

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
TECHNICKÁ FAKULTA
KATEDRA VOZIDEL A POZEMNÍ DOPRAVY



AUTOBUSY MHD NA ALTERNATIVNÍ PALIVA

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. František Lachnit, Ph.D.

Autor: Petr Volf

Praha, 2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Petr Volf

Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Autobusy MHD na alternativní paliva

Název anglicky

Alternative Fuel in Public Transport Buses

Cíle práce

Cílem práce je charakterizovat vhodná alternativní paliva pro pohon autobusů MHD, pohonné jednotky těchto autobusů a podrobněji technicky popsat vybrané autobusy předních výrobců. Dále srovnat vliv použití klasických a alternativních paliv na životní prostředí ve městech.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Metodika práce – návrh postupů získávání dat
4. Rešeršní část: alternativní paliva pro autobusy, pohonné jednotky autobusů MHD,
5. Výsledky a diskuse – technická charakteristika vybraných autobusů na alternativní paliva a jejich porovnání
6. Závěr
7. Seznam použitých zdrojů
8. Přílohy

Doporučený rozsah práce

30 stran

Klíčová slova

alternativní paliva, emise, autobusy, městská hromadná doprava

Doporučené zdroje informací

Iqbal Husain.. Electric and hybrid vehicles – Design Fundamentals. CRC Press LLC, 2003, ISBN 0-203-00939-8.

Kameš, J.. Alternativní pohon automobilů. Praha: BEN – technická literatura, 2004 ISBN: 80-7300-127-6.

Ramadhas, Arumugam S.. Alternative fuels for transportation. Boca Raton, CRC Press, 2011, ISBN 978-1-4398-1957-9.

Vlk, F.. Alternativní pohony motorových vozidel. Brno: František Vlk, 2004, ISBN: 80-239-1602-5.

Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. František Lachnit, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2018

doc. Ing. Miroslav Růžička, CSc.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 9. 3. 2018

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 27. 01. 2019

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Autobusy MHD na alternativní paliva vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla

V Praze dne: 24.3.2020

Podpis:

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce, Ing. Františku Lachnitovi, Ph.D. za odborné a důležité rady pro vypracování práce a za jeho čas, který mi věnoval při tvorbě této bakalářské práce.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na současně využívané alternativní pohony využívané v autobusech městské hromadné dopravy. V první části této práce jsou uvedeny celkové charakteristiky jednotlivých alternativních paliv včetně jejich výhod a nevýhod vycházejících z využití právě v autobusech. Druhá část podrobněji informuje o konkrétních pohonných jednotkách, které jsou využívány přímo v autobusech MHD poháněných alternativními palivy. Tato část obsahuje i charakteristiku klasického pohonu na motorovou naftu. Ve třetí části je srovnání nejvyužívanějších modelů autobusů MHD poháněných alternativními palivy a jejich srovnání se stejnými modely, které využívají klasická, fosilní paliva.

KLÍČOVÁ SLOVA

alternativní paliva, emise, autobusy, městská hromadná doprava

Alternative fuels in public transport buses

SUMMARY

This bachelor thesis focuses on alternative propulsion systems presently utilised in public transport buses. In its first section, the author introduces and characterizes individual alternative fuels, also depicting key advantages and disadvantages a usage of such fuels in public transport buses brings about. The second section of this thesis informs about specific propulsion units employed in public transport buses powered by alternative fuels. Additionally, detailed characteristics of the traditional diesel propulsion can be found in this section as well. In the third and final section, the author compares the most widespread models of public transport buses powered by alternative fuels, also evaluating them against similar models that utilise traditional fossil fuels.

KEY WORDS

alternative fuels, emissions, buses, public urban transport

OBSAH

ÚVOD.....	1
CÍL PRÁCE	2
METODIKA	2
LITERÁRNÍ REŠERŠE	3
1. Alternativní paliva pro autobusy	3
1.1 Zkapalněný ropný plyn	3
1.2 Stlačený zemní plyn	4
1.3 Bionafta	6
1.4 Bioetanol.....	7
1.5 Dimethyléter	9
1.6 Syntetická nafta.....	10
1.8 Elektřina z palivových článků.....	13
1.9 Elektřina z akumulátorů	15
2. Pohonné jednotky autobusů MHD	17
2.1 Pohon na motorovou naftu	17
2.2 Pohon na zemní plyn	17
2.3 Pohon na bionaftu	19
2.4 Elektrický pohon.....	20
2.5 Hybridní pohon	21
2.6 Pohon vodíkovými články	22
3. Příklady autobusů na alternativní paliva.....	24
3.1 Autobus Iveco Urbanway na zemní plyn	24
3.2 Elektrobuses Solaris Urbino	25
3.3 Elektrobuses Mercedes-Benz Citaro	26
3.4 Hybridní autobus Iveco Urbanway	28
3.5 Hybridní autobus Solaris Urbino	29
3.6 Solaris Urbino s palivovými články.....	31
DISKUSE.....	33
ZÁVĚR	35
SEZNAM OBRÁZKŮ	36
SEZNAM TABULEK	36
SEZNAM ZDROJŮ	37

ÚVOD

Za klasická motorová paliva lze považovat motorovou naftu a benzín, ostatní paliva jsou považována za alternativní (zemní plyn, bionafta, bioetanol, vodík, elektřina aj.). Jedním z důvodů pro používání alternativních paliv je snaha snížit negativní vliv dopravy na životní prostředí, zejména množství emisí látek znečišťujících ovzduší (oxid uhelnatý, oxidy dusíku, pevné částice aj.) a skleníkových plynů (oxid uhličitý). Dalším důvodem pro používání alternativních paliv je snížení závislosti na ropě, která patří mezi neobnovitelné zdroje energie, jejichž množství je na Zemi omezeno, a hrozí jejich vyčerpání v řádu stovek let.

Klasickým palivem autobusů je motorová nafta, což je směs uhlovodíků získaných z ropy. V současné době se používá směsná motorová nafta s přídavkem biosložky. Vznětový motor (po případných úpravách) může alternativně spalovat zemní plyn, propan-butan, bionaftu, bioplyn (bioetanol, biometanol), vodík apod.

Některá alternativní paliva vyžadují úpravu pohonu vozidla na tzv. alternativní pohon. Mezi autobusy s alternativním pohonem patří elektrické v současné době autobusy poháněné pouze elektromotorem, hybridní autobusy (kombinující spalovací motor s elektromotorem) a autobusy poháněné palivovými články.

CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je charakterizovat jednotlivá vhodná alternativní paliva pro pohon autobusů využívaných v městské hromadné dopravě, podrobněji technicky popsat konkrétní, nejčastěji využívané modely autobusů MHD od předních výrobců a dále porovnat vliv použití klasických, fosilních paliv se stále se rozšiřujícími alternativními palivy na celkové životní prostředí ve městech.

METODIKA

Bakalářská práce vytvořená na téma Autobusy MHD na alternativní paliva bude rozdělena do třech hlavních kapitol. První kapitola, věnována jednotlivým alternativním palivům bude vycházet převážně z knižních zdrojů, jednotlivé vlastnosti paliv budou přehledně uvedeny v tabulkách. Ve druhé části budou uvedeny informace z technických příruček (v elektronické verzi) o jednotlivých pohonech autobusů. Třetí kapitola, která bude pojednávat o konkrétních typech autobusů bude čerpat informace zejména z internetových stránek výrobců daných autobusů, včetně obrázku konkrétního modelu využívajícího pohon na alternativní palivo.

LITERÁRNÍ REŠERŠE

1. Alternativní paliva pro autobusy

V globálním měřítku dochází k vyčerpávání zdrojů fosilních paliv, proto se pozornost zaměřuje na alternativní paliva pro spalovací motory a na využití elektrického pohonu, kde zdrojem energie mohou být palivové nebo solární články.¹

Termín „alternativní paliva“ označuje náhradu za automobilový benzín a motorovou naftu. Mezi alternativní paliva patří především: stlačený zemní plyn (CNG), zkapalněné ropné rafinérské plyny (LPG), bioplyn, bionafta, vodík a elektrický proud.²

Z hlediska koncentrace energie jsou stále nejvýhodnější kapalná paliva, buď uhlovodíková (benzín, nafta aj.) nebo alkoholová (etanol, metanol). Pro spalovací motory jsou vhodná také plynná paliva (propan-butan, zemní plyn, bioplyn, vodík aj.), ale jejich skladování má vyšší nároky na prostor. Je-li objemová koncentrace energie u benzínu 100 %, potom tento údaj činí u nafty 105 %, u etanolu 75 %, u metanolu 55% a u zemního plynu 25 %. Nejhuře je na tom elektrická energie z akumulátoru: 5 %.³

1.1 Zkapalněný ropný plyn

LPG je směsí uhlovodíků, zejména propanu (C_3H_8) a butanu (C_4H_{10}). Složení konkrétního LPG závisí na jeho konečném použití a na geografických podmínkách, jako je sezónní atmosférická teplota a typ surové látky zpracovávané v rafinérii. Státy s chladnějším klimatem používají vyšší podíl propanu (kvůli jeho snadnému odpařování při nízké atmosférické teplotě), zatímco státy s teplejším klimatem používají vyšší podíl butanu.⁴

LPG je vedlejší produkt, který pochází z těžby zemního plynu (55 %) a z ropných rafinérií (45 %). Uhlovodíky vzniklé během rafinérského procesu atmosférické destilace se nazývají „ropný plyn“ (*petroleum gas*). Tento plyn se potom ochladí na teplotu pod 400 K, aby zkonduzoval na kapalinu.⁵

¹ REMEK: *Automobil a spalovací motor*, s. 143

² VLK: *Alternativní pohony motorových vozidel*, s. 1

³ REMEK: *Automobil a spalovací motor*, s. 143

⁴ BABU a SUBRAMANIAN. *Alternative Transportation Fuels: Utilisation in Combustion Engines*, s. 58

⁵ BABU a SUBRAMANIAN. *Alternative Transportation Fuels: Utilisation in Combustion Engines*, s. 60

LPG je vhodné palivo pro zážehové i vznětové motory. Jeho vyšší oktanové číslo oproti benzínu (viz tabulka 1) umožňuje vyšší kompresi, a tím i vyšší účinnost. Další výhodou tohoto paliva je jeho nízká cena.⁶ Nevýhodou je stále relativně nedostatečná síť čerpacích stanic na LPG, zvětšení celkové hmotnosti vozidla a zmenšení jeho užitkového prostoru.⁷

Tabulka 1: Porovnání parametrů propanu a butanu s benzínem⁸

parametr	propan	butan	benzín
měrná hmotnost při 15 °C [g.cm ⁻³]	0,508	0,584	0,73 až 0,78
výhřevnost hmotnostní [MJ.kg ⁻¹]	46,37	45,78	44,03
výhřevnost objemová [MJ.l ⁻¹]	23,28	26,51	32,3
tlak par při 37 °C [MPa]	1,21	0,26	0,05 až 0,09
teplota varu [°C]	-42,6	-0,6	30 až 225
oktanové číslo	97	89	85 až 87

Za normálních podmínek lze LPG přepravovat a skladovat ve středotlakých zásobnících (zkušební tlak 2,5 MPa). Výhodou je, že zkapalněný plyn zaujímá zlomek svého původního objemu, což usnadňuje jeho uskladnění ve vozidle.⁹

Pokud není LPG znečištěn, obsahuje daleko menší podíl síry než benzín, což se projevuje nižší produkcí oxidu siřičitého. Navíc nedochází k poškozování katalyzátorů sloučeninami síry, čímž se prodlužuje jejich životnost. Další vlastností LPG je, že obsahuje pouze malé množství vyšších uhlovodíků, takže je jejich podíl ve výfukových plynech nižší.¹⁰

1.2 Stlačený zemní plyn

Dalším alternativním palivem pro pohon spalovacích motorů je stlačený zemní plyn (CNG). Dosud je však využíván poměrně málo; brání tomu jeho fyzikální vlastnosti (problém se skladováním). Výhledově je však CNG perspektivním palivem, protože zásoby zemního plynu jsou větší než zásoby ropy a nejsou omezeny na jedinou oblast světa.¹¹

⁶ VLK: *Alternativní pohony motorových vozidel*, s. 28

⁷ VLK: *Alternativní pohony motorových vozidel*, s. 30

⁸ HROMÁDKO: *Spalovací motory*, s. 32

⁹ ŠTĚRBA a KRYŽICKÝ: *Jak na LPG: Přestavba, provoz a údržba automobilů na plyn*, s. 3

¹⁰ ŠTĚRBA a KRYŽICKÝ: *Jak na LPG: Přestavba, provoz a údržba automobilů na plyn*, s. 7

¹¹ ŠTĚRBA a KRYŽICKÝ: *Jak na LPG: Přestavba, provoz a údržba automobilů na plyn*, s. 9

Zemní plyn je primárně složen z metanu. Jako motorové palivo může být využíván buď ve formě stlačeného plynu (CNG) nebo ve formě zkapalněného plynu (LNG). V současnosti je preferována varianta stlačeného plynu.¹²

Složení CNG pro účely pohonu vozidel je normováno, protože na něm závisejí výkonové a ekonomické parametry motoru. V tabulce 2 jsou uvedena dvě mezní chemická složení CNG podle mezinárodního předpisu EHK 83.05; složení tankovaného plynu by se mělo nacházet mezi těmito dvěma extrémy.¹³

Tabulka 2: Povolené složení stlačeného zemního plynu¹⁴

druh paliva CNG	G20	G25
obsah metanu CH ₄ [%]	min. 99	84 – 88
obsah dusíku N ₂ [%]	0	12 – 16
zbytek	max. 1	max. 1
obsah síry [ppm]	max. 50	max. 50

Nevýhodou využití zemního plynu (v porovnání s propan-butanem) je velký zástavbový objem a velká hmotnost palivových zásobníků. Zemní plyn se používá nejčastěji stlačený v tlakových láhvích s plnicím tlakem 20 MPa, při kterém se objem plynu zmenší v poměru 200:1. Množství energie v jednotkovém objemu je 4 až 5krát menší než u kapalných uhlovodíkových paliv.¹⁵

Zemní plyn je palivo vhodné pro zážehové motory, ale může být použit i pro vznětové motory, kdy se pod vysokým tlakem vstříkuje přímo do válců motoru a zapaluje se vstříkem malé dávky nafty. Tento typ oběhu se označuje HPDI (*High Pressure Direct Injection*).¹⁶

Hlavními přednostmi použití CNG jako automobilového paliva (v porovnání s benzinem a naftou) jsou úspory ropy, méně škodlivých výfukových emisí, nižší produkce oxidu uhličitého a nižší cena zemního plynu. Jako nevýhody lze uvést zejména vyšší ceny vozidel s těžšími

¹² VLK: *Alternativní pohony motorových vozidel*, s. 8

¹³ ŠTĚRBA a KRYŽICKÝ: *Jak na LPG: Přestavba, provoz a údržba automobilů na plyn*, s. 9-10

¹⁴ ŠTĚRBA a KRYŽICKÝ: *Jak na LPG: Přestavba, provoz a údržba automobilů na plyn*, s. 10

¹⁵ VLK: *Automobilová příručka*, s. 174

¹⁶ LAURIN, Josef: *Plynná motorová paliva pro silniční vozidla v ČR, Paliva*, č.3/2014, s. 73-74

palivovými nádržemi, kratší dojezd, řídkou sít' plnicích stanic, zákaz parkování vozidel v podzemních hromadných garážích a vyšší nároky na servis vozidel.¹⁷

1.3 Bionafta

Bionafta se svými vlastnostmi podobá naftě běžně používané pro vznětové spalovací motory. Surovinou pro výrobu bionafty jsou rostlinné oleje nebo živočišné tuky. Z chemického hlediska tvoří bionaftu metylester mastné kyseliny (FAME).¹⁸ Bionafta je určena pro použití ve standardních vznětových motorech, na rozdíl od rostlinných a odpadních olejů určených k pohonu přestavěných vznětových motorů.¹⁹

Ve střední Evropě se k výrobě bionafty využívá řepka. Z řepkového oleje se v esterifikačních zařízeních vyrábí surovina – metylester řepkového oleje (MEŘO). Do procesu jeho výroby vstupuje řepkový olej a metanol společně s katalyzátorem (jako je hydroxid sodný), a při teplotě asi 50 až 60 °C vzniká v chemickém reaktoru požadovaný metylester a vedlejší produkt glycerin.²⁰

Vlastnosti metylesteru jsou podobné motorové naftě (viz tabulka 3), přičemž viskozita je jen o málo vyšší a také bod vzplanutí je vyšší. Metylester se dá používat přímo bez dalších úprav motoru, ale za provozu má některé nepříjemné vlastnosti (nižší výkon kvůli nižší výhřevnosti, větší viskozita a tudíž horší filtrovatelnost, horší rozprášení při vstřikování, riziko poškození pryžových součástí).²¹

Proto se metylester používá ve směsi s uhlovodíky (tj. s běžnou naftou). Obvykle se používá směs 30 % metylesteru řepkového oleje a 70 % motorové nafty. Tato směsná motorová nafta, označovaná SMN 30, patří mezi bionafty druhé generace. Od běžné motorové nafty se liší tím, že má trochu menší výhřevnost a nižší hodnoty emisí (obojí souvisí s obsahem kyslíku v molekule metylesteru).²²

¹⁷ LAURIN, Josef: Plynná motorová paliva pro silniční vozidla v ČR, *Paliva*, č.3/2014, s. 73

¹⁸ QUASCHNING: *Obnovitelné zdroje energií*, s. 243

¹⁹ BABU a SUBRAMANIAN. *Alternative Transportation Fuels: Utilisation in Combustion Engines*, s. 123

²⁰ QUASCHNING: *Obnovitelné zdroje energií*, s. 244

²¹ MURTINGER a BERANOVSKÝ: *Energie z biomasy*, s. 52-53

²² MURTINGER a BERANOVSKÝ: *Energie z biomasy*, s. 53

Tabulka 3: Porovnání parametrů paliv na bázi řepky s naftou²³

parametr	motorová nafta	metylester (MEŘO)	čistý řepkový olej
měrná hmotnost [g.cm ⁻³]	0,8 až 0,86	0,87 až 0,88	0,91 až 0,94
výhřevnost hmotnostní [MJ.kg ⁻¹]	42,5	37,1 až 40,7	37,4
výhřevnost objemová [MJ.l ⁻¹]	35,2	32,7	34,4
bod vzplanutí [°C]	min. 55	130	300 až 330
bod tuhnutí [°C]	-12 až 0	-7	-18 až 0
molekulová hmotnost	200	850 až 900	300
cetanové číslo	45	54 až 55	35 až 50

Výhody směsné bionafty oproti běžné naftě jsou následující:

- lepší spalování v motoru; motor má tišší chod a menší celkové emise;
- nižší kouřivost, a tudíž menší opotřebení motoru;
- vysoká mazací schopnost, což prodlužuje životnost vstřikovacích jednotek;
- nižší teplota výfukových plynů, a tudíž nižší tepelné zatížení motoru;
- schopnost čistit motor a celý palivový systém.²⁴

Bionafta se používá jako náhradní či doplňkový zdroj paliva pro vznětové motory. Je také možné přimíchávat menší množství bionafty do běžné nafty. Pro tankování čisté bionafty na čerpacích stanicích musí mít motor od výrobce povolení pro bionaftu. Pokud nejsou motory pro bionaftu uzpůsobené, existuje nebezpečí, že bionafta poškodí hadice nebo těsnění.²⁵

1.4 Bioetanol

Výroba etanolu ze zemědělských produktů a jeho využívání jako automobilového paliva má dlouhou tradici – energetický zájem se objevil již v osmdesátých letech v souvislosti se zvýšením cen ropy. V současnosti lze bioetanol využívat (po jeho denaturaci) jako příměs do automobilového benzínu, a to ve více možných koncentracích. Jednak je možné přidávat etanol do benzínu až do 10 objemových procent, a tuto směs spalovat v běžných zážehových motorech. Dále je možné míchat benzín s biopalivem na vysokoprocentní směsi pro vozidla

²³ HROMÁDKO: *Spalovací motory*, s. 36

²⁴ MURTINGER a BERANOVSKÝ: *Energie z biomasy*, s. 53

²⁵ QUASCHNING: *Obnovitelné zdroje energií*, s. 244

FFV (*flexi-fuel vehicles*). Další možností je využívat bioetanol ve směsi E95 (95 % bioetanolu a 5 % aditiv), určené pro pohon vznětových motorů.²⁶

Výroba lihu pomocí alkoholového kvašení cukrů je běžnou potravinářskou technologií, a je možné pro ni využít celou řadu surovin (obilí, brambory, cukrová řepa apod.). Surovinu obsahující jednoduché cukry lze použít přímo, surovinu obsahující škrob je nutné nejprve hydrolyzovat (nejčastěji enzymatickou hydrolýzou). Nevýhodou je, že výchozí zemědělské produkty se využívají také jako potraviny. Proto se v poslední době zkoumá možnost hydrolýzy celulózy pro výrobu etanolu; tento postup je však relativně obtížný.²⁷

Využití alkoholů v zážehových motorech nevyžaduje výraznější úpravy. Vzhledem k menší výhřevnosti alkoholu je nutné zvětšit dodávku paliva do motoru, aby vyhověla směšovacímu poměru. Dále je nutné provést úpravy pro omezení korozních vlivů paliva na součásti motoru a palivového systému.²⁸

Při používání bioetanolu ve vznětových motorech je hlavním problémem nízká vznětlivost bioetanolu (nízké cetanové číslo – viz tabulka 4), která musí být zvýšena speciálními aditivami. Dále je nutné provést úpravu vznětového motoru, spočívající ve zvýšení kompresního poměru a ve změně dimenzování vstřikovacího systému. Upravené motory využívají palivo E95.²⁹

Tabulka 4: Porovnání parametrů etanolu s motorovou naftou³⁰

parametr	motorová nafta	etanol
měrná hmotnost [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	0,84	0,79
výhřevnost hmotnostní [$\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$]	42,50	26,80
výhřevnost objemová [$\text{MJ}\cdot\text{dm}^{-3}$]	35,70	21,17
teoretická spotřeba vzduchu [kg/kg paliva]	14,90	9,00
relativní časová spotřeba [$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$]	1,00	1,58
cetanové číslo	45 až 55	8

²⁶ HROMÁDKO: *Spalovací motory*, s. 34-35

²⁷ MURTINGER a BERANOVSKÝ: *Energie z biomasy*, s. 50

²⁸ VLK: *Alternativní pohony motorových vozidel*, s. 109

²⁹ HROMÁDKO: Využití etanolu ve vznětových motorech. *Listy cukrovarnické a řepářské*, č. 1/2009, s. 24

³⁰ HROMÁDKO: Využití etanolu ve vznětových motorech. *Listy cukrovarnické a řepářské*, č. 1/2009, s. 24

1.5 Dimethyléter

Mezi automobilová paliva, která lze vyrobit z biomasy patří také étery. Konkrétně dimethyléter (DME) je palivo využitelné pro vznětové motory jako náhrada nafty, ale vyžaduje rozsáhlé změny palivového příslušenství motoru. Vlastnosti důležité pro využití DME jako paliva spalovacích motorů (v porovnání s propanem a motorovou naftou) uvádí tabulka 5.³¹

Tabulka 5: Porovnání parametrů DME s propanem a naftou³²

parametr	DME	propan	nafta
chemický vzorec	C ₂ H ₆ O	C ₃ H ₈	C ₁₅ H ₂₈
měrná hmotnost při 20 °C [kg.m ⁻³]	665	501	835
výhřevnost [kWh.kg ⁻¹]	7,8	12,9	11,9
obsah kyslíku [% hmot.]	34,8	–	0,004
bod varu [°C]	-24,8	-42,6	180 až 360
zápalná teplota [°C]	240	540	270
cetanové číslo	57	–	52

Dimethyléter je plyn, který kondenzuje při nízkém tlaku pouhých 0,5MPa, proto se s ním dobře manipuluje. Je možné ho vyrábět ze zemního plynu, ale také z různých druhů biomasy; potom se nazývá Bio-DME. Jedná se o biopalivo druhé generace, kdy zpracovávanou biomasou může být dřevo nebo vedlejší produkty a odpady ze zemědělské výroby.³³

Používá-li se DME jako palivo pro vznětové motory, dosahuje ve srovnání s konvenčním motorem stejné účinnosti a generuje nižší hladinu hluku. Ve srovnání s motorovou naftou vytváří Bio-DME o 95 % nižší emise oxidu uhličitého a také velmi nízké emise pevných částic a oxidů dusíku.³⁴

Provoz motoru na DME vyžaduje inovovaný systém pro skladování paliva a inovovaný systém pro dodávku paliva. Palivová nádrž pro DME musí mít dvojnásobnou velikost oproti nádrži na klasickou motorovou naftu, vzhledem k nižší energetické hustotě DME ve srovnání s motorovou naftou.³⁵

³¹ LAURIN: Étery získávané z biomasy jako alternativní automobilová paliva. *Biom.cz* [online]

³² LAURIN: Étery získávané z biomasy jako alternativní automobilová paliva. *Biom.cz* [online]

³³ PAVLŮSEK, Ondřej. Volvo Trucks rozšiřuje nabídku alternativních paliv. *Auto.cz* [online]

³⁴ PAVLŮSEK, Ondřej. Volvo Trucks rozšiřuje nabídku alternativních paliv. *Auto.cz* [online]

³⁵ BABU a SUBRAMANIAN: *Alternative Transportation Fuels: Utilisation in Combustion Engines*, s. 266

1.6 Syntetická nafta

Syntetická nafta se vyrábí Fischer-Tropschovou syntézou. Jako výchozí surovina se používá biomasa na bázi celulózy nebo lignocelulózy (sláma, melasa, tráva, dřevní hmota). Zplynění biomasy nastává po přidání kyslíku; tato exotermní reakce probíhá při vysokých teplotách okolo 900 °C. Výsledkem je syntézní plyn, jehož složení závisí na vstupních surovinách a na reakčních podmínkách. Nejvíce zastoupenými složkami jsou CO a H₂; dále směs obsahuje CO₂, CH₄, H₂O, N₂, dehtovité látky aj. Má-li být vyčištěný syntézní plyn využit jako surovina pro výrobu motorového paliva, je nutné upravit jeho složení (tj. poměr CO a H₂).³⁶

V porovnání s klasickou motorovou naftou má syntetická nafta srovnatelný energetický obsah a podobnou hustotu, viskozitu a bod vzplanutí. Některé její vlastnosti jsou pak výrazně lepší: má vyšší cetanové číslo (což indikuje snadné vzněcování) a neobsahuje síru a aromáty (což indikuje čistší spalování). Výhodou je i skutečnost, že složení a vlastnosti syntetické nafty lze měnit podle potřeby volbou reakčních podmínek syntézy. Pro zajištění dobré mazací schopnosti a nízkoteplotních vlastností je nutná aditivace, podobně jako u klasické nafty.³⁷

Tabulka 6: Porovnání parametrů syntetické a klasické nafty³⁸

parametr	syntetická nafta z FT syntézy	klasická motorová nafta
měrná hmotnost při 15°C [g.cm ⁻³]	0,78	0,84
výhřevnost hmotnostní [MJ.kg ⁻¹]	44,0	42,7
výhřevnost objemová [MJ.dm ⁻³]	34,3	35,7
teplota samovznícení [°C]	250	250
teplota vzplanutí [°C]	72	77
cetanové číslo	74	50

U motorové nafty vyrobené FT syntézou bylo zjištěno snížení emisí oxidů dusíku o 9 %. Podíl pevných částic se snížil o 28 %, což může být připisováno zanedbatelnému obsahu aromátů a síry v tomto syntetickém palivu.³⁹

³⁶ POSPÍŠIL, Milan a kolektiv: Nové trendy výroby biopaliv a jejich využití v dopravě, *Chemické listy*, č. 10/2012, s. 958

³⁷ POSPÍŠIL, Milan a kolektiv: Nové trendy výroby biopaliv a jejich využití v dopravě, *Chemické listy*, č. 10/2012, s. 959

³⁸ POSPÍŠIL, Milan a kolektiv: Nové trendy výroby biopaliv a jejich využití v dopravě, *Chemické listy*, č. 10/2012, s. 959

1.7 Vodíkové palivo

Vodík je nejčastěji se vyskytující prvek na Zemi, ale pouze 1 % jeho výskytu představuje plynný vodík. Prakticky nevyčerpatelné jsou zásoby vodíku ve vodě, významně je zastoupen i ve fosilních palivech. Průmyslově se vodík nejčastěji vyrábí buď petrochemickými postupy a zplyňováním (kdy je výchozí surovinou ropa, zemní plyn, uhlí či biomasa) nebo elektrolýzou vody.⁴⁰

Vodík se jeví jako perspektivní náhrada uhlovodíkových paliv pro spalovací motory, ale problémem jsou náklady na jeho výrobu. Nejlevnější je získávání vodíku štěpením uhlovodíků (zemní plyn, ropa) v otevřeném termochemickém cyklu. Dražší je získávání vodíku rozkladem vody nebo vodní páry elektrolýzou, eventuálně přímým tepelným rozkladem.⁴¹

Nízkoteplotní elektrolýzou vody se v současnosti vyrábí jen asi 4 % světové produkce vodíku. Spotřeba energie na elektrolýzu 1 kg vodíku bývá zhruba 50 kWh. Při vysokoteplotní elektrolýze, tj. technologii vhodné pro pokročilé jaderné reaktory, lze dosáhnout celkové účinnosti až 45 %.⁴²

Pohon vozidla může být uskutečněn vodíkovým spalovacím motorem, elektromotory napájenými elektrinou z vodíkových palivových článků nebo kombinací obou způsobů. V porovnání s klasickými automobilovými palivy má vodík široké rozmezí zápalnosti palivové směsi vodíku se vzduchem a vysokou rychlost hoření směsi. Palivová směs vodíku se vzduchem neobsahuje uhlík, takže se ve výfukových plynech nevyskytuje oxid uhličitý, oxid uhelnatý ani uhlovodíky. Ze sledovaných škodlivin jsou ve výfukových plynech vodíkového spalovacího motoru pouze oxidy dusíku.⁴³

Vodík je znám jako tzv. čisté palivo, což v praxi znamená, že se při jeho spalování neuvolňují žádné škodliviny. Vzhledem k fyzikálním vlastnostem vodíku je však problematické jeho vhodné uložení ve vozidle a jeho distribuce.⁴⁴

³⁹ BABU a SUBRAMANIAN: *Alternative Transportation Fuels: Utilisation in Combustion Engines*, s. 266

⁴⁰ LAURIN: Plynná motorová paliva pro silniční vozidla v ČR: *Paliva*, č.3/2014, s. 75

⁴¹ VLK: *Automobilová příručka*, s. 276

⁴² LAURIN: Plynná motorová paliva pro silniční vozidla v ČR: *Paliva*, č.3/2014, s. 75

⁴³ LAURIN: Plynná motorová paliva pro silniční vozidla v ČR: *Paliva*, č.3/2014, s. 75

⁴⁴ ŠTĚRBA a KRYŽICKÝ: *Jak na LPG: Přestavba, provoz a údržba automobilů na plyn*, s. 44

Vzhledem k nízké měrné hmotnosti vodíku (viz tabulka 7) je jeho uložení na vozidlech obtížnější než v případě zemního plynu. Použít lze některý z následujících způsobů:

- stlačený plyný vodík v tlakových nádržích ocelových či kompozitových, při tlacích až do 75 MPa;
- zkapalněný vodík v kryogenních nádržích při teplotách přibližně -250 °C a při nízkém provozním tlaku, např. do 0,6 MPa;
- vodík v nádržích vázaný v hydridech slitin kovů (např. FeTiH_2 nebo Mg_2NiH_4);
- vodík adsorbovaný na povrchu grafitových nanotělísek v nádrži při relativně nízkém tlaku.⁴⁵

Když se vyrobí čistý vodík, musí se skladovat a přepravovat ke spotřebiteli. Vodík je extrémně lehký plyn s velmi malou měrnou hmotností, ale s vysokou výhřevností. Ve srovnání se zemním plynem je pro skladování vodíku zapotřebí mnohem větší objem skladovacích zásobníků. Aby se tento objem zmenšil, musí se vodík buď stlačit nebo zkapalnit. Při normálním tlaku vodík kondenzuje při teplotě -253 °C ; zkapalněný vodík se označuje zkratkou LH (*liquid hydrogen*). Přeprava se realizuje buď dálkovým plynovodem (v plyném stavu) nebo nákladními cisternami a lodními tankery (v kapalném stavu).⁴⁶

Tabulka 7: Porovnání vlastností vodíku s benzínem⁴⁷

druh paliva [20 °C]	měrná hmotnost [kg/m ³]	měrný objem [l/kg]	výhřevnost [MJ/kg]	hustota energie [MJ/l]
stlačený vodík [25 MPa]	17	58,8	119	2,024
stlačený vodík [35 MPa]	22,2	45,2	119	2,64
stlačený vodík [70 MPa]	39	25,9	119	4,6
kapalný vodík [-253 °C]	71,08	14,1	119	8,46
kapalný benzín	700	1,43	44,5	31,15

⁴⁵ LAURIN: Plyná motorová paliva pro silniční vozidla v ČR, *Paliva*, č.3/2014, s. 75-76

⁴⁶ QUASCHNING: *Obnovitelné zdroje energií*, s. 244

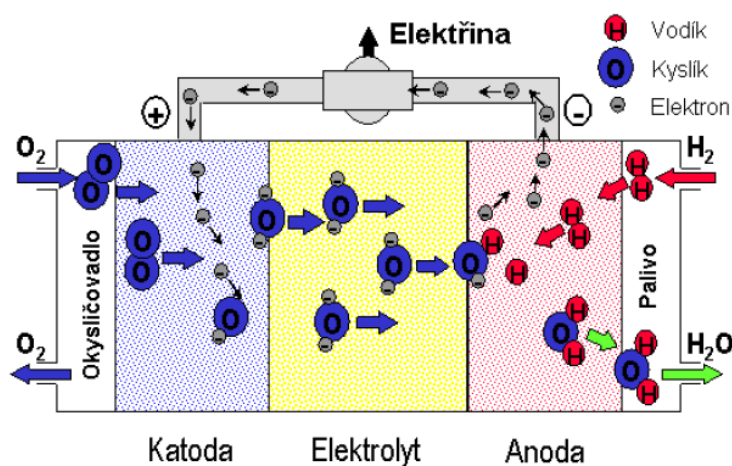
⁴⁷ DLOUHÝ a JANÍK: Vodíkové hospodářství, *Hytep.cz* [online]

1.8 Elektřina z palivových článků

Současné palivové články jsou technologicky velmi vyspělé a bezpečné. Jejich komerčnímu rozšíření brání prozatím jejich velmi vysoká cena, daná převážně kusovou výrobou a také cenou použitých materiálů. U nízkoteplotních palivových článků je to především cena fluorovaných membrán a platiny, u vysokoteplotních potom cena materiálů schopných odolat vysokým teplotám a korozivnímu prostředí.⁴⁸

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které přeměňuje chemickou energii v palivu během oxidačně-redukční reakce přímo na elektrickou energii. Skládá se z porézních elektrod oddělených elektrolytem.⁴⁹ Na anodu se podle typu palivového článku přivádí vodík nebo hořlavý plyn obsahující vodík. Na katodu se přivádí kyslík nebo vzduch jako oxidační prostředek.⁵⁰

Princip činnosti palivového článku – děj v podstatě inverzní k elektrolýze – uvádí obrázek 1 pro vysokoteplotní palivový článek s pevným oxidickým elektrolytem; palivem je čistý vodík, oksyličovadlem je čistý kyslík.⁵¹



Obrázek 1: Princip činnosti palivového článku⁵²

V současné době existuje pět typů palivových článků lišících se především chemickým složením elektrolytu, provozními teplotami a možným palivem. U většiny palivových článků

⁴⁸ DOUCEK a JANÍK: Úvod do vodíkového hospodářství, *PRO-ENERGY magazín*, č.3/2009, s. 72-73

⁴⁹ PORŠ: *Palivové články*, Ústav jaderného výzkumu Řež, 2002, s. 5

⁵⁰ QUASCHNING: *Obnovitelné zdroje energií*, s. 261

⁵¹ PORŠ: *Palivové články*, Ústav jaderného výzkumu Řež, 2002, s. 5

⁵² PORŠ: *Palivové články*, Ústav jaderného výzkumu Řež, 2002, s. 5

je oxidačním činidlem vzdušný kyslík. Jako palivo využívají nízkoteplotní články vodík nebo metanol, vysokoteplotní články mohou zužitkovat například i zemní plyn.⁵³

TYPY PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

Palivový článek s polymerní membránou (PEFMC)

Elektrolytem je iontoměničová polymerní membrána (většinou na bázi kyselých fluorovaných polymerů), která je výborným protonovým vodičem. Vzhledem k tomu, že jedinou kapalinou v tomto typu článku je voda, jsou minimalizovány problémy s korozí. Provozní teplota je dána polymerem, většinou je nižší než 120 °C. Palivem v tomto typu článku je čistý vodík nebo metanol. Jako katalyzátor se využívá především Pt, případně Pt/Rh a jiné. Pro tento typ katalyzátorů je významným jedem CO; jeho koncentrace v palivu nesmí přesáhnout 5 ppm.⁵⁴

Alkalický palivový článek (AFC)

Elektrolytem je 85 % hmotnostních KOH (hydroxid draselný) pro články pracující při vyšších teplotách (~250°C); pro nižší teploty (pod 120°C) se používá 35 až 50 % hmotnostních. Elektrolyt je udržován v porézním materiálu, kterým je ve většině případů azbest. Výhodou tohoto typu článku je možnost využít široké spektrum katalyzátorů: Ni, Ag, MeO, korund a vzácné kovy. Problémem je čistota paliva a oxidačního činidla, kdy i malé množství CO₂ způsobuje znehodnocování elektrolytu; CO je pro tento typ článku katalytickým jedem.⁵⁵

Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)

Tento typ článku pracuje při teplotě 150 až 220 °C, přičemž jako elektrolyt používá 100 % kyselinu fosforečnou (H₃PO₄). Při nižších teplotách má tato kyselina horší protonovou vodivost a vzniká tak problém CO jako katalytického jedu pro Pt. Kyselina fosforečná je stabilnější než jiné běžné kyseliny, proto může reagovat v širokém rozsahu teplot.⁵⁶

Palivový článek s taveným uhličitánem (MCFC)

Elektrolytem je většinou směs alkalických uhličitánů, které jsou fixovány v matici LiAlO₂. Provozní teplota je od 500 °C do 700 °C; v tomto rozmezí tvoří směs uhličitánů vysoce

⁵³ DOUCEK a JANÍK: Úvod do vodíkového hospodářství, *PRO-ENERGY magazín*, č.3/2009, s. 73

⁵⁴ DOUCEK a JANÍK: Úvod do vodíkového hospodářství, *PRO-ENERGY magazín*, č.3/2009, s. 73

⁵⁵ DOUCEK a JANÍK: Úvod do vodíkového hospodářství, *PRO-ENERGY magazín*, č.3/2009, s. 73

⁵⁶ DOUCEK a JANÍK: Úvod do vodíkového hospodářství, *PRO-ENERGY magazín*, č.3/2009, s. 73

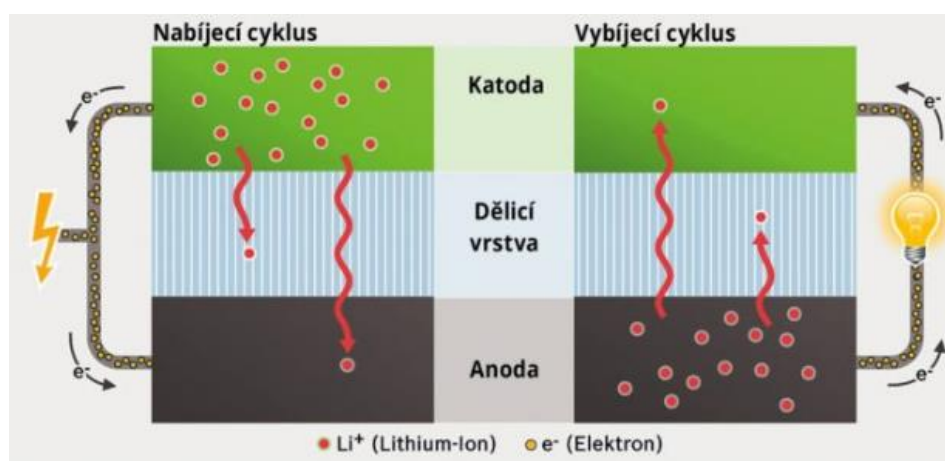
vodivou roztavenou sůl, ve které zprostředkovávají vodivost uhličitanové ionty. Díky vysokým teplotám není nutné používat vzácné kovy pro katalyzátory, využívá se Ni pro anodu a NiO pro katodu.⁵⁷

Palivový článek s pevným oxidem (SOFC)

Tento typ článku je výjimečný tím, že jeho elektrolytem je pevný, neporézní kovový oxid; používá se Y_2O_3 stabilizovaný ZrO_2 . Provozní teplota je 600 až 1000 °C, přičemž vodivost zprostředkovávají kyslíkové anionty. Materiálem pro anodu je Co-ZrO₂ nebo Ni-ZrO₂, pro katodu se používá LaMnO₃ dopovaný stronciem. Skutečnost, že elektrolyt je pevný, zjednodušuje celý systém, v němž se tak vyskytují pouze dvě fáze: pevná a plynná.⁵⁸

1.9 Elektrina z akumulátorů

Hlavními funkčními celky akumulátoru jsou dvě elektrody a elektrolyt mezi nimi. Tím je ve většině případů tekuté médium, které umožňuje pohyb iontů mezi oběma elektrodami. Dále je zde separátor, který zamezuje zkratu mezi oběma elektrodami. Samotným úložištěm energie jsou takzvané aktivní vrstvy uložené v elektrolytu. Jejich chemickou reakcí na elektrodách je elektrická energie při nabíjení ukládána a při vybíjení uvolňována.⁵⁹



Obrázek 2: Princip činnosti akumulátoru⁶⁰

⁵⁷ DOUCEK a JANÍK: Úvod do vodíkového hospodářství, *PRO-ENERGY magazín*, č.3/2009, s. 73

⁵⁸ DOUCEK a JANÍK: Úvod do vodíkového hospodářství, *PRO-ENERGY magazín*, č.3/2009, s. 73

⁵⁹ STEHLÍK: Baterie zůstávají limitujícím faktorem elektromobilů: Průlom se očekává za sedm let, *autobible.cz* [online]

⁶⁰ STEHLÍK: Baterie zůstávají limitujícím faktorem elektromobilů: Průlom se očekává za sedm let, *autobible.cz* [online]

V případě článku Li-Ion – viz obrázek 2 – se při nabíjení uvolňují kladné ionty lithia z kladné elektrody (katody) a jsou přitahovány k záporné elektrodě (anodě), do jejíž struktury jsou včleňovány. Průběh vybíjení článku je přesně opačný: ionty lithia putují od záporné elektrody ke kladné, a mohou napájet externí spotřebič.⁶¹

Pro elektrické autobusy jsou nejčastěji používány různé typy lithium-iontových akumulátorů. Jednotlivé typy jsou si dosti podobné, ale používají odlišné anody a katody. Pro komerční autobusy existuje pět klíčových skupin vhodných akumulátorů: LCO, LMO, LFP, NMC (s lithium-iontovou katodou) a LTO (s lithium-iontovou anodou). Další relevantní technologie akumulátorů jsou NiMH (nikl-metal hydrid) a NiZn (nikl-zinkové) akumulátory.⁶²

TYPY AKUMULÁTORŮ

Lithium-železo-fosfátový (LFP) akumulátor

Patří k nejpoužívanějším typům akumulátorů pro elektrická vozidla, protože je považován za bezpečný (vysoká chemická stabilita i při vysokých teplotách) a za šetrnější k životnímu prostředí než ostatní typy. Také očekávaná životnost je považována za vysokou.⁶³

Lithium-titanátový (LTO) akumulátor

Výhodou tohoto typu je rychlejší nabíjení než u jiných lithium-iontových akumulátorů. Akumulátory LTO jsou vhodné pro příležitostné nabíjení; poskytují více nabíjecích cyklů nežli akumulátory s lithium-iontovou katodou, mají však oproti nim nižší energetickou hustotu.⁶⁴

⁶¹ STEHLÍK: Baterie zůstávají limitujícím faktorem elektromobilů: Průlom se očekává za sedm let, *autobible.cz* [online].

⁶² RUTER: *Renewable energy powertrain options for Ruter*, [ebook], 2015, s. 28

⁶³ RUTER: *Renewable energy powertrain options for Ruter*, [ebook], 2015, s. 28

⁶⁴ RUTER: *Renewable energy powertrain options for Ruter*, [ebook], 2015, s. 28

2. Pohonné jednotky autobusů MHD

Existují různé koncepce autobusů na alternativní paliva. Pro autobusy jsou dostupné čtyři hlavní nosiče energie: fosilní paliva, biopaliva, elektřina a vodík. Pro tyto koncepce existují různé autobusové technologie, které využívají jeden energetický nosič nebo jejich kombinaci. Z technologického i ekologického hlediska jsou za nejslibnější považovány autobusy na elektřinu, autobusy na stlačený zemní plyn, autobusy na biopaliva druhé generace a elektrické či hybridní autobusy (kombinující elektřinu s vodíkem nebo motorovou naftou).⁶⁵

2.1 Pohon na motorovou naftu

Autobusy s klasickým naftovým spalovacím motorem, který běží na běžnou motorovou naftu, musejí od roku 2014 splňovat emisní normy Euro VI. Samotný naftový motor má dosti vysoké emise oxidů dusíku (NO_x) a tuhých částic (PM), ale podle normy Euro VI musejí motory splňovat přísné požadavky na emise znečišťujících látek. Proto jsou tyto naftové motory vybavovány částicovým filtrem a systémem pro redukci oxidů dusíku. Snížení emisí CO₂ lze dosáhnout zlepšením účinnosti pohonu, pneumatik a příslušenství nebo změnou chování při jízdě. Emise skleníkových plynů lze snížit používáním bionafty.⁶⁶

Díky dlouhé tradici naftových motorů mají naftové autobusy předvídatelnou účinnost, údržbu a náklady na provoz. Je také zavedena tankovací infrastruktura, proto lze tyto autobusy poměrně snadno adaptovat na využívání biopaliv.⁶⁷

Hlavní nevýhodou je, že fosilní nafta je neobnovitelný zdroj energie. Autobusy s naftovým pohonem také emitují značné množství hluku, ale u moderních motorů se hluk poněkud snížil použitím pokročilých systémů vstřikování paliva a metod hlukové izolace.⁶⁸

2.2 Pohon na zemní plyn

Pohon na CNG je pokročilá autobusová technologie s klasickým zážehovým spalovacím motorem, který nyní splňuje emisní normy Euro VI. Motor může běžet na stlačený zemní plyn nebo bioplyn, přičemž jeho účinnost je o něco nižší než u naftového motoru. Motory na

⁶⁵ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020 [ebook], s. 17

⁶⁶ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 20-21

⁶⁷ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 21

⁶⁸ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 21

zemní plyn jsou dostatečně propracované a také jejich trh se v posledních dekadách dostatečně rozvinul, obzvláště v některých zemích EU s vnitrostátní distribuční soustavou zemního plynu.⁶⁹

Vozidla na zemní plyn mohou být provozně seřizena buď jako jednopalivová, kde je jediným palivem zemní plyn zapalovaný jiskrou (podobně jako benzín), nebo jako dvoupalivová, která spalují v motoru společně motorovou naftu i zemní plyn.⁷⁰

Aby se do palivové nádrže běžné velikosti dostalo potřebné množství energie, je nutné zemní plyn stlačit nebo ochladit, aby zkondenzoval. V obou případech je plyn na vozidle uložen ve speciálních palivových nádržích; poté je přiveden do motoru vysokotlakými trubkami a je zaveden do sacího traktu, řízeného regulátorem. Stlačený zemní plyn bývá obvykle uskladněn na vozidle ve vysokotlaké nádobě o tlaku cca 20 až 25 MPa. Hmotnost paliva s nádrží je asi 4krát větší než u ekvivalentní nádrže na motorovou naftu, naplněné palivem.⁷¹

Složení zemního plynu se může lišit, což může ovlivnit jeho účinnost jako automobilového paliva. Zemní plyn má vysoké oktanové číslo a protože je to plyn, snadno se před spalováním smísí se vzduchem. To umožňuje nižší volnoběžné otáčky, lepší výkon, snadnější startování za studena a dokonalejší spalování, což pomáhá snižovat výfukové emise.⁷²

Tankování paliva obvykle trvá stejně dlouho jako u naftových autobusů, takže jsou CNG-autobusy považovány z hlediska provozního výkonu za víceméně rovnocenné s naftovými vozidly. Palivo se doplňuje za jeden až dva dny, doba tankování je 5 až 10 minut, dojezd je 350 až 400 kilometrů. Pro tankování zemního plynu je nutná specifická infrastruktura (speciální kompresor a vyrovnávací nádrž pro rychlé plnění). Plyn se přivádí prostřednictvím přípojky ke stávající plynárenské síti nebo je doplňován v místním depu.⁷³

⁶⁹ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook], s. 22

⁷⁰ ENERGY SAVING TRUST. *The Route to Cleaner Buses: A Guide to Operating Cleaner, Low Carbon Buses*, 2003, [ebook], s. 10

⁷¹ ENERGY SAVING TRUST. *The Route to Cleaner Buses: A Guide to Operating Cleaner, Low Carbon Buses*, 2003, [ebook], s. 10

⁷² ENERGY SAVING TRUST. *The Route to Cleaner Buses: A Guide to Operating Cleaner, Low Carbon Buses*, 2003, [ebook], s. 10

⁷³ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook], s. 22

Ve srovnání se současnými naftovými motory nabízejí jednosložkové motory na zemní plyn výhody pro kvalitu ovzduší při redukci tuhých částic až o 80 % a oxidů dusíku až o 95 %, obvykle však dochází k malému zvýšení emisí skleníkových plynů.⁷⁴ V důsledku odlišného procesu spalování vytvářejí motory na zemní plyn méně hluku než motory naftové. Emise hluku činí u stojícího vozidla 78 dB, u projíždějícího 78 dB.⁷⁵

2.3 Pohon na bionaftu

Většina naftových motorů je nastavena na využívání nízko-koncentrovaných směsí biopaliv, přičemž každý typ biopaliva nebo směsi vyžaduje menší úpravy motoru. Palivo s přísadou do 30 % je možné používat bez úpravy motoru, ale skutečný podíl závisí na typu motoru. Proto by měli výrobci uvádět, jaký druh biopaliva nebo směsi lze používat v konkrétním motoru.⁷⁶

Čistá forma bionafty (označovaná B100) neobsahuje žádné fosilní látky. Někteří výrobci autobusů dodávají naftové motory, které mohou využívat klasickou motorovou naftu i čistou bionaftu bez výrazného zvýšení nákladů. Například společnost Scania nabízí dva motory splňující normu Euro VI – se zdvihovým objemem 9000cm³ a 13000cm³ – které mohou běžet na čistou bionaftu. Její využívání však často vyžaduje nějaké úpravy motoru v závislosti na typu bionafty a suroviny.⁷⁷

Nejběžnějšími bionaftami jsou FAME a HVO, přičemž se většinou smíchávají s motorovou naftou. Podle normy Euro VI lze přimíchávat maximálně 7 % bionafty FAME a 30 % bionafty HVO. FAME (metyléster mastné kyseliny) je esterifikovaný olej – rostlinný olej, živočišný tuk nebo odpadní kuchyňský olej. Jeho molekula obsahuje hodně kyslíku, proto je energetický obsah v jednom kg nižší než u motorové nafty. HVO (hydro-rafinovaný rostlinný olej) je další vysoce kvalitní bionafta; obsahuje méně kyslíku a kvalitou se více podobá motorové naftě.⁷⁸

Většina bionafty se prodává jako nízko-koncentrované směsi (do 7%) prostřednictvím běžných čerpacích stanic a distribuční sítě. Pro tyto směsi lze využívat stejnou tankovací infrastrukturu jako pro motorovou naftu. Palivo se doplňuje každý druhý den, doba tankování

⁷⁴ ENERGY SAVING TRUST. *The Route to Cleaner Buses: A Guide to Operating Cleaner, Low Carbon Buses*, 2003, [ebook], s. 11

⁷⁵ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook], s. 23

⁷⁶ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook], s. 26

⁷⁷ RUTER: *Renewable energy powertrain options for Ruter*, [ebook], 2015, s. 23

⁷⁸ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook], s. 26

je 5 až 10 minut, dojezd je 570 až 850 kilometrů. Vysoce koncentrované směsi (B20 až B100) jsou dostupné ve vyhrazených čerpacích stanicích a vyžadují speciální uskladnění.⁷⁹

Při spalování směsné bionafty na bázi řepky (MEŘO) vzniká menší množství emisí než v případě motorové nafty. Ve výfukových plynech dochází k významnému poklesu obsahu polyaromatických uhlovodíků a tuhých částic. V emisích oxidů dusíku existují jen malé rozdíly mezi MEŘO a motorovou naftou.⁸⁰

Emise skleníkových plynů z autobusů na bionaftu závisejí na surovině použité k výrobě paliva a v menší míře na výrobním procesu (například u bionafty vyrobené z odpadního kuchyňského oleje mohou být až o 90% nižší). U některých surovin (obilniny, plodiny bohaté na škrob, olejiny a cukrové plodiny) může změna využití půdy zvýšit emise CO₂.⁸¹

2.4 Elektrický pohon

Akumulátorový elektroautobus je autobus, který je poháněn elektrickým motorem a je napájen pouze z akumulátorů nabíjených elektřinou. Existují dvě hlavní strategie dobíjení: a) příležitostné dobíjení elektrobusů po trase na autobusových zastávkách, u kterého je kapacita akumulátoru malá až střední (obvykle 20 až 60 kWh); b) elektrobusy dobíjené přes noc, které mají velkou kapacitu akumulátoru (obvykle 200 až 350 kWh) nutnou pro jízdu na delší vzdálenosti bez dobíjení; akumulátor se obvykle dobíjí ze sítě v depu.⁸²

U obou typů autobusů (pro příležitostné i noční dobíjení) závisí doba dobíjení na výkonu dobíjecí stanice a na technologii akumulátoru. Životnost podvozku autobusu a hnacího ústrojí, vyjma baterie, se odhaduje na 12 až 15 let. Očekává se, že zejména elektrický pohon bude mít delší životnost než spalovací motor.⁸³

Hmotnost prázdného autobusu bývá o něco vyšší u autobusu dobíjeného přes noc, vzhledem k většímu a těžšímu akumulátoru. To ovlivňuje přepravní kapacitu. Například dvounápravový dvanáctimetrový elektrobus může přepravovat 70 osob, na rozdíl od přibližně 100 osob v

⁷⁹ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 26

⁸⁰ VLK: *Alternativní pohony motorových vozidel*, s. 101

⁸¹ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 26-27

⁸² CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 32

⁸³ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 32

dvanařtmetrovém nařtfovém autobusu.⁸⁴ Typické elektrobusy mají řelku 8 až 9 metrů, mají nízké podlaží v celém autobusu, akumulátor a pohon jsou namontovány řiřně na zádí.⁸⁵

Hnací řstrojí elektrického vozidla sestává – podobně jako u vozidla se spalovacím motorem – z motoru, řevodovky, hnacích hřidelů a diferenciálu s rozvodovkou. Nejřastěji se používá řřední nebo zadní pohon s centřálním elektromotorem.⁸⁶ Elektrický pohon je velmi efektivní a je velmi vhodný pro provoz se zastavováním a rozjřžděním. Navíc může být energie regenerována elektrickým brzděním.⁸⁷

Pro elektrické autobusy je nutná vyhrazená infrastruktura, tj. dobřjecí stanoviřtř v depech autobusů nebo poděl tras na autobusovřch zastávkách. Palubní dobřjecí zařizení a dobřjecí stanoviřtř jsou vyspělě produkty; v rané řazi zavádění je řřiležitostně dobřjení pantografem.⁸⁸

Elektrické autobusy patří k nejřistřším dostupným technologiím, vřhledem k lokálně nulovřm emisím znečiřtřujících látek a k nízkřm emisím hluku; navíc je možné vyrábět elektřinu z udržitelnřch zdrojů.⁸⁹

Dalřím argumentem pro zavádění elektrických vozidel je to, že odpadá vřměna oleje a seřizování motoru, sniřuje se servisní náročnost a zvyřuje se počet najetřch kilometrů bez oprav – řředevřím u střidavřch elektromotorů. Střidavě elektromotory mají vyřřší řčinnost (ař 95 %) oproti stejnosmřrnřm elektromotorům (85 až 89 %) a spalovacím motorům (30 %).⁹⁰

2.5 Hybridní pohon

Hybridní elektrická vozidla používají spalovací motor jako hlavní generátor energie. Částečně je vyuříván také elektromotor, což vede ke sniřžení spotřeby paliva asi o 20 až 30 % oproti použití pouhého nařtfového motoru. Dalří vřhodou jsou sniřžené lokální emise.⁹¹

⁸⁴ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 32

⁸⁵ ENERGY SAVING TRUST. *The Route to Cleaner Buses: A Guide to Operating Cleaner, Low Carbon Buses*, 2003, [ebook], s. 10

⁸⁶ VLK: *Alternativní pohony motorovřch vozidel*, s. 122

⁸⁷ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 32

⁸⁸ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 33

⁸⁹ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 33

⁹⁰ VLK: *Alternativní pohony motorovřch vozidel*, s. 139

⁹¹ RUTER: *Renewable energy powertrain options for Ruter*, [ebook], 2015, s. 25

Hybridní vozidlo využívá dva zdroje hnací energie. Nejběžnějším typem je hybridní elektrické vozidlo (HEV), které používá kombinaci spalovacího motoru a elektrického pohonu. Uspořádání hnacího ústrojí se může lišit, ale obecně se rozlišují dva typy hybridů:

- Paralelní hybridy. Mají spalovací motor (například na motorovou naftu nebo na zemní plyn) a spřažený elektrický motor na podporu spalovacího motoru, na regeneraci brzděné energie a na dobíjení akumulátoru.
- Sériové hybridy. Mají spalovací motor, který vyrábí elektřinu pro nabíjení akumulátoru a pro poskytování energie k napájení elektromotoru, který potom pohání autobus. Většina typů se může připojit k elektrické síti za účelem dobíjení akumulátoru („*plug-in*”).⁹²

Hybridy, které lze externě dobíjet pomocí zásuvných přípojek, se nazývají „*plugin hybridy*” (PHEV). Mají větší akumulátory a delší dojezd na elektrický pohon ve srovnání s běžným hybridem (HEV). Lze je provozovat pouhým dobíjením elektřinou v depech, do kterých se autobusy musí několikrát denně vracet. Alternativně je lze dobíjet také na příležitostných dobíjecích stanovištích.⁹³

2.6 Pohon vodíkovými články

Autobusy mohou být poháněny vodíkovými palivovými články, které přeměňují chemickou energii vodíku na elektřinu a dodávají elektrickou energii do pohonné jednotky. Vodík bývá obvykle uchováván stlačený v nádržích na střeše autobusu, přičemž zařízení na tankování vodíku jsou zpravidla umístěna v autobusovém depu.⁹⁴

Tato autobusová technologie využívá sériovou hybridní konfiguraci souboru palivových článků a elektrického pohonu. Elektrický akumulátor se obvykle používá pro ukládání energie produkované palivovými články a energie vzniklé tzv. rekuperací při brzdění. Vodík pro pohon palivových článků je uchováván ve válcových nádržích při tlaku typicky 35 MPa. Dojezd vozidla činí 200 až 400 km, přičemž závisí na velikosti nádrže vodíku a na tlaku uvnitř. Doplnění nádrže se provádí každý den na konci provozu.⁹⁵

⁹² CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 35

⁹³ RUTER: *Renewable energy powertrain options for Ruter*, [ebook], 2015, s. 25

⁹⁴ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 38

⁹⁵ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 40

Pro autobusy na vodíkové články je nutná vyhrazená infrastruktura umožňující manipulovat s plynným nebo kapalným vodíkem. Pokud je vodík přepravován na delší vzdálenosti, je ekonomicky výhodné jeho zkapalnění, jinak je vodík obvykle skladován a distribuován v plynné formě. Stanice na tankování vodíku musejí splňovat specifické bezpečnostní požadavky, protože vodík je výbušný.⁹⁶

Vodíkové autobusy patří k nejčistším dostupným technologiím, vzhledem k nulovým emisím znečišťujících látek a nižším emisím hluku. Nevýhody spočívají v tom, že tato technologie ještě není dost vyspělá. S vysokotlakým tankováním a skladováním vodíku jsou spojeny bezpečnostní obavy. Vodíkový pohon je méně účinný než plně elektrický pohon, a vyžaduje vysoké náklady na vozidlo a infrastrukturu.⁹⁷

⁹⁶ RUTER: Renewable energy powertrain options for Ruter, [ebook], 2015, s. 29

⁹⁷ CIVITAS: *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*, 2020, [ebook] , s. 41

3. Příklady autobusů na alternativní paliva

Mezi významné evropské výrobce autobusů na alternativní paliva patří v současné době společnosti Iveco Bus, Solaris Bus & Coach, a Daimler Buses (značka Mercedes-Benz).

3.1 Autobus Iveco Urbanway na zemní plyn



Obrázek 3: Autobus Iveco Urbanway CNG⁹⁸

Společnost Iveco Bus vyrábí autobusy s pohonem CNG především v produktové řadě Urbanway (viz obrázek 3), a to ve všech délkových verzích – sólové s délkou 10,5 nebo 12 metrů a kloubové s délkou 18 metrů. Plynové autobusy Urbanway CNG pohání šestiválcový motor Cursor 8, vyráběný společností FPT (Fiat Powertrain Technologies).⁹⁹

Tento příčně uložený nízkoemisní motor je vhodný pro vozidla na stlačený zemní plyn nebo bioplyn. Pro autobus dlouhý 12 metrů je určen motor o výkonu 216 kW, pro autobus dlouhý 18 metrů je určen motor o výkonu 246 kW. Točivý moment motoru činí až 1300 Nm.¹⁰⁰

Plynové nádrže autobusů Urbanway se dodávají ve dvou alternativách materiálového provedení: CNG 3 a CNG 4. Nádrž typu CNG 3 má hliníkovou nebo ocelovou vložku opředenou uhlíkovými vlákny; její objem činí 155 litrů. Nádrž typu CNG 4 využívá plastové vložky, proto má nižší hmotnost, ale její objem je o jeden litr menší, tedy 154 litrů. V obou případech mají nádrže plnicí tlak 20 MPa.¹⁰¹

⁹⁸ IVECO CZECH REPUBLIC A.S., *Urbanway Iveco Bus*, produktová brožura[online], s. 12

⁹⁹ NEUMAN: Autobusy Iveco Urbanway na zemní plyn, *Trucker.cz* [online]

¹⁰⁰ IVECO CZECH REPUBLIC A.S., *Urbanway Iveco Bus*, produktová brožura[online], s. 9

¹⁰¹ NEUMAN: Autobusy Iveco Urbanway na zemní plyn, *Trucker.cz* [online]

Na střeše kloubového autobusu je příčně namontováno deset nádrží – z toho šest nádrží se nachází v první části vozidla, a čtyři nádrže jsou ve druhé části. Celkový objem nádrží tedy činí až 1550 litrů. Na jedno naplnění nádrží přitom tento autobus ujede 350 až 400 kilometrů. Zabudování nádrží na CNG ovlivňuje výšku autobusu – plynové varianty jsou tak oproti naftovým vyšší o 235 mm, což může činit problémy na trasách, kde jsou nižší mosty.¹⁰²

3.2 Elektrobuses Solaris Urbino



Obrázek 4: Elektrobuses Solaris Urbino 18¹⁰³

U kloubového elektrického autobusu Urbino 18 (viz obrázek 4) jsou využity akumulátory nové generace Solaris High Energy +. Vynikají vysokou hustotou energie, díky které může autobus ujet 200 km na jedno dobití, bez ohledu na silniční a povětrnostní podmínky. Vylepšené parametry akumulátorů také umožňují zvládat stále významnější zatížení cestujícími – v kloubovém elektrobuses je prostor pro 120 osob, včetně 40 sedících.¹⁰⁴

Do elektrobuses Urbino 18 bylo instalováno sedm akumulátorů o celkové kapacitě 553 kWh: tři akumulátory byly uloženy v zadní části vozidla a čtyři na střeše první sekce. Autobus se dobíjí prostřednictvím zásuvného konektoru, ale inovované akumulátory lze dobíjet také pantografem.¹⁰⁵

¹⁰² NEUMAN: Autobusy Iveco Urbanway na zemní plyn, *Trucker.cz* [online]

¹⁰³ SOLARISBUS.COM: Solaris Urbino 18 Electric, *Customer Magazine*, č. 2/2019, s. 10

¹⁰⁴ SOLARISBUS.COM: Solaris Urbino 18 Electric, *Customer Magazine*, č. 2/2019, s. 10

¹⁰⁵ SOLARISBUS.COM: Solaris Urbino 18 Electric, *Customer Magazine*, č. 2/2019, s. 10

Aby se co nejvíce snížila spotřeba energie, je kloubový elektrobuses Urbino vybaven klimatizací s tepelným čerpadlem, které využívá venkovní teplo k vytváření vhodné teploty uvnitř vozidla. V tomto čerpadle je pracovní látkou oxid uhličitý, což je v současnosti považováno za nejkologičtější řešení. Předpokládá se, že začlenění tepelného čerpadla CO₂ zvýší energetickou účinnost vozidla, čímž se zvětší jeho dojezd a sníží emise škodlivin.¹⁰⁶

Další inovací aplikovanou ve vozidle je trakční měnič vyrobený novátorskou technologií SiC – tj. na bázi karbidu křemíku. Může tudíž pracovat při vyšších napětích, frekvencích a teplotách, což zase vede k významnému snížení hmotnosti a velikosti výkonového měniče, a obecně ke zvýšení účinnosti celého systému.¹⁰⁷

3.3 Elektrobuses Mercedes-Benz Citaro



Obrázek 5: Elektrobuses Mercedes-Benz Citaro¹⁰⁸

Elektrobuses Citaro (eCitaro, viz obrázek 5) je plně elektrický autobus, určený k nasazení v městské hromadné dopravě. Kvůli akumulátorům mají elektrobuses vyšší hmotnost. Společnost Mercedes-Benz se snaží tuto nevýhodu kompenzovat promyšleným rozložením jednotlivých součástí modelu eCitaro. Jde například o volitelné umístění akumulátorových modulů na střeše a standardní uložení akumulátorů na zádi. Přitom přední náprava má

¹⁰⁶ SOLARISBUS.COM: Solaris Urbino 18 Electric, *Customer Magazine*, č. 2/2019, s. 10

¹⁰⁷ SOLARISBUS.COM: Solaris Urbino 18 Electric, *Customer Magazine*, č. 2/2019, s. 10

¹⁰⁸ MERCEDES-BENZ ČESKÁ REPUBLIKA, S. R. O. Nové eCitaro: Akumulátorová a nabíjecí technika, Mercedes-Benz-Bus.com [online]

přípustné zatížení osm tun. Výsledkem je přepravní kapacita nejméně 88 míst u autobusu sólo, a to dokonce i při rozsáhlé výbavě.¹⁰⁹

Autobus eCitaro je možné individuálně konfigurovat, vzhledem k modulární koncepci jeho pohonné i akumulátorové techniky. Dále je možné během provozu eCitara modernizovat akumulátory jejich výměnou za akumulátory s vyšší výkonností.¹¹⁰

Elektromotor – na rozdíl od spalovacího motoru – lze umístit ve vozidle do značné míry libovolně. Společnost Mercedes-Benz využívá kompaktní koncepci – hnací nápravu ZF AVE 130 s motory umístěnými v blízkosti nábojů kol, která se již osvědčila u jiných variant Citara. V této nápravě je u každého kola uložen vodou chlazený asynchronní motor. Každý z motorů dává výkon 125 kW, celkem tedy 250 kW. Uvolněný prostor, kam by jinak přišel spalovací motor s převodovkou, slouží k uložení akumulátorových modulů.¹¹¹

Aktuálně jsou dostupné dvě technologie dobíjení: v depu nebo pantografem. Obě metody jsou vhodné pro dobíjení moderních článků NMC (lithium-nikl-mangan-kobalt oxid), které společnost Mercedes-Benz používá. V současnosti je možné zvolit začlenění šesti, osmi, deseti nebo dvanácti akumulátorových modulů, umístěných na střeše a zádi modelu eCitaro. Při maximálním osazení akumulátory a celkové kapacitě 292 kWh má autobus sólo dojezd cca 170 kilometrů. Při menším počtu akumulátorových modulů se zvyšuje kapacita míst; požadovaný větší dojezd lze zajistit průběžným dobíjením pantografem.¹¹²

V dobíjecích stanicích se autobus eCitaro dobíjí stejnosměrným proudem pomocí konektoru Combo 2, který je v Evropě preferovaným standardem. Tento konektor je určen pro dobíjecí výkon do 150 kW a intenzitu proudu do 200 A.¹¹³

¹⁰⁹ MERCEDES-BENZ ČESKÁ REPUBLIKA, S. R. O. Nové eCitaro: Akumulátorová a nabíjecí technika, *Mercedes-Benz-Bus.com* [online]

¹¹⁰ MERCEDES-BENZ ČESKÁ REPUBLIKA, S. R. O. Nové eCitaro: Akumulátorová a nabíjecí technika, *Mercedes-Benz-Bus.com* [online]

¹¹¹ MERCEDES-BENZ ČESKÁ REPUBLIKA, S. R. O. Nové eCitaro: Technika pohonu, *Mercedes-Benz-Bus.com* [online]

¹¹² MERCEDES-BENZ ČESKÁ REPUBLIKA, S. R. O. Nové eCitaro: Technika pohonu, *Mercedes-Benz-Bus.com* [online]

¹¹³ MERCEDES-BENZ ČESKÁ REPUBLIKA, S. R. O. Nové eCitaro: Akumulátorová a nabíjecí technika, *Mercedes-Benz-Bus.com* [online]

3.4 Hybridní autobus Iveco Urbanway



Obrázek 6: Hybridní autobus Iveco Urbanway¹¹⁴

Hybridní autobusy Urbanway (viz obrázek 6) kombinují elektrický pohon se spalovacím motorem, splňujícím Euro VI, a sadou lithium-iontových akumulátorů nejnovější generace. Inteligentní systém řízení spotřeby optimalizuje při jízdě spotřebu paliva a množství emisí, přičemž přebytečná energie vznikající při brzdění je díky rekuperaci ukládána a znovu využita.¹¹⁵

K výhodám těchto autobusů patří režim „Arrive & Go“, který umožňuje poblíž autobusových zastávek přejít do plně elektrického provozu. Zároveň se dočasně vyřadí z činnosti generátor, čímž se eliminují vibrace a snižuje úroveň hluku o více než 50 %. Výsledkem je zcela tichý provoz bez emisí při příjezdu i odjezdu ze zastávky.¹¹⁶

Dodavatelem pohonu těchto hybridů je britská společnost BAE Systems. Součástí systému je šestiválcový naftový motor Iveco Tector se zdvihovým objemem 6728 cm³ a výkonem 210 kW, dále elektrický generátor (o výkonu 140 kW), trakční asynchronní elektromotor (o výkonu 120 kW) a akumulátory s kapacitou 11 kWh.¹¹⁷

U uvedeného autobusu je technologie řešena jako sériový hybrid, pohon je tedy trvale elektrický. Znamená to, že za normálních okolností se autobus rozjíždí na akumulátory (do

¹¹⁴ ŠTĚPÁNEK, Jiří. Autobusy – Autobus Urbanway s hybridním pohonem, *Trucker.cz* [online]

¹¹⁵ ŠTĚPÁNEK, Jiří. Autobusy – Autobus Urbanway s hybridním pohonem, *Trucker.cz* [online]

¹¹⁶ ŠTĚPÁNEK, Jiří. Autobusy – Autobus Urbanway s hybridním pohonem, *Trucker.cz* [online]

¹¹⁷ TRUCKER.CZ. Hybridní autobus Urbanway, *Trucker.cz* [online]

rychlosti cca 20 km/h), potom se zapne naftový motor pohánějící generátor, který dodává energii trakčnímu elektromotoru a dobíjí akumulátory. Může pochopitelně nastat situace, kdy kapacita akumulátorů na rozjezd nestačí a autobus tak odjíždí s nastartovaným naftovým motorem. Obráceně při snížení rychlosti pod 20 km/h se za běžných okolností naftový motor vypíná.¹¹⁸

Plně hybridní autobusy Urbanway (o délce 12 nebo 18 metrů) s novou aerodynamičtější a ještě pevnější konstrukcí a s kompaktní motorovou jednotkou (obsahující podélně uložený motor Tector, generátor a elektromotor), jsou výrazně lehčí a prostornější než předchozí generace, a mají o 10 až 12 cestujících větší přepravní kapacitu, přičemž počet míst k sezení zůstal zachován. Kloubová verze hybridního autobusu Urbanway tak dosahuje kapacity až 170 míst pro stojící a sedící cestující.¹¹⁹

Oproti klasickému autobusu dokáže plně hybridní Urbanway se systémem „Arrive & Go“ ušetřit až 35 % nafty, a to s velice nízkými emisemi CO₂ na cestujícího: o 10 % méně u 12metrové verze a o 12 % méně u 18metrové verze oproti hybridním autobusům první generace.¹²⁰

3.5 Hybridní autobus Solaris Urbino



Obrázek 7: Hybridní autobus Solaris Urbino 12¹²¹

¹¹⁸ TRUCKER.CZ. Hybridní autobus Urbanway, *Trucker.cz* [online]

¹¹⁹ TRUCKER.CZ. Autobusy – Iveco podporuje hybridní technologii v autobusech, *Trucker.cz* [online]

¹²⁰ TRUCKER.CZ. Autobusy – Iveco podporuje hybridní technologii v autobusech, *Trucker.cz* [online]

¹²¹ SOLARISBUS.COM: The New Solaris Urbino Hybrid, *Customer Magazine*, č. 2/2017, s. 18

Solaris Urbino 12 (viz obrázek 7) je autobus se sériovým hybridním pohonem. Dodavatelem hybridní jednotky HybriDrive je americký výrobce BAE Systems. Ekologicky šetrný pohon přispívá k výraznému snížení spotřeby paliva a emisí škodlivin do ovzduší. Umožňuje to elektromotor, který je napájen energií z akumulátoru. Toto zařízení je zase nabíjeno za pomoci generátoru, který využívá naftový motor o zdvihovém objemu 4500 cm³ Cummins ISB4.5E6 s výkonem 156 kW.¹²²

Hybridní autobus Solaris Urbino 12 je dostupný také ve verzi s nulovými emisemi, což činí toto vozidlo podobné elektrobuse. Díky instalaci systému „*Stop-and-Go*“ se naftový motor během zastavování na autobusových zastávkách a při otevírání dveří zcela vypne, ale znovu se zapne ihned po vyčerpání energie superkondenzátorů.¹²³

Ve vozidle je nainstalován také GPS, včetně odpovídajícího softwaru pro aktivaci funkce „*Arrive-and-Go*“. Tato alternativa umožňuje vypnout naftový motor už když se autobus přibližuje k zastávce. Testy prokázaly, že díky tomuto ekologicky šetrnému řešení může autobus spotřebovávat až o 20 procent méně paliva než podobná vozidla s klasickým pohonem. Navíc motor pracuje tak tiše, že lze významně snížit hladinu hluku, což je výhodné v přeplněných městských centrech.¹²⁴

Autobus Urbino 12 Hybrid vyniká především důraznou, a přesto plynulou akcelerací. Jedním z hlavních rysů pohonu je to, že může během brzdění rekuperovat kinetickou energii. Ta se následně transformuje a ukládá jako elektrická energie v superkondenzátorech.¹²⁵

V nabídce společnosti Solaris je také osmnáctimetrová verze hybridního autobusu se sériovým pohonem od firmy BAE. Tento autobus je vybaven šestiválcovým motorem Cummins ISB6.7 o zdvihovém objemu 6700 cm³ a výkonu 221 kW a také asynchronním centrálním motorem o špičkovém výkonu 200 kW.¹²⁶

¹²² SOLARISBUS.COM: The New Solaris Urbino Hybrid, *Customer Magazine*, č. 2/2017, s. 18

¹²³ SOLARISBUS.COM: The New Solaris Urbino Hybrid, *Customer Magazine*, č. 2/2017, s. 18

¹²⁴ SOLARISBUS.COM: The New Solaris Urbino Hybrid, *Customer Magazine*, č. 2/2017, s. 18

¹²⁵ SOLARISBUS.COM: The New Solaris Urbino Hybrid, *Customer Magazine*, č. 2/2017, s. 18

¹²⁶ SOLARISBUS.COM: The New Solaris Urbino Hybrid, *Customer Magazine*, č. 2/2017, s. 18

3.6 Solaris Urbino s palivovými články



Obrázek 8: Solaris Urbino s palivovými články¹²⁷

Vodíkový autobus Solaris Urbino 12 (viz obrázek 8) je zcela bezemisní elektrobuse, ve kterém se energie uložená ve vodíku přímo přivádí do hnací soustavy vozidla, a akumulátor slouží jako pomocný energetický zdroj. Ve vodíkovém palivovém článku vzniká elektrická energie procesem zvaným reverzní elektrolyza; jedinými produkty této chemické reakce jsou teplo a pára. Proto vozidlo nevytváří žádné škodlivé látky.¹²⁸

Tento vodíkový autobus využívá moderní palivový článek, který na palubě vozidla funguje jako miniaturní vodíková elektrárna. Díky pokročilým technologiím může autobus ujet až 350 km na jedno natankování. U těchto vodíkových autobusů se využívá sada palivových článků o výkonu 60 kW. Vodíkový systém dále zahrnuje pomocná zařízení: pro dodávku vodíku a kyslíku o vhodném tlaku, pro recirkulaci nevyužitého zdroje a pro udržování správné a stabilní teploty palivových článků během provozu.¹²⁹

Do autobusu je začleněn také malý trakční akumulátor Solaris High Power, který by měl podporovat palivový článek, v době maximálního požadavku na energii. Akumulátor je doplňován energií získávanou z vodíku nebo z regenerativního brzdění, ale lze ho také dobíjet pomocí zásuvky. Doplňkem hnacího ústrojí je náprava se zabudovanými elektromotory.¹³⁰

¹²⁷ SOLARISBUS.COM: Clean Hydrogen, *Customer Magazine*, č. 1/2019, s. 13

¹²⁸ SOLARISBUS.COM: Clean Hydrogen, *Customer Magazine*, č. 1/2019, s. 16

¹²⁹ SOLARISBUS.COM: Clean Hydrogen, *Customer Magazine*, č. 1/2019, s. 16

¹³⁰ SOLARISBUS.COM: Clean Hydrogen, *Customer Magazine*, č. 1/2019, s. 16

Technologie ukládání vodíku zde představuje špičkové řešení. Vodík je natlačen v plynné formě při tlaku 350 atmosfér do pěti nádrží nové generace, umístěných podélně na střeše autobusu. Díky nádržím nového typu se podařilo snížit hmotnost válců zhruba o 20 % oproti předchozímu modelu. Sada kompozitních nádrží, umístěných podélně nad první nápravou vozidla, poskytuje úložný prostor pro 36,8 kg vodíku. Na konci každé nádrže je namontován multifunkční ventil, zahrnující řadu bezpečnostních prvků: solenoidový ventil, nouzový ventil aktivovaný vysokou teplotou a pojistný ventil pro přerušení toku vodíku.¹³¹

Za účelem maximálního snížení spotřeby energie má vozidlo komfortní klimatizaci s tepelným čerpadlem CO₂, které může využívat odpadní teplo z palivového článku. Toto řešení zaručuje velmi vysokou účinnost a umožňuje zvýšit dojezd.¹³²

¹³¹ SOLARISBUS.COM: Clean Hydrogen, *Customer Magazine*, č. 1/2019, s. 16-17

¹³² SOLARISBUS.COM: Clean Hydrogen, *Customer Magazine*, č. 1/2019, s. 17

DISKUSE

Automobilová doprava významně ovlivňuje životní prostředí – zejména kvalitu ovzduší, což se nejvíce projevuje v městských aglomeracích a v hustě osídlených oblastech. Znečištěné ovzduší potom ovlivňuje zdraví obyvatel (snížená imunita, dýchací a kardiovaskulární onemocnění), ale také kvalitu rostlinných ekosystémů (stav lesních porostů a zemědělské produkce).¹³³

Směrnice Evropského parlamentu a Rady (EU) 2018/2001 o podpoře využívání energie z obnovitelných zdrojů ukládá České republice povinnost dosáhnout do roku 2030 v dopravě 14 % podílu energie z obnovitelných zdrojů na celkové spotřebě energie.¹³⁴

V souvislosti s tím se státní politika životního prostředí ČR aktuálně ubírá dvěma směry:

- snižování emisí oxidů dusíku (NO_x), těkavých aromatických uhlovodíků (VOC) a tuhých částic (PM_{2,5}) z dopravy; realizace opatření na ochranu kvality ovzduší; dodržování imisních limitů;
- zajištění 10 % podílu energie z obnovitelných zdrojů v dopravě do konce roku 2020.¹³⁵

Dopravní politika se za tím účelem zaměřuje na podporu energeticky efektivní veřejné hromadné dopravy. Dalším úkolem je snižování emisí NO_x, VOC a PM_{2,5} ze sektoru silniční dopravy obnovou vozového parku a zvyšováním podílu alternativních paliv.¹³⁶

Spotřeba zemního plynu, který je ekologicky šetrnější alternativou benzínu a nafty, vzrostla v ČR za období 2008 až 2018 více než desetkrát. Například v roce 2018 bylo registrováno 1234 autobusů na CNG, což je 5,8 % jejich vozového parku. V uvedeném roce bylo k dispozici 185 plnicích stanic na CNG, meziročně přibylo 21 nových plnicích stanic.¹³⁷

¹³³ MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Zpráva o životním prostředí České republiky 2018 [online], s. 219

¹³⁴ MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Zpráva o životním prostředí České republiky 2018 [online], s. 219

¹³⁵ MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Zpráva o životním prostředí České republiky 2018 [online], s. 219

¹³⁶ MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Zpráva o životním prostředí České republiky 2018 [online], s. 220

¹³⁷ MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Zpráva o životním prostředí České republiky 2018 [online], s. 229

Zásadním obnovitelným zdrojem energie jsou v dopravě biopaliva. Spotřeba FAME (biosložky nafty) dosáhla maxima v roce 2014 (300,4 tisíce tun), v období 2014 až 2018 poklesla o 23,8 % vlivem problémů spojených s jejím používáním – a to i přes daňové zvýhodnění. Výroba FAME však v roce 2018 meziročně vzrostla o 23,4 %.¹³⁸

Využívání elektromobilů a hybridů v ČR roste, ale elektromobilita zde má krátkou tradici (významnější je od roku 2016). Například v roce 2018 bylo nově registrováno 618 elektromobilů a 4831 hybridů – což je zhruba dvojnásobek oproti předchozímu roku.¹³⁹

¹³⁸ MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Zpráva o životním prostředí České republiky 2018 [online], s. 230

¹³⁹ MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Zpráva o životním prostředí České republiky 2018 [online], s. 230

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou alternativních paliv pro autobusy městské hromadné dopravy, dále se zabývá alternativními pohonnými jednotkami pro autobusy a ekologickými souvislostmi (uvedenými v diskusi).

První kapitola je zaměřena na alternativní paliva pro autobusy MHD: zkapalněný ropný plyn, stlačený zemní plyn, bionaftu, bioetanol, dimethyléter, syntetickou naftu, vodíkové palivo a elektřinu (z palivových článků nebo z akumulátorů). Paliva jsou popsána z hlediska jejich chemického složení, výroby, využití a vlastností (uvedených v tabulkách). Podkapitoly o elektřině uvádějí také typy palivových článků a akumulátorů.

Druhá kapitola je zaměřena na pohonné jednotky pro autobusy MHD. V úvodu je popsán pohon klasickým naftovým spalovacím motorem na motorovou naftu, dále je popsáno využití tohoto motoru pro alternativní paliva (zemní plyn a bionaftu). Následuje popis alternativních pohonů – elektrického pohonu, hybridního pohonu a pohonu vodíkovými články.

Třetí kapitola uvádí příklady současných modelů autobusů na alternativní paliva. Celkem je uvedeno sedm modelů autobusů (jeden autobus na zemní plyn, dva elektrické autobusy, dva hybridní autobusy a jeden palivočlánkový autobus) od významných evropských výrobců. Tyto autobusy jsou charakterizovány z hlediska jejich pohonného systému.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Princip činnosti palivového článku	13
Obrázek 2: Princip činnosti akumulátoru	15
Obrázek 3: Autobus Iveco Urbanway CNG	24
Obrázek 4: Elektrobuses Solaris Urbino 18	25
Obrázek 5: Elektrobuses Mercedes-Benz Citaro	26
Obrázek 6: Hybridní autobus Iveco Urbanway	28
Obrázek 7: Hybridní autobus Solaris Urbino 12	29
Obrázek 8: Palivočlánkový autobus Solaris Urbino	31

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Porovnání parametrů propanu a butanu s benzínem	4
Tabulka 2: Povolené složení stlačeného zemního plynu	5
Tabulka 3: Porovnání parametrů paliv na bázi řepky s naftou	7
Tabulka 4: Porovnání parametrů etanolu s motorovou naftou	8
Tabulka 5: Porovnání parametrů DME s propanem a naftou	9
Tabulka 6: Porovnání parametrů syntetické a klasické nafty	10
Tabulka 7: Porovnání vlastností vodíku s benzínem	12

SEZNAM ZDROJŮ

BABU, M. K. Gajendra a K. A. SUBRAMANIAN. *Alternative Transportation Fuels: Utilisation in Combustion Engines*. Londýn a New York: CRC Press, 2013. ISBN 978-1-4398-7281-9.

CIVITAS. *Smart Choices for Cities: Alternative Fuel Buses*. Technical Report, 2020 [ebook]. Dostupné z: https://civitas.eu/sites/default/files/civ_pol-08_m_web.pdf

DLOUHÝ, Petr a Luděk JANÍK. Vodíkové hospodářství. *Hytep.cz* [online]. Zveřejněno: 25.1.2007. [citace: 17.3.2020]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vodikove-hospodarstvi/654-vodikove-hospodarstvi>

DOUCEK, Aleš a Luděk JANÍK. Úvod do vodíkového hospodářství. In: *PRO-ENERGY magazín*, č.3/2009, s. 71-75, [online]. [citace: 15.3.2020]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/jaro2011/FY2MP_ENVI/um/vodikhospod4.pdf

ENERGY SAVING TRUST. *The Route to Cleaner Buses: A Guide to Operating Cleaner, Low Carbon Buses*. Guide, 2003. [ebook]. Dostupné z: https://www.lowcvp.org.uk/assets/reports/EST_Clean_Bus_Guide_-_2003.pdf

HROMÁDKO, Jan a kolektiv. *Spalovací motory*. Praha: Grada Publishing a.s., 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.

HROMÁDKO, Jan. Využití etanolu ve vznětových motorech. In: *Listy cukrovarnické a řepařské*, ročník 125, č. 1/2009, s. 24-27. Dostupné z: http://www.cukr-listy.cz/on_line/2009/pdf/24-27.PDF

IVECO CZECH REPUBLIC, A.S. Urbanway Iveco Bus, produktová brožura. *Ivecocr.cz* [online]. [cit. 18.3.2020]. Dostupné z: <https://www.ivecocr.cz/data/files/filemanager/370/urbanway-cz-1170.pdf>

LAURIN, Josef. Étery získávané z biomasy jako alternativní automobilová paliva. *Biom.cz* [online]. Zveřejněno: 12.9.2007 [citace: 12.3.2020]. ISSN 801-2655. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/etery-ziskavane-z-biomasy-jako-alternativni-automobilova-paliva>

LAURIN, Josef. Plynná motorová paliva pro silniční vozidla v ČR. In: *Paliva*, ročník 6, č.3/2014, s. 73-77. Dostupné z: <http://paliva.vscht.cz/cz/archiv-clanku/detail/24>

MERCEDES-BENZ ČESKÁ REPUBLIKA, S. R. O. Nové eCitaro: Akumulátorová a nabíjecí technika. *Mercedes-Benz-Bus.com* [online]. [cit. 19.03.2017] , dostupné z: https://www.mercedes-benz-bus.com/cs_CZ/models/ecitaro/technology-safety/battery-and-charging-technology.html

MERCEDES-BENZ ČESKÁ REPUBLIKA, S. R. O. Nové eCitaro: Technika pohonu. *Mercedes-Benz-Bus.com* [online]. [cit. 19.03.2017] , dostupné z: https://www.mercedes-benz-bus.com/cs_CZ/models/ecitaro/technology-safety/propulsion.html

MINISTERSTVO ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ. Zpráva o životním prostředí České republiky 2018 [online]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zpravy_o_stavu_zivotniho_prostredi_publicace/\\$FILE/OPZPUR-Zprava_ZP_CR_2018_20200207.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/zpravy_o_stavu_zivotniho_prostredi_publicace/$FILE/OPZPUR-Zprava_ZP_CR_2018_20200207.pdf)

MURTINGER, Karel a Jiří BERANOVSKÝ. *Energie z biomasy*. Druhé aktualizované vydání. Brno: Vydavatelství ERA, 2008. ISBN 978-80

NEUMAN, JAN. Autobusy Iveco Urbanway na zemní plyn. *Trucker.cz* [online], zveř. 14.3.2019. [cit. 18.3.2020]. Dostupné z: https://www.trucker.cz/rubriky/bus/autobusy-iveco-urbanway-na-zemni-plyn_46900.html

PAVLŮSEK, Ondřej. Volvo Trucks rozšiřuje nabídku alternativních paliv. *Auto.cz* [online]. Zveřejněno: 13.8.2013 [citace: 12.3.2020]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/volvo-trucks-rozsiruje-nabidku-alternativnich-paliv-76047>

PORŠ, Zdeněk. *Palivové články*. Ústav jaderného výzkumu Řež, 2002, [online]. [citace: 15.3. 2020]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/palivove-clanky.pdf>

POSPÍŠIL, Milan a kolektiv. Nové trendy výroby biopaliv a jejich využití v dopravě. In: *Chemické listy*, ročník 106, č. 10/2012, s. 953-960. ISSN 1213-7103. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_10_953-960.pdf

QUASCHNING, Volker. *Obnovitelné zdroje energií*. Praha: Grada Publishing a.s., 2010. ISBN 978-80-247-3250-3.

REMEK, Branko. *Automobil a spalovací motor: Historický vývoj*. Praha: Grada Publishing a.s., 2012. ISBN 978-80-247-3538-2.

RUTER a Roland Berger Strategy Consultants. *Renewable energy powertrain options for Ruter*. Finsko, Oslo: duben 2015. [ebook] Dostupné z: https://ruter.no/globalassets/dokumenter/fossilfri-2020/ruter-fossil-free-2020_report-on-renewable-energy-powertrain-options_june-2015.pdf

SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus*. Praha: Nakladatelství Karolinum, 2017. Třetí vydání. ISBN 978-80-246-2198-2.

SOLARISBUS.COM. The New Solaris Urbino Hybrid. In: *Customer Magazine*, č. 2/2017 (podzim), s. 18. ISSN 1689-6076. Dostupné z: https://www.solarisbus.com/public/assets/Biuro_prasowe/Magazyn_Solaris_jesien2017_EN_72dpi.pdf

SOLARISBUS.COM. Clean Hydrogen. In: *Customer Magazine*, č. 1/2019 (jaro), s. 13-17. ISSN 1689-6076. Dostupné z: https://www.solarisbus.com/public/assets/Magazyn_Solaris_wiosna2019_EN_72dpi.pdf

SOLARISBUS.COM. Solaris Urbino 18 Electric. In: *Customer Magazine*, č. 2/2019 (podzim), s. 10. ISSN 1689-6076. Dostupné z: https://www.solarisbus.com/public/assets/content/busmania/Magazyn2019/Magazyn_Solaris_Jesien2019_EN_72dpi.pdf

STEHLÍK, Jakub. Baterie zůstávají limitujícím faktorem elektromobilů: Průlom se očekává za sedm let. In: *autobible.cz*, zveřejněno: 27.11. 2020 [online]. [citace: 15.3.2020]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/baterie-zustavaji-limitujicim-faktorem-elektromobilu-prulom-se-ceka-za-sedm-let/>

ŠTĚPÁNEK, Jiří. Autobusy – Autobus Urbanway s hybridním pohonem. *Trucker.cz* [online], zveřejněno 29.09.2017, [cit. 19.03.2017] , dostupné z: https://www.trucker.cz/rubriky/bus/autobusy-autobus-urbanway-s-hybridnim-pohonem_46006.html

ŠTĚRBA, Pavel a Ondřej KRYŽICKÝ. *Jak na LPG: Přestavba, provoz a údržba automobilů na plyn*. Praha: Computer Press, 2002. ISBN 80-7226-734-5.

TRUCKER.CZ. Autobusy – Iveco podporuje hybridní technologii v autobusech. *Trucker.cz* [online], zveř. 08.06.2017, [cit. 19.03.2017], dostupné z: https://www.trucker.cz/rubriky/bus/autobusy-iveco-podporuje-hybridni-technologie-v-autobusech_45764.html

TRUCKER.CZ. Hybridní autobus Urbanway. *Trucker.cz* [online], zveř. 05.06.2019, [cit. 19.03.2017] , dostupné z: https://www.trucker.cz/rubriky/bus/hybridni-autobus-urbanway_47165.html

VLK, František. *Automobilová příručka*. Brno: FVLK – František Vlk nakladatelství a vydavatelství, 2003. ISBN 80-238-9681-4.

VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: FVLK – František Vlk nakladatelství a vydavatelství, 2004. ISBN 80-239-1602-5.