



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

ALTERNATIVNÍ POHON AUTOMOBILŮ

ALTERNATIVE DRIVE OF AUTOMOBILE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAN NOVOSÁD

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK KAPLAN, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jan Novosád

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Automobilní a dopravní inženýrství (2301T038)**

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

Alternativní pohon automobilů

v anglickém jazyce:

Alternative Drive of Automobile

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obsahem práce je přehled moderních řešení z oblasti vývoje, konstrukce a využití alternativních pohonů silničních vozidel.

Cíle diplomové práce:

Vypracujte přehled moderních řešení z oblasti vývoje, konstrukce a využití alternativních pohonů silničních vozidel.

Seznam odborné literatury:

Kameš, J.: Alternativní pohon automobilu.

Mackerle, J.: Automobil s vyšší účinností.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 22.10.2008

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

V této práci je zpracován přehled perspektivních alternativních pohonů silničních vozidel. U jednotlivých pohonů jsou uvedeny a okomentovány jejich základní charakteristiky, výhody a nevýhody a problémy spojené s jejich využitím ve vozidlech. Práce je zaměřena na plynové motory, elektromobily, hybridní pohony a vodík, tedy na nejpravděpodobnější pohony budoucnosti.

Klíčová slova: Alternativní pohon, elektromobil, hybridní pohon, vodík, palivový článěk, akumulátor, CNG, LPG, biopaliva, rekuperace energie.

Abstract

In this work is processed a survey of perspective alternative drives in motor vehicles. There are main characteristic for each mentioned drive, their advantages and disadvantages and problems associated with their use in vehicles. The work is aimed at gas engines, electro mobiles, hybrid drives and hydrogen, therefore the most likely drives the future.

Key words: Alternative drive, electro mobile, hybrid drive, hydrogen, fuel cell, battery, CNG, LPG, biofuels, energy recovery.

Bibliografická citace

NOVOSÁD, J. *Alternativní pohon automobilů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce pana doc. Ing. Zdeňka KAPLANA, CSc. a s použitím uvedených zdrojů.

V Brně dne 29. května 2009

.....

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Zdeňku KAPLANOVI za podporu, obětavou pomoc a cenné připomínky a rady při zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat svým rodičům za to, že mě finančně a psychicky podporovali a umožnili mi studovat na této škole.

Obsah

1 ÚVOD	11
2 PŘEHLED ALTERNATIVNÍCH POHONŮ	12
2.1 ŘEŠENÉ POHONY	18
3 ČTYŘDOBÉ MOTORY NA ALTERNATIVNÍ PALIVA	19
3.1 STLAČENÝ ZEMNÍ PLYN - CNG	19
3.1.1 Vlastnosti zemního plynu	19
3.1.2 Použití v automobilech	19
3.1.3 Plnicí stanice CNG	22
3.1.4 Sériové osobní automobily	23
3.2 BIOPALIVA	24
3.2.1 Bionafta	24
3.2.2 Bioetanol	26
3.3 VODÍK	27
3.3.1 Vlastnosti vodíku	27
3.3.2 Spalování vodíku ve spalovacím motoru	29
3.4 PROPAN-BUTAN – LPG	31
3.4.1 Vlastnosti propan-butanu	31
3.4.2 Použití v automobilech	31
4 VÝROBA, DISTRIBUCE A SKLADOVÁNÍ VODÍKU	34
4.1 VÝROBA VODÍKU	34
4.1.1 Elektrolýza vody	34
4.1.2 Parní reformování zemního plynu	34
4.1.3 Termochemické metody	35
4.1.4 Ekonomické a ekologické porovnání	37
4.2 DISTRIBUCE VODÍKU	38
4.3 SKLADOVÁNÍ VODÍKU	39
4.3.1 Stlačený vodík	39
4.3.2 Zkapalněný vodík	40
4.3.3 Vodík uložený do hydridů kovů	42
5. ELEKTROMOBILY	44
5.1 PROGRAM ZEV	45
5.2 POHON ELEKTROMOBILŮ	45
5.3 AKUMULÁTORY	48
5.3.1 Olověný akumulátor	49

5.3.2 Akumulátor nikl-kadmium (Ni-Cd).....	49
5.3.3 Akumulátor nikl-metalhydrid (Ni-MH).....	51
5.3.4 Akumulátor lithium-iont (Li-Ion).....	51
5.3.5 Akumulátor lithium-polymer (Li-Pol).....	52
5.3.6 Vysokoteplotní akumulátor	53
5.3.7 Akumulátor zinek-vzduch	54
5.3.8 Akumulátor hliník-vzduch.....	54
5.3.9 Akumulátory používané v současnosti	55
5.4 PALIVOVÉ ČLÁNKY	56
5.4.1 Alkalický palivový článek (AFC).....	58
5.4.2 Palivový článek polymer-elektrolyt (PEMFC).....	59
5.4.3 Přímý metanolový palivový článek (DMFC)	60
5.4.4 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC).....	61
5.4.5 Palivový článek s roztavenými uhličitany (MCFC)	61
5.4.6 Palivový článek s tuhými oxidy (SOFC).....	61
5.4.7 Palivový článek zinek-vzduch (ZAFC)	61
5.4.8 Palivové články vhodné pro vozidla.....	62
5.5 HYBRIDNÍ USPOŘÁDÁNÍ	63
5.5.1 Sériové uspořádání	63
5.5.2 Paralelní uspořádání	64
5.5.3 Kombinované uspořádání.....	65
5.5.4 Rozdělení podle výkonu elektromotoru.....	69
5.6 REKUPERACE ENERGIE	70
5.6.1 Rekuperace s využitím elektrické energie	71
5.6.2 Rekuperace s využitím kinetické energie	72
5.6.3 Rekuperace s využitím tlakové energie	73
6 SOUČASNÉ AUTOMOBILY S ALTERNATIVNÍMI POHONY	75
6.1 PLYNOVÉ MOTORY A MOTORY NA BIOPALIVA	75
6.2 BATERIOVÉ ELEKTROMOBILY	77
6.3 ELEKTROMOBILY S PALIVOVÝMI ČLÁNKY.....	79
6.4 HYBRIDY	80
7 ZÁVĚR.....	84
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	86
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	91
SEZNAM OBRÁZKŮ	91
SEZNAM TABULEK.....	93

1 Úvod

Naprostá většina motorových vozidel je poháněna čtyřdobými spalovacími motory. Nejpoužívanějšími palivy jsou stále benzin a nafta, tedy paliva vyráběná krakováním ropy. Důsledkem nedokonalého spalovacího procesu vzniká velké množství chemických látek, mezi nimiž je spousta škodlivých a nebezpečných pro životní prostředí. Některé, zvláště oxid uhličitý CO_2 , urychlují zesilování skleníkového efektu. Emise CO_2 z dopravy tvoří 24 % ze všech emisí tohoto plynu vyprodukovaných člověkem. Při tom asi 12 % připadá na osobní automobily. Vzhledem k neustále se zvyšujícímu počtu vozidel jsou proto přijímána stále přísnější zákonná opatření na omezování těchto škodlivých emisí.

Současné předpisy (EURO 4, od 1.10.2009 EURO 5) sledují nejrizikovější složky výfukových emisí – oxid uhelnatý CO , oxidy dusíku NO_x , nespálené uhlovodíky HC a pevné částice PM . Maximální povolené množství CO_2 není dosud legislativou předepsáno. Pravděpodobně tomu tak bude od roku 2014, kdy současně začne platit norma EURO 6. Přesto už teď se výrobci automobilů snaží, aby nové motory produkovaly CO_2 co nejméně, což přímo souvisí se snižováním jejich spotřeby.

Ovšem při sebemenší spotřebě paliva jednou dojde k vyčerpání dostupných zásob ropy. Podle odhadů se tak stane během 22. století. To je sice poměrně daleko, ale nesmíme zapomenout, že ropa neslouží pouze k výrobě paliv. Je na ní závislý chemický, kosmetický a také farmaceutický průmysl.

Omezené zásoby ropy a produkce škodlivin jsou tedy hlavními důvody, proč je třeba hledat alternativní pohony vozidel. Mimoto čtyřdobé motory produkují hluk a vibrace, jejich momentová charakteristika příliš neodpovídá ideální hnací charakteristice vozidla, mají nízkou účinnost, nejsou schopny se samy rozběhnout z nulových otáček atd.

2 Přehled alternativních pohonů

Obsah škodlivin emitovaných dopravními prostředky lze kromě používání alternativních pohonů snížit podstatně „jednodušší“ cestou. Uvozovky jsem použil proto, že mám na mysli změnu chování a smýšlení lidí. A to úplně jednoduché není. Pokud bychom vyloučili zbytečné jízdy, častěji využívali MHD nebo pěší chůzi a vozidla poháněná lidskou silou (HPV = Human Powered Vehicle), jistě bychom přispěli ke snížení produkce škodlivin.

K tomu ovšem těžko dojde, proto je nutné stále zdokonalovat současné čtyřdobé spalovací motory a hledat za ně vhodné alternativy. Těmi mohou být:

- dvoudobý motor,
- plynový motor (propan-butan, zemní plyn, vodík) nebo motory na biopaliva,
- motor s krouživým pístem,
- spalovací turbína,
- Stirlingův motor,
- parní stroj,
- elektromotor.

Dvoudobý motor:

Dvoudobý motor má oproti čtyřdobému výhodu v jednodušší konstrukci a vyšším měrném výkonu, ale velkou nevýhodou je nedokonalé vyplachování. Část paliva vždy uniká do výfuku. To má za následek zvýšení měrné spotřeby a tedy i škodlivin ve výfukových plynech. Proto jsou dvoutaktní motory využívány především u mopedů a skútrů, u nichž je produkované množství emisí díky malému zdvihovému objemu zanedbatelné.

Plynový motor:

- Propan-butan: Je využívána směs propanu a butanu, nejčastěji v poměru P:B 60:40 pro zimní směs a 40:60 pro letní směs. Tyto plyny se dříve vyráběly převážně z ropy, proto je používaná směs známá pod zkratkou LPG (Liquefied Petroleum Gas). Dnes už propan-butan pochází ze 70 % ze zemního plynu.
- Zemní plyn: Zemní plyn je z 80 – 99 % tvořen metanem. Uchovává a přepravuje se ve stlačené podobě při tlaku 20 MPa nebo zkapalněný při teplotě -162 °C. Kvůli náročnosti chlazení kapalného skupenství se převážně využívá stlačeného zemního plynu. Ten je označován jako CNG (Compressed Natural Gas), kapalný jako LNG (Liquefied Natural Gas).
- Vodík: Při spalování vodíku ve spalovacím motoru nevznikají žádné škodlivé emise s výjimkou malého množství oxidů dusíku NO_x. Vodík ale způsobuje celou řadu

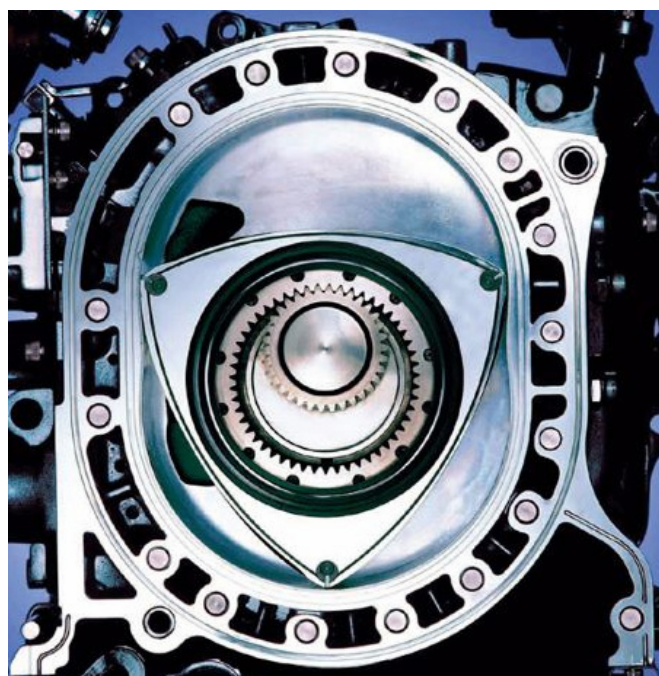
problémů, např. velmi rychlý průběh hoření, malá objemová výhřevnost plynného skupenství, problémy s uskladněním atd.

Čtyřdobý motor spalující biopaliva:

Biopaliva jsou vyráběna z rostlin obsahujících hodně sacharidů nebo olejů. Nejčastěji se setkáme s bioethanolem a bionaftou. Bionafta představuje směs motorové nafty s methylestery mastných kyselin, které se získávají z rostlinných olejů. Nejvíce používána jsou paliva B20 (20 % methylesterů, 80 % motorové nafty) a B30. Čistý etanol se prodává pod označením E100, ale používanější je jeho směs s bezolovnatým benzinem E85 (až 85 % etanolu, zbytek benzin). V EU navíc platí ustanovení přidávat biopaliva v malém množství i do klasických paliv. V ČR letos činí tento poměr 3,5 %.

Motor s krouživým pístem:

Rotační motor neboli Wankelův motor má oproti pístovým motorům podstatně jednodušší konstrukci, což vede k nižším nárokům na údržbu a k větší spolehlivosti. Díky rotačnímu pohybu pístu (rotoru) je snadnější vyvažování a motor je schopen dosahovat vyšších otáček. Vzhledem k delšímu trvání jednotlivých fází spalování je více času na tvorbu směsi. Navíc nehrozí zadření v případě přehřátí – hliníkový blok má vyšší teplotní roztažnost než ocelový píst.



Obr. 2-1: Rotační (Wankelův) motor [65]

Přes veškeré přednosti má Wankelův motor řadu nedostatků, jež brání většímu rozšíření – vysoká spotřeba paliva a s tím související vysoké hodnoty emisí, nižší termodynamická účinnost (kvůli tvaru spalovacího prostoru), nižší kompresní poměr a obtížnější chlazení kompresní a výfukové části. Největším problémem bylo utěsnění, těsnící lišty pístu se velmi rychle opotřebovávaly a docházelo k netěsnostem jednotlivých komor. To je v dnešní době již vyřešeno.

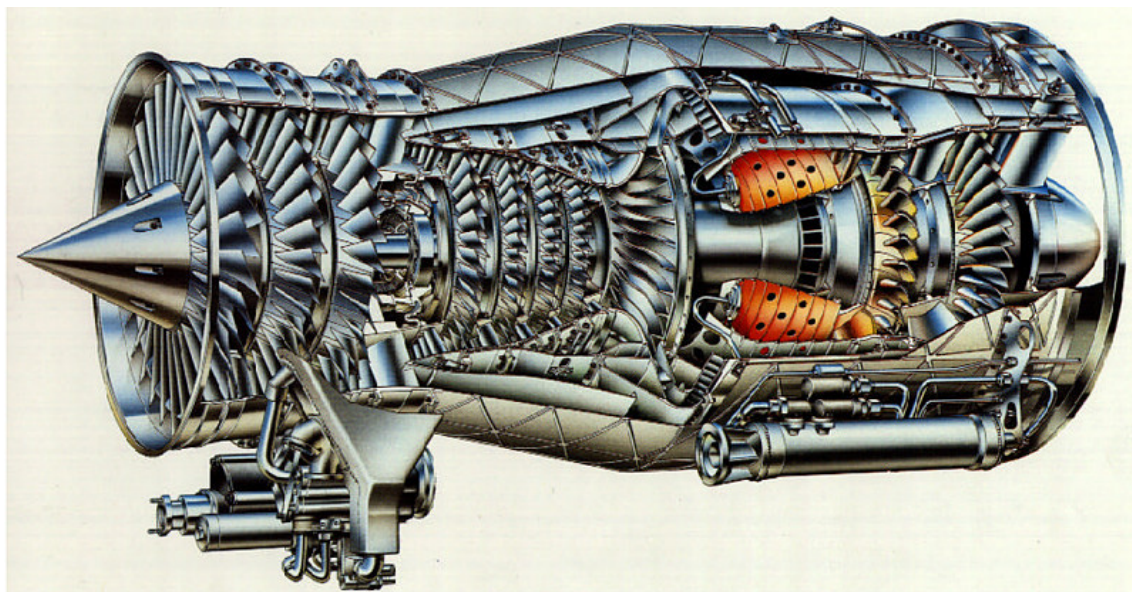
Všechny výše zmíněné potíže lze částečně eliminovat, a tak se rotační motor v praxi může svou efektivitou klasickým pístovým motorům vyrovnat. Jenže problémem je, že to vyžaduje poměrně náročný a specifický vývoj, který je hodně drahý. A vzhledem k nízkým produkčním objemům se tak intenzivní vývoj nevyplácí. [42]

V sériové produkci se s rotačním motorem setkáme pouze u automobilu Mazda RX-8 RE. Zajímavostí je verze upravená pro pohon vodíkem RX-8 Hydrogen RE.

Spalovací turbína:

Spalovací turbíny se používají v letecké a lodní dopravě, kde lze využít jejich přednosti:

- + Výhodný průběh točivého momentu při plném zatížení,.
- + malé nároky na kvalitu paliva.
- + Malé emise škodlivin.
- + Nízká úroveň hluku.
- + Malé mechanické ztráty.
- + Snadná údržba.



Obr. 2-2: Spalovací turbína [66]

Pro pohon automobilů se ale nepoužívají. Nejsou totiž vhodné pro částečné zatížení a pro jeho rychlé změny. Malé turbíny připadající v úvahu pro pohon osobních automobilů mají navíc malou účinnost kvůli vysokým ztrátám profukem mezi lopatkami a skříní. Možné využití má smysl a také se začíná uplatňovat u dálkových nákladních vozidel na rovinatých tratích v USA.

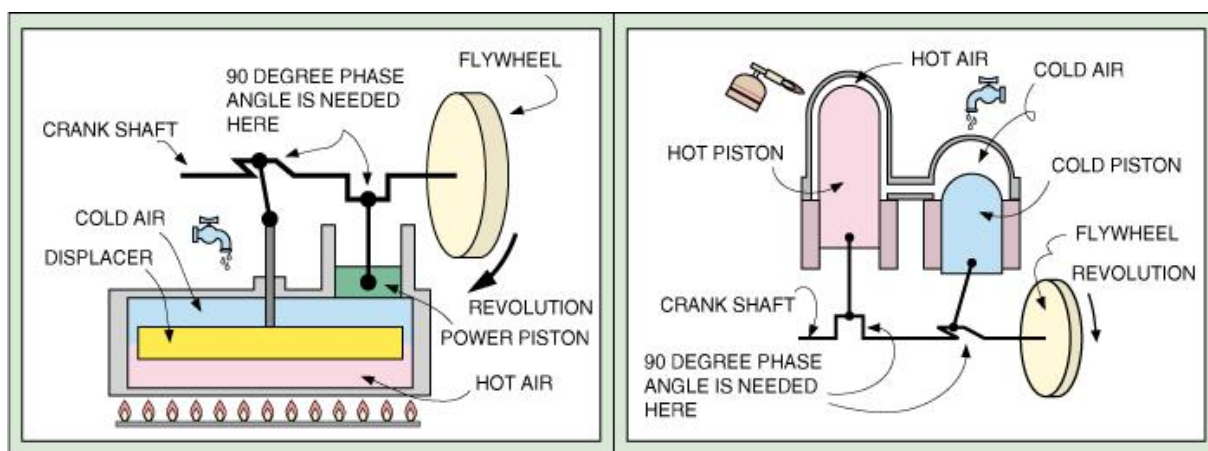
Stirlingův motor:

Stirlingův motor je motor s vnějším spalováním. Teplo tedy nevzniká hořením směsi uvnitř motoru, ale je přiváděno z vnějšího zdroje. Podrobný popis principu Stirlingova motoru udává např. [36]

Výhody a nevýhody Stirlingova motoru oproti klasickým spalovacím motorům:

- + Možnost použití libovolného paliva, nebo využití odpadního tepla z výrobních procesů, nebo ze solární a geotermální energie.
- + vyšší vnitřní tepelná účinnost.
- + Olej není v přímém kontaktu se spaliny ani horkými díly motoru => nulová spotřeba a tepelná a chemická degradace oleje.
- + Velmi nízká hluchnost vlivem pozvolné změny tlaku.
- + Nízké emise škodlivin.

- Značná složitost konstrukce => vysoká cena, některé technologie nejsou vhodné pro sériovou výrobu.
- Pomalejší regulace výkonu.
- Nižší měrný výkon.



Obr. 2-3: Znáznornění principu dvou modifikací Stirlingova motoru [67]

Kvůli svým vlastnostem je vhodný pro stacionární využití, např. výrobu elektřiny ze solární nebo geotermální energie, nebo pro spalování těžce spalitelných paliv. Oproti pístovému motoru stejného výkonu je výrobní cena podle [35] až 3x dražší. Z těchto důvodů se Stirlingův motor pro pohon automobilů neprosadil.

Parní stroj:

Pohon párou byl vynalezen a v automobilech využíván mnohem dříve, než spalovací motory. Parní stroj má výhodnou momentovou charakteristiku, spalování probíhá za nižších teplot a tlaků, díky kontinuálnímu spalování vypouští poměrně čisté výfukové plyny. Ovšem nízká účinnost, zamrzání vody při nízkých teplotách a nutnost použití velkých kondenzátorů pro opakované použití páry byly hlavním důvodem, proč byly parní stroje z automobilů před 100 lety vytlačeny. Navíc odpadní pára je kontaminována olejem a jeho odstranění je značně složité.

Elektromotor:

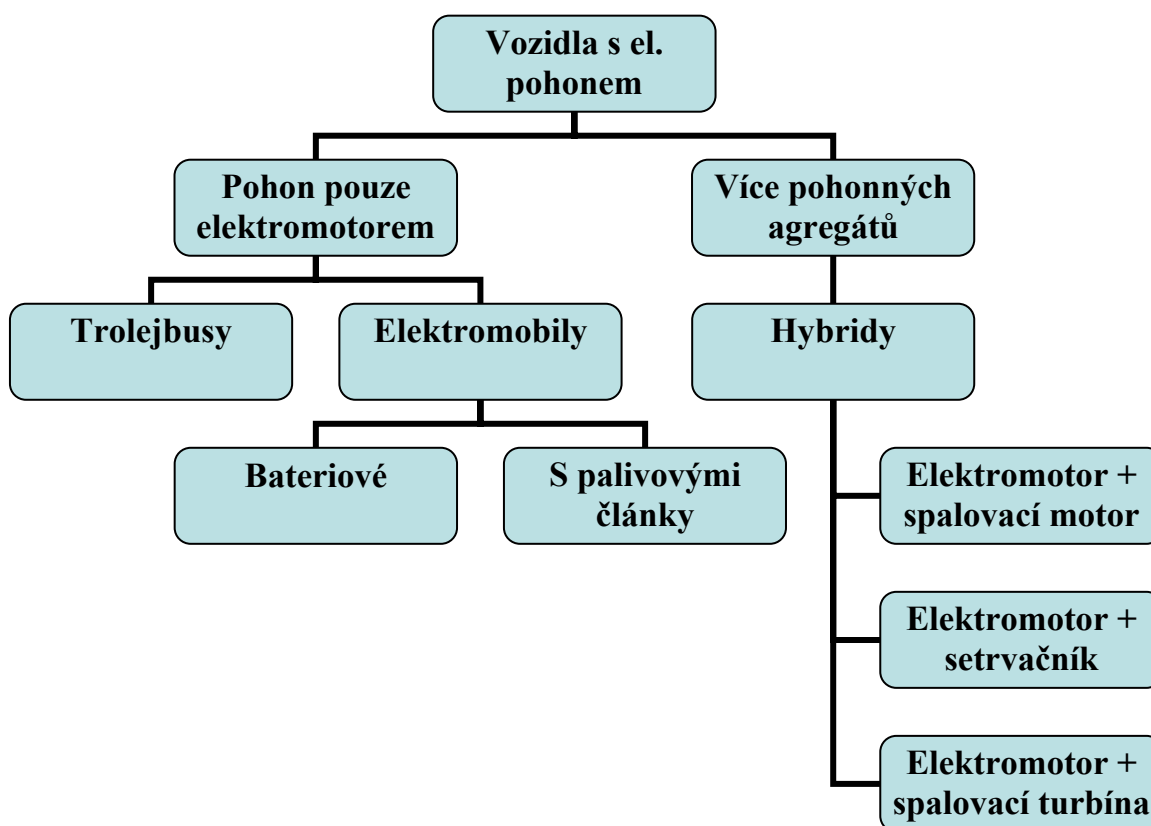
Vozidla poháněná elektrickou energií jsou na světě stejně dlouho jako pístové spalovací motory. Charakteristiky a principy elektrického pohonu jsou dosti odlišné od jakýchkoli spalovacích motorů. Hlavními přednostmi jsou:

- + Nulová produkce škodlivin, pokud nepočítáme vzniklé při výrobě elektřiny z nealternativních zdrojů.
- + Příznivá výkonová a momentová charakteristika motoru.
- + Vysoká účinnost přenosu elektrické energie na mechanickou – až 90 %. V této hodnotě ale nejsou zahrnuty ztráty ukládání a přenosu elektrické energie.
- + Velmi nízká hlučnost.
- + Bezúdržbový provoz.
- + Absence ztrát při volnoběhu.
- + Mnohem méně pohybujících se součástí.
- + Intenzivnější brzdění a rekuperace energie při něm.

Nevýhody dnes nejsou již tak značné jako dříve, přesto jsou stále příčinou pomalého rozšiřování elektromobilů. Jedná se o:

- Vysoká pořizovací cena.
- Omezená kapacita baterií (akumulátorů) => kratší dojezd.
- Vysoká hmotnost a nízká životnost baterií.

Vozidla s elektrickým pohonem se rozdělují:



Obr. 2-4: Rozdělení vozidel s elektrickým pohonem

Trolejbusy odebírají elektrickou energii z trolejového vedení umístěného nad vozovkou. Používají se pouze ve městech a přilehlých aglomeracích pro hromadnou přepravu osob. Existují také nákladní trolejbusy. Elektromobily mohou využívat jako zásobník energie buďto sadu baterií, nebo palivový článek, který produkuje elektrickou energii pomocí elektrochemické oxidace paliva (vodík, metanol, etanol...). Hybridní pohony jsou v naprosté většině zastoupeny kombinací elektromotor + spalovací motor.

Elektromotor se setrvačnickem využívají některé trolejbusy MHD, např. v Basileji. Setrvačnick je roztáčen pomocí energie z trolejového vedení nebo rekuperací energie při brzdění. Vložená energie je využita k rozjezdu vozidla nebo k jeho pohonu v okrajové části města bez trolejového vedení. Tento způsob byl v Basileji využíván již v 50. letech, vozy byly označovány jako „gyrobusy“.

Rekuperace energie

V souvislosti se snižováním spotřeby (paliva, elektřiny...) při pohonu vozidel nabývá na významu výše zmíněná rekuperace energie při brzdění. Jedná se o převedení kinetické

energie, která by jinak byla zmařena v podobě tepla, na jiný druh energie. Ta je poté uložena do zásobníku a zpětně využita při rozjezdu vozidla. Energie může být akumulována do:

- elektrického akumulátoru,
- tlakové akumulátoru,
- tepelného akumulátoru,
- vodíkového akumulátoru,
- setrvačnickového akumulátoru,
- do gumového svazku.

Nejpoužívanějšími druhy rekuperace energie, pomocí elektrické, kinetické a tlakové energie, se zabývá podkapitola č. 5.6.

2.1 Řešené pohony

V této práci se budu zabývat plynovými motory na zemní plyn, propan-butan a vodík a čtyřdobými motory spalujícími bionaftu a bioetanol. Dále rozeberu problematiku elektromobilů a hybridních pohonů. Uvedu základní charakteristiky jednotlivých pohonů (paliv), jejich výhody a nevýhody a problémy spojené s jejich využitím ve vozidlech.

Tyto alternativní pohony jsem si vybral proto, že v nich vidím perspektivu do bližší i vzdálenější budoucnosti. V dlouhodobějším horizontu očekávám pohon bateriovými elektromobily, elektromobily napájenými vodíkovými palivovými články a vozy se spalovacími motory na vodík. Ten bude vyráběn z vody pomocí alternativních zdrojů energie. Všechny tři pohony mají svá negativa, s nimiž je spojena vysoká cena a díky kterým nemůžou doposud spalovacím motorům konkurovat. Baterie jsou příliš těžké, neumožňují dostatečný dojezd a na životnosti je také potřeba zapracovat. Palivové články jsou rovněž těžké, mají nízkou životnost a pomalou reakci při požadavku prudkého zvýšení výkonu. Výroba vodíku elektrolýzou vody je stále neefektivní a jeho uchovávání při $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ je energeticky a technologicky náročné. Nádrže podstatně zvyšují hmotnost vozidla.

Než budou jednotlivé problémy vyřešeny, budou hlavní úlohu alternativních pohonů představovat plynové motory na CNG a LPG, motory spalující biopaliva a tzv. hybridy.

3 Čtyřdobé motory na alternativní paliva

3.1 Stlačený zemní plyn - CNG

3.1.1 Vlastnosti zemního plynu

Zemní plyn je fosilní palivo tvořeno metanem s proměnnou příměsí uhlovodíků a inertních plynů (N_2 , CO_2 ...). Jedná se o bezbarvý, nejedovatý, hořlavý, výbušný plyn bez chuti a zápachu. Je lehčí než vzduch a rozlišujeme 2 druhy:

- Zemní plyn H (high – vysoký energetický obsah) – obsahuje 90 – 99 % metanu.
- Zemní plyn L (low – nízký energetický obsah) – má vyšší podíl nehořlavých složek (přes 10 % obj.).

Tab. 3-1: Fyzikálně-chemické vlastnosti zemního plynu distribuovaného v ČR [2]

Parametr	Hodnota
Hustota	0,694 kg/m ³
Výhřevnost	34,1 MJ/m ³
Bod vzplanutí	152 °C
Bod hoření	650 °C
Teplota vznícení	537 – 580 °C
Teplota varu	-162 °C
Teplota tuhnutí	-182 °C
Mez výbušnosti se vzduchem	4,4 – 15 % obj.
Maximální objem CO_2 v suchých spalinách	11,8 % obj.
Oktanové číslo	130

Uvedené hodnoty platí při tlaku 101,325 kPa, teplotě 15 °C a relativní vlhkosti 0%. Podíl metanu je 98 %.

Zemní plyn může být uchováván v plynném skupenství při tlaku 16 – 20 MPa (odtud zkratka CNG – Compressed natural gas) nebo v kapalném skupenství při teplotě -162 °C (LNG – liquefied natural gas). Při zkapalnění dojde přibližně k 600-násobnému zmenšení objemu. Hustota LNG je okolo 410 kg/m³, výhřevnost 54,8 MJ/kg (22,2 MJ/l). Zkapalňování je ovšem vysoce nákladné, proto se v naprosté většině používá stlačený zemní plyn.

3.1.2 Použití v automobilech

Vozidla s pohonem na zemní plyn lze získat přestavbou stávajících vozidel se zážehovými motory. Některé automobilky pár svých modelů s bivalentním pohonem malosériově vyrábí.

Jsou tedy schopné jezdit jak na CNG, tak na benzín, přičemž motor je optimalizován pro pohon zemním plynem. Provoz vozidel na zemní plyn s sebou přináší tyto výhody:

- + Výrazně menší produkce škodlivin oproti vozidlům na benzín a naftu. Díky vyššímu poměru vodík/uhlík emitují o 80 % méně NO_x a CO, o 73 % méně HC a o 23 % méně CO₂.
- + Jednodušší podmínky tvorby směsi.
- + Vynikající antidetonační vlastnosti – oktanové číslo je 130 => kompresní poměr lze zvýšit až na 13, motor může pracovat s chudou směsí.
- + Při tankování plynu nemůže dojít ke kontaminaci půdy jako u kapalných paliv.
- + Snadná distribuce – zemní plyn je přepravován již vybudovanými plynovody, tím se ušetří za rozvoz kapalných pohonných hmot nákladními cisternami.
- + Nižší provozní náklady (50 – 60 % nákladů benzinového vozidla), spotřební daň je v ČR do roku 2011 nulová.

Nevýhody a důvody malého rozšíření CNG vozidel v EU jsou následující:

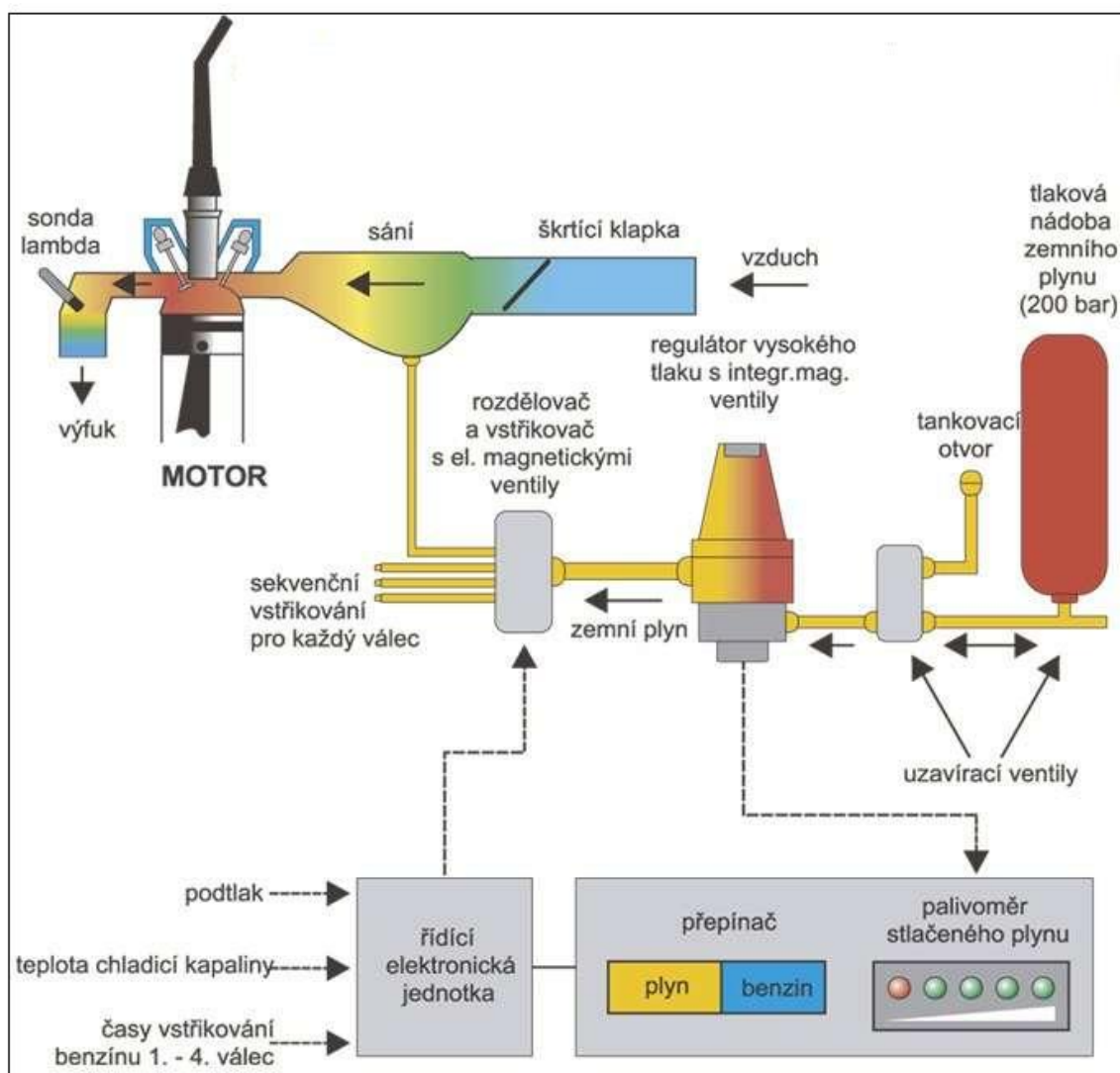
- Velmi řídká síť plnicích stanic, mapa s českými stanicemi viz obr. 3-2.
- Dražší přestavba vozidla – až 2x dražší než v případě LPG, sériově vyráběné automobily jsou také dražší (menší počty kusů, individuální výroba).
- Nutnost pravidelných kontrol plynových zástaveb.
- Zpřísněná bezpečnostní opatření (garážování, opravy ...).
- Vyšší hmotnost a méně úložného prostoru kvůli tlakovým zásobníkům.
- Snížení výkonu motoru o cca 10 % u přestavovaných vozidel.
- U přestavěného automobilu menší dojezd na jedno naplnění nádrže.

U motorů na zemní plyn se nejčastěji používá zařízení pro vstřikování plynu do sacího potrubí, obdobně jako u vícebodového vstřikování benzínu. Vzhledem k plynnému skupenství paliva jsou jednodušší podmínky tvorby směsi. Plyn oproti kapalnému palivu nekondenzuje a neulpívá na povrchu spalovacího prostoru. Dochází tak k lepšímu spalování s nižší produkcí emisí. Směšovací poměr vzduch ku palivu pro $\lambda = 1$ je 17:1, tedy menší množství paliva než u benzinových motorů. Důsledkem toho je snížení výkonu. Ovšem díky vysokému oktanovému číslu lze zvýšit kompresní poměr a tím ztrátu výkonu vykompenzovat. Stlačený zemní plyn představuje ideální podmínky pro přepřehování a provoz na chudou směs.

Při jízdě se CNG prostřednictvím vysokotlakého plynového potrubí dostává do vysokotlakého regulátoru, kde je plyn redukován na potřebný provozní tlak. Optimální množství plynu do směšovače reguluje tzv. krokový motorek na základě signálů z řídicí jednotky. Ve směšovači se palivo mísí se vzduchem. U čtyřdobých motorů rozhodují o směšovací poměru nejmenší průměry přívodního potrubí plynu a vzduchu. Jsou

dimenzovány na střední průtokovou rychlost $60 - 120 \text{ ms}^{-1}$. Měla by být vždy vyšší než v sedle sacích ventilů, toho je docíleno velkým předstihem jejich otevření.

U dvoupalivových vozidel je integrován přerušovač vstřiku, který při přepnutí přepínače benzin-plyn přerušuje vstřikování benzínu a řídí dávkování plynu. Přepínač benzin-plyn se nachází na přístrojové desce společně s ukazatelem množství plynu.

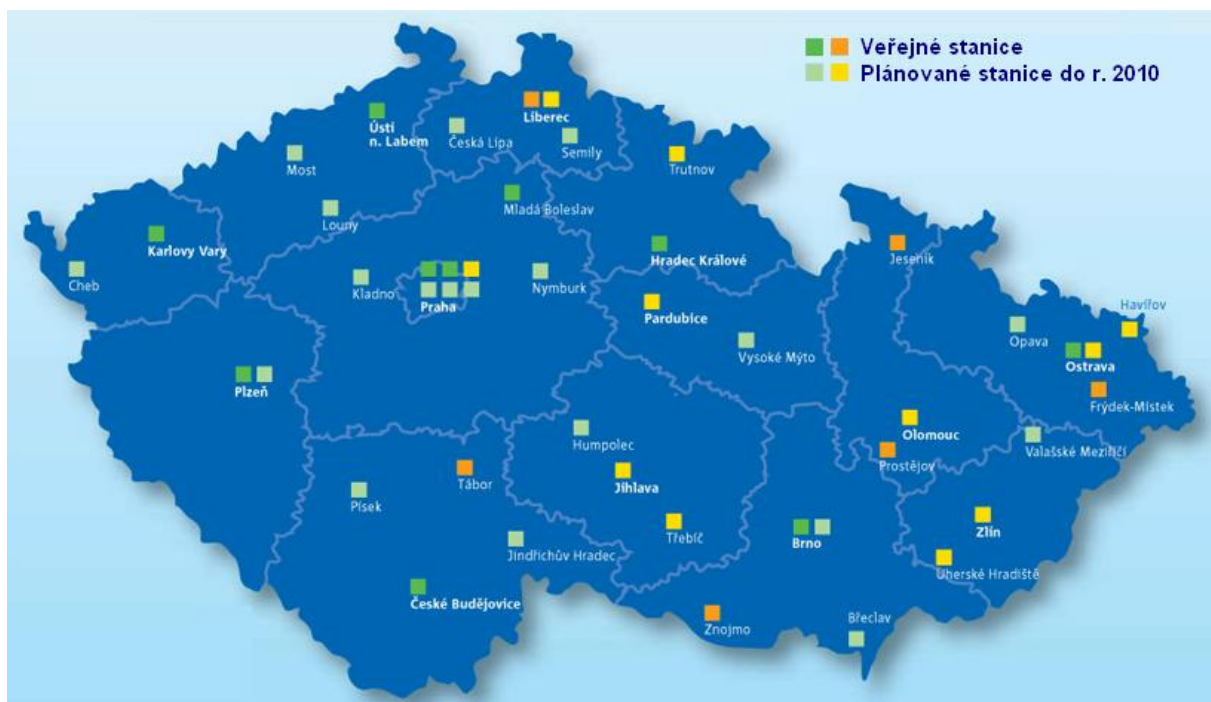


Obr. 3-1: Schéma provozu motoru na CNG [2]

Zemní plyn je ve vozidle uchováván v ocelových tlakových nádržích při tlaku 20 MPa. Jsou válcového tvaru o objemu $70 - 100 \text{ l}$ (u osobních vozidel). Jejich hmotnost v kilogramech odpovídá zhruba jejich objemu v litrech (70 litrová váží přibližně 70 kg). Moderní kompozitové nádrže mají hmotnost až 5x nižší. U přestavěných vozidel bývají umístěny nejčastěji v zavazadlovém prostoru, případně místo rezervního kola. U moderních osobních automobilů a autobusů se nacházejí na spodku vozidla (mimo zavazadlový prostor), u nízkopodlažních autobusů na střeše.

3.1.3 Plnicí stanice CNG

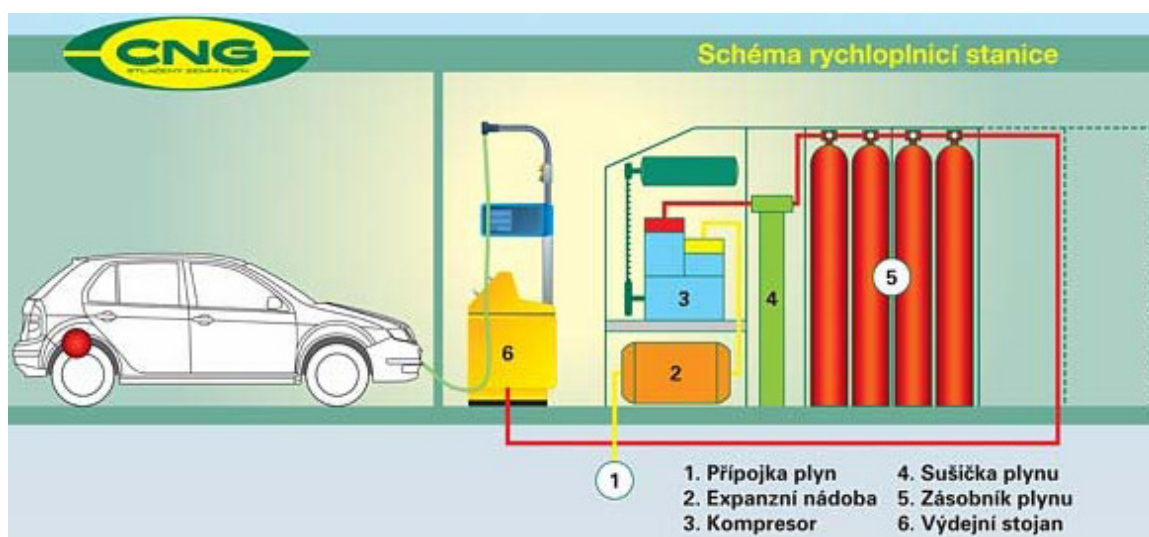
Infrastruktura pro přepravu zemního plynu je již spoustu let vybudovaná. Jednotlivé země jsou propojeny sítí plynovodů a přípojku k nim má dnes již téměř každá obec. Vybudovat plnicí stanice tedy není problém. Přesto jich je v ČR (18), ale také v celé EU (kromě Itálie) velmi málo. Teprve nyní dochází k výraznějšímu nárůstu staveb nových plnicích stanic. Za hlavní příčinu považují tzv. propan-butanový boom, který začal cca před 10 lety. Náklady na přestavbu vozidla na LPG jsou asi poloviční oproti CNG. Proto se mohutně rozšířil počet těchto vozidel a dnes jich jen po ČR jezdí okolo 200 000.



Obr. 3-2: Mapa plnicích stanic CNG v ČR [68]

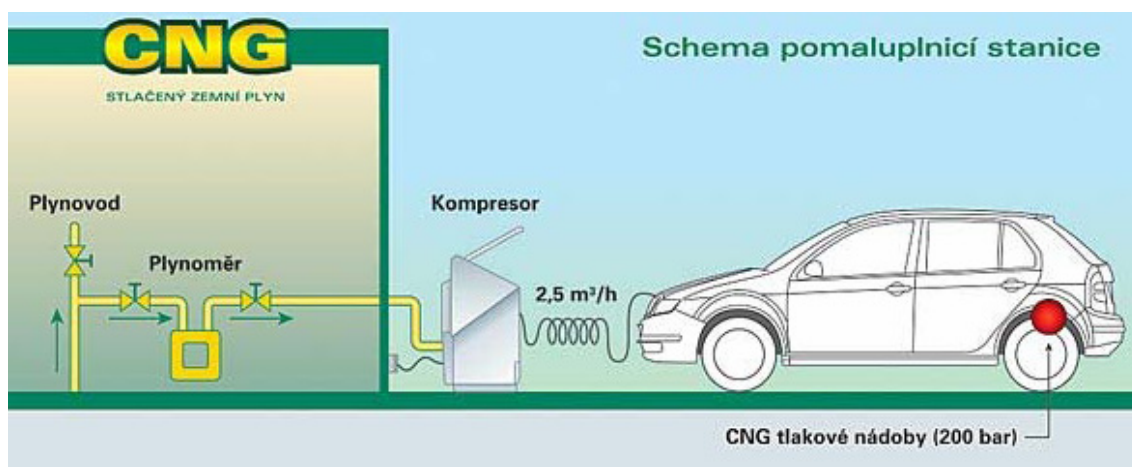
V plnicích stanicích je zemní plyn uchováván buďto v tlakových zásobnících o tlaku 20 až 30 MPa, které jsou navzájem propojeny, nebo je čerpán přímo z plynovodu. Existují tedy dva typy plnicích stanic:

- **Stanice pro rychlé plnění** – plnění vozidla spočívá v přepouštění CNG z tlakových zásobníků plnicí stanice do tlakové nádoby vozidla prostřednictvím výdejního stojanu. Plnicí konektor hadice je s plnicím ventilem vozidla propojen pomocí rychloupínacího systému. Doba plnění je srovnatelná s čerpáním benzínu a nafty (3 až 5 minut). [2]



Obr. 3-3: Znárodnění rychloplnicí stanice CNG [69]

- **Stanice pro pomalé plnění** – plnění se provádí přímo z plynovodu pomocí malého kompresoru, tedy bez použití tlakových zásobníků. Tento způsob je vhodný zejména pro firmy a rodinné domky, protože plnění trvá 5 – 8 hodin. [2]



Obr. 3-4: Znárodnění pomaluplnicí stanice CNG [69]

3.1.4 Sériové osobní automobily

Automobily spalující CNG vyrábí celá řada automobilek. V ČR jsou k dostání modely značek VW, Opel, Fiat a Citroen. Ve všech případech se jedná o bivalentní modely, spalují CNG a benzín. Porovnání tří modelů uvádí tab. 3-2.

Příkladem uvedu Opel Zafira 1,6 CNG. Srdcem vozu je zážehový motor 1.6 16V ECOTEC přizpůsobený pro spalování zemního plynu. Jedná se o systém „Monovalentplus“, který speciálně upravenému motoru garantuje maximálně efektivní spalování zemního plynu i benzínu. Každý válec je vybaven dvěma vstřikovači – jedním pro plyn, druhým pro benzín.

Motor tedy pracuje maximálně efektivně v každém režimu při spalování jak zemního plynu, tak benzínu. V letošním roce by měl být zahájen prodej také přeplňované verze – 1,6 XNT-CNG o výkonu 110 kW.

Přepínač plyn/benzin se nachází na palubní desce, v případě vyčerpání zásoby plynu přepne řídicí jednotka motor automaticky na režim benzínu a dojde k rozsvícení kontrolky. V přístrojové desce je integrován duální palivoměr, který ukazuje stav paliva, jež je aktuálně v provozu. Čtyři tlakové zásobníky pojmu 19 kg stlačeného zemního plynu a jsou umístěny pod podlahou. Nezabírají tedy zavazadlový prostor. Naopak musela být značně zmenšena nádrž na benzín, která pojme pouze 14 litrů.

VW Touran na rozdíl od většiny CNG vozidel nemá přepínač plyn/benzin. Vůz na benzín pouze startuje, jinak na jeho spalování automaticky přepne teprve v případě, kdy je plyn zcela vypotřebován.

Tab. 3-2: Porovnání výkonu a spotřeby vybraných vozidel na CNG

Model	Opel Zafira 1,6 CNG		Fiat Multipla 1,6 Natural Power		VW Touran 2,0 EcoFuel	
	CNG	benzín	CNG	benzín	CNG	benzín
Výkon	70 kW	68 kW	68 kW	75 kW	79 kW	74 kW
Obsah nádrže	19 kg	14 l	26,5 kg	38 l	18 kg	13 l
Komb. spotřeba na 100 km	5,3 kg	9,0 l	6,3 kg	9,0 l	5,8 kg	8,1 l
Dojezd	350 km	150 km	420 km	420 km	310 km	160 km
Cena od	578 900 Kč		485 000 Kč		639 400 Kč	

3.2 Biopaliva

Biopaliva jsou vyráběna z obnovitelného zdroje energie – z biomasy. Biomasu představují jakékoli rostliny (nejčastěji cukrová řepa a třtina, kukuřice, řepka olejka, obilí, nebo olejniny) a odpady ze zemědělského a dřevozpracujícího průmyslu. Biomasa v podstatě představuje akumulovanou sluneční energii. CO₂ vzniklý jejím spálením spotřebují rostliny k dalšímu růstu.

3.2.1 Bionafta

Bionafta je souhrnný název pro směsi motorové nafty s minimálním podílem 5 % metylesterů mastných kyselin. Metylestery vznikají esterifikací rostlinných olejů, tedy chemickou reakcí s methanolem. Používají se oleje z řepky olejky, slunečnice nebo sóji. 80 % celosvětové produkce zaujímá metylester řepkového oleje (zkr. MEŘO, RME, FAME). Na

výrobu 1 tuny MEŘO je potřeba cca 2,5 t semen řepky olejky. Porovnání vlastností MEŘO a motorové nafty uvádí tab. 3-3.

Oproti motorové naftě má MEŘO vyšší cetanové číslo, což umožňuje lepší vznětlivost. Dále má vyšší bod vzplanutí a lepší mazací vlastnosti, ale větší hustotu a viskozitu a nižší výhřevnost. MEŘO je rychleji biologicky odbouratelný, následkem je menší stabilita při dlouhodobém skladování. V současnosti je v ČR distribuována bionafta 2. generace, která obsahuje 30 – 36 % MEŘO. Její biologická odbouratelnost činí 98 % během 3 týdnů. Navíc mají zdejší distributoři pohonných hmot povinnost přidávat 3,5 % MEŘO i do „běžné“ motorové nafty (dle ČSN EN 590).

Tab. 3-3: Porovnání vlastností MEŘO a motorové nafty [2]

Vlastnosti paliva	MEŘO	Motorová nafta
Hustota při 15°C [kg/m ³]	880	840
Kinematická viskozita při 0°C [mm ² /s]	10	3 – 4
Kinematická viskozita při 20°C [mm ² /s]	6,3 – 8,1	2 – 8
Výhřevnost [MJ/kg]	37,3	42,7
Bod vzplanutí [°C]	130	55
Stechiometrický poměr vzduch/palivo (hm.)	12,3	14,5
Cetanové číslo	54	51
Emise CO [g/hod]	56	62
Emise HC [g/hod]	31	43
Emise SO ₂ [%]	0,002	0,15
Kouřivost (stupnice BOSCH)	0,26	0,49

Použití bionafty ve vozidlech s sebou přináší určité problémy, musí být schváleno výrobcem vozidla. Vyšší detergentnost oproti motorové naftě způsobuje ředění motorového oleje => nutné častější výměny. Při používání motorové nafty může poté bionafta rozpouštět usazeniny vzniklé v palivové soustavě. To je sice výhodná vlastnost, ale odplavené a rozpuštěné usazeniny se zpravidla zachytí v palivovém filtru. Proto je potřebná jeho častější výměna. Rovněž mohou úsady zanášet trysky vstřikovačů a způsobovat karbonizaci spalovacího prostoru. Bionafta je také agresivnější vůči těsněním.



Obr. 3-5: Součást palivového čerpadla zaneseného úsadami [64]

3.2.2 Bioetanol

Bioetanol je vyráběn anaerobní fermentací biomasy s vysokým obsahem sacharidů. V Evropě se nejvíce používá řepa cukrovka, brambory nebo obilí, v USA kukuřice a v Jižní Americe cukrová třtina. Z bioetanolu je dále vyráběn etyltercbutyléter (ETBE), který se přidává do bezolovnatého benzínu pro zlepšení jeho vlastností. Povinná složka v benzínu je v ČR 3,5 %, stejně jako podíl MEŘO v motorové naftě. Vlastnosti etanolu a ETBE uvádí následující tab. 3-4:

Tab. 3-4: Porovnání vlastností etanolu, ETBE a benzínu [2]

Parametr	Etanol	ETBE	Benzin
Hustota při 15 °C [kg/m ³]	800	740	750
Výhřevnost [MJ/kg]	26,4	36	41,3
Výhřevnost [MJ/l]	21,2	26,7	31
Bod varu [°C]	78	72	30 – 190
Bod vzplanutí [°C]	12	-19	-35
Stechiometrický poměr vzduch/palivo (hm.)	9	---	14,3
Oktanové číslo	109	118	91 – 98

Etanol má výrazně nižší výhřevnost než benzín. Díky vysokému oktanovému číslu lze však ztrátu výkonu vykompenzovat zvýšením kompresního poměru. Velké výparné teplo

umožňuje lepší plnění válců a současně lepší chlazení pístů a stěn válců. Spalování probíhá rychleji, vzniká při něm méně emisí CO₂, ale více NO_x.

Velkým negativem etanolu je jeho vysoká schopnost vázat vodu. Způsobuje korozi kovů a degradaci benzínu v případě směsného paliva. Při nízkých teplotách motor hůře startuje.

Více než čistý etalon je pro pohon vozidel vhodnější jeho směs s benzinem. Vozidla s motory konstruovanými pro spalování běžného benzínu mohou spalovat paliva s obsahem etanolu do 10 % nebo s přídavkem ETBE. Nejpoužívanějším směsným palivem je E85 (85 % etanolu a 15 % benzínu). Benzinová vozidla, jejichž motory jsou schopny spalovat i E85, jsou označována jako FFV (Fuel Flexible Vehicles). Jejich nádrž je vybavena čidlem, které provádí analýzu paliva, aby elektronická řídicí jednotka mohla vhodně nastavit charakteristiky motoru. FFV vozidla mají oproti benzinovým vozidlům následující rozdíly:

- odlišný tvar spalovacího prostoru a pístů,
- vyšší kompresní poměr,
- korozivzdorný palivový systém,
- korozivzdorné a zesílené ventily,
- zapalovací svíčky s vyšší tepelnou odolností.

Co se týče infrastruktury a skladování směsného paliva, je vhodnější variantou použití ETBE místo bioetanolu. ETBE má nižší rozpustnost ve vodě. Směs benzínu a 15 % ETBE nevyžaduje žádné úpravy infrastruktury, lze ji bez problémů dlouhodobě skladovat a je výhodná i z ekologického hlediska – je rychleji biologicky odbouratelná.

Největší počet FFV vozidel jezdí v Brazílii (více než 75 % vozového parku), nezanedbatelný počet jich je také v Argentině nebo USA. V Evropě jsou v popředí skandinávské země, zbytek Evropy za nimi v tomto směru dosti zaostává. Avšak podle EU by měla biopaliva v roce 2020 nahrazovat 10 % spotřeby klasických paliv.

3.3 Vodík

3.3.1 Vlastnosti vodíku

Vodík je označován jako palivo budoucnosti. Jako nejjednodušší chemický prvek je nejlehčí a nejrozšířenější na Zemi. Je velmi reaktivní, ve směsi s kyslíkem nebo s halogeny tvoří vysoce výbušné směsi. V přírodě se samostatně téměř nevyskytuje, je však podstatnou složkou vody a všech organických látek. Ve skutečnosti není vodík zdrojem energie, nýbrž jejím nosičem. energii vydanou spálením nebo jinou chemickou reakcí vodíku je třeba dodat zpět při jeho výrobě.

Tab. 3-5: Porovnání vybraných fyzikálních vlastností vodíku s klasickými palivy

Parametr	Vodík	Benzin	Nafta	Etanol
Relativní molekulová hmotnost [g/mol]	2,016	111	---	46
Hustota při 20 °C [kg/m ³]	0,071	0,73	0,86	0,79
Výhřevnost [MJ/kg]	120	44,9	43	26,4
Bod varu [°C]	-252,8	38 – 204	160 – 343	78
Rychlost hoření [m/s]	2,7	0,34	0,34	---
Stechiometrický poměr vzduch/palivo (hm.)	34,6	14,8	14,5	9

Tab. 3-6: Fyzikální vlastnosti vodíku [2]

Parametr	Hodnota
Molární hmotnost	2,016 g/mol
Hustota kapalné fáze při -259,2 °C a 0,1 MPa	70,8 kg/m ³
Hustota plynné fáze při 20 °C a 0,1 MPa	0,089 kg/m ³
Výhřevnost kapalné fáze	120,1 MJ/kg
Výhřevnost plynné fáze	10,8 MJ/m ³
Spalné teplo kapalné fáze	141,9 MJ/kg
Spalné teplo plynné fáze	12,8 MJ/m ³
Teplota samovznícení	585 °C
Teplota varu	-252,8 °C
Teplota tuhnutí	-259,2 °C
Mez výbušnosti se vzduchem	4 – 75 % obj.

Výhody a nevýhody:

- + Největší obsah energie ze všech chemických látek vztažený na jednotku hmotnosti.
- + Produktem spalování je vodní pára.
- + Velmi vysoká výhřevnost – cca 2,4 x větší než metan a 3,3 x větší než zemní plyn.
- + Prakticky neomezené zásoby.

- Vysoce výbušný ve směsi se vzduchem v široké škále koncentrací (viz tab. 3-7).
- Záporný Joule-Thomsonův koeficient – při uvolnění tlaku se zahřívá => při prudké expanzi může dojít k samovznícení.
- Nízká energetická hustota plynného skupenství.
- Energeticky náročné chlazení a problémy s utěsněním kapalného vodíku (-253 °C).
- Molekuly lehce pronikají těsněním, ventily i materiálem nádrží.
- Prakticky nulová infrastruktura a drahé způsoby a technologie výroby.

Tab. 3-7: Porovnání detonačních vlastností vodíku s metanem a benzinem

Palivo	Vodík	Metan	Benzin
Výhřevnost [MJ/kg]	120,1	50,1	44,9
Detonační rozmezí se vzduchem [obj. %]	18 - 59	6 - 13	1 - 3
Energie potřebná k iniciaci výbuchu [MJ]	0,02	0,29	0,24

Tab. 3-8: Kvalitativní požadavky na vodík [35]

Parametr	Znak jakosti		
	3,0	4,0	5,0
Min. obsah vodíku [% obj.]	99,9	99,99	99,999
Max. obsah kyslíku [ml/m ³]	50	5	2
Max. obsah dusíku [ml/m ³]	500	55	3
Max. obsah vody [ml/m ³]	100	20	5
Rosný bod [°C]	-42	-55	-66
Max. obsah C _n H _m [ml/m ³]	---	---	0,5

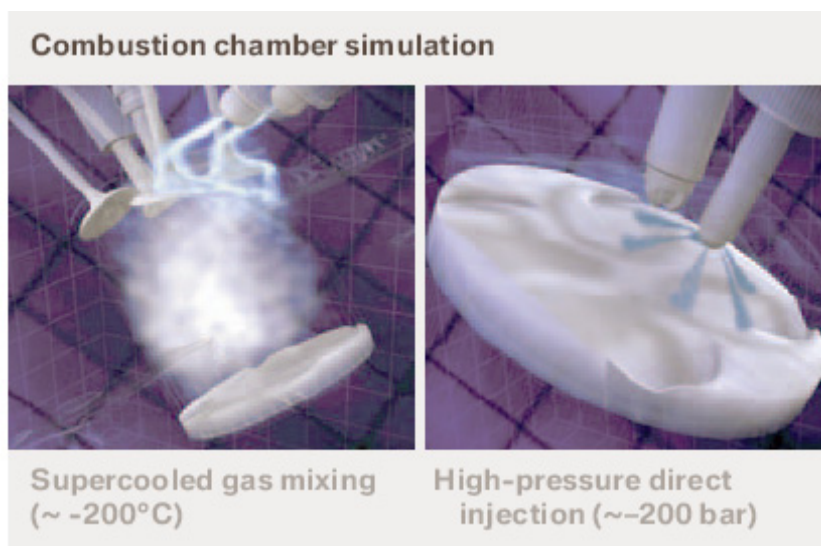
Pro pohon automobilů lze vodík využít dvěma základními způsoby – spálením ve spalovacích (zážehových) motorech jako klasická paliva, nebo jako palivo do palivového článku pro pohon elektromobilů. Palivový článek má oproti spalovacímu motoru mnohem vyšší účinnost, ale dlouhou reakční dobu při požadavku zvýšení výkonu. Palivovým článkům se věnuje kapitola č. 5.4. Problematická je také výroba, distribuce a skladování vodíku v automobilech. O těchto problémech pojednává kapitola č. 4.

3.3.2 Spalování vodíku ve spalovacím motoru

Spalování vodíku ve spalovacím motoru bylo poprvé zkoušeno již mezi 1. a 2. světovou válkou. Výhodou je, že jedinými škodlivými emisemi jsou oxidy dusíku NO_x. Při oxidaci vodíku čistým kyslíkem sice vzniká pouze vodní pára, jenže ve spalovacích motorech probíhá hoření pomocí vzduchu, jehož hlavní složkou (cca 78 %) je dusík a ten při vysokých teplotách oxiduje na NO_x. Vodík hoří velmi rychle a jeho plamen je stabilní i při velmi chudé směsi. Toho lze využít pro omezení zmíněných emisí NO_x.

Nevýhodou spalování vodíku je malá objemová výhřevnost směsi. Spalování chudých směsí tedy vyžaduje přeplňování. Nejlépe se také jeví přímý vstřík vodíku do válce až ke konci sacího zdvihu. Jedním z důvodů je snadná zápalnost vodíkové směsi. Pokud by byl vodík vpraven do válce již na počátku sacího zdvihu, mohlo by dojít k zapálení směsi od zbytku výfukových plynů a vyšlehnutí plamene do sacího potrubí. Toto hrozí zejména při použití nízkého kompresního poměru, avšak použitím moderních vstřikovačů je již problém vyřešen. Další nevýhodou je výjimečně rychlý průběh hoření, což často vede k vyhoření

veškeré směsi ještě před jejím zapálením => klepání motoru. Klepání následně přechází ve velmi silnou detonaci. Tomu lze částečně zabránit smícháním vodíku s pomalu hořícím palivem, např. metanem.



Obr. 3-6: Simulace spalovacího prostoru při vstřikování vodíku (BMW) [37]

Při bivalentním provozu musí být snížen kompresní poměr (např. u BMW Hydrogen 7). Při provozu čistě vodíkového vozidla při nízkém zatížení lze naopak využít poměrně vysoký kompresní poměr, při vysokém zatížení je nutná tzv. adaptivní regulace předstihu zážehu – vyžaduje regulaci efektivního kompresního poměru změnou časování ventilů. Optimální předstih je vzhledem k vysoké rychlosti hoření jen pár stupňů před horní úvratí. Do budoucna se předpokládá použití systému Common Rail (jeho vývojem se zabývá také Technická univerzita v Liberci). Vodík bude vstřikován pod vysokým tlakem a několikanásobně během jednoho cyklu.

Ve srovnání s palivovými články mají vodíkové spalovací motory tyto výhody a nevýhody:

- Vysoká účinnost palivových článků při nízkém zatížení a její pokles s rostoucím zatížením, u spalovacích motorů je to obráceně.
- Objem palivového článku s příslušenstvím je větší než odpovídající objem spalovacího motoru, ale tvarově je snadno přizpůsobitelný.
- Vozidlo s palivovým článkem je pro dostatečnou výkonovou rezervu nutno vybavit záložním zdrojem výkonu, např. akumulátorem.
- Poměrně dlouhá reakční doba palivového článku při požadavku změny výkonu.

3.4 Propan-butan – LPG

3.4.1 Vlastnosti propan-butanu

Propan-butan je směs plynů, které jsou získávány při zpracování ropy – odtud zkratka LPG (Liquefied Petroleum Gas). Dnes však již převládá výroba ze zemního plynu (asi 70 %). Jedná se o vysoce výhřevný plyn, který se snadno zkapalňuje při poměrně nízkém tlaku a běžné teplotě, zkapalněním se objem zmenší cca 260x. LPG je bezbarvá, výbušná a vysoce hořlavá kapalina o specifickém zápachu po síře. Vlastnosti LPG:

- + Vysoká výhřevnost a antidetonační odolnost.
- + Nižší emise škodlivin.
- + Ekonomičnost provozu – návratnost přestavby po ujetí několika desítek tisíc km.
- + Snadné odpařování.
- + Nerozpustný ve vodě => nehrozí kontaminace vod.

- V plynném skupenství je těžší než vzduch.
- Se vzduchem vytváří výbušnou směs.
- Nádrž v zavazadlovém prostoru zmenšuje úložný prostor a zvyšuje hmotnost vozidla.
- Snížení výkonu motoru o 7–15 %

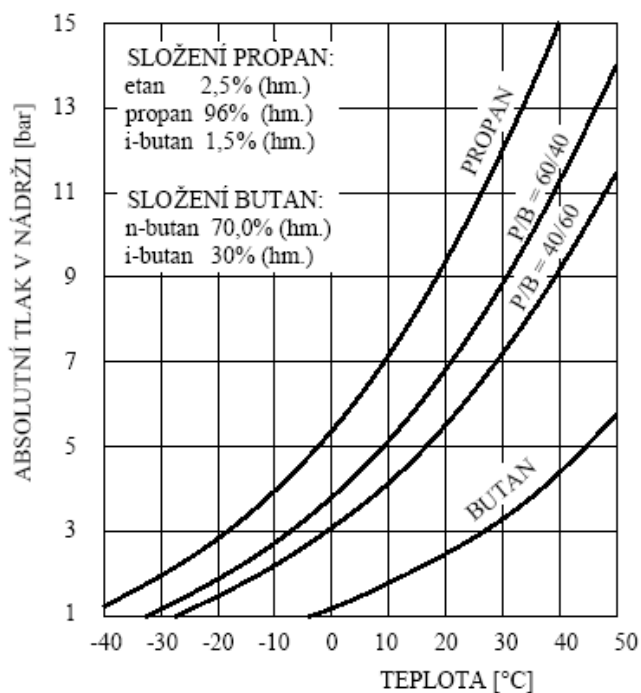
Tab. 3-9: Fyzikálně-chemické vlastnosti složek LPG

Parametr	Propan	Butan	Zemní plyn
Hustota [kg/m ³]	2,02	2,59	0,694
Výhřevnost (plynné skupenství) [MJ/m ³]	93,57	123,55	34,1
Bod vzplanutí [°C]	96,7	152	152
Teplota vznícení [°C]	510 – 580	475 – 550	537 – 580
Teplota varu [°C]	-42	-1	-162
Mez výbušnosti se vzduchem [% obj.]	2,1 – 9,4	1,9 – 8,4	4,4 – 15
Max. objem CO ₂ v suchých spalínách [% obj.]	13,8	14,1	11,8
Oktanové číslo	100 – 110 (směs)		130

3.4.2 Použití v automobilech

Pro použití LPG v automobilech je důležité, aby v plynové soustavě byl dostatečný přetlak pro zajištění dodávky paliva z nádrže. Tlak v nádrži je určen tlakem nasycených par LPG a závisí pouze na složení a teplotě, nikoliv na množství v nádrži. Vhodné složení LPG je dáno

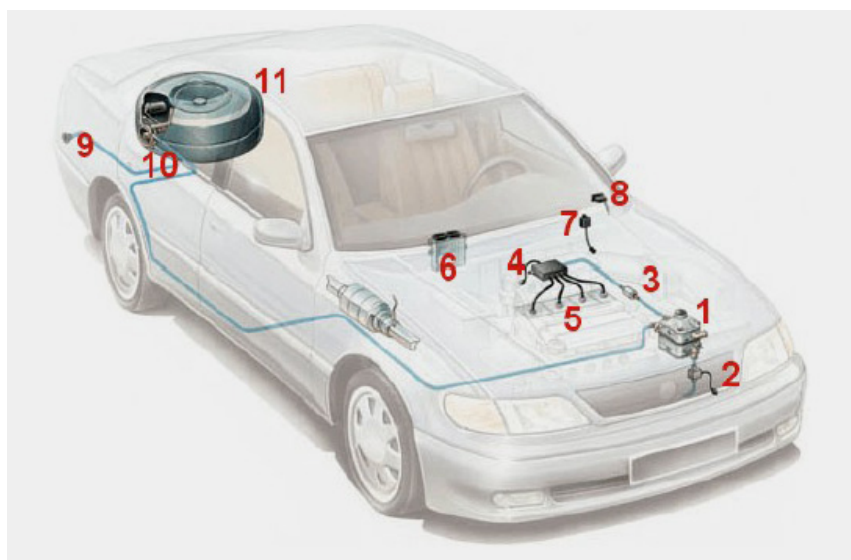
především obsahem propanu (viz obr. 3-7). Vzhledem k teplotě tuhnutí se poměr směsi může lišit podle ročního období a klimatického pásma. V ČR se používá letní směs s obsahem 40 % propanu (P/B = 40/60) a zimní směs 60/40.



Obr. 3-7: Závislost tlaku v nádrži na složení a teplotě LPG [2]

Stejně jako u zemního plynu lze pro pohon LPG přestavět vozidla se zážehovým motorem. Získané vozidlo je také bivalentní, s přepínačem paliva na palubní desce. Přestavět lze i vznětové motory, ale je to mnohem náročnější a nákladnější, tudíž je velmi dlouhá návratnost. Přestavěný zážehový motor poskytuje asi o 10 % nižší výkon. Zvýšením kompresního poměru a úpravou zapalování lze ztrátu výkonu kompenzovat, ale motor nebude schopen spalovat benzin.

Zařízení plynového motoru se skládá z tlakového zásobníku, uzavíracího ventilu plynu (multiventilu), zplyňovače s tlakovou regulací a ohřevem, směšovače (případně vstřikovače), regulátoru dávkování paliva a třicestného ventilu. Plyn se odpařuje ve zplyňovači a v regulátoru se na základě signálů z lambda sondy a podtlakového snímače snižuje jeho tlak. Požadované množství plynu je vstřikováno do směšovače.



- 1 – reduktor 2 – čidlo teploty chladicí kapaliny 3 – filtr LPG 4 – vstříkovací lišta 5 – vstříkovací trysky 6 – řídicí jednotka LPG 7 – snímač tlaku v sání vozidla 8 – přepínač benzin / LPG 9 – plnicí hrdlo 10 – multiventil 11 – nádrž

Obr. 3-8: Základní schéma vozidla s pohonem na LPG [2]

Díky vyššímu oktanovému číslu je klidnější chod motoru, dochází k menšímu namáhání. Vzhledem k plynnému skupenství nedochází ke smývání oleje ze stěn válců a olej je méně znečišťován karbonovými úsadami, které se při provozu na LPG téměř netvoří. Měl by být ale používán olej určený pro LPG motory, který neobsahuje aditiva zabraňující vzniku karbonu.

Kvůli síře obsažené v propan-butanu dochází k zanášení elektrod zapalovacích svíček a je nutno je častěji měnit (max. po 15 000 km). Rovněž je více namáhána výfuková soustava vyšší teplotou spalin a snadněji podléhá korozi – výfukové plyny téměř neobsahují částice, které se usazují na vnitřním povrchu výfukového systému a částečně jej chrání proti korozi.

Propan-butan je ve vozidle uchováván v takové nádobě o tlaku 0,2 – 2 MPa. Je vyráběna z oceli ve tvaru válce pro umístění v zavazadlovém prostoru a ve tvaru toroidu pro umístění místo rezervy. Nejvyšší provozní přetlak je 2,5 MPa a naplnění nesmí překročit 80 %. To je hlídáno multiventilem, který je vybaven tlakovou a tepelnou pojistkou. Upevnění nádoby je z bezpečnostních důvodů zkoušeno nárazovou a dynamickou zkouškou. Bezpečné uložení je zaručeno do zrychlení 20 g v podélném a 8 g v příčném směru.

Vozidla přestavěna na pohon LPG musí povinně každý rok nebo po najetí 15 000 km absolvovat pravidelné revize a navíc mají zakázán vjezd do podzemních garáží. V ČR je v současnosti registrováno asi 200 000 těchto vozidel, využívat mohou okolo 600 plnicích stanic. Jedná se tedy o nejrozšířenější alternativní palivo u nás.

4 Výroba, distribuce a skladování vodíku

Pro masové využití vodíku v dopravě je nutné vyvinout levné způsoby výroby pomocí alternativních zdrojů energie, vybudovat potřebnou infrastrukturu pro jeho distribuci a podstatně zdokonalit skladování vodíku v automobilech.

4.1 Výroba vodíku

Čistý vodík se v přírodě nevyskytuje, je proto nutné jej získávat z dostupných zdrojů. Možnostmi jsou elektrolýza vody, parciální oxidace zemního plynu nebo ropných zbytků, zplyňování uhlí a solárně termická výroba (např. pomocí zinku). Existují ještě další způsoby výroby vodíku:

- Zplynění nebo termochemická konverze z biomasy.
- Rozklad vody při 2800 °C pomocí jaderné energie nebo plazmy.
- Fotoelektrochemická metoda – využití světla k získání molekul vodíku z vody.

Tyto metody se ovšem používají velmi málo, nebo jsou stále ve fázi vývoje. Proto nebudou dále podrobněji popsány.

4.1.1 Elektrolýza vody

Nejedná se o nic jiného, než o rozklad (disociaci) vody pomocí stejnosměrného elektrického proudu, přičemž je potřeba minimální napětí 1,24 V (při atmosférickém tlaku a teplotě 25 °C). Disociací vzniknou ionty H^+ a OH^- , které jsou přitahovány k opačně nabitým elektrodám, kde posléze oxidují, resp. redukují na molekuly vodíku H_2 a kyslíku O_2 .

Účinnost procesu je 80 – 90 %, při započítání účinnosti výroby elektrické energie je výsledná účinnost výroby vodíku elektrolýzou vody cca 25 – 35 %. Tento způsob výroby vodíku není příliš výhodný. Na výrobu množství plynného vodíku, které vyprodukuje 1 kWh energie, je při elektrolýze vody spotřebováno 1,53 kWh elektrické energie. To se vyplatí zemím, které vyrábějí levnou elektřinu pomocí geotermálních pramenů nebo vodních a větrných elektráren (Island, Norsko, Švýcarsko...).

4.1.2 Parní reformování zemního plynu

Vodík s uhlíkem jsou obsaženy ve všech organických látkách. Je tedy zřejmé, že vodík může být vyráběn z některé z nich. Nejvhodnější je doposud zemní plyn, jehož hlavní složka metan obsahuje nejvíce vodíku ze všech uhlovodíků (25 hm. %). Výrobní náklady jsou taktéž nejnižší, proto je tento způsob výroby vodíku stále nejrozšířenější.

Vodík může být ze zemního plynu separován čtyřmi způsoby. Nejvhodnější a nejpoužívanější je parní reformování. Vyjadřuje ho následující rovnice:



Rov. 4.1 znázorňuje, že z jednoho objemu metanu se získají tři objemy vodíku a dokonce třetina vyrobeného vodíku pochází z obnovitelného zdroje – z vody! Proces má dvě fáze. Nejprve se metan přivádí do vodní páry o teplotě 500 – 950°C a tlaku 0,3 – 2,5 MPa (za přítomnosti katalyzátoru). Následnou reakcí vzniká vodík s oxidem uhelnatým. Druhou fází je přivedení páry k oxidu uhelnatému, přičemž se uvolní další molekuly vodíku a nejedovatý oxid uhličitý. Reakce probíhá již za nižších teplot. Účinnost produkce vodíku je cca 80 %. Nevýhodou je produkce vysokého množství oxidu uhličitého (7 kg na 1 kg vodíku).



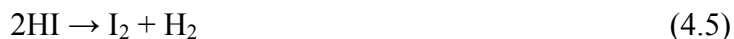
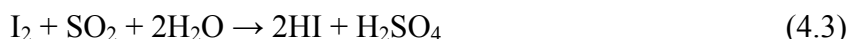
Obr. 4-1: Stanice na parní reformování zemního plynu [32]

4.1.3 Termochemické metody

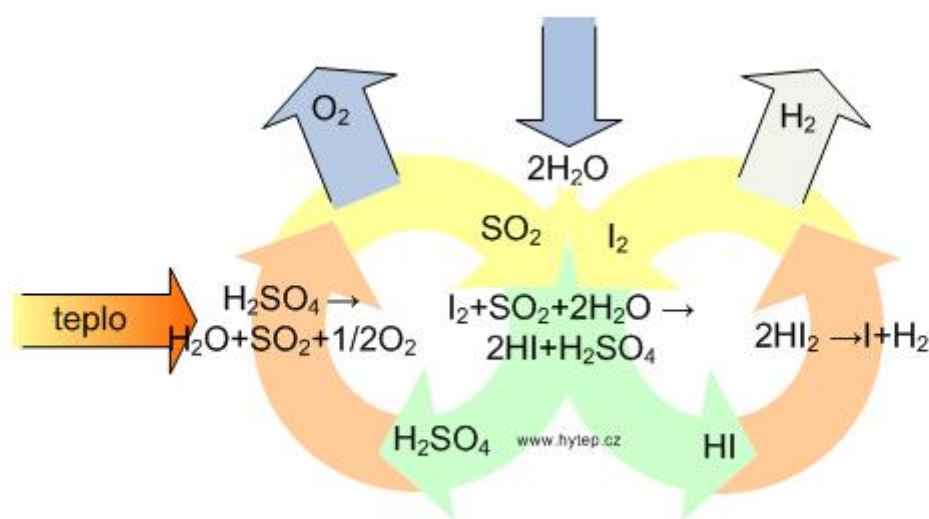
Vodík se při těchto metodách vyrábí štěpením vody za vysokých teplot a chemickými reakcemi pomocných látek. Tyto cykly jsou uzavřené – použité chemické látky jsou v průběhu reakcí recyklovány a znovu vstupují do procesu. Doplnována je tak pouze voda, výsledným produktem je vodík a kyslík.

4.1.3.1 Siřičito-jódový cyklus (S-I cyklus)

Byl vyvinut před 30 lety v USA a je považován za nejlevnější a neúčinnější způsob výroby vodíku pomocí jaderné energie. Vstupní surovinou je pouze voda a teplo, výstupními surovinami jsou vodík a kyslík. Pomocnými látkami jsou jód a oxid siřičitý. Oba se recyklují a opětně používají. Při procesu probíhají následující termochemické reakce:



První reakce je exotermická, voda reaguje s jódem a oxidem siřičitým, přičemž vzniknou kyseliny sírová a jodovodíková. Odváděné teplo má teplotu cca 120 °C. Další dvě reakce (rov. 4.4 a 4.5) jsou endotermické. K rozkladu kyseliny sírové je potřeba teplota 800 až 1000 °C, k rozkladu kyseliny jodovodíkové 450 °C.



Obr. 4-2: Znárodnění reakcí při S-I cyklu [32]

Účinnost celého výrobního cyklu roste s teplotou a pohybuje se v rozmezí 40 až 52 %. Hodnota je vyšší než v případě elektrolýzy, protože nedochází ke ztrátám při výrobě elektrické energie.

Při výrobě jsou kladeny velmi vysoké nároky na chemickou odolnost použitých materiálů, neboť vysoké pracovní teploty a použité kyseliny vytvářejí velmi agresivní prostředí. Hromadná průmyslová výroba je kvůli tomu stále problematická.

4.1.3.2 Solárně-termická metoda

Tento způsob výroby vodíku také potřebuje spoustu tepla, které lze získat pomocí jaderné energie nebo ze slunečního záření využitím parabolických zrcadel. Principem je reakce čistého zinku s vodou. Zinek je získáván dvěma způsoby:

- Smíšením oxidu zinečnatého s uhlíkem (dostačuje použití uhlí) při vysoké teplotě a za nepřístupu vzduchu. Chemickou reakcí vznikne zinek a oxid uhelnatý (viz rov. 4.6).

Potřebné teplo je dodáno soustavou parabolických zrcadel. Při výkonu cca 1 MW se vyprodukuje cca 50 kg čistého zinku a 22 kg oxidu uhelnatého za hodinu.

- Termickým rozkladem oxidu zinečnatého při teplotě 1750 °C. Tento způsob je také vysoce energeticky náročný, ale oproti předchozímu nevzniká jedovatý oxid uhelnatý. Reakce je vyjádřena rov. 4.7.

Tímto je do zinku vložena energie, která se následně využije k získání vodíku. Zinek se smíchá s vodou a při teplotě 350 °C na sebe naváže kyslík, vytvoří opět oxid zinečnatý a uvolní dva atomy vodíku (viz. rov. 4.8). Oxid zinečnatý je tedy recyklovatelný.

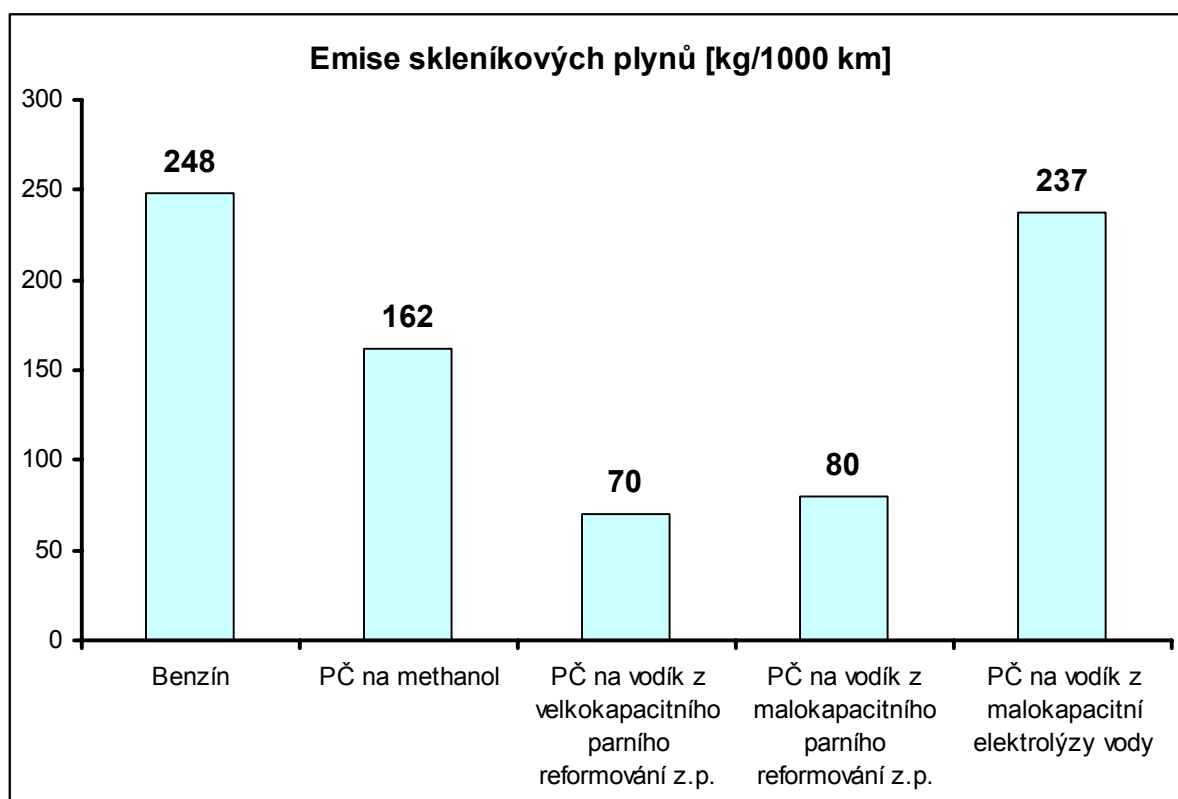


Obr. 4-3: Využití parabolických zrcadel [51]

4.1.4 Ekonomické a ekologické porovnání

V současnosti je ekonomicky nejvýhodnější výroba vodíku parním reformováním zemního plynu. Na 1 kWh plynného vodíku je využito 1,43 kWh chemické energie zemního plynu. U velkokapacitní výroby se cena pohybuje okolo 160 Kč/GJ (6 EUR), u malokapacitní 300 Kč/GJ (11 EUR). Celosvětově je tímto způsobem vyráběno asi 90 % vodíku.

Kromě ekonomického hodnocení výrob vodíku je důležité také jejich hodnocení z hlediska zátěže životního prostředí emisemi skleníkových plynů. Porovnání bylo provedeno na automobilu Mercedes Benz třídy A, který byl poháněn zážehovým spalovacím motorem, resp. palivovým článkem. S každým druhem pohonu bylo najeto 1000 km, viz obr. 4-4.



Obr. 4-4: Porovnání emisí skleníkových plynů pro výrobu vodíku v palivovém článku z různých surovin (Mercedes Benz třídy A) [35]

Z obrázku je patrné, že velikost emisí závisí na způsobu výroby vodíku. Nejvyšší emise vykazuje zážehový spalovací motor a pohon s palivovým článkem na vodík vyráběný elektrolýzou. Elektřina byla v tomto případě vyráběna pomocí spalování zemního plynu. Pokud by byla vyrobena z obnovitelných zdrojů, hodnota skleníkových emisí by klesla pod 70 kg/1000 km. Nejnižších emisí bylo dosaženo při pohonu s palivovým článkem, kdy byl vodík vyroben parním reformováním zemního plynu.

4.2 Distribuce vodíku

Pro masové využití vodíku v dopravě je nutné vybudovat potřebnou infrastrukturu. Ta je v současnosti prakticky nulová, neboť všechny průmyslově vyráběný vodík je spotřebován v blízkosti místa výroby. Využívání vodíku jako pohonné hmoty vodíkových spalovacích motorů nebo jako paliva do palivových článků je zatím velmi omezené. Na celém světě je okolo 160 čerpacích stanic. Nejvíce v USA – 56, následuje Německo s 26 a Japonsko s 20 čerpacími stanicemi vodíku. První česká by měla být otevřena letos v květnu v Neratovicích.



Obr. 4-5: Rozmístění vodíkových čerpacích stanic v Evropě (v r. 2008) [60]

Do dnešní doby nebyly požadavky na dálkovou přepravu a skladování velkých množství vodíku příliš frekventované. Nyní je na tuto problematiku kladen vysoký důraz – vodík je očekáván jako palivo budoucnosti. Není však rozhodnuto, v jaké formě bude vodík uchovávan a distribuován. Existují tři varianty – stlačený, zkapalněný nebo vázaný ve formě hydridů. Každá má svá pro a proti.

4.3 Skladování vodíku

4.3.1 Stlačený vodík

Skladování stlačeného plynného vodíku je energeticky méně nákladné ve srovnání s kapalným vodíkem. Nejčastěji se plynný vodík skladuje a distribuuje ve vysokotlakých nádržích. Standardně se používají ocelové tlakové láhve s objemem 50 – 70 l, vodík se v nich uchovává pod tlakem 20 MPa. Hmotnostní poměr nádrže a vodíku uvnitř je asi 80:1, proto se pro vyšší spotřebu vodíku používají speciální bateriové vozy. Ty jsou vybaveny buď větším množstvím tlakových lahví o standardní velikosti 50 litrů, nebo devíti kusy pevně upevněných dlouhých ležatých tlakových nádob. Při plnicím tlaku 20 MPa jsou schopny přepravit cca

4 000 m³ vodíku. V místě spotřeby je vodík skladován ve válcových tlakových nádobách o pracovním tlaku 5 MPa a objemu 25, 50, nebo 95 m³. [2]



Obr. 4-6: Distribuce stlačeného vodíku [56]

Použití tlakových zásobníků se využívá spíše u elektromobilů s palivovými články. Dnešní zásobníky jsou vyráběny z metalizovaného plastu, který je zpevněn uhlíkovými vlákny. Vodík v nich může být skladován při tlaku 35 MPa. U chystaného vozu Chevrolet Equinox Fuel Cell má být skladovací tlak až 69 MPa.

4.3.2 Zkapalněný vodík

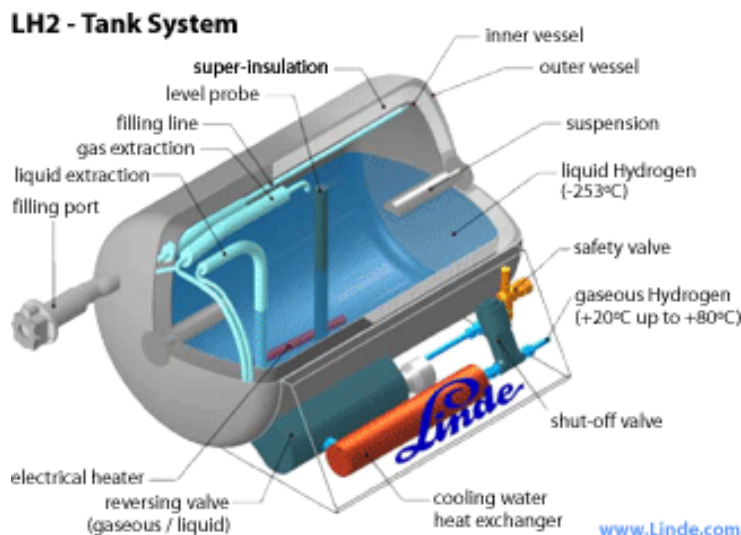
Zkapalnění vodíku je vysoce energeticky náročné. Kapalného skupenství dosahuje až při teplotě -253 °C. Energie potřebná ke zkapalnění odpovídá asi třetině jeho výhřevnosti. Ovšem zkapalněný vodík zaujímá 4,5x menší objem než plynný vodík při 0 °C a tlaku 25 MPa. Zkapalňování probíhá ve čtyřech krocích:

- 1) stlačení vodíku a odvedení kompresního tepla,
- 2) předchlazení kapalným dusíkem,
- 3) expanze v expanzní turbíně (expanzí dojde k ochlazení),
- 4) expanze na tzv. Joule-Thomsonově ventilu – další ochlazení a zkapalnění.

Při uchovávání zkapalněného vodíku jsou dosahovány obsahy vodíku cca 10 % (plná 100 kilogramová nádrž obsahuje 10 kg vodíku), kdežto při skladování stlačeného vodíku je to okolo 1 % pro ocelové nádrže a 4 – 5 % pro moderní kompozitové. Pro použití vodíku do automobilů vydal Americký energetický úřad doporučení, aby tato hodnota dosahovala alespoň 6 %. Dalším problémem jsou ztráty odparem. Molekula vodíku je nejmenší ze všech prvků, snadno tedy proniká skrz těsnění. Hodnota ztrát se pohybuje okolo 1 % za den.

Díky více než půl století trvajícím vesmírným programům je manipulace s kapalným vodíkem poměrně dobře zvládnuta. NASA ho ročně spotřebuje kolem 7 000 t. Zkapalněný vodík je uchováván ve velkých nádržích s evakuovaným dvojitém pláštěm vyplněným

speciální izolací s reflexní vrstvou. Jejich objem může být až 5 000 m³. Platí, že čím je větší objem nádrže, tím menší jsou ztráty vodíku odparem.



Obr. 4-7: Systém aktivního chlazení Linde CoolH2 [52]

V současných automobilech je zkapalněný vodík skladován v kryogenních zásobnících. Ty, stejně jako celý palivový systém, musí být velmi dobře utěsněny proti odpařování, které je značné zejména při delší nečinnosti vozidla. Jedna s největších společností zabývajících se vodíkem – Linde a.s. vyvinula systém aktivního chlazení „CoolH2“ (viz obr. 4-7). Umožňuje odstavení vozidla údajně až na 12 dní, aniž by unikla jediná molekula vodíku. Principem systému je dvoukomorová nádrž. Okolo vnitřní nádrže cirkuluje zkapalněný vzduch, jeho teplota může dosahovat až -200 °C. Ke zkapalnění vzduchu dojde při kontaktu s vodíkem, který proudí do motoru. Mezi komorami je vakuum a vnější komora je obalena tepelnou izolací. Nevím však zatím o žádném automobilu, který by je využíval.

Nádrže musí být vybaveny přetlakovými ventily, vodík se totiž i v sebelepší nádrži stále pomalu odpařuje a je třeba ho po dosažení určitého tlaku odpouštět. U vozu BMW Hydrogen 7 činí mezní hodnota 0,51 MPa a potrubí pro odpouštěný vodík vyúsťuje v blízkosti výfukových koncovek. Vodík se tímto způsobem začne z nádrže vytrácet cca po 17 hodinách stání. Pokud se s vozem nejezdí a odpařený vodík se nespotebovává provozem motoru, během devíti dnů parkování zůstane v nádrži jen takové množství vodíku, které vystačí na dojezd jen asi 20 km. To je v podstatě nejslabší stránkou využití kapalného vodíku ve vozidlech. [5]

Kvůli tomuto bezpečnostnímu odpouštění nesmí vodíková vozidla parkovat v podzemních garážích.



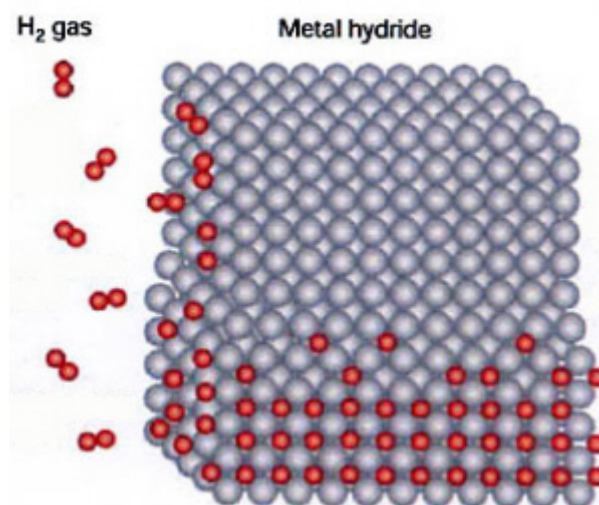
Obr. 4-8: Nádrž na zkapalněný vodík používaný automobilkou BMW [53]

4.3.3 Vodík uložený do hydridů kovů

Tímto způsobem je vodík uchovávan v pevné fázi. Využívá se schopnosti některých látek vázat do sebe vodík za vzniku hydridů. Vhodné jsou zejména lehké kovy, např. vápník, hliník, hořčík, sodík nebo lithium. Hydridy lehkých kovů se vyrábějí syntézami kovů s plynným vodíkem. Syntézy musí probíhat za vysokých teplot a tlaků, neboť při normálních teplotách jsou hydridy stabilní => bezpečné zásobníky vodíku. Příklad syntézy hydridu lithia a niklu znázorňuje rov. 4.9. Absorpce vodíku do hydridu je exotermní, uvolňování endotermní.



K rozkladu hydridů tedy musíme dodávat teplo. Z hlediska použití v automobilech je požadováno, aby rozklad probíhal jen za mírně zvýšených teplot (do 200 °C), aby samotný ohřev hydridů nespotebovával nadměrné množství energie. Najít vhodné sloučeniny se usilovně snaží spousta výzkumných pracovišť a automobilek. Současné nejkvalitnější hydridy (MgH_2 , LiBH_4 , NaBH_4) jsou schopny absorbovat přes 10 % vodíku. Pro příklad: 1 dm³ MgH_2 je schopen absorbovat okolo 1200 dm³ plynného vodíku, což je asi 7,6 % hm.



Obr. 4-9: Znárodnění hydridu kovu [70]

Pro použití v automobilech s palivovými články je nutné je vybavit zásobníkem hydridu a zařízením k jeho ohřevu. Toto zařízení by nebylo třeba u vozidel, která vodík spalují ve spalovacím motoru a palivový článek používají pro výrobu elektřiny do palubní sítě (např. BMW 745 h). K ohřevu by se tedy využívalo odpadní teplo z motoru. Nevýhodou tohoto systému je nemožnost doplňování vodíku. Po rozkladu veškerého hydridu v zásobníku je nutné „odpadní“ produkty ze zásobníku vyměnit za novou náplň. Východiskem by mohly být hydridy schopné uvolnění vodíku a jeho opětovné absorpce opakovaně, jsou dokonce i dostupné. Ale nemají zatím dostatečnou kapacitu, aby se jejich použití vyplatilo. Proto v nejbližší době připadají v úvahu menší vyměnitelné zásobníky, které by bylo možno vyměnit za nové např. u stávajících čerpacích stanic.

Vodík se uvolňuje také reakcí hydridů kovů s vodou. Může být využita odpadní voda z palivového článku, tím se zvýší množství získaného vodíku než je jeho obsah v hydridu. Výhodou je, že odpadá vyvíjení složitých hydridů s nízkými teplotami rozkladu.

Vodíkový pohon využívající hydridových zásobníků se jeví jako nejpravděpodobnější varianta budoucnosti. Nevyžaduje budování nové infrastruktury a čerpacích stanic. Největší překážkou je stále vysoká cena hydridů a poměrně komplikovaná cesta, která vede od výroby elementárních kovů a vodíku, jejich transportu až po samotnou výrobu hydridu. Při současných cenách vychází 1 km s využitím NaBH_4 asi na 140 Kč. Pro srovnání – u BMW Hydrogen 7 (využívá kapalný vodík) stojí 1 kilometr 8 až 9 Kč.

5. Elektromobily

Vozidla s elektrickým pohonem lze rozdělit do dvou kategorií podle použití, na vnitropodniková vozidla a vozidla pro silniční dopravu. Vnitropodniková vozidla jsou používána už přes 50 let v místech, kde jsou výfukové emise obzvlášť nežádoucí (areály podniků, sklady, letiště, pěší zóny, nádraží...). Rychlost těchto vozidel je omezena na 50 km/h. Silniční elektromobily se rozšiřují až v posledních letech zejména díky hybridním automobilům.

Tab. 5-1: Rozdělení a porovnání typů elektromobilů [12]

Typ elektromobilu	S baterií	S palivovým článkem	Hybridní elektromobil
Trakční motor	Elektrický	Elektrický	Spalovací motor, Elektrický motor
Nosič energie	Baterie	Palivové články	Baterie, Superkapacitor, Spalovací motor
Zdroj energie	Elektrochemický	Vodík, Methanol, Ethanol	Ropa, Elektrická síť
Požadavky na infrastrukturu	Síť nabíjecích stanic	Síť prodeje paliva	Benzinové stanice, Elektrické nabíjecí stanice
Vlastnosti	Žádné emise, Nezávislost na ropě, Nízký akční rádius, Vysoká cena, Obchodně přístupný	Téměř žádné emise, Vysoká účinnost, Nezávislost na ropě, Vyhovující akční rádius, Vysoká současná cena, Stále ještě ve vývoji	Nízké emise, Velký akční rádius, Závislost na ropě, Obchodně přístupný
Problémy	Baterie a její management, Doba nabíjení, Hmotnost, Nároky na prostor, Výkon, REKUPERACE	Cena palivových článků, Dynamika, Řízení spalování, Nároky na prostor, Bezpečnost	Řízení více energetických zdrojů, Závislost na jízdním cyklu, Rozsah hybridizace, REKUPERACE

5.1 Program ZEV

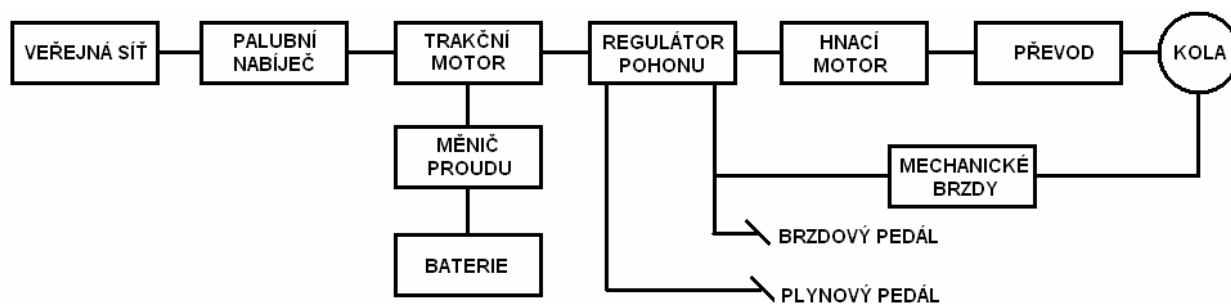
Na zavádění silničních elektromobilů měl velký vliv kalifornský program ZEV (Zero-Emission Vehicle), který byl schválen v roce 1990 spolkovým státem Kalifornie. Důvodem bylo vysoké znečištění tamního ovzduší. Legislativně bylo předepsáno, že by v roce 2003 měla 10 % nově prodaných vozidel v Kalifornii tvořit vozidla s nulovými emisemi – bateriové elektromobily, elektromobily s palivovými články, vozidla spalující vodík atp.

Reakcí na to vyvinula automobilka General Motors ve spolupráci s Toyotou a Hondou známý elektromobil EV1. Prototyp byl představen v roce 1993, sériová výroba začala o tři roky později. Ačkoli byl tento elektromobil velmi vyspělý a celý projekt vyšel na více než miliardu dolarů, byl na základě politického tlaku nakonec ukončen. Všechna vozidla byla v letech 2003 a 2004 sešrotována, pouze několik kusů bylo věnováno muzeím. Oficiálním důvodem byl prezentován nedostatek kvalitních a levných akumulátorů. Patent na jejich výrobu poté odkoupila ropná společnost Chevron, která je zablokovala pro jakékoliv další použití v dopravě.

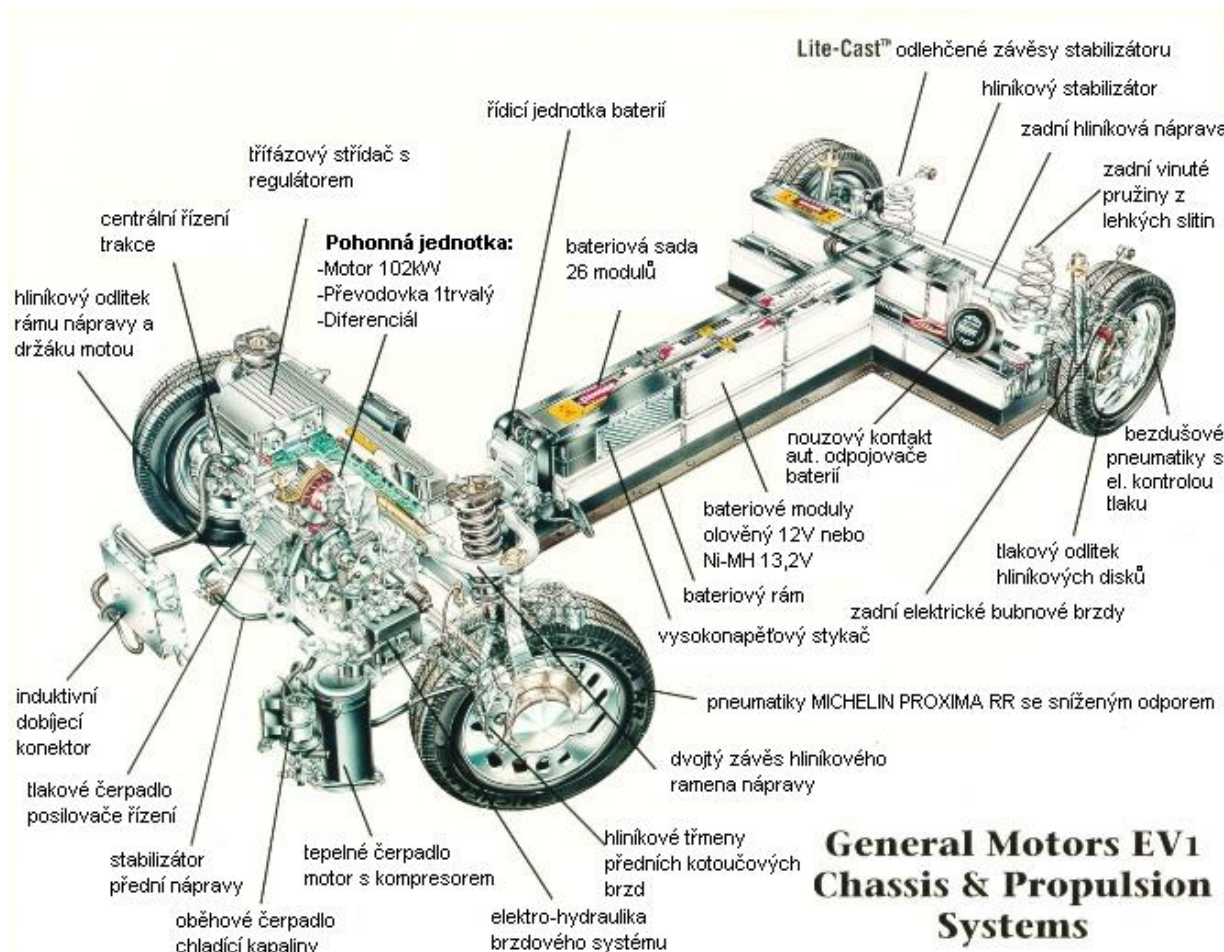
V minulém roce byl program ZEV obnoven Kalifornskou radou pro čisté ovzduší (CARB). Počítá se s prosazením převážně elektromobilů s vodíkovými palivovými články (v počtu 25 000 mezi lety 2014 – 2017). Do té doby je požadováno po automobilkách, aby každá ročně vyrobila alespoň 150 bateriových elektromobilů. Rovněž jsou podporovány v produkci hybridů.

5.2 Pohon elektromobilů

Nezbytnými prvky pohonného ústrojí elektromobilu jsou zdroj energie, elektromotor, regulátor výkonu a převodovka. Obr. 5-1 znázorňuje schéma pohonného ústrojí bateriového elektromobilu. V závislosti na požadované stoupavosti vozidla se volí vysokootáčkový motor s mechanickou redukcí otáček a jednostupňový, případně vícestupňový převod.



Obr. 5-1: Schéma pohonného ústrojí bateriového elektromobilu



Obr. 5-2: Schéma podvozku elektromobilu EV1 [71]

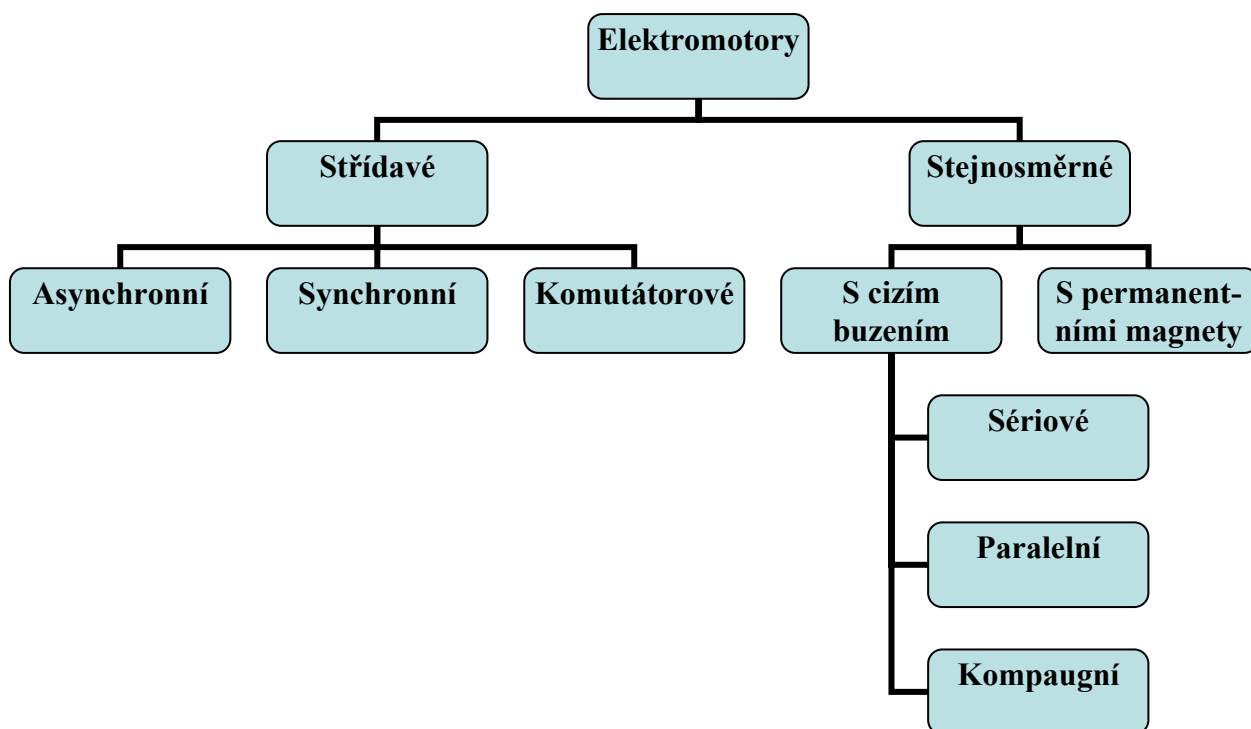
Narozdíl od spalovacích motorů je u elektromobilů rozlišován dvojitý maximální výkon, dlouhodobý a krátkodobý. Krátkodobý výkon je omezen maximálním výkonem regulátoru výkonu. Místo dlouhodobého výkonu je udáván tzv. půlhodinový výkon. Ten je omezen přípustnou teplotou elektromotoru a baterie, schopností baterie dodávat potřebné množství energie a musí být nepřetržitě monitorován. Obvyklý poměr mezi krátkodobým a půlhodinovým výkonem bývá 1:3. Stejně tak jsou rozlišovány dvě maximální rychlosti realizovatelné:

- na vzdálenost 2x 1 km,
- po dobu 30 minut.

Pro pohon elektromobilů se používají všechny tradiční principy, které se používají pro trakční pohony. Důležitou veličinou je hodnota točivého momentu. Je požadována co nejvyšší v širokém rozsahu otáček. Konstrukce motoru musí být kompaktní, dosahovat vysoké spolehlivosti a účinnosti, nízké hlučnosti a to při malé hmotnosti a nízkých nákladech na

údržbu. Elektromotory se rozdělují podle obr. 5-3 a využívají těchto elektromechanických jevů:

- elektromagnetické síly,
- piezoelektrické efekty,
- tepelné účinky při průchodu elektrického proudu.



Obr. 5-3: Druhy elektromotorů

Je patrné, že k pohonu vozidel může sloužit více druhů elektromotorů. Každý typ má své výhody a nevýhody. Nejvýhodnější jsou zřejmě stejnosměrné motory s cizím buzením. Základními požadavky jsou nízká hmotnost, malé rozměry, nízká hlučnost a cena. Porovnání jednotlivých typů udává tab. 5-2.

Stejnoseměrný motor s cizím buzením

Vyznačuje se velmi dobrými regulačními vlastnostmi. Umožňuje jednoduché řízení rychlosti změnou napětí kotvy (popř. budicího proudu). Přitom se otáčky mohou pohybovat v širokém rozsahu, který nijak nezávisí na kmitočtu napájecí sítě. Smysl otáčení lze snadno měnit změnou polarit napětí kotvy nebo budicího proudu. Výhodou tohoto motoru je také vysoký točivý moment, dokonce i při nízkých otáčkách. Naopak problémem je menší spolehlivost a větší nároky na údržbu.

U vozidel se častěji používá motor s paralelním budicím vinutím, neboť má výhodnější charakteristiku – točivý moment klesá pomaleji a lineárně s otáčkami. Tento motor může být

přetížen až o 20 % nad trvalým výkonem po dobu jedné hodiny a krátkodobě při rozjezdu až o 100 %. Maximální otáčky jsou cca 7000 min⁻¹.

Asynchronní motor

Používá se asynchronní motor s klecovou kotvou nakrátko. Jeho velkou výhodou je jednoduchá a robustní konstrukce a spolehlivost. Regulace tahové síly a otáček motoru se provádí proměnnou frekvencí a napětím. To vyžaduje drahý a složitý výkonový obvod. Tento motor je silně přetížitelný, dosahuje až 20 000 min⁻¹ a je podstatně lehčí oproti stejnosměrnému motoru.

Řízený reluktanční (krokový) motor

Tento motor disponuje vysokým točivým momentem při nízkých otáčkách a vysokou účinností. Díky robustní konstrukci vyžaduje malé náklady na údržbu, je stabilní i při vypnutí jedné či více fází a je vysoce přetížitelný. Nevýhodami je zvýšená hlučnost a nerovnoměrný točivý moment. Rozbíhání motoru probíhá asynchronně, samotný běh je synchronní.

Tab. 5-2: Porovnání různých koncepcí trakčních elektromotorů (1 – nejhorší, 10 – nejlepší)
[1]

Motor	Cena	Účinnost	Hmotnost	Rozsah P _{konst.}	Přetížitelnost	Stav vývoje
Stejnoseměrný	10	7	6	10	10	10
Asynchronní	8	8	6	9	10	9
Synchronní	8	10	7	10	10	8
Synchronní s PM	7	10	8	8	10	7
Reluktanční	9	6	7	4	10	5
Magnetický	8	10	10	8	9	8

5.3 Akumulátory

Akumulátory, bývají označovány i jako baterie, jsou nejdůležitějším prvkem elektromobilů. Zásadním způsobem ovlivňují jízdní vlastnosti. Je jim přizpůsobován výkon elektromotoru. Největšími slabinami jsou nízká životnost, nízká měrná energie a vysoká hmotnost. Podstatného zvýšení životnosti (80 000 – 150 000 km) došlo teprve v poslední době používáním inteligentních nabíjecích cyklů BMS (Battery management system).

V elektromobilech se používají tři druhy akumulátorů:

- záložní,
- startovací – nejsou konstruovány pro hluboké vybíjení,
- trakční – konstruovány pro hluboké vybíjení. Poskytují menší proud, ale vydrží větší počet cyklů.

5.3.1 Olověný akumulátor

Nejnámější a nejpoužívanější akumulátor, používá se jako startovací. V plně nabitém stavu je katoda tvořena z čistého houbovitého olova a anoda z oxidu olovičitého. Napětí mezi elektrodami je cca 2 V. Elektrolytem je zředěná kyselina sírová o koncentraci 35 %. Z technického hlediska může být roztok:

- volně nalitý mezi elektrodami = akumulátor se zaplavenými elektrodami,
- ztužený ve formě gelu,
- nasáknutý do vaty ze skelných vláken (AGM).

Tab. 5-3: Hodnoty napětí 12V olověného akumulátoru (20 °C)

Napětí	Se zaplavenými elektrodami	Gelová baterie	Baterie AGM
Napětí naprázdno nabité baterie	12,6 až 12,8 V		
Napětí naprázdno vybité baterie	11,8 až 12,0 V		
Napětí pod zátěží, při kterém se má ukončit vybíjení	1,75 V		
Nabíjecí udržovací napětí	13,4 V	13,8 V	13,5 - 13,8 V
Napětí pro občasné dobíjení baterie	14,2 až 14,5 V		
Napětí, při kterém začíná výrazná tvorba H ₂ a O ₂	2,4 V		

Hodnota udržovacího napětí se může u různých výrobců lišit. V případě dobíjení udržovacím napětím se napětí musí pečlivě nastavit. Nízké napětí by způsobilo sulfataci elektrod, vysoké napětí jejich korozi a ztrátu elektrolytu. Obojí má značný vliv na životnost akumulátoru. Měrná objemová kapacita je pouhých 40 Wh/kg, rychlost samovybíjení okolo 5 % kapacity za měsíc.

5.3.2 Akumulátor nikel-kadmium (Ni-Cd)

Katoda plně nabitého nikel-kadmiového akumulátoru je tvořena oxid-hydroxidem niklitým, anodu tvoří čisté kadmium. Zásaditým elektrolytem bývá obvykle vodný roztok hydroxidu draselného.

Výhody a nevýhody Ni-Cd akumulátorů:

- + Možnost rychlého nabíjení.
 - + Odolnost proti hlubokému vybití – může být skladován ve vybitém stavu, aniž by se poškozoval.
 - + Konstantní napětí po celou dobu životnosti a menší pokles kapacity při nízkých teplotách.
 - + Nízký vnitřní odpor – vhodné pro nárazové odběry vysokého proudu (např. rozběhy motorů).
 - + Delší životnost a větší odolnost proti přebíjení.
 - + Měrná hmotnost elektrolytu se se stupněm vybití nemění – při vhodně volené hustotě elektrolytu může pracovat za podstatně nižších teplot oproti olověnému.
-
- Nízká objemová kapacita (60 Wh/kg).
 - Paměťový efekt – pro dosažení plné kapacity musí být pravidelně úplně vybit.
 - Obtížná zjistitelnost potřeby nabití (kvůli konstantnímu napětí).
 - Toxicita kadmia.
 - Nižší napětí článků, větší tolerance nabíjecího a konečného vybíjecího napětí.
 - Menší energetická účinnost a větší počáteční samovybití (20 % měsíčně).
 - Během provozu akumulátorů se zaplavenými elektrodami dochází působením vzdušného oxidu uhličitého k reakci s hydroxidem draselným za vzniku karbonátů, ty snižují kapacitu a zvyšují vnitřní elektrický odpor.

Moderní Ni-Cd akumulátory jsou vyráběny ve tvaru otevřených článků. Musí být plynotěsné, aby mohly být použity jako bezúdržbové. Výrobce je např. firma Hoppecke. Elektrody jejich akumulátorů FNC jsou tvořeny deskami z umělohmotných vláken, které jsou ve speciálních lázních pokovovány hydroxidem nikelným (katoda) a hydroxidem kademnatým (anoda). Navzájem jsou odizolovány plastovými separátory. Udávaná životnost je 20 let, rozsah teplot od -50 do +50 °C a počet cyklů až 3000. Dnes se však Ni-Cd akumulátory příliš nepoužívají kvůli toxicitě kadmia a nízké energetické hustotě.



Obr. 5-4: Akumulátory Hoppecke FNC [72]

5.3.3 Akumulátor nikel-metalhydrid (Ni-MH)

Nikel-metalhydridový akumulátor, někdy uváděn jako nikel-vodíkový, je obdobný nikel-kadmiovému. Katoda i elektrolyt jsou totožné, anoda je tvořena speciální kovovou slitinou, která s vodíkem vytváří směs hydridů neurčitého složení. Tato slitina bývá obvykle složena z niklu, kobaltu, manganu, nebo hliníku. Mohou být použity i vzácné kovy jako lanthan, neodym, praseodym nebo cer.

Akumulátory Ni-MH mají mnoho vlastností shodných s Ni-Cd akumulátory. Rozdíly jsou následující:

- + Mnohem méně škodlivé k životnímu prostředí.
- + Až dvojnásobná kapacita (110 Wh/kg).
- + Malý paměťový efekt.

- Nižší počet cyklů.
- Poměrně vysoké samovybití při nepoužívání (30 % měsíčně).

5.3.4 Akumulátor lithium-iont (Li-Ion)

Anoda je vyrobena z uhlíkové matrice, katoda z oxidů lithia – Li_2MnO_4 , LiCoO_2 nebo LiNiO_2 . Elektrolyt se skládá z rozpouštědla a vodivé soli, nejčastěji LiPF_6 . Všechny články musí být vybaveny protizkratovou ochranou a každá sada obsahuje čip, který hlídá průběh nabíjení a vybíjení.

- + Netrpí paměťovým efektem.
- + Minimální samovybití při nepoužívání (5 % měsíčně).

- + Dobrý poměr energie/hmotnost (až 190 Wh/kg) – lithiové ionty jsou nejlehčí v přírodě se vyskytující ionty a oproti iontům vodíku nebo jiných plynů jsou stálejší.
- + Životnost 500-2000 nabíjecích cyklů.

- Ztráta kapacity bez ohledu na dobu používání – rychlost se zvyšuje s vyšší teplotou (20 % ročně při 25 °C, 35 % při 40 °C), vyšším stavem nabití, a vyšším zatížením.
- Nebezpečí výbuchu nebo vznícení – nutné teplotní a tlakové ochrany.
- Nedovoluje úplné vybití – poklesne-li napětí pod 2,8 V (nominální napětí je 3,7 V), je velmi obtížné akumulátor znovu aktivovat. Proto nesmí být dlouhou dobu ponechán vybitý, aby nedošlo k samovybití pod přípustnou hodnotu.

Tab. 5-4: Hodnoty napětí a hustoty energie Li-Ion akumulátoru [38]:

Materiál katody	Nominální napětí	Nabíjecí napětí	Hustota energie
Kobalt	3,6 V	4,2 V	150 – 190 Wh/kg
Mangan	3,7 – 3,8 V	4,2 V	110 – 120 Wh/kg
Nikl-kobalt-mangan	3,7 V	4,1 V	95 – 130 Wh/kg
Fosfát Saphion®	3,2 – 3,3 V	3,6 V	95 – 140 Wh/kg

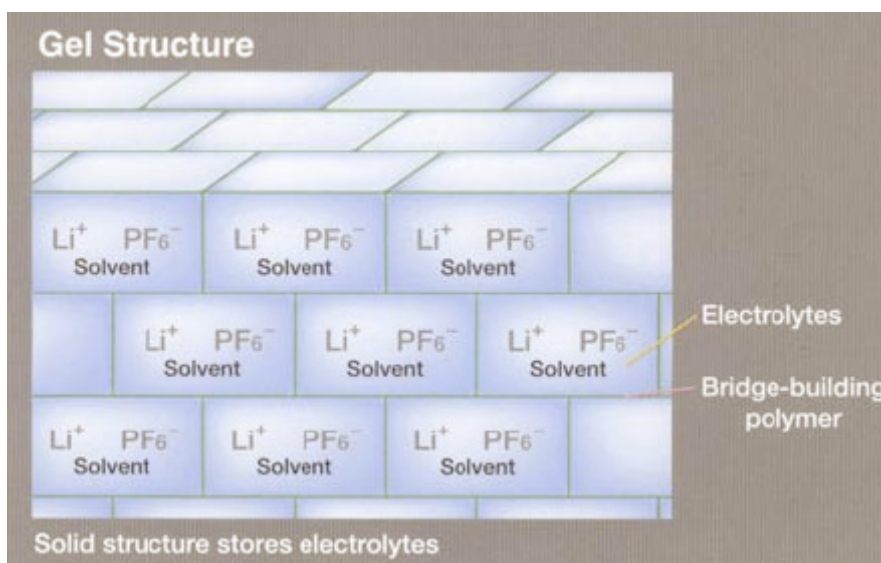
Nejnovějším typem Li-Ion baterií jsou baterie NanoSave™. Jsou vyráběny pomocí nanotechnologií, kdy grafitová anoda je nahrazena oxidem lithia a titanu Li₂TiO. Mají velmi vysokou životnost – po 15 000 nabíjecích cyklech mají 85 % původní kapacity. Další výhodou je velmi rychlá doba nabíjení třífázovým proudem – až 10 minut! Při nabíjení z domácí sítě to trvá několik hodin. Nevýhodami jsou asi o 10 % nižší energetická hustota a velmi vysoká cena.

5.3.5 Akumulátor lithium-polymer (Li-Pol)

Technologicky je odvozený od lithium-iontového akumulátoru. Anoda i katoda jsou ze stejného materiálu, liší se pouze elektrolyt, který je složen z pevného polymeru na bázi oxidu polyetylénu nebo polyakrylonitrilu. Díky pevnému elektrolytu není potřeba příliš masivní obal.

- + Velmi nízká hmotnost a libovolné tvary (obalem může být pouhá fólie).
- + Vyšší kapacita a odolnost vůči mrazu.
- + Hustota energie cca o 20 % vyšší než u Li-Ion.
- + Bezpečnost a nehořlavost.
- + Rychlé dobíjení, životnost až 10 000 cyklů.

- + Zanedbatelné samovybíjení při nepoužívání.
- Nutnost používání elektronické ochrany jednotlivých článků při nabíjení a vybíjení, nesmí být překročeny výrobcem stanovené hodnoty, jinak dojde k nevratnému poškození článků.
- Křehkost, je-li obal článku tvořen kovovou fólií. Při jejím poškození hrozí nebezpečí požáru a poškození zdraví.
- Vyšší cena.



Obr. 5-5: Struktura elektrolytu Li-Pol akumulátoru [3]

5.3.6 Vysokoteplotní akumulátor

Katoda vysokoteplotního akumulátoru není tvořena pevnou deskou jako u předchozích typů, ale roztaveným sodíkem. Anoda z pevné síry nebo niklchloridu je potopena do elektrolytu z roztavených solí (nejčastěji NaAlCl_4). Obě elektrody jsou odděleny izolační keramikou z oxidu hliníku, kterou protékají ionty sodíku při teplotě $300\text{ }^\circ\text{C}$. Pracovní teplota akumulátoru je $250 - 330\text{ }^\circ\text{C}$, elektrolyt tuhne při $157\text{ }^\circ\text{C}$.

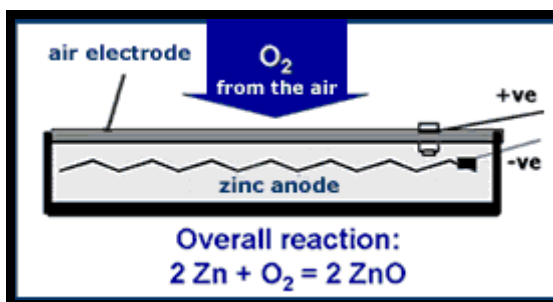
- + Hustota energie (90 Wh/kg).
- + Možnost velkých článků (až 500Ah).
- + Výdrž více než 3000 cyklů.
- + Jsou bezúdržbové.
- + Odpadní teplo je využito k jejich ohřevu.
- Nutnost stále udržovat pracovní teplotu (spotřebují 14% své kapacity za den, kdy nejsou používány).

- Nutný externí přívod energie.
- Vysoký vnitřní odpor.
- Vysoká provozní teplota.
- Vysoká cena.

5.3.7 Akumulátor zinek-vzduch

Jedná se o elektro-chemický akumulátor využívající oxidace zinku kyslíkem přímo ze vzduchu. Částice zinku jsou smíchány s elektrolytem (obvykle roztok hydroxidu draselného). Tyto akumulátory se nedají nabíjet přímo elektřinou, ale je nutná recyklace odpadního oxidu zinečnatého. Výkon lze regulovat množstvím protékajícího vzduchu.

- + Vysoká hustota energie (370 Wh/kg).
 - + Nízká hmotnost.
 - + Levná výroba.
 - + Dlouhá životnost (bez přístupu vzduchu).
 - + Odpad ve formě ZnO_2 lze recyklovat zpět na Zn.
-
- Velké samovybíjení na vzduchu – při nepoužívání musí být uskladněny v anaerobním prostředí.
 - Nelze je dobít elektřinou, ale výměnou náplně (viz výše).



Obr. 5-6: Schéma akumulátoru zinek-vzduch [46]

5.3.8 Akumulátor hliník-vzduch

Hliníkové akumulátory pracují na podobném principu jako zinkové. Elektřinu vyrábí reakcí vzdušného kyslíku s hliníkem. Mají nejvyšší energetickou hustotu ze všech akumulátorů, teoreticky lze dosáhnout až 1300 Wh/kg. Přesto se kvůli značnému počtu problémů nepoužívají (až na pár výjimek pro vojenské účely). Pro průmyslové využití je nutný jejich další vývoj.

5.3.9 Akumulátory používané v současnosti

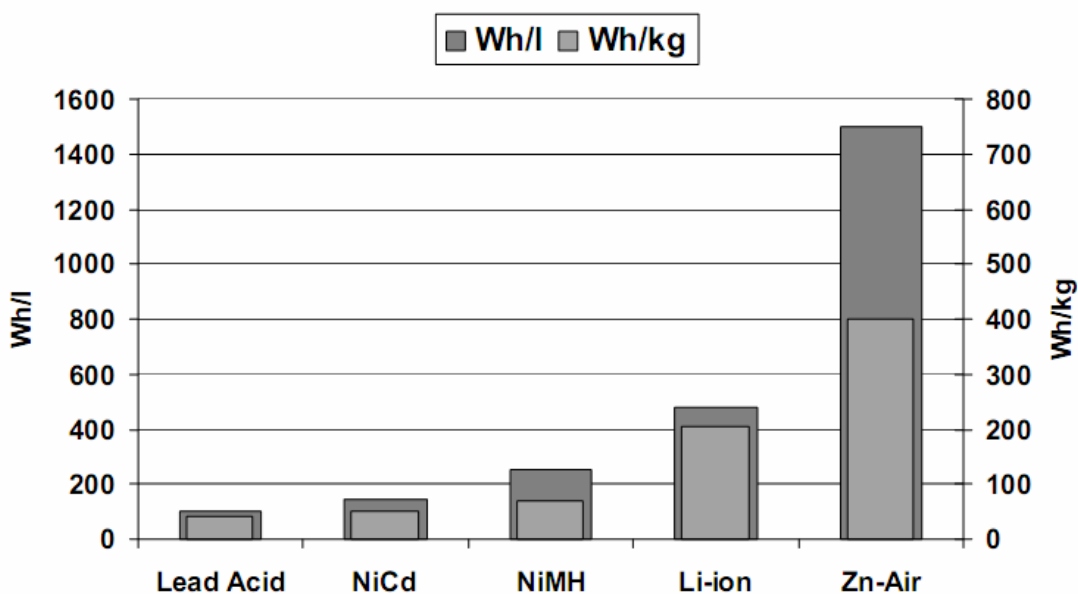
K velkému pokroku v oblasti baterií a akumulátorů došlo díky velkému rozmachu notebooků a mobilních telefonů. Vzhledem k jejich čím dál vyšší spotřebě investovaly elektrotechnické firmy do vývoje obrovské prostředky. Z toho teď těží i automobilový průmysl.

V současných elektromobilech se nejčastěji používají akumulátory lithium-iontové, případně nikl-metalhydridové. Li-Ion nabízejí v poměru k ceně nejlepší parametry – energetickou hustotu, nízkou hmotnost a vysokou výdrž. Ovšem dojezd v porovnání s automobily na klasická paliva je stále malý, většinou okolo 100 km.

Budoucnost podle mého názoru patří akumulátorům hliník-vzduch, nebo zinek-vzduch. Nevyžadují totiž použití hořlavých kapalných elektrolytů a navíc nabízejí až pětkrát vyšší energetickou kapacitu oproti stejně velkým lithium-iontovým akumulátorům. Vývoj těchto akumulátorů oznámila např. japonská automobilka Toyota. Dalšího pokroku se očekává od použití nanotechnologií. Ty byly využity např. u zmíněného Li-Ion akumulátoru NanoSave™.

Tab. 5-5: Porovnání parametrů jednotlivých typů akumulátorů (upraveno) [38]

	Olověný	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ion (Co)	Li-Ion (Mn)	Li-Ion (Fosfát)	Li-Pol
Hustota energie [Wh/kg]	30 - 50	45 - 80	60 - 120	150 - 190	110 - 120	95 - 140	130 - 200
Počet cyklů do dosažení 80% původní kapacity	200 - 300	1500	300 - 500	300 - 500	300 - 500	1000	>1000
Doba rychlonaabití [hod]	8 - 16	1	2 - 4	1,5 - 3	<1	<1	<1
Samovybití / měsíc při 20 °C	5 %	20 %	30 %	3 %			
Nominální napětí článku [V]	2	1,25	1,25	3,6	3,7 - 3,8	3,3	3,7
Provozní teplota (při vybití) [°C]	-20 až +60	-40 až +60	-20 až +60				
Nároky na údržbu	3 - 6 měsíců	30 - 60 dní	60 - 90 dní	nepotřebují			
Komerční použití od	1970	1950	1990	1991	1996	2006	1996
Toxicita	Vysoce toxické, nebezpečné pro životní prostředí			Nízká toxicita			

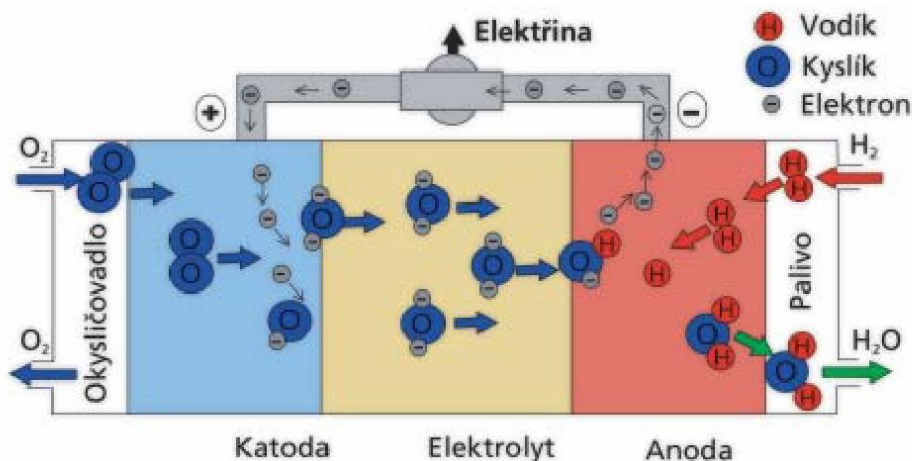


Obr. 5-7: Hustota energie vybraných typů akumulátorů [73]

5.4 Palivové články

Palivový článek je zařízení, ve kterém na základě elektrochemických procesů dochází k přímé přeměně vnitřní energie paliva na energii elektrickou. Skládá se ze dvou elektrod – anody a katody, mezi nimi je vhodný elektrolyt.

Princípem činnosti je přivádění paliva na palivovou elektrodu – anodu. Palivo zde oxiduje a vyloučené elektrony putují obvodem ke katodě a vytvářejí tak elektrický proud, obdobně jako u akumulátorů. Na katodu je přiváděno okysličovadlo (kyslík, vzduch nebo chlor), které zde redukuje a současně reaguje s kladnými ionty pronikajícími elektrolytem od anody (viz obr. 5-8). K zastavení reakcí stačí přerušit elektrický obvod.

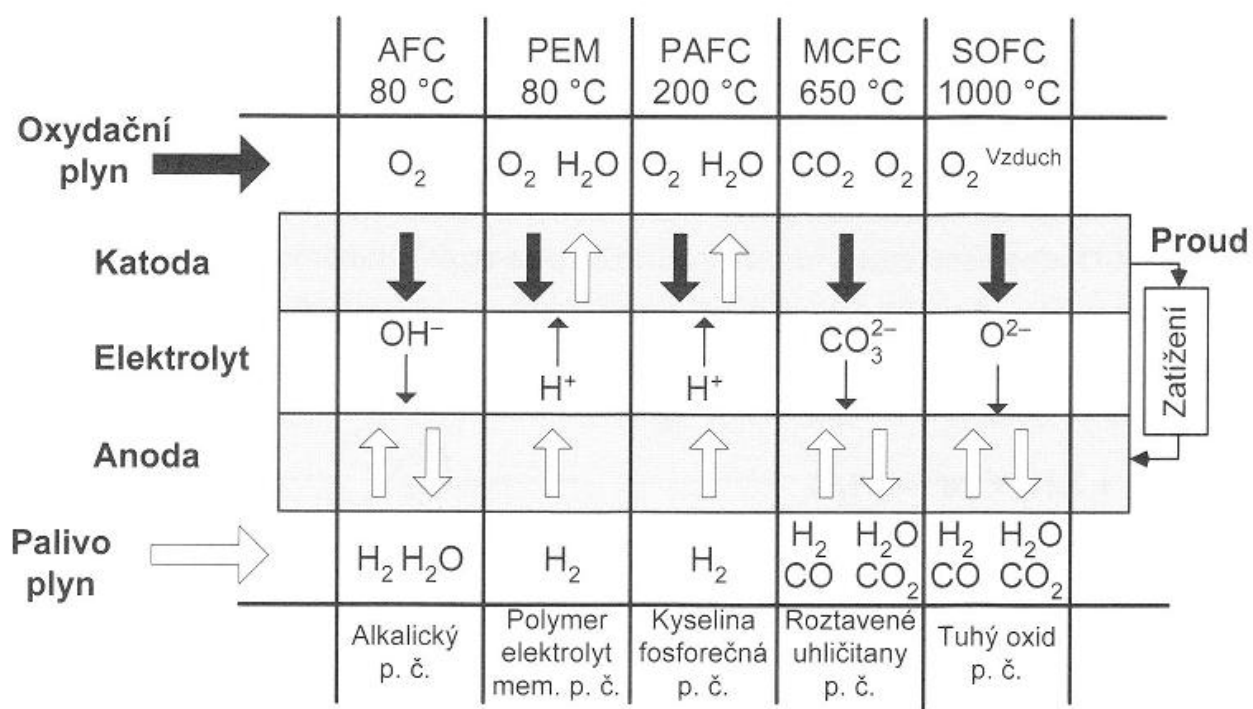


Obr. 5-8: Schéma palivového článku [2]

Anoda musí být uzpůsobena skupenství přiváděného paliva – je-li palivem plyn, musí být porézní, aby zachytila co nejvíce bublinek paliva. Současně musí obsahovat kapiláry pro zachycení elektrolytu. Při nízké provozní teplotě článku musí být povrch elektrod opatřen katalyzátorem příslušných reakcí. Nejčastěji se používají platina a palladium.

Elektrolyt může být kapalný nebo pevný. Podle používaného elektrolytu a pracovní teploty se palivové články člení na:

- Nízkoteplotní – pracovní teplota je do 130 °C. Patří sem palivový článek s alkalickým elektrolytem (AFC), s polymerním elektrolytem (PEFC, PEMFC), a přímý metanolový.
- Středněteplotní – palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC). Pracuje při teplotě okolo 200 °C.
- Vysokoteplotní – 600 až 1000 °C. Do této kategorie patří palivový článek s roztavenými uhličitany (MCFC) a s tuhými oxidy (SOFC).



Obr. 5-9: Porovnání typů palivových článků [1]

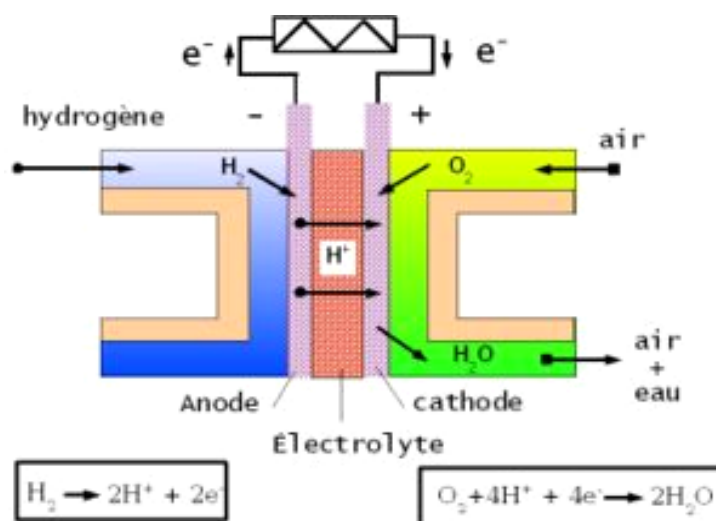
Tab. 5-6: Rozdělení a parametry palivových článků [29]

Druh	Nízkoteplotní			Středně teplotní	Vysokoteplotní	
	Alkalické AFC	Membránové PEMFC	Přímé metanolové DMFC	Kyselé PAFC	S tavenými karbonáty MCFC	S pevnými oxidy (SOFC)
Elektrolyt	Hydroxid draselný	Iontoměničná membrána		Kyselina fosforečná	Tavené karbonáty lithia, vodíku, draslíku	Oxid zirkoničitý s příměsí yttria
Pracovní teplota [°C]	60 - 100	20 - 80	20 - 130	170 - 250	600 - 650	800 - 1000
Pohyblivý iont	OH ⁻	H ⁺			CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Elektrická účinnost [%]	45 - 60	40 - 60	40	38 - 45	45 - 60	50 - 65
Výkon [kW]	< 20	< 250	< 10	50 – stovky kW	Několik MW	
Používané palivo	Vodík	Vodík, reformovaná paliva	Methanol (ethanol)	Vodík, reformovaná paliva	Vodík, nepřímá paliva	Všechny druhy bez reformování
Možné aplikace	Kosmické lodě, lodě, ponorky	Univerzální	Přenosné články	Výroba energie		

5.4.1 Alkalický palivový článek (AFC)

Alkalické palivové články používají jako elektrolyt 3 – 50% roztok hydroxidu draselného. Palivem je vodík, který zde může být oxidován pouze čistým kyslíkem. Oxidace vzduchem je nepřijatelná, neboť vzdušný oxid uhličitý reaguje s hydroxidem za vzniku uhličitanu K₂CO₃. Ten zanáší póry elektrod a brání difúzi.

Alkalické články mají vysokou energetickou kapacitu a účinnost až 70 %. Pracovní teplota se pohybuje v rozmezí 60 – 80 °C, životnost je až 15 000 hod. Tyto články byly používány jako zdroje elektřiny již v kosmických lodích Apollo. Použití v automobilech ovšem brání nemožnost oxidace vzduchem.



Obr. 5-10: Alkalický palivový článek [48]

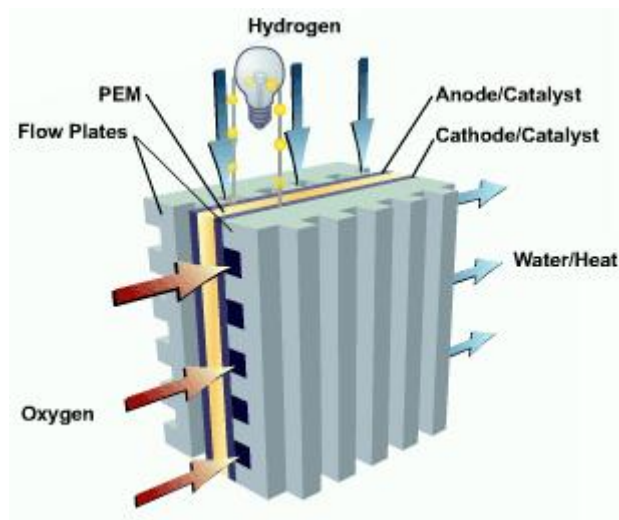
5.4.2 Palivový článek polymer-elektrolyt (PEMFC)

Elektrolyt je tvořen tenkou polymerovou membránou, její složení je podobné teflonu. Membrána izoluje elektrony a zároveň výborně vede ionty H⁺ (protony). Elektrody jsou vyrobeny z tenkého porézního grafitického papíru, který je pokryt vrstvou teflonu (proti zvlhnutí) a malým množstvím platinové černi. Elektrody mají na opačných stranách grafitovou destičku s jemnými kanálky, které rozvádějí palivo (na anodě) a okysličovadlo (na katodě). Mezi anodu a katodu je poté vložena elektrolytická membrána a vše je pod tlakem spojeno dohromady.

Pracovní teplota článku je 70 – 90 °C, při pokojové teplotě dodává cca 50 % svého maximálního výkonu (50 – 250 kW). Dalšími výhodami jsou:

- + Jednoduchá výroba.
- + Životnost až 20 000 hod.
- + Odolnost proti vysokým tlakům.
- + Provozní schopnost při vysokém napětí – nízké elektrické ztráty a dobrá výkonová hustota (1300 W/l).
- + Vysoká dynamika v celém výkonovém rozsahu.

Většímu rozšíření ovšem brání vysoká cena polymerových membrán.

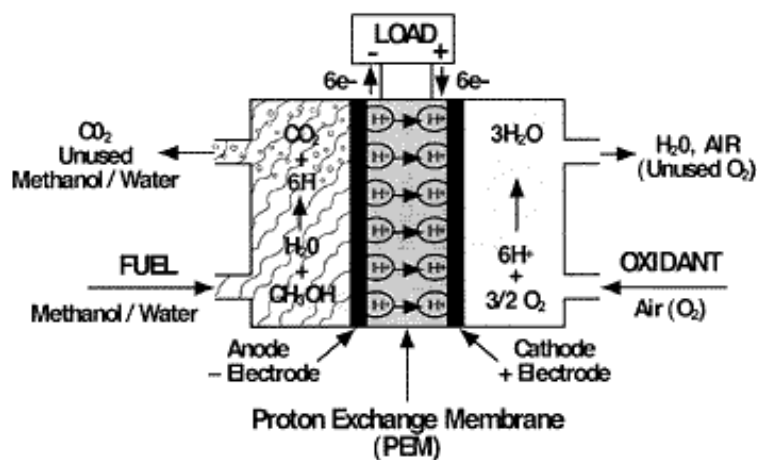


Obr. 5-11: Palivový článek polymer-elektrolyt [49]

3.4.3 Přímý metanolový palivový článek (DMFC)

Elektrolytem může být polymerová fólie, vodní roztok, nebo alkalický roztok hydroxidu draselného. Palivo – čistý metanol je ředěn vodou a přiváděn k anodě. Oxidace na katodě probíhá pomocí vzduchu.

Katalyzátorem katody je čistá platina, anoda je pokryta směsí rhutenia a platiny. Důvod použitý rhutenia je tento – při napětí nižším než 450 mV dochází k pokrytí anody oxidem uhličitým a tím dojde ke ztrátě účinnosti jejího katalyzátoru. Rhutenium tento jev zčásti odbourává, přesto není problém ještě zcela vyřešen. Dalším negativem je difúze methanolu z anody na katodu. Proto je výzkum orientován především na hledání vhodných elektrolytických membrán.



Obr. 5-12: Přímý methanolový palivový článek [50]

5.4.4 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)

Svazek tohoto článku je podobný polymer-elektrolytovému článku. Obsahuje vysoce koncentrovanou kyselinu fosforečnou ve formě gelu. Požadavky na čistotu paliva jsou oproti AFC nebo PEMFC článkům menší, neboť kyselina nereaguje s oxidem uhličitým. Pracovní teplota je okolo 200 °C. Jako palivo se používá methanol nebo zemní plyn. Palivo je před článkem rozloženo reformerem a dojde ke zvýšení obsahu vodíku. Oxidace paliva probíhá pomocí vzduchu.

Velkou nevýhodou je, že teplota nesmí být nižší než 45 °C. Hrozí poškození článku, neboť kyselina fosforečná ztuhne. Z tohoto důvodu nejsou PAFC články příliš vhodné pro použití do automobilů.

5.4.5 Palivový článek s roztavenými uhličitany (MCFC)

Palivové články s roztavenými uhličitany pracují při teplotě cca 650 °C. Obě elektrody proto musí odolávat velmi vysokým teplotám a agresivnímu prostředí. Anoda je vysoce porézní, vyrábí se spékáním práškového niklu s příměsí chrómu. Katodu tvoří oxid nikelnatý s lithiem. Elektrolyt je tvořen směsí roztavených uhličitánů (zejména Li_2CO_3 a K_2CO_3) v porézní matici ze sloučeniny LiAlO_2 . Jako palivo se používá zemní plyn, oxidačním činidlem je vzduch. Zemní plyn se za vysokých teplot rozkládá a vzniklý vodík se zúčastní reakcí na anodě.

5.4.6 Palivový článek s tuhými oxidy (SOFC)

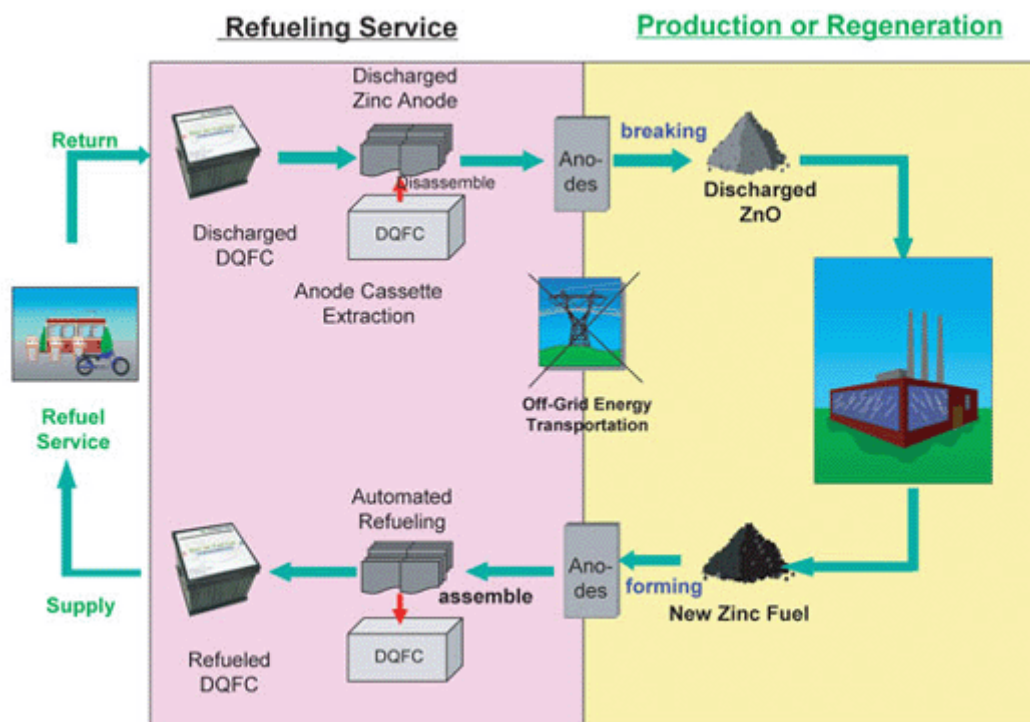
Články s tuhými oxidy (SOFC) pracují při teplotách až kolem 1000 °C. Anoda se vyrábí z niklu a oxidu zirkoničitého, její katalyzátor ze sloučeniny NiZnO . Katodu tvoří sloučenina oxidu manganového a lanthanu, katalyzátor SrLa_2Mn . Elektrolyt je z keramických oxidů zirkonu a yttria. Jako palivo se používají odpadní látky získané ze zpracování uhlí.

Výhodou článku je nemožnost elektrolytu způsobovat korozi, použití libovolných tvarů a využití horké odpadní páry. Nevýhodou je nedokončený vývoj a vysoká provozní teplota, kvůli které nelze tyto a SOFC články použít u automobilů.

5.4.7 Palivový článek zinek-vzduch (ZAFC)

Palivové články zinek-vzduch pracují na obdobném principu jako zinek-vzduchové akumulátory. Ke katodě je přiváděn vzduch, který prochází přes propustnou membránu. Membrána propouští molekuly kyslíku, jež se přemění na vodu a hydroxidové ionty. Ty putují elektrolytem k zinkové anodě, kde reagují a dochází k uvolnění elektronů.

Jako palivo tedy slouží zinek, který oxiduje na oxid zinečnatý. Po přeměně veškerého paliva stačí doplnit nádrž zinkem, nebo připojit do elektrické sítě a zpětnou reakcí dojde k redukci oxidu zinečnatého zpět na zinek. Zaváděním zinek-vzduchových akumulátorů a článků se zabývá např. kalifornská firma Powerzinc. Obr. 5-13 znázorňuje regeneraci zinku.



Obr. 5-13: Regenerace zinku jako paliva [68]

5.4.8 Palivové články vhodné pro vozidla

Palivový článek zpravidla bývá jen jednou z částí energetického systému. Ten ještě obvykle obsahuje reformer (zařízení na úpravu primárního paliva), měnič a jednotku, která je schopna zužítkovat vzniklé teplo. Návrh celého systému zahrnuje nejen optimalizaci samotného článku, ale i dalších součástí, přičemž šířka možností návrhu je omezena danou aplikací. Roli zde hraje například typ paliva, hladina emisí, využití odpadního tepla a požadovaná úroveň tepla. [30]

Vzhledem k provozním teplotám mohou být v elektromobilech používány pouze nízkoteplotní palivové články. Článek s alkalickým elektrolytem však nepřipadá v úvahu, neboť může jako oxidační činidlo používat pouze čistý kyslík. Přímometanolový článek má výhodu v použitém palivu. Distribuce a skladování metanolu je oproti vodíku snadnou záležitostí, i když se jedná o jedovatou látku. Navíc může být použit i bioetanol, což je velká výhoda. Bohužel tyto články disponují příliš malým výkonem. Jediným použitelným článkem pro elektromobily je tedy membránový (polymer-elektrolytový). Hromadnému využití ovšem brání vysoká cena polymerových membrán a nevyřešené problémy uchování a distribuce vodíku (viz kapitola č. 4).

5.5 Hybridní uspořádání

Automobil s hybridním pohonem ke svému pohonu využívá více zdrojů energie, přičemž jsou využity přednosti jednotlivých pohonů. Kombinace pohonů mohou být:

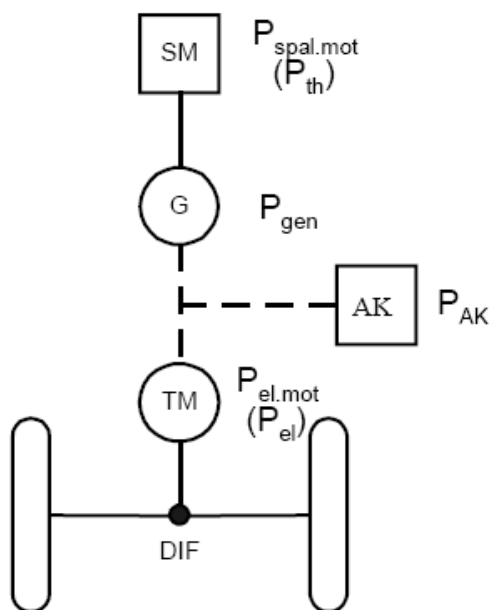
- spalovací motor + elektromotor + akumulátor (+ palivový článěk),
- spalovací motor + elektromotor + externí přívod elektrické energie (trolej),
- spalovací motor + setrvačník,
- plynová turbína + generátor + elektromotor + akumulátor.

Snad všechny současné hybridy využívají kombinaci elektromotoru se spalovacím motorem. Spalovací motor může sloužit jako hlavní pohonná jednotka, nebo naopak pracuje pouze v režimu své nejvyšší účinnosti a pohání generátor. Existuje několik kombinací – sériové, paralelní a kombinované uspořádání.

5.5.1 Sériové uspořádání

Sériové hybridní uspořádání spočívá v pohonu vozidla výhradně elektromotorem. Ten při rozjezdu a malé zátěži (zejména při jízdě ve městě) získává elektrickou energii z akumulátorů. Při vyšší zátěži dojde ke spuštění spalovacího motoru, který pracuje pouze při otáčkách, kdy má nejvyšší termodynamickou účinnost. Spalovací motor však pohání pouze generátor a vzniklým elektrickým proudem je napájen trakční elektromotor. Pokud je v akumulátorech dost energie, motor se vypne. Schéma zapojení je na obr. 5-14 (SM = spalovací motor, G = generátor, AK = akumulátor, TM = trakční motor).

Nevýhodou sériového uspořádání jsou poměrně velké ztráty, neboť dochází k trojnásobné přeměně energie: chemická → mechanická → elektrická → mechanická. Z tohoto důvodu se příliš nepoužívá v osobních automobilech. Výjimkou je Chevrolet Volt, jehož sériová výroba začne v příštím roce. Sériové uspořádání naopak najdeme u diesellových lokomotiv nebo u některých trolejbusů, které tak mohou obsluhovat i okrajové části měst, ve kterých není nataženo trolejové vedení.



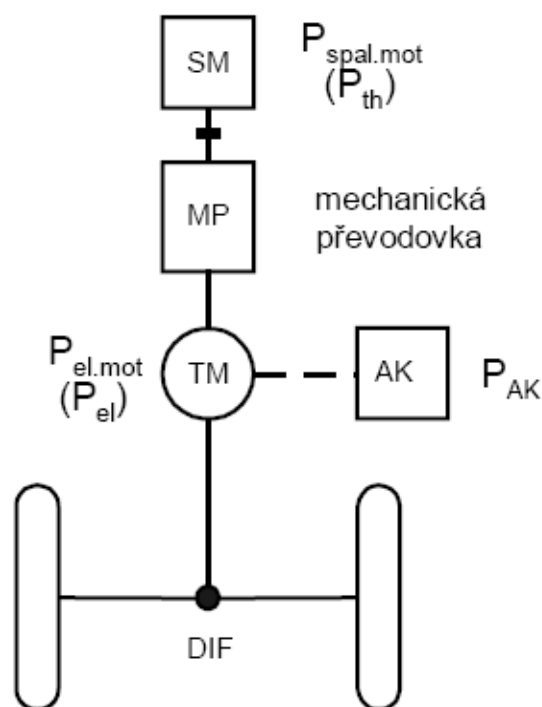
Obr. 5-14: Schéma sériového hybridního uspořádání [7]

5.5.2 Paralelní uspořádání

Paralelní hybridní uspořádání je tvořeno klasickým mechanickým přenosem výkonu – ze spalovacího motoru přes mechanickou převodovku. Systém je pouze doplněn jedním elektrickým strojem. Ten se nachází buď mezi motorem a převodovkou, nebo na výstupní hřídeli převodovky (schéma na obr. 5-15).

Elektrický stroj pracuje ve dvou režimech. Jako elektromotor pomáhající spalovacímu motoru při nižším točivém momentu než je potřeba (např. při rozjezdu nebo předjíždění) a jako generátor při přebytku momentu, kdy dobíjí akumulátor. Maximální otáčky elektromotoru musí odpovídat maximálním otáčkám spalovacího motoru.

Oproti sériovému uspořádání je přenosu výkonu dosahováno s vyšší účinností. Výhodou je zlepšení účinnosti spalovacího motoru vhodnou volbou pracovního bodu, ovšem spalovací motor zůstává mechanicky pevně vázán s poháněnou nápravou. Pohon pouze elektromotorem nebývá zpravidla možný, neboť elektromotor nedosahuje potřebných výkonů. Slouží tedy jen jako pomocný agregát.



Obr. 5-15: Schéma paralelního hybridního uspořádání [7]

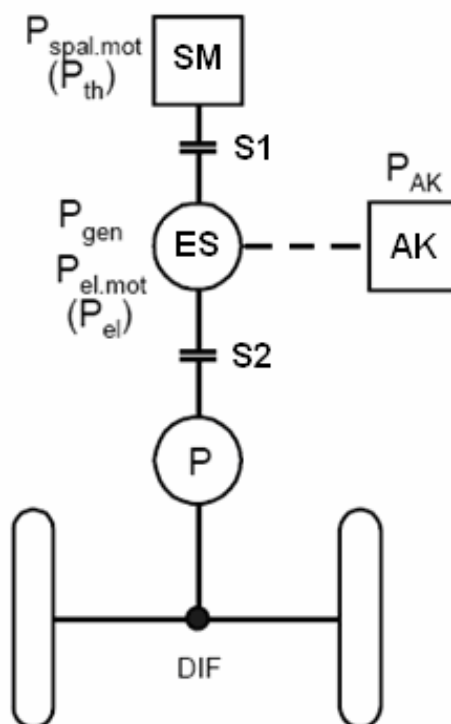
5.5.3 Kombinované uspořádání

5.5.3.1 Přepínatelné uspořádání

Kombinované uspořádání spojuje dohromady paralelní a sériový systém. Vozidlo s tímto uspořádáním obsahuje dvě spojky – první spojka (na obr. 5-16 a dále v textu označena jako S1) spojuje spalovací motor se stejnosměrným elektrickým strojem (ES), druhá (S2) spojuje elektrický stroj s převodovkou (P). Při jízdě dochází k různým kombinacím jejich sepnutí v závislosti na jízdním režimu.

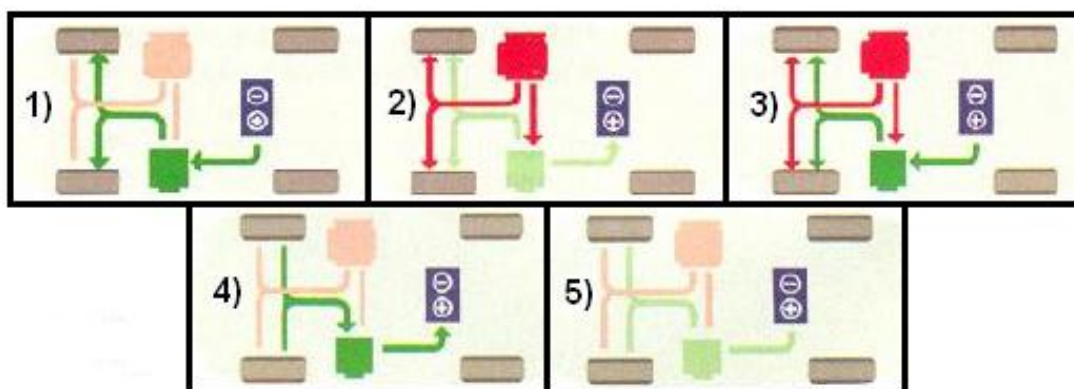
- 1) Krátké vzdálenosti a rovnoměrná jízda přibližně do 50 km/h (jízda po městě) – automobil je poháněn pouze elektromotorem. Spalovací motor je vypnut, spojka S1 rozpojena a S2 sepnuta. Elektromotor je napájen energií z akumulátoru.
- 2) Pokud dojde k vybití akumulátorů, nebo je potřeba větší akcelerace, případně vyšší rychlosti, dojde k sepnutí S1 a automobil je poháněn spalovacím motorem. Elektrický točivý stroj změní svojí funkci na generátor a dobíjí akumulátory.
- 3) Při prudké akceleraci, kdy je potřeba nejvíce točivého momentu, jsou sepnuty obě spojky a elektrický stroj v režimu motoru zvyšuje vstupní moment do převodovky.
- 4) Při brzdění dojde k rozpojení spojky S1 a vypnutí spalovacího motoru. Generátor přeměňuje kinetickou energii vozidla na elektrickou a dobíjí akumulátory.

- 5) Při zastavení vozidla dojde k vypnutí obou motorů a vozidlo zůstane v „pohotovostním režimu“.



Obr. 5-16: Schéma kombinovaného přepínatelného uspořádání (upraveno) [7]

Jednotlivé režimy znázorňuje obr. 5-17. Červená zobrazuje tok výkonu ze spalovacího motoru, zelená z generátoru.



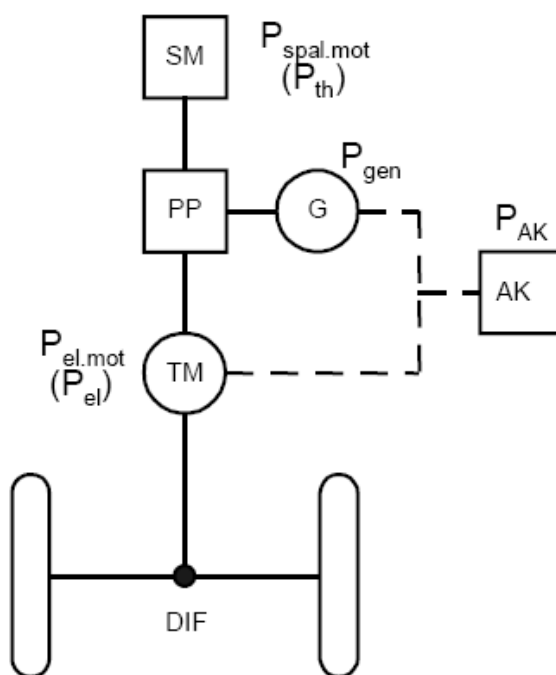
Obr. 5-17: Znázornění jízdních režimů vozu s kombinovaným uspořádáním [17]

Spojením výhod jednotlivých druhů pohonů je získáno menší množství vypouštěných škodlivých emisí, větší dojezd a vysoký točivý moment. Jednotlivé druhy jsou využívány v oblastech své nejvyšší účinnosti. Udávané snížení celkové spotřeby je asi 20 %. Nevýhodou

jsou vyšší pořizovací náklady než u běžného vozu, zvýšení hmotnosti vozidla (cca o 100 kg), zmenšení úložných prostor a v neposlední řadě větší pravděpodobnost poruchy některé součásti složitého systému.

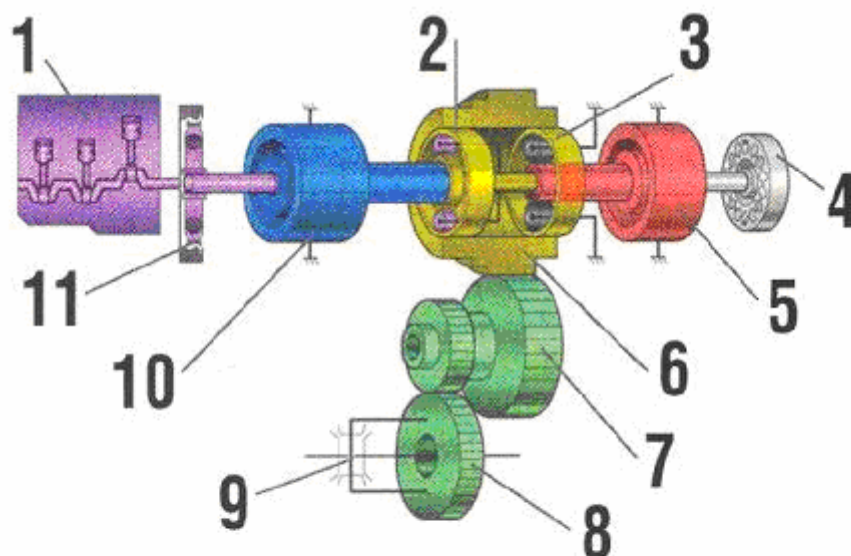
5.5.3.2 Uspořádání s dělením výkonu

Uspořádání s dělením výkonu je druhou variantou kombinovaného hybridního pohonu. Oproti přepínatelnému uspořádání obsahuje dva elektrické stroje – generátor a trakční motor. K dělení výkonu nejčastěji slouží diferenciální planetová převodovka (tzn. se dvěma stupni volnosti), na obr. 5-18 označena jako PP. Rozděluje výkon spalovacího motoru na dvě části. První část je mechanicky přenášena na hnací nápravu, druhá část pohání generátor. Generovaná elektřina buďto dobíjí akumulátory nebo pohání trakční motor, který je mechanicky spojený s hnací nápravou. Trakční motory mohou být integrovány i přímo v kolech vozidla.



Obr. 5-18: Schéma kombinovaného uspořádání s dělením výkonu [7]

Při brzdění působí trakční motor jako generátor a napájí palubní síť, případně akumulátor. Výhody a nevýhody tohoto systému jsou podobné jako u přepínatelného kombinovaného uspořádání. Automobily s kombinovaným uspořádáním, kdy se o pohon může starat jak samotný elektromotor, tak spalovací motor, bývají označovány také jako Strong- nebo Full-hybridy.



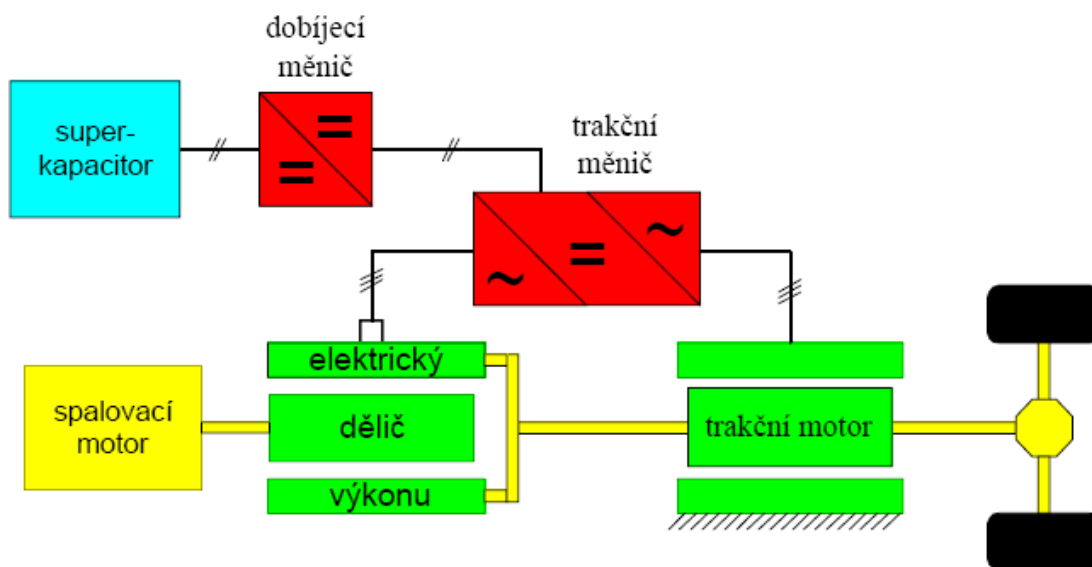
- 1 - spalovací motor, 2 - rozdělovací planetová převodovka (PP),
3 - PP pro snížení otáček elektromotoru, 4 - olejové čerpadlo,
5 - přední elektromotor, 6 - výstupní kolo PP, 7 - ozubené kolo předlohy,
8 - stálý převod nápravy, 9 - diferenciál, 10 - generátor, 11 - tlumič torzních kmitů

Obr. 5-19: Uspořádání s dělením výkonu automobilky Lexus [17]

5.5.3.3 Uspořádání s dělením výkonu elektrickým děličem

Toto uspořádání je stejné jako u předchozích dvou variant s tím rozdílem, že dělič výkonu je tvořen speciálním elektrickým strojem s rotujícím statorem a rotorem. Rotor je spojen s klikovou hřídelí spalovacího motoru a jeho hnací moment se elektromagnetickými silami přenáší přes vzduchovou mezeru na stator. Rotující stator je spojen s trakčním motorem a s výstupní hřídelí. Moment spalovacího motoru se tak přičítá k hnacímu momentu trakčního motoru.

Při rozjezdu vozidla se celý výkon spalovacího motoru přeměňuje v děliči výkonu na elektrickou energii, kterou je napájen trakční motor. Funkce tohoto systému odpovídá sériovému hybridnímu pohonu s tím rozdílem, že výstupní moment na hřídeli za trakčním motorem je větší o moment spalovacího motoru. V okamžiku, kdy se vozidlo začne pohybovat, klesnou rozdílové otáčky mezi rotorem a statorem děliče a v důsledku toho se sníží i elektrický výkon děliče a trakčního motoru. Zbývající část výkonu spalovacího motoru se elektromagnetickými silami přenáší přes vzduchovou mezeru na stator a dále na výstupní hřídel pohonu. S narůstající rychlostí jízdy se zvyšuje část přenášená mechanicky, zatímco elektricky přenášená část úměrně tomu klesá. Výsledkem je snižování ztrát v elektrických strojích [7].



Obr. 5-20: Uspořádání s elektrickým děličem výkonu [7]

5.5.4 Rozdělení podle výkonu elektromotoru

Jako hybridní vozidla jsou označována také vozidla s klasickým pohonem spalovacím motorem, která jako spouštěč motoru používají startér-generátor, tedy elektromotor malého výkonu poháněný řemenem. Díky němu je v těchto vozidlech zaveden tzv. Start/Stop systém. Jeho funkce spočívá v možnosti vypnutí a opětovném zapnutí motoru při zastavení vozidla. Při zastavení stačí sešlápnout brzdu, vyřadit rychlost a uvolnit spojku, motor se vypne. K opětovnému nastartování dojde po sešlápnutí spojky. Start/Stop se neaktivuje v případech, kdy je venkovní teplota nižší než 2 °C a motor není zahřátý na provozní teplotu. Další podmínky aktivace se liší podle výrobce.

Vozidla vybavena tímto systémem, případně i systémem rekuperace energie (viz. kap. 5.6), jsou označována jako „hybridní nižší formy.“ Z tohoto hlediska se tedy hybridní vozidla rozdělují podle výkonu elektromotoru na:

- **Mikro-hybridy** – využívají pouze Start/Stop systém. Úsporu paliva přináší zejména ve městě při častém zastavování na křižovatkách. Udávaná úspora činí až 8 %.
- **Mild-hybridy** – mezi motorem a převodovkou mají umístěný spouštěcí generátor. Ten umožňuje funkci Start/Stop a také dovede rekuperovat energii při brzdění. V některých případech může také pomáhat jako elektromotor při prudké akceleraci. Výkony těchto generátorů nepřesahují 25 kW. Maximální úspora paliva dosahuje cca 15 %.
- **Full-hybridy** – v tomto případě už se jedná o plně hybridní automobily s kombinovaným uspořádáním. Elektromotory jsou již schopny samy pohánět vozidlo, kapacita akumulátorů však dostačuje pouze k ujetí několika málo kilometrů. Výkon

elektromotoru/generátoru může dosahovat až 75 kW a spotřeba paliva je až o 20 % nižší.

- **Plug-In hybridy** – jedná se o Full-hybridy vybavené zásuvkou na dobíjení elektrické energie z veřejné sítě. Jejich dojezd na elektřinu je díky větším akumulátorům o něco vyšší (viz obr. 5-21).

Typ	konv. Fzg.	Micro Hybrid	Mild Hybrid	Full Hybrid	Plug-In Hybrid	Elektro-Fzg.
Funktion	Starten	Start-Stopp (Rekuperation)	Start-Stopp Rekuperation (Boost)	Start-Stopp Rekuperation Boost (E-Drive, 2 km)	Start-Stopp Rekuperation Boost (E-Drive, 20 km)	E-Drive > 100 km
Energiespeicher						
el. Leistung (typisch)	~ 2 kW	~ 6 kW	~ 15 kW	~ 30 kW		~75 kW
Spannung (typisch)	12 V	< 60 V	> 60 V			>> 60 V
Lebensdauer (gefordert)	5 Jahre		8 - 10 Jahre			>10 Jahre
Technologie		Blei-Säure	Nickel-Metallhydrid	Lithium-Ion		SuperCaps

Obr. 5-21: Rozdělení hybridních pohonů dle výkonu elektromotoru [15]

Systémem Start/Stop je v současnosti vybavováno čím dál více vozidel různých automobilek. U nedávno představeného Porsche Panamera je dokonce tento systém integrován přímo se samočinnou převodovkou.

5.6 Rekuperace energie

Při brzdění vozidla bubnovými a kotoučovými třecími brzdami dochází k maření veškeré energie v podobě odváděného tepla. Velký význam má proto rekuperace energie. Při ní dochází k přeměně kinetické energie na jiný druh energie, který je poté uložen do patřičného zásobníku a znovu využit při akceleraci vozidla. Nejčastěji se využívá elektrická, kinetická a tlaková energie.

Rekuperace energie se využívá u vozidel s elektrickým pohonem snad od počátku jejich rozvoje. Do vozidel se spalovacími motory ji jako první začala před pár lety zavádět automobilka BMW. Její systém „BMW EfficientDynamics“ je kromě systémů Start/Stop a rekuperace energie navíc vybaven dalšími funkcemi, jež napomáhají snižovat spotřebu paliva.

Jedná se o odpojení všech nepotřebných spotřebičů od akumulátoru při prudkém zrychlení. Veškerý výkon motoru je tak využit pouze k pohonu vozidla. Dalším prvkem jsou nastavitelné klapky mezi chladičem a maskou kapoty, které zmenšují odpor vzduchu při menší potřebě chlazení. Dále je hydraulický posilovač řízení nahrazen elektromotorem. Ten je aktivní pouze tehdy, je-li to potřeba. Při rovné jízdě nebo při konstantním natočení volantu tak nespotebovává žádnou energii.

5.6.1 Rekuperace s využitím elektrické energie

Při brzdění vozidla pracuje trakční elektromotor v režimu generátoru a dobíjí akumulátory. U moderních vozidel se začínají uplatňovat vysoko energetické kondenzátory – tzv. superkondenzátory (superkapacity). Jsou schopny rychle akumulovat a následně odevzdat velké množství elektrické energie. Při opakovaném nabíjení a vybíjení vysokými proudy netrpí zahříváním nebo snižováním životnosti. Rovněž nemají paměťový efekt a mohou pracovat i při nízkých teplotách. Jejich vlastnosti jsou:

- + Vysoká účinnost a životnost.
 - + Vysoké nabíjecí a vybíjecí proudy => vysoký výstupní výkon.
 - + Velmi nízký vnitřní odpor => malé zahřívání.
 - + Vyráběny z netoxických materiálů => zvýšená bezpečnost.
 - + Možnost velmi častého nabíjení a vybíjení s vysokou efektivitou.
 - + Rychlá reakce na změny nabíjení a vybíjení.
-
- Velmi nízká měrná energie (viz tab. 5-7).
 - Závislost napětí na množství uloženého náboje.
 - Vysoká dielektrická absorpce.
 - Vysoká cena.

Tab. 5-7: Porovnání vlastností superkondenzátoru a akumulátoru

Parametr	Akumulátor Ni-MH	Akumulátor Li-Ion	Kondenzátor	Superkondenzátor
Hustota energie [Wh/kg]	60 – 120	100 – 190	0,2	15
Měrný výkon [kW/kg]	1	2 – 3	500	10
Doba nabíjení (vybíjení)	2 – 4 hod	1 – 3 hod	1 ms	10 s
Životnost	300 – 500 cyklů	1000 cyklů	1 000 000 cyklů	1 000 000 cyklů

Superkondenzátor je tvořen dvěma elektrodami z hliníkové fólie povrstvených aktivním uhlíkem, mezi nimi je elektrolyt a separátor. Aktivní uhlík má dobrou elektrickou vodivost, vysokou poréznost (až 2000 m²/g) a je chemicky netečný. Ve vybitém superkondenzátoru

jsou ionty rovnoměrně rozloženy v elektrolytu mezi elektrodami. Po přiložení napětí na elektrody se začnou záporné ionty pohybovat ke kladné elektrodě a kladné naopak. Na obou elektrodách se tak vytvoří vrstva se zrcadlovým rozložením elektrického náboje. Provozní napětí jedné buňky je cca 2,3 V.



Obr. 5-21: Schéma superkondenzátoru [8]

Současné moderní superkondenzátory jsou vyrobeny z aerogelu, jejich elektrody z kompozitního papíru s uhlíkovými vlákny. Využívá je např. automobilka BMW ve svém systému „BMW Active Hybrid“. Jsou uloženy ve dveřních prazích a dávají výkon až 190 kW po dobu tří sekund nebo 65 kW po dobu deseti sekund. Další uplatnění našly superkondenzátory v několika městských autobusech v Šanghaji.

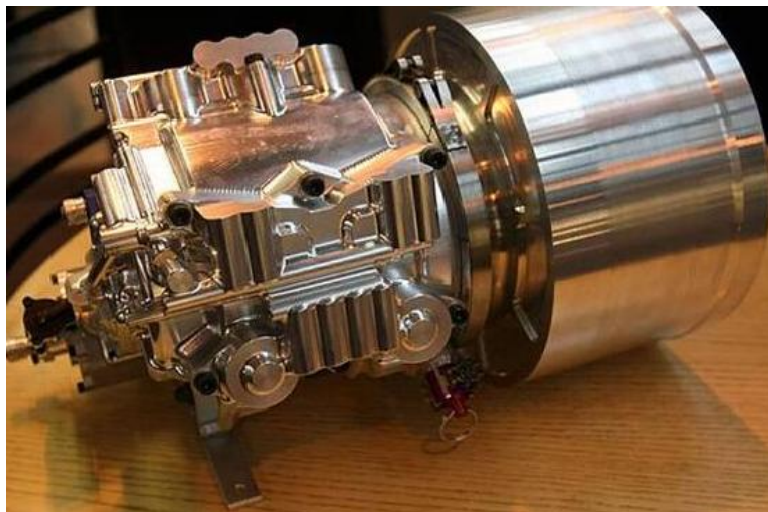
5.6.2 Rekuperace s využitím kinetické energie

Jako akumulátor v tomto případě slouží setrvačnick, který je roztáčen pomocí proměnného převodu od hnací nápravy nebo pomocí elektromotoru, který je napájen elektrinou z generátoru jako v předchozím případě (kap. 5.6.1).

O množství energie, kterou je setrvačnick schopen akumulovat, rozhoduje rozdělení hmotnosti (moment setrvačnosti) a maximální otáčky. Rychlé rotace způsobují velmi vysoké síly. Proto jsou kladeny vysoké nároky na materiál a také na ložiska. Používá se ocel, případně moderní kompozitní materiály a uhlíková vlákna. Kompozitní materiály jsou sice mnohem dražší, ale jsou konstruovány tak, aby se v případě destrukce nerozpadly na malé kousky, které se poté rozletí všemi směry. Místo toho se rozdělí na jednotlivá vlákna, která se do sebe zamotají, obdobně jako vata. Díky tomu není třeba používat těžké a mohutné skříně. Ložiska bývají magnetická, čímž je zabráněno třecím ztrátám. Značný odpor klade také plyn ve skříně setrvačnicku, proto bývají skříně vakuovány.

Dalším důležitým faktorem je umístění a směr rotace setrvačnicku. Při pohybu vozidla dochází ke vzniku gyroskopického momentu (vlivem změny osy rotace setrvačnicku), který může vyvádět vozidlo z rovnováhy, ale také stabilizovat. Při umístění osy setrvačnicku napříč vozidla k žádným (de)stabilizačním účinkům nedochází.

Setrvačnick jako akumulátor energie používá např. několik trolejbusů ve švýcarské Basileji. Setrvačnick jsou „nabíjeny“ elektrickou energií buďto z trolejového vedení, nebo z generátoru při brzdění autobusu. Setrvačnick může disponovat výkonem až 150 kW, což dostačuje na ujetí cca 3 km vodorovné dráhy. Naměřená úspora elektrické energie je okolo 25 %.



Obr. 5-22: Setrvačnickový systém KERS Formule 1 [14]

Setrvačnick využívá také několik týmů Formule 1 ve svém systému KERS. Jedná se o systém akumulace brzděné energie, který je povolen od letošní sezóny. V tomto případě je setrvačnick spojen se zadní nápravou přes převodovku s plynule proměnným převodem (CVT). Při brzdění se setrvačnick roztočí až na $60\,000\text{ min}^{-1}$. Dodaný výkon nesmí být podle pravidel vyšší než 60 kW a smí být dodán pouze jednou za kolo.

5.6.3 Rekuperace s využitím tlakové energie

U tohoto systému je využíván paralelní hydraulický systém, který energii získanou při brzdění uchovává v podobě stlačeného plynu. Hlavními částmi systému jsou hydraulická pumpa, dvě tlakové nádoby a akumulární nádrže. Hydraulická pumpa při brzdění čerpá hydraulickou kapalinu z jedné tlakové nádoby do druhé. Tím je stlačován plyn (nejčastěji dusík), který se v ní nachází. Akumulovaná energie není příliš velká, ale vzhledem k jejímu využití při následném rozjezdu se i toto množství pozitivně projeví na spotřebě paliva. Při rozjezdu dojde k uvolnění stlačeného plynu zpět do skladovacích nádrží a z pumpy se stane hydraulický motor, který přes spojku pomáhá otáčet kardanovou hřídelí.



Obr. 5-23: Hydraulický systém rekuperace energie pomocí stlačeného vzduchu [31]

Výhodou oproti akumulátorům je prakticky neomezený počet cyklů a velmi rychlé uvolnění akumulované energie (až 60 kW po dobu 20 s). Ovšem celý systém je poměrně složitý a zabírá spoustu místa, kvůli tomu je vhodný pro nákladní automobily a autobusy. V USA ho využívá zásilková služba UPS ve svých velkých dodávkách. Každý vůz má 5 akumulčních nádrží o celkovém objemu 400 l. Energetická kapacita je cca 0,4 kWh. Při ceně přes 130 000 Kč (7000 USD) za vybavení jedné dodávky počítá UPS návratnost investice asi na 3 roky.

6 Současné automobily s alternativními pohony

6.1 Plynové motory a motory na biopaliva

Automobily spalující CNG vyrábí celá řada automobilek. V ČR jsou k dostání modely od VW, Opelu, Fiatu a Citroenu. Ve všech případech se jedná o bivalentní modely, spalují CNG a benzin. Porovnání tří modelů jsem uvedl v kapitole 3.1.4.

Vozidla s motory konstruovanými pro spalování LPG vyrábí např. Subaru, Dacia nebo VW, od letošního roku také Fiat. Vesměs se jedná o atmosférické zážehové motory, VW letos představil prototyp s dvojitě přepínaným agregátem 1,4 TSI, a sice VW Passat EcoFuel. Pro příklad uvedu nový VW Golf VI:

VW Golf VI BiFuel

- Zážehový atmosférický R4 1,6 l.
- Výkon: 75kW při 5600 min⁻¹ (benzin) a 72 kW při 5600 min⁻¹ (LPG).
- Udávaná kombinovaná spotřeba: benzin – 7,1 l/100 km, LPG – 9,2 l/100 km.
- Dojezd až 1100 km. Benzinová nádrž: 55 l, LPG nádrž umístěna místo rezervního kola: 41 l.
- Česká cena není ještě známa, v SRN stojí od 20 400 EUR (550 000 Kč)



Obr. 6-1: VW Golf BiFuel [54]

Vozidla schopná spalovat směsné palivo E85 vyrábí nebo alespoň vyvíjí všechny významné automobilky a to díky Jižní Americe, kde je toto (případně E100) více používané než benzin. Zajímavostí je tří-palivový automobil Ford Mondeo:

Ford Mondeo Tri-Fuel

- Zážehový R4 2,0 Duratec.
- Spaluje benzin, E85 a LPG.
- Disponuje výkony: 107 kW (benzin a E85) a 104 kW (LPG).
- Nádrž pro benzin a E85: 70 l, pro LPG: 50 l.
- V ČR neprodáván, v SRN stojí v přepočtu 740 000 Kč (27 500 EUR – o 250 EUR méně než oblíbený model se vznětovým 2,0 TDCi 103 kW)!

Spalovací motory na vodík má jen několik málo automobilů, jedná se zejména o modely automobilek BMW, Mazda, General Motors.

Mazda RX-8 RE

- Rotační motor 2 x 654 cm³ spalující benzin i vodík.
- Pohon na benzin: 154 kW (7200 min⁻¹) a 222 Nm (5000 min⁻¹).
- Pohon na vodík: 81 kW a 120 Nm (při stejných otáčkách jako na benzin)

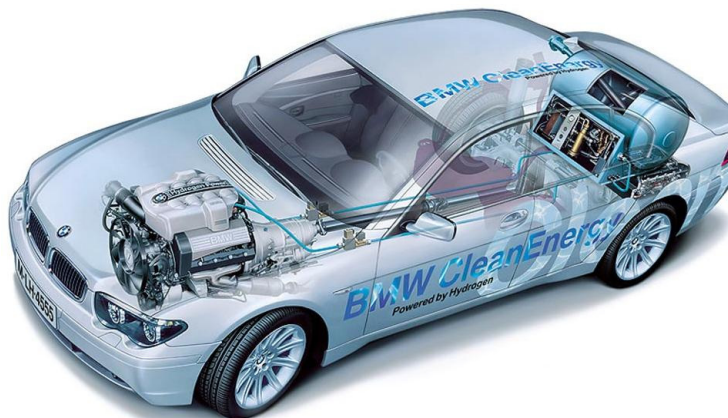


Obr. 6-2: Mazda RX-8 RE [22]

BMW Hydrogen 7

- Zážehový V12 6,0 l.
- Výkon 191 kW, točivý moment 390 Nm – na obě paliva, jejich charakteristiky se vzájemně kryjí.
- Zrychlení 0 – 100 km/h za 9,5 s, nejvyšší rychlost 230 km/h.

- Emise CO₂: benzín 332 g/km, vodík 5 g/km.
- Dojezd cca 500 km na benzín, 200 km na vodík.
- Kapacita benzinové nádrže je 74 litrů, nádrž na vodík zabírá 170 litrů zavazadlového prostoru a pojme 8 kg kapalného vodíku.



Obr. 6-3: BMW Hydrogen 7 [37]

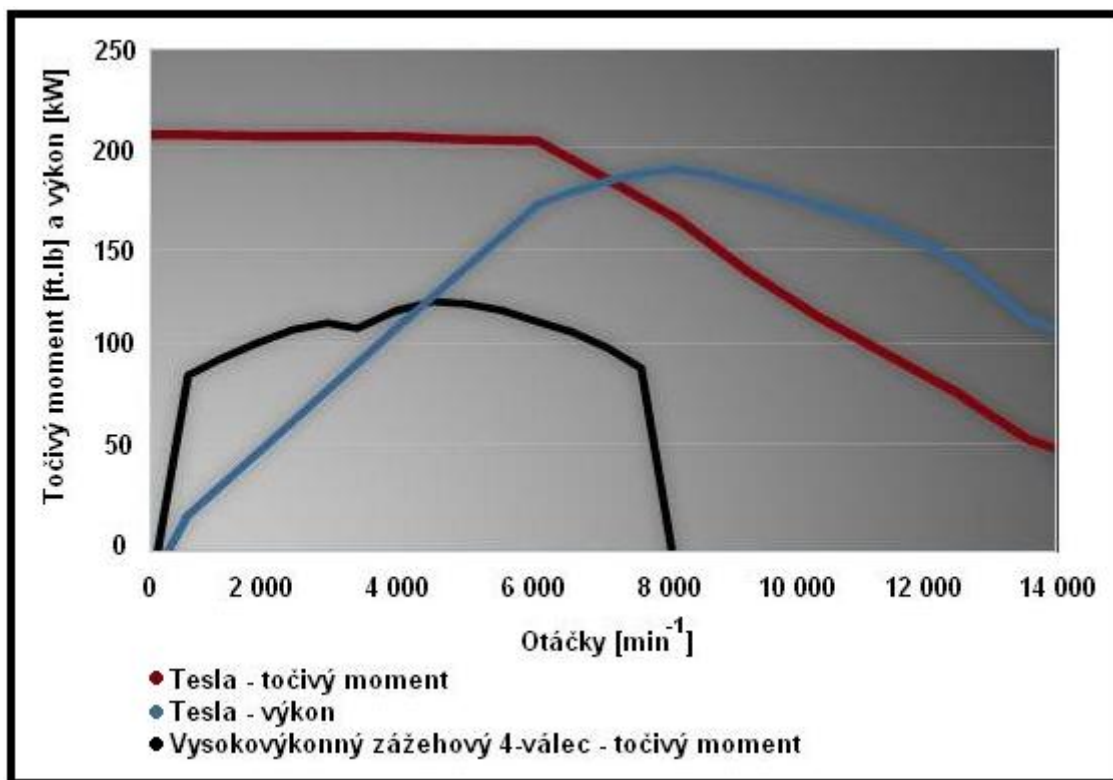
6.2 Bateriové elektromobily

Tesla Roadster:

- Indukční elektromotor 375 V AC (212 kW a 244 Nm).
- Li-Ion baterie – sada složená z 6 831 článků, hmotnost 450 kg, garantovaná životnost 5 let nebo 160 000 km.
- Max. rychlost 210 km/h, zrychlení 0 – 100 km/h za 3,9 s, dojezd 320 km.
- Plné nabití za cca 3,5 hod.
- 109 000 USD.



Obr. 6-4: Tesla Roadster Sport [74]



Obr. 6-5: Křivky výkonu a toč. momentu Tesly Roadster Sport [74]

Lightning GT

- U každého kola bezkartáčový elektromotor s permanentními magnety o výkonu 130,5 kW (celkem tedy 522 kW), 750 Nm.
- Baterie NanoSave™ - vyráběny pomocí nanotechnologií na bázi titaničitanů.
- Garantovaná životnost 12 let.
- 85% kapacita po 15 000 nabíjecích cyklech.
- Doba nabíjení přibližně 10 minut (třífázovým proudem)!
- Dojezd je až 400 km.
- Ještě se neprodává.



Obr. 6-6: Lightning GT [75]

6.3 Elektromobily s palivovými články

Honda FCX Clarity

- Elektromotor s permanentními magnety a elektronicky ovládanou řídicí jednotkou o 100 kW a 256 Nm (při 0 – 3050 min⁻¹).
- Sada membránových vodíkových palivových článků (PEMFC) „V Flow“ o výkonu 100 kW. Sada váží 67 kg a zabírá objem 57 litrů, umístěna je ve středovém tunelu mezi přední a zadní řadou sedadel, což je výhodné ohledně rozložení hmotnosti a úspory místa.
- Účinnost pohonného ústrojí 60 %.
- Využívá stlačený plynný vodík, nádrž je umístěna nad zadní nápravou a pojme 171 l vodíku o tlaku 35 MPa.
- Dojezd asi 450 km, max. rychlost 150 km/h.
- Schopné startovat od -30 °C.
- Předchůdce FCX-V4 byl jako první vozidlo na světě označen jako ZEV (Zero Emission Vehicle) a schválen k provozu.
- Není na prodej, ale pronajímán automobilkou na 3 roky za cenu 600 USD/měsíc.



Obr. 6-7: Honda FCX Clarity [57]

Chevrolet Equinox Fuel Cell

- 3-fázový asynchronní elektromotor o výkonu 73 kW.
- Systém palivových článků PEMFC – 93 kW (pracují při -25 °C až 37 °C).
- Sada Ni-MH baterií – 35 kW.
- Zrychlení 0 – 100 km/h za 12 s, nejvyšší rychlost 160 km/h .
- 3 karbonové nádrže – 4,2 kg plynného vodíku stlačeného na 69 MPa.
- Dojezd cca 320 km.
- Očekávaná životnost 80 000 km.
- Neprodejný, automobilka vyrobila a pronajímá 100 ks.



Obr. 6-8: Chevrolet Equinox Fuel Cell [59]

6.4 Hybridy

První hybridní sériově vyráběný osobní automobil Toyota Prius byl představen v roce 1995 a o dva roky později začal jeho prodej v Japonsku, později po celém světě. V současnosti hybridní automobily sériově vyrábí (pokud započítáme i mikro- a mild-hybridy) snad každá automobilka. Nejvíce full-hybridů nabízí automobilka Lexus.

Toyota Prius III (Full-hybrid)

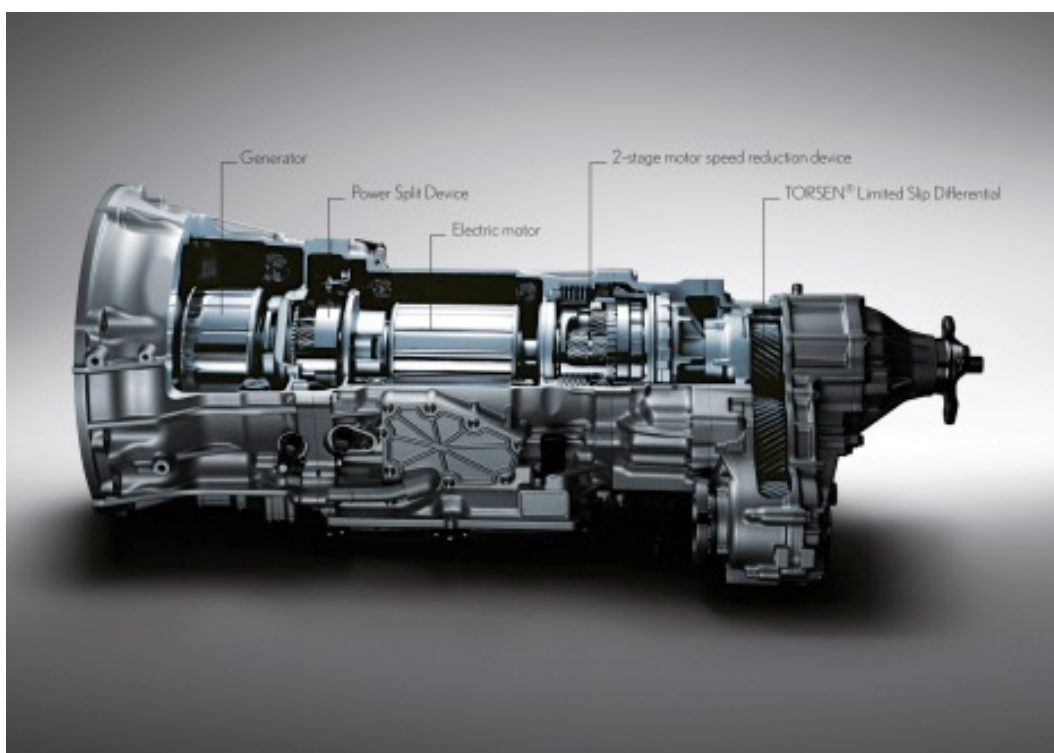
- Představena v lednu 2009, prodej začne v r. 2010.
- Zážehový R4 1,8 l VVT-i o výkonu 73 kW při 5200 min⁻¹.
- Synchronní elektromotor s permanentním magnetem - 60 kW, 207 Nm.
- Kombinované uspořádání, maximální výkon celého systému 100 kW.
- Sada Ni-MH baterií (28 modulů o nominálním napětí 201,6 V). Váží 45 kg včetně střídače, AC-DC měniče a přívodů vzduchu. Od r. 2012 budou nahrazeny Li-Ion.
- Spotřeba by měla být pod 5 l/100 km (zatím není oficiální údaj).
- Dojezd čistě na elektromotor cca 1,6 km.



Obr. 6-9: Toyota Prius (III. generace) [61]

Lexus RX 450h (Full-hybrid)

- Zážehový V6 3,5 l DOHC (Atkinsonův cyklus) – 183 kW při 6000 min⁻¹, 317 Nm při 4800 min⁻¹.
- 2 synchronní střídavé elektromotory s permanentním magnetem – jeden u přední nápravy (123 kW, 335 Nm) a druhý u zadní nápravy (50 kW, 139 Nm).
- Kombinované uspořádání s dělením výkonu pomocí planetové převodovky. Celkový výkon 220 kW.
- Sada Ni-MH baterií – 240 článků o 288 V.
- Zrychlení 0 – 100 km/h za 7,8 s, max. rychlost 200 km/h.
- Spotřeba 6,3 l/100 km.
- Cena od 1 549 000 Kč.



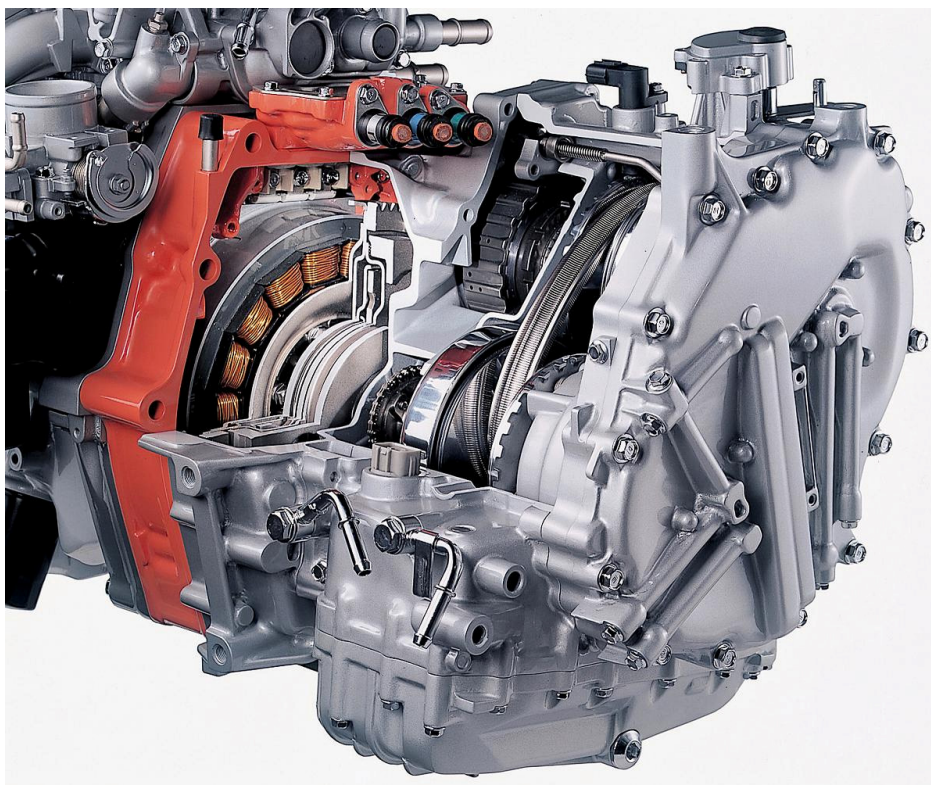
Obr. 6-10: Hybridní ústrojí Lexus [55]

Chevrolet Volt (Full-hybrid)

- Elektromotor o 110 kW a 370 Nm.
- Atmosférický R4 1,4 l (výkon není znám) spalující benzin a E85.
- První hybrid se sériovým uspořádáním.
- Li-Ion baterie – dojezd až 65 km na plné nabití
- Plné dobití za 3 hodiny (230 V), nebo 8 hodin (120 V).
- Sériová výroba začne koncem roku 2010.

Honda Civic Hybrid (Mild-hybrid)

- Zážehový R4 1,3 l i-VTEC – 70 kW při 6000 min⁻¹, 123 Nm při 4600 min⁻¹.
- Synchronní střídavý elektromotor s permanentním magnetem – 15 kW (2000 min⁻¹), 105 Nm (0 – 1150 min⁻¹).
- Paralelní uspořádání – elektromotor umístěn mezi spalovacím motorem a převodovkou s plynule měnitelným převodem CVT.
- Při požadavku jízdy na elektromotor (při velmi pomalé jízdě) není možno odpojit spalovací motor, ale dochází k tomu, že ventily zůstanou uzavřeny a spalovací motor pracuje naprázdno.
- Spotřeba 4,56 l/100 km.
- Zrychlení 0 – 100 km/h za 12,1 s, max. rychlost 185 km/h.
- Cena od 599 000 Kč.



Obr. 6-11: Elektromotor a CVT převodovka automobilu Honda Civic Hybrid [63]



Obr. 6-12: Hybridní pohonné ústrojí automobilu Honda Civic Hybrid [62]

7 Závěr

Záměrem této práce bylo vytvořit přehled perspektivních alternativních pohonů ke čtyřdobým zážehovým a vznětovým motorům. U každého pohonu jsou uvedeny jeho základní charakteristiky, výhody a nevýhody oproti klasickým čtyřdobým motorům a problémy, které více či méně brání jejich rozšiřování.

V úvodní části práce je uveden stručný přehled možných alternativ, které mohou čtyřdobé motory zastoupit. V další části práce jsou podrobněji popsány pouze plynové motory, biopaliva a elektromobily.

Nejprve se zmiňují o čtyřdobých motorech spalujících alternativní paliva – stlačený zemní plyn CNG, propan-butan LPG, vodík a biopaliva. CNG a LPG jsou neobnovitelná, pojmem „alternativní“ jsou tedy označována pouze dočasně. V České republice byl zemní plyn pro využití v dopravě dlouho přehlížen. V současnosti je registrováno několik stovek vozidel a k dispozici mají pouze 18 plnicích stanic, dalších cca 25 je ve výstavbě. Velké oblibě se tu naopak těší právě LPG. V současnosti je registrováno okolo 200 000 vozidel a k dispozici mají přes 600 stanic. Přitom se LPG musí rozvážet cisternami, kdežto čerpací stanici CNG lze postavit v každé větší obci díky rozsáhlé síti plynovodů. Z CNG se navíc neplatí spotřební daň (do roku 2011 je nulová), u LPG činí 3,93 Kč/kg. Během pár let by se měl podíl těchto paliv vyrovnat.

Biopaliva mají výhodu, že jsou vyráběna z obnovitelného zdroje – biomasy. Ovšem množství použitelné pro dopravu je limitováno rozlohou hospodářské půdy. Pokud by všechna vozidla jezdila na biopaliva, nestačilo by k pokrytí celosvětové spotřeby ani osázení veškeré současné hospodářské plochy rostlinami pro jejich výrobu. Je tedy zřejmé, že biopaliva budou pouze napomáhat ke snižování spotřeby ropy a zemního plynu, dokud nebudou vyřešeny všechny problémy spojené s vodíkem a elektromobily.

Využití vodíku jako paliva představuje rozsáhlou problematiku. Vodík je z 90 % vyráběn ze zemního plynu. Pro hromadné využití v dopravě připadá v úvahu hlavně výroba elektrolýzou vody, jakožto obnovitelné suroviny. Na výrobu množství plynného vodíku, které vyprodukuje 1 kWh energie, je spotřebováno 1,53 kWh elektrické energie. Je tedy potřeba postavit mnoho elektráren využívajících obnovitelné zdroje energie – vítr, geotermální energii, energii přílivu a odlivu, solární energii atd. Výroba elektřinou z konvenčních elektráren je totiž velmi nevýhodná.

Jedním z největších problémů je jeho uchovávání ve vozidlech. Jako nejlehčí prvek musí být v plynném skupenství skladován pod vysokými tlaky, aby mělo jeho použití význam. K tomu je potřeba vyvinout nové materiály s vysokou pevností. V nádržích současných automobilů je dosahován tlak okolo 35 MPa. Kapalné skupenství pro změnu vyžaduje velmi důkladnou tepelnou izolaci. To přináší podstatné zvýšení hmotnosti a zmenšení užitého

prostoru. A přes veškeré dosavadní snahy stejně téměř všechny vodík během několika dní (maximálně týdnů) uniká. Budoucnost má zřejmě ukládání vodíku do hydridů kovů. Pokud budou vyvinuty nové hydridy s mimořádnými absorpčními schopnostmi, nebo alespoň výrazně zdokonaleny a zlevněny ty současné, nebude jejich používání ve vozidlech stát nic v cestě. Dokud nebude vyřešena problematika uchovávání a distribuce vodíku, nelze počítat se sériovou výrobou vodíkových automobilů.

Hlavním problémem bateriových elektromobilů zůstává nízká kapacita, nízká životnost a vysoká cena akumulátorů. V současnosti jsou používány Ni-MH a Li-Ion akumulátory. Velký pokrok očekávám od použití nanotechnologií a od zavedení akumulátorů zinek-vzduch a hliník-vzduch. Jejich měrná energie několikanásobně převyšuje současné Li-Ion. Nemohu vyloučit ani superkapacitory. Vzhledem k intenzitě jejich vývoje mohou akumulátory časem úplně vytlačit.

Dalším negativem bateriových elektromobilů je úmyslné nadhodnocování technických údajů samotnými výrobci. Velmi často totiž jako dojezd uvádějí pouze jedno jediné číslo, pochopitelně to nejlepší, které platí pro úplné vybití plně nabitě baterie. Tento způsob ovšem razantně snižuje její životnost, proto je využíváno asi 10 až 90 % její kapacity. Navíc hodně závisí na stylu jízdy. Tudíž celkový dojezd může být až o 20 % menší! A to nepočítám pokles kapacity stárnutím baterie.

Masového rozšíření bateriových elektromobilů bude bránit, že elektrická síť není dimenzována na noční nabíjení velkého množství vozů. To nahrává palivovým článkům. Ve vozidlech mohou být používány pouze nízkoteplotní palivové články – membránové PEMFC. Jejich hlavní nevýhodou je vysoká cena a proměnná spolehlivost v závislosti na teplotě. Cena (asi 2200 Kč/kW) je závislá na náročné výrobní technologii a použitých materiálech (platinový katalyzátor, grafitové membrány...). Pro jejich hromadné použití by musela klesnout asi na třetinu.

Odolnost palivových článků velmi závisí na teplotě. Protože je membrána ponořena ve vodě, může při mrazech dojít k zamrznání a při velkém ohřátí k jejímu odpaření. Při vysokých teplotách dokonce hrozí rozpad membrány. Zároveň palivovému článku příliš nesvědčí prudká změna teplot. A tomu se při použití v automobilu nelze vyhnout. Je tedy třeba další vývoj.

Vozidla s hybridním pohonem jsou v současnosti doslova „módou“. Do sériové výroby jde čím dál více mikro- a mild- hybridů, tedy klasických vozů se systémy rekuperace energie a Start/Stop. Stejně tak roste počet full-hybridů. V nejbližších letech vidím prosazení plug-in hybridů – plně hybridních vozů s možností dobíjení ze zásuvky.

Oblast alternativních pohonů představuje rozsáhlou problematiku. Zaměřil jsem se proto pouze na ty druhy, o jejichž využití se v současné době nejvíce uvažuje. Tato práce by měla posloužit jako prostředek k seznámení s danou oblastí. Lze v ní najít spoustu nápadů a inspirací např. pro témata dalších diplomových prací apod.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KAMEŠ J.: *Alternativní pohony automobilů*. BEN – Technická literatura, Praha 2004. ISBN 80-7300-127-6
- [2] NOVOSÁD, J. *Alternativní paliva a možnosti řešení pohonných jednotek v budoucnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007.
- [3] Akumulátory Lithium – Polymer (Li-pol) [online]. 2004 [cit. 2009-05-09]. Dostupný z WWW: <http://vyuka.fel.zcu.cz/kae/NSA/Texty/Akum_Lipol.pdf>.
- [4] BISKUP, Pavel. Hybridní auta jsou nejlepší při jízdě ve městě [online]. 2006 [cit. 2009-04-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.21století.cz/view.php?cislocclanku=2006081816>>.
- [5] BISKUP, Pavel. Jezdili jsme s autem na vodík [online]. 2007 [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.21století.cz/view.php?cislocclanku=2007051905>>.
- [6] Co je to EV [online]. 2006 [cit. 2009-04-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektromobily.org/Elektromobily/elektromobily>>.
- [7] ČEŘOVSKÝ, Zdeněk, et al. HYBRIDNÍ POHONY AUTOMOBILŮ A VÝZKUMNÉ PRACOVIŠTĚ HYBRIDNÍCH POHONŮ [online]. [cit. 2009-02-15]. Dostupný z WWW: <<http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2002/k314-SYMEP.pdf>>.
- [8] DĚDOUREK, Pavel. Superkondenzátor - princip, použití [online]. 2007 [cit. 2009-04-15]. Dostupný z WWW: <http://www.dedalebeda.wz.cz/skola/upload/02FM1/super_capacitor.pdf>.
- [9] Direct methanol fuel cell [online]. 2009 [cit. 2009-04-14]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Direct_methanol_fuel_cell>.
- [10] Electroauto [online]. 2008 [cit. 2009-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://electroauto.cz/>>.
- [11] Elektromobil [online]. 2006-2008 [cit. 2009-04-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.hybrid.cz/tagy/elektromobil>>.
- [12] Elektromobily a hybridní automobily [online]. 2006 [cit. 2009-05-05]. Dostupný z WWW: <http://www.inovace-dmt.fs.cvut.cz/studijni_materialy/Prednasky_12.pdf>.
- [13] Elektrovůz v ČR - hobby pro nadšence [online]. 2007 [cit. 2009-04-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.ekolist.cz/zprava.shtml?x=1958350>>.
- [14] Grafika: KERS [online]. 2009 [cit. 2009-04-14]. Dostupný z WWW: <<http://formule1.auto.cz/novinky/grafika-kers.html>>.

- [15] HADLER J.: Hybrid Hybridfahrzeuge - Technik und Möglichkeiten alternativer Antriebskonzepte (Přednáška na FS TUL 19.11.2008) [online]. 2008 [cit. 2009-04-22]. Dostupný z WWW: <<http://www.ksd.tul.cz/studenti/texty/Hybridfahrzeuge-Technik.pdf>>.
- [16] HOŘČÍK, Jan. Elektromobily a vodík pro Kalifornii [online]. 2008 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.hybrid.cz/novinky/elektromobily-a-vodik-pro-kalifornii>>.
- [17] LAPČÍK, Vladimír. Modul2: Oceňování antropogenních vlivů na životní prostředí [online]. [cit. 2009-03-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.hgf.vsb.cz/shared/uploadedfiles/hgf/EV-modul2.pdf>>.
- [18] Hybridní automobily 1. část [online]. [cit. 2009-02-11]. Dostupný z WWW: <http://www.inovace-dmt.fs.cvut.cz/studijni_materialy/Microsoft_PowerPoint_Prednaska_1.pdf>.
- [19] Hybridní pohon [online]. 2008 [cit. 2009-04-28]. Dostupný z WWW: <<http://cs.autolexicon.net/articles/hybridni-pohon>>.
- [20] Hybridní pohon osobních automobilů [online]. [cit. 2009-03-14]. Dostupný z WWW: <<http://vedmakalouskova.tripod.com/hybrid.htm>>.
- [21] JUŘIČKA, Martin. Jak funguje hybridní pohon? [online]. 2008 [cit. 2009-03-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.auto.auto-news.cz/jak-funguje-hybridni-pohon-24617.html>>.
- [22] KOZOUSOVÁ, Naděžda. Ihned k pronájmu: Mazda RX-8 Hydrogen RE [online]. 2006 [cit. 2009-03-11]. Dostupný z WWW: <<http://magazin.automix.centrum.cz/novinky/clanek.phtml?id=8602>>.
- [23] Lithium-polymerový akumulátor (Li-Pol) [online]. 2008 [cit. 2009-03-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.bateria.cz/stranky3/zabava--pouceni/jak-to-funguje/lithium-polymerovy-akumulator-li-pol.htm>>.
- [24] LPG v České republice 2008 [online]. 2008 [cit. 2009-03-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.pressweb.cz/tiskova-zprava/11153-lpg-v-ceske-republice-2008>>.
- [25] LUDĚK, Vokáč. Auta na setrvačnik nejsou jen pro děti. Používat je budou i ve formuli 1 [online]. 2008 [cit. 2009-03-12]. Dostupný z WWW: <<http://autotypy.cz/mirror/7f/2343807.aspx>>.
- [26] Molten salt battery [online]. 2009 [cit. 2009-03-15]. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Molten_salt_battery>.
- [27] Nový Lexus RX 450 s hybridním pohonem na právě probíhajícím autosalonu v Ženevě [online]. 2009 [cit. 2009-05-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.periskop.cz/cz/clanky/novy-lexus-rx-450-s-hybridnim-pohonem-na-prave-probihajicim-autosalonu-v-zeneve/>>.

- [28] Palivové články - princip, konstrukce, vlastnosti a využití [online]. [cit. 2009-03-06]. Dostupný z WWW: <<https://www.powerwiki.cz/attach/APE/palivo.doc>>.
- [29] Palivové články – Typy, rozdělení a parametry [online]. [cit. 2009-04-11]. Dostupný z WWW: <http://www.enviros.cz/palivove_clanky/2_typy_palivovych_clanku.html>.
- [30] Palivové články jako perspektivní technologie [online]. [cit. 2009-03-27]. Dostupný z WWW: <http://www.enviros.cz/palivove_clanky/palivove_clanky.html>.
- [31] Revoluční pohony - který z nich uspěje? [online]. 2007 [cit. 2009-03-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.tipcar.cz/revolucni-pohony---ktery-z-nich-uspeje--2452.html>>.
- [32] SOMOLOVÁ, Markéta, DLOUHÝ, Petr. Výroba vodíku [online]. 2007 [cit. 2009-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.hytep.cz/?loc=article&id=6>>.
- [33] STACHA, Jan. Revoluční Chevrolet Volt se předčasně představil [online]. 2009 [cit. 2009-04-22]. Dostupný z WWW: <http://www.tyden.cz/rubriky/auta/zelena-stopa/revolucni-chevrolet-volt-se-predcasne-predstavil_81079.html>.
- [34] Superkondenzátory [online]. 2009 [cit. 2009-05-12]. Dostupný z WWW: <<http://klub.elektromobily.org/wiki/Superkondenzátory>>.
- [35] ŠEBOR M., POSPÍŠIL G., ŽÁKOVEC J.: *Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě (1. část)* [online]. VŠCHT v Praze, 2006, červen 2006 [cit. 2007-03-24]. Dostupný z: http://www.mdcz.cz/NR/rdonlyres/F2EF24EF-5E59-42C7-B6C7-A5508CE8F820/0/Technickoekonomicka_analyza_vhodnych_alternativnich_paliv_v_dopravecast_1.pdf
- [36] TEDOM. Výhody Stirlingova motoru [online]. [cit. 2009-03-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.stirling.cz/vyhody-stirlingova-motoru.html>>.
- [37] The BMW Group's energy strategy [online]. 2009 [cit. 2009-03-14]. Dostupný z WWW: <http://www.bmw.cz/cz/cs/insights/technology/cleanenergy/_shared/pdf/cleanenergy_technicalinformation.pdf?download=true>.
- [38] The high-power lithium-ion [online]. 2003-2005 [cit. 2009-05-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.batteryuniversity.com/partone-5A.htm>>.
- [39] Toyota Prius III Battery Pack [online]. 2009 [cit. 2009-04-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.cleangreencar.co.nz/page/toyota-prius-iii-hybrid-battery-pack-information>>.
- [40] Types of Fuel Cells [online]. [cit. 2009-03-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.fuelcells.org/basics/types.html#dmfc>>.
- [41] Vodíkové spalovací motory [online]. 2007 [cit. 2009-02-22]. Dostupný z WWW: <<http://hytep.cz/?loc=article&id=15>>.

- [42] VOKÁČ, Luděk. Wankelův rotační motor. Jak to vlastně funguje? [online]. 2008 [cit. 2009-03-14]. Dostupný z WWW: <http://auto.idnes.cz/wankeluv-rotacni-motor-jak-to-vlastne-funguje-f47-/ak_aktual.asp?c=A080401_015114_ak_aktual_vok>.
- [43] VYSOKÝ, Petr, VYSOKÝ, Ondřej. Perspektivy hybridních vozidel [online]. 2006 [cit. 2009-04-04]. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=1544>>.
- [44] WALTER, Manfred. Hybridní technologie - pohodlná jízda ohleduplná k životnímu prostředí [online]. 2006 [cit. 2009-04-14]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/hybridni-technologie-pohodlna-jizda-ohleduplna-k-zivotnimu-prostredi>>.
- [45] Zebra Batteries [online]. 2005 [cit. 2009-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.mpoweruk.com/zebra.htm>>.
- [46] Zinc-Air Battery Applications [online]. 2004 [cit. 2009-03-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.defense-update.com/products/z/zinc-air-battery-new.htm>>.
- [47] Zinc-Air Fuel Cells (ZAFC) [online]. 2001-2009 [cit. 2009-03-08]. Dostupný z WWW: <http://www.fctec.com/fctec_types_zafc.asp>.

Obrázky:

- [48] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c4/Fuell_cell.jpg/300px-Fuell_cell.jpg
- [49] http://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_fuel_cell
- [50] <http://www.dtienergy.com/Resources/works.gif>
- [51] <http://pointfocus.com/solarimages/tower/tower-Images/15.jpg>
- [52] <http://www.hydrogencarsnow.com/images/liquid%20hydrogen/liquid-hydrogen-tank.gif>
- [53] <http://www.volvo4ever.com/2008/06/new-type-hydrogen-tank.html>
- [54] <http://www.autorevue.cz/Magazin/Golf-BiFuel-prvni-Volkswagen-na-LPG/sc-17-a-16831/default.aspx>
- [55] <http://cdn.24.com/files/Cms/General/d/16/9136c8791a9742749618e389aa779ac8.jpg>
- [56] <http://www.hydrogengassavers.com/images/hydrogen-delivery.jpg>
- [57] http://smashthemirror.files.wordpress.com/2008/06/honda_fcx_clarity.jpg
- [58] <http://www.21stoleti.cz/view.php?cislocclanku=2007051905>
- [59] <http://cache.daylife.com/imageserve/0eNWbyO2k70dM/610x.jpg>
- [60] <http://www.hydrogencarsnow.com/eu-hydrogen-highway.htm>
- [61] <http://news.auto.cz/nove-modely/toyota-prius-nova-vse-podstatne-o-treti-generaci-hybridu.html>
- [62] <http://news.auto.cz/dojmy/honda-civic-hybrid-technika-prvni-jizdni-dojmy.html>

- [63] http://www.hybridexperience.ca/Honda_Civic_Photo_Gallery.htm
- [64] <http://www.cumminsforum.com/forum/98-5-02-non-powertrain/32109-100-bio-diesel-3.html>
- [65] <http://image.motortrend.com/f/auto-review/2008-mazda-rx-8-happy-40th-anniversary-wankel-twin/6966031+w600+cr1+re0+ar1/wankel-engine-cutaway.jpg>
- [66] http://www.mzak.cz/motory/f124/f124_02.jpg
- [67] <http://www.bekkoame.ne.jp/~khirata/english/struct.htm>
- [68] <http://www.powerzinc.com>
- [69] <http://www.cng.cz>
- [70] <http://www.bnl.gov>
- [71] <http://www.electroauto.cz/gm.html>
- [72] <http://cz.hoppecke-batteries.com/>
- [73] http://klub.elektromobily.org/wiki/Baterie_pro_elektromobily
- [74] <http://www.teslamotors.com>
- [75] <http://www.lightningcarcompany.co.uk/technical.php>

Webové stránky:

<http://www.google.com>
<http://www.metaelectric.com>
<http://www.hytep.cz/>
<http://www.lexus.cz>
<http://www.opel.cz>
<http://www.biodiesel.cz>
<http://auto.honda.cz/>
<http://www.wolkswagen.cz>
<http://www.hybridexperience.com/>

Seznam použitých zkratek

AFC	Alkalický palivový článek (Alkaline Fuel Cell)
CNG	Stlačený zemní plyn (Compressed Natural Gas)
DMFC	Přímý metanolový palivový článek (Direct Methanol Fuel Cell)
Li-Ion	Lithium-iontový akumulátor
Li-Pol	Lithium-polymerový akumulátor
LNG	Zkapalněný zemní plyn (Liquefied Natural Gas)
LPG	Zkapalněný propan-butan (Liquefied Petroleum Gas)
MEŘO	Methyl-ester řepkového oleje
MCFC	Palivový článek s roztavenými uhličitany Molten Carbonate Fuel Cell
Ni-Cd	Nikl-kadmiový akumulátor
Ni-MH	Nikl-methalhydridový akumulátor
PAFC	Palivový článek s kyselinou fosforečnou Phosphoric Acid Fuel Cell
PEMFC	Palivový článek polymer-elektrolyt Proton Exchange Membrane Fuel Cell
SOFC	Palivový článek s tuhými oxidy Solid Oxide Fuel Cell

Seznam obrázků

Obr. 2-1: Rotační (Wankelův) motor	13
Obr. 2-2: Spalovací turbína	14
Obr. 2-3: Znázornění principu dvou modifikací Stirlingova motoru	15
Obr. 2-4: Rozdělení vozidel s elektrickým pohonem	17
Obr. 3-1: Schéma provozu motoru na CNG	21
Obr. 3-2: Mapka plnicích stanic CNG v ČR	22
Obr. 3-3: Znázornění rychloplnicí stanice CNG	23
Obr. 3-4: Znázornění pomaluplnicí stanice CNG	23
Obr. 3-5: Součást palivového čerpadla zaneseného úsadami	26
Obr. 3-6: Simulace spalovacího prostoru při vstřikování vodíku (BMW)	30
Obr. 3-7: Závislost tlaku v nádrži na složení a teplotě LPG	32
Obr. 3-8: Základní schéma vozidla s pohonem na LPG	33
Obr. 4-1: Stanice na parní reformování zemního plynu	35
Obr. 4-2: Znázornění reakcí při S-I cyklu	36
Obr. 4-3: Využití parabolických zrcadel	37
Obr. 4-4: Porovnání emisí skleníkových plynů pro výrobu vodíku v palivovém článku z různých surovin (Mercedes Benz třídy A)	38

Obr. 4-5: Rozmístění vodíkových čerpacích stanic v Evropě (v r. 2008)	39
Obr. 4-6: Distribuce stlačeného vodíku	40
Obr. 4-7: Systém aktivního chlazení Linde CoolH2	41
Obr. 4-8: Nádrž na zkapalněný vodík používaný automobilkou BMW	42
Obr. 4-9: Znázornění hydridu kovu	43
Obr. 5-1: Schéma pohonného ústrojí bateriového elektromobilu	45
Obr. 5-2: Schéma podvozku elektromobilu EV1	46
Obr. 5-3: Druhy elektromotorů	47
Obr. 5-4: Akumulátory Hoppecke FNC	51
Obr. 5-5: Struktura elektrolytu Li-Pol akumulátoru	53
Obr. 5-6: Schéma akumulátoru zinek-vzduch	54
Obr. 5-7: Hustota energie vybraných typů akumulátorů	56
Obr. 5-8: Schéma palivového článku	56
Obr. 5-9: Porovnání typů palivových článků	57
Obr. 5-10: Alkalický palivový článek	59
Obr. 5-11: Palivový článek polymer-elektrolyt	60
Obr. 5-12: Přímý metanolový palivový článek	60
Obr. 5-13: Regenerace zinku jako paliva	62
Obr. 5-14: Schéma sériového hybridního uspořádání	64
Obr. 5-15: Schéma paralelního hybridního uspořádání	65
Obr. 5-16: Schéma kombinovaného přepínatelného uspořádání	66
Obr. 5-17: Znázornění jízdních režimů vozu s kombinovaným uspořádáním	66
Obr. 5-18: Schéma kombinovaného uspořádání s dělením výkonu	67
Obr. 5-19: Uspořádání s dělením výkonu automobilky Lexus	68
Obr. 5-20: Uspořádání s elektrickým děličem výkonu	69
Obr. 5-21: Rozdělení hybridních pohonů dle výkonu elektromotoru	70
Obr. 5-21: Schéma superkondenzátoru	72
Obr. 5-22: Setrvačnickový systém KERS Formule 1	73
Obr. 5-23: Hydraulický systém rekuperace energie pomocí stlačeného vzduchu	74
Obr. 6-1: VW Golf BiFuel	75
Obr. 6-2: Mazda RX-8 RE	76
Obr. 6-3: BMW Hydrogen 7	77
Obr. 6-4: Tesla Roadster Sport	77
Obr. 6-5: Křivky výkonu a toč. momentu Tesly Roadster Sport	78
Obr. 6-6: Lightning GT	78
Obr. 6-7: Honda FCX Charity	79
Obr. 6-8: Chevrolet Equinox Fuel Cell	80
Obr. 6-9: Toyota Prius (III. generace)	80

Obr. 6-10: Hybridní ústrojí Lexus	81
Obr. 6-11: Elektromotor a CVT převodovka automobilu Honda Civic Hybrid	82
Obr. 6-12: Hybridní pohonné ústrojí automobilu Honda Civic Hybrid	83

Seznam tabulek

Tab. 3-1: Fyzikálně-chemické vlastnosti zemního plynu distribuovaného v ČR	19
Tab. 3-2: Porovnání výkonu a spotřeby vybraných vozidel na CNG	24
Tab. 3-3: Porovnání vlastností MEŘO a motorové nafty	25
Tab. 3-4: Porovnání vlastností etanolu, ETBE a benzínu	26
Tab. 3-5: Porovnání vybraných fyzikálních vlastností vodíku s klasickými palivy	28
Tab. 3-6: Fyzikální vlastnosti vodíku	28
Tab. 3-7: Porovnání detonačních vlastností vodíku s metanem a benzinem	29
Tab. 3-8: Kvalitativní požadavky na vodík	29
Tab. 3-9: Fyzikálně-chemické vlastnosti složek LPG	31
Tab. 5-1: Rozdělení a porovnání typů elektromobilů	44
Tab. 5-2: Porovnání různých koncepcí trakčních elektromotorů	48
Tab. 5-3: Hodnoty napětí 12V olověného akumulátoru (20 °C)	49
Tab. 5-4: Hodnoty napětí a hustoty energie Li-Ion akumulátoru	52
Tab. 5-5: Porovnání parametrů jednotlivých typů akumulátorů	55
Tab. 5-6: Rozdělení a parametry palivových článků	58
Tab. 5-7: Porovnání vlastností superkondenzátoru a akumulátoru	71