



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

PERSPEKTIVNÍ POHONNÉ JEDNOTKY AUTOBUSŮ

PERSPECTIVE BUS POWERTRAINS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN KUBÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. VÁCLAV PÍŠTĚK, DrSc.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Kubík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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

Perspektivní pohonné jednotky autobusů

v anglickém jazyce:

Perspective bus powertrains

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Soustředit a kriticky zhodnotit dostupné poznatky z oblasti budoucích pohonných jednotek autobusů.

Cíle bakalářské práce:

Soustředit a kriticky vyhodnotit dostupné poznatky z oblasti budoucích pohonných jednotek autobusů.

Pro vybrané možnosti perspektivních řešení provést orientační výpočtové zhodnocení možných přínosů.

Seznam odborné literatury:

REIMPELL, J., STOLL, H., EDWARD, A. The automotive chassis - engineering principles.
Arnold, London 1996.

ISBN 0-340-61443-9.

Gillespie, T.D. Fundamentals of Vehicle Dynamics, Society of Automotive Engineers,
Warrendale, PA, 1992.

ISBN 1-56091-199-9.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 15.11.2011



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan



ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je posoudit možný budoucí vývoj alternativních pohonů s ohledem jejich využití v autobusech. Nejdříve jsou popsány nejnadějnější alternativní pohony, které využívají spalovacího motoru. V další části práce jsou zhodnoceny způsoby skladování energie při využití elektropohonů. Na konci práce jsou zmíněny hybridní technologie jako kombinace předchozích pohonů.

KLÍČOVÁ SLOVA

autobus, alternativní palivo, CNG, LNG, bionafta, bioethanol, ED95, biomethan, CBG, dimethyl ether, DME, methan-diesel, NiCd, NiMH, akumulátor Zebra, Li-ion, superkondenzátor, palivový článek, vodík, hybridní pohon

ABSTRACT

The aim of this thesis is to consider possible future development of alternative powertrains with regard to their use in buses. First described are the most promising alternative fuel vehicles, which use an internal combustion engine. The next part is evaluated ways to store energy using electric drives. At the end of the work is mentioned hybrid technology as a combination of previous drives.

KEYWORDS

bus, alternative fuel, CNG, LNG, biodiesel, bioethanol, ED95, biomethane, CBG, dimethyl ether, DME, methane-diesel, NiCd, NiMH, Zebra battery, Li-ion, supercapacitor, fuel cell, hydrogen, hybrid powertrain



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUBÍK, J. *Perspektivní pohonné jednotky autobusů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 33 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc..



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Václava Píštěka, DrSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2012

.....

Jan Kubík



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především své rodině a blízkým za podporu při studiu. Dále svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Václavu Píštěkovi, DrSc. za cenné rady v průběhu psaní práce a panu Ing. Janu Vodstrčilovi ze společnosti Iveco Czech Republic za zajímavé téma bakalářské práce a cenné informace.



OBSAH

Úvod	10
1 Spalovací motory na alternativní paliva	11
1.1 Zemní plyn	11
1.1.1 Stlačený zemní plyn (CNG)	11
1.1.2 Zkapalněný zemní plyn (LNG)	12
1.2 Biopaliva	12
1.2.1 Bionafta	13
1.2.2 Bioethanol a ED95	14
1.2.3 Bioplyn a biometan	14
1.2.4 (bio-)Dimethyl ether (DME)	15
1.3 Vícepalivové motory	16
1.3.1 Metan – nafta	16
2 Elektropohony	17
2.1 Akumulátory	18
2.1.1 Olověné akumulátory	18
2.1.2 Nikl – kadmiové akumulátory	18
2.1.3 Ni-MH akumulátory	19
2.1.4 Akumulátory Zebra	19
2.1.5 Li-ion akumulátory	20
2.2 Superkondenzátory	21
2.3 Palivové články	22
2.3.1 Vodík	23
3 Porovnání paliv a akumulátorů	25
3.1 Dojezd meziměstského autobusu s li-ion akumulátory	25
4 Hybridní pohony	27
Závěr	28
Seznam použitých zkratk a symbolů	32
Seznam příloh	33



ÚVOD

Pohon autobusů i ostatních vozidel vždy odrážel období, ve kterém jezdily. Vliv na něj měl stupeň technologického pokroku, války, ekonomické krize i politická situace. První omnibus, předchůdce dnešního autobusu, vznikl již v 17. století. Tehdy se jednalo o 8místný kočár tažený koňmi. Koně byly u některých omnibusů v první polovině 19. století zkušebně nahrazeny parním kotlem. Parní pohon nebyl pro omnibusy ideální a proto v roce 1895 Karl Benz vyměnil parní kotel za zážehový spalovací motor. Aby se odlišil motorem poháněný omnibus od toho taženého koňmi, vznikl termín automobilní omnibus, ze kterého časem vznikl dnešní název autobus. Zážehový motor brzy doplnil i motor vznětový a motory byly upravovány na různá paliva. Hlavně během druhé světové války byl pro pohon autobusů využíván dřevoplyn z důvodu nedostatku benzínu a nafty pro civilní účely. Autobusy s generátory dřevoplynu a zásobou dřevěných polínek vozily cestující ještě pár let po válce, kdy byl nedostatek novějších autobusů. Následně se vývoj vydal cestou vznětových motorů spalujících naftu. Ropná krize v 70. letech poprvé ukázala, že spoléhat se pouze na naftu není nejlepší strategie, ale až vývoj cen ropy v posledních desetiletích a také snahy o čistší životní prostředí pohnuly vývojem směrem k jiným pohonům a palivům.

V oblasti automobilů se největší inovace často objevují nejprve u automobilů vyšších tříd, u autobusů je v oblasti pohonů tím „nosem pokroku“ kategorie městských autobusů. Ve městech je totiž největší tlak na snižování zátěže životního prostředí. Zároveň je v této kategorii jednodušší zavádění a zkoušení inovací, protože městské autobusy jezdí v přesně ohraničených, relativně malých oblastech a vrací se vždy do stejného depa, takže je snazší zajistit infrastrukturu, zejména čerpání paliva a servis, než v případě luxusních zájezdových autobusů, které křížují Evropu po často se měnících trasách. Luxusním autokarům ani meziměstským autobusům se však nutnost zbavit se závislosti na ropě stejně nevyhne, proto je dobré při zkoumání alternativ na tyto kategorie nezapomínat.

V současné době se k pohonu autobusů v drtivé většině stále používá motorová nafta, u městských autobusů ji často může nahradit stlačený zemní plyn (CNG), spalovaný zážehovým motorem přestavěným ze vznětového. Výhodou zemního plynu je velmi nízká úroveň emisí oxidů dusíku a pevných částic ve výfukových plynech, kdy může motor na zemní plyn bez následné úpravy výfukových plynů plnit ty nejpřísnější platné emisní limity (EEV). Díky tomu je vítaným dopravním prostředkem v centrech měst. Navíc umístěním nádrží na střeše vozidla se v interiéru nízkopodlažních autobusů uvolní prostor, který by zabírala nádrž na naftu. Podobnou alternativou jsou autobusy na LPG, které mají podobné výhody i nevýhody jako ty na zemní plyn. V Evropě je jejich nejvýznamnějším provozovatelem dopravní podnik rakouského hlavního města Vídně, který má ve svém vozovém parku autobusy pouze na LPG. Jediný evropský výrobce autobusů na LPG, společnost MAN, však oznámil, že v roce 2012 ukončí výrobu těchto autobusů a proto i Vídeň začíná hledat jinou cestu. LPG však je zkapalněný ropný plyn a proto vůbec nesnižuje závislost na ropě, nebudeme se jím tedy zabývat. Za alternativu ke klasickým autobusům se spalovacími motory by se dal považovat trolejbus, ten je však závislý na trolejovém vedení, díky tomu ho legislativa považuje za kolejové vozidlo, proto ho nebudeme brát v úvahu. Přesto však mohou být trolejbusy cenným zdrojem zkušeností s provozem elektrických vozidel. V dnešní době se totiž jedná o běžné autobusové karoserie s vestavěnými elektromotory.

Cílem této práce je zmapovat současný stav vývoje alternativních pohonů a paliv a určit možnosti dalšího vývoje.



1 SPALOVACÍ MOTORY NA ALTERNATIVNÍ PALIVA

V současnosti je nejjednodušší cestou úprava spalovacího motoru pro spalování jiného paliva. Vyhovuje to nejen vybudované infrastruktuře (čerpací stanice) ale obejde se to i bez větších úprav výrobních a servisních procesů vozidel. Hlavní alternativou ke klasickým palivům jsou biopaliva. Další z možností výroby alternativních paliv je výroba ze syntézního plynu, což je směs vodíku a oxidu uhelnatého, vyráběná ze zemního plynu, uhlí nebo libovolné biomasy. Ze syntézního plynu se dá vyrábět syntetická nafta, dimethyl ether (DME), methanol či vodík. Syntetická nafta má až na vyšší cetanové číslo stejné parametry jako motorová nafta a je s ní tedy plně zaměnitelná, proto nebude v rámci této práce uvažována. Vodík i methanol se dají využít v palivových článcích. DME je vhodné palivo pro vznětové motory.

1.1 ZEMNÍ PLYN

Alternativou k ropě jsou paliva vyráběná ze zemního plynu, protože ložiska zemního plynu jsou na ropných ložiscích nezávislá. Protože jde o surovinu, která nemá po celém světě stejnou kvalitu, dělí se zemní plyn do dvou kategorií – H (zemní plyn s velkým energetickým obsahem, více než 90% tvoří metan) a L (s nízkým energetickým obsahem). Ve většině Evropy se používá zemní plyn typu H, není však zaručeno, že bude v místě použití vozidla k dispozici, je s tím proto nutné počítat. Existují dva hlavní způsoby využití zemního plynu jako paliva pro vozidla – buď se zemní plyn stlačí (CNG) nebo zkapalní (LNG). Vozidla využívající zemní plyn jako paliva jsou označovány jako NGV (Natural Gas Vehicle). Dalšími možnostmi je výroba syntetické nafty a syntetického benzínu ze zemního plynu a v současnosti je zemní plyn ve velkém využíván k výrobě vodíku. Zemní plyn je však samozřejmě také fosilním palivem, proto není dlouhodobým řešením.

1.1.1 STLAČENÝ ZEMNÍ PLYN (CNG)

V současnosti v Evropě snad nejvyužívanějším alternativním palivem pro autobusy je stlačený zemní plyn (Compressed Natural Gas – CNG). V únoru 2011 bylo na celém světě v provozu více než 400 000 autobusů na CNG.[4] CNG je zemní plyn stlačený na 20 až 25 MPa, který se může brát z běžné rozvodné sítě zemního plynu a stlačí se až při tankování. Po natankování je skladován v kompozitních tlakových lahvích (nádřích) na střeše autobusů. Protože CNG je palivo pro zážehové motory, v případě autobusů se vyrábějí zážehové motory, které vycházejí ze vznětových motorů. Odlišnosti spočívají v upravené hlavě motoru, zapalovacích svíčkách, palivové soustavě, ventilech a sedlech ventilů. U vozidla je navíc potřeba počítat s bezpečností vozidla po nehodě (bezpečnostní ventily a uzávěry) případně při požáru. Nebezpečí výbuchu při požáru se snižuje pomocí ventilů, které plyn z nádrží pomalu odpouštějí – obsah nádrže se nechá kontrolovaně vyhořet. Výhodou je čistota výfukových plynů, které pro dosažení hodnot předepsaných normou Euro 5 nepotřebují být upravovány jako v případě výfukových plynů naftového motoru.



1.1.2 ZKAPALNĚNÝ ZEMNÍ PLYN (LNG)

LNG je namodralá, bezbarvá kapalina bez zápachu.[1] Jedná se o stejné palivo jako CNG, liší se jen způsobem skladování, tankováním, nádržemi a drobné odlišnosti jsou i na motoru. Výroba LNG (*Liquefied Natural Gas*) spočívá v podchlazení zemního plynu na -162°C , kdy zemní plyn změní skupenství na kapalné a tím více jak $600\times$ zmenší svůj objem.[5] Na rozdíl od CNG se LNG transportuje a skladuje při atmosférickém tlaku, požadavky na infrastrukturu jsou proto velmi odlišné. Nádrže čerpacích stanic musí dokázat udržovat plyn podchlazený a veškeré vybavení, které přijde do styku s LNG musí odolávat velmi nízkým teplotám. Palivo LNG se často používá u nákladních vozů, důvodem je menší prostorová náročnost nádrží. Plyn se ve voze skladuje v „termosce“, dvouplášťové nádrži z nerezového plechu, mezi jednotlivými plášti je izolační materiál a vysoké vakuum.

Toto palivo je nevhodné pro osobní automobily, protože ty na rozdíl od nákladních vozů a autobusů často stojí nevyužité. Při stání vozidla, kdy je motor v klidu, dochází k nárůstu tlaku v nádrži, protože LNG se neustále pomalu odpařuje. Kvůli bezpečnosti je nutné při stání plyn řízeně odpouštět přetlakovým ventilem a při tom hrozí hromadění plynu a následný výbuch či požár. Toto nebezpečí může být odstraněno katalyzátorem, montovaným na výpust ventilu, který unikající palivo mění na CO_2 a vodu. [6] Další nebezpečí, které skýtá zkapalněný zemní plyn, vzniká při úniku kapalného plynu z nádrže (například prasknutí nádrže při nehodě). V případě styku kapalného zemního plynu s vodou může dojít k rychlému fázovému přechodu a tedy k velmi rychlému odpaření plynu, které se projeví fyzikálním výbuchem.[6] Díky tomu se v místě nehody vytvoří mrak zemního plynu, který následně může začít hořet, v některých případech (vytvoření min. 5% a max. 15% koncentrace se vzduchem) může i explodovat.

V případě autobusů přichází v úvahu využití u zájezdových autokarů, kde by nádrže na CNG zvyšovali už tak velkou výšku vozidla a přispívaly by ke zhoršení jízdních vlastností vlivem zvýšení těžiště.

1.2 BIOPALIVA

Jako biopaliva jsou označována paliva získávaná z obnovitelných zdrojů, nejčastěji z rostlin. Může se jednat o paliva kapalná (bionafta, bioethanol,...) či plynná (bioplyn). Bionaftu získáme esterifikací z rostlinných olejů, bioethanol (líh) získáme fermentací rostlin s obsahem cukrů a bioplyn bakteriálním rozkladem organických materiálů bez přístupu vzduchu. Biopaliva lze po drobných úpravách palivového systému (jsou často agresivnější) využít v současných spalovacích motorech a po úpravách lze využít i stávající infrastrukturu. Tyto výhody jsou však vyvažovány problémy při výrobě biopaliv.

K výrobě kapalných biopaliv je nejjednodušší použít běžně pěstované rostliny jako je řepka olejka či cukrová řepa. Bohužel pěstování těchto rostlin vyžaduje zábor kvalitní půdy určené k pěstování rostlin pro výrobu potravin. Nelze proto začít více využívat tato biopaliva bez toho, aby ceny potravin vzrostly. Paliva získávaná z rostlin konkurujících výrobě potravin se nazývají biopaliva první generace.

Jako biopaliva druhé generace jsou označována paliva, jejichž výroba nekonkuruje výrobě potravin. K výrobě se dá využít dřevěný odpad, celulóza, zemědělský odpad, odpad z domácností a další, popřípadě speciálně pěstované, geneticky modifikované rostliny, které



oproti jiným dřevinám obsahují více celulózy. Jejich výroba je však většinou složitější a dražší, navíc vývoj některých výrobních procesů ještě není dokončen. V současnosti nejsnáze dostupné biopalivo je bioplyn, který lze získávat například ve fermentačních stanicích, ve kterých se mohou zpracovávat bioodpady z domácností a kaly z čistíren odpadních vod.

Další, třetí, generace biopaliv je teprve na začátku vývoje. U paliv předchozích generací se surovina pro výrobu paliva musí na palivo nějak zpracovat (například kvašením a následnou destilací u bioethanolu). Ve třetí generaci by měly „hotová“ paliva produkovat řasy žijící v odpadních či mořských vodách, popřípadě mikroorganismy živící se celulózou. Zajímavé je také využití bakterií rodu *Clostridium* pro výrobu biovodíku z takzvaného mléčného permeátu, což je vedlejší produkt výroby sýrů pomocí membránové filtrace. Ve Švýcarsku je každý rok vyprodukováno přibližně 150 000 tun této odpadní látky s vysokým obsahem laktózy.[22]

Biopaliva různých generací se od sebe liší pouze způsobem získávání, proto bude každé palivo popsáno obecně.

1.2.1 BIONAFTA

Bionafta je obecný název pro metylestery mastných kyselin (zkráceně FAME). Technologie výroby bionafty jsou již osvědčené, používají se a již se v nich neočekávají větší změny. Základní surovinou pro výrobu bionafty jsou rostlinné či živočišné tuky. Je možné využít i odpadní fritovací oleje. Olej se smísí s methanolem, do kterého je předtím vmíchán katalyzátor (v případě řepkového oleje je použit hydroxid sodný nebo draselný). Po jejich vzájemné reakci, která při teplotách 50-80°C trvá 1-8 hodin, je potřeba oddělit vzniklý methylester od glycerolů, neutralizovat obě složky a oddestilovat z nich methanol.[1] Methanol se využije při další výrobě bionafty, glycerol je cenná surovina pro kosmetický průmysl (při výrobě 1 tuny bionafty vznikne přibližně 100 kg glycerolu).[1] Bionaftu je dále potřeba promýt vodou a následně odvodnit. Místo methanolu lze použít i bioethanol, vznikají tak ethylestery mastných kyselin. Ke skladování a čerpání FAME lze použít stejnou infrastrukturu jako pro motorovou naftu, musí se však důsledně dbát na oddělení této infrastruktury od zařízení pro motorovou naftu, nesmí dojít ke kontaminaci motorové nafty.[1]

Bionafta je použitelná v neupravených vznětových motorech, k použití však musí dát svolení výrobce motoru. Vlastnosti bionafty se od motorové nafty liší. Má menší výhřevnost a proto stoupá měrná spotřeba, má však vyšší cetanové číslo. Zároveň je hůře stlačitelná, což komplikuje dosahování vysokých vstřikovacích tlaků u vstřikovacích systémů. Má také nepříznivý vliv na těsnící materiály. Výhodami bionafty jsou lepší mazací schopnosti a velmi dobrá biologická odbouratelnost. Velkou nevýhodou bionafty je horší nízkoteplotní odolnost, možný výskyt látek které ucpávají palivové filtry a její nestálost, která může u dlouhodoběji odstaveného vozidla způsobit nepojízdnost.

Také lze FAME přimíchávat do motorové nafty v podílech od 5 do 30%, čímž vzniká směsná motorová nafta, která má vyšší výhřevnost než čistá FAME. Stejně jako u bionafty musí použití směsné nafty povolit výrobce motoru.



1.2.2 BIOETHANOL A ED95

Bioethanol je ethalon získaný alkoholovým kvašením z biomasy. Pro výrobu bioethanolu je použitelná jakákoliv biomasa s vysokým obsahem cukrů nebo látek, které lze na cukry převést, jako jsou škroby či celulóza. Využívání plodin, které přímo (cukrová řepa, pšenice, brambory) či nepřímo konkurují výrobě potravin, k výrobě paliva je nevhodné z důvodu zvyšování cen potravin. U bioethanolu se nabízí výroba z odpadu z dřevozpracujícího průmyslu, je však poměrně složitá a technologie pro jeho výrobu se teprve vyvíjejí, komerční využitelnost se očekává do 10 až 15 let.[1] Čistý bioethanol je v současnosti využitelný v zážehových motorech upravených na spalování bioethanolu. Je také možné bioethanol použít jako palivo pro palivový článek, dnešní palivové články na alkoholy však nemají dostatečný výkon. Výhodou ethanolu je nízké nebezpečí poškození přírody při jeho rozlití, například při tankování nebo při nehodách. Je totiž snadno biologicky odbouratelný a tak ho stačí smýt vodou. Navíc se směs s vodou od 70% obsahu vody stává nehořlavou, je tak snazší zabránit požáru než v případě rozlitého benzínu či nafty.

Ve vznětových motorech autobusů se bioethanol spaluje v podobě paliva ED95. Palivo vynalezl švédský výrobce bioethanolu SEKAB. Jedná se o směs, která obsahuje 95 procent ethanolu a zbytek je aditivum vylepšující cetanové číslo a další parametry. Přesné složení 5% složky není veřejně známo a je součástí patentu společnosti SEKAB. Používá se v upravených vznětových motorech s vyšším kompresním poměrem, menším turbodmychadlem a upraveným palivovým systémem (výměna pryžových těsnění za silikonová a snížení vstřikovacích tlaků). Palivo je levnější oproti naftě, tuto výhodu však částečně kompenzuje vyšší spotřeba. Nevýhodou je o 5-7% vyšší cena autobusů oproti dieselovým vozům a potřeba častější údržby.

V Evropě vyrábí autobusy na ethanol pouze Scania, která od 80. let vyrobila již přes 700 autobusů na toto palivo. Autobusy pohání 9 litrové vznětové a většina těchto autobusů je v provozu ve Švédsku, dokonce Stockholm má největší flotilu ethanolových autobusů na světě. V České republice byl tento autobus také testován, testovací provoz však byl ukončen z důvodu ekonomické nevýhodnosti – česká legislativa nepovažuje ethanol za ekologické palivo (na rozdíl od bionafty a CNG) a stát proto nevrací spotřební daň. [24]

1.2.3 BIOPLYN A BIOMETAN

Bioplyn vzniká bakteriálním rozkladem bez přístupu vzduchu. Materiálem pro anaerobní rozklad na bioplyn může být speciálně pěstovaná biomasa (vzniká biopalivo 1. generace) nebo odpad ze zemědělství, z domácností, z výroby papíru či čistírenské kaly (vzniká biopalivo 2. generace). Tento bioodpad se zpracovává ve fermentačních stanicích, kde se rozkládá v obrovských uzavřených nádržích o objemu stovek m³. Takto získáme dva produkty – bioplyn a tzv. digestát, což je pevný zbytek, který lze použít jako kvalitní hnojivo. Bioplyn může být získáván i na skládkách (tzv. skládkový plyn). Nevýhodou bioplynu je kolísavá produkce i kvalita v průběhu roku v závislosti na střídání ročních období.

Bioplyn je směs plynů, tvořená z 50 až 70% metanem a z 25 až 50% oxidem uhličitým. Může obsahovat i malé procento vody či sulfanu. Jako palivo pro vozidlové spalovací motory je nepoužitelný kvůli agresivním spalinám, které rapidně snižují životnost motoru.



Bioplyn se proto čistí, odstraňují se nežádoucí příměsi a zvyšuje se koncentrace metanu až na 98%. Výsledný produkt se nazývá biometan (nebo také CBG) a má kvalitu odpovídající zemnímu plynu. Díky tomu je po stlačení na přibližně 200 barů použitelný v autobusech s motory na CNG. Dle [2] je výroba biometanu v České republice v současnosti ekonomicky efektivní i bez dotací, je však velmi citlivá na jeho výkupní cenu (prodejní cenu CNG) a proto má v ČR konkurenci ve výrobě elektřiny z bioplynu, která nabízí jistotu výdělku (garantované výkupní ceny zelené energie).

Příklad fungujícího projektu lze nalézt ve městě Lille ve Francii. Nachází se v regionu Nord-Pas-de-Calais. Spravuje území o rozloze přibližně 600 km² a s 1,2 milionu obyvatel (rozloha a počet obyvatel přibližně srovnatelný s Jihomoravským krajem). Město hledalo využití pro bioplyn, produkovaný místní čistírnou odpadních vod, který se do té doby bez užitku spaloval. V roce 1995 byl za podpory EU spuštěn pilotní projekt výroby biometanu a byl zakoupen první autobus na CNG. Zároveň se začalo s výrobou bioplynu z bioodpadu jak v čistírně odpadních vod, tak v samostatné stanici na zpracování bioodpadu. Produkce biometanu v čistírně odpadních vod stačí pro provoz přibližně 10 autobusů na CNG a produkce z bioplynové stanice, která zpracuje 100 000 tun bioodpadu ročně a vyrobí z něj 3,6 milionu normativních m³ bioplynu, (700 Nm³/h bioplynu, ze kterého se získá 480 Nm³/h biometanu) vystačí na provoz 100 autobusů. Do roku 2015 plánují kompletní plynofikaci vozového parku, který bude čítat přes 400 autobusů na CNG. Díky zaměnitelnosti obou paliv nevadí ani případné kolísání produkce biometanu.

1.2.4 (BIO-)DIMETHYL ETHER (DME)

Dimethyl ether je plyn, vyráběný ze syntézního plynu. Syntézní plyn je směs vodíku a oxidu uhelnatého a dá se vyrábět buď z uhlí, zemního plynu nebo z biomasy. V případě biomasy se nejčastěji jedná o odpad ze zpracování dřeva. Pokud je DME vyrobeno z bio-masy, označuje se jako bioDME. Pro výrobu 500 litrů bioDME je zapotřebí 1 tuna dřeva.[1] Pro využití ve vozidlech se DME stlačuje na 0,5 MPa, čímž zkapalní a v kapalném stavu se tankuje do nádrží. Zpracovává se podobným způsobem jako LPG, proto se pro jeho dopravu a tankování může použít podobná infrastruktura. Podobné mohou být i úpravy palivového systému.

Dimethyl ether lze využít v upravených vznětových motorech. Oproti motorové naftě má dimethyl ether téměř poloviční měrnou energii ale motory na DME dosahují stejné účinnosti. Výhodou oproti naftě je nižší hlučnost motoru, velmi nízké emise pevných částic a o 90% nižší emise oxidů dusíku[3] a proto stačí pro následnou úpravu výfukových plynů jednodušší systém. V roce 2010 vyrobila společnost Volvo Trucks na testování 14 nákladních vozů Volvo FH s 13 litrovým motorem o výkonu 440 koní, které jsou upraveny na provoz na DME. Úpravy vozidel spočívají v instalaci přetlakových nádrží, pro dosažení stejného dojezdu je nižší měrná energie kompenzována instalací větších nádrží. Motory mají speciální palivové čerpadlo i vstřikovače, upravený program řídicí jednotky a vstřikování common rail.

U autobusů na DME bude potřeba vyřešit problém umístění nádrží. U nízkopodlažních autobusů připadá v úvahu instalace kompozitních nádrží na střeche stejně jako u autobusů na LPG, v případě středně- a vysokopodlažních autobusů je možné umístit nádrže pod podlahu.



1.3 VÍCEPALIVOVÉ MOTORY

1.3.1 METAN – NAFTA

Tento více palivový systém kombinuje výhody pohonu na LNG (zkapalněný zemní plyn)/CNG a vznětového motoru. Pokud chceme v motoru spalovat LNG (nebo CNG), musíme použít zážehový motor, kde svíčka zažehne směs ve válci. Zážehové motory však mají oproti vznětovým nižší účinnost. Metan – naftová pohonná jednotka pracuje na principu vznětového motoru, má proto vyšší účinnost. Do válce se nasaje směs vzduchu a metanu a po stlačení se do směsi vstříkne malé množství motorové nafty, která směs zapálí. Tento systém v současnosti testuje společnost Volvo Trucks, která zákazníkům na vybraných trzích zapůjčila několik prototypů vozidel Volvo FL, FE a FH se sedmilitrovými motory. Vozidla mají oproti dieselovým navíc nádrže na LNG a upravené motory. Zachovávají si stejný výkon a díky zachované možnosti jezdit pouze na naftu nejsou omezeny sítí čerpacích stanic na plyn. Vozidla mají o 25% nižší spotřebu v porovnání s vozidly na CNG.[7] Nevýhodou je snížená nosnost vozidel díky váze přidaných nádrží. V případě použití systému pro autobusy připadá v úvahu úprava naftových autobusů, kdy by se zmenšila naftová nádrž v interiéru a na střechu by se přidaly nádrže na CNG.



Obr. 1 Volvo FM s metan-dieselovým pohonem [7]



2 ELEKTROPOHONY

Velmi slibnou cestou pro pohon autobusů je využití elektrické energie. Elektromobily jsou historicky starší než automobily se spalovacím motorem, ty je však pár desítek let po vynalezení vytlačily na okraj zájmu. Bylo totiž jednodušší nalít do nádrže laciný ropný produkt či líh než nabíjet olověné akumulátory, navíc když elektrické rozvodné sítě nebyly na začátku 20. století všude. Například v Českých zemích byly pouze výjimkou, s elektrifikací Československa se začalo až v roce 1919. Rozvoji konkurenčních automobilů se spalovacími motory navíc napomohly obě světové války, je totiž snazší zásobovat bojiště sudy s palivem, než tam zavádět elektrické vedení. Díky tomu se tehdy vývoj elektromobilů v podstatě zastavil a v dnešní době nejsme o moc dále než před sto lety. Zatím nejsou ani vyřešeny všechny jejich problémy tak, aby se daly elektromobily bez problémů a bez omezení používat v reálném světě.

Elektromotory mají příznivější výkonovou a momentovou charakteristiku než spalovací motory, navíc umožňují reverzaci, takže se vozidla mohou obejít bez převodovky. Další výhodou je rekuperační brzdění – autobus se obejde bez elektromagnetického retardéru a navíc není kinetická energie mařena, ale převedena na elektrickou. Většina energie se tedy vrátí a může být využita při následném rozjezdu. To vedle velké účinnosti elektromotorů dále snižuje spotřebu energie na ujetý kilometr. Navíc se elektromobily dají zabudovat do kol a za cenu zvýšení hmotnosti neodpružených hmot ušetří prostor ve vozidle. S ohledem na životní prostředí mají tichý chod a nevytvářejí výfukové plyny, na druhou stranu jsou baterie často z toxických kovů.

Pozor je třeba dát také na to, že spotřeba energie v autobusu nesouvisí jen s jízdou, energii spotřebovává i topení, klimatizace ale i informační, odbavovací a zábavní systémy vozidla, přičemž topení nebo klimatizace se na spotřebě energie podepíše výrazně. Moderní naftové autobusy již vůbec nevyužívají k vytápění prostoru pro cestující odpadního tepla motoru a to z prostého důvodu – motory již nevytvářejí dostatek odpadního tepla. Proto se k vytápění využívají nezávislá naftová topení o výkonu 24 až 30 kW, podle klimatických podmínek v místě provozu vozidla a jeho velikosti. Shodně výkonná nezávislá topení na elektřinu by razantně snížila dojezd elektrických autobusů, proto se do elektrobusů budou pravděpodobně montovat i nadále nezávislá topení na kapalná či plynná paliva. Dalšími nevýhodami v současné době jsou díky bateriím zvýšená váha a cena vozidla, nízký dojezd a dlouhá doba dobíjení, která se dá v provozu zkrátit za cenu snížení životnosti baterie. Dá se však očekávat, že technický vývoj a velkosériová výroba tyto nevýhody odstraní. Skladování elektrické energie je základní otázkou, po jejímž zodpovězení nic nebrání masivnímu rozvoji elektromobilů a elektrobusů.



2.1 AKUMULÁTORY

Nejjednodušší a v současnosti nejpoužívanější cestou uchovávání elektrické energie jsou akumulátory. Elektřina je v nich skladována v podobě chemické energie. Akumulátory jsou však zároveň tím, co brzdí rozvoj elektřinou poháněných vozidel. Problémem je jejich váha, kapacita, vysoká cena, životnost a doba nabíjení. Protože životnost baterií velmi ovlivňuje způsob používání, je pro co nejvyšší životnost nutný řídicí systém nabíjení a vybíjení baterie, který bude moci ovlivňovat spotřebu vozu (vypínat komfortní elektroniku v případě nouze) a upozornit uživatele na nutnost dobíjení. Přesto v současné době skutečná životnost baterií (dle údajů výrobců automobilů **maximálně** 10 let) nedosahuje životnosti zbytku vozidla, což je u karoserie autobusu až 15 let, v případě elektromotoru je životnost při správné údržbě klidně 30 – 50 let, což se dá pozorovat u trolejbusů. Nejstarší trolejbus pravidelně zasahující do brněnského provozu (ev. č. 3194) letos oslaví 26 let. I přes vysoký věk bude důvodem k vyřazení spíše nutnost opravy karoserie a nemožnost sehnání náhradních dílů, popřípadě morální zastaralost, než neopravitelná závada motoru. V případě, že cena akumulátorů bude tvořit převážnou část ceny vozidla, budou se pravděpodobně autobusy vyřazovat z provozu po skončení životnosti baterie. Bude také potřeba vymyslet způsob řešení situací, kdy vybité vozidlo zůstane stát bez energie v místech, kde nebude k dispozici dobíjecí infrastruktura (například v odstavném pruhu dálnice). Přesto jsou akumulátory oblastí s velkým potenciálem, protože možnosti jejich vývoje ještě nejsou u konce a velkou část nákladů na vývoj technologií v současnosti nesou výrobci spotřební elektroniky.

2.1.1 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY

Olověné akumulátory jsou v dnešní době využívány v automobilech se spalovacími motory jako zdroje startovacího proudu. Jedná se o nejstarší typ nabíjecí baterie, byla vynalezena v roce 1859 Gastonem Planté, francouzským fyzikem, a je používána již déle než 100 let. Díky tomu je její výroba již dobře zvládnutá a je vyřešen i sběr a recyklace akumulátorů po skončení životnosti. Životnost olověných akumulátorů se udává přibližně na 500–800 cyklů. Nejsou však vhodné pro hybridní vozidla, protože časté střídání cyklů jim snižuje životnost. Navíc pokud jsou nabitě na více než 70% kapacity tak neumožňují rekuperaci.[9] Vzhledem k jejich vysoké váze a menší kapacitě se nepředpokládá jejich využití jako hlavních baterií elektrických vozidel, mohou však, stejně jako u současných vozidel, sloužit k napájení osvětlení a pomocných systémů vozidel.

2.1.2 NIKL – KADMIOVÉ AKUMULÁTORY

Nikl - kadmiové akumulátory (označované jako NiCd) byly vynalezeny v roce 1899. Skládají se z kladné elektrody z oxid-hydroxidu niklitého, separátoru a záporné elektrody z kadmia, elektrolytem je hydroxid draselný. Při nabíjení i provozu baterie je třeba udržovat co nejnižší teplotu, do 20°C je totiž nabíjení nejučinnější, zároveň vyšší teploty urychlují samovybití. Minimální napětí článku, pod které by se nemělo vybíjet, je 1,2 V, při poklesu napětí pod 1V na článek dojde k obrácení polarity, což snižuje životnost. Další věcí, na kterou si je potřeba dát pozor je přebíjení nebo úplné vybití baterie, v obou případech v baterii vzroste tlak vlivem rozkladu elektrolytu. V případě, že je tlak odpuštěn bezpečnostním ventilem, sníží se životnost baterie. Zároveň tyto (a všechny akumulátory na bázi niklu) baterie trpí tzv. paměťovým efektem, který vzniká při opakovaném nabíjení jen částečně vybitých baterií.

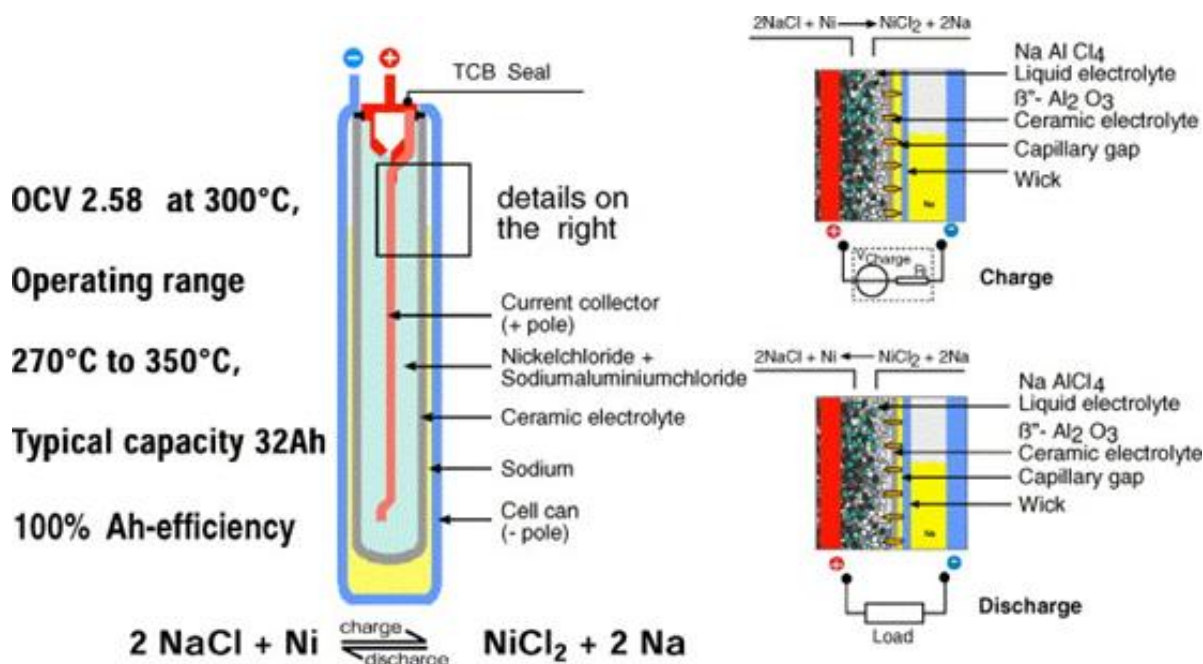
Baterie si pak tuto hodnotu vybití „pamatuje“ jako vybití maximální a neumožňuje využít skutečnou kapacitu baterie. Akumulátory zasažené paměťovým efektem však lze regenerovat tak, že se baterie několikrát vybije na minimální napětí (1,2 – 1 V / článěk) a po několika nabíjecích cyklech se obnoví původní parametry. Z těchto vlastností NiCd akumulátorů lze usuzovat, že nejsou úplně vhodné pro použití do vozidel, protože prakticky vylučují možnost rekuperace do akumulátorů. Pro optimální životnost (2 000 cyklů) vozidlových NiCd akumulátorů je zapotřebí řízené chlazení baterií a počítačový systém řízení nabíjecích a vybíjecích cyklů, který hlídá, že baterie nebude vybita pod minimální napětí na článek. Velkou nevýhodou NiCd akumulátorů je použití jedovatého kadmia na zápornou elektrodu.

2.1.3 NI-MH AKUMULÁTORY

Nikl – metal hydridové akumulátory přišly na trh v roce 1989. Složením jsou velmi podobné NiCd bateriím, liší se zápornou elektrodou, která je ze slitiny vzácných kovů, poutajících vodík. Vlastnostmi se také moc neliší od nikl – kadmiové baterie s tím rozdílem, že dochází k rychlejšímu samovybití, které lze omezit nízkou teplotou. Pro skladování je ideální 0°C. Jsou méně náchylnější k paměťovému efektu, který se Ni-MH akumulátorů projevuje nižším napětím v plně nabitém stavu, také tyto články však lze regenerovat. Akumulátory tohoto typu využívá ve svých hybridních vozidlech automobilka Toyota, oproti lithiovým akumulátorům mají nižší energetickou hustotu, Toyota však tvrdí, že jsou pro hybridní systémy vhodnější, protože se rychleji vybíjejí i nabíjejí a proto u technologie NiMH plánuje Toyota zůstat minimálně do roku 2020.[12]

2.1.4 AKUMULÁTORY ZEBRA

Akumulátory Zebra (jméno je složeno z názvu projektu „Zeolite Battery Research Africa“) patří mezi termální baterie, jinak také zvané jako baterie tekutých solí. Vynalezeny byly týmem vědců z výzkumného ústavu v Jihoafrické republice a jsou jediným typem termálních akumulátorů, které se komerčně využívají. Výroba byla spuštěna v roce 1994. Baterie se



Obr. 2 Schéma akumulátorů Zebra s chemickými reakcemi [11]



vyrábí ve vybitém stavu, kdy se do keramické nádoby z $\beta^{\text{II}}\text{-Al}_2\text{O}_3$ která je separátorem i elektrolytem zároveň, nasype směs práškového niklu s kuchyňskou solí (NaCl), která tvoří kladnou elektrodu. Tato směs se podtlakově naimpregnuje roztavenou NaAlCl_4 což je směs tvořená 50% kuchyňské soli a 50% chloridu hlinitého, která je tekutým elektrolytem. Následně se keramická nádoba umístí do vnějšího obalu a obklopí se sodíkem. Protože baterie funguje, jen když jsou soli roztavené, provozní teplota článku je mezi 250 – 370°C. Baterie je z tohoto důvodu uzavřena do tepelně izolovaného pouzdra a vnitřní teplota je řízena řídicí jednotkou baterie.

Není se třeba obávat křehkosti keramického separátoru, protože v případě prasknutí dojde k reakci mezi sodíkem na záporné elektrodě a tekutým elektrolytem NaAlCl_4 a vznikne $4\text{NaCl} + \text{Al}$, které prasklinu uzavřou. Například v případě nehody automobilu, kdy dojde k většímu poškození keramického separátoru, hliník vzniklý při stejné reakci zkratuje póly článku a spolu se solí obalí katodu tak, aby zamezil reakci mezi katodou a anodou. Takto poškozený článek však klade jen malý elektrický odpor, takže zbytek baterie může fungovat dál. To činí baterie Zebra velmi bezpečnými a předurčuje je pro použití ve vozidlech. Další výhodou těchto baterií je 100% účinnost nabíjení, protože v baterii neprobíhají žádné vedlejší chemické reakce. Cena životního cyklu je nižší než u srovnatelných olověných baterií.[11] Těchto akumulátorů v současné době využívají elektrické dodávky Iveco Daily electric.

2.1.5 LI-ION AKUMULÁTORY

Li-ion je označení pro skupinu akumulátorů, které jako jeden z prvků ve svých chemických reakcích využívají lithium. Lithium je nejlehčí kov, takže další podstatné snižování váhy akumulátorů může přijít jen s technologií, která bude navyšovat kapacitu akumulátoru (zvyšovat měrnou energii). Na akumulátorech využívajících lithia se pracovalo od 60. let 20. století, ale první skutečně využitelný článek přinesla na trh až v roce 1991 firma Sony ve svém mobilním telefonu.

V akumulátoru je záporná elektroda zdrojem lithiových iontů, nejčastěji je zápornou elektrodou směs grafitu obohacená lithiem. Elektrolytem je nejčastěji LiPF_6 rozpuštěný v bipolárním rozpouštědle a kladná elektroda se liší podle typu akumulátoru.[13] Jmenovité napětí článku je 3,6 V, je tedy 3x vyšší oproti NiCd a NiMH akumulátorům. Na rozdíl od nich také nemají paměťový efekt a méně trpí samovybitím, také se dají navrhovat v různých tvarech, aby se efektivně využil prostor vymezený pro baterii. Jejich životnost je však ovlivněna způsobem nabíjení a vybíjení – životnost je vyšší, pokud se vybíjí jen na část své kapacity a jsou častěji dobíjeny.

V současnosti se jeví jako nejperspektivnější akumulátory, protože mají velký potenciál pro zvýšení kapacity, stačí vhodně nakombinovat materiály elektrod a elektrolytu. Dříve se tyto kombinace zkoušely metodou pokus-omyl, dnes se k tomuto vývoji používají počítačové simulace. Další cestou, jak zvýšit kapacitu těchto baterií je nahrazení jedné z elektrod vzdušným kyslíkem, vývoj těchto baterií je však na začátku a zatím je problémem jejich nabíjení. Potenciál pro zlepšení je také u rychlosti nabíjení a vybíjení. Tyto vlastnosti lze vylepšit úpravou povrchu elektrod pomocí nanotechnologií, která zlepší schopnost absorbovat a uvolňovat lithiové ionty.[14]

Nevýhodou je však stárnutí článků, kdy v průběhu životnosti klesá jejich kapacita. Další velmi nepříjemnou vlastností těchto baterií je nebezpečí vznícení. Při výrobě či nehodě se



mohou do elektrolytu uvolnit malé kovové částice, které mohou poškodit separátor, který odděluje obě elektrody, což vede ke zkratu a následnému požáru. K bezpečnosti určitě nepřispívá, že elektrolytem je hořlavá kapalina. Těmto problémům lze předejít větší pečlivostí při výrobě a lepší ochraně baterií před nárazem. Další možností jak předejít těmto problémům je použití článků Li-Pol, kde jsou elektrolytem polymery.

Lithium je drahý kov a v případě že stoupne jeho cena, může se tato technologie velmi prodražit, přesto v současnosti cena lithia tvoří pouze 3% ceny baterie,[14] což znamená, že je zde velký prostor pro snížení ceny při výrobě. Možností jak snížit cenu baterie je její sestavení z článků, které se již vyrábí ve velkých sériích. Tuto cestu zvolila automobilka Tesla pro svůj Roadster. Díky použití 6 831 kusů článků 18650 (18 mm průměr, 65 mm délka), ze kterých se sestavují baterie pro notebooky, může jednak vyrábět tyto baterie relativně levně a navíc si může na trhu vybírat články s nejvyšší kapacitou, tím tak zvyšuje dojezd svých automobilů.[15] V případě výroby autobusů, která je oproti výrobě automobilů spíše malosériové povahy, a navíc je zde nutnost přizpůsobit baterie většímu množství typů a variant, se tento způsob výroby baterií zdá velmi výhodný.

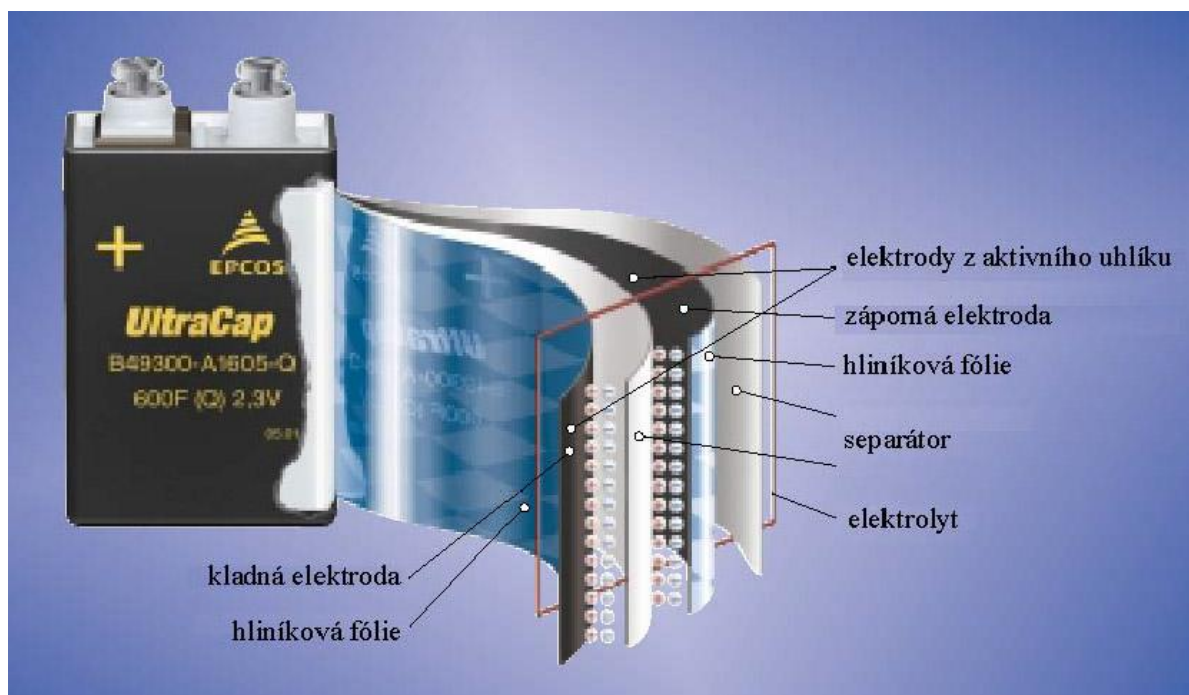


Obr. 3 Porovnání velikosti lithiového článku 18650 s běžnými monočlánky [15]

2.2 SUPERKONDENZÁTORY

Superkondenzátory, známé také pod názvem kapacitory či ultrakapacitory jsou elektrotechnická součástka, sloužící k dočasnému uskladnění elektrického náboje. Elektrická energie se zde skladuje v elektrostatickém poli, nedochází k převodu na chemickou ani jinou formu energie. Jsou schopné velmi rychlého nabití i vybití a hodí se proto jako doplněk k akumulátorům na vykrytí proudových špiček, například k absorbování energie při rekuperačním brzdění a jejímu následnému uvolnění pro rozjezd. Nabíjení i vybití trvá zhruba od 0,3 do 30 s. Oproti akumulátorům vydrží mnohonásobně víc nabíjecích a vybíjecích cyklů (až milion). Maximální napětí, které jsou schopny vstřebat je mezi 2-3 volty, což se řeší zapojováním více superkondenzátorů do série.[16] V Soligenu (Německo) testují trolejbus s 288 superkapacitory (kapacita každého 2600 F) o napětí 700 V, které dokáží uložit 0,5 kWh energie, což umožní cca 1 km jízdy. Další, tentokrát již provozovanou aplikací

superkapacitorů, je moskevské metro, kde superkapacitory ve vozech slouží k vykrytí proudových špiček. [17]



Obr. 4 Řez superkondenzátorovým článkem [16]

Celkově lze říci, že superkapacitory pravděpodobně nikdy nebudou tvořit hlavní zdroj energie v autobusech, ale velmi výhodně mohou sloužit jako doplněk k akumulátorům a jejich vlastnosti se mohou vzájemně doplňovat.

2.3 PALIVOVÉ ČLÁNKY

Palivový článek je zařízení, které vyrábí elektrickou energii elektrochemickou oxidací z chemické energie paliva a okysličovadla. Nejčastěji se používá vodík, jednak proto, že má ze všech paliv nejvyšší energetický obsah a také proto, že jeho oxidací vzniká pouze vodní pára. Palivem mohou teoreticky být i alkoholy popsané výše, tyto články jsou však stále ještě ve vývoji. Okysličovadlem je téměř vždy kyslík, buď čistý nebo z okolního vzduchu. Už z principu své činnosti jsou účinnější než tepelné stroje, protože je neomezuje. Každý palivový článek se skládá ze dvou elektrod oddělených elektrolytem. Právě složením elektrod a elektrolytu se články dělí do jednotlivých typů. [1]

Palivové články mohou být hledanou budoucností pohonu autobusů, protože do vodíkových nádrží můžeme uložit více energie než do současných akumulátorů, navíc nabíjení akumulátorů trvá mnohem delší dobu než čerpání vodíku a u palivových článků nehrozí tak rychlé stárnutí jako v případě akumulátorů.



Tab. 1 Hlavní charakteristiky různých typů palivových článků [1]

Typ pal. článku	Elektrolyt	Anoda	Katoda	Provozní teplota (°C)
AFC	KOH (30-85% hm.)	Pt/Pd Ni	Au/Pt NiO (Li)	60-120 (až 250)
PEMFC	Iontoměničový polymer	Pt/C	Pt/C	50–80
PAFC	H ₃ PO ₄	Pt/C	Pt/C	160–220
MCFC	Li ₂ CO ₃ + K ₂ CO ₃	Ni (Cr)	NiO (Li)	600–660
SOFC	ZrO ₂	Ni-ZrO ₂	LaMnO ₃ (Sr)	800–1000

Asi největšími projekty využívajícími autobusy na palivové články jsou projekty EU. Prvním byl projekt CUTE (Clean Urban Transport of Europe), který probíhal v letech 2001 – 2006 a v jeho rámci jezdilo v běžném provozu 9 evropských měst 27 autobusů Mercedes Benz Citaro Fuel Cell. V roce 2006 na něj navázal projekt HyFleet:CUTE, v rámci kterého bylo v 10 městech tří kontinentů provozováno 47 autobusů na vodík, z nich bylo 36 autobusů Mercedes Benz Citaro Fuel Cell druhé generace a zbytek tvořily autobusy MAN Lion's City se spalovacím motorem na vodík. Tento projekt skončil v roce 2009. Na něj navázal projekt Chic, který má za úkol vybudovat flotilu vodíkových autobusů ve vybraných městech v rámci EU a vybudovat pro ně infrastrukturu,[18] zároveň tyto projekty slouží jako laboratoř zapojeným společnostem a umožňuje jim získávat poznatky z reálného provozu.

2.3.1 Vodík

Vodík je často nazýván palivem budoucnosti, protože se dá vyrobit z vody a jeho spalováním znovu vzniká voda. Čistý vodík se díky své nízké hmotnosti na Zemi vyskytuje jen ve vrchních vrstvách atmosféry, odkud pomalu uniká do vesmíru. Na povrchu Země a pod ním se většinou vyskytuje ve sloučeninách, z nichž nejčastější sloučeninou je voda. Vodík se díky tomu nedá těžit, ale musí se průmyslově vyrábět. Vodík tedy není palivem, ale pouze „zásobníkem“ energie, je proto přímým konkurentem akumulátorů. V současnosti se nejvíce vodíku (90%) vyrábí tepelným rozkladem zemního plynu, výroba elektrolýzou z vody je energeticky náročná, na 1 kWh energie uložené ve vyrobeném vodíku se spotřebuje 1,53 kWh elektriny, v případě parního reformování zemního plynu je ztráta nižší, na jednu kilowatthodinu vodíku se spotřebuje 1,43 kilowatthodiny chemické energie zemního plynu.[1] Navíc při parním reformování zemního plynu pochází 1/3 vyrobeného vodíku z vodní páry. Vodík lze využít jako palivo v palivových článcích ale lze ho i spalovat ve spalovacích motorech. Vzhledem k vyšší účinnosti palivových článků je to však velmi neekonomické.

Vodík lze ve vozidle skladovat třemi způsoby – buď ve formě kapalné, plynné nebo ve formě chemických sloučenin, které vodík snadno uvolňují. Vodík zkapaňuje při -252,8°C (20,3 K) a jeho zkapaštění je tedy velmi energeticky náročné, spotřebuje se při něm energie odpovídající asi 40% jeho výhřevnosti.[19] Je potřeba dát velký pozor na úniky tekutého vodíku, protože vodík se při odpařování zahřívá a to může vést k samovznícení. Z těchto důvodů není toto řešení příliš vhodné pro autobusy, využívá se hlavně v kosmickém programu jako palivo do



nosných raket. Vodík stlačený do tlakových lahví pod tlakem 20 – 35 MPa je v současnosti asi nejpoužívanější způsob uskladnění vodíku ve vozidlech, skladování vodíku na střeše autobusu se moc neliší od skladování CNG, liší se tankování a skladování vodíku u čerpacích stanic. Dle United States Department Of Energy (Ministerstvo energetiky USA) však automobil s dojezdem 500 km bude muset mít 4x až 6x objemnější a 2x - 3x těžší nádrž oproti stejnému vozidlu s benzínovým motorem.[19]

Jako nejnadějnější se zdá být ukládání vodíku do chemických sloučenin. V současnosti nejdál je vývoj ukládání vodíku do kovových hydridů. Velkou výhodou je velká kapacita zásobníku a nižší tlak než v případě plynného vodíku. Do jedné 50 litrové nádrže dokážeme pod tlakem 1,4 MPa uložit 0,0625 kg vodíku, do hydridové nádrže o stejném objemu dokážeme při stejném tlaku uložit 3 kg vodíku. Čerpání vodíku do hydridových nádrží trvá při tlaku 10 MPa asi 10 minut, při vázání vodíku do hydridů vzniká teplo a proto je třeba nádrže externě chladit, v případě špatného chlazení může dojít ke kolapsu nádrže, je proto nutná školená obsluha. Vodík se z nádrží uvolňuje zahříváním a teplota potřebná k uvolnění vodíku závisí na slitině, na kterou je vodík vázán. Například v případě železo-titanové slitiny je to 7°C, v případě hořčíku je to 296°C.[20] Nevýhodou je proto hmotnost nádrže a její cena, výhodami jsou naopak bezpečnost a velká kapacita při malých rozměrech. Mezi další možnosti uskladnění vázaného vodíku ve vozidlech jsou například uhlíkaté struktury a skleněné mikrokuličky. Tyto možnosti jsou však v současnosti teprve vyvíjeny v laboratořích.



3 POROVNÁNÍ PALIV A AKUMULÁTORŮ

Tab. 2: Porovnání paliv a akumulátorů

	Energetická hustota	Měrná energie		Hustota	Účinnost
	(MJ.m ⁻³)	(MJ.kg ⁻¹)	(kWh.kg ⁻¹)	(kg.m ⁻³)	%
Motorová nafta	38 080	44,8	12,4	850	35 – 40
Bionafta	35 446	38	10,5	880	cca 33 – 38
Bioethanol	21 438	27	7,5	794	19 – 24
CNG (20 MPa)	6 800	36 – 50	10 – 14	160	25 – 30
LNG (-161°C)	25 000	54	10 – 14	400 – 500	25 – 30
DME (0,5 MPa)	-	31,6	8,7	668	35 – 40
Vodík (20 MPa)	1 825	120	33,3	15,2	25 – 30 50 – 80
Olověný akumulátor	270	0,142	0,04	-	90
NiCd	360	0,144	0,04	-	90
NiMH	504	0,25	0,06	-	90
ZEBRA	576	0,324	0,1	-	90
Li-ion	900 - 2230	0,3 – 0,9	0,1 – 0,25	-	90

V tabulce výše jsou uvedena všechna paliva a baterie porovnávaná v této práci. Hodnoty pocházejí z [1],[5],[8],[10] a jsou uváděny při teplotách a tlacích obvyklých pro palivo v nádrži, uvedených u názvu paliva. V případě neuvedení tlaku nebo teploty se hodnoty vztahují k atmosférickému tlaku a 15°C. Účinnost vyjadřuje, kolik procent energie dokážeme v motoru využít. Hodnoty jsou orientační, protože se zdroj od zdroje liší. Skutečná energetická hustota baterií závisí na tom, zda jsou konstruované na výkon nebo kapacitu. U vodíku jsou uvedeny dva rozsahy hodnot účinnosti, první se vztahuje ke spalovacímu motoru, druhá k palivovému článku.

3.1 DOJEZD MEZIMĚSTSKÉHO AUTOBUSU S LI-ION AKUMULÁTORY

Meziměstské autobusy se v současné době téměř výlučně spoléhají na motorovou naftu, smyslem následujícího výpočtu je zjistit, o kolik zhruba se sníží či prodlouží dojezd autobusu v případě, že se do karoserie místo vznětového motoru a s ním souvisejících nádrží a agregátů zabudují baterie a elektromotor. Dojezd autobusů porovnáme množstvím energie získané z paliva či akumulátoru.

Meziměstský autobus Irisbus Crossway s motorem Cursor 8 o výkonu 243 kW má nádrž o objemu 340 litrů paliva.[23]

Pokud vynásobíme energetickou hustotu ρ_E motorové nafty objemem nádrže V ,

$$E = \rho_E \cdot V = 38\,080 \cdot 0,34 = 12\,947 \text{ MJ}$$



vyjde nám, že plná nádrž v autobuse obsahuje 12 947 MJ energie E . Vznětový spalovací motor má však účinnost 37,5%, proto nám z rovnice, kde η je účinnost, vyjde skutečná energie E_s , která se z paliva dostane na kola:

$$E_s = E \cdot \eta = 12\,947 \cdot 0,375 = 4\,855 \text{ MJ}$$

V případě zástavby elektropohonu se do vozu nenamontuje spojka, převodovka s retardérem, výfukový systém se systémem AdBlue, chladič a nádrže AdBlue a na naftu. Vznětový motor bude nahrazen elektromotorem o stejném výkonu, proto jeho prostor a váha nebude započítávána, protože elektromotor váží zhruba stejně. Celkový prostor uvolněný těmito agregáty je zhruba $1,6 \text{ m}^3$, ušetřená hmotnost 576 kg bez náplní.[23]

Hmotnost 340 litrů motorové nafty je 289 kg, hmotnost 60 l AdBlue (hustota 1090 kg/m^3 [21]) je 65 kg. Celková ušetřená hmotnost je tedy 930 kg.

Pokud do uvolněného prostoru zabudujeme li-ionové akumulátory s nejlepšími parametry dle tabulky 2 a dosadíme je do následující rovnice:

$$E_A = \rho_E \cdot V = 2\,230 \cdot 1,6 = 3\,568 \text{ MJ}$$

Kde E_A je energie uložená v akumulátorech, ρ_E je energetická hustota akumulátorů a V je objem prostoru pro uložení baterií, zjistíme, že můžeme do akumulátorů teoreticky uložit 3 568 MJ energie. Účinnost elektromotoru budeme uvažovat jako $\eta = 90\%$:

$$E_s = E \cdot \eta = 3\,568 \cdot 0,9 = 3\,211 \text{ MJ}$$

Proto k cestování můžeme využít 3 211 MJ energie.

Váha akumulátorů m při jejich měrné energii $e = 0,9 \text{ (MJ.kg}^{-1}\text{)}$ pak vychází:

$$m = \frac{e}{E_A} = \frac{3\,568}{0,9} = 3\,964 \text{ kg}$$

Z výpočtu tedy plyne, že elektroautobus by měl o 34 % menší dojezd při stejných podmínkách (vozidlo zatíženo na maximální přípustnou hmotnost, stejná trasa, počasí, řidič atd.), ale zároveň by byl o 3 034 kg těžší, což by se výrazně podepsalo na užitečné hmotnosti, respektive obsaditelnosti. Pro zjištění skutečného stavu i s případným rozdílem hmotností by bylo potřeba skutečně postavit prototyp elektrobusu a otestovat oba autobusy v reálném provozu, to však zdaleka přesahuje rozsah této práce.



4 HYBRIDNÍ POHONY

Hybridní pohony kombinují nejméně dva zdroje energie. Dle této definice využívá hybridní pohon i automobil na CNG, který má zachovanu nádrž na benzín a může mezi těmito palivy přepínat. Nejčastěji je však myšlena kombinace spalovacího motoru s elektromotorem. Tyto kombinace různých zdrojů energie vznikají s cílem potlačit nevýhody samostatných pohonů a spojit jejich výhody. V případě spojení elektromotoru se spalovacím motorem se například využívá možnosti rekuperace energie při brzdění, které není samotný spalovací motor schopen. Zde se mohou s výhodami uplatnit i superkondenzátory. Dalšími výhodami tohoto spojení je vyšší účinnost elektromotoru, nižší hlučnost a jeho charakteristika točivého momentu. Dalšími možnostmi jsou například hydraulické hybridní systémy, které při brzdění akumulují hydraulický tlak v tlakovém zásobníku a následně ho přes hydromotory v kolech využívají k rozjezdu. Obecnými nevýhodami hybridních systémů je složitost, vyšší váha a cena. Proto se dají smysluplně využít jen tam, kde se dají naplno zužít klady vzniklé jejich spojením. V případě autobusů se jedná především o městské autobusy, které často brzdi a rozjíždějí se, navíc je u nich kladen důraz na hluk a emise výfukových plynů.

Nejjednodušším hybridním systémem je sériový hybridní pohon. U sériových hybridních systémů pohání kola autobusu elektromotor. Ten čerpá energii z baterií nebo přímo z běžícího spalovacího motoru s generátorem, který je ve voze pouze k dobíjení baterií. Může tedy být menší a může být provozován v optimálních otáčkách. Takováto vozidla hromadné dopravy v České republice běžně jezdí a jsou zde navíc vyráběna. Tuto definici (až na akumulátor jako zdroj elektrické energie) totiž splňují i trolejbusy s diesel-agregátem, které jezdí v ulicích Mariánských Lázní, Plzně, Zlína a dalších měst. U trolejbusů diesel-agregát slouží k přejezdu míst bez trolejového vedení, případně jako záložní zdroj energie v případě výpadku elektrického proudu.

Druhým zástupcem hybridních systémů je paralelní hybrid. U něj pohání kola spalovací motor i elektromotor a elektronika vozu rozhoduje, kdy se který pohon zapojí. Protože zde spalovací motor pohání kola, akumulátor je menší a slouží k uložení energie získané rekuperačním brzděním. Elektromotor ani nemusí být schopen bez pomoci spalovacího motoru samostatně pohánět vozidlo.

Netypickým hybridním pohonem disponuje autobus, který vznikl v rámci českého projektu TriHyBus. Jedná se o elektrobus, který svou elektrickou energii získává ze tří zdrojů – z palivového článku, akumulátoru a superkondenzátorů. Tento vodíkový autobus jezdící na linkách MHD v Neratovicích používá jako primární zdroj energie elektřinu vyrobenou palivovým článkem z vodíku, ten však může i nabíjet akumulátor. Původním záměrem projektu bylo využívat odpadní vodík z výroby Spolany Neratovice, z ekonomických důvodů (nutnost výstavby technologie na čištění vodíku) se však vodík dováží. Akumulátory a ultrakondenzátory slouží k akumulaci elektrické energie při brzdění, následně ji uvolňují při rozjezdu. O tom, odkud a kam elektřina poteče rozhoduje počítačový systém s cílem dosáhnout maximální efektivity. Dle vyjádření Petra Dlouhého z Ústavu jaderného výzkumu Řež činí spotřeba vodíku přibližně 8 kg na 100 km.



ZÁVĚR

Cílem této práce bylo zjistit, jaké alternativní pohony se nabízejí pro pohon autobusů, které jsou v současnosti v drtivé většině závislé na ropných palivech. Ropa pravděpodobně nikdy zcela nedojde, jen její cena stoupne na tolik, že již bude pro výrobu paliv moc drahá. Současná biopaliva však nejsou řešením. Většina biopaliv používaných v České republice jsou biopaliva první generace, tedy paliva získaná na úkor potravin. Druhá generace biopaliv, jejichž výroba nekonkuruje výrobě potravin, tedy paliva vzniklá zpracováním odpadu či dřeva, také asi nebudou vhodným řešením, protože pravděpodobně nedokážou pokrýt celou spotřebu. Třetí generace biopaliv, která je produktem geneticky upravených řas či bakterií, ač je její vývoj teprve na začátku, již teď vzbuzuje otázku, zda případný únik těchto geneticky modifikovaných řas do volné přírody nemůže napáchat nějaké ekologické škody.

Ze zjištěných informací vyplývá, že pohonem budoucnosti bude pro autobusy určité elektromotor. Záleží však na vývoji akumulátorů a palivových článků, jak je tato budoucnost vzdálená, zda to bude za deset, padesát, sto či více let. Současné elektrobusy jsou použitelné jen na některých kratších linkách, kde vyhovují kapacitou a není překážkou jejich pořizovací cena a omezená využitelnost. Palivové články na vodík jsou zajímavou alternativou k akumulátorům, protože nabízejí velký dojezd a rychlé čerpání energie. Pokud dříve stoupne cena ropy na tolik, že bude nutné využít jiných alternativ, stanou se mezistupněm některá z biopaliv. Pokud by přišla na trh levná biopaliva třetí generace může to nástup elektromotorů zbrzdit, ne však zpomalit. Spalovací motory však budou z autobusů mizet pouze pomalu a po jednotlivých kategoriích, pravděpodobně nejdříve zmizí z městských autobusů. Neexistence použitelné alternativy pro dálkové autobusy v případě růstu cen ropy může této kategorii vozidel výrazně uškodit, protože na většině tras mají konkurenci v podobě elektrických vlaků, které nemusejí čekat na vývoj akumulátorů díky elektrifikovaným tratím. Podobná elektrifikace silnic navíc nepřípadá v úvahu.

Hybridní technologie budou více využívány, a to nejen ve spojení se spalovacím motorem, zejména s cílem nemařit kinetickou energii při brzdění. Tento trend se začíná projevovat například tím, že se objevují první hybridní autobusy na palivové články. Celkově lze očekávat, že nabídka pohonů bude pestřejší a výrobci budou nabízet více technologií než v současnosti, kdy je převládající pohonnou jednotkou vznětový motor. Nejvíce však může alternativními pohony zahýbat tak nevyzpytatelná věc, kterou je politika. Ať už v podobě daňového zvýhodnění alternativních paliv, případně jeho neexistence (což se projevilo na českém provozu Scanie Omnilink na bioethanol), nebo v podobě legislativních předpisů ke schvalování nových typů vozidel do provozu.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] ŠEBOR, Gustav, Milan POSPÍŠIL a Jan ŽÁKOVEC. VŠCHT V PRAZE, Ústav technologie ropy a petrochemie. *Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě: 1. část (revidovaná)* [online]. Praha, 2006, 200 s. [cit. 2011-03-01]. Dostupné z: http://www.mdcr.cz/NR/rdonlyres/F2EF24EF-5E59-42C7-B6C7-A5508CE8F820/0/Technickoeekonomicka_analyza_vhodnych_alternativnich_paliv_v_dopravecast_1.pdf
- [2] NOVOTNÝ, Petr. *Ekonomická analýza alternativních využití bioplynu v České republice a ve Finsku* [online]. Brno, 2009 [cit. 2011-03-04]. Dostupné z: http://is.muni.cz/th/100049/esf_m_b1/Diplomova_prace.doc. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Ekonomicko správní fakulta. Vedoucí práce Ing. Radoslav ŠKAPA, Ph.D.
- [3] Dimethyl Ether Buses in Shanghai. In: *Green Car Congress* [online]. 2004 [cit. 2011-04-11]. Dostupné z: http://www.greencarcongress.com/2004/11/dimethyl_ether_.html
- [4] THAMSIROJ, T., H. SMYTH a J.D. MURPHY. A roadmap for the introduction of gaseous transport fuel: A case study for renewable natural gas in Ireland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2011, roč. 15, č. 9, s. 4642-4651 [cit. 2012-03-15]. ISSN 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.088. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032111003339>
- [5] KUMAR, Satish, Hyouk-Tae KWON, Kwang-Ho CHOI, Wonsub LIM, Jae Hyun CHO, Kyungjae TAK a Il MOON. LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development. *Applied Energy* [online]. 2011, roč. 88, č. 12, s. 4264-4273 [cit. 2012-05-11]. ISSN 03062619. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.06.035. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261911004247>
- [6] ASTBURY, G.R. A review of the properties and hazards of some alternative fuels. *Process Safety and Environmental Protection* [online]. 2008, roč. 86, č. 6, s. 397-414 [cit. 2012-05-11]. ISSN 09575820. DOI: 10.1016/j.psep.2008.05.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095758200800058X>
- [7] Volvo Trucks, [online]. 2011, [cit. 2011-02-10]. Dostupné z: <http://www.volvotrucks.com/trucks/czech-market/cs-cz/Pages/home.aspx>
- [8] Heating values of hydrogen and fuels. *Essom.com* [online]. Dostupné z: http://www.essom.com/backend/data-file/engineer/engin21_1.pdf
- [9] OMAR, Noshin, Mohamed DAOWD, Omar HEGAZY, Grietus MULDER, Jean-Marc TIMMERMANS, Thierry COOSEMANS, Peter VAN DEN BOSSCHE a Joeri VAN MIERLO. Standardization Work for BEV and HEV Applications: Critical Appraisal of Recent Traction Battery Documents. *Energies* [online]. 2012, roč. 5, č. 1, s. 138-156 [cit. 2012-05-12]. ISSN 1996-1073. DOI: 10.3390/en5010138. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/5/1/138/>



- [10] THE ELECTROPAEDIA, [online], Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/specifications/comparisons.pdf>
- [11] DUSTMANN, Cord-H. Advances in ZEBRA batteries. *Journal of Power Sources* [online]. 2004, roč. 127, 1-2, s. 85-92 [cit. 2012-05-12]. ISSN 03787753. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2003.09.039. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775303009418>
- [12] GREIMEL, Hans. Toyota: We'll stick with nickel-metal. *Automotive News* [online]. 2010 [cit. 2012-03-19]. Dostupné z: <http://www.autonews.com/apps/pbcs.dll/article?AID=/20101206/OEM06/312069951>
- [13] KAVÁLEK, O. *Elektrodové materiály na bázi lithium - titan - oxidu pro lithno-iontové akumulátory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Tibor Jiráček.
- [14] BROOKS, Michael. All juiced-up and ready to go. *New Scientist*. 2009, roč. 203, č. 2717, s. 42-45. ISSN 02624079.
- [15] Increasing energy density means increasing range. TESLA MOTORS. *Tesla Roadster Inovations / Battery* [online]. 2011 [cit. 2012-03-10]. Dostupné z: <http://www.teslamotors.com/roadster/technology/battery>
- [16] ČEŘOVSKÝ, Zdeněk a Vladek PAVELKA. Podmínky pro vybíjení superkondenzátorů použitých v hybridních elektrických vozidlech. In: *XXVIII. Celostátní Konference o Elektrických Pohonech: Plzeň, 10. - 12. června 2003*. S.l.: Česká Elektrotechnická Společnost, ÚOS Elektrické Pohony, 2003, s. 71-76. ISBN 80-02-01563-0. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/Supcap2_PPVS.pdf
- [17] KÜHNE, Reinhart. Electric buses ? An energy efficient urban transportation means. *Energy* [online]. 2010, roč. 35, č. 12, s. 4510-4513 [cit. 2012-05-20]. ISSN 03605442. DOI: 10.1016/j.energy.2010.09.055. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544210005566>
- [18] CHIC, *Chic-project.eu* [online]. 2012 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z <http://chic-project.eu/>
- [19] ČESKÁ VODÍKOVÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA. Skladování vodíku I. *Hytep.cz* [online]. 2007 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://hytep.cz/?loc=article&id=8>
- [20] ČESKÁ VODÍKOVÁ TECHNOLOGICKÁ PLATFORMA. Skladování vodíku II. *Hytep.cz* [online]. 2007 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://hytep.cz/?loc=article&id=9>
- [21] Bezpečnostní list AdBlue, výrobek DIN 70 070
- [22] COLLET, C. Hydrogen production by *Clostridium thermolacticum* during continuous fermentation of lactose. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2004, roč. 29, č. 14, s. 1479-1485 [cit. 2012-05-21]. ISSN 03603199. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2004.02.009. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319904000734>



- [23] Interní dokumenty společnosti Iveco Czech Republic
- [24] E-mailová korespondence s Radimem Hulejou z českého zastoupení společnosti Scania [online], 29. 3. 2011, Radim.Huleja@scania.cz



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

E	[MJ]	energie obsažená v palivu
e	[MJ.kg ⁻¹]	měrná energie paliva / akumulátoru
E _A	[MJ]	energie uložená v akumulátoru
E _S	[MJ]	skutečná energie převedená na kola
m	[kg]	hmotnost
V	[m ³]	objem nádrže / objem prostoru pro baterii
η	[-]	účinnost motoru / elektromotoru
ρ _E	[MJ.m ⁻³]	energetická hustota paliva / akumulátoru
AFC		Alkaline Fuel Cell, alkalické palivové články
CBG		Compressed bio gas, stlačený biometan
CNG		Compressed Natural Gas, stlačený zemní plyn
DME		Dimethyl ether
EEV		Enhanced Environmentally friendly Vehicles, emisní norma
FAME		Methylestery mastných kyselin, bionafta
LNG		Liquefied Natural Gas, zkapalněný zemní plyn
LPG		Liquefied Petroleum Gas, zkapalněný ropný plyn
MCFC		Molten Carbonyl Fuel Cell, palivové články s roztaveným karbonátovým elektrolytem
NGV		Natural Gas Vehicle, vozidlo s pohonem na zemní plyn
PAFC		Phosphoric Acid Fuel Cell, palivové články s kyselinou fosforečnou
PEMFC		Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, palivové články s polymerním elektrolytem
SOFC		Solid Oxide Fuel Cell, palivové články s tuhým oxidem



SEZNAM PŘÍLOH

Elektronická verze práce na CD