

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Druhy elektromotorů pro hybridní automobily

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš HLINOVSKÝ**
Osobní číslo: **E10B0031P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Druhy elektromotorů pro hybridní automobily**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

Zpracujte:

1. přehled hybridních automobilů
2. problematiky akumulace energie
3. přehledně typy užívaných elektromotorů

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


1. internetové zdroje

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

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


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku hybridních pohonů. V první části se věnuje rozdělení hybridních pohonů podle uspořádání a koncepce, ve druhé pak problematikou akumulace elektrické energie v automobilech. Poslední část práce se zaměřuje na druhy elektrických motorů vhodných pro použití v hybridních automobilech a uvádí přehled aktuálně používaných elektrických motorů.

Klíčová slova

Hybridní pohon, sériový, paralelní, elektromotor, akumulátor

Abstract

The present thesis is focused on hybrid systems used in automobiles. In the second part this work analyzes problems of energy storage in cars. Third part of this work focuses on types of electric motors that are suitable for use in hybrid vehicles and summarizes the types of electric motors which are currently used.

Key words

Hybrid drive, serial, parallel, electric motor, battery

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2013

Tomáš Hlinovský

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
1 PŘEHLED HYBRIDNÍCH AUTOMOBILŮ	8
1.1 PROČ HYBRIDNÍ POHON?	8
1.1.1 <i>Omezené zásoby ropy</i>	8
1.1.2 <i>Možnosti současných motorů</i>	9
1.1.3 <i>Ekologie provozu</i>	10
1.2 CHARAKTERISTIKA HYBRIDNÍHO POHONU	11
1.2.1 <i>Sériové hybridy</i>	11
1.2.2 <i>Paralelní hybridy</i>	12
1.2.3 <i>Výhody hybridního pohonu</i>	13
1.2.4 <i>Nevýhody hybridního pohonu</i>	13
1.3 TYPY HYBRIDNÍCH POHONŮ	14
1.3.1 <i>Micro hybrid</i>	14
1.3.2 <i>Mild hybrid</i>	15
1.3.3 <i>Full hybrid</i>	15
1.3.4 <i>Plug-in hybrid</i>	15
2 PROBLEMATIKY AKUMULACE ENERGIE	16
2.1 AKUMULÁTORY	16
2.1.1 <i>Olověné články</i>	16
2.1.2 <i>NiCd</i>	20
2.1.3 <i>NiMH</i>	21
2.1.4 <i>Li-Ion</i>	22
2.1.5 <i>Li-Pol</i>	24
2.2 SUPERKAPACITORY	25
2.3 SETRVAČNÍKY	26
2.4 PALIVOVÉ ČLÁNKY	27
3 PŘEHLED TYPŮ POUŽÍVANÝCH ELEKTROMOTORŮ	28
3.1 STEJNOSMĚRNÉ KOMUTÁTOROVÉ MOTORY	29
3.1.1 <i>S cizím buzením</i>	30
3.1.2 <i>Sériové</i>	30
3.1.3 <i>Paralelní</i>	30
3.1.4 <i>Kompaudní</i>	30
3.2 BLDC MOTORY	31
3.3 ASYNCHRONNÍ MOTORY	32
3.4 SYNCHRONNÍ MOTORY	35
3.5 APLIKACE V HYBRIDNÍCH AUTOMOBILECH	36
3.5.1 <i>Toyota</i>	36
3.5.2 <i>General Motors</i>	39
3.5.3 <i>Ostatní výrobci</i>	39
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	42

Úvod

Předkládaná práce se zabývá problematikou hybridních pohonů a jejich použití v automobilech. Text je rozdělen do tří částí; první se zabývá hybridními pohony a jejich vlastnostmi, ve druhé je rozebrána problematika akumulace energie a ve třetí se zabývá druhy elektromotorů vhodných pro hybridní pohon automobilů a uvádí přehled elektromotorů použitých v současně prodávaných hybridních vozech.

1 Přehled hybridních automobilů

1.1 Proč hybridní pohon?

Hybridní pohon vynalezl již v roce 1898 konstruktér Ferdinand Porsche a roku 1900 se mu podařilo tento pohon využít k pohonu prvního hybridního automobilu na světě. Po několika dalších poměrně úspěšných realizacích musely nakonec hybridní, stejně jako čistě elektrické pohony ustoupit levným, sériově vyráběným automobilům se spalovacími motory. Je tomu již více než sto let a zdá se, že hybridní pohony se nyní opět začínají hlásit o slovo. Proč ale vůbec nahrazovat spolehlivé a fungující spalovací motory konstrukčně i výrobně složitějším systémem, kterým hybridní pohon bezesporu je. V následujících řádcích se proto pokusím nastínit možné důvody toho, proč je v dnešní době o hybridní automobily tak nebývalý zájem.

1.1.1 Omezené zásoby ropy

Ropa jako surovina má zastoupení snad v každém odvětví lidské činnosti. Vyrábí se z ní plasty, oleje, hnojiva, ale také třeba léky a mnoho dalších věcí a ropné deriváty se také podílí na 95% veškeré dopravy. Podle odhadů by nám při současném objemu těžby měly zásoby ropy vystačit minimálně na dalších 40 let. Jenže spotřeba ropy každoročně narůstá a udržet současný objem těžby bude v budoucnu stále obtížnější. Snadno dostupná ložiska s kvalitní ropou jsou již z velké části vytěžena a v budoucnu se postupně větší část těžby přesune na hůře dosažitelná ložiska a méně kvalitní ropu s větším obsahem nežádoucích příměsí, jejíž rafinace je nákladnější. Lze předpokládat, že s nárůstem nákladů na těžbu a následnou rafinaci půjde ruku v ruce i neustálé zdražování ropy a pohonných hmot, které se z ní vyrábějí. [1]

Ceny benzínu a nafty se již dnes dostali do bodu, kdy je spotřeba paliva jedním z nejdůležitějších parametrů automobilu. Automobilky se proto všemožně snaží snížit

spotřebu svých vozů a to otevírá dveře novým řešením pohonů, které jsou sice známy již řadu let, ale kvůli nízké ceně paliva nebylo dosud ekonomicky výhodné jejich masovější zavádění nebo investice do jejich vývoje.

1.1.2 Možnosti současných motorů

Současné spalovací motory jsou, co se týče zvyšování účinnosti již na hranici svých možností. Ta se pohybuje u současných spalovacích motorů pouze kolem 25 %, přičemž platí že vznětové motory jsou na tom s účinností o něco lépe než zážehové. Dnes se široce začínají používat maloobjemové tzv. přeplňované motory, u kterých se zvýší účinnost přidáním turbodmyhadla nebo kompresoru a ty potom mají účinnost kolem 35%. Této teoretické účinnosti je ale dosahováno pouze v úzkém rozmezí otáček. Omezení spalovacích motorů vyplývají z termodynamického Carnotova cyklu a nelze proto předpokládat zvýšení jejich účinnosti někdy v budoucnu. [2]

Naproti tomu elektrické motory jsou na tom, co se účinnosti týče nesrovnatelně lépe. Účinnost je u středně velkých elektrických točivých strojů 75-85 % [3]. Kromě vysoké účinnosti mají ale elektromotory i další výhody. Při stejném výkonu jsou menší a lehčí než spalovací motor, a díky jednodušší konstrukci jsou méně náchylné k poruchám. Dnes používané elektrické motory jsou prakticky bezúdržbové. Navíc jsou schopny zpětné přeměny elektrické energie při brzdění, tzv. rekuperace. Elektrické motory mají vysoký krouticí moment už od nízkých otáček a tím odpadá v mnoha případech nutnost vybavit vozidlo převodovkou, jenž dále snižuje účinnost pohonu a je potenciálním zdrojem poruch. Spalovací motory jsou též zdrojem hluku, vibrací a škodlivých plynných emisí, což elektrické motory nejsou.

Čistě elektrický pohon však zatím není schopen plnohodnotně nahradit spalovací motory. To je dáno především omezenou kapacitou akumulátorů a z ní vyplývající nedostatečný dojezd elektromobilů. Palivové články jako perspektivní a fungující náhradu akumulátorů zase odepisuje cena. Hybridní pohon se tedy nabízí v současné době jako jediná schůdná cesta využití elektrického motoru v automobilové dopravě.

1.1.3 Ekologie provozu

Dalším a podle mého názoru hodně důležitým faktorem, který hovoří pro zavádění hybridního a elektrického pohonu obecně, je ekologie provozu. Nárůst počtu osobních automobilů je za posledních 20 let více než dvojnásobný a škodlivé emise tak díky hustému silničnímu provozu více sužují především velká města [4]. Šedé oblaky výfukových plynů se tvoří v místech dopravní špičky každý den. Dlouhodobé vystavení znečištěnému ovzduší však může mít řadu závažných zdravotních dopadů, jako jsou chronická onemocnění dýchacích cest, rakovina plic, choroby srdce, astma atd. V Ostravě, která se stala díky těžkému průmyslu synonymem pro znečištěné ovzduší, už se snaží tento problém řešit a zkušebně provozují na některých linkách autobusy na čistě elektrický pohon. Jedná se konkrétně o čtyři elektrobusy EBN 10,5 od českého výrobce SOR. Elektrobusy jsou nasazovány na trhaný kurz, kdy v součtu denně najedou 127 km. Dobíjení probíhá dvakrát denně ve vozovně trolejbusů po ranní a odpolední směně. Ukázalo se, že celkové provozní náklady elektrobusu na kilometr jsou výrazně nižší než u trolejbusu a srovnatelné s náklady klasického autobusu a zároveň se ukázalo, že na kratších a méně vytížených linkách by mohly elektrobusy bezproblémově fungovat již dnes. [5]



Obr. 1.1: Elektrobus SOR 10,5 v ulicích Brna (převzato z [5])

Normální autobus za dobu svojí životnosti vyprodukuje do ovzduší 24,7 tun škodlivin [5]. Nahrazením části klasických autobusů hlavně v centrech měst by tak mohlo dojít ke znatelnému zlepšení čistoty ovzduší.

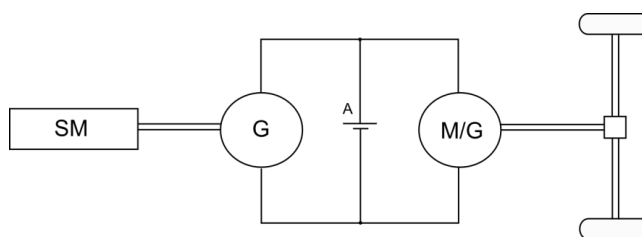
Částečně nebo plně elektrický pohon je do městského provozu velice vhodný a měly by zde být podporovány snahy o jeho uplatnění jak v osobní tak hromadné dopravě.

1.2 Charakteristika hybridního pohonu

Hybridní pohon se skládá nejčastěji ze spalovacího a elektrického motoru. Ty mohou vzájemně spolupracovat několika způsoby, které si podrobně popíšeme. Základní myšlenkou ovšem zůstává co nejlepší využití výhod obou typů motorů a jejich provoz v optimálním pracovním režimu. Hybridní pohony se dělí do dvou základních skupin a to na sériové a paralelní.

1.2.1 Sériové hybridy

Tento systém má nejbližší klasickému elektromobilu. O pohon vozidla se stará pouze elektromotor a ten je umístěn v sérii se spalovacím agregátem vyrábějícím pomocí generátoru proud. Označuje se jako REEV (Range-Extended Electric Vehicle) neboli elektromobil s rozšířeným dojezdem. U tohoto typu hybridního pohonu je možnost čistě akumulátorového provozu a využití benzínového motoru až po vybití akumulátorů nebo při náhlém zvýšeném odběru energie například při předjíždění. Výhodou tohoto řešení je, že spalovací motor není mechanicky propojen s koly a může být proto optimalizován pro vysoce efektivní provoz, kdy se může přibližovat teoretické účinnosti 37%. [7]



Obr. 1.2: Blokové schéma sériového hybridního pohonu (SM – spalovací motor, G – generátor, A – akumulátor, M/G – motor/generátor) [8]

Jedním z mála současných vozů, který se prezentuje jako sériový hybrid je Opel Ampera. Ve skutečnosti je jeho zařazení o něco komplikovanější a dal by se nazvat spíše smíšeným, než sériovým hybridem. Nicméně je pravda, že většinu času se chová jako sériový hybrid a proto ho zde také uvádím jako příklad. Je poháněn střídavým elektrickým motorem o výkonu 111 kW (150 k) a točivém momentu 370 Nm. Akumulátor je složen z 220 lithium-iontových článků. Ty mají celkovou kapacitu 16 kWh a jejich váha je 180 kg. Vůz na plně dobíтый akumulátor ujede podle podmínek přibližně 40 – 80 km kdy vyšší hodnota platí především

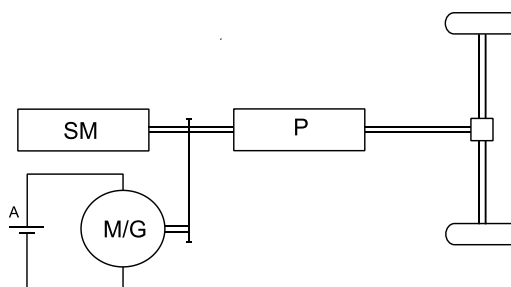
pro provoz ve městě a nižší pro jízdu po dálnici. Poté se zapne čtyřválcový benzínový motor o objemu 1,4 litru s výkonem 63 kW (86 k) a začne pomocí 54 kW generátoru vyrábět energii. [9]



Obr. 1.3: Opel Ampera (převzato z [9])

1.2.2 Paralelní hybridy

U paralelního uspořádání jsou elektrický a spalovací motor uspořádány paralelně a oba se mohou přímo podílet na pohybu vozidla. Celkově je tato koncepce bližší konvenčnímu uspořádání automobilu. Výhoda tohoto řešení spočívá v tom, že při provozu spalovacího motoru nedochází k tak výraznému zhoršení vlastností [8]. Elektrický motor zde „vypomáhá“ spalovacímu motoru zvláště v nízkých otáčkách například při rozjezdu, nebo při jiných pro spalovací motor nepříznivých provozních stavech. Samozřejmostí bývá rovněž stop-start systém a rekuperační brzdění. U vozů této koncepce nebývá kladen tak velký důraz na jízdní dosah čistě na elektrickou energii a akumulátory mohou být tím pádem menší.



1.4: Blokové schéma paralelního hybridního pohonu (SM – spalovací motor, A – akumulátor, M/G – motor/generátor, P – převodovka) [8]

V současné době je většina hybridních automobilů této koncepce a jedním ze zástupců paralelního uspořádání je i Toyota Prius. Ta má ze současných hybridních automobilů nejstarší historii a jedná se v současnosti o nejrozšířenější hybridní automobil vůbec. Toyota Prius plug-in má jako základ pohonné soustavy spalovací motor o objemu 1,8 l. Tomu při rozjezdech zdatně vypomáhá 60kW synchronní elektromotor napájený li-ion baterií s kapacitou 4,4 kWh a o váze 80 kg. Nabíjení baterie trvá přibližně 100 – 120 minut a účinnost nabíjení je přes 90 %. Čistě na elektřinu dokáže při rychlosti do 50 km/h ujet přibližně 22 – 24 km, při rychlostech kolem 80 – 90 km/h ujede asi 15 – 19 km. Spotřeba záleží na prostředí a nejvíce se samozřejmě elektrický pohon projeví při jízdě ve městě, zatímco na dálnici se neprojeví skoro vůbec. Zde se hodnota spotřeby pohybuje kolem 5,2 l/100 km. Výhodou Priusu je pohotovostní hmotnost, která činí 1420 kg oproti značně těžšímu Opelu Ampera vážícímu 1732 kg. [10]



Obr. 1.5: Toyota Prius (převzato z [10])

1.2.3 Výhody hybridního pohonu

Obecné výhody hybridního pohonu oproti klasickému jsou snížení spotřeby paliva a snížení množství produkovaných emisí. Výhodou některých hybridních automobilů je možnost určitého dojezdu čistě na elektřinu jako například u již zmiňovaného Opelu Ampera, kde jeho elektrický dojezd 80 km ve městském plně postačuje na pokrytí denního nájezdu 90 % lidí.

1.2.4 Nevýhody hybridního pohonu

Hlavní nevýhodou je především vyšší pořizovací cena, která je způsobena složitější konstrukcí, cenou akumulátorů, které stojí řádově statisíce a elektroniky, která vše řídí. Již

zmiňovaná hybridní Toyota Prius v plug-in verzi stojí aktuálně 909 tis. a Opel Ampera je ještě o 200 tis. korun dražší. V podstatě jsou tedy náklady na pořízení takového auta takové, že i při maximální možné úspoře nákladů na provoz se nemůže cenový rozdíl s přihlédnutím k životnosti a to především akumulátorů vrátit. Tedy alespoň v české republice. Hybridních vozů Toyota Prius se totiž v minulém roce prodalo 26000 jenom v USA. Je to dáno státními dotacemi, kterými stát přispívá na nákup ekologických automobilů. V evropské unii se postupně začíná tento trend také objevovat. Dotace na elektromobily nebo hybridy mají např. v Británii, Francii, Norsku, Rumunsku atd. V některých městech jako je například Londýn, mají majitelé ekologicky šetrných vozů úlevu od poplatků, které musí každý majitel vozu platit.

U hybridního automobilu obvykle dochází ke zvýšení hmotnosti oproti klasické verzi se spalovacím motorem, což se projeví především zhoršenými jízdními vlastnostmi. Děje se tak především u hybridních vozů, kde se klade důraz na velký dojezd na elektrickou energii. Toho může být dosaženo pouze umístěním rozměrných a těžkých bateriových článků. Ty navíc snižují užitek hodnotu vozu, protože zabírají místo a obvykle tím utrpí zavazadlový prostor.

Další nevýhoda se týká baterií, které mají omezenou životnost a postupně ztrácejí kapacitu. Výrobci se snaží životnost baterií prodloužit tak, že nevyužívají plný potenciál baterie. Rovněž je diskutabilní ekologie výroby některých baterií v případě masového zavádění hybridních pohonů. Je to dáno použitím látek, které jsou buď toxické (kadmium), nebo jí není dostatek pro výrobu velkých akumulátorů (Nikl) a pouze by se přešlo z jedné nedostatkové suroviny (ropy), na jinou.

1.3 Typy hybridních pohonů

V dnešní době se hybridní automobily podle míry zastoupení elektrického pohonu rozdělují do následujících kategorií.

1.3.1 Micro hybrid

Jedná se v podstatě o systém u nás známý spíše pod názvem Stop-Start, který spočívá ve vypínání motoru ve chvíli, kdy není jeho provoz zrovna zapotřebí. Je to například při stání na semaforech, při častém zastavování během popojíždění v koloně aut při dopravní špičce, nebo

třeba při jízdě z kopce. Podmínky za jakých motor vypíná a zapíná samozřejmě záleží na řídicím programu konkrétního výrobce, ale také se mohou lišit i pro konkrétní typy motorů. Vypínání motoru na dobu, kdy jeho výkon není potřeba šetří palivo a emise CO₂. Toyota na svých stránkách uvádí, že v případě 1,33-litrového motoru a systému Stop & Start, se vypnutí z energetického a emisního hlediska vyplatí již za 3,5 vteřiny [11]. Systém se samozřejmě nejvíce vyplatí při provozu ve městě, kde může úspora paliva být v řádu několika procent. Automobil vybavený systémem Stop-Start má vlastně jen posílený startér, který je schopen opakovaného startování a zhasínání motoru. Zároveň je schopen udělit motoru při startu vyšší otáčky než obyčejný startér což se projeví na větší kultivovanosti chodu a menšímu namáhání spalovacího motoru při častém startování. Tento systém je v současné době součástí výbavy všech větších, nebo dražších vozů a u levnějších a menších aut je obvykle dostupný jako příplatková výbava. [12]

1.3.2 Mild hybrid

Slovem mild, se označuje koncepce hybridního pohonu, kde se na pohybu vozidla po celou dobu využívá spalovacího motoru a elektrický motor pouze asistuje ve vhodných situacích jako např. při rozjíždění nebo když je potřeba plný výkon. Proto se tomuto řešení také někdy říká asistovaný hybrid. Elektrický motor zde ale není dimenzovaný pro čistě elektrický provoz. Tento druh pohonu je samozřejmě schopen rekuperace. Úspora paliva stejně jako snížení emisí není příliš vysoká a mnoho odborníků nepovažuje mild hybridy stejně jako micro hybridy za plnohodnotné hybridní pohony [13]. [12]

1.3.3 Full hybrid

Full hybrid neboli plný hybrid je takový typ pohonu, kde je elektromotor dostatečně dimenzovaný na čistě elektrický provoz. Zatímco předchozí stupně hybridizace mohou být uspořádány pouze paralelně, zde již může být uspořádání sériové nebo kombinované. Úspora paliva je vyšší, než tomu bylo v předchozích případech, nicméně elektřina sloužící k napájení elektromotoru zde pochází buď přímo (generátorický režim), nebo nepřímo (rekuperací) ze spalovacího motoru a ten jak už víme má jen omezenou účinnost. [12]

1.3.4 Plug-in hybrid

PHEV (plug-in hybrid electric vehicle) Je dalším logickým krokem evoluce hybridních vozidel a má hodně společných znaků s klasickým elektromobilem. Hlavní důvodem tohoto

řešení je fakt, že elektřina vyrobená hromadně v elektrárně je levnější než elektřina vyrobená přímo ve vozidle spalovacím motorem. Dalším důvodem tohoto řešení je zkušenost, která říká, že naprostá většina automobilů nenajede denně více než 60 km. S dostatečnou kapacitou akumulátorů by tedy bylo možné pokrýt denní potřebu většiny lidí čistě na elektřinu bez škodlivých emisí. V tomto ideálním případě by tedy bylo teoreticky možné snížit spotřebu a produkci škodlivých emisí na nulu. Plug-in verze automobilů jsou ale díky potřebě instalace vysoce kapacitních akumulátorů drahé a bez podpory státu (viz USA) se zatím jen těžko můžou vyplatit. [12]

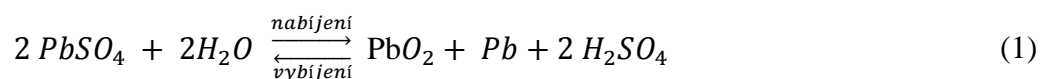
2 Problematiky akumulace energie

Problém s uchováním elektrické energie se řeší už od počátků rozvoje elektrotechniky. Prvním použitelným elektrickým zdrojem byl galvanický článek. Brzy po rozvoji prvních typů primárních článků byl objeven princip reverzibilního ukládání elektrické energie do sekundárních galvanických článků neboli akumulátorů. Nejdříve to byly olověné a nikl-železné články, později nikl-kadmiové. Tyto články jsou známy a v praxi používány déle než sto let a přesto se jejich základní konstrukční uspořádání, alespoň co se týče akumulátorů s většími ampérhodinovými kapacitami, příliš nezměnilo. S využitím nových technologií výroby, zlepšením vlastností základních materiálů a s použitím nových materiálů na separátory a nádoby článků se podařilo zmenšit hmotnost, omezit samovybíjení a zvýšit bezpečnost, ale to je tak v podstatě všechno. Princip článků se nezměnil ani základní materiály. Hlavní problém, tedy nepříznivý poměr kapacity uložené energie vzhledem ke hmotnosti a objemu akumulátorů přetrval. [14]

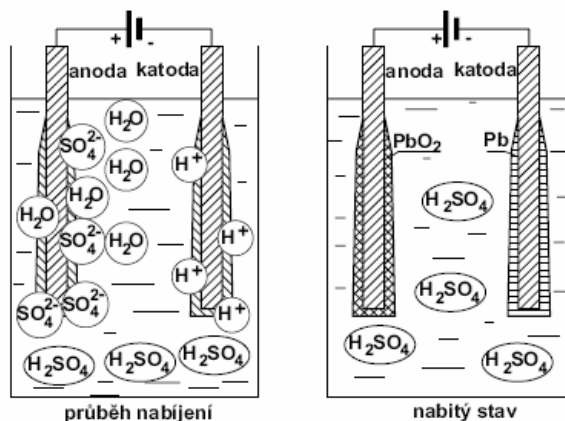
2.1 Akumulátory

2.1.1 Olověné články

Olověný článek poprvé zhotovil r. 1859 francouzský fyzik Gaston Planté a vytvořil tak první sekundární (dobíjecí) článek vůbec. Obecně lze říci, že článek je tvořen dvěma olověnými elektrodami, které jsou ponořeny do zředěné kyseliny sírové (35%). Chemický proces nabíjení a vybíjení lze vyjádřit chemickou rovnicí [15]:

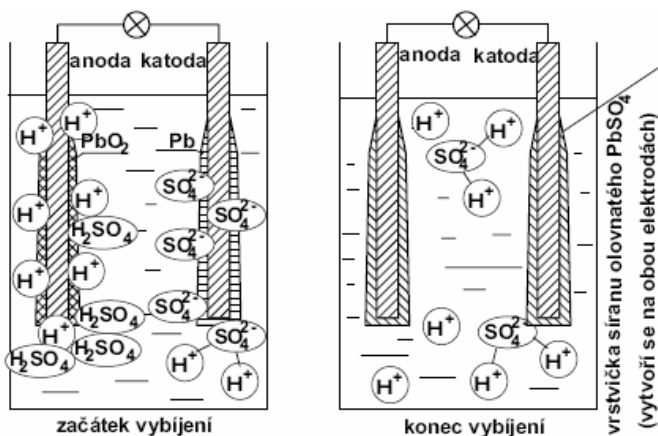


Nabíjením olověného článku se tvoří kyselina sírová (H_2SO_4) a elektrolyt houstne. Na konci nabíjení je kladná elektroda pokrytá tmavohnědým oxidem olovičitým (PbO_2) a na záporné elektrodě je jemně, houbovitě rozptýlené tmavošedé olovo. [15]



Obr. 2.1: Schematické zobrazení reakcí při nabíjení olověného článku (převzato z [16])

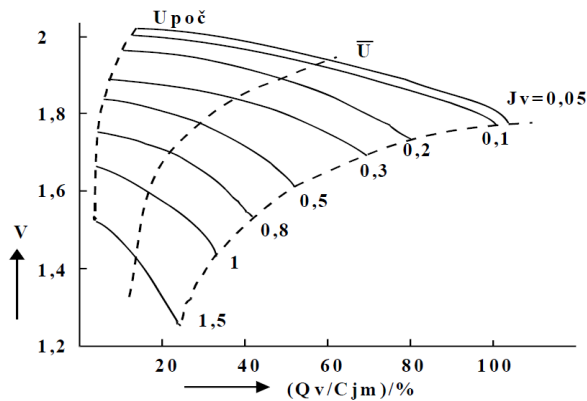
Při vybíjení reakce probíhá opačně. Aktivní hmota anody i katody se přeměňuje na síran olovnatý (PbSO_4) a v elektrolytu ubývá kyselina sírová a přibývá voda. Při vybíjení tedy klesá koncentrace elektrolytu a při nabíjení naopak roste. Pokles koncentrace kyseliny je přímo úměrný prošlému náboji, proto je měření hustoty elektrolytu vhodnou a přesnou metodou zjišťování stupně nabití akumulátoru. [15]



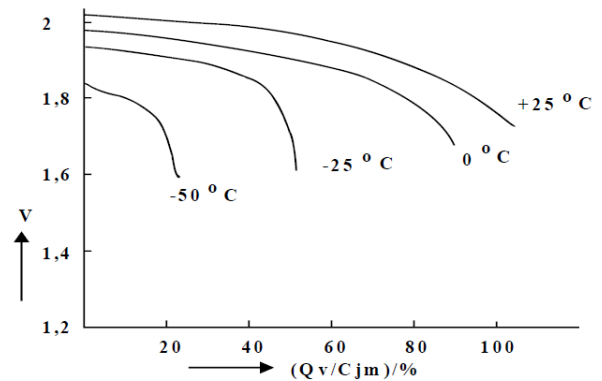
Obr. 2.2: Schematické zobrazení reakcí při vybíjení olověného článku (převzato z [16])

Jmenovité napětí olověného článku je 2 V a konečné vybíjecí napětí činí 1,75 – 1,8 V pro malé vybíjecí proudy a 1,25 – 1,4 pro velké vybíjecí proudy. Kapacita olověné baterie značně závisí na vybíjecím proudy. Největší kapacitu má baterie pro malý vybíjecí proud, který odpovídá 0,05 C (kapacity v ampérhodinách), pro proud 1,5 C dojde k poklesu kapacity na

hodnotu kolem 20 % (viz obr. 2.3). Podobné je to s teplotou kde při teplotě nad 0 °C způsobí pokles o 1 °C pokles kapacity o 0,6 – 0,7 % (viz obr. 2.4). Při nižších teplotách je pokles ještě vyšší. [15]



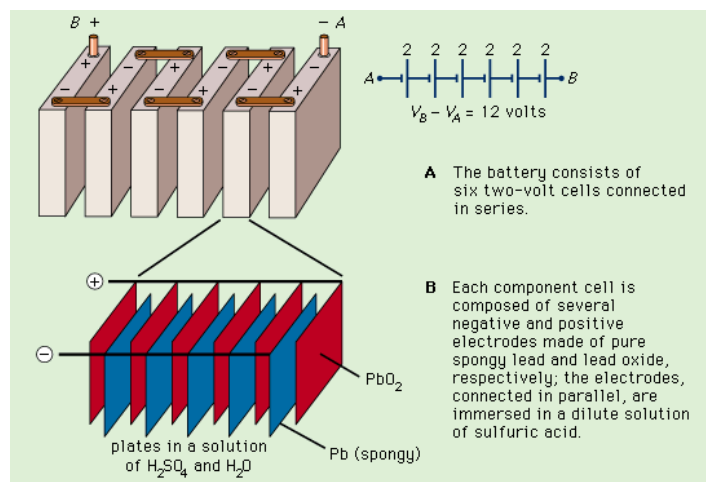
Obr. 2.3: Vybíjecí křivky pro různé proudy startovacího olověného akumulátoru (převzato z [15])



Obr. 2.4: Vybíjecí křivky při různých teplotách $I_N = 0,1$ (převzato z [15])

Olověné články jsou v dnešní době stále hojně používané, což je dáno zvláště nízkou cenou, spolehlivostí a dobrým výkonem. Podle konstrukce a použití se dají rozdělit do dvou skupin a to na startovací a trakční akumulátory.

Startovací akumulátory se skládají ze šesti olověných článků spojených sériově tak aby baterie dávala napětí 12 V. Jak je vidět na obr. 2.5, tak každý jednotlivý článek je uvnitř tvořen z více plátek záporné elektrody tvořené olovem a kladné elektrody tvořené oxidem olovičitým, které jsou vzájemně spojeny paralelně a to z důvodu maximalizace plochy a tím snížení vnitřního odporu R_i . To nám totiž umožní odebírat proudy ve stovkách ampérů, i když jen v řádu jednotek vteřin. Startovací autobaterie špatně snáší hluboké vybíjení, které urychluje rozklad elektrod. Startovacím bateriím rovněž vadí dlouhé setrvání ve vybitém stavu, což u nich způsobuje rychlou a nevratnou sulfataci. K té dochází řádově v několika dnech a spočívá ve vzniku krystalů síranu olovnatého na elektrodách což má za následek snížení napětí a proudu dodávaného akumulátorem a nárůst jeho vnitřního odporu. [17]



Obr. 2.5: Uspořádání článků v autobaterii (převzato z [18])

Trakční akumulátory mají odlišnou konstrukci elektrod než startovací akumulátory. Desky elektrod mají menší plochu a jsou silnější. To jim neumožňuje dodat extrémní proudy jako startovacím bateriím, ale mají nízký pokles napětí v celém rozsahu vybíjení. Na rozdíl od autobaterií jsou konstruovány na pravidelné hluboké vybíjení a méně jim vadí setrvání ve vybitém stavu. Používají se k pohonu např. vysokozdvizných elektrických vozíků a podobných zařízení. Dříve se používaly k pohonu elektromobilů, ale dnes jsou v těchto aplikacích vytlačovány modernějšími typy akumulátorů. [17]

Olověné akumulátory poháněly i slavný elektromobil EV1 od firmy General Motors zkušebně provozované od roku 1996 do roku 1999. Baterie, která poháněla EV1 první generace pracovala na napětí 312 V a při kapacitě 16,5 kWh vážila 500 kg. Vůz byl schopen ujet na jedno dobítí kolem 96 km. Druhá generace vozů EV1 dostala zpočátku větší 600kg olověnou baterii díky čemuž se její kapacita zvětšila na 18,7 kWh, což prodloužilo dojezd na 161 km. Později ale byla vyměněna za modernější NiMH baterii, která při napětí 343 V a kapacitě 26,4 kWh vážila pouze 520 kg a dojezd se s ní prodloužil dokonce na 257 km. [19]

Jak je vidět na příkladu s EV1 tak olověné akumulátory mají relativně malou hustotu energie vzhledem ke hmotnosti a jsou pro uplatnění v elektricky poháněných automobilech dávno překonané modernějšími typy článků. Jejich použití však bude vzhledem k nízké ceně i nadále velice časté, zejména v aplikacích kde nevedí jejich větší hmotnost.

Tab. 1: Základní parametry olověných článků [15,20]

U naprázdno	2,105 V
U jmenovité	2 V
U vybitého článku	1,75 V
efektivita nabíjení/vybíjení	50 - 90 %
životnost v cyklech	500 - 800
samovybíjení	3 – 20 % / měsíc

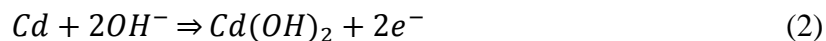
2.1.2 NiCd

Nikl-kadmiový akumulátor, byl objeven již na konci 19. století a r. 1899 na něj byl udělen patent W. Jungrovi.

Článek je tvořen vysoce porézními elektrodami, které mají co největší povrch, aby bylo docíleno snížení vnitřního odporu. Na rozdíl od jiných systémů, u NiCd článků nedochází při nabíjecích/vybíjecích reakcích k přenosu materiálu z jedné elektrody na druhou. Díky tomu má NiCd článek dlouhou životnost, protože aktivní materiály jeho elektrod nejsou během provozu spotřebovávány. Aktivním materiálem kladné elektrody je hydroxid oxidu niklu NiO(OH) a na záporné elektrodě je aktivním materiálem kadmium. Elektrody jsou odděleny separátorem a ponořeny do alkalického (zásaditého) elektrolytu. [21]

Chemické procesy v NiCd člancích [21]:

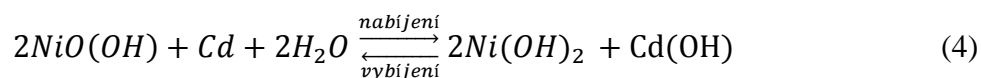
Vybíjení: Kadmiový kov jako aktivní materiál na nabitě záporné elektrodě během vybíjení oxiduje na hydroxid kademnatý $Cd(OH)_2$ a uvolňuje elektrony do vnějšího obvodu [21]:



Na kladné elektrodě je aktivním materiálem hydroxid oxidu nikelnatého (NiOOH). Ten při vybíjení přijímá elektrony z vnějšího obvodu a tím dochází k jeho redukci na $Ni(OH)_2$ [21]:



Souhrnná rovnice: Obrácené reakce probíhají při nabíjení. Zde je výsledná reakce probíhající v elektrolytu hydroxidu draselného (KOH) [21]:



Tab. 2: Základní parametry NiCd článku [21,22]

U naprázdno	1,35 V
U jmenovité	1,2 V
U vybitého článku	0,8 - 1,0 V
efektivita nabíjení/vybíjení	70 - 90 %
životnost v cyklech	2000
samovybíjení	10 % / měsíc

2.1.3 NiMH

NiMH akumulátory vychází ze starších NiCd akumulátorů a jsou jim jak konstrukčně tak některými elektrickými vlastnostmi velmi podobné. Záporná elektroda je zde však místo toxického kadmia vyrobena ze sloučeniny, která obsahuje slitinu kovu (lanthan, neodým, cer, titan, zirkon, nikl atd.) a vodík. Tato sloučenina kovu a vodíku se nazývá metal-hydrid. Kladná elektroda je tvořena hydroxidem oxidu niklu NiO(OH). Jako elektrolyt zde slouží hydroxid draselný KOH. [23]

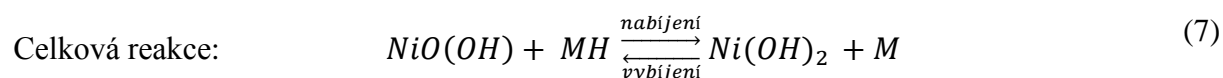
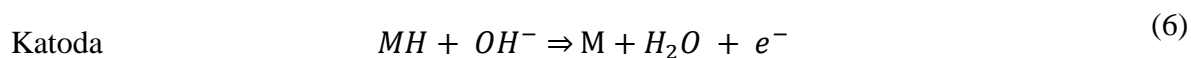
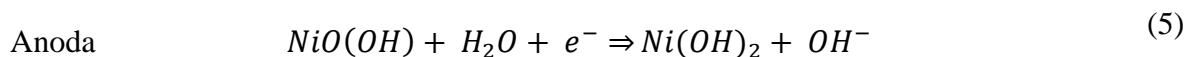
NiMH akumulátory dosahují o 30 – 40 % větší kapacity než běžné NiCd. Jsou méně citlivé na přebíjení a snesou teplotu až 60 °C. Dále jsou šetrnější k životnímu prostředí, protože mají menší obsah toxických kovů, které dosahují pouze 0,4 % celkové hmotnosti na rozdíl od NiCd kde je to přes 20 %. NiMH navíc neobsahují kadmium, které je velice škodlivé pro lidský organizmus. [23]

Oproti NiCd mají NiMH články několik nevýhod. Tou hlavní je asi životnost, která je řádově kolem 400 – 700 cyklů oproti několika tisícům u NiCd. Dále je to vysoká hodnota samovybíjení, která postihuje oba typy článků, ale u NiMH je vyšší kvůli únikům atomů vodíku. Maximální povolený vybíjecí proud je navíc menší než u NiCd, což nemusí být problém např. u mobilních telefonů a notebooků, ale může to být nevýhoda při použití v elektrických vozidlech. Jmenovité napětí je pouze 1,2 V což může být také v některých

aplikacích nevýhodné. Při teplotách nižších než 5 °C se baterie začínají tzv. „blokovat“, zdá se, že jsou bez energie, ale po ohřátí zase normálně fungují [24].

Chemické procesy v NiMH článcích [23]:

Vybíjení:



Tab. 3: Základní parametry NiMH článku [23,24]

U naprázdno	1,4 V
U jmenovité	1,2 V
U vybitého článku	1 V
efektivita nabíjení/vybíjení	66 %
životnost v cyklech	400 - 700
samovybíjení	30 % / měsíc

Zlepšení základních parametrů, ke kterému došlo při nahrazení olověných článků novějšími NiMH články, lze ukázat na příkladu elektromobilu EV1 druhé generace. To bylo zpočátku vybavené olověnou baterií s kapacitou 18,7 kWh o váze 600 kg, což odpovídá měrné hustotě energie 31,2 Wh/kg. Ta byla nahrazena NiMH baterií s kapacitou 26,4 kWh vážící 520 kg, odpovídající měrné hustotě energie 50,8 Wh/kg. Lze tedy přibližně říci, že pokles hmotnosti při použití NiMH akumulátoru oproti olověnému byl při stejné kapacitě 38,6 %. [19]

2.1.4 Li-Ion

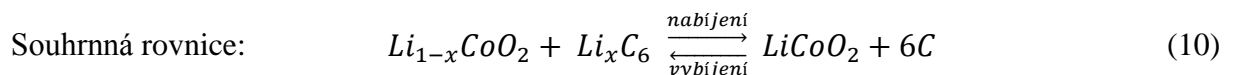
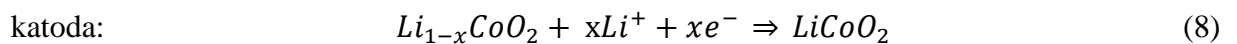
Lithium-iontové články jsou dalším stupněm vývoje akumulátorů. Oproti NiMH akumulátorům umožňují Li-Ion články uložit dvakrát až čtyřikrát více energie při stejném objemu [14].

Lithium jako prvek s velkým elektrochemickým potenciálem je předmětem zkoumání vědců již řadu let. První komerčně dostupné nenabíjecí lithiové články byly dostupné již na počátku sedmdesátých let. V osmdesátých letech probíhal vývoj sekundárních článků, který však nebyl zpočátku úspěšný a to díky vysoké oxidační reaktivitě lithia díky které byly články nestabilní a snadno explodovaly. To se podařilo vyřešit tím, že se místo čistého kovového lithia začaly používat méně reaktivní sloučeniny lithia. První Li-ion akumulátory začala prodávat firma SONY v r. 1991. [25]

Katoda se skládá z oxidu kovové slitiny, nejčastěji je to Li_2MnO_2 , LiCoO_2 a LiNiO_2 . Anoda je z grafitu a elektrolyt tvoří rozpouštědlo např. metyletylkarbonát a vodivá sůl např. LiPF_6 [25].

Chemické procesy v Li-ion člancích [25]:

Vybíjení



Konečné nabíjecí napětí je podle typu článku 4,1 nebo 4,2 V a i malé překročení tohoto napětí podstatně zkrátí životnost. Nabíjecí proud může mít hodnotu od 0,1 do 2 C, kde C se myslí jmenovitá kapacita článku. Bude-li mít článek kapacitu např. 900 mAh a povolený maximální nabíjecí proud bude 0,5 C, můžeme ho nabíjet proudem až 450 mA [25]. Po zahájení vybíjecího procesu napětí článku rychle poklesne na hodnotu 3,6 - 3 V (podle velikosti vybíjecího proudu) a na té se ustálí téměř po celou dobu vybíjení. Konečné vybíjecí napětí je udáváno mezi 3 - 2,5 V a je nutné, aby nikdy nekleslo pod tuto minimální hodnotu. Další pokles napětí by měl za následek v lepším případě zhoršení vlastností, v horším úplné zničení článku. [14]

Velkou nevýhodou tohoto článku je jeho stárnutí, které probíhá bez ohledu na to, jestli je akumulátor používán nebo ne. Přibližně po dvou letech pak dochází ke skokové změně kapacity přibližně na polovinu. [14]

Li-ion akumulátory jsou v dnešní době nepoužívanější u různých přenosných elektronických zařízení. Typicky jsou to baterie s kapacitami od 800 - 2000 mAh používané v mobilních telefonech, nebo větší baterie s kapacitami až 8000 mAh používané u notebooků.

Hybridní či elektrické automobily v současné době také již používají převážně Li-ion články, což se kladně projevilo především na snížení váhy akumulátorů oproti minulosti. Pro lepší představu uvedu opět příklad z praxe. Moderní elektromobil Nissan Leaf napájí Li-ion články s celkovou kapacitou 24 kWh vážící 294 kg. To odpovídá měrné hustotě energie 81,6 W/kg. Oproti NiMH akumulátorům použitým u vozu EV1 druhé generace v roce 1999, kde měrná hustota energie odpovídala 50,8 W/kg, se podařilo snížit měrnou hustotu energie a tedy váhu akumulátoru při stejné kapacitě o 37 %. [19,27]

Tab. 4: Základní parametry Li-ion článků [25,26]

U naprázdno	4,1 – 4,2 V
U jmenovité	3,6 V
U vybitého článku	2,5 - 3 V
efektivita nabíjení/vybíjení	50 - 90 %
životnost v cyklech	500 - 2000
samovybíjení	5 % / měsíc

2.1.5 Li-Pol

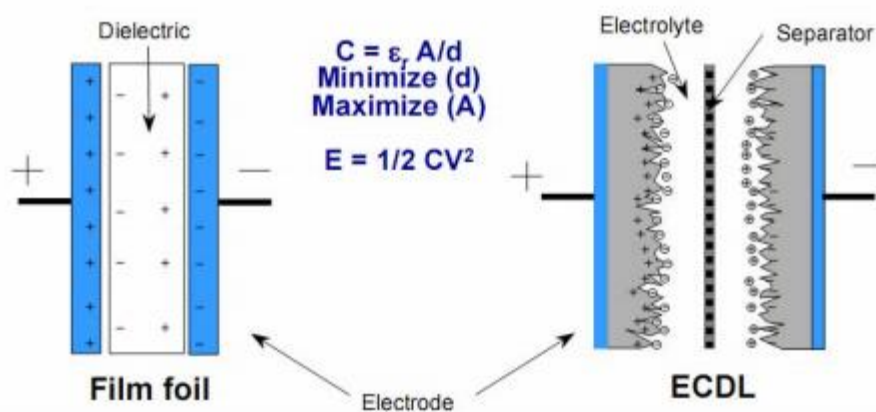
Mezi extrémně perspektivní zdroje v oblasti elektrických pohonů, bezpochyby patří i nové typy lithium-polymerových akumulátorů. Používá se u nich podobný systém jako u Li-ion článků, ale místo tekutého elektrolytu je zde speciální vodivý polymerní materiál. Mají stejně dobré, nebo podobné vlastnosti jako klasické Li-ion články. Jejich výhodou je nízká hmotnost a také možnost výroby akumulátorů takřka libovolného tvaru, což se vyplatí zejména u stále tenčích přenosných zařízení, jako jsou mobilní telefony nebo tablety. Mají nižší výrobní náklady než běžné Li-ion články což by do budoucna mohlo znamenat jejich zlevnění [23]. Negativní vlastností Li-Pol článků je zatím nízká životnost, kdy po přibližně 100 cyklech vybíjení poklesne kapacita o 15 – 20 %. [28]

Hyundai Motor Company má v plánu použití Li-Pol článků pro svoje hybridní a elektrické automobily. Konkrétně se například jedná o již představený model i10 electric, což by měl být

jejich první sériově vyráběný elektromobil určený do městského provozu. Ten by měl využívat Li-Pol baterie s kapacitou 16,4 kWh, které by měly být o 20 % menší, než v případě lithium-iontových článků, což usnadní jejich efektivní rozmístění ve voze. Díky nízké váze vozidla, která nepřesahuje jednu tunu, by měly stačit na 160 km jízdy. Dobití na 85 procent kapacity by mělo trvat pouze 15 min. [29]

2.2 Superkapacitory

V dynamických režimech jako je rekuperace při brzdění nebo akcelerace mají elektrochemické akumulátory problémy s nízkou účinností ukládání a výdeje elektrické energie. Superkapacitor naproti tomu ukládá energii přímo v elektrické formě a na rozdíl od elektrochemické přeměny energie v akumulátorech zde může probíhat ukládání i výdej energie podstatně rychleji a s vyšší účinností. Superkapacitor není sice schopný uložit tak velké množství energie jako běžné akumulátory, ale jeho výhodou je vyšší pohotovost díky rychlejšímu dobíjení a mnohonásobně vyšší životnost. Ideálně se používá tam, kde potřebujeme nárazově dodávat a ukládat špičkové proudy. Proto se kapacitor používá v kombinaci s klasickým akumulátorem, kde snižuje špičkový odběr proudu z akumulátoru a umožňuje výrazně efektivnější využití energie během rekuperace. [30]



Obr. 2.6: Struktura běžného kondenzátoru (vlevo) a superkondenzátoru (vpravo), (převzato z [30])

V principu je superkapacitor elektrolytický kondenzátor vyrobený technologií založenou na tzv. elektrochemické dvouvrstvě tak, aby dosahoval kapacity v řádu stovek až tisíců faradů a současně byl schopen rychlého nabíjení a vybíjení. Důležitou součástí superkapacitoru představuje vrstva aktivního uhlíku, jenž je nanášena na vnitřní stranu hliníkových elektrod, tvořených hliníkovou fólií. Aktivní uhlík je tvořen malými částicemi, které v celém jeho

objemu tvoří vysoce porézní povrch, jehož plocha je značná. Uvádí se hodnota až 2000 m² na jeden gram prášku. Aktivní uhlík se vyrábí z uhlíkového aerogelu nahrazením tekuté složky vzduchem. Dále se používají též uhlíkové polymery a v budoucnu se počítá s použitím uhlíkových nanotrubic. Elektrody superkapacitoru jsou odděleny separátorem, který tvoří polypropylenová fólie a jsou obklopeny tekutým, nebo gelovým elektrolytem. Tloušťka dielektrika (el. dvouvrstvy) je velmi malá, řádově 10⁻¹⁰ m. Díky obrovské ploše a velmi malé vzdálenosti elektrod je docíleno schopnosti superkapacitoru vázat velké množství náboje. Určitá daň za tuto vlastnost je poměrně malé provozní napětí, jehož hodnota se kvůli možnému průrazu pohybuje pouze okolo 2,3 – 2,7 V. Proto je nutné pro větší napětí řadit superkapacity do série. [30]

V porovnání s akumulátory má superkapacitor vyšší výkonovou hustotu, ale několikrát menší energetickou hustotu viz tab. 5.

Tab. 5: Srovnání olověného akumulátoru, elektrolytického kondenzátoru a superkapacitoru [25]

	Olověný akumulátor	superkapacitor	Elektrolytický kondenzátor
Nabíjecí doba	1 - 6 h	0,3 - 30 s	10-3 až 10-6 s
Vybíjecí doba	0,3 - 3 h	0,3 - 30 s	10-3 až 10-6 s
Energetická hustota[Wh/kg]	10 - 100	1 - 10	< 0,1
Výkonová hustota[W/kg]	<1000	< 10000	< 100 000
Počet cyklů	1000	> 500000	> 500 000
Účinnost	0,7 - 0,85	0,85 - 0,98	> 0,95

2.3 Setrvačníky

Setrvačnick pracuje na využití energie rotující hmoty a v budoucnu by se mohl stát jedním z perspektivních způsobů krátkodobého uložení energie. Typický setrvačnick pro použití v automobilu má hmotnost např. 20 kg průměr 30 cm a otáčky 60000/min. Základní problémy jsou dobré vyvážení hmot setrvačnicku, uložení hřídele a aerodynamický odpor. V dnešní době jsou však tyto problémy do velké míry vyřešené např. rotací setrvačnicku ve vakuu, nebo umístěním osy rotace svisle ke směru jízdy atd. [31]

V minulosti byly zkušebně provozovány autobusy na čistě setrvačnickový pohon tzv. gyrobusy. Princip spočíval v tom, že gyrobus se na každé zastávce připojil k napájecímu stožáru a pomocí proudu ze sítě byl urychlen setrvačnick, který poskytoval dostatečné množství energie na ujetí několika dalších kilometrů k další zastávce s nabíječkou. Nicméně

dnes se setrvačnick jako hlavní akumulátor energie považuje za přežitý hlavně kvůli nízkému akčnímu rádiusu (cca 2 km) a připoutání na síť stanic. [32]

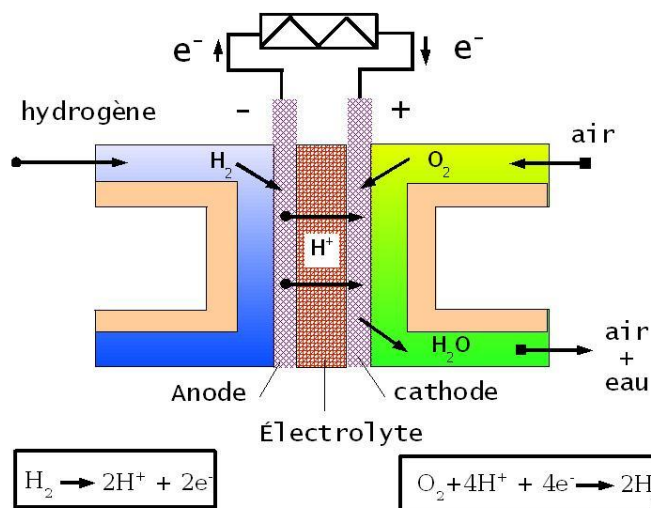
Jako velmi perspektivní se v dnešní době jeví tzv. elektromechanická baterie což je kombinace elektrického a gyroskopického pohonu. Ta je schopna krátkodobě a efektivně uložit velké množství energie vzniklé např. při rekuperaci tím, že pomocí elektrické energie roztočí setrvačnick a ten později opět svojí mechanickou energii přemění na elektrickou. Podobně jako superkapacitor by při nerovnoměrném pohybu vyrovnávala špičkové nabíjecí a vybíjecí proudy. [31]

Setrvačnick jako akumulační prvek má celou řadu výhod. Nízké výrobní náklady, spolehlivý provoz i při nízkých teplotách a životnost srovnatelnou s celkovou životností vozidla. [31]

2.4 Palivové články

Palivový článek je zdroj elektrické energie, který přeměňuje přímo chemickou energii paliva a kysličovadla na elektrickou energii. Je to galvanický článek skládající se ze dvou elektrod, které jsou odděleny elektrolytem nebo membránou. Na rozdíl od akumulátorů nejsou u palivových článků aktivní chemické látky součástí elektrod, ale jsou na elektrody neustále přiváděny. [33]

Na anodu je přiváděno palivo, což bývá obvykle vodík a ke katodě oxidant nejčastěji ve formě kyslíku. Reakce, která v článku probíhá je opačnou reakcí elektrolýzy vody. Vodík je na anodě přeměněn na kationty H^+ . Uvolněné elektrony jsou navázány anodou a vytváří elektrický proud, proudící přes napájený obvod ke katodě. Poté dochází k redukci kyslíku na anionty O^2 a ty poté reagují s H^+ ionty a přeměňují se na vodu. Elektrody jsou nejčastěji tvořeny kovem a mohou být potaženy katalyzátorem (platinou, palladiem), což zvyšuje účinnost článku. Vznikající napětí se u dnes běžných článků pohybuje okolo 0,5 – 0,95 V. [34]



Obr. 2.7: Schematické vyjádření dějů v palivovém článku (převzato z [33])

Výhodou palivových článků je, že mohou fungovat tak dlouho jak dlouho bude zajištěn přívod paliva a oxidantu. Oproti akumulátorům tak jsou schopny zajistit dostatečný dojezd elektromobilů. Další výhodou je ekologický provoz, jehož odpadním produktem je pouze voda. Vodík může být získán stejně jako elektřina z různých zdrojů a na rozdíl od elektřiny může být dlouhodoběji skladován. Skladování vodíku v automobilových nádržích ale ještě stále není dostatečně vyřešeno a nádrž s vodíkem představuje bezpečnostní riziko, protože vodík tvoří se vzduchem výbušnou směs. Problém s dlouhodobým skladováním vodíku spočívá v netěsnosti nádrží. To je způsobeno malými rozměry molekuly vodíku, které jsou srovnatelné s mezimolekulárními rozměry materiálu nádrže. Z tohoto důvodu nelze nádrže dokonale utěsnit. [34]

3 Přehled typů používaných elektromotorů

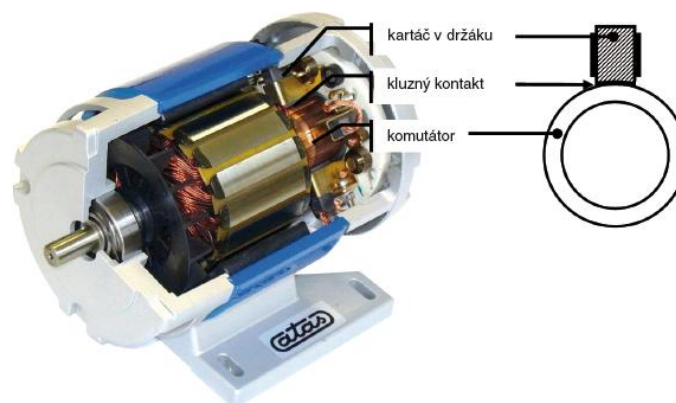
Motorů, které se svými vlastnosti hodí pro použití v hybridním pohonu automobilů je celá řada. Jedním z hlavních parametrů elektrického motoru je hodnota záběrného momentu, který bývá zpravidla nejvyšší v nízkých otáčkách a s rostoucími otáčkami klesá. Použití vhodného elektromotoru s vysokou hodnotou momentu v širokém rozmezí otáček v případě např. sériového hybridu může ušetřit nutnost použití převodovky. S rostoucím výkonem však roste váha i zástavbová velikost, a tak se často jeví jako vhodné zkombinovat menší elektromotor s víceúrovňovou převodovkou. Ta může mít díky schopnosti elektromotorů snášet přetížení redukovaný počet stupňů. Další důležitou vlastností je bezúdržbový provoz a spolehlivost. [8]

3.1 Stejnosměrné komutátorové motory

Jedná se o nejstarší druh elektromotorů, které byly dříve široce používané díky jejich snadné regulaci. Stator stejnosměrného motoru se skládá z hlavních a pomocných (komutačních) pólů. Počet těchto pólů nesouvisí s rychlostí stroje tak jako u střídavého motoru. Ty mohou být tvořené masivními cívkami, neboť zde nepůsobí střídavé magnetické pole a není nutné omezovat ztráty vířivými proudy, a na nich se nachází budící vinutí. Do výkonu 20 kW jsou stejnosměrné stroje konstruovány s permanentním buzením a budící statorové cívky jsou nahrazené permanentními magnety [35]. Rotor se skládá z ocelového hřídele a svazku rotorových plechů nalisovaných na něm. V drážkách rotoru jsou umístěné závity vinutí připojené na lamely komutátoru, na který dosedají kartáče, přes které je vinutí napájeno. Komutátor zajišťuje přepínání směru proudu vedeného do rotorových cívek tak, aby byla napájena vždy cívka pod aktivním pólem a byla dosažena co největší účinnost stroje.

Komutátor jako kluzný kontakt omezuje maximální otáčky motoru, vyžaduje pravidelnou údržbu a může se stát zdrojem poruchy z důvodu opotřebení. To jsou také hlavní důvody, proč se již od stejnosměrných motorů z velké části upustilo.

Výhoda stejnosměrných motorů pro elektrický pohon automobilů spočívá zvláště v tom, že mohou být napájeny stejnosměrným napětím přímo z baterie bez nutnosti použití napěťových střídačů [1]. Jeho maximální otáčky jsou omezené na přibližně 7000 ot. / min, takže při aplikaci k pohonu automobilu je nutné použití víceúhňové převodovky [8]. S rozvojem polovodičové techniky a nástupem a frekvenčních měničů se však od jejich použití ve velké míře upustilo [3].



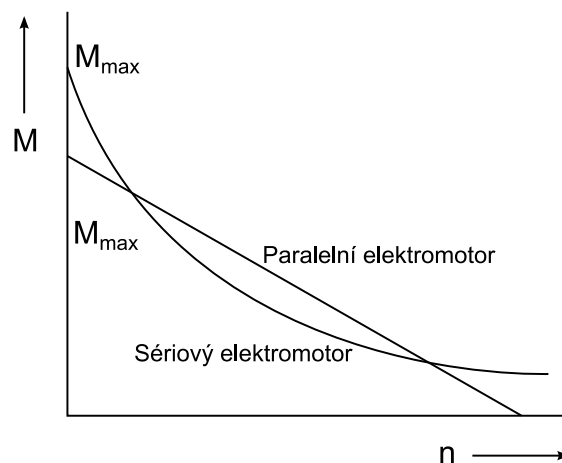
Obr. 3.1: Kluzný kontakt v komutátorovém motoru (převzato z [36])

3.1.1 S cizím buzením

U tohoto motoru je budící vinutí napájeno z cizího zdroje, nebo se může jednat o motory s permanentními magnety [35]. Regulace probíhá změnou napětí rotoru a velikosti budícího proudu nezávisle na sobě [3]. Jeho momentová charakteristika je podobná jako u paralelního (derivačního) motoru, ale má stabilnější otáčky při proměnlivém zatížení [35].

3.1.2 Sériové

Budící vinutí je u tohoto motoru zapojeno sériově s vinutím kotvy, takže velikost buzení závisí na zatížení stroje [3]. Ze všech typů stejnosměrných motorů mají sériové největší rozběhový moment [35]. Má ale velice měkkou momentovou charakteristiku, takže s rostoucími otáčkami moment rychle ztrácí. Sériový motor nesmí běžet bez zátěže, protože dochází k prudkému nárůstu otáček, které může vést k poškození stroje.



Obr. 3.2: Průběh momentů v závislosti na otáčkách sériového a paralelního motoru [1]

3.1.3 Paralelní

Obvod budícího vinutí i kotvy je připojen paralelně ke zdroji přes samostatné regulační prvky. To umožňuje snadnou a plynulou regulaci, ale v menším rozsahu než cize buzené motory. [8]

3.1.4 Kompaudní

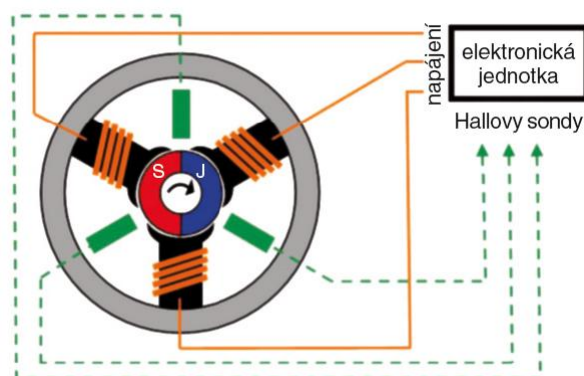
Kompaudní nebo také sério-paralelní motory tvoří přechod mezi stejnosměrně a paralelně buzenými motory. Část budícího vinutí je zapojené v sérii a část paralelně s vinutím kotvy. Sériová část vinutí zvětšuje moment při nízkých otáčkách a derivační omezuje otáčky na prázdko. Kompaudní stroje se snadněji regulují a mají příznivější momentové charakteristiky

než střídavé stroje. Mají ale při stejné velikosti nižší výkon, vyžadují údržbu a jsou dražší. [8]

3.2 BLDC motory

BLDC je zkratka, která pochází z anglického BrushLess DC motor neboli bezkartáčový stejnosměrný motor. Formálně patří sice mezi stejnosměrné motory, nicméně se od nich zásadně liší především absencí mechanického komutátoru a z toho vyplývajících omezení, způsobem regulace a tím, že je v současné době v popředí zájmu i co se týče jeho uplatnění v pohonu automobilů. Proto jsem se ho rozhodl zařadit do zvláštní kategorie.

BLDC řeší problematiku komutace tzv. elektronickou komutací. Nejedná se však o řešení klasické komutace vnějšími elektronickými systémy, ale interní elektronickou jednotkou, která je nedílnou součástí BLDC motoru a ta řídí napájení jednotlivých vinutí statoru. Činnost elektronického systému se sice nazývá elektronickou komutací, ale není zde žádná spojitost s provozem kluzného kontaktu. Uspořádání BLDC motoru je vzhledem ke komutátorovému stroji obrácené. Zatímco u tradičního stejnosměrného motoru je budicí část (elektromagnetické buzení nebo permanentní magnety) pevná a rotuje vinutí napájené přes kartáče a komutátor, u BLDC motoru je situace opačná. BLDC motor má totiž napájené vinutí statoru a rotuje budič osazený permanentními magnety. Motor je tedy svým konstrukčním uspořádáním podobný spíše synchronnímu stroji s permanentními magnety. Integrovaná elektronická jednotka motoru přepíná jednotlivá vinutí statoru v závislosti na aktuální poloze rotoru a požadovaných vlastnostech motoru. Informace od zpětné vazby zpracovává mikroprocesor, který generuje data pro spínání výkonových FET tranzistorů. U malých motorů se pro určení úhlového natočení rotoru používají Hallovy sondy. [36]



Obr. 3.3: Principiální uspořádání BLDC motoru (převzato z [36])

Vzhledem ke skutečnosti, BLDC již obsahuje elektronickou jednotku s výkonným mikroprocesorem, odpadá tím nutnost řešení regulace pomocí přídavných zařízení, a tudíž to nezvyšuje cenu motoru. Integrovaná elektronická jednotka navíc umožňuje kromě regulace otáček také ochranu proti přehřátí, přetížení a přepólování. Regulace motoru je možná prostou změnou napájecího napětí. Účinnost neklesá v celé pracovní oblasti pod 80 % a momentová přetížitelnost může být až 100 %. Životnost BLDC není přirozeně omezena komponenty kluzného kontaktu jako je tomu u komutátorových motorů. BLDC se dají použít všude kde je napájecí napětí stejnosměrné. Jsou tedy velice perspektivní i pro použití v hybridních automobilech. [36]

3.3 Asynchronní motory

Asynchronní (indukční) motory jsou široce používané střídavé motory. Základní princip je jednoduchý. Motor se skládá z budícího vinutí statoru a rotoru tvořeného klecovým vinutím spojeným na koncích vodičů do krátkého (kotva nakrátko). Tři cívky statorového vinutí jsou rozmístěny po vnitřním obvodu statoru a jsou vůči sobě pootočené o 120°. Na každou cívku je připojena jedna fáze třífázového napájení kdy harmonické průběhy napětí jednotlivých fází jsou také vzájemně fázově posunuta o 120°. Ve vinutí statoru tak vzniká točivé magnetické pole, které indukuje do vinutí statoru proud. Proud v rotoru začne vytvářet stojaté pulzující magnetické pole. Tyto dvě pole na sebe začnou působit silou a tím vznikne pohyb.

Název „asynchronní“ je odvozen od toho, že rotor svými otáčkami zaostává za synchronními otáčkami magnetického pole. Synchronní otáčky závisí na počtu pólů a frekvenci a počítají se podle vztahu [3]:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad [\text{ot. / min}] \quad (11)$$

kde: p – počet pólových dvojic, f – frekvence napájecího napětí.

Rozdíl mezi synchronními otáčkami a skutečnými otáčkami rotoru se nazývají skluz. Ten se spočítá podle vztahu [3]:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

kde: n_s – jsou synchronní otáčky magnetického pole, n – jsou skutečné otáčky rotoru.

Regulace otáček je možná několika způsoby [37]:

1) změnou skluzu

To je možné u motorů s kroužkovou kotvou a to zařazením regulačního rezistoru do každé fáze vinutí rotoru. Je to ale nevhodný a překonaný způsob řízení otáček.

2) změnou velikosti napájecího napětí

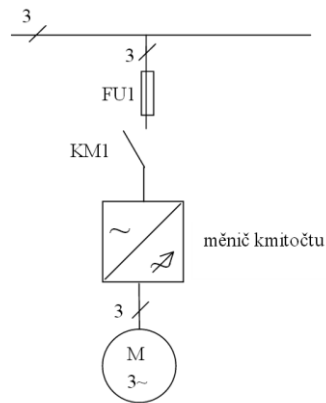
Změnou velikosti napájecího napětí se mění momentová charakteristika a při daném zatěžovacím momentu se mění i otáčky. Toto řízení je nevhodné pro motory s klecovou kotvou kvůli nízkému rozsahu regulace.

3) změnou frekvence napájecího napětí

Tento způsob regulace je vhodný pro motory s klecovým rotorem a jedná se o hospodárné a moderní řízení otáček, které je široce využíváno. Mezi řízený motor a napájecí síť je zapojený trojfázový měnič kmitočtu, který může být v provedení:

- přímého měniče kmitočtu tzv. cyklokonvertoru

- nepřímého měniče kmitočtu skládajícího se z usměrňovače (šestipulzního diodového můstku) a střídače osazeného bipolárními tranzistory s izolovaným hradlem (IGBT)



Obr. 3.4: Schéma řízení otáček motoru změnou kmitočtu (převzato z [37])

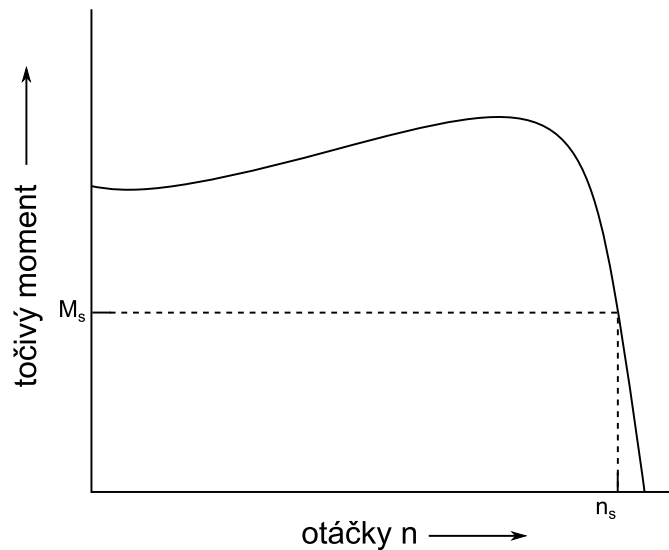
4) změnou počtu pólů

Budící vinutí takového motoru musí být rozděleno na skupiny, které se přepojují tak, aby vzniklo magnetické pole o různých počtech pólů. Prakticky se používá např. přepínání ze 2 na 4 póly (3000 / 1500 otáček). Rotor bývá klecový a v případě že je vinutý, musí se přepínat vinutí i na něm. Tato regulace probíhá jen skokově a je použitelná např. při regulaci rychlosti větráků.

Asynchronní motor se provádí ve dvou základních provedeních a to s klecovým rotorem a kroužkovým rotorem. Klecový rotor je složen z tlustých hliníkových, nebo měděných tyčí na koncích spojených nakrátko. Vnitřek je vyplněn neorientovanými transformátorovými plechy. Kroužkový rotor je naproti tomu opatřen trojfázovým vinutím uloženým v drážkách magnetického obvodu, které se vždy spojují do hvězdy. Volné konce vinutí rotoru spojeného do hvězdy se vyvedou na tři vzájemně izolované kroužky, na které dosedají uhlíkové kartáče, ze kterých je vinutí rotoru napájeno. Takové provedení asynchronního motoru přichází o výhody plynoucí z absence kluzného kontaktu. Používá se však pro výrobu generátorů, které pracují samostatně bez připojení na síť. Mnohem častěji se ale používají motory s klecovou kotvou. [3]

Oproti klasickým stejnosměrným motorům jsou asynchronní motory při stejném výkonu menší a lehčí a lze u nich počítat s výkonovou hmotností přibližně 1 kg/kW. Další výhodou je absence komutace jako takové a v případě motoru s klecovým rotorem i absence jakéhokoliv kluzného kontaktu. Motor s klecí nakrátko má výhodu jednodušší konstrukce, bezúdržbového

chodu a silné přetížitelnosti. Může pracovat až při 20 000 otáčkách za minutu takže v případě pohonu vozidla nemusí být použita vícestupňová převodovka. [8]

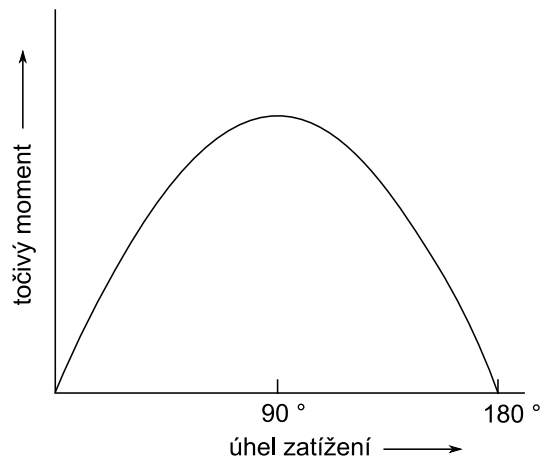


Obr. 3.5: Momentová charakteristika asynchronního motoru [35]

3.4 Synchronní motory

Stator synchronních strojů má stejnou konstrukci jako u asynchronních. Na svazku statorových plechů je uloženo trojfázové vinutí, potřebné k vytváření točivého magnetického pole. Rozdíl je v konstrukci rotoru. Magnetické jádro může být masivní nebo složené z plechů a na něm je umístěné budící vinutí, napájené přes sběrné kroužky stejnosměrným proudem. Rotor působí jako elektromagnet, který má stejný počet pólů jako stator. U motorů menších výkonů může být rotor složený z permanentních magnetů. [35]

Na rozdíl od asynchronního motoru se rotor otáčí stejnou (synchronní) rychlostí jako magnetické pole a zaostává za ním o tzv. úhel zátěže. S rostoucím zatížením se zvětšuje úhel zátěže a roste točivý moment. U dvoupólového motoru je maximální při úhlu zátěže 90° , při dalším nárůstu úhlu točivý moment klesá (viz obr. 3.6). Synchronní motory mají tzv. momentu zvratu, při jehož překročení motor vypadne ze synchronismu a zastaví se. [35]



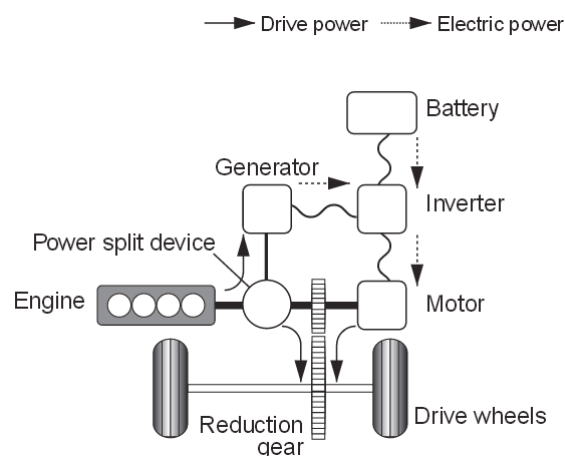
Obr. 3.6: Závislost točivého momentu na úhlu zatížení [35]

Řízení rychlosti synchronních motorů se dnes již výhradně provádí změnou frekvence pomocí frekvenčních měničů, což řeší i problémy s jejich rozběhem.

3.5 Aplikace v hybridních automobilech

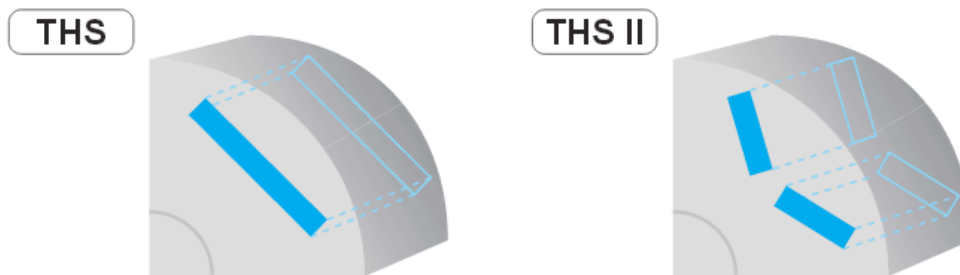
3.5.1 Toyota

Toyota jako první začala s masovou produkcí hybridních vozů již v roce 1997 s uvedením první generace modelu Prius na trh. Od té doby prodala již více než pět milionů kusů hybridních automobilů z toho přibližně 70 % jenom tohoto modelu. Jenom za rok 2012 prodala 1 milion hybridních vozů. [38] Svůj systém hybridního pohonu nazývá od roku 2006 Hybrid Synergy Drive (HSD), ten vznikl přejmenováním původního názvu Toyota Hybrid System (THS). Schéma fungování tohoto systému je na obr. 3.7 a jedná se o kombinaci sériového i paralelního uspořádání. [39]



Obr. 3.7: Schéma hybridního systému THS (převzato z [39])

Toyota používá pro pohon svých klasických hybridů třífázový synchronní motor s permanentními magnety pro jeho kompaktnost, nízkou váhu a vysokou efektivitu. U těch se podařilo zvýšit krouticí moment umístěním permanentních magnetů v rotoru do tvaru písmene „v“ (viz obr. 3.8), což zaručuje optimální úhel mezi magnetickým polem statoru a magnety. [40]



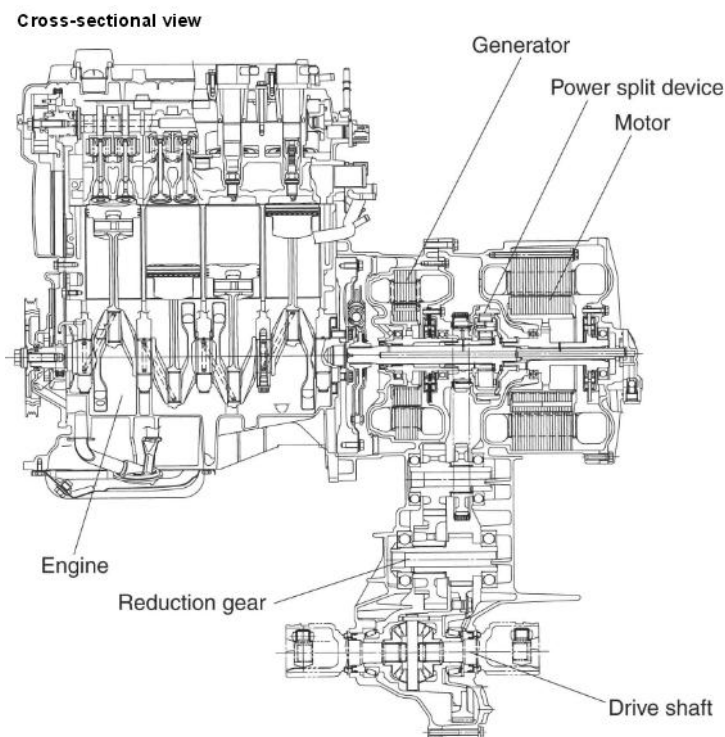
Obr. 3.8: Způsob rozmístění permanentních magnetů v rotoru (převzato z [39])

Jako generátor používá Toyota opět střídavý synchronní stroj, který je ale optimalizovaný pro generátorický chod v kombinaci se spalovacím motorem. Díky speciální konstrukci rotoru má vyšší maximální otáčky a je tak schopen dodávat větší výstupní výkon. [39]

Pro své plug-in hybridy používají jak střídavé synchronní, tak bezkartáčové stejnosměrné motory, ale podrobnější informace o konkrétních aplikacích Toyota již neuvádí. BLDC motory jsou navíc často v angličtině označovány jako synchronní a tak je těžké odlišit, kdy se jedná skutečně o synchronní a kdy o BLDC stroj. Navíc jak již bylo řečeno, co se týče konstrukce, není mezi těmito dvěma druhy motorů téměř žádný rozdíl. Oba druhy mají díky použití silných neodimiových permanentních magnetů a jejich optimálnímu uspořádání v rotoru velký krouticí moment a jeden z nejlepších možných poměrů výkonu k váze. [40]

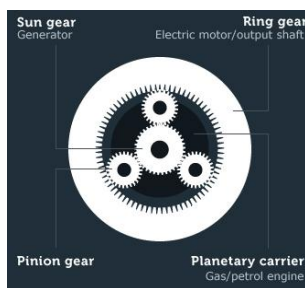


3.9: synchronní motor Toyota (65kW, 207Nm) (převzato z [40])



3.10: Boční řez systémem THS II (převzato z [39])

Na obr. 3.10 můžeme vidět způsob uspořádání hybridního pohonu Toyota Hybrid System a na obr. 3.11 způsob propojení jednotlivých prvků systému pomocí planetové převodovky, která je na obr. 3.12 označena jako Power split device.

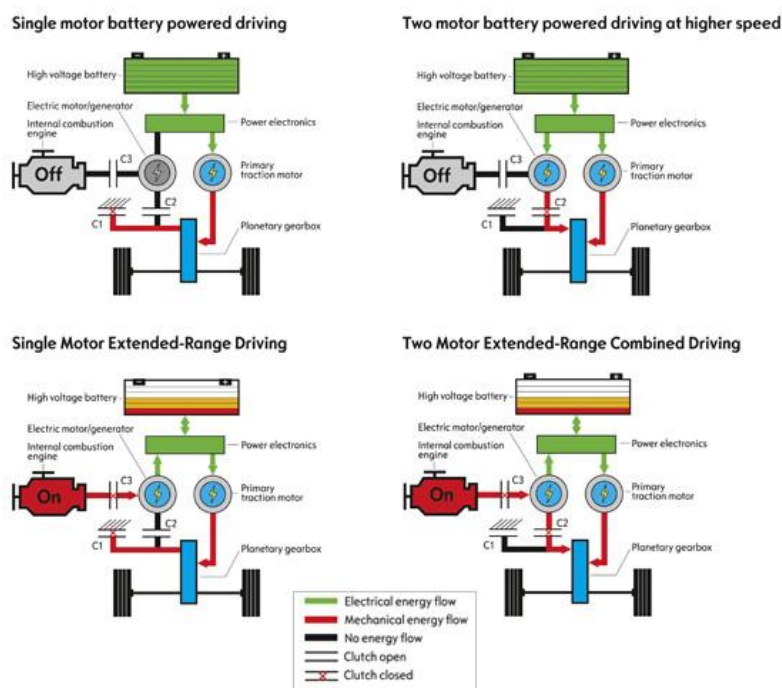


Obr. 3.11: Planetová převodovka (převzato z [40])

Navzdory současnému hromadnému využívání motorů s permanentními magnety Toyota do budoucna počítá s přechodem na indukční motory. Tím chce snížit svoji závislost na Číně, která ovládá 90 procent světového trhu s kovy. Čína dlouhodobě snižuje vývozní kvóty a to se projevuje růstem cen některých kovů jako např. neodym nebo dysprosium, které se používají pro výrobu permanentních magnetů. Toyota si slibuje od nových motorů rovněž snížení hmotnosti a vyšší účinnost. [42]

3.5.2 General Motors

Opel Ampera v zámoří prodáváný jako Chevrolet Volt (obě automobilky patří pod GM) je také velice prodáváným hybridním vozem a jedním z průkopníků plug-in hybridů neboli elektromobilů s rozšířeným dojezdem. Hybridní systém se zde skládá ze tří spojek, dvou elektrických strojů (motor a generátor) planetové převodovky a spalovacího motoru. Tento systém elektrického hybridního pohonu se nazývá Voltec a princip jeho fungování můžete vidět na obr. 3.12.



Obr. 3.12: Schéma systému hybridního pohonu Voltec (převzato z [43])

Také v Opel Ampera se používá jak v případě motoru tak i generátoru synchronní stroj s permanentními magnety [43].

3.5.3 Ostatní výrobci

Většina automobilek nechce zůstat pozadu za konkurencí a tak přichází na trh s vlastním řešením hybridního pohonu, kterému dá obvykle vlastní marketingový název. Ve skutečnosti se pak téměř vždy jedná o paralelní hybridní pohon a liší se pouze detaily. Kompletní výčet používaných hybridních systémů, potažmo elektromotorů, by byl pouze opakováním stále toho samého, a proto zde uvedu pouze několik příkladů za všechny.

Hyundai například pro svůj hybridní model Sonata využívá systém pohonu, který pojmenoval Blue Drive, ale ve skutečnosti se jedná pouze o plně hybridní paralelně uspořádaný pohon. Použitý elektromotor se opět omezuje na synchronní stroj s permanentními magnety a jedinou odlišností oproti zaběhlému trendu je použití baterie skládající se z moderních lithium-polymerových článků. [44]

Bmw svojí technologii říká Active Hybrid a opět se jedná „pouze“ o paralelní hybrid se synchronním elektromotorem a Li-ion články. [45]

Ford má ve své nabídce dva hybridní vozy a těmi jsou Ford C-MAX a Fusion hybrid. Ani Ford nevybočuje ze široce zavedené koncepce, kterou je použití synchronního motoru a Li-ion akumulátorů. [46]

Závěr

Hybridní pohony jsou dnes v kurzu a žádná z automobilek nechce zůstat pozadu. Zejména v USA je to v dnešní době veliký trend a díky masivním dotacím od státu tam dnes jezdí velké množství hybridních automobilů. Co se týče koncepce hybridních pohonů tak převládá paralelní uspořádání pro relativní jednoduchost implementace do již existujících vozů. U nově vyvíjených typů se obvykle volí smíšená konstrukce, která umožňuje dosáhnout lepších parametrů hybridního pohonu. Vývoj článků zejména lithium-iontových umožnil sice zmenšit baterie, limitující je však jejich cena a omezená životnost. Masová produkce výkonových baterií zase povede k závislosti na dalším nedostatkové surovině tedy lithiu. Koncepce elektrických motorů se zdá být sjednocená, protože všichni výrobci do svých hybridních aut používají synchronní motory s permanentními magnety. Ty mají výhodu ve větší hustotě výkonu vzhledem k rozměrům motoru. V budoucnu se tento trend může změnit z důvodu narůstajících cen kovů používaných pro výrobu permanentních magnetů a výrobci se možná začnou přiklánět spíše k indukčním motorům. Díky rozvoji řídicí elektroniky už je dnes použití klasických trakčních komutátorových motorů dávno překonané a nedá se předpokládat, že by se vývoj ubíral tímto směrem. Elektrické motory jsou ale dnes obecně již na vysoké úrovni a všechny pracují při správné regulaci s vysokou účinností. Limitujícím faktorem jsou spíše a vždycky byly zdroje elektrické energie. Zde sice vývoj znatelně pokročil, ale je to spíše evoluce než revoluce. Do budoucna bude nutné vyvinout typ článku, který nebude využívat nedostatkové suroviny nebo se vývoj přesune na palivové články, které

jsou díky energetické hustotě vodíku a různým možnostem jeho výroby perspektivní již dnes. Bude ale nutné vyřešit technické obtíže s jeho skladováním. Možná že nahrazování spalovacích motorů nepůjde tak rychle jak se předpokládalo, ale myslím si, že se první krok již udělal a tyto pokrokové koncepce se začínají postupně uplatňovat stále více v automobilové dopravě.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KAMEŠ, Josef. *Alternativní pohony automobilů*. 1. vyd. Věšínova 5, Praha 10: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-127-6.
- [2] Spalovací motor: Účinnost. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-06-03]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Spalovac%C3%AD_motor
- [3] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, Anna KOTLANOVÁ a Bohumil SKALA. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Západočeská univerzita v Plzni katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky: Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 8, 306 14 Plzeň, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [4] Vývoj počtů vozidel a dopravních výkonů - Osobní automobily + dodávkové vozy. In: [online]. [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.czrso.cz/clanky/vyvoj-poctu-vozidel-a-dopravnich-vykonu-osobni-automobily-do-#!prettyPhoto>
- [5] Elektrobuses EBN_10_5_v_DP_Ostrava_DPO. In: [online]. [cit. 2013-06-03]. Dostupné z: http://www.busportal.cz/bpextend/elmob/Elektrobuses_EBN_10_5_v_DP_Ostrava_DPO.ppt
- [6] Ostrava testuje elektrobuses na trolejbusové lince. [online]. [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/ostava-testuje-elektrobuses-na-trolejbusove-lince>
- [7] Sériový hybrid. HORČÍK, Jan. *Hybrid.cz: Magazín o budoucnosti dopravy* [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/slovnicek/seriovy-hybrid>
- [8] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: František Vlk, 2004, 234 s. ISBN 80-239-1602-5.
- [9] PAVLŮSEK, Ondřej. Opel Ampera: Technická data sériového vozu. In: *Auto.cz* [online]. 2011 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/opel-ampera-technicka-data-serioveho-vozu-54684>
- [10] HORČÍK, Jan. TEST: Toyota Prius plug-in hybrid - dokonalé auto do zásuvky. In: *Hybrid.cz: Magazín o budoucnosti dopravy* [online]. 2012 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/test-toyota-prius-plug-hybrid-dokonale-auto-do-zasuvky>
- [11] Technologie: Systém „Stop & Start“ (1. část). In: *Toyota* [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: http://www.toyota.cz/cars/new_cars/toyota_tech/stop_start1.tmex
- [12] HORČÍK, Jan. Mikrohybrid, plug-in nebo asistovaný? Uděláme vám v autech jasno!. In: *Hybrid.cz: Magazín o budoucnosti dopravy* [online]. 2011 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/mikrohybrid-plug-nebo-asistovany-udelame-vam-v-autech-jasno>
- [13] HORČÍK, Jan. Mild hybrid. In: *Hybrid.cz: Magazín o budoucnosti dopravy* [online]. 2009 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/slovnicek/mild-hybrid>
- [14] Lithiové akumulátory velkých výkonů a jejich použití. *Elektro* [online]. 2005, č. 12, s. 4 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26540
- [15] Podklady k přednášce ZÁKLADNÍ ELEKTROCHEMICKÉ ČLÁNKY III.: 6. Olověné akumulátory. In: HAMMERBAUER, Jiří. *KAE/ENZ - Elektronické napájecí zdroje: Přednášky* [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=76836
- [16] ŠTEKL, Pavel. Schemata elektrochemických zdrojů elektrické energie. In: *KTE/ECH - Elektrochemie: přednášky* [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=1480
- [17] ČECH, Jiří. Olověné akumulátory - mýty a skutečnost. [online]. 2007, s. 8 [cit. 2013-05-26]. Dostupné z: <http://mcu.cz/news.php?extend.637>

- [18] Rechargeable Batteries: Lead-Acid (Pb-Acid) Battery. In: [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://www.smashingrobotics.com/electrical-power-sources-for-mobile-robots/>
- [19] EV1 - specs. In: [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: http://www.evchargernews.com/CD-A/gm_ev1_web_site/specs/specs_specs.htm
- [20] Olověný akumulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Olov%C4%Bn%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [21] Podklady k přednášce ZÁKLADNÍ ELEKTROCHEMICKÉ ČLÁNKY III.: Akumulátor NiCd. In: HAMMERBAUER, Jiří. *KAE/ENZ - Elektronické napájecí zdroje: Přednášky* [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=76836
- [22] Nikl-kadmiový akumulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/NiCd>
- [23] Podklady k přednášce ZÁKLADNÍ ELEKTROCHEMICKÉ ČLÁNKY III.: Uzavřené sekundární články NiMh. In: HAMMERBAUER, Jiří. *KAE/ENZ - Elektronické napájecí zdroje: Přednášky* [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=76836
- [24] Nikl-metal hydridový akumulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/NiMH>
- [25] Podklady k přednášce ZÁKLADNÍ ELEKTROCHEMICKÉ ČLÁNKY III.: Akumulátory Li-ion a jejich nabíjení. In: HAMMERBAUER, Jiří. *KAE/ENZ - Elektronické napájecí zdroje: Přednášky* [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=76836
- [26] Lithium-ion battery. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery
- [27] Battery specs. In: [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: http://www.mynissanleaf.com/wiki/index.php?title=Battery_specs
- [28] Podklady k přednášce ZÁKLADNÍ ELEKTROCHEMICKÉ ČLÁNKY III.: Akumulátory Lithium - polymer (Li-pol). In: HAMMERBAUER, Jiří. *KAE/ENZ - Elektronické napájecí zdroje: Přednášky* [online]. [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: https://portal.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=76836
- [29] *I10 Electric – elektromobil Blue Drive™* [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.hyundai.cz/o-spolocnosti/tiskove-zpravy/2009/i10-electric-elektromobil-blue-drivetm.html>
- [30] MAŠEK, Zdeněk, et al. <http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/vts25/2511.pdf>. *Vědeckotechnický sborník ČD* [online]. 2008, č.25, [cit. 2010-02-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/vts25/2511.pdf>>.
- [31] PLOMER, Jan. Setrvačnick, inovativní řešení pro hybridní a elektrická vozidla, 2. díl. In: *Setrvačnick, inovativní řešení pro hybridní a elektrická vozidla, 2. díl* [online]. [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/clanky/setrvacnik-inovativni-reseni-pro-hybridni-elektricka-vozidla-2-dil>
- [32] PLOMER, Jan. Setrvačnick, inovativní řešení pro hybridní a elektrická vozidla, 1. díl. [online]. 2011 [cit. 2013-05-28]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/clanky/setrvacnik-inovativni-reseni-pro-hybridni-elektricka-vozidla-1-dil>
- [33] Palivový článek. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Palivov%C3%BD_%C4%8D%C3%A1nek#Reakce

- [34] HORČÍK, Jan. Palivové články. In: [online]. 2007 [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/slovnicek/palivove-clanky>
- [35] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechnika*. 2. dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006, 623 s. ISBN 80-867-0613-3.
- [36] *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. Praha: FCC PUBLIC s. r. o., 2011 [cit. 2013-06-04]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=44507
- [37] ASYNCHRONNÍ STROJE. In: KOCMAN, Stanislav. [Http://p.kobrlle.sweb.cz/](http://p.kobrlle.sweb.cz/) [online]. Katedra obecné elektrotechniky FEI VŠB-TU Ostrava, 2002 [cit. 2013-06-04]. Dostupné z: <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>
- [38] KUBOTA, Yoko. Toyota hybrid sales pass 5 million mark. In: [online]. TOKYO, 17.4. 2013 [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.reuters.com/article/2013/04/17/us-toyota-hybrid-idUSBRE93G0BU20130417>
- [39] TOYOTA HYBRID SYSTEM. In: [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.evworld.com/library/toyotahs2.pdf>
- [40] Technology File. In: [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: http://www.toyota-global.com/innovation/environmental_technology/technology_file/plugin_hybrid.html
- [41] Get a Toyota Brochure. In: [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.toyota.com/download-brochure.html>
- [42] HRADIL, Ivo. Toyota vyvíjí nový typ elektrického motoru. In: [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/toyota-vyvi-ji-novy-typ-elektrickeho-motoru>
- [43] NOVÝ OPEL AMPERA. PRVNÍ ELEKTROMOBIL PRO KAŽDODENNÍ PROVOZ. In: [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.srba.opeldealer.cz/opel-showroom/ampera/>
- [44] Tech Look: 2011 Hyundai Sonata Hybrid. In: [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://motoring2.com/2011/05/tech-look-2011-hyundai-sonata-hybrid/>
- [45] BMW ActiveHybrid 5 2012. In: [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.cars-data.com/cz/bmw-activehybrid-5-specs/7464>
- [46] C-MAX Specifications. In: [online]. [cit. 2013-06-05]. Dostupné z: <http://www.ford.com/cars/cmax/specifications/engine/>