typ elektromotoru | BLDC | BLDC | 2x BLDC | 2xBLDC |
| Výkon [W] | 750 | 1800 | 2x 400 | 2x1600 |
| Kapacita baterie [Wh] | - | 995 | 159 | 1560 |
| Dojezd [km] | 52 | 90 | 20 | 70 |
| Maximální rychlost [km/h] | 32 | 45 | 15 | 85 |
| Hmotnost [kg] | 15,9 | 24 | 14 | 35 |
| Cena [Kč] (k 10.5.2022) | 68 490 | 48 890 | 7490 | 34 990 |

ZÁVĚR

Elektrifikace vozidel v posledních letech zažívá hojný rozvoj a mnoho výrobců, kteří se nejprve odkláněli od zavádění elektrických pohonů do svých vozidel, bylo donuceno svůj postoj přehodnotit a vydat se také směrem elektromobility, aby si udrželi konkurenceschopnost. S novými objevy a technologiemi v oblasti elektrických motorů, výkonové elektroniky a veškerých akumulátorů vznikají nové možnosti pro uspořádání a kombinace jednotlivých elektropohonů. Výrobci často experimentují a vydávají se vlastní cestou. Oblast elektromobility je stále z velké části neprozkoumána a do budoucna má určitě ještě mnoho co nabídnout.

Hlavním cílem této práce bylo uvést přehled současných elektrických pohonů, které se využívají v dopravních prostředcích. Ze získaných informací při porovnávání vybraných vozidel a vozítek bylo vyvozeno několik závěrů.

Pro pohon čistě elektrických bateriových a hybridních automobilů se nejčastěji používají synchronní motory s permanentními magnety a indukční (asynchronní) motory. Oba motory mají dostatečně velký rozsah otáček a tím eliminují potřebu integrovat do pohonu vícestupňovou převodovku. Mírně navrch má stále PMSM motor, který dosahuje větší účinnosti a nevyžaduje tak intenzivní chlazení jako IM. Ačkoliv jsou náklady na výrobu vyšší, výrobci jej stále častěji preferují před IM, protože jedním z rozhodujících parametrů pro výběr elektrifikovaných automobilů, z pohledu zákazníka, je čistě elektrický dojezd a každý kilometr navíc je důležitý.

U sériově vyráběných elektrických vozidel se převážně ustálil koncept uspořádání s elektromotorem a převodovkou umístěnými uprostřed mezi koly na hnací hřídeli. U čistě elektrických bateriových vozidel dosahují nejdelších dojezdů s ohledem na cenu automobily s jedním, případně dvěma elektromotory. EV s více elektromotory mají ve většině případů umístěný silnější elektromotor na zadní nápravě, který slouží jako primární pohon a méně výkonný elektromotor na přední nápravě zajišťuje rekuperaci energie při brzdění. U hybridních automobilů se v současné době nejvíce vyskytuje paralelní a power-split uspořádání s možností dobíjení akumulátorů (plug-in hybridy). Jejich nevýhodou je vyšší pořizovací cena oproti variantám se spalovacím motorem z důvodu komplikovanější konstrukce. Ale s postupným navyšováním kapacit akumulátorů, prodlužováním čistě elektrického dojezdu a zlepšováním dynamických vlastností díky asistenci elektromotoru se zájem o hybridní vozidla rozšiřuje.

U menších elektrických vozidel a vozítek se nejčastěji vyskytuje jako součást pohonné jednotky BLDC motor. Důvodem je úspora místa vestavěním motoru do kola a jednoduchost řízení a napájení motoru přes výkonovou elektroniku. S ohledem na cenu, dojezd a jízdní vlastnosti vychází z kategorie elektrických vozítek nejlépe elektrické koloběžky, které s příchodem lithium iontových baterií dosahují dojezdu až několik desítek kilometrů.

V práci se nacházejí prostory pro další a podrobnější rozvinutí jednotlivých témat. Například v kapitole 3 je možné rozšířit seznam vybraných vozidel v kategoriích, zahrnout do porovnání další typy vozidel jako jsou elektrická kola, vlaky, tramvaje nebo čtyřkolky. Lze přidat i další parametry pro vzájemné porovnání vozidel a vozítek – produkce CO₂ [g/km] nebo rychlost nabíjení.

Z mého pohledu předpokládám, že k největšímu rozvoji dojde v oblasti akumulátorů, kde se očekává příchod tzv. solid-state baterií, který by mohl zásadně změnit parametry čistě elektrických bateriových vozidel. Ve vývoji samotných elektromotorů neočekávám příchod převratných technologií, ale pouze drobné technologické úpravy, které umožní zmenšování objemu při zachování výkonových parametrů a zvýší účinnost. Dobrou ukázkou je například Quark motor od společnosti Koenigsegg, který produkuje výkon 250 kW, váží pouhých 30 kg a na výšku měří 334 mm. Dále lze také očekávat častější využití čtyř samostatných elektromotorů u EV automobilů, převážně u off-road modelů. S tím souvisí i vývoj řídicích jednotek a výkonové elektroniky, které umožní co nejefektivnější rozložení výkonu mezi elektromotory a optimalizují zisk energie při rekuperaci. S elektrifikací vozidel je také ale nutné budovat potřebnou infrastrukturu, zajistit vhodný energetický mix a recyklaci, aby proces elektrifikace dával smysl a opravdu docházelo ke zlepšování životních podmínek.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BOLDEA, Ion a Syed A. NASAR. *Electric Drives* [online]. 3. Boca Raton: CRC Press, 2016 [cit. 2022-02-03]. ISBN 9781498748216. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781315368573>
- [2] HUGHES, Austin a Bill DRURY. *Electric Motors and Drives - Fundamentals, Types and Applications* [online]. 5th Edition. Elsevier, 2019 [cit. 2022-02-03]. ISBN 978-0-1281-8925-2. Dostupné z: https://app.knovel.com/kn/resources/kpEMDFTA11/toc?include_synonyms=no&sort_on=default
- [3] Elektromotor, elektrický motor. *Oneindustry* [online]. 2019 [cit. 2022-02-03]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/elektromotor-elektricky-motor/>
- [4] Spouštění indukčního motoru: Trojfázový indukční motor - spouštění. *ELUC* [online]. 13.8.2013 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/783>
- [5] PEŠAN, Radovan. *Spouštění asynchronních motorů* [online]. In: . 2016, 2016 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://adoc.pub/1-spoutni-asynchronnich-motor.html>
- [6] *Průvodce problematikou softstartérů* [online]. In: VAŠINKA, Jiří. 2009 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/31a495b8b7132474c1257d710037bc83/Softstartery%20-%20Pruvodce%20problematikou%20softstarteru.pdf>
- [7] Brushless DC Motors (BLDC): What Are They & How Do They Work?. *Electrical4U* [online]. © 2022, 24.12.2015 [cit. 2022-02-028]. Dostupné z: <https://www.electrical4u.com/brushless-dc-motors/>
- [8] AKIN, Bilal a Manish BHARDWAJ. Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors: Application Report [online]. Texas Instruments, 2013 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq6/sprabq6.pdf>
- [9] ICE, Charlie. *Odborný časopis pro vývoj a výrobu v oboru elektroniky* [online]. CADware, 2013, 194 s. [cit. 2022-03-21]. ISSN 1805-5044. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/soucastky/id:2700/bezsenszorove-rizeni-blcdc-motoru-pro-siroke-vyuziti>
- [10] Rozdíly mezi motory PMSM a motory BLDC. *Staba motor* [online]. © 2010-2020, 12.7.2021 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <http://cs.stabamotor.com/news/differences-between-pmsm-motors-and-blcdc-motors/>
- [11] AMILCARE. The basics of BLDC motors. *ElettroAmici* [online]. 29.7.2018 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.elettroamici.org/en/nozioni-di-base-sui-motori-blcdc/>
- [12] KARTHIK, Sri Hari. Types of Motors used in Electric Vehicles. *Circuit Digest* [online]. © 2022, 3.5.2019 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/article/different-types-of-motors-used-in-electric-vehicles-ev>

- [13] Brushed vs. Brushless Motors. *VEX* [online]. ©2022 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://motors.vex.com/brushed-brushless>
- [14] *ELEKTRO: Renesance reluktančních motorů* [online]. FCC Public, 2017, 104 s. [cit. 2022-03-28]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz//flipviewer/Elektro/2017/08/Elektro_08_2017/index.html#p=62
- [15] Reluctance Motors Types and Function: Synchronous Reluctance Motor and Switched Reluctance Motor. *OSWOS* [online]. [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://oswos.com/reluctance-motor/>
- [16] KOŠTÁL, Josef. *ELEKTRO* [online]. FCC Public, 2017, 68 s. [cit. 2022-03-28]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz//flipviewer/Elektro/2017/06/Elektro_06_2017/index.html#p=51
- [17] BARTA, Jan a Cestmir ONDRUSEK. *MM Science Journal: ROTOR DESIGN AND OPTIMIZATION OF SYNCHRONOUS RELUCTANCE MACHINE* [online]. 8. 2015 [cit. 2022-03-28]. ISSN 1805-0476. Dostupné z: http://doi.org/10.17973/MMSJ.2015_03_201504
- [18] KANE, Mark. Tesla Model 3's IPM-SynRM Electric Motor Explained. *INSIDEEVs* [online]. 22.12.2020 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/461811/video-tesla-model-3-electric-motor-explained/>
- [19] Electric vehicle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle#Range-extended_electric_vehicle
- [20] HANNAN, M.A., F.A. AZIDIN a A. MOHAMED. Hybrid electric vehicles and their challenges: A review. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 29. 2014, 17.9.2013 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.097>
- [21] Druhy elektromobilů - znáte je všechny?. *Škoda Storyboard* [online]. 21.3.2019 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/e-mobilita-cs/druhy-elektromobilu-znate-je-vsechny>
- [22] ZHUANG, Weichao, Shengbo Eben LI, Xiaowu ZHANG, Dongsuk ZAM, Ziyou SONG, Guodong YIN a Fei JU. A survey of powertrain configuration studies on hybrid electric vehicles. In: *Applied Energy* [online]. 262, 2022, 15.2.2020 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114553>
- [23] Types of Mild Hybrid Electric Vehicles (MHEV). *X-engineer* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/mild-hybrid-electric-vehicles-mhev-types/>

- [24] TRAN, Dai-Duong, Majid VAFAEIPOUR, Mohamed EL BAGHDADI, Ricardo BARRERO, Joeri VAN MIERLO a Omar HEGAZY. Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 119. 2020, 5.2.2020 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109596>
- [25] LUKIC, Srdjan M., Jian CAO, Ramesh C. BANSAL, Fernando RODRIGUEZ a Alo EMADI. Energy Storage Systems for Automotive Applications. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 55. IEEE, 2008, 28.5.2008 [cit. 2022-04-06]. ISSN 1557-9948. Dostupné z: [doi:10.1109/TIE.2008.918390](https://doi.org/10.1109/TIE.2008.918390)
- [26] Siang Fui Tie, Chee Wei Tan, A review of energy sources and energy management system in electric vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 20, April 2013, Pages 82-102, ISSN 1364-0321. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.077>
- [27] FRIVALDSKÝ, Michal, Michal PRAŽENICA, Roman KOŇARIK, Pavol ŠPÁNIK, Peter ČUBOŇ, Roman RADVAN a Vladimír RÁČEK. Elektromobilita. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline 2019: EDIS-vydavateľské centrum ŽU, 2019. ISBN 978-80-554-1598-7.
- [28] Fuel Cell Electric Vehicles. *Energy Efficiency & Renewable Energz* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel_cell.html
- [29] Vodíkové stanice v ceska-republika v Květen 2022. *Glpautogas.info* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.glpautogas.info/cs/vodikove-stanice-ceska-republika.html#>
- [30] WARNER, John T. The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design. Elsevier Science & Technology, 2015. ISBN 9780128014561. Dostupné z: [doi:10.1016/C2013-0-23144-5](https://doi.org/10.1016/C2013-0-23144-5)
- [31] Electric Car Batteries and Characteristics. *Omazaki Group* [online]. [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.omazaki.co.id/en/electric-car-batteries-and-their-characteristics/>
- [32] FRYBERT, Jan, Ján LACKO, Petr MUDRÁK, Jan SLANINA a Martin TRAUTMAN. *Alternativní pohony*. 1. Brno: Integrovaná střední škola automobilní, 2015, 125 stran: ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-80-260-7548-6.
- [33] Typy lithium-iontů. *Zhejiang Dongshuo New Energy Co* [online]. 21.2.2019 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://cz.dsnsolar.com/info/types-of-lithium-ion-32657770.html/>
- [34] GET TO KNOW THE MEB PLATFORM, THE BASE OF THE ŠKODA ENYAQ iV. *Škoda Storyboard* [online]. 8.10.2020 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/en/models/enyaq/get-to-know-the-meb-platform-the-base-of-the-skoda-enyaq-iv/>
- [35] Škoda Enyaq iV. *ŠKODA Storyboard* [online]. 29.11.2021 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://cdn.skoda-storyboard.com/2020/08/TD-ENYAQ-iV-cz.pdf>

- [36] "We are open to e-collaboration." *Volkswagen Newsroom* [online]. © 2022, 31.1.2019 [cit. 2022-04-06]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/stories/we-are-open-to-e-collaboration-4620>
- [37] Tesla Motors Models. *Tesla Motors* [online]. [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: https://www.tesla.com/cs_cz/models
- [38] Porsche Taycan Turbo S. *Porsche Inter Auto CZ* [online]. © 2022 [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: <https://porsche.cz/nove-modely/taycan/taycan-turbo-s/>
- [39] TRACY, David. An Extremely Detailed Look At The Porsche Taycan's Engineering Designed To Take On Tesla. *Jalopnik* [online]. @2022, 15.2.2022 [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: <https://jalopnik-com.cdn.ampproject.org/c/s/jalopnik.com/an-extremely-detailed-look-at-the-porsche-taycans-engin-1837802533/amp>
- [40] EWING, Mark. Porsche Taycan: All Electric, Quick As A Ferrari Stradale, The Most Radical Porsche In Decades. *Forbes Media* [online]. @2022, 4.9.2019 [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/markewing/2019/09/04/porsche-taycan-all-electric-quick-as-a-ferrari-stradale-the-most-radical-porsche-in-decades/?sh=22810eb29e4d>
- [41] BMW i3s. *BMW Česká republika* [online]. © 2022 [cit. 2022-05-5]. Dostupné z: https://configure.bmw.cz/cs_CZ/configid/lhtup6xl
- [42] In brief: More than 200 horses in a sports bag – the electric drive in the Volkswagen ID.3. *Volkswagen Group News* [online]. ©2022, 14.11.2019 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/in-brief-more-than-200-horses-in-a-sports-bag-the-electric-drive-in-the-volkswagen-id3-5541>
- [43] TESLA. *Model S Plaid Delivery Event* [online]. 2021 [cit. 2022-04-25]. Youtube video. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=kUmkbzQ-BS0>
- [44] KANE, Mark. Watch Tesla Model S Plaid's Battery Get Opened And Described. *INSIDEEVs* [online]. 13.10.2021 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/540380/tesla-models-plaid-battery-open/>
- [45] Rivian R1T. *Rivian* [online]. © 2022 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://rivian.com/r1t>
- [46] DORIAN, Drew. 2022 Rivian R1T. *Car and Driver* [online]. 3.3.2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/rivian/r1t>
- [47] Rimac Nevera. *Rimac* [online]. [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.rimac-automobili.com/nevera/>
- [48] KANE, Mark. 2019 BMW i3, i3 REx, i3s & i3s REx: Full Specs. *INSIDEEVs* [online]. 28.9.2018 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/339970/2019-bmw-i3-i3-rex-i3s-amp-i3s-rex-full-specs/>

- [49] VOSSLER, Chuck. The Underbody Of The BMW i3 REx. *BMW BLOG* [online]. 5.12.2014 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.bmwblog.com/2014/12/05/underbody-bmw-i3-rex/>
- [50] Fisker Karma. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 30.4.2022 [cit. 2022-05-10].
- [51] Lotus Evora 414E Hybrid. *Haymarket Media Group: Autocar* [online]. © 2022, 1.10.2012 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.autocar.co.uk/car-review/lotus/evora/first-drives/lotus-evora-414e-hybrid>
- [52] Škoda Octavia. *ŠKODA Storyboard* [online]. © 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/skoda-model/nova-octavia/>
- [53] BMW ActiveHybrid 3 (F30) 340 PS. *Ze Perfs* [online]. © 2001-2022, 13.10.2021 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://zeperfs.com/en/fiche5343-bmw-activehybrid-3.htm#Specs>
- [54] BONDE, Jonas. Volkswagen Jetta 1.4 TSI Hybrid DSG Sequential, 7-speed 170ps, (2011 - 2014). *Car.info* [online]. © 2014-2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.car.info/en-se/volkswagen/jetta/jetta-4-door-14-tsi-hybrid-6779378/specs>
- [55] 2022 Toyota Prius Specs & Options. *Toyota Motor Sales* [online]. ©2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.toyota.com/prius/features/mpg_other_price/1221/1223/1263
- [56] THOMAS, Vik. Toyota Power Split device. *Hybrid Auto* [online]. © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://hybridautopart.com/blog-en/toyota-prius-power-split-device/>
- [57] Ford Kuga. *Ford Motor Company* [online]. © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.ford.cz/osobni-vozy?bnpShowroom=on?config=WSEAT-CF7-2020-BX726PUMACZE202125>
- [58] Specifications Volvo B5L S-charge. *AB Volvo* [online]. ©2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.volvobuses.com/en/city-and-intercity/chassis/volvo-B5l-s-charge/specifications.html>
- [59] Specifications Volvo BZL Electric. *AB Volvo* [online]. ©2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.volvobuses.com/en/city-and-intercity/chassis/volvo-bzl-electric/specifications.html>
- [60] BYD ADL Enviro400EV. *Alexander Dennis* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.alexander-dennis.com/media/85597/byd-adl-enviro400ev.pdf>
- [61] Zero SR/F. *Zero Motorcycles* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.zeromotorcycles.com/model/zero-srf>
- [62] *Energica Ego* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.energicamotor.com/en/models/energica-ego-electric-motorcycle/>

- [63] The Arc Vector. *ARC Vehicle* [online]. ©2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.arcvehicle.com/the-vector.html>
- [64] Onewheel GT. *One Wheel* [online]. ©2020 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://onewheel.com/products/onewheel-gt>
- [65] Ninebot Z10. *Seg-way Ninebot* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://cz-cs.segway.com/products/ninebot-by-segway-z10>
- [66] Hoverboard VeGA VIRON GPX-04 WHITE. *Peddy* [online]. © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.peddy.cz/zahrada-volny-cas-detske-zbozi-vozik-hoverboard/hoverboard-vega-viron-gpx-04-white#box-popis>
- [67] Elektrická koloběžka 2WD EcoWheel K95 3200W, 26Ah - OIL double. *EcoWheel* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.ecowheel.cz/Elektricka-kolobezka-2WD-EcoWheel-K95-3200W-26Ah-OIL-double-d373.htm#detail-anchor-description>
- [68] ONEWHEEL GT / TREADAD TIRE. *ADRENALINE JUNKIES* [online]. © 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://adrenalinejunkies.cz/produkt/onewheel-gt/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

| | | |
|----------------------|---------------------------------------|---|
| <i>AEV</i> | | All electric vehicle (plně elektrické vozidlo) |
| <i>B</i> | [T] | Magnetická indukce |
| <i>BEV</i> | | Battery electric vehicle (Bateriové elektrické vozidlo) |
| <i>BLDC</i> | | Brushless d.c. motor (bezkartáčový stejnosměrný motor) |
| <i>BMS</i> | | Battery management system |
| <i>E</i> | [V] | Indukované (magnetomotorické) napětí |
| <i>ECM</i> | | Electronically commutated motor (elektricky komutovaný motor) |
| <i>EV</i> | | Electric vehicle (elektrické vozidlo) |
| <i>F</i> | [N] | Síla působící na vodič v magnetickém poli |
| <i>f₁</i> | [Hz] | Frekvence proudu primárního vinutí |
| <i>f₂</i> | [Hz] | Frekvence proudu sekundárního vinutí (rotoru) |
| <i>FCEV</i> | | Fuel cell electric vehicle (elektrické vozidlo s palivovými články) |
| <i>HEV</i> | | Hybrid electric vehicle (hybridní elektrické vozidlo) |
| <i>HF</i> | | Hybridization factor (hybridizační faktor) |
| <i>I</i> | [A] | Elektrický proud |
| <i>IM</i> | | Induction motor (indukční nebo asynchronní motor) |
| <i>IPM-SynRM</i> | | Internal permanent magnet – synchronous reluctance motor |
| <i>I_r</i> | [A] | Elektrický proud na rotoru |
| <i>I-SAM</i> | | Integrated Starter, Alternator, Motor |
| <i>K_E</i> | [V·s] | Napěťová konstanta |
| <i>K_T</i> | [N·T ⁻¹ ·A ⁻¹] | Napěťová konstanta |
| <i>l</i> | [m] | Délka vodiče |
| <i>LFP</i> | | Lithium železo fosfátový |
| <i>Li-ion</i> | | Lithium iontový |
| <i>LMO</i> | | Lithium oxid manganičitý |
| <i>LTO</i> | | Lithium titaničitý |
| <i>MEB</i> | | Modular electric drive matrix (modulární platforma pro elektromobily) |
| <i>n</i> | [min ⁻¹] | Otáčky motoru |
| <i>N</i> | [min ⁻¹] | Otáčky rotoru asynchronního motoru |
| <i>N_c</i> | [-] | Počet závitů cívky |
| <i>NCA</i> | | Lithium nikl kobalt oxid hlinitý |

| | | |
|----------------|----------------------|--|
| <i>Ne-Fe-B</i> | | Neodym-železo-bór |
| <i>NMC</i> | | Lithium nikl mangan oxid kobaltnatý |
| N_s | [min ⁻¹] | Synchronní otáčky motoru |
| p | [-] | Počet pólů |
| <i>PHEV</i> | | Plug-in electric vehicle |
| <i>P-HEV</i> | | Paralel- hybrid electric vehicle (paralelní hybridní elektrické vozidlo) |
| <i>PMSM</i> | | Permanent magnet synchronous motor |
| <i>PS-HEV</i> | | Power-split Hybrid electric vehicle |
| r | [m] | Poloměr rotoru |
| R | [Ω] | Elektrický odpor |
| <i>R-EEV</i> | | Range-extended electric vehicle (elektrické vozidlo s extendérem) |
| s | [-] | Skluž |
| <i>S-HEV</i> | | Series - Hybrid electric vehicle (sériové hybridní elektrické vozidlo) |
| <i>SRM</i> | | Switched reluctance motor (spínavý elektrický motor) |
| <i>SynRM</i> | | Synchronous reluctance motor (synchronní reluktanční motor) |
| T | [N·m] | Kroutící moment |
| T_{roz} | [N·m] | Rozdíl kroutícího momentu motoru a zátěže |
| U | [V] | Napětí zdroje |
| U_s | [V] | Napětí ideálního zdroje |
| v | [m·s ⁻¹] | Rychlost vodiče |
| <i>Y/D</i> | | Zapojení do hvězdy/trojúhelníku |
| Z_s | [Ω] | Impedance zdroje |
| Φ | [T·m ²] | Magnetický tok |
| Φ_r | [°] | Fázový posun |