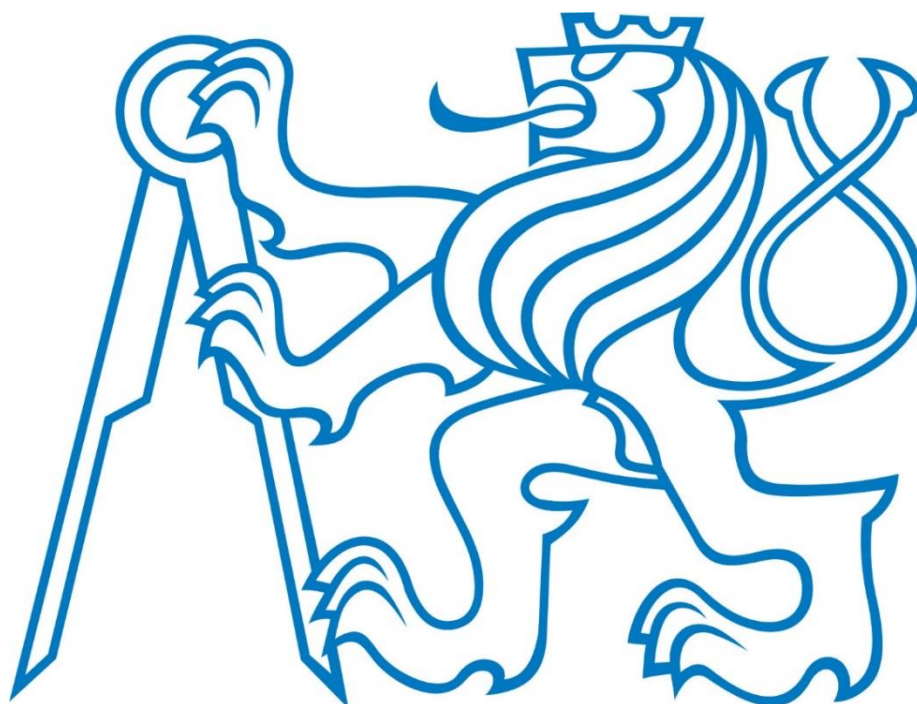


České vysoké učení technické  
Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce  
Obor: Aplikovaná elektrotechnika



Perspektivy elektrického pohonu automobilů

Prospects of electric vehicle drivetrain

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Oto Moravec

Vedoucí práce: Doc. Ing. Pavel Mindl, CSc.

Rok: 2017

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Moravec** Jméno: **Oto** Osobní číslo: **372295**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Perspektivy elektrického pohonu automobilů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Perspectives of Electric Drives for Vehicles**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši současného stavu pohonných systémů silničních vozidel.
- 2) Proveďte analýzu možných architektur elektrických pohonů silničních vozidel.
- 3) Proveďte rozvahu o výkonových nárocích na energetické sítě v souvislosti s rozvojem elektromobility.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Čeřovský, Z., Mindl, P.: Influence of Energy Production Technology on Electric Hybrid and Electric Vehicles. Příspěvek na konferenci EVER Monaco 2011  
[2] Kameš, J.: Alternativní pohony automobilů. BEN&#8211;technická literatura, Praha 2004  
[3] Vlk, F.: Alternativní pohony motorových vozidel. FVLK Brno 2004

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**doc. Ing. Pavel Mindl CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL**

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

Datum zadání bakalářské práce: **19.02.2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.5.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.06.2017**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

**26.5.2017**  
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne .....

.....

Oto Moravec

### **Poděkování**

Mé poděkování patří Doc. Ing. Pavlu Mindlovi, Csc. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval.

*Název práce:* Perspektivy elektrického pohonu automobilů

*Autor:* Oto Moravec

*Obor:* Aplikovaná elektrotechnika

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* Doc. Ing. Pavel Mindl, CSc., Katedra elektrických pohonů a trakce, Fakulta elektrotechnická, České vysoké učení technické v Praze

*Abstrakt:* Práce popisuje současnou situaci v automobilovém sektoru se zaměřením na elektrický pohon. Nejdříve diskutuje stav automobilového průmyslu a motivaci pro zavádění elektrických pohonů. Poté jsou probrány možné architektury vozidel a komponenty jejich pohonu. V poslední části se práce věnuje vlivu elektromobility na elektrickou infrastrukturu a snaží se nastínit směr budoucího vývoje.

*Klíčová slova:* elektromobil, pohon elektromobilu, alternativní paliva

*Title:* Prospects of electric vehicle drivetrain

*Author:* Oto Moravec

*Abstract:* The purpose of this study is to investigate present state of automotive sector with focus on electric machine drives. First it discusses current automotive industry and motivation to deploy electric machine drives. Vehicle drive architecture and its constituent parts are then described. The final part is dedicated to possible effects of electromobility on electrical grid and strives to outline the direction of future progress.

*Key words:* electric vehicle, electric vehicle drivetrain, alternative fuels

# Obsah

1. Úvod .....	7
2. Současný stav pohonných systémů silničních vozidel .....	9
3. Architektura pohonu .....	11
3.1. Podvozkové uspořádání .....	11
3.1.1. Vozidlo .....	11
3.1.2. Náprava .....	13
3.2. Hybridní pohony .....	16
3.2.1. Míra hybridizace .....	16
3.2.2. Uspořádání hybridního ústrojí .....	18
3.3. Čistě elektrické pohony .....	21
3.4. Elektrický motor .....	22
3.4.1. Stejnoseměrné komutátorové motory .....	22
3.4.2. Synchronní motor s rotorem s permanentními magnety .....	23
3.4.3. Asynchronní motor .....	25
3.5. Úložiště/zdroj energie .....	25
3.5.1. Setrvačnický .....	26
3.5.2. Superkapacitor .....	27
3.5.3. Elektrochemické akumulátory .....	28
3.5.4. Palivový článěk .....	29
3.5.5. Shrnutí .....	30
3.6. Dobíjení vozidel .....	31
3.6.1. Kontaktní .....	31
3.6.2. Bezkontaktní .....	32
4. Rozvaha o výkonových nárocích na energetické síť .....	34
5. Závěr .....	37
6. Reference .....	38
Seznam obrázků .....	39
Seznam tabulek .....	41

## 1. Úvod

Spalovací motor je v širokém měřítku užíván už více jak sto let. Jeho použití v automobilech umožnilo nebývalý rozvoj přepravy osob a zboží na regionální až mezinárodní úrovni. Jako palivo pro spalovací motor jsou používána převážně paliva na ropné bázi, ač nejsou jediná technicky vhodná. Ropa je velmi užitečná surovina s nepřebernými možnostmi využití, její užívání jako paliva ovšem není bezproblémové. Velká část světově významných nalezišť leží v politicky méně stabilních oblastech. To představuje riziko přerušovaných či nedostatečných dodávek a následných tzv. ropných krizí v západních ekonomikách. S rozvojem motorismu a průmyslu ale vyplynul na povrch možná ještě závažnější problém – zplodiny vznikající spalováním ropných paliv znečišťují ovzduší a vzhledem k množství těchto zplodin se jedná o problém celosvětových proporcí. Nehledě na to, jak čistě je palivo připraveno (vyrobeno) a jak dokonale je spáleno, nevyhnutelným produktem tohoto procesu bude vždy oxid uhličitý, který je většinou světové akademické obce identifikován jako hlavní činitel tzv. globálního oteplování, což je termín označující proces destabilizace nesmírně komplexního systému zemského klimatu.

Tento mnoha studii podložený jev tak přinutil vlády vyspělých států k tvorbě legislativních opatření týkajících se emisí oxidu uhličitého v dopravě a průmyslu. Za posledních 20 let tak došlo k výrazným zlepšením ekonomiky a ekologie provozu automobilu se spalovacím motorem, ovšem za cenu značného nárůstu komplexity celého pohonného ústrojí vozu a s tím související spolehlivosti a citlivosti na řádnou údržbu. Pokroky byly dosaženy v oblastech řízení motoru (řídící jednotky s vysokým výpočetním výkonem, citlivé senzory), přípravě zápalné směsi (vysokotlaké přímé vstřikování paliva), termodynamické účinnosti (přepřehování turbodmychadlem), úpravě zplodin spalovacího procesu (recirkulace výfukových plynů, katalyzátory, částicové filtry), parazitních ztrát v samotném motoru a transmisích, snížení valivého odporu pneumatik a dalších. Spalovací motor má zřejmě ještě další prostor pro vývoj, zásadní skok ve zvýšení jeho účinnosti již ale není v tuto chvíli pravděpodobný. Ultimátním krokem využití spalovacího motoru v automobilu je jeho hybridizace, tj. částečná elektrifikace pohonného ústrojí vozu. V takové formě je možné využívat spalovací motor jen selektivně a v pásmech jeho nejvyšší účinnosti. V kombinaci s rekuperací energie při zpomalování vozu je tak dosaženo maximálního možného zužitkování energie obsažené v palivu.

Další možností v ústupu od užívání ropných paliv ve spalovacím motoru je použití tzv. alternativních paliv. Jedná se o uhlovodíková paliva (stejně jako benzin a nafta), ovšem přírodního původu. Tato paliva lze získat zpracováním určitých zemědělských plodin. Tyto rostliny během svého růstu zabudují do své struktury uhlík získaný ze vzdušného oxidu uhličitého pomocí fotosyntézy. Když je takové palivo spáleno, dojde pouze k uvolnění uhlíku, který byl předtím ze vzduchu odebrán a bilance tak zůstává vyrovnaná. K vypěstování těchto plodin je ovšem potřeba orné půdy. Pokud by se mělo

vyrobit takové množství paliv na přírodní bázi, aby jimi bylo možné zcela či z velké části nahradit ropná paliva, potřeba orné půdy by byla tak velká, že by konkurovala potřebám potravinářského průmyslu a navyšovala tak ceny potravin. I životní prostředí by trpělo, kdyby za účelem co nejvyšších výnosů bylo používáno značné množství hnojiv a velké plochy by byly osazené jednou a tou samou kulturou. Tato paliva jsou tedy vhodná jen jako částečná náhrada ropných paliv.

Doposud popsaná řešení a metody jsou však pouze mezikrokem k opuštění ropy jako suroviny pro výrobu paliva automobilů. Plná elektrifikace vozidel je zjevně směr, kterým se současný trh, průmysl a společnost ubírají.



## 2. Současný stav pohonných systémů silničních vozidel

V současnosti má téměř každý významný výrobce v nabídce vůz s elektrickým nebo hybridním pohonem. Podíl čistě elektrických vozů (dále EV) v celkovém celosvětovém vozovém parku (tj. přes 1,2 mld. vozidel (1)) je v tuto chvíli zanedbatelný, nicméně podíl na trhu nových vozidel se pohybuje přibližně na úrovni 0,1 % a meziročně rostou počty prodaných EV o desítky procent. V krajních případech, ve státech s vysokým finančním zvýhodněním při nákupu elektrického vozu, dosáhly prodeje vysokých jednotek až nízkých desítek procent tržního podílu.

Jak již bylo naznačeno v předchozím odstavci, spalovací motor je stále využíván jako pohon naprosté většiny silničních vozidel – osobních, veřejné hromadné dopravy a nákladních. Pro tento druh pohonu jsou typicky používána paliva fosilního původu. Majoritu tvoří kapalná paliva na ropné bázi – benzin a motorová nafta, dále je užíván tzv. zkapalněný ropný plyn (zkratka LPG), neboli propan-butan.

Další skupinu paliv vhodných pro užití ve spalovacím motoru tvoří takzvaná alternativní paliva, tj. paliva jiného než fosilního původu. Rozšířenými zástupci této skupiny jsou etanol a stlačený zemní plyn (zkratka CNG). Tato paliva lze po nepříliš velkých úpravách používat v běžném zážehovém spalovacím motoru (totéž platí i pro LPG).

Tabulka 1 Energetická hustota paliv užívaných ve spalovacích motorech (2)

Palivo	Benzin	Nafta	LPG	CNG	Ethanol
Výhřevnost [MJ/kg]	42,1	41,8	46,4	50	22,2
Výhřevnost [kWh/kg]	11,7	11,6	12,9	13,9	6,2

Přibližně v druhé polovině devadesátých let 20. století začala být na trh uváděna vozidla, jejichž pohonný systém je částečně elektrifikován – většinu energie pro pohon vozu stále dodává spalovací motor. Pro tento typ pohonu se v moderní mluvě používá označení „hybridní pohon“, resp. „hybridní vůz“. Symbolem hybridních vozů se stal model Toyota Prius, uvedený na trh v roce 1997, v současnosti již ve své čtvrté generaci, se souhrnnými prodeji přesahujícími pět milionů jednotek. Počátek velkosériové produkce vozidel s čistě elektrickým pohonem nastal v roce 2010, s příchodem modelu Nissan Leaf. Souhrnné prodeje tohoto vozu v současnosti dosahují více než 250 tisíc jednotek, jedná se o světově nejrozšířenější elektromobil.

Kromě osobních vozidel pro koncového zákazníka jsou ekologicky šetrnější pohony zaváděny do vozových parků provozovatelů MHD. Vzhledem k užití těchto vozidel převážně v městské zástavbě je motivace pro jejich zavedení pochopitelná a výrazná. Na rozdíl od osobních automobilů, které musí sloužit k všeobecným účelům, rozsah činnosti vozidel hromadné dopravy je přesněji definován. Ideálním stavem je, pokud je technické řešení postavené dle potřeb daného projektu, v takovém případě jsou přínosy nejen ekologické a společenské, ale mohou být i ekonomického charakteru. Po

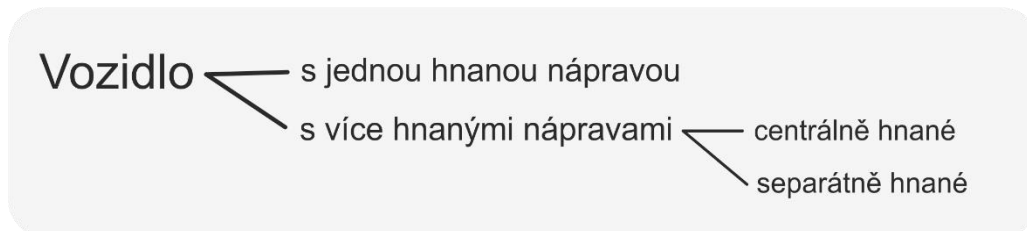
celém světě jsou tak alespoň do zkušebních provozů zaváděny autobusy různých hybridních koncepcí (diesel hybrid, ale i palivový článěk + superkapacitor + baterie) či variace čistě elektrických pohonů, jako průběžně dobíjené autobusy, autobusy dobíjené přes noc, parciální trolejbusy, které část trasy absolvují napájeny z troleje a část z akumulátoru, a další. Vlastnosti některých z těchto vozidel budou zmíněny v další části práce. I v České republice už probíhají projekty zavádění ekologicky šetrnějších vozidel MHD – např. v Ostravě, Třinci či Praze (3).

### 3. Architektura pohonu

#### 3.1. Podvozkové uspořádání

Následující popis architektur pohonného ústrojí platí pro nejběžnější formu dvoustopého vozidla – tedy vozidla s dvěma nápravami a sudým počtem kol. Po mírných úpravách jej lze aplikovat i na vozidla s větším počtem náprav (či menším, v případě tříkolových vozidel). Popis ústrojí v rámci samotné nápravy je použitelný na všechna dvoustopá kolová silniční vozidla.

##### 3.1.1. Vozidlo

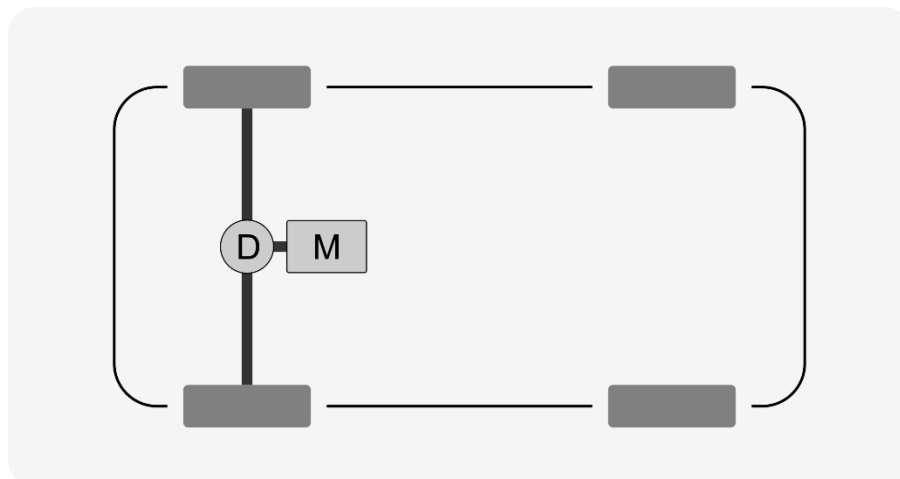


Nejpočetnější kategorii tvoří vozidla s pohonem jedné nápravy. Pro většinu provozních situací je tento typ pohonu dostačující. Jeho hlavní výhodou je jednoduchost a z ní vyplývající vlastnosti jako nižší hmotnost, nižší cena a vyšší spolehlivost ústrojí. Mezi zástupce této kategorie lze zařadit většinu současných vozidel, jmenovitě například Nissan Leaf, Toyota Prius, BMW i3, VW e-Golf, McLaren P1.

*Poznámka:*

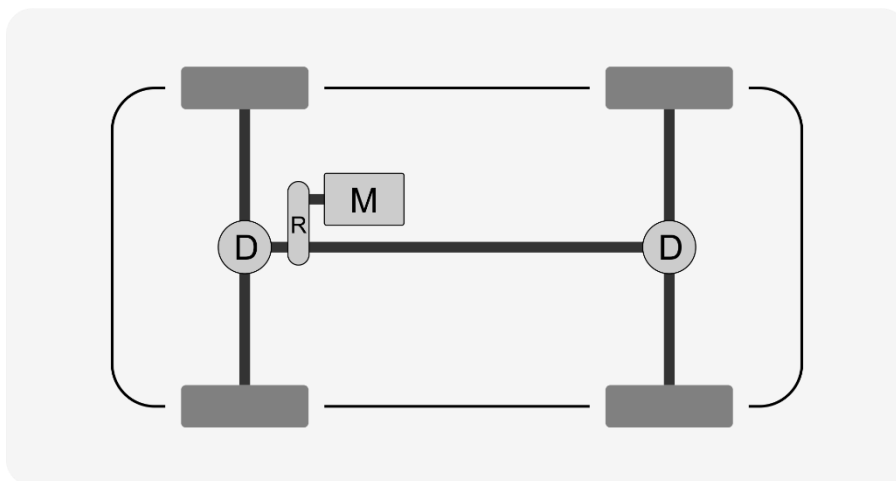
*Vysvětlivky pro následující sérii obrázků:*

- M* ... *obecný motor (motor jednoho typu či celé hybridní ústrojí)*
- D* ... *diferenciál (mechanický rozdělovač výkonu)*
- R* ... *rozvodovka (mechanický rozdělovač výkonu)*
- P* ... *převodovka (dělič/násobič točivého momentu)*

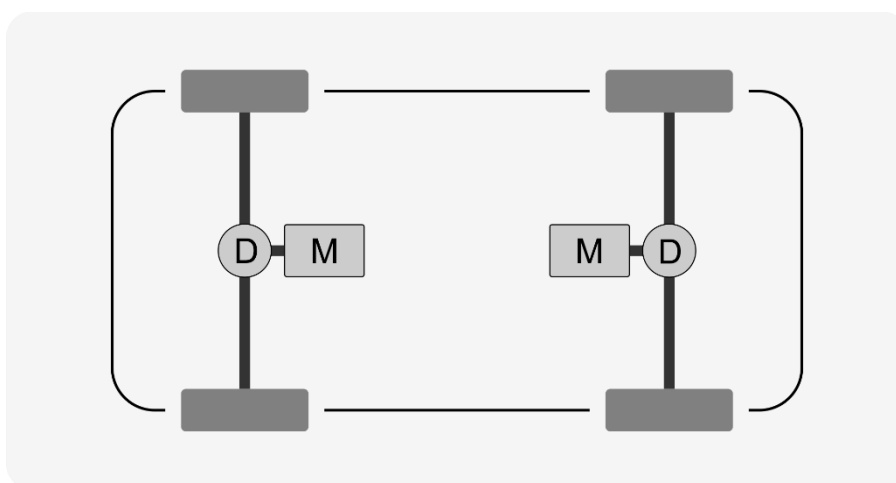


*Obrázek 1 Vozidlo s jednou poháněnou nápravou*

Další kategorii tvoří vozidla s pohonem více náprav. Kategorii lze dále rozdělit na vozidla s centrálním pohonem, či separátním, tedy zvlášť pro každou nápravu. Viz obrázky níže.



Obrázek 2 Vozidlo s dvěma poháněnými nápravami; s centrálním pohonem



Obrázek 3 Vozidlo se dvěma separátně poháněnými nápravami

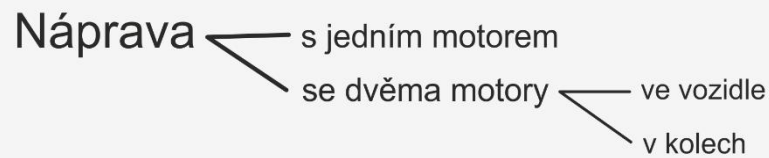
Konvenční vozidla se spalovacím motorem téměř výhradně patří do kategorie centrálního pohonu (dvumotorová koncepce se uplatnila pouze u některých závodních speciálů či jiných prototypových vozidel). Hnací síla je k nápravám dovedena mechanicky, pomocí rozvodovky a hnacích hřídelů.

V případě čistě elektrických vozidel se lze domnívat, že převládne architektura se zvlášť poháněnými nápravami. Umožní to nižší zástavbové rozměry elektromotoru (pro motory porovnatelného výkonu) a jeho další výhody, jako mnohem nižší nároky na výkonnost (a tedy velikost) chladicího systému, neexistující potřeba přívodu a odvodu pracovního plynu motoru a další. Elektrickým vozem koncepce separátního pohonu více náprav je například Tesla Model S ve verzi s pohonem všech kol.

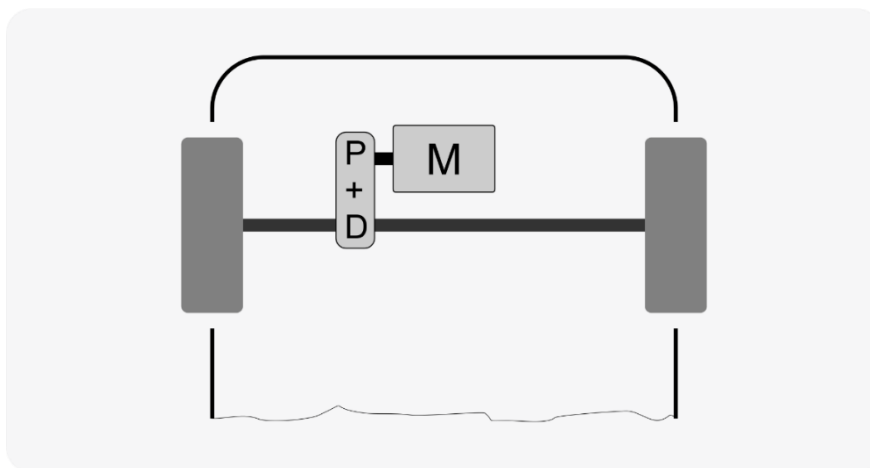
Hybridní vozy s pohonem více náprav lze najít v obou kategoriích – existují vozy s centrálním pohonem (např. hybridní verze vozů Porsche Cayenne a Panamera, Mercedes-Benz GLC a GLE) i vozy

se separátním pohonem náprav (např. Lexus RX 400h, Mitsubishi Outlander, BMW i8, BMW 225xe, Honda NSX, Porsche 918).

### 3.1.2. Náprava

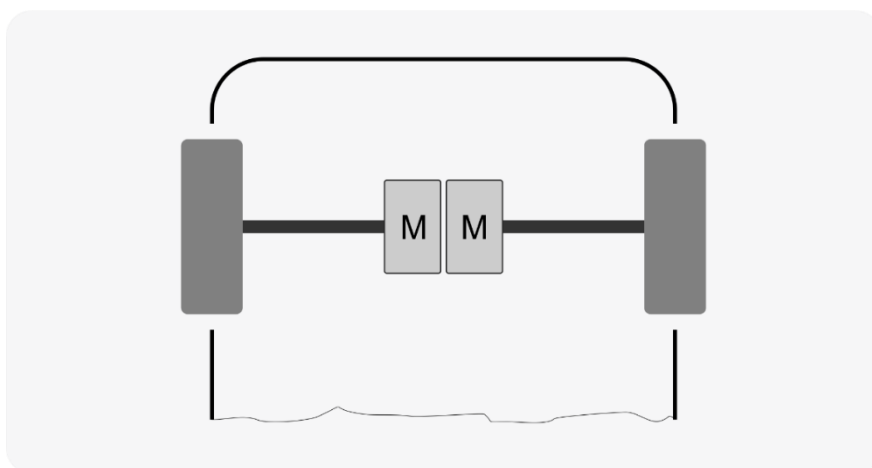


Nejběžnějším způsobem pohonu nápravy je jednomotorové provedení, kdy jsou obě kola poháněna skrze převodovku a mechanický diferenciál, který mezi ně samočinně rozděljuje hnací moment. Takovéto řešení se obvykle nachází v běžných vozidlech se spalovacím motorem, v hybridních ústrojích i ve výhradně elektrických vozech. Jeho hlavní předností je jednoduchost a nižší cena v porovnání se složitějšími systémy. Zástupci této kategorie jsou například Nissan Leaf, Toyota Prius a většina konvenčních vozů jako Škoda Fabia, VW Golf a další.



Obrázek 4 Jednomotorová náprava s mechanickým diferenciálem

Pokročilejším způsobem je pohon každého kola zvlášť. Tento způsob je v praxi ze zjevných důvodů proveditelný pouze u elektrického pohonu. Toto řešení, za cenu nárůstu complexity v elektrické části (dva motory, dva střídače, výpočetně náročnější systém), nabízí funkce jako aktivní řízení stáčitosti vozidla (rotace okolo jeho svislé osy), vyšší zástavbovou flexibilitu a potenciálně nižší hmotnost. Možným rizikem je bezpečnost takového systému – v případě poruchy může být ohrožena směrová stabilita vozidla. Vozy spadajícími do této kategorie jsou například Honda NSX (přední náprava) či autobus čínského výrobce BYD K9.



Obrázek 5 Dvumotorový pohon nápravy – každé kolo zvlášť

Dvumotorový systém nabízí možnost přesunout motory až do samotných kol vozidla. V tomto případě lze kolo pohánět přímo či skrze redukční (obvykle planetový) převod, za použití vysokootáčkového motoru s vyšší výkonovou hustotou. Konečnou možností je použití motoru s vnějším rotorem, který přímo unáší kolo vozidla. Jsou tak zcela eliminovány jakékoliv hřídele či převody a tím zvýšena účinnost pohonu.

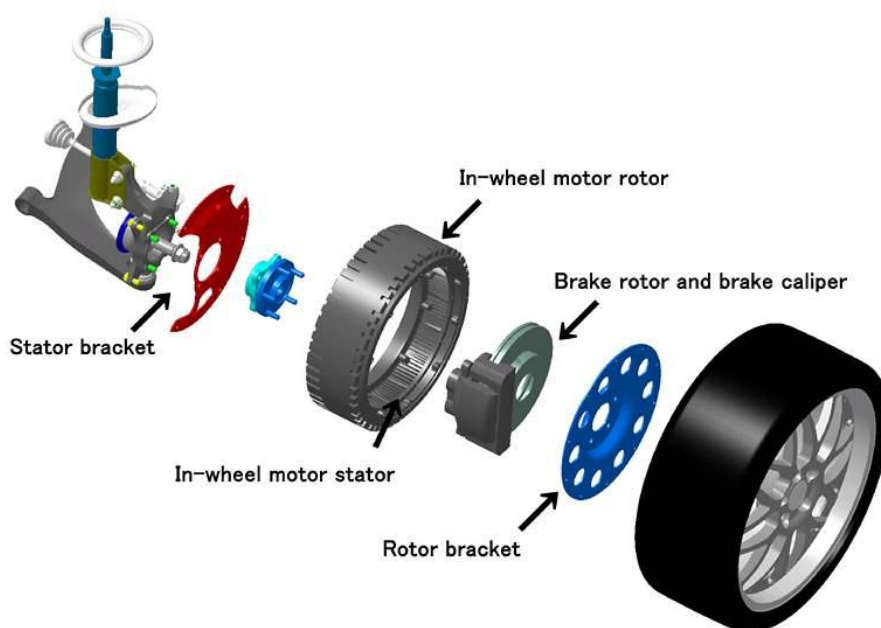
Neblahým efektem konfigurace s motorem umístěným v kole je vysoká neodpružená hmotnost. Tento fakt pravděpodobně brání v současnosti většímu rozšíření konstrukce tohoto druhu, nicméně neustálý vývoj a zlepšující se parametry motorů mohou do budoucna výrazně zvýšit atraktivitu tohoto řešení. V následující tabulce jsou uvedeny příklady vozidel s dvumotorovým pohonem nápravy, každé spadající do jiné podkategorie.

Tabulka 2 Přehled vozidel s dvumotorovou nápravou

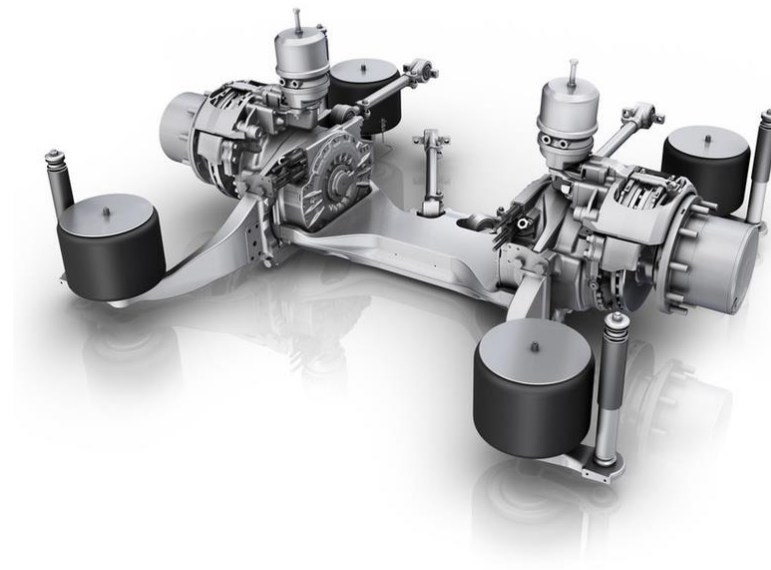
Vozidlo	Mitsubishi Colt MIEV	Mitsubishi Lancer MIEV	BYD K9 (autobus)	Honda NSX
Rok uvedení	2005	2005	2010	2016
Status	prototyp	prototyp	v produkci	v produkci
Motor	PMSM vnitřní rotor	PMSM vnější rotor	PMSM vnitřní rotor, převod	n/a vnitřní rotor, převod, spojka
Náprava	zadní	přední, zadní	zadní	přední
Umístění	vně paluby	vně paluby	vně paluby	na palubě
Pracovní napětí [V]	330	360	540	n/a
Převod	1:1	1:1	17,7:1	n/a
Max. výkon [kW]	20	50	90	27
Max. moment [Nm]	600	518	350	146
Max. otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]	1500	1500	7500	4000



Obrázek 6 Motor umístěný v těhlici vozu Mitsubishi Colt MIEV (4)



Obrázek 7 Nábojový motor s vnějším rotorem vozu Mitsubishi Lancer MIEV (4)



Obrázek 8 Zadní náprava autobusu BYD K9 se zavěšenými motory s redukčním převodem (5)

## 3.2. Hybridní pohony

Hybridní pohon v nejobecnějším slova smyslu znamená, že pohon vozu je zajišťován více než jedním druhem motoru. V praxi je užíván elektrický a spalovací motor. Za hybridizaci se ovšem považuje také stav, kdy energie pro pohon motoru je ve vozidle uložena či získávána více než jedním způsobem.

Hybridní pohony jsou klasifikovány ze dvou hledisek – tzv. míry hybridizace a uspořádání hybridního systému. Míra hybridizace uvádí poměr druhů energie užitých pro pohon vozidla.

### 3.2.1. Míra hybridizace

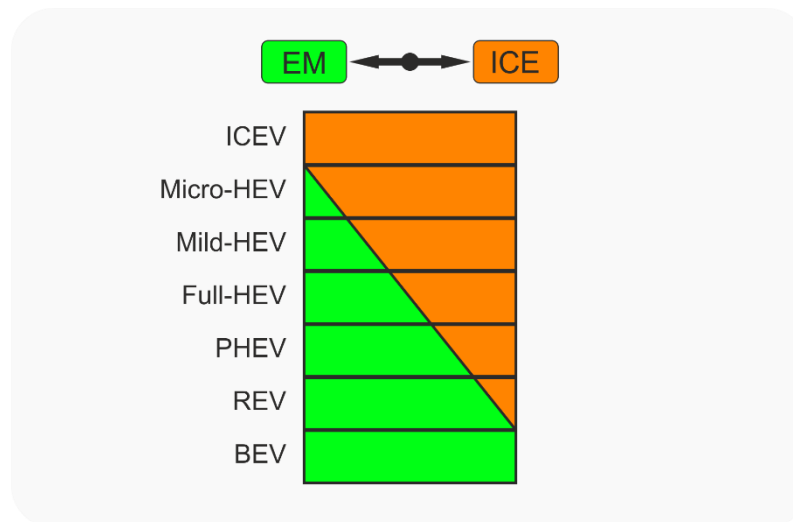
Graficky je míra hybridizace znázorněna následujícím obrázkem, navíc zahrnujícím konvenční vozidlo se spalovacím motorem a čistě elektrické vozidlo.

*Poznámka:*

*Popis zkratk použitých v obrázku:*

<i>EM</i>	...	<i>Electric Motor</i>
<i>ICE</i>	...	<i>Internal Combustion Engine</i>
<i>ICEV</i>	...	<i>Internal Combustion Engine Vehicle</i>
<i>HEV</i>	...	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
<i>PHEV</i>	...	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicle</i>
<i>REV</i>	...	<i>Range extended Electric Vehicle</i>
<i>BEV</i>	...	<i>Battery Electric Vehicle</i>





Obrázek 9 Grafické znázornění skladby trakční energie vozidel s různou koncepcí pohonu

V konstrukci tzv. mikrohybridu jsou běžný startér a alternátor sloučeny do jednoho stroje. Vzniká tak ISG neboli integrovaný startér-generátor. Jeho funkcí je zajišťovat rychlý rozběh spalovacího motoru v systému stop-start a získávat zpět část pohybové energie vozu při zpomalování. Jako zásobník energie slouží olověný akumulátor vyšší kapacity, než je pro danou kubaturu spalovacího motoru obvyklé. ISG se nijak nepodílí na pohonu vozu.

Tzv. mírný či částečný hybrid je vozidlo, ve kterém většinu hnací síly poskytuje spalovací motor a elektrický motor je připojován pouze ve vhodných okamžicích. Jeho výkon obvykle dosahuje vysokých jednotek až nízkých desítek kW. Při zpomalování vozu umožňuje rekuperovat více energie ve srovnání s mikrohybridem, standardní třecí brzdy tak mohou být dimenzovány na nižší brzdny výkon. Trakční baterie je obvykle tvořena nikl-metal hydridovými či lithiovými články a její kapacita se pohybuje od desetin do nízkých jednotek kWh.

Konstrukce plně hybridního vozu umožňuje použít k pohonu pouze elektrický či spalovací motor a nebo jejich kombinaci. Elektrický trakční motor dosahuje obvykle výkonu v řádu desítek až nízkých stovek kW. Trakční baterie je obvykle tvořena NiMH či Li-ion články a její kapacita se pohybuje v jednotkách až nízkých desítkách kWh.

PHEV, často také označován jako Plug-in hybrid, je plně hybridní vozidlo, jehož trakční baterii lze dobíjet z elektrické sítě. Tuto funkci zajišťuje palubní „nabíječka“, tedy řízený usměrňovač napětí, nebo tzv. rychlonabíjecí stanice, jejímž výstupem je stejnosměrné napětí na úrovni odpovídající trakční baterii vozu. Jelikož se u připojitelných hybridních vozů předpokládá vyšší míra využití elektrického pohonu, akumulátor má vyšší kapacitu než v běžném plněm hybridu. Obvyklým minimem jsou vyšší jednotky kWh.

Hodnoty uvedené v předchozích odstavcích shrnuje následující tabulka. Hodnoty odpovídají osobním vozům.

Poznámka: Písmena „N“ či „V“ před číselným údajem znamenají „Nízké“ či „Vysoké“.

Tabulka 3 Výkonové a energetické rozsahy hybridních architektur

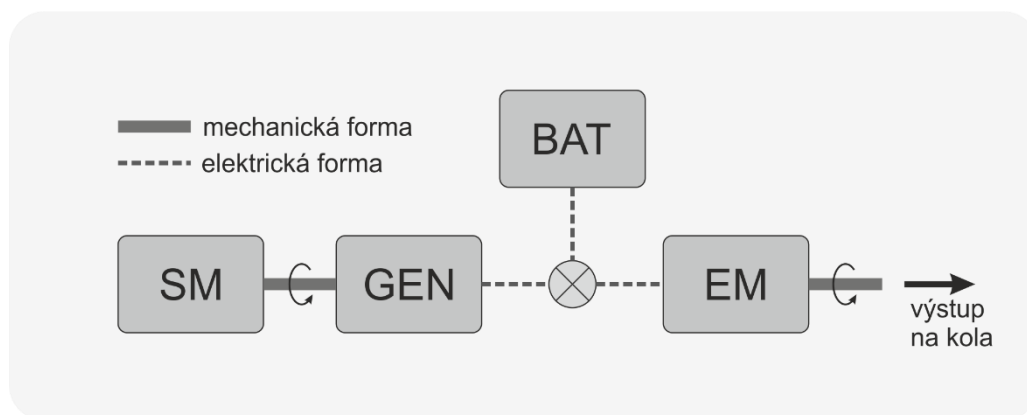
Míra hybridizace	Výkon elektrického trakčního motoru / generátoru $P_E$ [kW]	Kapacita trakční baterie $E_B$ [kWh]
Micro-HEV	$N10^0$	$V10^{-1}$
Mild-HEV	$V10^0 \sim N10^1$	$V10^{-1} \sim N10^0$
Full-HEV	$10^1 \sim N10^2$	$10^0 \sim N10^1$
PHEV	$10^1 \sim N10^2$	$\geq V10^0$

Vozidlo s označením REV je z hlediska pohonného ústrojí čistě elektrické vozidlo. Na palubě má však takzvaný Range Extender, tedy zařízení k prodloužení dojezdové vzdálenosti. Tvoří ho souprava malého spalovacího motoru a elektrického generátoru o podstatně nižším výkonu, než jakého dosahuje trakční elektromotor.

### 3.2.2. Uspořádání hybridního ústrojí



V případě sériového hybridního systému slouží k pohonu vozidla výhradně elektrický motor. Výhodou tohoto systému je mechanická jednoduchost a především možnost provozovat spalovací motor v pásmu jeho nejvyšší účinnosti. Sériový systém je výhodný v městském provozu s častým zastavováním a rozjížděním, kdy je konvenční vozidlo se spalovacím motorem velmi neefektivní (účinnost hluboko pod 10 %). Topologie pohonu sériového hybridu a je shodná s elektrickým vozidlem s prodlouženým dojezdem (REV).



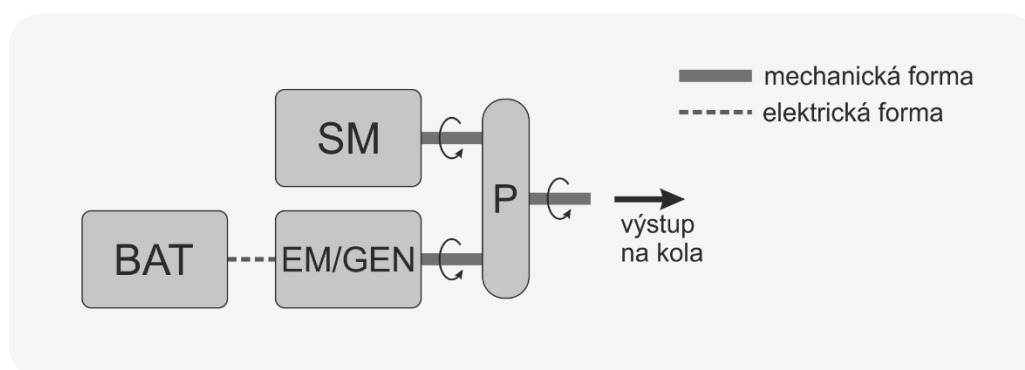
Obrázek 10 Blokové schéma sériového hybridního pohonu

Rozdíl mezi REV a sériovým hybridem je v poměru generované a ukládané energie. Sériový hybrid má zpravidla menší baterii, ale výkonnější soustavu spalovacího motoru a generátoru. V případě vyčerpání baterie je stále schopen nabídnout jízdní dynamiku porovnatelnou s čistě elektrickým režimem provozu. V praxi se výkon elektrického generátoru pohybuje v rozmezí přibližně 50 až 75 % maximálního výkonu trakčního motoru. Vozidlo typu REV dosahuje v tomto ohledu hodnoty přibližně 20 %. Zástupců této kategorie není mezi silničními vozidly příliš, u osobních vozů i vozidel MHD je tato koncepce uplatněna zřídka. Příklady jsou Chevrolet Volt / Opel Ampera, Fisker Karma, BMW i3 REX a městský autobus společnosti Alexander Dennis s pohonným ústrojím od BAE Systems.

Tabulka 4 Vozidla se sériovou hybridní konfigurací

Vozidlo	Výkon trakčního elektrického motoru [kW]	Výkon elektrického generátoru [kW]	Výkon spalovacího motoru [kW]	Kapacita trakčního akumulátoru [kWh]
Chevrolet Volt	111	55	63	16
BMW i3 REX	125	n/a	25	22
Fisker Karma	240	175	191	20

Paralelní hybridní ústrojí je schopné k pohonu použít elektrický či spalovací motor, podle aktuální výhodnosti. V mimoměstském a hlavně dálničním provozu je tato koncepce účinnější než sériový systém, protože zde neprobíhá několikanásobná konverze energie (spalovací motor – generátor – měnič – elektromotor). Provozu v čistě elektrickém režimu je schopen pouze takzvaný plný paralelní hybrid. Částečný hybrid tuto funkci neposkytuje, jeho konstrukce je ovšem nejjednodušší a tedy nejlevnější ze všech druhů hybridních ústrojí. Do běžného uspořádání spalovacího motoru a vícestupňové převodovky (libovolného typu) je navíc zařazen pouze jeden elektromotor, často na jedné hřídeli se spalovacím motorem (v opačném případě je použit řemen či řetěz). Plně hybridní systém již vyžaduje zařízení pro rozpojení elektrického a spalovacího motoru, v praxi tuto funkci vykonává elektronicky ovládaná spojka. Elektromotor je možné umístit až na výstup z převodovky. Účinnost pohonu v elektrickém režimu se tím zlepšuje, nicméně elektrický motor pak musí být řádně dimenzován nejen pro rozjezd vozidla (vysoký moment), ale také pro vysokorychlostní provoz.

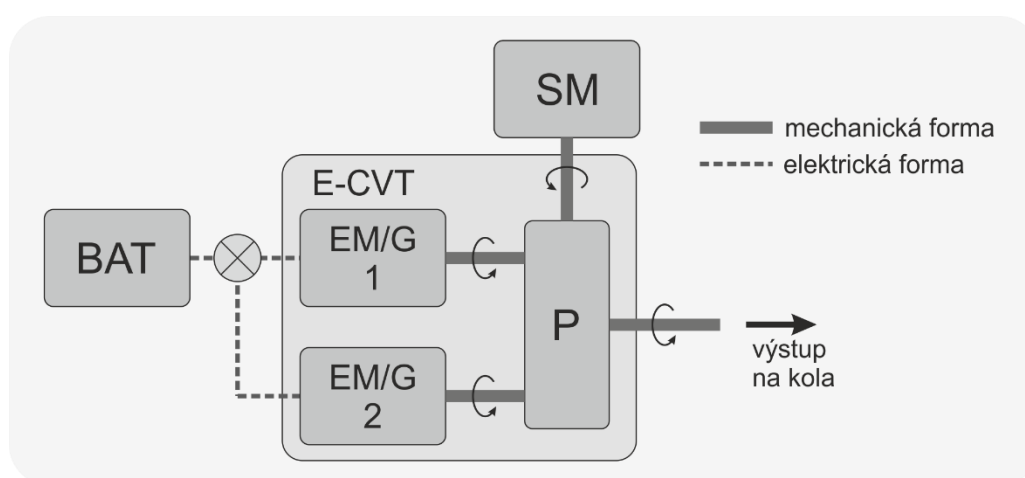


Obrázek 11 Blokové schéma paralelního hybridního pohonu

Tabulka 5 Přehled vozidel s paralelním hybridním pohonem

Vozidlo	Výkon spalovacího motoru [kW]	Výkon elektrického motoru [kW]	Nejvyšší výkon trakční soustavy [kW]	Kapacita trakční baterie [kWh]
VW Golf GTE	110	75	150	8,8
Honda Insight	63	10	73	0,6
Peugeot 508 RXH	120	27	147	1,1
BMW 530e	135	70	184	9,4

Sério-paralelní hybridní systém kombinuje výhody obou systémů v zájmu co nejvyšší účinnosti v širokém spektru provozních režimů, za cenu vysoké komplexity celého ústrojí.



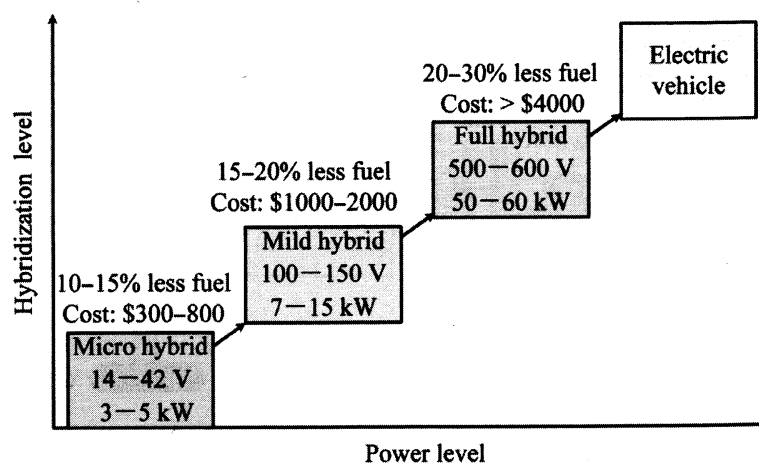
Obrázek 12 Blokové schéma sério-paralelního hybridního pohonu

Systém je tvořen třemi motory a planetovou převodovkou, která zajišťuje jejich vzájemné mechanické propojení. Jeden motor je spalovací, další dva elektrické, schopné pracovat i v generátorickém režimu. Soustava těchto dvou elektromotorů a planetového převodu je často nazývána jako E-CVT, tedy elektronická převodovka se spojitě proměnným převodem. Existuje více verzí tohoto zařízení, některé obsahují ještě další planetové převody či spojky a jsou tak schopny poskytnout širší pracovní rozsah (vyšší míra optimalizace pro různé jízdní režimy – např. město, dálnice apod.) Systém dokáže v městském provozu dosáhnout účinnosti sériového hybridu a mimoměstském se vyrovná paralelnímu ústrojí.

Tabulka 6 Přehled vozidel se sério-paralelním hybridním pohonem

Vozidlo	Výkon spalovacího motoru [kW]	Výkon elektrického motoru [kW]	Nejvyšší výkon trakční soustavy [kW]	Kapacita trakční baterie [kWh]
Toyota Prius PHEV	71	68	90	8,8
Mitsubishi Outlander	89	2 x 60	149	12
Ford Fusion Energi	105	88	145	7,6
Honda Accord PHEV	102	124	146	6,7

Následující ilustrace popisuje ekonomické náklady na hybridní pohon na straně výrobce.



Obrázek 13 Ekonomická náročnost výroby hybridního ústrojí (6)

### 3.3. Čistě elektrické pohony

Obvyklá konfigurace u produkčních vozů je jednomotorová, s pohonem jedné nápravy. Elektromotor je doplněn redukčním převodem, pohání kola přes diferenciál. Výjimku v současnosti tvoří vozy Tesla Model S a Model X s elektrickým pohonem všech kol využívajícím jednoho motoru pro každou nápravu.

Tabulka 7 Přehled produkčních elektrických vozidel

Vozidlo	Výkon trakčního motoru [kW]	Druh trakčního motoru	Kapacita baterie [kWh]	Druh baterie	Spotřeba [kWh/100km]	Dojezd [km]
Nissan Leaf	80	PMSM	24	Li-ion	15	200
BMW i3	125	PMSM	22	Li-ion	13,5	190
Renault Zoe	65	SM	22	Li-ion	14,6	240
VW e-Golf	85	PMSM	24,2	Li-ion	12,7	190
Tesla Model S 70D	239	ASM	70	Li-ion	16	375
Tesla Model X 90D	2 x 193	ASM	90	Li-ion	23	>400
Škoda Perun HE 26BB (autobus)	160	ASM	222	Li-Pol	130	150
SOR EBN10,5 (autobus)	120	ASM	200	Li-ion	89	250 (prázdný)
BYD K9 (autobus)	2 x 90	PMSM	324	Li-ion	109	>250

*Poznámka: Dojezd ne vždy odpovídá uváděné spotřebě a kapacitě baterie. Zatímco spotřeba je obvykle u osobních vozů normovaná podle odpovídajícího jízdního cyklu (NEDC, EPA, JC08), dojezd je údaj uváděný výrobcem dle jeho měření. Může se lišit například kvůli odlišné úrovni nabití a vybití baterie, tj. její efektivní (oproti nominální) kapacitě.*

### 3.4. Elektrický motor

V konstrukci současných vozů převládají dva druhy konstrukce elektrického motoru, synchronní motor s permanentními magnety v rotoru a asynchronní motor. Vlastnosti těchto a ještě dalších shrnuje následující tabulka.

Tabulka 8 Porovnání trakčních elektrických motorů (7)

Motor	Cena	Účinnost	Hmotnost	Rozsah $P_{konst}$	Přetížitel-nost	Spolehli-vost	Stav vývoje
Stejnoseměrný	10	7	6	10	10	7	10
Asynchronní	8	8	6	9	10	9	9
Synchronní	8	10	7	10	10	9	8
Synchron. perm. buzení	7	10	8	8	10	10	7
Přepínatelný reluktantní	9	6	7	4	10	9	5
Magnetický (M-M)	8	10	10	8	9	10	8

#### 3.4.1. Stejnoseměrné komutátorové motory

Ač byly v závislé trakci vyvíjeny a používány po mnoho desetiletí, nesplňují nároky pro použití v elektrifikovaných silničních vozech. Jedním z těchto nároků je bezúdržbovost, což vylučuje použití

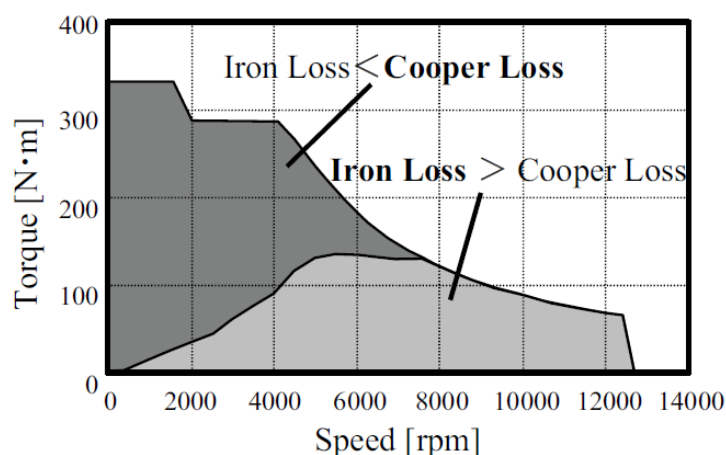
komutátorů a sběracích kroužků. Dále je nutný vyšší měrný výkon a výkonová hustota, protože na zástavbové rozměry pohonné jednotky osobního automobilu jsou v tomto ohledu kladeny vyšší nároky. V neposlední řadě je třeba maximalizovat účinnost pohonu, protože energie uložená v baterii vozu je omezená.

Mezi výhody stejnosměrných motorů patří technická vyspělost, cena a jednoduché řízení otáčivé rychlosti.

### 3.4.2. Synchronní motor s rotorem s permanentními magnety

V současnosti preferovaná konstrukce. Výhody i nevýhody motoru plynou z užití magnetů tvořených prvky vzácných zemin. Hlavními přednostmi synchronního motoru s permanentními magnety je účinnost (přes 95 %) a měrný výkon (i přes 4 kW/kg), nedostatkem je vysoká cena a teplotní omezení.

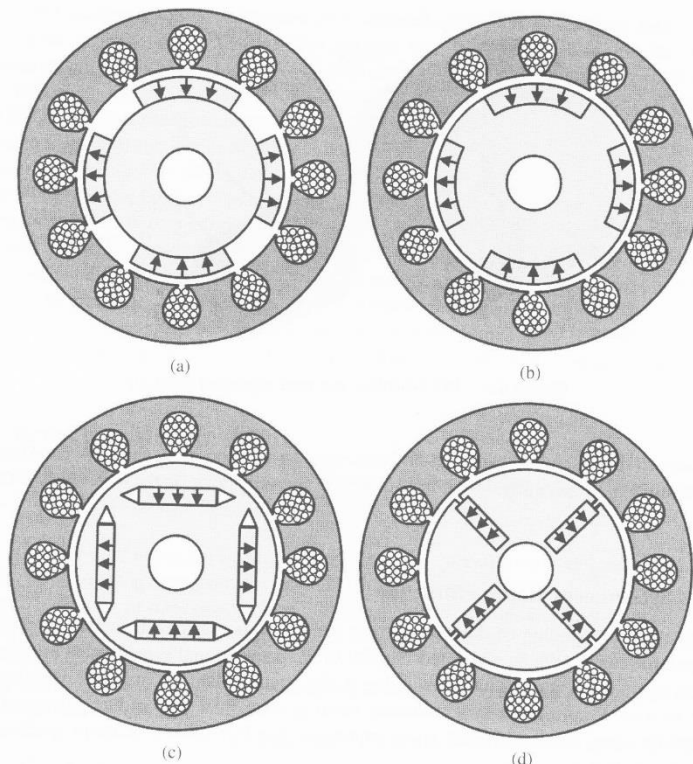
Ztráty vznikají převážně ve vodičích statorového vinutí (ztráty v mědi) a v magnetickém obvodu statoru (ztráty v železe). Teplo je ze statoru odváděno chladicí kapalinou.



Obrázek 14 Distribuce ztrát v motoru ústrojí Toyota Hybrid Systém (8)

Statorové vinutí je zpravidla třífázové, často ve čtyřpólové konfiguraci. Konstrukce vinutí se často liší podle technických a ekonomických požadavků, u motorů malé axiální délky a většího průměru bývá použito soustředné koncentrované vinutí, množství vodičů v čelech stroje je tak výrazně sníženo. Magnetický obvod je složen z izolovaných plechů z elektrotechnické oceli.

Rotor je také složen z elektrotechnických plechů, důvodem jsou technologické požadavky – výrobní náročnost a tedy cena. Magnetický tok v rotoru je konstantní, tudíž v něm nevznikají vířivé proudy. Rotory se liší tvarem a umístěním permanentních magnetů. Základním rozdělením je povrchová či vnitřní montáž. Vnitřní montáž je preferovaná, poskytuje vyšší mechanickou integritu rotoru a použité magnety jsou ploché a tedy snáze obrobitelné. Vnitřní montáž dále umožňuje několik způsobů uložení magnetů, každý se specifickými výhodami.



Obrázek 15 Přehled možných uspořádání magnetů v rotoru (6)

Existují různé materiály magnetů, v současnosti nejpoužívanějším je neodym-železo-bor (Nd-Fe-B). Má velmi dobré magnetické vlastnosti (remanentní indukce, koercivita), ale poměrně nízkou Curieovu teplotu, při které magnet své vlastnosti ztratí. Teplotně mnohem odolnější je magnet ze samaria-kobaltu (Sm-Co), má i porovnatelné magnetické vlastnosti, nicméně je výrazně dražší. Zmíněné vlastnosti magnetů shrnuje následující tabulka.

Tabulka 9 Srovnání vlastností permanentních magnetů (6)

	Ferrite	Alnico	Sm-Co	Nd-Fe-B
Remanence, $B_r$ (T)	0.43	1.25	1.21	1.47
Coercivity, $H_c$ (kA/m)	330	51	796	820
Energy product, $(BH)_{\max}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	35	44	271	422
Temperature coefficient of $B_r$ (%/°C)	-0.18	-0.02	-0.03	-0.11
Temperature coefficient of $H_c$ (%/°C)	0.2	0.01	-0.22	-0.65
Curie temperature, $T_c$ (°C)	450	860	825	345

Třífázové vinutí napájené harmonickým napětím tvoří uvnitř motoru otáčivé magnetické pole. Pole rotoru, buzené permanentními magnety, se k otáčivému poli přimkne a je nuceno se otáčet stejnou rychlostí, tedy synchronně.

Střídač napájející motor je obvykle řízený můstkový (třífázový), se spínacími součástkami vhodného typu (nejčastěji IGBT). Požadavkem je schopnost řídit výstupní frekvenci i amplitudu, spínací pulzy střídače jsou tedy šířkově modulované.



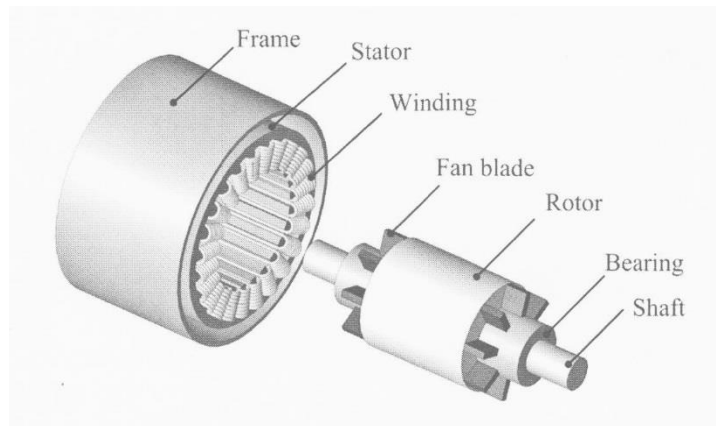
Strategií řízení motoru existuje několik. Řídící metoda musí být schopna poskytnout dostatečnou dynamiku a přesnost v rozsahu otáček od nulových po maximální.

- Vektorově orientovaná metoda – rozkládá vektor statorového proudu na tokotvornou a momentotvornou složku. Podle způsobu určení polohy rotujících os systému se dělí na přímou a nepřímou.
- Přímé řízení momentu – je regulován přímo výstupní moment motoru a pohyb prostorového magnetického toku statoru.

### 3.4.3. Asynchronní motor

Pohony s asynchronními motory jsou schopny dosáhnout účinnosti přes 90 %. Jsou levnější než motory s permanentními magnety, také robustnější a jednodušší, ale s nižším měrným výkonem a momentem.

Stator má zpravidla třífázové vinutí, většinou více než jeden pól pár na fázi. Rotor je kompaktní, složený z elektrotechnických plechů. Rotorové vinutí tvoří klec, u moderního motoru měděná, dříve hliníková.



Obrázek 16 Konstrukční uspořádání asynchronního motoru s klecovou kotvou (6)

Točivé magnetické pole je vytvořené stejně jako u synchronního motoru, napájením třífázového statorového vinutí. Toto pole indukuje ve vinutí rotoru napětí a následné proudy vytvoří rotorové magnetické pole. Interakce pole rotoru a statoru tvoří moment na výstupní hřídeli motoru. Statorové pole se musí vůči rotoru pohybovat, jinak neprobíhá indukce napětí v rotoru. Rozdíl otáčivé rychlosti rotoru a statorového magnetického pole je charakteristickým znakem asynchronního motoru a je nazýván skluz.

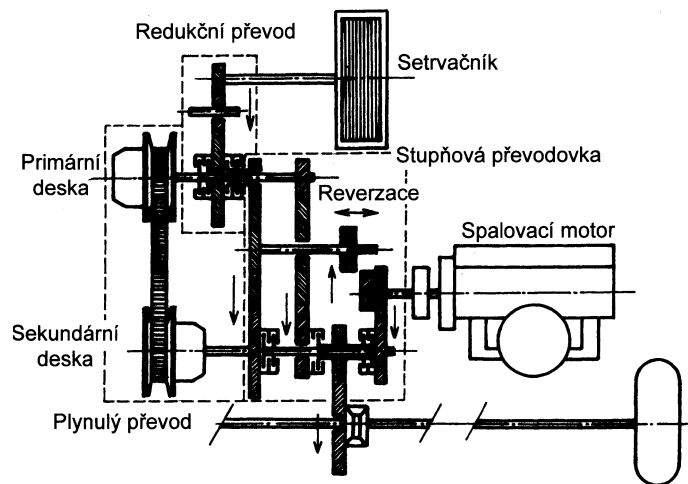
### 3.5. Úložiště/zdroj energie

Z hlediska mobilních pohonných systémů patří mezi nejdůležitější parametry měrná energie (Wh/kg příp. kJ/kg), měrný výkon (kW/kg), energetická hustota (kJ/l (litr) či Wh/l) a výkonová hustota

(kW/l). Pro praktické konstrukce je pochopitelně důležitá životnost (obvykle v počtu celých cyklů) a jednotková cena, což je částka vztažená na jednotku některého z parametrů (např. USD/kWh).

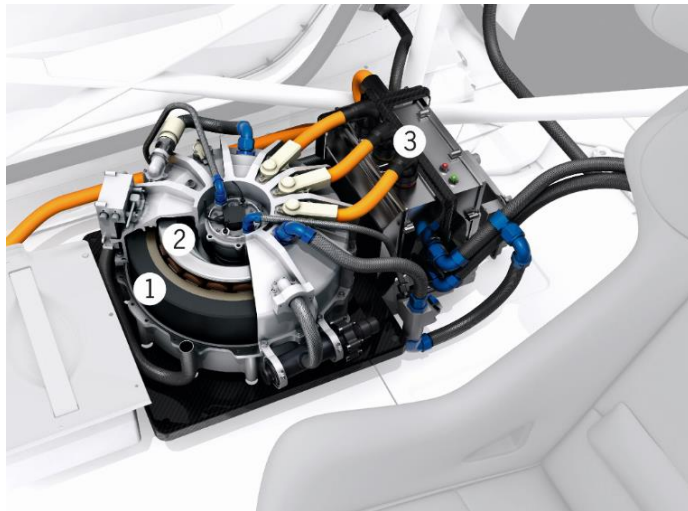
### 3.5.1. Setrvačnick

Pravděpodobně nejstarší v praxi používané zařízení pro ukládání energie v mechanické formě. V základní podobě je energie ukládána a odebírána čistě mechanicky, přes převodovku spojující setrvačnick s koly (a dalšími částmi pohonného ústrojí). Tyto systémy, ač postupně vyvinuty na vysokou úroveň (např. setrvačnickový hybridní systém s devítistupňovou převodovkou vyvinutý Technickou univerzitou v Eindhovenu) se v praxi neuchytily.



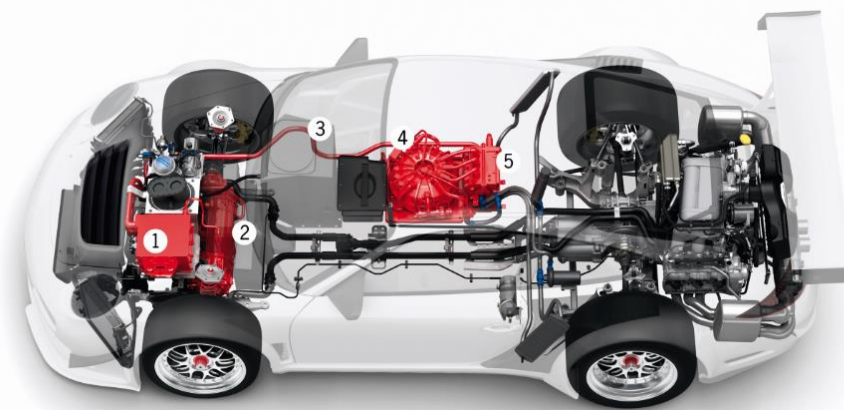
Obrázek 17 Mechanický hybridní systém se setrvačnickem (7)

Modernější reinkarnací této myšlenky je setrvačnick kombinovaný s elektrickým motorem/generátorem. Přesněji, setrvačnickem je samotný rotor elektrického stroje. Jeden z nejvyspělejších a hlavně v praxi odzkoušených systémů vyvinula společnost Williams Advanced Engineering, deriváty tohoto systému byly s úspěchy využity v motorsportu (Formule 1, vytrvalostní závodní vozy třídy GT (Porsche) a LMP (Audi)) a městských hybridních autobusech v Londýně. Systém Porsche dokáže uložit 200 Wh energie, výstupní výkon je přibližně 120 kW. Průměr setrvačnicku činí přibližně 40 cm a maximální otáčky dosahují 40 000 / min. Udávaná životnost systému je více než jeden milion cyklů (9).



1. Rotor
2. Stator
3. Power electronics

Obrázek 18 Ilustrace setrvačnickového systému vozu Porsche (10)



1. Power electronics
2. Portal shaft with two electric motors
3. High-voltage cable
4. Electrical flywheel battery
5. Power electronics

Obrázek 19 Prostorové uspořádání vozu Porsche s hybridním setrvačnickovým pohonem (10)

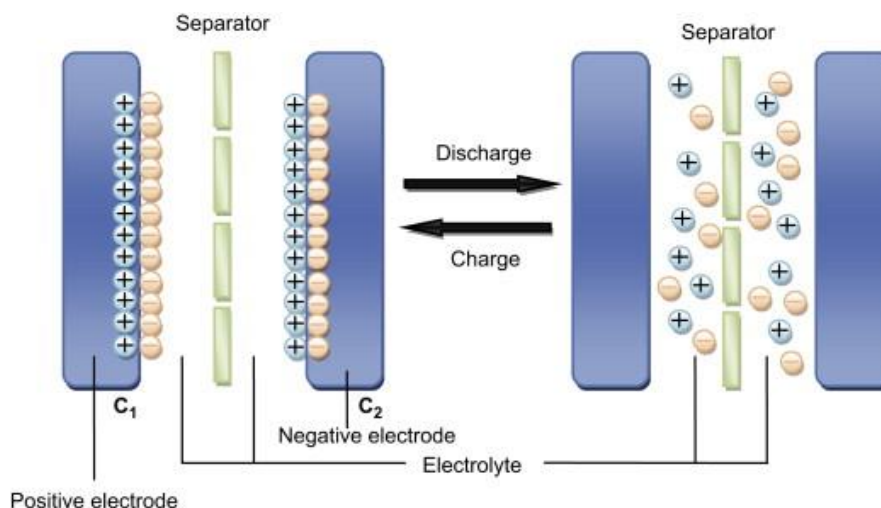
Úskalími v konstrukci setrvačnicků jsou bezpečnost, parazitní ztráty a, v případě mobilní zástavby, vliv na jízdní vlastnosti vozu. Bezpečnost je výrazně zvýšena použitím kompozitních materiálů v konstrukci rotoru. Parazitní ztráty jsou sníženy použitím magnetických ložisek a vyčerpáním skříně setrvačnicku (vakuum hlubší než 1 kPa). Vliv na jízdní vlastnosti vozidla lze snížit či eliminovat vhodným umístěním a orientací setrvačnicku.

I přes tyto pokroky je současné užití setrvačnickového akumulátoru omezené. Důvody mohou být zástavbová omezení, bezpečnostní obavy, cena či obecný trend ústupu od mechanických řešení.

### 3.5.2. Superkapacitor

Takzvaný superkapacitor je vysokoenergetický kondenzátor o kapacitě i přes 1000 F. Ukládá tedy energii v elektrostatické podobě. Superkapacitor pro trakční účely dosahuje měrného výkonu v řádu tisíců W/kg, což je o dva řády výše, než dosahují současné trakční baterie. Uložená energie obvykle nepřesahuje jednotky kWh. Trakční kondenzátor je obvykle elektrolytického typu s tekutým nebo

gelovým elektrolytem. Elektrody tvoří porézní uhlík (měrný povrch více než 2000 m<sup>2</sup>/g). Životnost je přes milion cyklů. Obvykle je využíván jako jeden ze zdrojů energie v hybridním systému (TriHyBus, ČR, energie 1 kWh), existují ale i vozidla poháněná výhradně ze superkapacitoru (Sinautec Ultracap Bus, Šanghaj, energie 5,9 kWh).



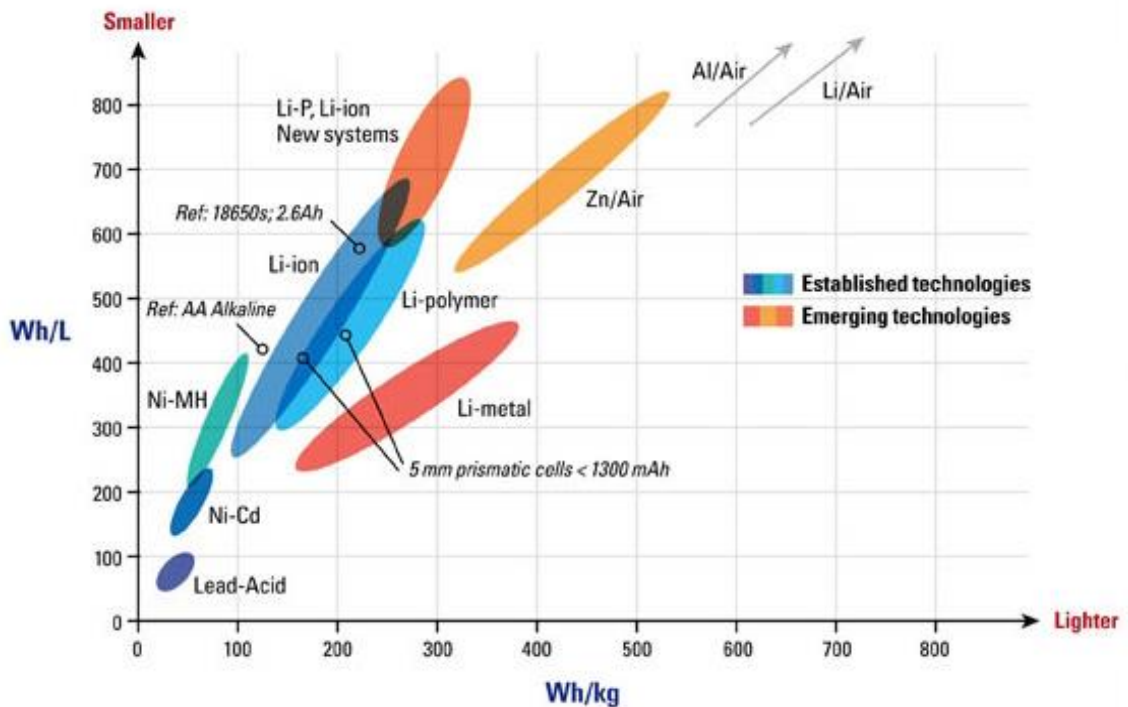
Obrázek 20 Znárodnění konstrukce a principu superkapacitoru (11)

### 3.5.3. Elektrochemické akumulátory

Hodnoty měrné energie a výkonu dosáhly úrovně, při které je možno zabudovat akumulátor dostatečné kapacity do osobního silničního vozidla, aniž by se výrazně zvýšila jeho hmotnost, vnější rozměry či byl omezen prostor pro posádku. Ekonomická nákladnost těchto moderních akumulátorů je ovšem značná, což zatím brání rozšíření této technologie do nižších vrstev automobilového trhu. Vývoj v oblasti baterií je velmi čilý a prognózy příznivé. Podle předpovědí (12) by se cena za bateriový svazek mohla v roce 2020 dostat až na úroveň 125 USD/kWh, zatímco dnes činí přibližně 250-300 USD/kWh.

Tabulka 10 Porovnání parametrů elektrochemických článků (7)

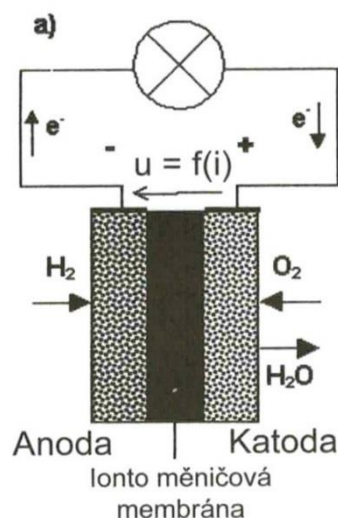
Typ baterie	Hustota energie		Výkonová hustota		Životnost		Cena
	Wh/kg	Wh/l	W/kg	W/l	cyklů	let	Euro/kW
olovo	30-50	70-120	150-400	350-1000	50-1000	3-5	100-150
nikl-kadmium	40-60	80-130	80-175	180-350	> 2000	3-10*	225*-350
nikl-metalhydrid	60-80	150-200	200-300	400-500	500-1000	5-10*	225*-300
sodík-niklchlorid	85-100	150-175	155	255	800-100	5-10*	225*-300
lithium-iontová	90-120	160-200	300	300	1000	5-10*	275*
lithium-polymer	150	220	300	450	< 1000	-	< 225*
zinek-vzduch	100-220	120-250	100	120	-	-	60*
cílové hodnoty	80-200	135-300	75-200	250-600	600-1000	5-10	90-135



Obrázek 21 Grafické znázornění parametrů elektrochemických článků (13)

### 3.5.4. Palivový článek

Alternativu dobíjecím elektrochemickým zdrojům nabízí palivový článek. Akumulátory jsou zároveň zásobníky a měniče energie, palivový článek je pouze měničem, potřebuje tak ještě přívod a zásobník paliva, aby mohl generovat elektrický proud. Základem konstrukce palivového článku jsou dvě elektrody a elektrolyt. Palivo je přiváděno na anodu, kde oxiduje a zbavuje se elektronu, výsledný kladný iont prochází elektrolytem na katodu, kde současně reaguje s oksyličovadlem a přijímá elektron. Elektrony jsou nuceny procházet vnějším obvodem a konat práci.



Obrázek 22 Konstrukce a princip vodíkového palivového článku (7)

Palivové články jsou klasifikovány na základě materiálu elektrolytu. Elektrolyt může být kapalný či pevný. Palivo může být kapalné, pevné nebo plynné, ale jeho skupenství musí být uzpůsobena struktura anody. Pro provoz v automobilu jsou technicky nevhodnější články s tuhým organickým polymerem – PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) pro vodíkové palivo a DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) pro metanol. Vodík je preferován, protože při jeho užití nedochází k emisi oxidu uhličitého. Výroba vodíku je ale energeticky náročná a používat k ní energii z fosilních zdrojů postrádá smysl. Také skladování vodíku je technicky náročné a infrastruktura téměř neexistující.

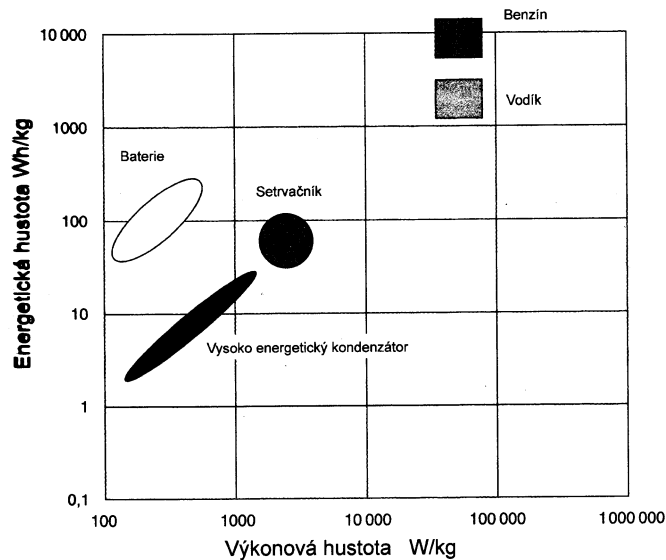
Tabulka 11 Porovnání různých druhů palivových článků (6)

	Power level (MW)	Power density (W/cm <sup>2</sup> )	Operating temperature (°C)	System efficiency (%)
DMFC	<0.001	0.04–0.23	90–120	10–20
AFC	<0.1	0.2–0.3	60–100	62
PEMFC	<0.5	0.35–0.6	50–120	30–50
PAFC	<10	0.2–0.25	150–200	40
MCFC	<100	0.1–0.2	600–650	47
SOFC	<100	0.24–0.3	500–1100	55–60

Vozidly v současnosti užívajícími palivový článek jsou Toyota Mirai a Honda Clarity FCV.

### 3.5.5. Shrnutí

Výkon elektrických vozů nebyl v minulosti limitován technologií motoru, ale akumulátoru. Až s nikl-metal hydridovými a lithium-iontovými články se bateriová technologie dostala na úroveň, kdy je možné do osobního automobilu zabudovat akumulátor s výstupním výkonem desítek až stovek kilowatt. Pro hybridní automobily tak elektrochemické akumulátory dlouho nebyly vhodné, proto se vyvíjely alternativní způsoby pro ukládání energie, jako například setrvačnick. Díky pokroku v oblasti elektrochemických článků jsou dnes nejběžnější technologie užití v konstrukci hybridních a čistě elektrických vozů prakticky shodné.



Obrázek 23 Grafické porovnání nosičů energie (7)

## 3.6. Dobíjení vozidel

### 3.6.1. Kontaktní

#### 3.6.1.1. Stacionární

Dobíjení elektrifikovaných vozů z elektrické sítě upravují standardy IEC 62196, 61851 a 15118.

Dobíjení je klasifikováno z několika hledisek:

- Level – výkonová úroveň, elektrické parametry
- Mode – bezpečnostní úroveň
- Type – způsob připojení (konektor, kabel)

#### Level

- Level 1: Domácí nabíjení z běžné jednofázové zásuvky, proud omezen na 10 nebo 16 A (výkony přibližně 2,2 a 3,5 kW)
- Level 2: Rychlejší dobíjení střídavým napětím. Proud až 32 A na fázi, výkon 7 kW pro jednofázové připojení, 21 kW pro třífázové
- Level 3: Rychlonabíjení stejnosměrné, výkon až 50 kW.

#### Mode

- Mode 1: Připojení vozu do sítě obyčejným prodlužovacím kabelem. Žádná detekce ochran. U produkčních vozů se nepoužívá.
- Mode 2: Připojení pomocí tzv. EVSE (Electric Vehicle Supply Equipment) kabelu. Obsahuje zabezpečení proti přehřátí a nadproudu, komunikuje s vozem po datové lince.
- Mode 3: Připojení do dobíjecí stanice (střídavé napětí), s přívodem uzpůsobeným pro kontinuální použití. Bezpečnostní protokol shodný s Mode 2.

- Mode 4: Připojení k stejnosměrné rychlonabíjecí stanici.

#### *Type*

- Type 1: Jednofázový konektor podle normy SAE 1772, používaný v USA a Japonsku.
- Type 2: Konektor používaný v EU. Pro jednofázové a třífázové připojení, s výkony od 3 do 120 kW.
- Type 3: Konektor navrhovaný Francií a Itálií, jejichž legislativa vyžaduje fyzický kryt kontaktů. Type 2 existuje ve verzi vyhovující tomuto požadavku.

Pro konektory pro stejnosměrné nabíjení existuje také několik standardů. Japonské vozy mají stejnosměrnou přípojku podle standardu CHAdeMO, nicméně konsorcium amerických a evropských výrobců CharIN (Charging Interface Initiative) vyvinulo tzv. Combined Charging System (CCS), fungující jako nadstavba pro konektory Type 1 a Type 2, umožňující užívat pro střídavé i stejnosměrné dobíjení jednoho typu zásuvky. Tyto konektory se nazývají Combo 1 a Combo 2. Částečně stranou této diskuse stojí automobilka Tesla se svým vlastním typem rychlodobíjecí stejnosměrné stanice a konektorem, tzv. Tesla Supercharger, nicméně nabízí i adaptér na systém CHAdeMO.

#### *3.6.1.2. Mobilní*

Mobilní kontaktní nabíjení je užíváno u parciálních trolejbusů. Akumulátor je dobíjen za jízdy energií z troleje o stejnosměrném trakčním napětí 600, případně 750 V.

### *3.6.2. Bezkontaktní*

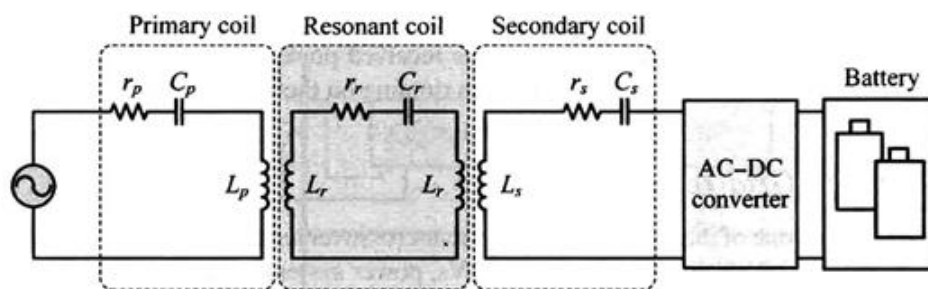
#### *3.6.2.1. Stacionární*

Bezkontaktní dobíjení využívá magnetické indukce k přenosu energie mezi primární cívkou umístěnou pod vozidlem a sekundární cívkou umístěnou na vozidle. Někteří výrobci již tuto možnost nabízejí jako příplatkové vybavení. Dobíjecí výkon se obvykle pohybuje v jednotkách kilowatt. Tato metoda má potenciál stát se hlavním způsobem dobíjení, kromě zvýšeného pohodlí a bezpečnosti obsluhy odpadá nekompatibilita mezi jednotlivými standardy přípojek.

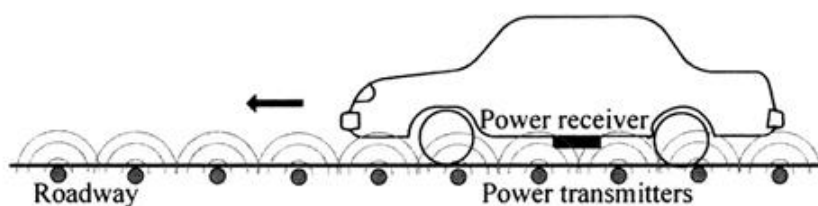
#### *3.6.2.2. Mobilní*

Tato metoda je také nazývána Move-and-Charge. Pod vozovkou jsou zabudovány emitory magnetického pole a vozidlo tak může přijímat energii za jízdy. Existuje pochopitelně mnoho překážek, než se takováto technologie může dostat do produkčního stádia. Proměnná vzdálenost vozidla od povrchu (dle zatížení a terénu), rychlost vozidla, vzájemná poloha vysílače a přijímače a v neposlední řadě také zabezpečení proti neoprávněnému odběru energie. Tyto záležitosti a ještě další musí řídicí systém zpracovávat v reálném čase. Způsob tohoto přenosu energie již byl demonstrován s výkonem 100 kW a průměrnou účinností 75 % (6).





Magnetic resonant coupling-based EV charging



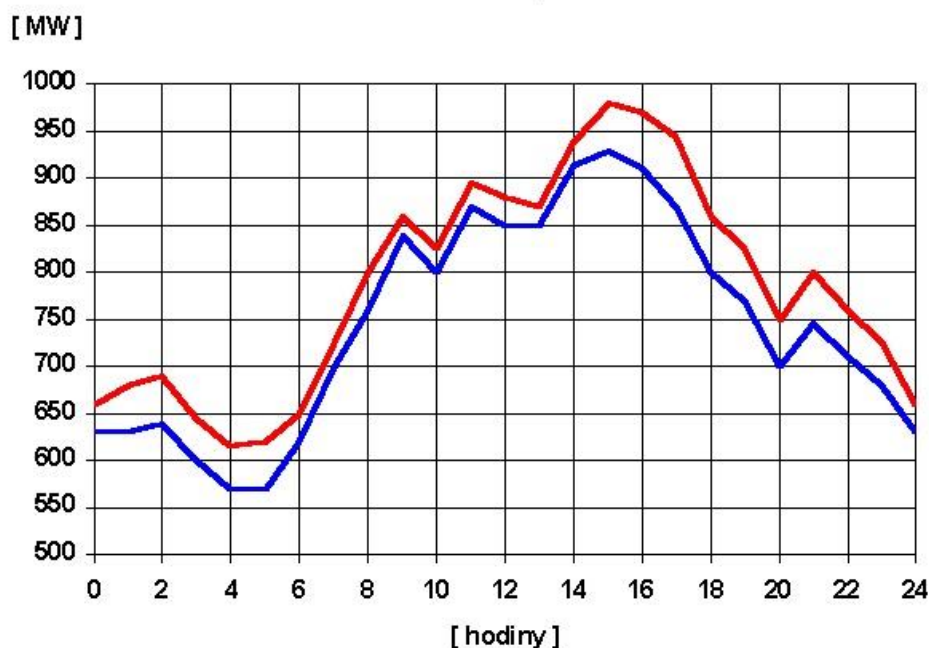
Obrázek 24 Znáznornění metody Move-and-Charge (6)

Pokud by se tato technologie dočkala rozšíření a četnost nabíjecích pruhů by dosáhla dostatečné úrovně, mohlo by se to projevit i na konstrukci vozů. Pokud by vzdálenosti mezi jednotlivým dobíjenými byly krátké, nebylo by nutné užívat vysokokapacitní akumulátory.

## 4. Rozvaha o výkonových nárocích na energetické sítě

S narůstajícími počty prodaných elektrifikovaných vozidel vyvstává otázka, kde a jak se budou všechny dobíjet. Pro majitele domu s garáží není tato problematika příliš palčivá. I podle průzkumu americké Idaho National Laboratory (14), který trval 3 roky a účastnilo se ho přes osm tisíc elektromobilů, je naprostá většina nabíjení uskutečněna doma nebo v zaměstnání, na tzv. pomalých nabíječkách (jednofázové, do výkonu 3,5, případně 7 kW). Nicméně, podobnou situaci si lze v současnosti stěží představit v českých podmínkách, konkrétně přímo v pražských ulicích. Počet registrovaných vozidel v Praze překonal ke konci roku 2015 jeden milion (15) a většina není na noc umístěna do garáže. Je opodstatněné předpokládat, že tento region, s nejvyšší hustotou zalidnění a nejvyšší průměrnou mzdou v České republice (16), zaujme v rozvoji elektromobility vůdčí postavení. Existuje v pražském energetickém systému rezerva pro situaci, kdy začnou počty elektromobilů dosahovat jednotek či dokonce desítek procent?

Společnost PRE ve své výroční zprávě 2015 (17) uvedla, že Praze za uplynulý rok dodala přibližně 6,1 TWh energie a rekordní zatížení pražské distribuční sítě dosáhlo hodnoty lehce přes 1,2 GW (v prosinci 2014). Dále se na jejích webových stránkách (18) lze dočíst, že instalovaný transformační výkon VVN/VN, tedy 110/22 kV, činí 2815 MVA.



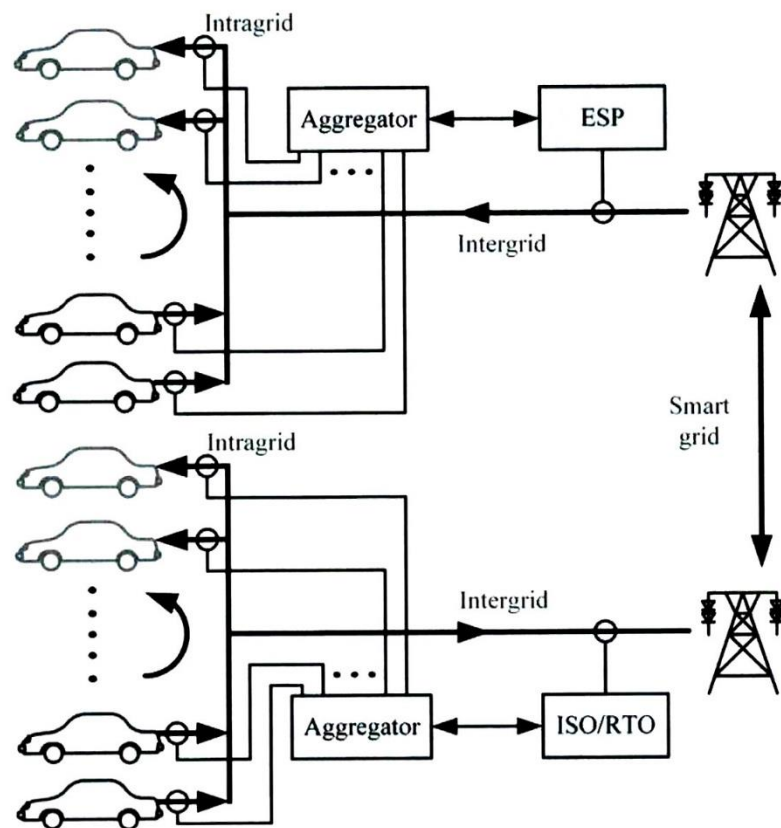
Obrázek 25 Denní diagram zatížení pro Prahu (19)

Pro jednoduché porovnání – dosáhne-li objem elektrických vozidel deseti procent a každé denně ujede 40 km, při průměrné spotřebě 15 kWh/100 km, roční spotřeba elektřiny (při zanedbání ztrát při dobíjení) bude přibližně 22 GWh. Taková hodnota se v porovnání celkovými dodanými 6 TWh zdá téměř zanedbatelná. Výraznějším způsobem bude infrastruktura zatížena při užívání tzv.

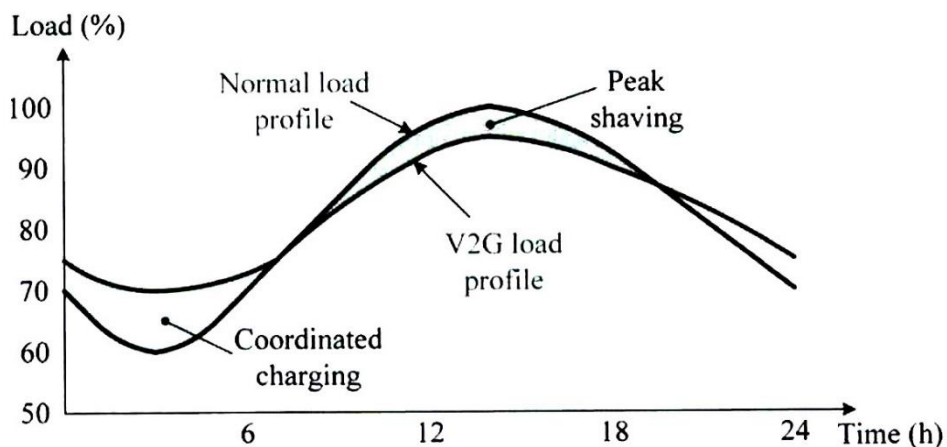
rychlodobíjecích stanic. V současnosti je obvyklé, že stanice je pouze pro jedno nebo dvě vozidla, s nabíjecím výkonem přibližně 50 kW, nicméně s narůstajícím počtem elektromobilů přibude stanic, které budou mít více dobíjecích pozic a, podle prohlášení konsorcia výrobců automobilů CharIN, jsou plánovány dobíjecí výkony i přes 300 kW na vozidlo. Na takto vysoké odběry, místně i časově náhodně rozprostřené po celé metropoli, není elektrická síť navržena. Rozvoj infrastruktury bude nutný.

Možnou odpovědí na tuto situaci je koncept tzv. chytré sítě (smart grid). Hlavním znakem chytré sítě je různorodost zdrojů a schopnost v reálném čase sledovat a řídit výrobu a spotřebu. Chytrá síť je maximálně automatizovaná, její prvky jsou propojeny komunikačními linkami. Pojem smart grid se úzce prolíná s dalšími obdobnými myšlenkami, jako je chytré město, inteligentní budovy a chytrá mobilita.

Rozvoj elektrické sítě, tak aby byla schopna obstarat nabíjení elektrovozidel, nespočívá v prostém zesílení a navýšení maximálních výkonů. Cílem je koordinovaně využívat výrobní zdroje, kterých je větší počet a jsou více rozprostřené. Vysoký lokální odběr je třeba kompenzovat lokálním zdrojem či kombinací několika. Nabíjecí stanici může být přidružena malá plynová turbína. V blízkosti solární či větrné elektrárny může být akumulátorové pole, které bude pružně reagovat na propady či nárůsty výkonu v dané lokaci. Akumulátorové pole může být dokonce tvořeno samotnými elektromobily – tato metoda se nazývá Vehicle-to-Grid (V2G). K tomuto účelu může být využito místo s větší hustotou zaparkovaných vozidel, například vícepatrové podzemní či nadzemní garáže. Zaparkovaná vozidla disponují nezanedbatelnou energetickou a výkonovou kapacitou. Prostředníka mezi elektrickou sítí a automobily pak může tvořit tzv. agregátor, který pod sebe sdružuje skupiny automobilů a přebírá komunikaci se sítí. Sám může disponovat energetickým záchytným systémem, polem akumulátorů či setrvačником. Stacionární pole akumulátorů může být tvořeno vyřazenými bateriemi elektromobilů, které už nedisponují původní kapacitou, přesto stále mají hodnotu a jejich recyklace by byla předčasná. Z dnešního pohledu, kdy má baterie poměrně omezenou životnost, by se její užití v systému Vehicle-to-Grid mohlo zdát jako plýtvání a zbytečné opotřebení, to ale pro akumulátory další generace nemusí platit. Z celého systému navíc může majitel vozu profitovat, protože cena energie uložené do vozu v době přebytku je nižší než při následném nedostatku a jejím vrácení do sítě. Možným schématem takto pokročilé doby je i odlišný obchodní model týkající se akumulátorů ve vozidlech. V případě, že by si je majitel pouze pronajímal od energetického závodu a zavázal se k určité dostupnosti v systému V2G, mohl by existovat přínos pro obě strany.



Obrázek 26 Metoda Vehicle-to-Grid (6)



Obrázek 27 Vliv metody Vehicle-to-Grid na denní diagram zatížení (6)

Rozvojové projekty chytrých měst a sítí existují již dnes a jsou k nim k dispozici finance z příslušných fondů. Příkladem může být Vrchlabí a jeho účast v projektu Grid4EU (20).

## 5. Závěr

Viděno čistě z ekonomického hlediska, elektrická vozidla v současnosti zdaleka nejsou schopna konkurovat konvenčním vozům se spalovacím motorem. Motivace pro zavádění ekologicky šetrnějších vozidel ovšem nikdy nebyla primárně finančního charakteru.

Aby se tato vozidla vyrovnala konvenčním vozům v důležitých vlastnostech jako je pořizovací cena, dojezdová vzdálenost a rychlost doplnění energie, je třeba dalších pokroků hlavně v oblasti baterií. Elektrické pohony jsou již dnes na velmi vysoké technické úrovni, ovšem i v této oblasti se počítá se zlepšením.

Pozitivním faktem je, že již dnes elektrické vozy v některých ohledech velmi snadno překonávají běžné automobily. Jsou jimi tichý chod, výrazně snížené nároky na údržbu a především nulové lokální emise výfukových plynů. Jízdní dynamika elektromobilů je také velmi dobrá, díky přirozeně vhodným vlastnostem elektrických trakčních motorů.

Hybridní vozy tvoří důležitý přechodový stupeň mezi běžnými a plně elektrickými vozy. Navzdory vysoké komplexitě jejich pohonného ústrojí se brzy stanou nejrozšířenějším druhem automobilu. Míra hybridizace se bude zvyšovat ve prospěch elektrické části. Budou benefitovat ze stejných technologických pokroků jako plně elektrické vozy, protože elektrická část jejich pohonu je shodná.

## 6. Reference

1. **OICA.** Vehicles in use. *Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles*. [Online] 2015. [Citace: 18. 5. 2016.] <http://www.oica.net/wp-content/uploads//total-inuse-2014.pdf>.
2. **Nejen.** Výchřevnost a spalné teplo paliv. [Online] <https://nejen.cz/vlastnosti-materialů-f56/vyhřevnost-paliv-a-jejich-spalne-teplo-t20.html>.
3. **Ing. Jakub Slavík, MBA – Consulting Services.** *E-mobilita v MHD*. 2015.
4. **Mitsubishi Motors.** MITSUBISHI MOTORS | Global Website. [Online] [www.mitsubishi-motors.com](http://www.mitsubishi-motors.com).
5. **BYD.** BYD Europe | BYD Official Web Site. [Online] <http://bydeurope.com>.
6. **Chau, K. T.** *Electric vehicle machines and drives: design, analysis and application*. Singapore : IEEE Wiley, 2015.
7. **Kameš, Josef.** *Alternativní pohony automobilů*. Praha : BEN - technická literatura, 2004.
8. **Kamiya, Munehiro.** *Development of Traction Drive Motors for the Toyota Hybrid System*. místo neznámé : Toyota Motor Corporation, 2005.
9. **Abuelsamid, Sam.** Porsche Racing Tech - Porsche 911's GT3R Hybrid Flywheel. [Online] <http://www.popularmechanics.com/cars/hybrid-electric/a6266/porsche-911-gt3r-hybrid-flywheel/>.
10. **Porsche.** Porsche Press Room USA. [Online] <http://press.porsche.com>.
11. **Energy Education.** Supercapacitor - Energy Education. [Online] 2017. <http://energyeducation.ca/encyclopedia/Supercapacitor>.
12. **StreetInsider.** *Jeffereis Sees 1,000bps of GM Tailwind for Tesla (TSLA); PT Up to \$365*. [článek] 17. 9. 2015.
13. **eRally.** eRally – at the cutting edge of EV technology. *Motorsport for the 21st Century*. [Online] 2016. [Citace: 25. 5. 2016.] <http://www.erally.co.uk/technology.php>.
14. **Idaho National Laboratory.** *Plugged In*. 2014.
15. **Centrální registr vozidel.** Statistika registru silničních vozidel v hl. m. Praze. *Praha.eu (Portál hlavního města Prahy)*. [Online] 2016. [Citace: 22. 5. 2016.] [http://www.praha.eu/jnp/cz/doprava/automobilova/statistiky\\_ridicu\\_a\\_vozidel/statistika\\_registru\\_silnicnich\\_vozidel/](http://www.praha.eu/jnp/cz/doprava/automobilova/statistiky_ridicu_a_vozidel/statistika_registru_silnicnich_vozidel/).
16. **Český statistický úřad.** Průměrné hrubé měsíční mzdy v Praze ve 4. čtvrtletí 2015. *Český statistický úřad | ČSÚ*. [Online] 11. 3. 2016. [Citace: 20. 5. 2016.] <https://www.czso.cz/csu/xa/prumerne-hrube-mesicni-mzdy-v-praze-ve-4-ctvrtleti-2015>.

17. **Pražská energetika, a.s. PRE.** [Online] 2016. [Citace: 23. 5. 2016.] <https://www.pre.cz/Files/profil-spolecnosti/o-nas/vyrocnizpravy/2015/>.
18. **PREdistribuce, a. s.** Technické informace. *PREdistribuce, a. s.* [Online] 2016. [Citace: 21. 5. 2016.] <https://www.predistribuce.cz/cs/distribucni-sit/technicke-informace/>.
19. **Pázral, Emil.** Integrace větrné energetiky do nadřazených systémů. *Emil Pázral.* [Online] 2009. [Citace: 22. 5. 2016.] [http://stary.biom.cz/clen/ep/a\\_vitr.html](http://stary.biom.cz/clen/ep/a_vitr.html).
20. **Slavík, Jakub.** Smart city, rozhovor se starostou Vrchlabí. *Smart city v praxi.* [Online] [http://www.smartcityvpraxi.cz/rozhovory\\_komentare\\_1.php](http://www.smartcityvpraxi.cz/rozhovory_komentare_1.php).
21. **Vlk, František.** *Alternativní pohony motorových vozidel.* Brno : František Vlk, 2004.
22. **Sandalow, David, a další.** *Critical Materials Strategy.* [PDF dokument] Washington, D.C., USA : U.S. Department of Energy, 2011.
23. **Pavelka, Jiří a Zděnek, Jiří.** *Elektrické pohony a jejich řízení.* 2. vydání. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2015.
24. **Burrell, T. A., a další.** *Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive system.* [PDF dokument] Washington, D.C., USA : U.S. Department of Energy, Oak Ridge National Laboratory, 2011.
25. **Benecki, Walter T.** *The Permanent Magnet Market.* [Prezentace] Orlando, USA : Magnetics 2013 Conference, 2013.
26. **Toyota.** *Toyota Motor Sales, USA, Inc.* [Online] 2015. [Citace: 10. 5. 2016.] <https://ssl.toyota.com/mirai/assets/modules/carprice/2016-Mirai-Product-Sheet.pdf>.
27. **Neubauer, Jeremy, Wood, Eric a Pesaran, Ahmad.** *Project Milestone: Analysis of Range Extension Techniques for Battery Electric Vehicles.* místo neznámé, USA : National Renewable Energy Laboratory, 2013.
28. **Liu, Jinfang.** *Comparison of Permanent Magnets.* místo neznámé : Electron Energy Corporation, 2016.
29. **Braunl, Thomas.** *EV Charging Standards.* místo neznámé : University of West Australia, 2012.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Vozidlo s jednou poháněnou nápravou .....	11
Obrázek 2 Vozidlo s dvěma poháněnými nápravami; s centrálním pohonem.....	12
Obrázek 3 Vozidlo se dvěma separátně poháněnými nápravami .....	12

Obrázek 4 Jednomotorová náprava s mechanickým diferencíálem .....	13
Obrázek 5 Dvoumotorový pohon nápravy – každé kolo zvlášť .....	14
Obrázek 6 Motor umístěný v těhlici vozu Mitsubishi Colt MIEV (4) .....	15
Obrázek 7 Nábojový motor s vnějším rotorem vozu Mitsubishi Lancer MIEV (4) .....	15
Obrázek 8 Zadní náprava autobusu BYD K9 se zavěšenými motory s redukčním převodem (5).....	16
Obrázek 9 Grafické znázornění skladby trakční energie vozidel s různou koncepcí pohonu.....	17
Obrázek 10 Blokové schéma sériového hybridního pohonu.....	18
Obrázek 11 Blokové schéma paralelního hybridního pohonu .....	19
Obrázek 12 Blokové schéma sério-paralelního hybridního pohonu .....	20
Obrázek 13 Ekonomická náročnost výroby hybridního ústrojí (6) .....	21
Obrázek 14 Distribuce ztrát v motoru ústrojí Toyota Hybrid Systém (8) .....	23
Obrázek 15 Přehled možných uspořádání magnetů v rotoru (6).....	24
Obrázek 16 Konstrukční uspořádání asynchronního motoru s klecovou kotvou (6) .....	25
Obrázek 17 Mechanický hybridní systém se setrvačником (7) .....	26
Obrázek 18 Ilustrace setrvačnickového systému vozu Porsche (10) .....	27
Obrázek 19 Prostorové uspořádání vozu Porsche s hybridním setrvačnickovým pohonem (10) .....	27
Obrázek 20 Znázornění konstrukce a principu superkapacitoru (11) .....	28
Obrázek 21 Grafické znázornění parametrů elektrochemických článků (13) .....	29
Obrázek 22 Konstrukce a princip vodíkového palivového článku (7) .....	29
Obrázek 23 Grafické porovnání nosičů energie (7).....	31
Obrázek 24 Znázornění metody Move-and-Charge (6).....	33
Obrázek 25 Denní diagram zatížení pro Prahu (19) .....	34
Obrázek 26 Metoda Vehicle-to-Grid (6).....	36
Obrázek 27 Vliv metody Vehicle-to-Grid na denní diagram zatížení (6) .....	36



## Seznam tabulek

Tabulka 1 Energetická hustota paliv užívaných ve spalovacích motorech (2) .....	9
Tabulka 2 Přehled vozidel s dvumotorovou nápravou.....	14
Tabulka 3 Výkonové a energetické rozsahy hybridních architektur.....	18
Tabulka 4 Vozidla se sériovou hybridní konfigurací .....	19
Tabulka 5 Přehled vozidel s paralelním hybridním pohonem .....	20
Tabulka 6 Přehled vozidel se sério-paralelním hybridním pohonem.....	21
Tabulka 7 Přehled produkčních elektrických vozidel .....	22
Tabulka 8 Porovnání trakčních elektrických motorů (7) .....	22
Tabulka 9 Srovnání vlastností permanentních magnetů (6) .....	24
Tabulka 10 Porovnání parametrů elektrochemických článků (7).....	28
Tabulka 11 Porovnání různých druhů palivových článků (6).....	30