

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI - FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojů průmyslové dopravy



**Obor
Konstrukce strojů a zařízení**

**Zaměření
KOLOVÉ DOPRAVNÍ A MANIPULAČNÍ STROJE**

AUTOBUS S ELEKTRICKÝM POHONEM A VODÍKOVÝMI PALIVOVÝMI ČLÁNKY

KSD – DP - 496

Jiří Haba

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Josef Laurin, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Ladislav Stránský, TEDOM Jablonec n.N.

Rozsah práce:

Počet stran: 74 (50 + 24)

Počet obrázků: 36

Počet tabulek: 11

Počet příloh: 9

Počet výkresů: 2

Leden 2006



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Jiří H a b a
studijní program	M2301 Strojní inženýrství
obor	2302T010 Konstrukce strojů a zařízení
zaměření	Kolové dopravní a manipulační stroje

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

AUTOBUS S ELEKTRICKÝM POHONEM A VODÍKOVÝMI PALIVOVÝMI ČLÁNKY

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody vypracování)

1. Zpracujte stručnou studii o pohonu autobusů elektromotorem napájeným z palivových článků na vodík.
2. Zpracujte projekt pohonu městského autobusu elektromotorem s palivovými články na vodík.
3. Navrhněte jednotlivé agregáty pohonu vč. plynové instalace a vyhotovte výkresovou dokumentaci jejich zástavby do autobusu.
4. Stanovte očekávané hlavní provozní parametry autobusu a celkovou účinnost transformace energie obsažené ve vodíku na mechanickou energii přivedenou na kola autobusu.
5. Výsledky řešení diplomového úkolu budou využity v rámci výzkumného záměru.

Forma zpracování diplomové práce:

Průvodní zpráva: cca 40 stran

Grafické práce: výkresová dokumentace

Průvodní zpráva i výkresová dokumentace budou odevzdány též na CD ROM.

Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

- Studie, výzkumné projekty, diplomové práce a publikace týkající se pohonu autobusů na plynná paliva.
- Firemní literatura výrobců autobusů a agregátů.

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Josef Laurin, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Ladislav Stránský, TEDOM Jablonec n.N.

L.S.

Doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D.
vedoucí katedry

Doc. Ing. Petr Louda, CSc.
děkan

V Liberci dne 31.10.2004

Autobus s elektrickým pohonem a vodíkovými palivovými články

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá pohonem autobusu elektromotorem napájeným z palivových článků na vodík. Díky tomuto technickému řešení autobus při provozu neprodukuje žádné škodliviny.

Práce obsahuje studii o pohonu autobusů palivovými články, projekt pohonu městského autobusu s palivovými články, návrh základních částí pohonu, konstrukční provedení zástavby pohonu do autobusu (ProENGINEER) a očekávané hlavní provozní parametry autobusu včetně účinnosti pohonu.

Výsledky řešení diplomové práce mohou být využity v rámci výzkumného záměru.

Bus with electric drive and hydrogen fuel cells

ANNOTATION

The diploma work deal with drive bus electric motor fed from hydrogen fuel cells. Thanks this technical solution bus at running no produces any harmful emissions.

The work includes studies about fuel cell buses, project drive city bus with fuel cells, design basic parts of drive, construction development drive to the bus (ProENGINEER) and expected main operation parameters of bus including effectivity of drive.

The results of this diploma work may be used in within the experimental plan.

Prohlášení o původnosti DP

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci 6.1.2006

Jiří Haba

Prohlášení k využívání výsledků DP

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Beru na vědomí, že si po pěti letech mohu diplomovou práci převzít v Univerzitní knihovně TUL, kde bude uložena.

V Liberci 6.1.2006

Jiří Haba

Spojovací 6

466 02 Jablonec nad Nisou

OBSAH

1	ÚVOD	7
2	STUDIE O POHONU AUTOBUSŮ ELEKTROMOTOREM NAPÁJENÝM Z PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ	9
2.1	Odvození scénáře trhu	9
2.2	Stručný přehled	10
2.3	Významné projekty a výrobci autobusů poháněných palivovými články.....	12
2.3.1	DaimlerChrysler	12
2.3.2	Irisbus	13
2.3.3	Gillig	13
2.3.4	MAN	14
2.3.5	NABI (North American Bus Industries)	14
2.3.6	Neoplan	15
2.3.7	New Flyer.....	15
2.3.8	NovaBus.....	16
2.3.9	Toyota	17
2.3.10	Thor	17
2.3.11	Van Hool	18
2.3.12	Volvo	18
2.3.13	Ostatní (DICP, Enova, Scania).....	19
3	PROJEKT POHONU MĚSTSKÉHO AUTOBUSU ELEKTROMOTOREM S PALIVOVÝMI ČLÁNKY NA VODÍK	20
3.1	Palivem je vodík.....	20
3.2	Součásti pohonu a jejich uspořádání	23
3.2.1	Nádrže na vodík	25
3.2.2	Palivové články – zdroj elektrické energie	26
3.2.3	Akumulátory – rekuperace energie	30
3.2.4	Elektromotor	31
3.3	Variety uspořádání pohonu	33
3.3.1	Varianta I.....	33
3.3.2	Varianta II	34
3.3.3	Varianta III	34
3.3.4	Výběr varianty pro podrobnější rozpracování projektu, schéma zapojení.....	35
4	NÁVRH AGREGÁTŮ POHONU A JEJICH ZÁSTAVBY DO AUTOBUSU.....	37
4.1	Autobus	37
4.2	Nádrže na vodík	37
4.3	Palivové články	38
4.4	Akumulační systém - ultrakondenzátory	39
4.5	Invertor.....	41
4.6	Trakční elektromotor.....	41
4.7	Převodovka, kloubová hnací hřídel, spojka a zadní náprava	43
4.8	Ostatní systémy	43
4.9	Zástavba navržených částí pohonu do autobusu	45

5	PŘEDPOKLÁDANÉ PROVOZNÍ PARAMETRY AUTOBUSU	47
5.1	Předpokládaná účinnost pohonu	48
6	ZÁVĚR	50
	PŘÍLOHA 1 – Přehled autobusů s pohonem palivovými články	51
	PŘÍLOHA 2 – Přehled lokalit vodíkových čerpacích stanic, schéma čerpací stanice	56
	PŘÍLOHA 3 – Pohonná jednotka Xcellsis HY-205 firmy Ballard	57
	PŘÍLOHA 4 – Uspořádání hybridního pohonu autobusu MAN – technické parametry	60
	PŘÍLOHA 5 – Uspořádání hybridního pohonu autobusu Scania	61
	PŘÍLOHA 6 – Grafy	62
	PŘÍLOHA 7 – Technické parametry autobusu Tedom	64
	PŘÍLOHA 8 – Zjednodušený návrh převodových stupňů	65
	PŘÍLOHA 9 – 3D Model sestavy z aplikace ProENGINEER	71
	Seznam použité literatury a další zdroje	73

Samostatně řazené přílohy

2D výkres zástavby pohonu do autobusu KSD – DP – 496 – 1
3D výkres zástavby pohonu do autobusu KSD – DP – 496 – 2
CD-ROM – diplomová práce v elektronické podobě

Obsah CD-ROM

Úvodní webová stránka pro snadné procházení CD-ROM (default.htm)
Programy pro otevření souborů diplomové práce Adobe Acrobat Reader a Foxit PDF Reader
Kompletní diplomová práce ve formátu PDF
2D výkres ve formátu PDF
3D výkres ve formátu PDF
Prezentace zástavby pohonu z aplikace ProENGINEER ve formátu EXE
Princip funkce palivového článku UTC ve formátu AVI
Vybrané podklady ve formátu PDF

1 ÚVOD

Energetická spotřeba má stále rychleji rostoucí charakter, jejíž nedostatek může vést k hluboké krizi. Stále se rozšiřující průmyslová zóna potřebuje dostatek fosilních paliv, jejichž zásoby jsou zatím dostatečné, ale ne nevyčerpatelné. Uhlovodíkové suroviny se také ve velké míře zpracovávají v petrochemickém průmyslu (plasty). Spotřeba fosilních paliv vede k tomu, že se používají méně ušlechtilější druhy. Na spalování se používají paliva s nižší kvalitou a vyšším obsahem síry, jako např. hnědé uhlí. Používání těchto méně kvalitních paliv vede k dramatickému zhoršování ekologické situace. Náhradu za tyto paliva musíme hledat již dnes, protože vývoj nových technologií je velmi technicky i finančně nákladný. Potřebujeme najít takový energetický zdroj, jehož zpracování je co nejjednodušší, neekonomičtější a především je ho dostatečné množství. Při hledání tohoto paliva bylo stanoveno jako nejvýhodnější (se současným technickým vybavením) palivo vodík. Jeho zásoby jsou prakticky nevyčerpatelné, zpracování je jednoduché, i když klade větší nároky na splnění bezpečnosti. [14]

Za posledních deset let můžeme zaznamenat rapidní nárůst vozidel poháněných vodíkovými palivovými články. Jedná se zejména o projekty demonstračních a výzkumných vozidel. Za tuto dobu vlády zemí, v nichž se převážně výzkum palivových článků provádí, a průmysl společně investovaly miliardy dolarů s cílem komercializace vozidel poháněných palivovými články a jejich případnému masovému využívání v 21. století.

Účelem tohoto výzkumu je utvořit si již dnes obrázek o tom, zda vozidla poháněná palivovými články celosvětově obstojí na automobilovém trhu. Ačkoliv není výzkum zdaleka kompletní, již dnes nám poskytuje celkově dobrý pohled na produkty a projekty související s palivovými články. Obrázek, který si můžeme z tohoto výzkumu utvořit, je opravdu ohromující. Na projektech spolupracují vlády a průmyslová sdružení celkem v jedenácti zemích, včetně Evropské unie. Tato sdružení se zabývají nejrozličnějšími projekty, zahrnující vývoj "vodíkové dopravy", autobusů a aut s pohonem palivovými články, ale i kol a skútrů poháněných palivovými články. Zároveň již existuje celkem 20 společností, které se zabývají vývojem vozidel poháněných palivovými články a příslušných komponent. Jedná se zejména o významné světové výrobce, jakými jsou např. Toyota, DaimlerChrysler, Ford, General Motors a Mitsubishi. Dále můžeme identifikovat přinejmenším 12 společností, které pracují na vývoji autobusů poháněných palivovými články. Tato skupina zahrnuje nejzkušenější výrobce v oblasti pohonu palivovými články, jsou to například DaimlerChrysler, MAN, Toyota, Volvo, New Flyer a North American Bus Industries.

Přestože o pohonu vodíkovými palivovými články není v budoucnu ještě rozhodnuto, zdá se, že vlády i průmysl jsou plně oddáni rozvoji vozidel poháněných vodíkem a související infrastruktury. Některé země, jako Kanada a Island, jsou o přechodu z ropného hospodářství na hospodářství vodíkové plně přesvědčeny již dnes. Ačkoliv bude tento přechod trvat desetiletí, je jasné, že nezbytné základy byly již položeny.

Palivové články pohánějící vozidla mají co poskytnout. Zejména nabízejí nulové výfukové emise, což je zásadní vlastnost pro zdravý rozvoj světových městských center. Mají též velký ekonomický potenciál, jak již mnohokrát bylo dokázáno významnými investicemi, udělenými soukromým sektorem pro vývoj a demonstraci pohonu palivovými články.

Výroba autobusů poháněných elektrickým pohonem a vodíkovými palivovými články se jeví jako nejlepší strategie pro komercializaci palivových článků silničních vozidel a přechodu k vodíkové ekonomice vůbec. Je mnoho důvodů, proč využívat platformu palivových článků právě v autobusech:

- Autobusy mají přesně stanovené pracovní cykly, centralizované čerpání paliva a servisní infrastrukturu.
- Autobusy jsou velké, poskytují tak rozsáhlé prostory pro instalaci palivových článků a jejich příslušenství.
- Současné naftové autobusy produkují škodliviny a jsou hlučné, z tohoto pohledu přinášejí palivové články podstatné zlepšení.
- Výrobci autobusů si obecně nevyvíjejí svoje vlastní pohonné jednotky, obvykle spolupracují s jinými výrobci pohonných jednotek, kteří se snaží vyhovět nejnovějším technologiím.
- Dopravci podporují rozvoj příslušnými dotacemi a pomáhají tak uhradit většinu nákladů souvisejících s technologickým vývojem autobusů.
- Autobusy jsou společnostmi vysoce využívány, poskytují tak palivovým článkům výbornou reklamu.
- Pohon autobusů palivovými články může být snadno přenesen na aplikace středních a těžkých vozidel.

Následkem toho vlády v Severní Americe, Evropě a Asii začaly podporovat projekty autobusů poháněných vodíkovými palivovými články, počet autobusů s tímto pohonem dnes roste téměř exponenciální řadou. V roce 2003 se počet vyrobených autobusů s palivovými články oproti roku 2002 zdvojnásobil a celkový úhrn vyrobených kusů se vyšplhal na hodnotu 65 po celém světě. Ve všech případech se jedná o "demonstrační" autobusy, vyráběné, až na pár výjimek, pouze v jednom exempláři za účelem sbírání dat a prokázání správnosti zvolené technologie vzhledem k nákladům, výkonu a spolehlivosti.

Stanovení cílů práce

- Shrnout dosavadní poznatky o autobusech poháněných palivovými články na vodík (studie o pohonu autobusů elektromotorem napájeným z palivových článků).
- Utvořit si obrázek o tom, jak se bude vyvíjet pohon palivovými články u vozidel - městských autobusů - v následujících 20 letech (odvození scénáře trhu).
- Zhodnotit vodík, jakožto palivo pro palivové články (výroba, distribuce, vlastnosti, cena).
- Zpracovat projekt městského autobusu s vodíkovými palivovými články (možná řešení uspořádání pohonu + praktické aplikace; popis základních částí pohonu a funkce, včetně jejich nejruznějších modifikací; zpracovat schéma zapojení možné varianty pro podrobnější rozpracování projektu).
- V rámci úvodního projektu (I. etapa) navrhnout jednotlivé hlavní agregáty pohonu a provést jejich zástavbu do současně vyráběného městského autobusu v prostředí 3D (projekční náčrty).
- Určit předpokládané provozní parametry autobusu včetně celkové účinnosti navrženého pohonu.

2 STUDIE O POHONU AUTOBUSŮ ELEKTROMOTOREM NAPÁJENÝM Z PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ

2.1 Odvození scénáře trhu

Na základě vysoké ceny nových pohonných technologií lze předpokládat zvyšující se prodej vozidel s palivovými články do roku 2020 jen v ekologicky citlivých oblastech a uzavřených centrech. Tento potenciál obsahuje pouze část světového trhu vozidel a je dále označen jako "teoretický potenciál trhu". Prognózu pro zavádění palivového článku pro pohon vozidel můžeme rozdělit do tří fází:

Fáze I

Z jednotlivých kroků výrobců lze soudit, že v první fázi zavádění vozidel s palivovým článkem nebude energie odebírána ze zásoby vodíku ve vozidle, ale z pomocné technologie. Vodík bude získáván přímo ve vozidle reformací (obr. 16). V této fázi stávající spalovací motor silně konkuruje palivovému článku. Na základě vysoké ceny při zavádění pohonu palivovým článkem (pro nízký počet vyrobených kusů) a omezené výhody tohoto pohonu, bude velmi nízká poptávka. Cenový rozdíl mezi vozidly s palivovým článkem oproti pohonu zážehovým motorem bude 30 – 300 %.

Fáze II

Vysoký zájem vývojových pracovníků dává tušit, že do roku 2015 bude vyřešeno tankování vodíku do vozidla a začne i sériová výroba. Postupně se začnou využívat výhody palivového článku: nulové emise a rozvoj vodíkového hospodářství s jeho získáváním pomocí sluneční energie umožňující základní řešení problému s CO₂. Bude docházet k plošnému pokrývá infrastrukturou (čerpací stanice vodíku).

Na potenciálním trhu (USA, Evropa i Japonsko) nastupuje nová technologie pohonu. Pohon palivovým článkem má ještě stále nevýhodu ve vyšších pořizovacích cenách (ovšem už jen o 10 – 100 %). Palivový článek se začíná ucházet o prvenství díky vysokému jízdnímu výkonu těsně před rokem 2020, kdy se začínají zvyšovat ceny konvenčních paliv (benzinu a nafty) i daně z CO₂. Podle tohoto scénáře lze tvrdit, že do roku 2020 bude vyčerpáno asi 20 % teoretického potenciálu trhu, tj. 3 miliony nově prodaných vozidel budou vybaveny palivovým článkem.

Fáze III

Po roce 2020 se pohon pomocí palivového článku rozšíří i na další území. Podle optimistického názoru by mohlo být na potenciálních trzích do r. 2025 prodáno již 50 % těchto vozidel (7 milionů ročně). Ve zbytku trhu dosáhne poptávka do roku 2025 hranice 10 až 25 %. Tím přibude dalších až 7 milionů vozidel s palivovým článkem. [3]

Prognóza pro zavádění palivového článku pro pohon vozidel viz. tabulka 1.

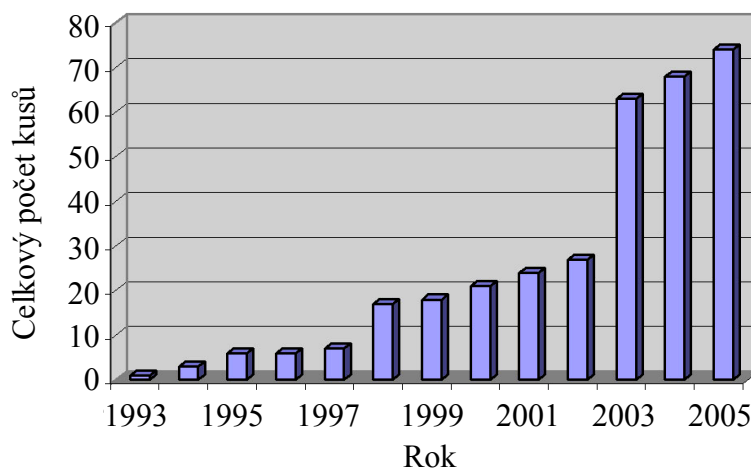
Tab. 1. Prognóza pro zavádění palivového článku pro pohon vozidel.

Fáze I 2005	Fáze II 2010 - 2015	Fáze III 2015 -2025
První sériové vozidlo	Vysoká cenová nevýhoda (20% nad konvenční pohon)	Cenová nevýhoda (10% nad konvenční pohon)
Vysoký zájem výrobců vozidel	Řídká infrastruktura sítě čerpadel a servisu	Cenová výhoda čerpání (daň z CO ₂)
Cenová nevýhoda (30% nad konvenční pohon)	Poptávka v uzavřených oblastech po "nulových emisích"	Výstavba plošného pokrytí sítě čerpacích stanic
Nejistota možností celodenního použití	Optimalizace motoru, prosazování hybridního pohonu	Stoupá privátní poptávka
Nedostatečná infrastruktura	Omezená výhoda technologie reformeru	Reakce výrobců na poptávku
Zavedení autobusů v uzavřených oblastech	Rozšiřování autobusů v uzavřených oblastech	100% autobusů s pohonem palivovým článkem

2.2 Stručný přehled

V současné době je nejvíce autobusů poháněných elektromotorem napájeným vodíkovými palivovými články provozováno v Evropě. Projekt CUTE (Clean Urban Transport for Europe) má na starosti 30 autobusů poháněných elektromotorem a vodíkovými palivovými články v devíti evropských městech a na Islandu. Tři další autobusy operují v Perthu a Austrálii. Taktéž program Evropské unie CITYCELL provozuje další čtyři autobusy s pohonem vodíkovými palivovými články v Madridu, Berlíně, Paříži a Turíně.

Ostatní země též jeví velký zájem o autobusy s pohonem palivovými články. Čína zamýšlí využít až 100 těchto autobusů při příležitosti olympijských her v Pekingu v roce 2008. Spojené národy podporují rozmístění až 40 autobusů v různých městech.

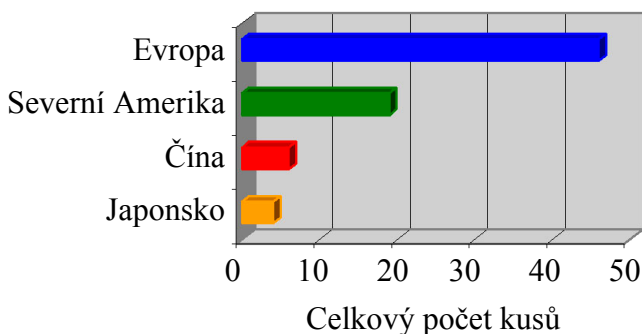


Obr. 1. Nárůst počtu vyrobených autobusů poháněných palivovými články: 1993-2005.

V Severní Americe jsou nebo budou testovány autobusy s pohonem elektromotorem napájeným palivovými články v několika oblastech:

- Šest autobusů v Chicagu a Vancouveru v rozmezí let 1998 a 2000.
- Od roku 2004 sedm autobusů v programu California Fuel Cell Partnership. Tři autobusy byly vyrobeny firmou GILLIG a rozmístěny v oblastech Santa Clara Valley a Kalifornii. Čtyři autobusy vyrobila firma Van Hool pro přepravní společnosti AC Transit a Sun Line Transit.
- Demonstrační autobusy v brzké době plánuje provozovat Las Vegas.
- Plánován je též provoz v Dallasu pro městskou dopravu.
- Potenciálně plánuje rozšířit program své třetí generace autobusu poháněného palivovými články typu PEMFC univerzita v Georgetownu.
- Déle než tři roky funguje projekt autobusu s pohonem palivovými články o výkonu 180 kW, s rekuperací energie při brzdění, v Kanadě, v rámci plánu Natural Resources Canada.
- Koalice, známá pod zkratkou NFCBTI (National Fuel Cell Bus Technology Initiative), si prosadila udělení dotace ve výši 150 miliónů dolarů ze státního dopravního fondu pro rozvoj autobusů poháněných palivovými články. Následně bude autobusy provozovat v dalších městech. Členové koalice jsou: AC Transit, Ballard, Boeing, CEO (Coalition to Advance Sustainable Technologies), ECD Ovonic, Hydrogenics, ISE Research, NAVC (Northeast Advanced Vehicle Consortium), Quantum Technologies, Sun Line Transit, Texaco Ovonic Hydrogen Systems, Thor Industries a TriMet (Tri-Metropolitan Transportation District of Oregon).

Jak je vidět z grafu na obrázku 2, Evropa je v současné době v počtu provozovaných autobusů s pohonem palivovými články na prvním místě, z velké části díky projektu CUTE. Očekává se, že si i nadále bude udržovat silnou pozici, hlavně z důvodu rostoucího zájmu o předvádění nových projektů v mnoha Evropských městech. Ostatní regiony nehodlají zaostávat. Na Dálném Východě předvedli nebo plánují předvést flotily autobusů poháněných palivovými články v řadě významných mezinárodních událostí.



Obr. 2. Zastoupení autobusů s pohonem palivovými články v různých oblastech.

2.3 Významné projekty a výrobci autobusů poháněných palivovými články

2.3.1 DaimlerChrysler

Společnost EVOBUS, která vznikla v roce 1995 sloučením firem Setra a DaimlerChrysler, prošla vývojem tří generací autobusů s pohonem palivovými články.

První generaci nazvanou NEBUS (No Emissions Bus) představil Mercedes-Benz v roce 1997. NEBUS uskutečnil přes 540 hodin testovacích jízd v Norsku a Německu. V Hamburku na zvláštní lince č. 101, která spojovala nákupní zóny v centru města, najezdil autobus 1 387 km. Cestujícím se líbil nejen proto, že mohli jezdit zdarma, ale také pro čistý a mimořádně tichý provoz bez trhavých pohybů. Za uvedené období spotřeboval autobus 171 kg vodíku. Vodík je umístěn v sedmi tlakových nádržích na střeše autobusu pod tlakem 300 barů, což umožňuje dojezd 250 km, přívod kyslíku je zajištěn nasáváním okolního vzduchu. Pohon autobusu zajišťují dva kompaktní elektromotory s pevným převodem, každý o výkonu 75 kW, které jsou umístěny v nábojích kol zadní nápravy. Tak odpadla potřeba použít automatickou převodovku, k regulaci otáček slouží vnější planetová převodovka s přídatnými čelními převody. Pro chlazení elektromotorů je nutný nezávislý chladicí okruh.

Druhá generace autobusu dostala jméno ZEBUS (Zero Emission Bus), vyvinuta byla v roce 1999 pro společnost Sun Line Transit. Ta autobus předváděla 13 měsíců v Kalifornii a za tuto dobu autobus absolvoval téměř 24 500 testovacích kilometrů.

Poslední generace autobusu, Citaro (obr. 3), je testována v Evropě. Citaro byl představen v roce 1997 jako autobus určený pro městská centra. Jedná se o 12 metrů dlouhou nízkopodlažní verzi se třemi dveřmi s kapacitou 70 cestujících.



Obr. 3. Mercedes-Benz Citaro.

Výkon palivových článků byl modifikován na hodnotu 205 kW, což je hodnota srovnatelná s výkonem jinak používaných naftových motorů, umístěny jsou na střeše před chladicími ventilátory. Palivové články jsou schopny vygenerovat více jak 600 V elektrického napětí. Jako palivo používají vodík, stlačený v tlakových nádržích na střeše pod tlakem 350 barů. Vysokotlakých nádržích je celkem devět, každá o objemu 250 litrů. Kapacita nádrží umožňuje dojezd asi 200 km. Elektromotor, převodovka a hnací hřídel jsou umístěny v zadní části autobusu. Maximální rychlost se pohybuje okolo 80 km.h⁻¹. Cena jednoho autobusu byla stanovena na 1,25 miliónů euro včetně servisních služeb po dobu dvou let, subvenci však nedostane každý.

Autobusy Citaro jsou provozovány v devíti evropských městech v rámci programu CUTE (Clean Urban Transport for Europe): Amsterdam, Barcelona, Hamburg, Londýn, Luxembourg, Madrid, Porto, Stockholm a Stuttgart. Další tři autobusy Citaro operují na Islandu pod projektem ECTOS (Ecological City Transport System) a další tři byly doručeny do Perthu a Austrálie v rámci projektu STEP (Sustainable Transport Energy Program). Autobusy jsou zde testovány na každodenních městských linkách, prokazují tak svou provozuschopnost v chladných skandinávských zimách, teplých španělských létech a v rovinatých a kopcovitých oblastech Stuttgartu. Celkem se vyrobilo 12 autobusů z plánovaných 33 kusů (2007), čímž se DaimlerChrysler stal první společností, která vyrobila jeden typ autobusu s palivovými články v sérii.

Kromě technologie pohonu palivovými články pracuje EVOBUS na dalších inovacích, například se jedná o systém automatického rozpoznávání dopravního koridoru, systém pro udržování vzdálenosti a rychlosti za jedoucím vozidlem, infračervená světla pro lepší vidění v noci a aplikace pro elektronické řízení brzd.

2.3.2 Irisbus

Společnost Irisbus se v roce 1999 stala partnerem skupiny Iveco a Renault. Irisbus se účastní evropského programu CITYCELL. Program má na starosti pět autobusů provozovaných v Turíně, Berlíně, Madridu a Paříži. Tři z těchto autobusů vyrobila společnost Irisbus. Jeden autobus s pohonem palivovými články převáží cestující v Turíně a zbývající dva operují jako zkušební v Madridu.



Obr. 4. Irisbus - Iveco – Renault.

Autobus v Madridu (obr. 4) je poháněn palivovými články typu PEMFC o výkonu 62 kW, které vyrobila společnost UTC (United Technologies Corporation). Autobus disponuje invertorem a elektrickým hnacím ústrojím vyrobeným firmou ANSALDO, kyselinoolovenými elektrickými články a devíti nádržemi pro stlačený vodík.

2.3.3 Gillig

Firma Gillig působí na trhu již 110 let, v současné době vyrábí těžké dálkové autobusy. Základními typy jsou: Standardní modely dálkových autobusů nazvaných Phantom a nejnovější nízkopodlažní autobusy pro městský provoz. Gillig je druhý největší výrobce autobusů v Severní Americe a produkuje více jak 1 200 autobusů ročně pro různé zákazníky na Floridě či Aljašce.

Gillig doručil v roce 2004 do Santa Clara VTA (Valley Transportation Authority) tři nízkopodlažní autobusy poháněné palivovými články (obr. 5). Autobusy jsou využívány v plném provozu, jsou vybaveny klimatizací, výsuvnou plošinou pro vozíčkáře a zvukovým systémem pro identifikaci autobusových zastávek. Autobusy operují v San Jose v rámci programu VTA, v dopravní oblasti San Mateo, a v Kalifornii pod programem California Fuel Cell Partnership a California Air Resources Board.



Obr. 5. Gillig – Phantom.

Autobusy jsou poháněny palivovými články o výkonu 205 kW, vyrobené firmou Ballard, palivem je stlačený vodík. Tankování se provádí u speciální čerpací stanice s nádržemi o celkovém objemu 34 000 litrů zkapalněného vodíku. Natankování paliva trvá přibližně 12 minut.

Program je zaměřen zejména na zhodnocení využitelnosti palivových článků v dopravě, bezpečnosti čerpání paliva, a vyhodnocení nákladů, výkonu a jednoduchosti údržby. Zaměřuje se na školení pracovníků a na veřejné vzdělávání a uvědomění.

Celkový programový rozpočet činí 18 450 000 dolarů, z něhož je 10 565 000 dolarů určeno pro autobusy a 3 103 000 dolarů na příslušné vybavení.

2.3.4 MAN

Firma MAN vznikla v roce 1986, nyní zaměstnává 75 000 lidí v pěti divizích. MAN patří mezi největších zásobovatele standardních automobilových dílů na evropském trhu.

MAN v roce 2000 odhalil svůj první autobus poháněný palivovými články vyvinutý různými průmyslovými partnery. Autobus velkou měrou financovalo Bavorské státní ministerstvo pro ekonomické záležitosti, dopravu a technologii. Autobus je založen na nízkopodlažním modelu MAN NL 263 a NL 163 BZ (obr. 6). Pro pohon využívá čtyři moduly palivových článků typu PEMFC firmy Siemens o celkovém elektrickém výkonu 120 kW. Výkon je rozdělen mezi dva asynchronní elektromotory PV5135 namontovaných v nábojích kol, každý o výkonu 75 kW. Stlačený vodík je uložen v devíti tlakových nádržích Dynetek na střeše autobusu pod tlakem 250 barů. Celkový objem nádrží 1 548 l poskytuje dojezd asi 250 km.



Obr. 6. MAN NL 163 BZ.

Autobus byl využíván v běžném městském provozu po dobu šesti měsíců koncem roku 2000 a začátkem roku 2001. Za tuto dobu překonal vzdálenost větší jak 8 000 km. Odezva cestujících byla velice pozitivní. Řidič též v provozu nezaznamenal žádné rozdíly oproti řízení typického dieselového autobusu. Z technických poznatků získaných zkušebním provozem byly stanoveny pro následující verzi autobusu tyto změny: Snížení celkové hmotnosti a spotřeby, zdokonalení palivových článků a zvýšení jejich výkonu, zavedení hybridního systému pro rekuperaci elektrické energie a redukce provozních nákladů (vzhledem k inflaci a cenám vodíku).

V květnu roku 2003 představil MAN společně s firmou Ballard Power Systems nový hybridní autobus poháněný palivovými články. Autobus bude využíván na letišti v Mnichově. Nízkopodlažní autobus je poháněn palivovými články typu PEMFC o výkonu 68 kW, palivem je vodík stlačený v tlakových nádržích umístěných na střeše. Autobus je vybaven brzdovou soustavou s možností rekuperace energie při brzdění. Avšak kvůli problémům s palivovými články stále ještě není v úplném provozu.

MAN spadá pod sdružení CEP v Berlíně (Clean Energy Partnership Berlin). Projekt CEP byl založen v roce 2002 za účelem testování životaschopnosti vodíkové ekonomie a je dotován německou vládou. Autobusy MAN jsou též součástí programu THERMIE, který provozuje autobusy na palivové články s palivem na tekutý vodík v Lisabonu, Kodani a Berlíně.

2.3.5 NABI (North American Bus Industries)

Společnost NABI vyrábí a nabízí dálkové autobusy s dieselovým pohonem, s pohonem na CNG (stlačený zemní plyn) a s pohonem na LNG (zkapalněný zemní plyn). NABI, Inc. spadá pod společnost NABI, Rt., která byla založena v Maďarsku v roce 1992. Hlavní výrobní zařízení má NABI v Annistonu, jedná se o dvě autobusové montážní dílny, nachází se zde též vývojové a výzkumné centrum. Sem se dovážejí karosérie autobusů z NABI Rt. a provádí se konečná montáž.



Obr. 7. NABI 45C-LFW.

NABI vyrobila modely 40C-LFW a 45C-LFW (obr. 7), což jsou hybridní autobusy poháněné vodíkovými palivovými články. Aktuálně NABI spolupracuje se Sun Line Transit v Palm Springs, Kalifornii, kam nasadila 13,5 metrů dlouhý model 45C-LFW s výkonnými palivovými články. Autobus využívá palivových článků od firmy UTC (United Technologies Corporation) o celkovém výkonu 170 kW a systému pro rekuperaci energie při brzdění. Získaná energie se ukládá buď do akumulátorů nebo do ultrakondenzátorů, což poskytuje vozidlu extra zrychlení a výkon pro překonání velkých stoupání.

Autobus testovaný v Palm Springs je zatěžován extrémními vedry, která jsou pro tuto oblast typická. Převážní společnost Sun Line také srovnává pohon palivovými články se současnou verzí autobusu s pohonem na CNG. Z počátku byl totiž autobus vybaven pohonem na CNG a později dodán strojírenské firmě ISE Research v San Diegu na přestavbu. ISE do autobusu nainstalovala palivové články a hybridní elektrický pohon ELFE od firmy Siemens. ISE též přizpůsobila stávající vysokotlaké nádrže zemního plynu pro skladování stlačeného vodíku. Nádrže jsou umístěny na střeše autobusu.

Sun Line Transit též spadá do společenství California Fuel Cell Partnership, se kterým spolupracuje na rozvoji vodíkových čerpacích stanic.

2.3.6 Neoplan

Společnost Neoplan byla pod jiným názvem založena již v roce 1935 ve Stuttgartu v Německu. Od této doby Neoplan vyrobil a prodal více jak 35 000 autobusů. V roce 1981 otevřel pobočku ve spojených státech. V současnosti probíhá výroba autobusů jak v Německu tak v USA.

Hlavním produktem Neoplanu jsou malé 9 m dlouhé autobusy N8008FC (obr. 8) určené pro města a letoviska. Tyto autobusy jsou založené na originálním nízkopodlažním typu s kompaktním designem o maximální kapacitě 12 sedících a 35 stojících cestujících. Autobusy od roku 1999 operují v lázeňském městě Oberstdorf v Německu.



Obr. 8. Neoplan N8008FC.

Autobus má nainstalovány tři moduly palivových článků typu PEMFC s výkonem 40 kW a velkokapacitní akumulátory o výkonu 21 kW, které jsou dobíjeny rekuperací při brzdění. Pohon zajišťují hnací elektromotory chlazené vodou. Palivem pro palivové články je stlačený vodík, uložený v nádržích z uhlíkových vláken na střeše autobusu. Akční rádius autobusu je 600 km.

V květnu roku 2000 představil Neoplan nový hybridní typ poháněný vodíkovými palivovými články. Toto 12 metrů dlouhé vozidlo je vybaveno 80 kW palivovými články typu PEMFC a unikátním 100 kW setrvačnickovým pohonem, který poskytuje potřebné zrychlení a přidavnou hnací sílu do kopce.

2.3.7 New Flyer

Firma New Flyer je největším výrobcem dálkových autobusů v Severní Americe. Společnost započala výrobu v roce 1930 stavbou nákladních aut a karosérií autobusů. V roce 1960 přešla výhradně na výrobu autobusů a stala se výhradním dodavatelem pro USA. V roce 1986 byla firma odkoupena největším holandským výrobcem autobusů, který si ponechal název New Flyer a v roce 1987 vystavěl v USA novou továrnu. V současnosti má New Flyer výrobní zařízení ve Winnipegu v Kanadě, v Crookstonu v Minnesotě a v St. Cloud v Minnesotě.

New Flyer produkuje celou škálu vozidel poháněných nejrůznějšími palivy, jako stlačeným zemním plynem (CNG), zkapalněným zemním plynem (LNG) a hybridním diesel-elektrickým pohonem.

New Flyer v roce 1993 poprvé u svého nového autobusu P1 využil palivových článků a stal se tak prvním výrobcem autobusu s tímto druhem pohonu na světě. Jednalo se o palivové články typu PEMFC o výkonu 90 kW, jako palivo bylo využito stlačeného vodíku. V roce 1995 představil vylepšenou, ve vnitřním prostoru nezmenšenou, variantu P2 s palivovými články o výkonu 260 kW a nádržemi s kapacitou 2 738 l stlačeného vodíku pod tlakem 25 MPa. V rozmezí let 1997 až 2000 byly tři autobusy New Flyer P3 (obr. 9) testovány ve Vancouveru a Chicagu pod programem CTA (Chicago Transport Authority). Autobusy za tuto dobu nasbíraly více jak 117 500 testovacích kilometrů. Všechny autobusy využívaly palivové články dodané firmou Ballard.



Obr. 9. New Flyer P3.

V roce 2002 představila vláda Kanady a společnost Hydrogenics svůj nový projekt pohonu hybridního autobusu na vodíkové palivové články, jenž je namontován v autobusu New Flyer. Autobus je předváděn ve Winnipegu a dalších kanadských městech. Ukončení projektu bylo naplánováno na konec roku 2005. Projekt využívá hybridní technologie vyvinuté v Hydrogenics. Tato technologie umožňuje při uvolnění akceleračního pedálu zpětně dodávat zdroji pohonu elektrickou energii. Autobus je vybaven ultrakondenzátory, které jsou dobíjeny elektrickou energií zpětně získanou při brzdění. Ultrakondenzátory pro tento účel dodala firma Maxwell Technologies. Autobus využívá technologie stlačeného vodíku. Vozidlo má několik modulů palivových článků o celkovém výkonu 180 kW. Takovýto výkon je již plně srovnatelný s ekvivalentními pohony a umožní rychlejší přechod k pohonu palivovými články.

Projekt stál celkem 8 miliónů dolarů, při čemž v první fázi přispělo sdružení NRCan (Natural Resources Canada) 2 milióny dolarů, v druhé fázi přispělo 1 miliónů dolarů, a zbytek uhradil Hydrogenics se svými partnery.

Projekt byl ukončen podle plánu v březnu 2004 a nyní provádí silniční zkoušky přepravní společnost Winnipeg Transit.

2.3.8 NovaBus

Společnost NovaBus vznikla v roce 1993 odkoupením autobusového výrobce MCI v Saint-Eustache, Quebec. V roce 1998 byla firma NovaBus odkoupena firmou Prevost Car, Inc., patřící autobusovému koncernu Volvo a Henlys skupiny PLC. V současnosti NovaBus vlastní výrobní zařízení v Quebecu v Kanadě.

Vláda spojených států od roku 1983 financuje výzkum autobusů s pohonem palivovými články, které jsou součástí projektu Univerzity v Georgetownu ve Washingtonu, D.C. Program začal vývojem tří 12 m dlouhých autobusů. V roce 1993 Federální dopravní úřad začal financovat program demonstrující komerční životaschopnost autobusů poháněných palivovými články, jehož výsledkem byly dva dvanáctimetrové hybridní autobusy.



Obr. 10. NovaBus, druhá generace.

Oba autobusy byly vyvinuté na základě platformy firmy NovaBus (obr.10). Každé vozidlo využívá palivové články s výkonem 100 kW s akumulátorovým modulem a systém pro rekuperaci elektrické energie při brzdění. Jeden autobus využívá články s kyselinou fosforečnou typu PAFC, které vyrobila firma UTC (United Technologies Corporation). Použité je elektrické hnací ústrojí vyvinuté firmou BAE Systems Controls. Firma Booz-Allen & Hamilton, Inc. vyvinula řídicí systém autobusu. Druhý autobus používá palivové články typu PEMFC od firmy XCELLSiS. Palivem je u obou autobusů metanol.

2.3.9 Toyota

Toyota Motor Corporation se v roce 1937 oddělila od dceřiné společnosti Toyota Automatic Loom Works, která vznikla o několik let dříve. V roce 1956 firma expandovala na automobilový trh. V roce 1966 se sloučila s firmou Hino Motors, výrobcem nákladních aut a autobusů.

V roce 2001 Toyota odhalila FCHV-BUS1, nízkopodlažní hybridní autobus s pohonem palivovými články (obr. 11), jehož základem je nízkopodlažní městský autobus od firmy Hino Motors. Vozidlo má nainstalovány palivové články o výkonu 160 kW vyvinutých Toyotou, nikl-metal hydridové akumulátory a rekuperační brzdňý systém. Autobus využívá stlačeného vodíku uloženého v tlakových nádržích na střeše, kapacita nádrží umožňuje dojezd 290 km.



Obr. 11. FCHV-BUS1.

V roce 2002 Toyota představila vylepšenou verzi, nazvanou FCHV-BUS2. Tato verze využívá dvou modulů 90 kW palivových článků vyvinutých Toyotou a hybridní hnací systém. Hybridní pohon se skládá ze dvou elektromotorů, každý s maximálním výkonem 80 kW a točivým momentem 260 Nm. Tak jako první i druhá verze využívá jako palivo stlačeného vodíku.

Autobus je od srpna 2003 používán v Tokiu. Maximální počet cestujících může být 60. V roce 2005 Toyota využila znovu vylepšenou verzi FCHV-BUS2 v rámci EXPO 2005 v Aichi v Japonsku. Autobus na výstavě přepravil 1 000 pasažérů za hodinu na trase dlouhé 3,2 km.

2.3.10 Thor

Thor Industries, Inc. byl založen v roce 1980. Thor se v roce 1984 stal veřejnoprávní společností a se svými 4 000 zaměstnanci je v současnosti největším výrobcem autobusů střední velikosti ve spojených státech.

Thor Industries, Inc. se spojil s podnikem ISE Research za účelem vytvořit ThunderPower (obr. 12). V roce 2001 Thor dostal od ministerstva pro dopravu grant ve výši 750 000 dolarů, aby vyvinul hybridní autobus s pohonem palivovými články. V roce 2002 se 9 metrů dlouhý autobus známý pod názvem ThunderPower poprvé objevil u přepravní agentury Sun Line Transit. Tím se stal prvním autobusem poháněným palivovými články v Kalifornii, který přepravoval cestující na běžných trasách.



Obr. 12. ThunderPower.

ThunderPower je poháněn palivový články typu PEMFC o výkonu 75 kW, vyrobených firmou UTC (United Technologies Corporation). Palivové články produkují elektřinu pro dva elektromotory a nabíjejí akumulátory. Součástí pohonu je též rekuperační brzdňý systém.

TunderPower využívá stlačeného vodíku jako paliva. Oproti konvenčnímu pohonu je výhřevnost paliva dvojnásobná. Autobus pojme 26 cestujících a je schopen překonat vzdálenost 320 km.

Autobus využívá hnacího systému ISE-TVI ThunderVolt. Ten se skládá ze dvou elektromotorů se zdvojeným regulátorem, což umožňuje dosahovat běžného výkonu 170 kW a špičkového výkonu 288 kW. Systém vyvinula firma ISE-TVI.

2.3.11 Van Hool

Bernard Van Hool založil společnost v Belgii v roce 1947. Společnost produkuje tisíce vozidel ročně a stala se druhým největším výrobcem autobusů v Evropě.

Van Hool byl do projektu autobusu poháněného palivovými články zapojen více jak jednu dekádu. Uprostřed devadesátých let se účastnil vývoje 18 metrů dlouhého alkalickými palivovými články poháněného autobusu. Autobus, který jako palivo využíval kapalného vodíku, byl předváděn v Bruselu. Palivové články dávaly výkon 78 kW a byly podpořeny sadou akumulátorů, celkový výkon se tak vyšplhal k hodnotě 200 kW. Na projektu se spolupodílely firmy Elenco (palivové články), Ansaldo (elektrické komponenty), Air Products (vodíkové vybavení) a SAFT (nikl-kadmiové akumulátory).



Obr. 13. Van Hool A330.

V současnosti Van Hool postavil čtyři ze sedmi plánovaných autobusů poháněných palivovými články (obr. 13), které jsou vyhodnocovány v rámci programu California Fuel Cell Partnership. Hybridní hnací systém a řídicí systémy pro tento autobus navrhla firma ISE Corporation ze San Diega. Palivové články dodala firma UTC (United Technologies Corporation).

Autobusy jsou založeny na modelu Van Hool A330, který dostal ocenění "Autobus roku", v soutěži mezi ostatními evropskými autobusovými výrobci. Autobus se vyznačuje mnohými inovacemi včetně nepřetržitě nízké podlahy v celé délce autobusu, tří širokých dveří, prostorného interiéru, panoramatických bočních oken a moderními interními i externími informačními displeji.

Tři autobusy provozuje přepravní společnost AC Transit. Vozidla jsou srovnávána s výkonnými dieselovými autobusy. Čtvrtý autobus slouží přepravní společnosti Sun Line Transit. Projekt započal v září roku 2005.

2.3.12 Volvo

Skupina Volvo patří mezi největší světové výrobce nákladních aut, autobusů, stavebních zařízení, hnacích systémů a leteckých dílů. Založena byla v roce 1927, zaměstnává zhruba 72 000 lidí, má výrobní zařízení v 25 zemích a operuje na více jak 185 trzích světa.

Společnost Volvo Bus spolupracuje s největším německým městským provozovatelem dopravy BVG (Berliner Verkehrsbetriebe) a dodalo tomuto dopravci pro provoz v Berlíně dva dvoupodlažní autobusy poháněné palivovými články. Jedná se o první dvoupodlažní autobusy tohoto druhu na světě.

Autobus je poháněn palivovými články typu PEMFC vyvinuté firmou Proton Motor, německým výrobcem palivových článků. Autobus je 15 metrů dlouhý a pojme 130 pasažérů, většinu sedících (obr.14).

Jedná se o druhý pokus předvést autobusy poháněné palivovými články v Berlíně. Poprvé se o provoz těchto autobusů pokusila firma MAN, která ale z důvodů problémů s palivovými články neuspěla. [7]



Obr. 14. Volvo.

2.3.13 Ostatní (DICP, Enova, Scania)

Čínská vláda podporuje výzkum palivových článků ve velmi širokém rozsahu již od roku 2001, mimo jiné financuje vývoj autobusů s tímto druhem pohonu. Ze státního rozpočtu přidělila 106 milionů dolarů projektům hybridních autobusů s palivovými články. Společně s podporou průmyslových odvětví zamýšlí vyvinout dva plnohodnotné autobusy s palivovými články s výkonem 150 kW do konce roku 2005. Většina dotací bude rozdělena mezi následující čínské společnosti, zabývající se vývojem pohonu palivovými články: Delian Sunrise Power a DICP (Delian Institute of Chemical Physics), Shanghai Shen-Li High Tech, vedením projektu byly pověřeny univerzity Tongji a Tsinghua. Autobusy budou sloužit projektu GEF (Global Environment Fund Fuel Cell Bus Programme).

V období 2001-03 demonstroval institut DICP několik menších autobusů s 30 kW palivovými články. Na jaře 2003 předal tento ústav svůj nový 75 kW palivový článek univerzitě Tsinghua, která předvedla již v roce 2001 malý dvanáctisedadlový autobus, s maximální rychlostí 90 km.h⁻¹ a s dojezdem 160 km na jednu náplň paliva.

Enova Systems (USA) poskytuje výrobcům těžkých vozidel, včetně autobusů, palivové články s výkonem až 240 kW, sama vyvíjí menší pohonné jednotky pro malé hybridní autobusy. Enova v roce 2004 podepsala spolupráci s čínským závodem First Auto Works, kterému bude dodávat menší hybridní hnací systémy s palivovými články pro jejich autobusy. Enova se též podílí na vývoji malých hybridních autobusů pro letecké síly v Hickham Air Force Base.

Scania představila svůj koncept autobusu s nulovými emisemi s palivovými články poprvé na výstavě UITP v Londýně v roce 2001. Nízkopodlažní autobus má hybridní pohon palivovými články a akumulátory a je především určen pro provoz v městských centrech. Koncept je poháněn elektromotory umístěnými v nábojích kol, které jsou napájeny z palivových článků typu PEMFC o účinnosti 57 %, s integrovanými 600 V akumulátory, které se dobíjí též při rekuperačním brzdění. Tím byla spotřeba energie redukována na 60 % oproti pohonům s dieslovým motorem. Vynikajícími vlastnostmi autobusu jsou velmi nízký hluk (70 dB, což jsou emise hluku nižší než u malého osobního automobilu), vibrace a plynulý přenos energie. Palivové články jsou napájeny stlačeným vodíkem umístěným v tlakových nádržích na střeše.

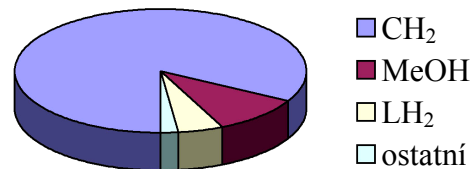
Prototyp je výsledkem spolupráce firem Scania, Air Liquide, Nuvera, CEA, SAR a univerzity Genoa, v projektu podporovaného fondy Evropské unie nejaderného energetického programu JOULE. Celkový rozpočet činí 4,3 milionů euro.

Kompletní přehled všech dosud vyrobených typů autobusů s palivovými články viz. *příloha 1*, str. 51-55.

3 PROJEKT POHONU MĚSTSKÉHO AUTOBUSU ELEKTROMOTOREM S PALIVOVÝMI ČLÁNKY NA VODÍK

3.1 Palivem je vodík

V současnosti je nepoužívanějším palivem pro palivové články stlačený vodík (CH_2), přičemž zájem o jeho alternativu metanol (MeOH) a tekutý vodík (LH_2) postupně klesá (obr. 15). Výroba vodíku je zatím velmi nákladná a náročná na elektrickou energii, vodík je však možné získávat v neomezeném množství.



Obr. 15. Využití paliv u autobusů s pohonem palivovými články.

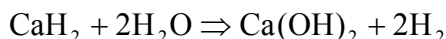
Je potřeba zdůraznit, že vodík není energetickým zdrojem, ale nosičem energie. Pro hlavní výrobu vodíku prostřednictvím elektrolýzy je nutný další významný energetický nosič - elektřina. Obdobně jako u elektřiny, výhody užití vodíku jako paliva, bezpečnost zásobování a nulová tvorba skleníkových plynů závisí na tom, jak je vodík vyráběn. Je-li vodík vyráběn pomocí elektřiny např. vyráběním z uhlí, zvýší se sice bezpečnost zásobování, ale výrazně se zvýší emise CO_2 . Je-li vodík vyráběn pomocí elektřiny z nefosilních zdrojů (nukleární nebo obnovitelné), zvýší se bezpečnost zásobování a sníží se emise CO_2 , ale přidávají se další vlivy tohoto způsobu výroby elektřiny, například nedořešení uložení jaderného odpadu, omezenost obnovitelných zdrojů apod. Při výrobě vodíku elektrolýzou vody použitím elektrické energie vyrobené z obnovitelných zdrojů, je vodík nejčistším současným palivem.

Vodík jako budoucí rozšířený energetický nosič má výhody (obdobně jako elektřina), že může být vyráběn z různých energetických zdrojů a (na rozdíl od elektřiny) může být skladován. Hlavní výhodou vodíku jako energetického nosiče je, že nabízí cestu k decentralizovanému energetickému trhu na bázi nefosilních paliv. Je zřejmé, že potenciální výhody vodíku jako motorového paliva budou dosaženy po dalším úspěšném technologickém vývoji zásobníků vodíku a technologie palivových článků a po nákladných investicích do výroby vodíku a jeho distribuce. [3]

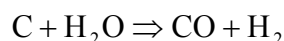
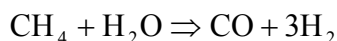
Možné způsoby výroby vodíku

V dnešní době se při výrobě vodíku nejvíce využívá metody zplynování uhlí. Touto metodou se vyrobí 90 % produkce. Za další perspektivní metody se považují: elektrolýza vody, termické štěpení vody a zplyňování biomasy, zvláště biomasy odpadní.

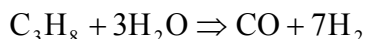
Vodík lze vyrobit reakcí vody nebo zředěných kyselin s elektropozitivními kovy. Reakce může být explozivní. Laboratorní metody užívají pro přípravu vodíku reakce sodíkového amalgamu nebo vápníku s vodou, popř. reakci zinku s kyselinou chlorovodíkovou. Pro přípravu malého množství vodíku je výhodná hydrolýza hydridů kovů, kterou se vyvine dvojnásobné množství vodíku než je obsaženo v hydridu – např.:



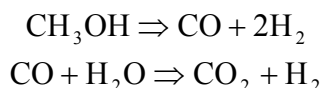
Vhodným zdrojem vodíku je elektrolýza okyselené vody s použitím platinových elektrod. Velmi čistý vodík lze ve větším množství získat poměrně drahou elektrolýzou horkého roztoku hydroxidu barnatého mezi niklovými elektrodami. Jiné průmyslové procesy jsou založeny na reakci vodní páry s uhlovodíky nebo s koksem:



Většina průmyslově vyrobeného vodíku se spotřebuje přímo v závodě, v němž se vyrábí (např. při syntéze amoniaku, v petrochemickém průmyslu apod.). Přesto se velké množství dodává i na trh. Například v USA se ročně prodá na trhu okolo $3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$, tj. 250 000 tun. Ve velkém měřítku převládá výroba z uhlovodíků s použitím zemního plynu nebo suroviny z olejových rafinérií. Míchá se s párou a směs se vede přes niklový katalyzátor při teplotě $700 - 1\,000 \text{ }^\circ\text{C}$:

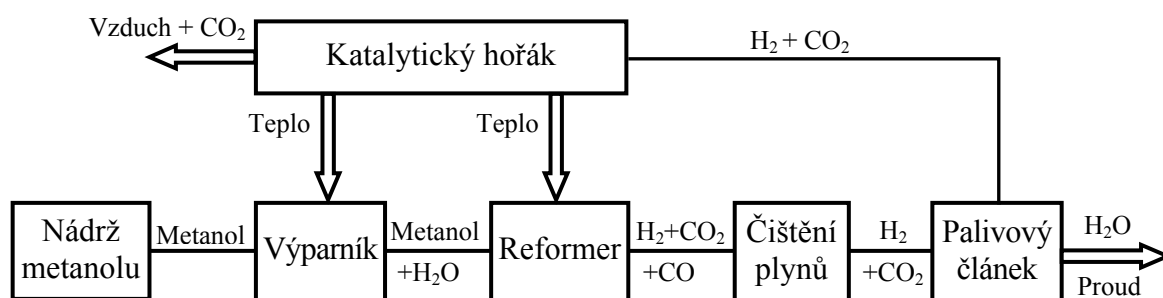


Vodík vzniká také jako vedlejší produkt při elektrolýze solanky při výrobě chlóru a hydroxidu sodného. Uvedené způsoby výroby nejsou vždy praktické, zejména potřebujeme-li malé množství plynu na různě vzdálených místech. Pro takové případy (např. plnění meteorologických balonů) byl vyvinut vodíkový generátor. V něm se odpařuje směs metanolu a vody, vede se přes chromitový katalyzátor při teplotě $400 \text{ }^\circ\text{C}$, kde se metanol krakuje na vodík a oxid uhelnatý. Vodní pára dále reaguje s oxidem uhelnatým a vzniká oxid uhličitý a další vodík: [14]



Vodík lze dále získávat pomocí zelených řas. Mají-li dostatek slunečního světla a živin (zejména síry), probíhá v organismech řas fotosyntéza stejně jako u vyšších rostlin. Přitom produkují kyslík, spotřebovávají oxid uhličitý a vytvářejí si látky nutné k zachování existence. V okamžiku, kdy se dostanou do prostředí chudého na živiny, by vyšší rostliny zahynuly. Řasy dokáží po nějakou dobu přežít bez výživných látek, pokud se v prostředí nevykytuje ani kyslík. Tehdy mohou použít speciální enzymy a spustit alternativní metabolický proces, při kterém produkují vodík.

Vodík lze také získat přímo ve vozidle tzv. reformací z metanolu či benzínu. Při reformaci se však vyvíjí CO_2 , což zeslabuje velké výhody palivového článku. Postup výroby vodíku reformací metanolu je znázorněn na obrázku 16.



Obr. 16. Postup výroby vodíku reformací metanolu. [3]

Dalším možný způsob výroby vodíku je jaderná fúze, proces, který je zdrojem nesmírné energie našeho slunce. Při jaderné fúzi vstupují na scénu dva izotopy vodíku: Deuterium, které má o jeden neutron víc než "obyčejný" vodík, a radioaktivní tritium, které má neutrony dokonce celkem tři. Zatímco deuterium je v přírodě celkem běžné (mořská voda ho například v 1 m^3 obsahuje 33 gramů), tritium vzniká v aktivní zóně jaderných reaktorů dotovaných lithiem. Klíčovým problémem jaderné fúze je dosáhnout teploty 15 milionů stupňů Kelvina potřebných k jejímu nastartování a následně udržet pod kontrolou její průběh. Při této reakci vzniká atom helia, jeden neutron a obrovské množství energie – 470 kg vhodného paliva by

stačilo na roční provoz elektrárny o výkonu 5 000 MW. Vodík vyráběný pomocí jaderné fúze by byl nejčistším vyráběným palivem vůbec a vyráběné množství by bez problémů pokrylo poptávku trhu. Bohužel s tímto druhem výroby vodíku můžeme počítat nejdříve okolo roku 2050, kdy by se měla jaderná fúze stát realitou.

Přibližné ceny vodíku dle současných druhů výroby a distribuce s porovnáním s ropnými produkty v tabulce 2.

Tab. 2. Přibližné ceny vodíku – porovnání s nejrozšířenějšími ropnými produkty. [17]

Typ paliva	Cena paliva [€/GJ]	Cena paliva [€/km]	Využití
CH ₂ z centrální čerpací stanice včetně daně z CO ₂	14 – 18 16 – 20	0,017 0,018 – 0,022	vodíkové pohony
CH ₂ z místní čerpací stanice	19 – 22	0,026	
LH ₂ z centrální čerpací stanice	24 – 26	0,027 – 0,029	
CH ₂ z uhlí včetně daně z CO ₂	19 – 21 22 – 24	0,021 – 0,023 0,025 – 0,027	vodíkové pohony
CH ₂ z dřevěného odpadu	22 – 28	0,023 – 0,035	
CH ₂ z topolové plantáže	29 – 37	0,033 – 0,042	
LH ₂ z dřevěného odpadu	33 – 36	0,033 – 0,042	vodíkové pohony
LH ₂ z topolové plantáže	44 – 47	0,049 – 0,053	
CH ₂ z pobřežního větru	41 – 46	0,048 – 0,055	H ₂ pohony
LH ₂ z pobřežního větru	49 – 55	0,053 – 0,063	H ₂ pohony
LH ₂ ze sluneční energie (Severní Afrika)	přibližně 66	0,074 – 0,086	vodíkové pohony
Benzín / Nafta (surová nafta) nezdaněná	7 – 10	0,014 – 0,023	spalovací motory
zdaněná	21 – 31	0,046 – 0,081	

Vlastnosti vodíku

Za normálních podmínek má jeden litr vodíku hmotnost 0,00899 g. Další důležitou vlastností je výhřevnost, která u vodíku činí 33 kWh.kg⁻¹. Ostatní atomové a fyzikální vlastnosti vodíku jsou uspořádány v tabulce 3.

Některé problémy vodíku:

- tvoří traskavou směs se vzduchem - problém větrání garáží, autoservisů apod.,
- díky malé molekule proniká téměř každým těsněním, šroubením i ventily,
- stlačování a zkapalňování vyžaduje značné výdaje na energii navíc.

Distribuce vodíku

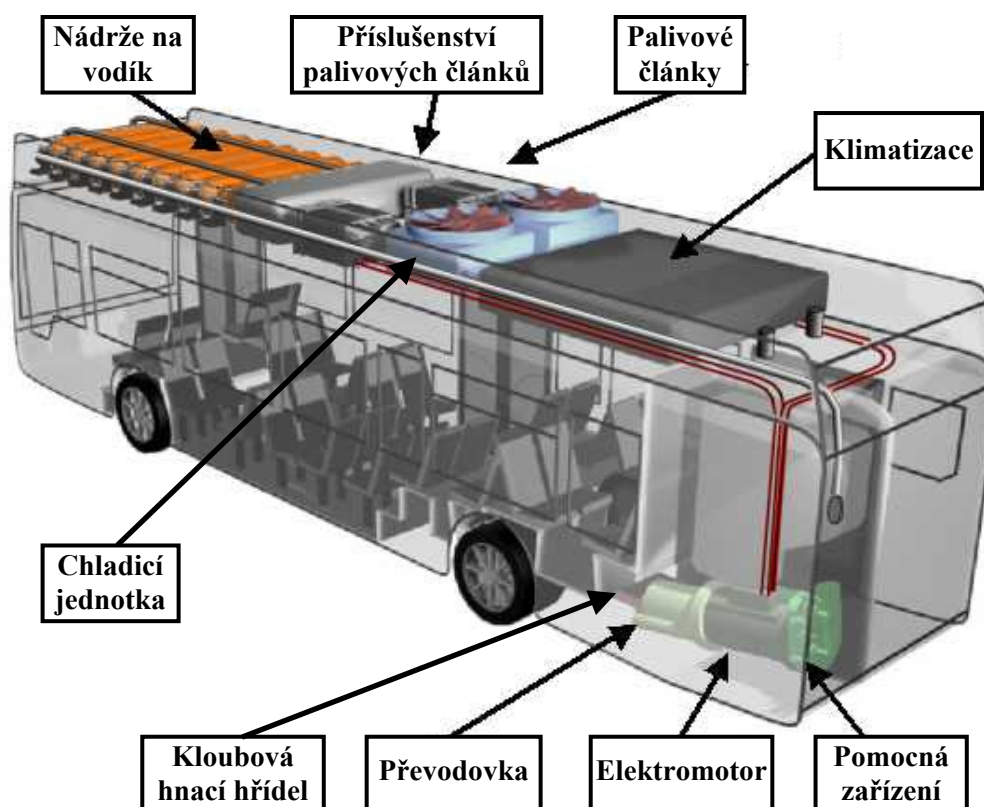
Vodík se z výrobního závodu k čerpacím stanicím přepravuje v kapalném stavu ve speciálních cisternách. V budoucnu se počítá i se speciálními potrubními systémy. Současná infrastruktura veřejných vodíkových čerpacích stanic je nedostatečná, po celém světě je vystavěno zhruba 75 čerpacích stanic. V dalším rozvoji zatím brání vysoké pořizovací náklady, které činí asi 450 000 dolarů na jednu čerpací stanici. K výstavbě např. 500 stanic by bylo třeba investovat 225 milionů dolarů. Předpokládá se, že vybudování fungující infrastruktury nutné pro výrobu a bezproblémovou distribuci vodíku v celé Evropě je záležitostí do roku 2020. Současné lokality umístění vodíkových čerpacích stanic, jejich procentuální rozdělení ve světě a schéma vodíkové čerpací stanice viz. **příloha 2**, str. 56.

Tab. 3. Atomové a fyzikální vlastnosti vodíku.

Atomové vlastnosti vodíku		Fyzikální vlastnosti vodíku	
Relativní atomová hmotnost	1,00794(7)	Teplota tání [K]	13,957
Jaderné spinové kvantové číslo	0,5	Teplota varu [K]	20,39
Magnetický moment jádra	2,79270	Teplo tání [kJ.mol ⁻¹]	0,117
NMR – frekvence (při 2,35 Tesla) / Mhz	100,56	Výparné teplo [kJ.mol ⁻¹]	0,904
NMR – relativní citlivost (konstantní pole)	1,000	Kritická teplota [K]	33,19
Jaderný kvadrupólový moment / (10 ⁻²⁸ m ²)	0	Kritický tlak [Mpa]	1,315
Radioaktivní stabilita	stabilní	Disociační teplo [kJ.mol ⁻¹] (při 298,2 K)	435,88

3.2 Součásti pohonu a jejich uspořádání

Jedno z možných uspořádání pohonu autobusu s elektromotorem a palivovými články je dobře vidět na následujícím obrázku (obr. 17). Jedná se o demonstrační autobus Citaro vyrobený koncernem Evobus.



Obr. 17. Uspořádání pohonu autobusu Mercedes-Benz Citaro.

Nádrže na vodík

Tlakové nádrže jsou nejčastěji umístěny v přední části autobusu na střeše, buď nad přední nápravou, nebo mezi přední a zadní nápravou. Uspořádání nádrží může být buď podélné ve směru jízdy, nebo častějším řešením je umístění příčné kolmo na směr jízdy. Nádrže slouží k uchovávání vodíku buď ve stlačeném plynném nebo kapalném stavu.

Palivové články a jejich příslušenství

Palivový článek je zařízení, v němž dochází na základě elektrochemických procesů k přímé přeměně vnitřní energie paliva na energii elektrickou.

Provoz palivových článků se prodražuje díky vynucené přítomnosti různých pomocných zařízení vybavených automatickou regulací. Úkolem příslušenství je regulovat tok vodíku do palivového článku, ovládat vzduchový kompresor a tím ovládat tok vzduchu do palivového článku, regulovat množství chladicí vody procházející skrz palivový článek. Příslušenství palivových článků často bývá v blízkosti samotného palivového článku. Příslušenství se skládá:

- přívodní vedení vodík/vzduch,
- nádrž chladicí kapaliny,
- vodní filtr,
- čerpadlo chladicí kapaliny,
- vzduchový filtr,
- kompresor,
- elektronická řídicí jednotka palivových článků.

Palivové články a jejich příslušenství jsou v nejčastějších případech umístěny na střeše autobusu, buď přímo za vodíkovými nádržemi, nebo na zadní části střechy, v některých případech mohou být umístěny v zadní části autobusu na místě elektromotoru, pokud jsou elektromotory součástí nábojů kol, nebo vedle elektromotoru na úkor zadního prostoru pro cestující.

Chladicí jednotka

Účelem chladicí jednotky je odvést teplo z palivových článků a chladit invertor, trakční elektromotor a převodovku. Umístěna je na střeše autobusu nebo ve vrchní části zádě.

Klimatizace

Klimatizace přímo nesouvisí s provozem palivových článků, slouží pouze k pohodlí cestujících.

Elektromotor

Velký elektrický motor poskytuje potřebnou trakční sílu a poskytuje energii pro příslušenství palivových článků a ostatních zařízení autobusu spojených s jeho provozem. Umístění elektromotoru buď jako "centrální" na místě současných spalovacích motorů, nebo jsou elektromotory součástí zadní nápravy umístěných přímo v nábojích kol.

Pomocná zařízení

Zahrnují:

- DC/AC invertor pro přeměnu stejnosměrného napětí z palivových článků na napětí střídavé pro asynchronní motor,
- čerpadlo posilovače řízení,
- kompresor brzdové soustavy,
- větrák chladiče,
- chladicí pumpy,
- olejové pumpy,
- kompresor klimatizace (pokud nějaká je),
- akumulátory nebo ultrakondenzátory při hybridním uspořádání.

Převodovka

Samočinná převodovka slouží k vhodné úpravě trakční charakteristiky elektromotoru. V případě použití elektromotoru s vhodným průběhem točivého momentu a výkonu v závislosti

na otáčkách blíží se požadované jízdní charakteristice autobusu, se může převodovka vypustit, používá-li se regulace kotevního proudu, může se vypustit i rozjezdová spojka.

Kloubová hnací hřídel

Zajišťuje transmisi mezi převodovkou a rozvodovkou zadní nápravy. V případě použití elektromotorů umístěných v nábojích kol odpadá.

3.2.1 Nádrže na vodík

Umístění dostatečného množství paliva ve vozidle je problém, který dnes není uspokojivě vyřešen. Protože vodík má pouze 30 % energetický obsah v porovnání se zemním plynem na objemové bázi, plynové zásobníky jsou příliš velké a těžké.

Plynná paliva bývají na vozidlech přechovávána obvykle ve stlačeném plynném skupenství, méně často zkapalněná. Vzhledem k malé měrné hmotnosti vodíku je jeho uložení obtížnější než v případě jiných plynných paliv, např. zemního plynu nebo bioplynu. K uložení vodíku bývá používáno několik způsobů:

- Stlačený plynný vodík v tlakových nádržích, buď ocelových nebo kompozitových, při maximálních tlacích až do 45 MPa (v budoucnu 70 MPa).
- Zkapalněný vodík v kryogenních (nízkoteplotních) nádržích při teplotách přibližně $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nízkém provozním tlaku, např. do 0,6 MPa.
- Vodík v nádržích vázaný v hydridech slitin kovů, obvykle v hydridu Fe TiH_2 ,
- Vodík absorbovaný na povrchu grafitových tělísek v nádrži při relativně nízkém tlaku.

Téměř všechny autobusy používají jako palivo stlačený vodík, který je uložen ve vysokotlakých nádržích namontovaných na střeše autobusu. Takovéto uspořádání je výhodné pro vodík produkovaný mimo vozidlo, redukuje se tak cena, hmotnost a složitost autobusu. Tyto nádrže užívají podobnou technologii jako nádrže na stlačený zemní plyn, které se v dopravním průmyslu již rozšířily. Tankování vodíku do vysokotlakých nádržích je podobné tankování do palivových nádrží.

Podstatně vhodnější je uchovávat vodík v kapalném stavu. Zkapalněním vodíku se dosáhne při tlaku jedné atmosféry hustoty $70,8\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Na zkapalnění vodíku je však nutno dosáhnout teploty $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, k čemuž je třeba vynaložit energii přibližně $10 - 14\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Nádoby musí být rovněž velmi dobře izolovány. Přestože byly vyvinuty speciální izolační materiály, představují nádrže s vodíkem stále značný objem. Problémem zde je i výparnost vodíku. Za jeden den se odpaří až 2 % z celkového objemu.

Zajímavým způsobem, jak uchovávat vodík, jsou zásobníky na bázi kovových hydridů. Kovové hydridy jsou kovy, v jejichž krystalických mřížkách se vyskytují molekuly vodíku. Hydridy tedy mohou sloužit jako zásobníky vodíku. Proces nabíjení zásobníku představuje vznik hydridu a uvolňování tepla. Při vybíjení se teplo spotřebovává. Jedním z prvních hydridů byla slitina titanu a železa. Výraznější úspěch zaznamenala slitina nazvaná Code 500 (slitina titanu, zirkonu, vanadu, chromu, železa a manganu). Ta vykazuje kapacitu až 1,8 hmotnostních procent vodíku a při teplotě okolí v širokém rozmezí zaručuje dostatečný tlak pro provoz vozidla. Relativně úspěšnou konstrukcí nádrže na bázi hydridu se může pochlubit i koncern Daimler – Benz. Plynný vodík je zde absorbován kovovým práškem. Ten je umístěn v trubkách. Nádrž je konstruována jako tepelný výměník, neboť při tankování vodíku se uvolňuje teplo, které musí být odváděno. Nevýhodou je, že zásobník váží 320 kg a pojme pouze 170 l vodíku. [11]

Poslední alternativa spočívá v zachycování atomů vodíku na povrchu extrémně malých dutých uhlíkových vláken. Jedná se o uhlíková vlákna o průměru v řádu nanometrů.

V tabulce 4 jsou porovnány hmotnosti a objemy nádrží, hmotnosti paliva a obsahy energie připadající na 1 kg celkové hmotnosti příslušné nádrže s palivem pro různé případy uložení vodíku a benzínu. Jedná se o vodík stlačený v ocelových nádržích, vodík stlačený v kompozitových nádržích, zkapalněný vodík v kryogenní nádrži, vodík vázaný v hydridu kovů, vodík v nádrži absorbovaný na grafitu a naftu v běžně používané nádrži. Palivo nacházející se v každé z uvedených nádrží obsahuje přibližně stejné množství energie (přibližně 270 kWh) a umožní zhruba stejný dojezd konkrétního vozidla. [15]

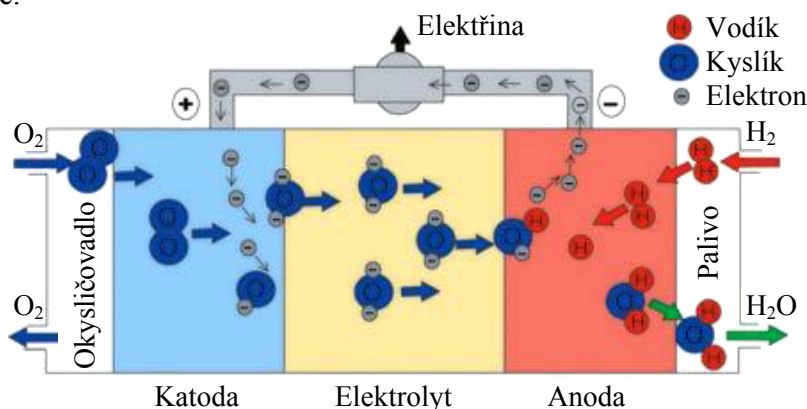
Tab. 4. Porovnání palivových nádrží.

Palivo	Hmotnost paliva [kg]	Hmotnost nádrže [kg]	Energie v nádrži [kWh.kg ⁻¹]
Vodík v ocelových nádržích 25 MPa	8,2	265	1
Vodík v kompozitových nádržích 25 MPa	8,2	128	2,1
Vodík zkapalněný při -252 °C	8,2	65	3,7
Vodík v hydridu Fe TiH ₂	8,2	764	0,35
Vodík absorbovaný na grafitu	8,2	52	4,6
Motorová nafta	22,5	9	8,7

Umístění nádrží na střeše autobusu má své výhody. Díky malému atomu vodíku je pravděpodobnější možná netěsnost akumulárního systému oproti ostatním skladovacím nádržím jiných paliv. Pokud se vyskytne nějaká netěsnost, potom umístění nádrží na střeše umožní vodíku rychlé rozptýlení do atmosféry. V případě montáže nádrží na nízkopodlažní autobus je to též jediné možné řešení. Mimoto je nejméně pravděpodobné, že by střecha autobusu byla v případě dopravní kolize poškozena, což napomáhá bezpečnosti samotných nádrží.

3.2.2 Palivové články – zdroj elektrické energie

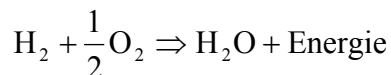
Palivové články jsou zařízení, v nichž na základě elektrochemických procesů dochází k přímé přeměně vnitřní energie paliva na energii elektrickou. První palivový článek nejjednoduššího typu vodík-kyslík (obr. 18) sestrojil již v roce 1839 Angličan Sir William Grove.



Obr. 18. Schéma palivového článku.

Princip činnosti palivového článku je poměrně jednoduchý. Na zápornou elektrodu, které říkáme palivová (jedná se o anodu), se přivádí aktivní látka (palivo). Ta zde oxiduje (její atomy se zbavují - často za přispění katalyzátoru - jednoho nebo několika elektronů z valenční sféry) a uvolněné elektrony představující elektrický proud se vnějším obvodem pohybují ke kladné elektrodě (katodě). Na kladné elektrodě, kam se přivádí okysličovadlo, naopak probíhá

redukce (atomy okysličovadla volné elektrony přijímají) za současné reakce s kladnými ionty, které k ní pronikají elektrolytem. Pokud se vnější obvod se zátěží přeruší, probíhající chemické reakce se z důvodu deficitu elektronu okamžitě zastaví. Výsledkem spalování je v závislosti na pracovní teplotě článku voda či vodní pára. To je ten nejznámější způsob uvolňování energie pod názvem oxidace vodíku dle základní rovnice:



Palivové články jsou podobné článkům primárním či sekundárním (akumulátorům). Na rozdíl od baterií (primární a sekundární články) nejsou aktivní chemické látky součástí anody a katody, ale jsou k nim průběžně přiváděny zvnějšku. Obě elektrody působí výlučně jako katalyzátor chemických přeměn, během činnosti článku se téměř neopotřebovávají a jejich chemické složení se nemění. Palivový článek se tedy nevybíjí. Pokud jsou do něho aktivní látky přiváděny trvale, může pracovat prakticky bez časového omezení. Mízí zde tudíž i pojem "kapacita" článku. Kromě napětí se proto mezi charakteristické parametry obvykle řadí i velikost proudu či výkonu odebíraného z 1 dm² (1 cm²) elektrod. Často se také udává měrný výkon (W.kg⁻¹), objemový výkon (W.dm⁻³) nebo výkon na jednotku plochy elektrod (W.cm⁻²). Další rozdíl spočívá v tom, že pracovní teplota většiny palivových článků je vyšší (u některých typů velmi výrazně) než u baterií, což se odráží jak v technologii výroby, tak i v určité době náběhu, než dosáhnou jmenovitých provozních parametrů.

Základními prvky palivového článku jsou dvě elektrody (záporná - anoda a kladná - katoda) a elektrolyt. Jejich struktura zpravidla závisí na použitém palivu, případně na vlastnostech okysličovadla.

Palivem mohou být plynné, kapalné i tuhé látky. Z plynu lze jmenovat již zmíněný vodík H₂, oxid uhličitý CO, nebo hydrazin N₂H₄, z kapalin metanol CH₃OH a další složitější alkoholy, a z tuhých látek některé kovy (sodík Na, hořčík Mg, zinek Zn, kadmium Cd). Okysličovadlem mohou rovněž být plynné (kyslík O₂, chlor Cl₂), kapalné či tuhé látky (oxid rtuťnatý HgO, oxid manganičitý MnO₂), ale z praktických důvodů se nejčastěji využívá kyslík z okolního vzduchu.

Záporná elektroda musí být uzpůsobena skupenství přiváděného paliva. Je-li palivem plyn, musí na ní být co nejvíce míst, kde se může setkávat fáze pevná (elektroda a případný katalyzátor), kapalná (některé elektrolyty) a plynná (paliva). Tato místa jsou tvořena soustavou pórů a kapilár, které vznikají během výroby například tak, že se jednotlivé vrstvy elektrody lisují z materiálu o určité velikosti zrn, nebo obsahují snadno rozpustné materiály, po jejichž odplavení vznikají ve strukturách elektrody další dutinky. Během činnosti článku jsou póry vyplněny plynem a kapiláry elektrolytem. Takové elektrody jsou většinou kovové a říká se jim difúzní.

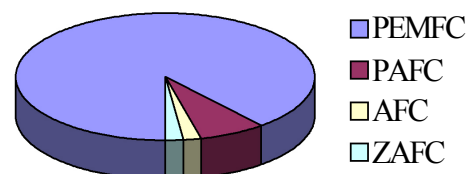
Jinou možností je hydrofobizace pórovité elektrody, kdy se vnitřní struktura pórů upravuje smáčením v organickém polymeru. Stěny pórů pak mají různou smáčivost vůči přítomnému elektrolytu, takže některé póry elektrolyt přijmou, jiné nikoli (drží se v nich plynné palivo). Těto úpravy se užívá zejména u elektrod uhlíkových. Je-li palivem kapalina, pracuje palivová elektroda pouze s pevnou a kapalnou fází, takže jemná porézní struktura ztrácí na důležitosti. Rozhodujícím faktorem se nyní stává velikost aktivního povrchu elektrody, poněvadž palivo se k ní přivádí rozpuštěné v elektrolytu. Záporná elektroda je pak od kladné oddělena separátorem, který propouští pouze vybrané ionty.

Vzhledem k tomu, že okysličovadlem je zpravidla plyn, platí pro kladnou elektrodu stejné zásady, jako pro zápornou s možným stykem všech tří fází. [3]

Palivové články se dělí především podle typu elektrolytu. V současné době rozeznáváme několik systémů. Uvedené systémy se liší jednak chemickými reakcemi probíhajícími na jednotlivých elektrodách, provozní teplotou i účinností elektrochemických přeměn.

- Alkalické články AFC (Alkaline Fuel Cell) - elektrolytem je zpravidla zředěný hydroxid draselný KOH.
- Články s tuhými polymery PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) - elektrolytem je tuhý organický polymer. Alternativou jsou články DMFC (Direct Methanol Fuel Cell), které jako palivo používají metanol.
- Články s kyselinou fosforečnou PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) - elektrolytem je kyselina fosforečná HPO_3 .
- Články s roztavenými uhličitany MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) - elektrolytem je směs roztavených uhličitánů.
- Články s tuhými oxidy SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) - elektrolytem jsou oxidy vybraných kovů.
- Články zinek-vzduch ZAFC (Zinc-Air Fuel Cell) - podobné článkům s tuhými polymery, materiálem anody je zinek, který slouží jako palivo. Podobají se bateriím.
- Články s protonově vodivou keramikou PCFC (Protonic Ceramic Fuel Cell) - elektrolytem je při vysokých teplotách vodivá keramika.

Téměř všechny moderní autobusy jsou poháněny palivovými články typu PEMFC (obr.19). Palivové články typu PEMFC se v dopravních aplikacích jeví jako velmi výhodné, jsou dostatečně výkonné, pracují při nízkých teplotách, mají nízkou dobu náběhu do provozu, rychle reagují na proměnné zatížení a jsou relativně levné. Výstupní výkon může být vyšší jak 200 kW.



Obr. 19. Využití palivových článků u autobusů.

Články s tuhými polymery PEMFC

Společně s alkalickými palivovými články spadají do kategorie nízkoteplotních článků. Měrný výkon těchto článků je až o řád vyšší než u ostatních typů (s výjimkou moderních článků s kyselinou fosforečnou, jejichž parametry jsou srovnatelné). Tyto články pracují s vodíkovým palivem a vzdušným kyslíkem. Tuhý polymer jakožto elektrolyt snižuje nebezpečí koroze a další nepříznivé jevy, které jsou obvyklé v člancích s kapalnými elektrolyty. Nízká provozní teplota (70 až 85 °C) zajišťuje dostatečně rychlý náběh článku a nevyžaduje žádné tepelné odstínění k ochraně obsluhy.

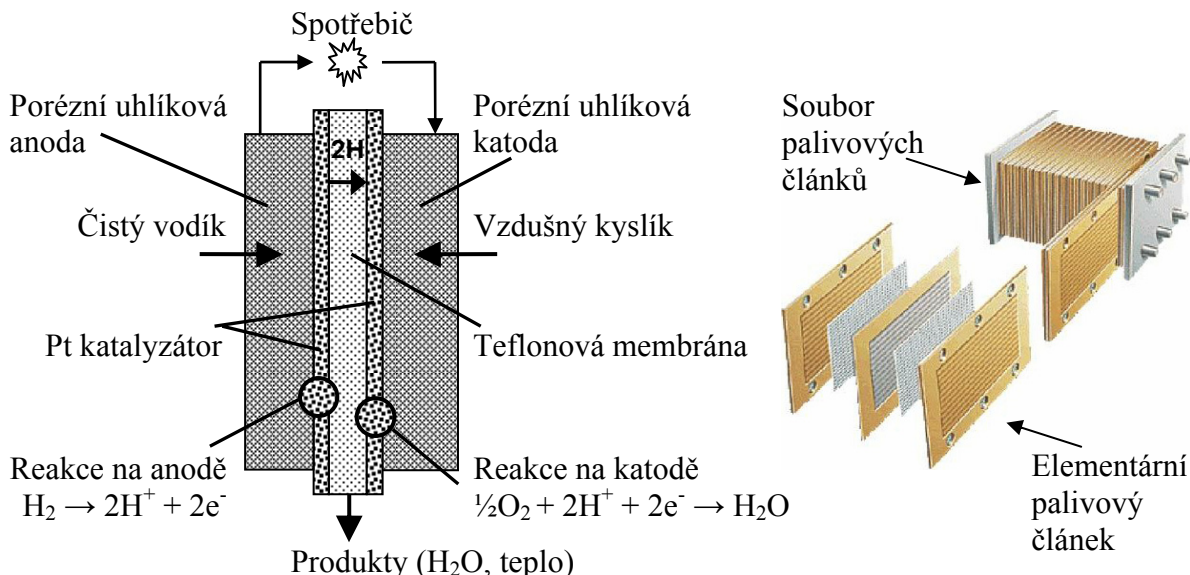
Elektrolytem je tenká polymerová membrána, které vypadá jako silnější fólie na balení potravin. Ten působí jako elektronový izolátor a současně jako výtečný vodič vodíkových kationtů. Používaným materiálem je polymer na bázi uhlíku a fluoru podobný teflonu, k jehož řetězci jsou připojeny skupiny obsahující sulfonovou kyselinu. Protony mohou volně přes membránu migrovat, přičemž ztráty v důsledku vnitřního odporu elektrolytu jsou nepatrné.

Anoda a katoda jsou vyrobeny aplikací malého množství platinové černi na jednu stranu tenkého listu porézního grafitického papíru, jenž byl předem opatřen teflonovou ochranou proti zvlhnutí. Elektrolytická membrána je posléze vložena mezi anodu a katodu a všechny tři části jsou za tepla a pod tlakem spojeny do jednoho celku. Tento celek (obr. 20), který představuje srdce palivového článku, má tloušťku menší než 1 mm. Díky nižšímu množství platiny poklesla jeho cena na přijatelnou úroveň.

Obě elektrody jsou na opačných stranách opatřeny destičkou s jemnými kanálky, která je vyrobena z grafitu. Stěny mezi kanálky zajišťují elektrický kontakt se zadní částí elektrody a vedou elektrický proud do vnějšího obvodu. Samotné kanálky rozvádějí na anodě palivo a na katodě oksyličovadlo. [3]

Hlavním výrobcem těchto článků je společnost Ballard Power Systems v Kanadě.

Obr. 20. Schéma elementárního palivového článku s tuhými polymery PEMFC a jeho začlenění do souboru palivových článků.



Teoreticky se nechá na palivovém článku typu PEMFC naměřit klidové napětí 1,23 V, což je možno získat ze standardního potenciálu elektrod. V praxi se ale toto napětí nedosahuje, pouze cca 0,6 až 0,9 V (zbytek představují ztráty způsobené reakčními závadami či nedostatečnou difúzí plynu) - typický průběh napětí palivového článku viz. **Příloha 6**, str. 62. Palivové články mohou podle typu a volby paliva dosahovat teoretického stupně účinnosti od 70 do 100 %. Protože v praxi se nedosahuje plného teoretického napětí, leží také skutečný stupeň účinnosti níže, cca mezi 35 až 60 %. Výkon odebíraný z 1 cm² elektrod je doposud dosti nízký (běžně desetiny W, nejvýše asi 2 W). Aby bylo docíleno vysokého napětí a s tím spojeného vysokého výkonu, řadí se v praxi více palivových článků do série či paralelně. Pro zvýšení objemového výkonu se články přeplyňují vzduchem pod tlakem cca 0,3 MPa. Porovnáním s akumulátory membránové palivové články dosahují již nyní 400 Wh.kg⁻¹ a počítá se, že jejich energetická kapacita bude zvýšena až na 1 000 Wh.kg⁻¹. Za cílovou hodnotu se přitom považuje objemový měrný výkon 2,0 kW/l zástavbového prostoru.

Hlavními problémy PEMFC článků jsou hmotnost a objem (dnes i při velkém pokroku v technologii obojí převyšuje 2 až 3 násobek spalovací motor; sada článků je ovšem na rozdíl od motoru snadno přizpůsobitelná různým tvarům instalačního prostoru). Dalším problémem je stále vysoká, byť klesající (oproti cenám minulých let až 5 000 \$/kW), cena (platinový nebo jiný katalyzátor, technologicky náročná PEM), která dnes postupně klesá pod hodnotu cca 1 000 \$/kW. Za přijatelnou cílovou hodnotu lze považovat 20 až 25 dolarů na 1 kW výkonu. Rozložení nákladů na pohon palivovými články viz. **příloha 6**, str. 63.

Výhody palivových článků

- relativně vysoká účinnost,
- nízké opotřebení,
- vysoká životnost (až desetitisíce hodin),
- tichý chod díky nepřítomnosti pohyblivých částí,

- schopnost snášet i značná přetížení (krátkodobě až stovky procent),
- nevyžadují složitou údržbu a obsluhu,
- oproti klasickým akumulátorům mají vyšší jízdní dojezd,
- oproti klasickým akumulátorům po vyřazení nezatěžují životní prostředí těžkými kovy.

Nevýhody palivových článků

- nutnost kontinuálně odstraňovat zplodiny chemických reakcí (odčerpání produktů oxidace, vody či vodní páry),
- udržování optimální teploty a tlaku aktivních médií,
- uvedení do provozu (může trvat několik minut),
- nízké stejnosměrné napětí cca 0,7 V na článek,
- vysoké investiční náklady,
- vysoká cena vstupních paliv.

3.2.3 Akumulátory – rekuperace energie

Zařízení pro akumulaci elektrické energie se využívá u hybridních autobusů. Použité elektromotory mohou pracovat jak v režimu motorickém, tak v režimu generátorovém, který umožňuje rekuperaci, tj. zpětné získání energie vynakládané při brzdění. Tuto energii je potřeba v autobuse s pohonem palivovými články někam uložit. Jelikož palivový článek není schopen elektrickou energii akumulovat, je k tomuto účelu potřeba využít jiného zařízení - akumulátorů.

Použité akumulátory jsou dobíjeny při brzdění, v některých případech je dobíjí samotný palivový článek. Takto získaná energie z akumulátorů dále napájí jednak zařízení potřebné pro provoz autobusu (palubní síť), ale hlavně slouží k napájení trakčního elektromotoru, čímž se snižuje spotřeba vodíku potřebného pro napájení palivových článků a zvyšuje se tak dojezd autobusu. Díky možnosti značné přetížitelnosti elektromotorů lze takto i krátkodobě zvyšovat výkon celého systému např. při předjíždění nebo jízdě do kopce s velkým stoupáním.

Možná závislost spotřeby výkonu na čase u městského autobusu viz. **příloha 6**, str. 62.

U akumulátorů jsou důležité zejména následující parametry: Měrná energie [W.h.kg^{-1}] – vyjádřená ve vztahu k objemu [W.h.dm^{-3}] informuje o prostorové náročnosti akumulátorů. Nejvýhodnější je použít akumulátory s nejvyšší hodnotou měrné energie. Měrný výkon [W.kg^{-1}] – ovlivňuje maximální rychlost a zrychlení vozidla. Životnost – závisí na způsobu nabíjení a vybíjení, údržbě apod. Určuje počet kilometrů, které překoná vozidlo s použitím jedné sady akumulátorů.

Rozeznáváme několik druhů akumulátorů: Olověné akumulátory, akumulátory sodík-síra, akumulátory nikl-kadmium (Ni-Cd), nikl-metalhydrid (Ni-MH), zinek-vzduch, zinek-halogen, lithium-ion, lithium-metal-hydrid a lithium-polymer.

V praxi se pro provoz autobusů osvědčili akumulátory typu nikl-metalhydrid, nikl-kadmium a akumulátory olověné. Zajímavým řešením, které se objevuje stále častěji, je systém využívající k akumulaci elektrické energie ultrakondenzátorů (superkondenzátorů).

Olověné akumulátory

Nejnovější typ sériově vyráběného akumulátoru je založen na principu technologie spirálových článků. Oproti klasickým bateriím má 3x větší životnost. Nosné části desek jsou z čistého olova, elektrolyt je obsažen v mikroporézní skelné vatě separátorů. Vodík a kyslík vyvíjející se při nabíjení a vybíjení jsou rekombinovány na vodu, akumulátor je bezúdržbový.

Rychlá rekombinace je umožněna vrstvou mezi dělenou negativní elektrodou. V článku je tímto uspořádáním vytvořeno a udržováno vakuum během cyklování a zvláště při rychlém nabíjení vysokými proudy. Nabíjecí proud může dosáhnout až 100 A při napětí 14,4 V, plné nabití tak lze zkrátit na 1 hodinu. Výhodou těchto akumulátorů je jejich nízká cena, nevýhodou je nízká měrná energie a výkon.

Akumulátory nikl-kadmium (Ni-Cd)

Jedná se o plně recyklovatelné a bezúdržbové akumulátory. Mají velkou životnost (10 let) a vysokou energetickou hmotnost. Kladné elektrody jsou tvořené hydroxidem hliníku, záporné hydroxidem kademnatým. Elektrolytem je hydroxid draselný ředěný destilovanou vodou. Tyto akumulátory nemají tak výraznou závislost kapacity na teplotě a vybíjecím proudy, jako olověné akumulátory. Vyznačují se větší spotřebou vody a ztrátami.

Akumulátory nikl-metalhydrid (Ni-MH)

Mají mnoho společných znaků jako nikl-kadmiové akumulátory. Materiálem záporné elektrody je slitina lanthanu, kobaltu, hliníku a manganu, která při nabíjení vytváří metalhydrid a nahrazuje tak škodlivé kadmium. Ni-MH akumulátory jsou tak ekologické a dosahují ještě vyšší hodnoty měrné energie. Jsou však dražší a citlivější na nabíjecí a vybíjecí režim. Životnost je oproti Ni-Cd akumulátorům poloviční. [3]

3.2.4 Elektromotor

Hnací ústrojí autobusu s palivovými články se skládá, podobně jako u autobusu se spalovacím motorem, z motoru, převodovky, hnacích hřídelí a diferenciálu s rozvodovkou. V současnosti se používá výhradně zadního pohonu s "centrálním" elektromotorem. Alternativou jsou pohony kol elektromotory umístěnými přímo v kolech.

I přes relativně jednoduchou plynulou možnost změny točivého momentu u používaných elektromotorů, které tak umožňují ušetřit použití vícestupňové převodovky, roste se zvyšující se vnitřním výkonem elektromotoru jeho hmotnost a zástavbová velikost, takže se často jeví jako výhodná kombinace elektromotoru s vícestupňovou převodovkou. Vzhledem ke schopnosti přetížení elektromotoru může být většinou redukován počet převodových stupňů. Používá-li se regulace kotevního proudu (např. proudové omezení), může se vypustit rozjezdová spojka. Jsou-li naproti tomu převzaty spojka a převodovka ze sériově vyráběného vozidla se spalovacím motorem, může se řízení elektromotoru omezit na regulaci magnetickým polem (buzením stejnosměrného motoru).

Ačkoliv technika elektrického pohonu nevyžaduje žádný speciální vývoj v oblasti pohonu vozidla, musí být přirozeně parametry celého systému přizpůsobeny (omezeným) jízdním výkonům vozidla, (zrychlení, stoupavost, nejvyšší rychlost), ale především vlastnostem palivových článků a akumulátorů (napětí, výkonová hustota, zatížitelnost apod.). Elektromotory používané ve vozidlech můžeme rozdělit na:

- stejnosměrné elektromotory – se sériovým buzením, s cizím buzením, s derivačním buzením a se smíšeným buzením;
- střídavé elektromotory – asynchronní, synchronní s permanentním buzením;
- magnetické elektromotory.

U středně těžkých a těžkých vozidel (autobusů, nákladních vozidel) se výhradně používají střídavé elektromotory (v drtivé většině asynchronní) a elektromotory magnetické, a to hlavně kvůli jejich vysoké účinnosti, přetížitelnosti, spolehlivosti a příznivému poměru výkon/hmotnost.

Asynchronní elektromotor

Podstatná výhoda třífázového asynchronního motoru je v tom, že odpadá vinutí kotvy a kolektor, čímž lze dosáhnout otáček až $20\,000\text{ min}^{-1}$. Oproti stejnosměrnému motoru je asynchronní motor při stejném výkonu podstatně menší a lehčí, proto lze počítat s výkonovou hmotností asi 1 kg/kW . Kromě toho je asynchronní motor jednodušší konstrukce, robustní, bezúdržbový a silně přetížitelný. Jistá nevýhoda spočívá v nákladech na elektronickou regulaci. Stejnosměrný proud akumulátoru je nutno přeměnit na střídavý. Obvykle se toho docílí cyklickým zapínáním tyristoru, přitom se pravoúhlý průběh mění přibližně na sinusový. K regulaci tahové síly a otáček motoru musí být proměnná frekvence i napětí. Ke splnění regulačních požadavků vyžaduje vysoké náklady na výkonový obvod.

Zpětné získání energie při brzdění je možno realizovat s vysokou účinností. Pohon silového pole vede k velmi dobrému využití instalovaného výkonu v celé tahové – rychlostní charakteristice.

Synchronní elektromotor s permanentním buzením

Tato varianta pohonu umožňuje velmi malý zastavěný objem motoru. Magnetické pole vybuzené permanentními magnety je bezdrátové. To vede k vysoké účinnosti. U tohoto motoru není pohon zeslabením možný. Proto musí být použito vícenásobného regulátoru výkonu palivového článku, akumulátoru nebo převodovky. Umožňuje-li stejnosměrný pohon nastavení pole 1:3, musí být u synchronního motoru s buzením permanentními magnety (při stejném maximálním momentu a stejných otáčkách) nastavení výkonu regulátoru střídavého proudu vyšší o faktor 3. Stejného rozsahu otáček jako u synchronních motorů nelze dosáhnout, proto vyžaduje hospodárny provoz nejméně dvoustupňový převod.

Magnetický elektromotor

Příkladem je pokrokové řešení elektromotoru permanentní magnet – motor s vynikajícími elektrickými parametry při malé hmotnosti a stavebních rozměrech. Motor náleží ke skupině elektronické komutace synchronních motorů s permanentním buzením.

Pro všechny elektromotory platí, že dosahovaný moment je proporcionální magnetické indukci ve vzduchové mezeře, k axiální délce rotoru a ke kvadrátu poloměru vzduchové mezery. Vzhledem ke kvadratické závislosti momentu na poloměru vzduchové mezery je výhodná konstrukce vnějšího rotoru. Tento rotor je složen z vyliisovaných elektrolechů, v nichž se nachází tangenciálně magnetizované oddělené magnety (neodym – železo – bor) se střídavou polaritou.

Motor nemá žádné rotující elektrické součásti. Uvnitř se nachází stator, který je složen z lisovaných elektrolechů a tvoří vysokopólové nosiče cívek. Cívky jsou spojeny s výstupem výkonové elektroniky, která proudy do statorového vinutí komutuje tak, že se motor chová jako stejnosměrný motor s cizím buzením. Je to tzv. elektronická komutace. Regulace je jednoduchá a dokonalá v celém rozsahu otáček až do $n = 0$. Vzhledem až k desetinásobku zvětšení výkonu oproti konvenčnímu provedení elektromotoru je statorové vinutí chlazeno kapalinou. Dále je motor až čtyřikrát lehčí než je tomu u konvenčního provedení a je menší.

[4]

3.3 Varianty uspořádání pohonu

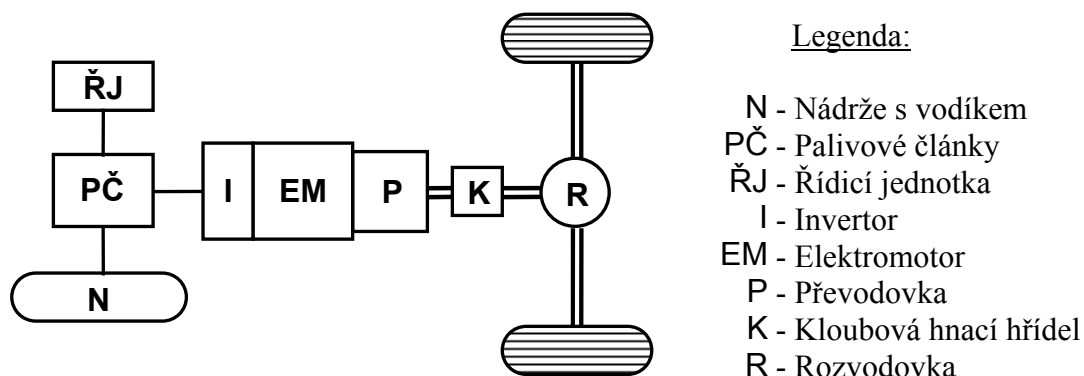
V posledních letech se čím dál tím více upouští od "čistého" pohonu palivovými články a přechází se na variantu hybridního pohonu autobusů. Počet autobusů s hybridním pohonem již výrazně dominuje. Hybridizaci autobusů s palivovými články reprezentují dvě varianty:

1. Hybridní pohon skládající se z palivových článků a akumulátorů. Palivové články poskytují primární zdroj energie, akumulátory slouží jako pomocný, nebo v případě potřeby jako záložní zdroj energie. Příkladem může být nový hybridní autobus ThunderPower, osazený 170 kW palivovými články UTC, jako primárním zdrojem energie, a akumulátory poskytující potřebnou energii zbývajícím částem hnacího ústrojí (inverter, elektromotor ...).
2. Hybridní pohon skládající se z akumulátorů a palivových článků. Palivové články reprezentují pomocný zdroj energie, akumulátory jsou zdrojem primárním. Příkladem budiž nový hybridní autobus provozovaný leteckou základnou Hickham na Havaji, s palivovými články o výkonu 20 kW, které dobíjejí hlavní akumulátorovou pohonnou jednotku, čímž se zvýší jízdní dosah vozidla.

Dnes již nenajdeme žádný autobus, který by byl poháněn pouze energií z palivových článků bez využití možnosti získávat elektrickou energii zpět prostřednictvím rekuperačního brzdění, která se ukládá do akumulátorů nebo ultrakondenzátorů. Autobusy, které nebyly touto technologií vybaveny, byly v následujícím období testování na hybridní přestavěny.

3.3.1 Varianta I

První možnou variantou, znázorněnou zjednodušeným schématem (obr. 21), je pohon jedním "centrálním" elektromotorem. Pro zlepšení trakční charakteristiky autobusu je využito buď několikastupňové převodovky nebo alespoň jednoduchého stálého převodu (zpravidla 4:1), který je součástí elektromotoru. Přenos krouticího momentu od převodovky k rozvodovce zadní nápravy je řešen hnacím hřídelem. Funkce jednotlivých částí viz. kapitola 3.2. Jedná se o "čistý" pohon palivovými články, který byl následně vylepšen o systém rekuperační elektrické energie (viz. varianta II).

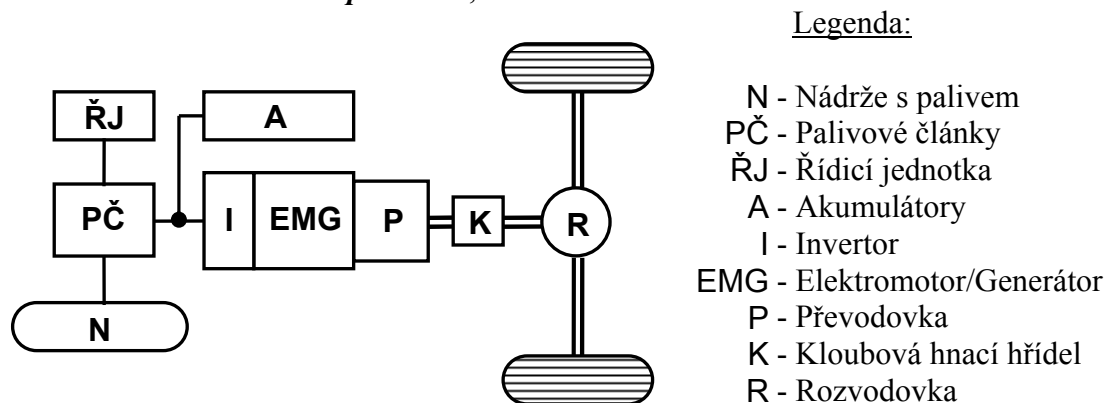


Obr. 21. Schéma nehybridního pohonu s centrálním elektromotorem.

Typickým příkladem této koncepce pohonu je například autobus ZEBUS, který je osazen pohonnou jednotkou Xcellsis HY-205 od firmy Ballard, technické parametry tohoto "motoru" a jeho zástavba do autobusu viz. **příloha 3**, str. 57-59. V současné době je tento pohon již vylepšen o rekuperační brzdový systém.

3.3.2 Varianta II

Vychází z koncepce pohonu pouze palivovými články, doplněna je však o akumulátory, do kterých se ukládá energie získaná při rekuperačním brzdění (obr. 22). Koncepce "centrální elektromotor, převodovka, hnací hřídel a rozvodovka" je zachován. Elektromotor však může pracovat jak v režimu motorickém, tak v režimu generátorovém. Příklad pohonu a jeho zástavba do autobusu MAN viz. *příloha 4*, str. 60.



Obr. 22. Schéma hybridního pohonu s centrálním elektromotorem.

Klady řešení:

- V současné době osvědčená konstrukce, vhodná pro přestavbu autobusu s klasickým pohonem a tím menší zásah do stávající konstrukce.
- Oproti nehybridní variantě úspora energie až 30 %.
- Umístění elektromotoru v oblasti stávajícího konvenčního spalovacího motoru.
- Řešení umožňuje zachovat stávající zadní nápravu v případě přestavby pohonu konvenčního autobusu na pohon palivovými články.
- Využití převodovky, což zlepšuje hnací charakteristiku vozidla a snižuje nároky na trakční charakteristiku elektromotoru a jeho řízení.

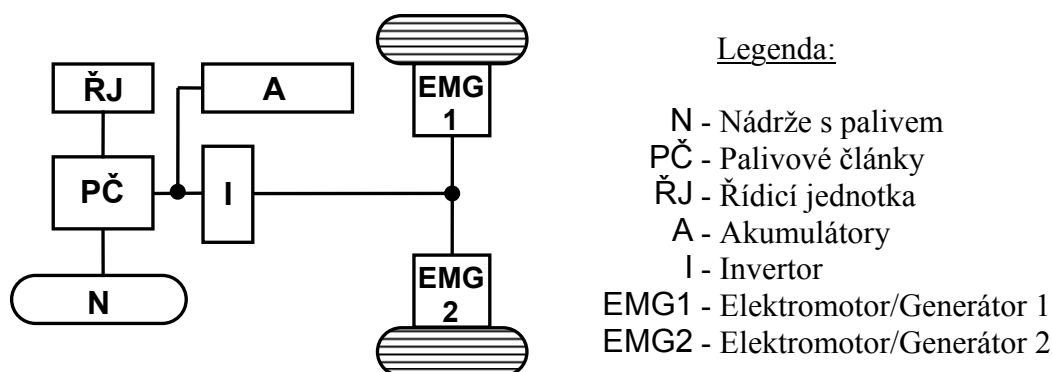
Zápory řešení:

- Časté umístění palivových článků a jejich příslušenství na střeše autobusu nepříznivě posouvá těžiště směrem nahoru, z toho plynoucí horší stabilita a ovladatelnost vozidla; vysoké nároky na konstrukci střechy.
- Použitá automatická převodovka, hnací hřídel a rozvodovka představují další součásti pohonu, které jsou náchylné k poškození, prodražují koncepci pohonu a snižují celkovou účinnost.
- Umístění hnací části (elektromotoru a převodovky) zaujímá zbytečně velké prostory, které by mohly být využity pro součásti hybridního pohonu; zvýšení hmotnosti pohonu.

3.3.3 Varianta III

Konstrukce této varianty koncepce pohonu vychází z předchozí varianty s následující změnou: Nahrazení jednoho trakčního elektromotoru dvěma, každý umístěný v nábojích kol zadní nápravy. Tím odpadá řetězec "centrální elektromotor, převodovka, hnací hřídel a rozvodovka" (obr. 23). Použité elektromotory jsou menší, použit je jednoduchý převod (kolová redukce). Celkový potřebný výkon si rozdělí mezi dva elektromotory. Elektromotory pracují v režimu jak motorickém tak generátorovém. Příkladem tohoto pohonu budiž autobus Scania, technické parametry a zástavba pohonu do tohoto autobusu viz. *příloha 5*, str. 61.

Obr. 23. Schéma hybridního pohonu s elektromotory v nábojích kol.



Klady řešení:

- Možnost umístění palivových článků do oblasti stávajícího konvenčního spalovacího motoru, tím posunutí těžiště směrem dolů. Též vzniknou další prostory pro součásti hybridního pohonu.
- Oproti nehybridní variantě úspora energie až 30 %.
- Odpadá použití převodovky a hnacího hřídele; zvýšení účinnosti, snížení hmotnosti.

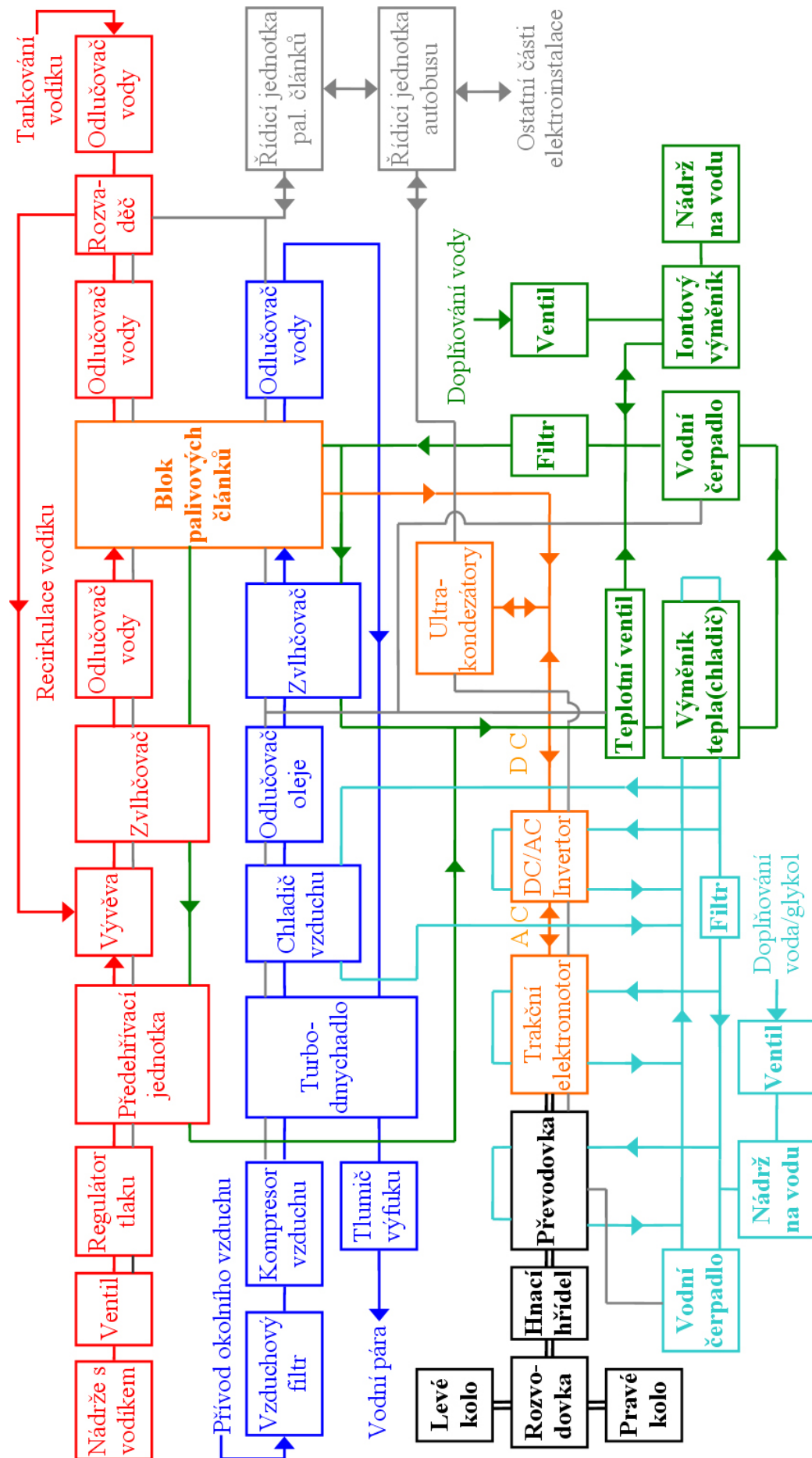
Zápory řešení:

- Není možno využít stávající nápravu při přestavbě autobusu s konvenčním pohonem.
- Z důvodů vypuštění převodovky horší hnací charakteristika a větší nároky na trakční charakteristiku elektromotorů.
- Složitější řízení elektromotorů; dražší elektromotory.

3.3.4 Výběr varianty pro podrobnější rozpracování projektu, schéma zapojení

S ohledem na skutečnost, že konstrukce vodíkového pohonu by mohla být provedena formou přestavby nízkopodlažního autobusu poháněného v současné době řetězcem "spalovací motor – převodovka – kloubová hnací hřídel – rozvodovka zadní nápravy", bude vhodné ekvivalentně využít stávající prostory pohonu a minimalizovat tak zásahy do konstrukce nosných částí karoserie. Z těchto důvodů byla za vhodné řešení vybrána varianta II (viz. kap. 3.3.2). Dalším kladem tohoto řešení pohonu je skutečnost, že drtivá většina autobusů poháněná elektromotorem s vodíkovými palivovými články využívá této koncepce, což má za následek větší informační dostupnost ve všech ohledech konstrukce tohoto nového pohonu.

Na základě volně zveřejněných informací nejrůznějších výrobců autobusů o vodíkovém pohonu, bylo sestaveno možné zjednodušené blokové schéma zapojení nejdůležitějších částí pohonu (obr. 24). Funkce jednotlivých částí pohonu byly popsány v předcházejících kapitolách, jejich začlenění do funkčního celku by mělo být patrné právě z následujícího schématu.



Legenda: — Vedení vodíku — Vedení vzduchu — DC/AC proud — Chlazení deionizovanou vodou — Chlazení směsí voda/glykol
— Komunikační rozhraní CAN bus == Přenos kroutícího momentu

4 NÁVRH AGREGÁTŮ POHONU A JEJICH ZÁSTAVBY DO AUTOBUSU

Jelikož se pohon palivovými články dosud masově nerozšířil, zaměří se návrh pouze na základní části hnacího ústrojí. Důvodem je stále nízká informační dostupnost, převážně scházející přesné specifikace jednotlivých částí pohonu, jak rozměrové, tak funkční. Dalším problémem je chybějící standardizace a normalizace, plynoucí ze skutečnosti, že stávající autobusy jsou pouze prototypy využívané k testování. Výrobci těchto pohonů též neradi zveřejňují jakékoliv podrobnější informace o zapojeních a použitých technologiích "třetím osobám", čemuž se s ohledem na vysoké investiční náklady a rostoucí konkurenci v této oblasti není možno ani divit. Nejvíce dat je v současné době možné získat prostřednictvím internetu (specializované servery, volně šířené výzkumné zprávy, zápisy z prezentací apod.), stávající literatura je, zejména v České republice, nedostačující.

4.1 Autobus

Pro zástavbu vodíkového pohonu s palivovými články byl vybrán městský nízkopodlažní autobus TEDOM 123 G (D), který je v současnosti poháněn plynovým motorem TEDOM M1.2C M640 FNG 4 (zdvihový objem $11\,946\text{ cm}^3$, výkon 210 kW při $2\,000\text{ min}^{-1}$, max. točivý moment $1\,200\text{ Nm}$ při $1\,200 - 1\,450\text{ min}^{-1}$) nebo alternativně dieselovým motorem TEDOM M1.2C M640 FE 3 (výkon 210 kW , max. točivý moment $1\,220\text{ Nm}$ při $1\,300\text{ min}^{-1}$). S těmito agregáty může autobus dosahovat rychlosti 90 km.h^{-1} . Podrobnější technické specifikace a konstrukce autobusu viz. **příloha 7**, str. 64.



Obr. 25. Autobus TEDOM 123 D.

Současné verze autobusů (obr. 25) vyrábí společnost TEDOM s.r.o. v Třebíči a v Jablonci nad Nisou, společnost tak navazuje na tradici značky LIAZ. K potřebám této práce byla poskytnuta výkresová dokumentace karoserie autobusu (střecha a zadní část), využitá k rozměrové analýze zástavby jednotlivých částí vodíkového pohonu.

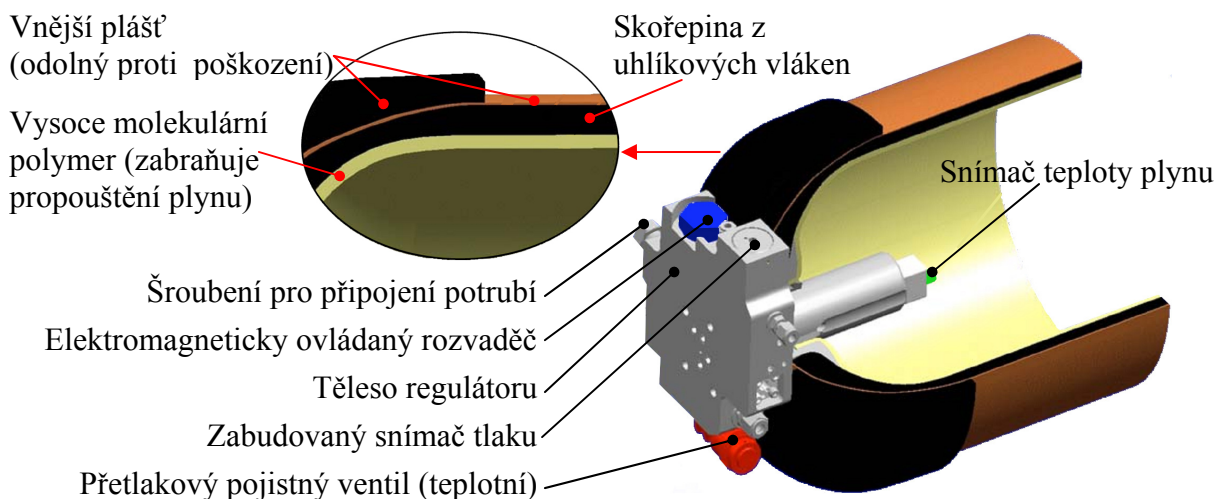
4.2 Nádrže na vodík

Pro uchovávání vodíku v autobuse byl vybrán systém "tlakových nádrží", který je v současnosti nejpoužívanější (o systémech skladování vodíku ve vozidle viz. kapitola 3.2.1). Hlavními dodavateli tlakových nádrží na vodík pro vozidla jsou zkušení výrobci v této oblasti, zejména Linde AG, Dynetek Industries Ltd. a Quantum Technologies, Inc. Pro uskladnění vodíku v autobuse byly navrženy tlakové nádoby firmy Dynetek. Jedná se o typ DyneCell z kompozitního materiálu (obr. 26), který by měl být až o 18 % lehčí než stejná nádrž jiných výrobců a až čtyřikrát lehčí než podobná ocelová nádrž. Nádrže jsou dokonale nepropustné, odolné proti UV paprskům, kyselinám, olejům, solím a vodě. Nádrže jsou dále z bezpečnostních důvodů otestovány na odolnost proti nárazům (shazovány z velkých výšek z jeřábů, taženy za nákladním automobilem), na odolnost proti střelbě a na tlaková přetížení odpovídající dvojnásobku pracovního tlaku. Nádrže mají tvar válce (tvar může být na přání zákazníka modifikován na nestandardní) o různých vnějších průměrech a délkách. K zástavbě byl vybrán typ W, parametry jedné nádrže v tabulce 5.

Tab. 5. Parametry nádrže DyneCell.

Série	Vnitřní objem	Vnější průměr	Délka	Hmotnost	Pracovní tlak	Max. plnicí tlak	Připojení - port
W303	303 l	428 mm	3020 mm	170,5 kg	45 MPa	56,3 MPa	G8N

Obr. 26. Konstrukce tlakových nádrží a regulátoru.



Hmotnost stlačeného vodíku v jedné nádrži lze přibližně určit pomocí stavové rovnice ideálního plynu $p \cdot V = m \cdot r \cdot T$:

$$m = \frac{p \cdot V}{r \cdot T} = 11,3 \text{ kg}$$

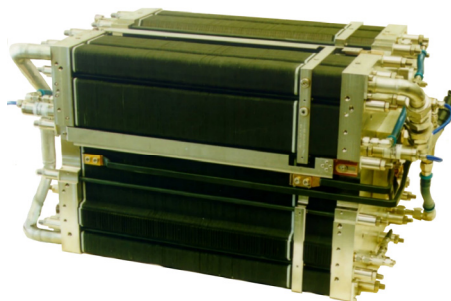
Kde absolutní tlak $p = p_p + p_{\text{bar}}$; přetlak v nádobě $p_p = 45 \times 10^6 \text{ Pa}$; barometrický tlak $p_{\text{bar}} = 0,1 \times 10^6 \text{ Pa}$; objem nádrže $V = 0,303 \text{ m}^3$; měrná plynová konstanta vodíku $r = 4\,116 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; teplota $T = t + 273,15 \text{ [K]}$; teplota okolí $t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tlakové nádrže budou namontovány v přední části střechy v podélném směru v počtu 4 kusů, celková kapacita 1 212 l (45,2 kg) vodíku, celková hmotnost včetně náplně 727,2 kg.

4.3 Palivové články

Největšími výrobci palivových článků pro mobilní aplikace jsou Ballard Power Systems, UTC, Siemens AG a Hydrogenics Corporation. Jako hlavní zdroj elektrické energie byl vybrán palivový článek firmy Siemens. Jedná se o článek s tuhými polymery PEMFC. Princip funkce takového palivového článku viz. kapitola 3.2.2. Palivové články tohoto typu se úspěšně používají v aplikacích těžkých a středně těžkých vozidel. Konkrétně tyto typy využívají ke svému provozu autobusy značky MAN a Neoplan. Palivem je v tomto případě čistý vodík (99, 998 %), který je přiváděn na katodu, oksysočivadlem přiváděným na anodu je okolní vzduch.

Články výrobce dodává v blocích tvaru kvádrů o různých rozměrech a výkonech. K zástavbě byl vybrán palivový článek Siemens typ E (obr. 27). Dostupné parametry tohoto palivového článku v tabulce 6, průběh účinnosti v grafu na obrázku 28.

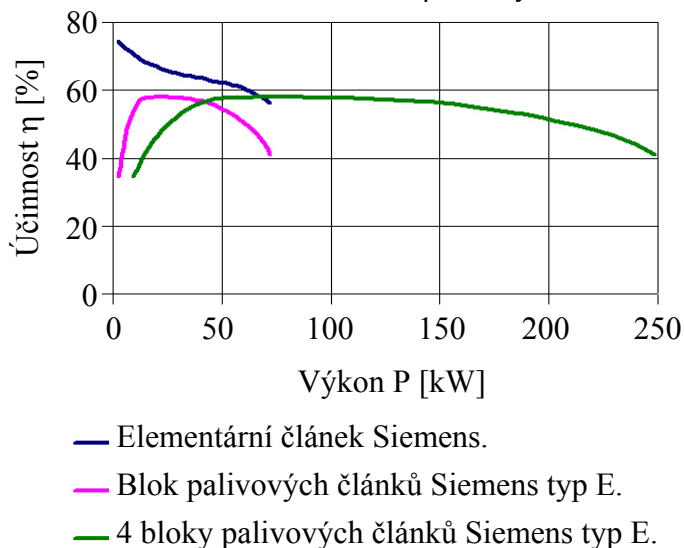


Obr. 27. Blok palivových článků Siemens typ E.

Tab. 6. Siemens typ E - parametry.

Jmenovitý výkon	58 kW
Jmenovité napětí	96 V
Svorkové napětí	160 V
Jmenovitý proud	600 A
Počet elementárních článků	160 ks
Výška	410 mm
Šířka	410 mm
Hloubka bez armatur	560 mm
Hloubka včetně armatur	835 mm
Celková hmotnost	180 kg
Pracovní teplota	cca. 80 °C
Maximální účinnost	58 %

Obr. 28. Průběh účinnosti palivových článků.



Palivový článek má integrované zvlhčovače a odlučovače. Chlazení článků se provádí deionizovanou vodou. S ohledem na nainstalovaný výkon stávajícího autobusu poháněného spalovacím motorem je třeba použít čtyři bloky tohoto palivového článku (spojení více bloků palivových článků se běžně používá). Celková hmotnost palivových článků bez příslušenství dosáhne hodnoty 720 kg. Celkový výkon palivových článků tak bude dosahovat přibližně 232 kW, průběh účinnosti takového sestavení je znázorněn v grafu zeleně (obr. 28). Jedná se o celkovou účinnost kompletního systému palivových článků včetně jejich příslušenství (kompresory, čerpadla apod.). Je patrné, že bude vhodné palivové články provozovat při nižším odbíraném výkonu, v rozmezí 50 – 100 kW, články tak budou pracovat při vyšší účinnosti v optimálních podmínkách. K pokrytí výkonnostních špiček bude maximálně využíváno akumulárního systému.

4.4 Akumulační systém - ultrakondenzátory

Energetický akumulární systém funguje jako "Buffer", který uskládá a uvolňuje nadbytečnou energii získanou zpětně z hnacího systému při brzdění. Tato nadbytečná energie se dále využívá jednak k pohonu a dále k napájení ostatních příslušenství autobusu. Využitím akumulárních systémů u autobusů s vodíkovým pohonem se docílí provozu palivových článků při nižším výkonu než je při výkonnostních špičkách elektromotoru potřeba a dovoluje tomuto systému pracovat v optimálním "hladkém" režimu, čímž se snižuje spotřeba paliva, zvyšuje účinnost pohonu a snižují celkové náklady. K ukládání elektrické energie je možno využít akumulátorů (kapitola 3.2.3), velmi často nikl-metalhydridových (např. systém Cobasys LLC 4 500) s dobou životnosti až 6 let, modernější způsob reprezentují systémy ultrakondenzátorů s životností minimálně dvojnásobnou. Při použití akumulárního systému se z autobusu s pohonem palivovými články stává hybridní vozidlo.

Pro optimalizaci hybridního systému je zapotřebí pečlivě vybrat jednotlivá zařízení dle specifického pracovního cyklu autobusu, který je možno získat například z již naměřených dat (telemetrie) podobného vozidla provozovaného v příslušné oblasti. Jedním z největších problémů optimalizace hybridních hnacích systémů autobusů je fakt, že se aktuálně tyto systémy málo používají. Dalším problémem je velká různorodost intervalů zastávek v městských centrech a různé rozsahy stoupání a klesání. Hybridní systém tedy může fungovat s maximální efektivitou pouze na specifických trasách, je proto často konfigurován tak, aby byl schopen vyhovět co nerůznorodějším podmínkám i za cenu kompromisů, nebo je konstruován přímo "na míru" požadavkům konkrétního zákazníka.

Hybridní uspořádání zvyšuje pružnost systému, ovšem je třeba dodat, že jen po omezenou dobu trvání (dobu do vyprázdnění akumulčního systému). Je tedy zřejmé, že palivové články musí být vzhledem k výkonovým potřebám motoru patřičně dimenzovány, protože akumulční systém není schopen kontinuálně poskytovat dostatek elektrické energie. Palivové články tedy dodávají zejména elektrickou energii o výkonu v rozmezí řádově 50 - 100 kW (průměrná hladina výkonu potřebná k jízdě městského autobusu se pohybuje okolo 50 kW, viz **příloha 6**, str. 62), naopak výkonové špičky hlavně přes 150 kW potřebné k rozjezdu a zrychlování by měl pomáhat pokrývat právě akumulční systém. Vedlejší agregáty (příslušenství) standardního autobusu obecně ke svému provozu potřebují asi 8 kW výkonu včetně klimatizace a asi 3 kW výkonu bez klimatizace. V praxi může asi jedna desetina kWh akumulčního systému dodat výkon 60 kW po dobu 6 sekund. Pro zajímavost je statisticky ověřeno, že autobus provozovaný 12 hodin denně 330 dní v roce je schopen rekuperačním brzděním celkem získat 36 000 kWh elektrické energie, což např. u dieselového motoru odpovídá spotřebě 15 140 litrů nafty!

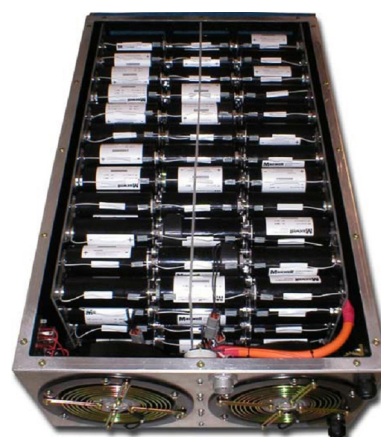
Je třeba ještě poznamenat, že ultrakondenzátory nejsou určeny k dlouhodobému skladování elektrické energie, proto musí být na palubě autobusu nainstalovány klasické akumulátory, které dále napájejí elektrickou soustavu (osvětlení apod.). K tomuto účelu mohou být v našem případě využity stávající akumulátory s kapacitou 225 Ah.

Ultrakondenzátory, které přemění stávající hnací ústrojí autobusu na hybridní, byly vybrány od společnosti ISE Corporation, která se projektováním a zkoušením hybridních elektrických systémů pro autobusy zabývá více než deset let. Do systému bude zapojen energetický ultrakondenzátorový akumulční systém ThunderVolt typ ThunderPack II (obr. 29). Specifikace tohoto zařízení v tabulce 7.

Tab. 7. ThunderPack II - parametry.

Jmenovité / maximální napětí	306 V / 403 V
Jmenovitý / maximální proud	400 A / 600 A
Kapacita	2 600 F
Nominální / maximální výkonová kapacita	0,325 kWh / 0,407 kWh
Provozní teplota	-35 až 65 °C
Hmotnost	114 kg
Rozměry (Š×V×H)	610×305×1016 mm
Počet kondenzátorů	144 ks, typ Maxwell
Počet nabíjecích cyklů	$> 5 \times 10^5$ cyklů
Účinnost	$> 95 \%$

Obr.29. ThunderPack II.



Předpokládaná životnost ultrakondenzátorů dle výrobce je 12 let, což je dostatečná doba s ohledem na životnost ostatních částí pohonu. Systém je opatřen protipožárním zařízením Halotron, reagující na nežádoucí teplo, a chlazením vzduchem pomocí dvou integrovaných ventilátorů umístěných na boku. Měrná energie odpovídá hodnotě asi $3,5 \text{ Wh.kg}^{-1}$ a měrný výkon $1,75 \text{ kW.h}^{-1}$. Maximální nabíjecí a vybíjecí výkon činí 200 kW, přičemž doba ukládání a vyprazdňování takto vysoké hladiny výkonu je velice krátká, nesrovnatelně kratší než u standardních akumulátorů.

Pro autobus s elektromotorem o výkonu kolem 200 kW je nutné použít dvou těchto systémů zapojených v sérii, dosahuje se tak následujících hodnot: Nominální napětí 720 V (max. 800 V), maximální výkon vyšší než 300 kW, kapacita přibližně 0,65 kWh, celková hmotnost 228 kg. V praxi to například znamená, že pro rozjíždění (akceleraci) bude po dobu 11 s k dispozici výkon 213 kW.

4.5 Invertor

Hlavním úkolem invertoru je přeměňovat stejnosměrný proud generovaný palivovými články nebo ultrakondenzátory na střídavý proud potřebný pro napájení střídavého elektromotoru. Invertor dále musí dokázat plynule upravovat velikost napětí a frekvence v potřebném rozsahu pro rozjezd a dokonalé řízení výkonu trakčního elektromotoru (aktivní kontrola). Musí zamezit možnému překročení povolených otáček trakčního elektromotoru. Invertor se též zpětně používá k přeměně střídavé proudu generovaného motorem, generátorem při brzdění, na proud stejnosměrný, který je dále jednak ukládán do ultrakondenzátorů a jednak napájí ostatní části hnacího ústrojí.

Invertory jsou často dodávány společně s elektromotory. Čelními výrobci v této oblasti jsou firmy ISE Corporation, Enova Systems, Siemens AG a Ballard Power Systems. Invertor byl vybrán společně s elektromotorem od firmy Ballard, jedná se o typ A660 V300 (obr. 30), parametry v tabulce 8.

Tab. 8. Invertor A660 V300 – parametry.

Maximální výkon	250 kW
Nominální napětí	660 V
Napěťový rozsah	660 – 900 V
Výstupní proud RMS	450 A
Výstupní frekvence	0 – 400 Hz
Rozměry (Š×V×H)	470×200×590 mm
Hmotnost	60 kg
Pracovní teplota	cca. 75 °C
Maximální účinnost	98 %

Obr. 30 Invertor Ballard A660 V300.



Další provozní parametry jsou: Vysoce rychlostní přepínací zařízení výkonu 1200 V & 1 700 V typu IGBT, vektorový typ kontroly střídavého proudu, I/O rozhraní vysokorychlostní komunikace J1939 CAN s integrovaným zjišťováním chyb, napájení 12 nebo 24 VDC / 50 W, kapalinové chlazení směsí 50 % voda / 50 % glykol. Invertor byl navržen zejména pro elektromotory Ballard A660 V250 a A600 V300.

4.6 Trakční elektromotor

Jen ve velmi malém procentu z celkové času je po motoru vyžadován výkon větší jak 200 kW. Je dobré poznamenat, že průměrná hladina výkonu potřebná k provozu autobusu během dne je přibližně 50 kW, viz. **příloha 6**, str. 62. Přestože je výkon 200 kW zřídka kdy potřeba pro konvenční hnací systém autobusu, musí být elektromotor o tomto výkonu ve vozidle nainstalován. Mezi výrobce elektromotorů pro mobilní aplikace patří firmy Siemens AG, Ballard Power Systems, Enova Systems a ISE Corporation. K pohonu byl vybrán střídavý třífázový asynchronní motor firmy Ballard typ A660 V250 (obr. 31), který se úspěšně používá u autobusů koncernu Evobus. Parametry motoru v tabulce 9, výkonová a momentová charakteristika v grafu na obrázku 32.

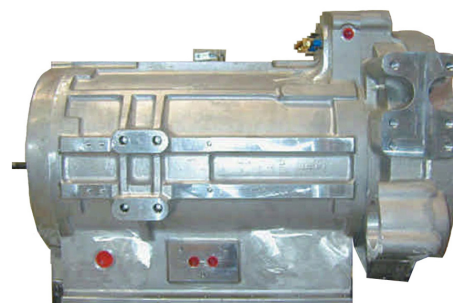
Asynchronní motor je výrobně nejjednodušší a proto nejlevnější elektrický motor s vysokou spolehlivostí. Řízení otáček se provádí změnou frekvence napájecího napětí, která ovlivňuje magnetický tok, moment i proud motoru. Proto je třeba současně s řízením frekvence řídit i napětí. Je to hospodárný a plynulý způsob regulace otáček. Řízení otáček lze provést též změnou skluzu - změnou napájecího napětí. V tomto případě ale snížením napětí moment výrazně klesá, protože moment je úměrný druhé mocnině napětí. K rekuperačnímu

(generátorickému) brzdění dochází při skluzu menším než 0, kdy činná složka proudu a tím i moment změni znaménko. K tomuto účelu je nutno zvýšit otáčky motoru nad synchronní. Brzdění motoru je realizováno buď protiproudem (nastane při skluzu větší jak 1 a změně směru točení magnetického pole přepólováním dvou přívodů) nebo stejnosměrným proudem (nastane při skluzu menší než 1, kdy se odpojí dvě fáze střídavého napětí a připojí napětí stejnosměrné, indukované napětí, proud a moment jsou záporné).

Tab. 9. Motor Ballard A660 V250.

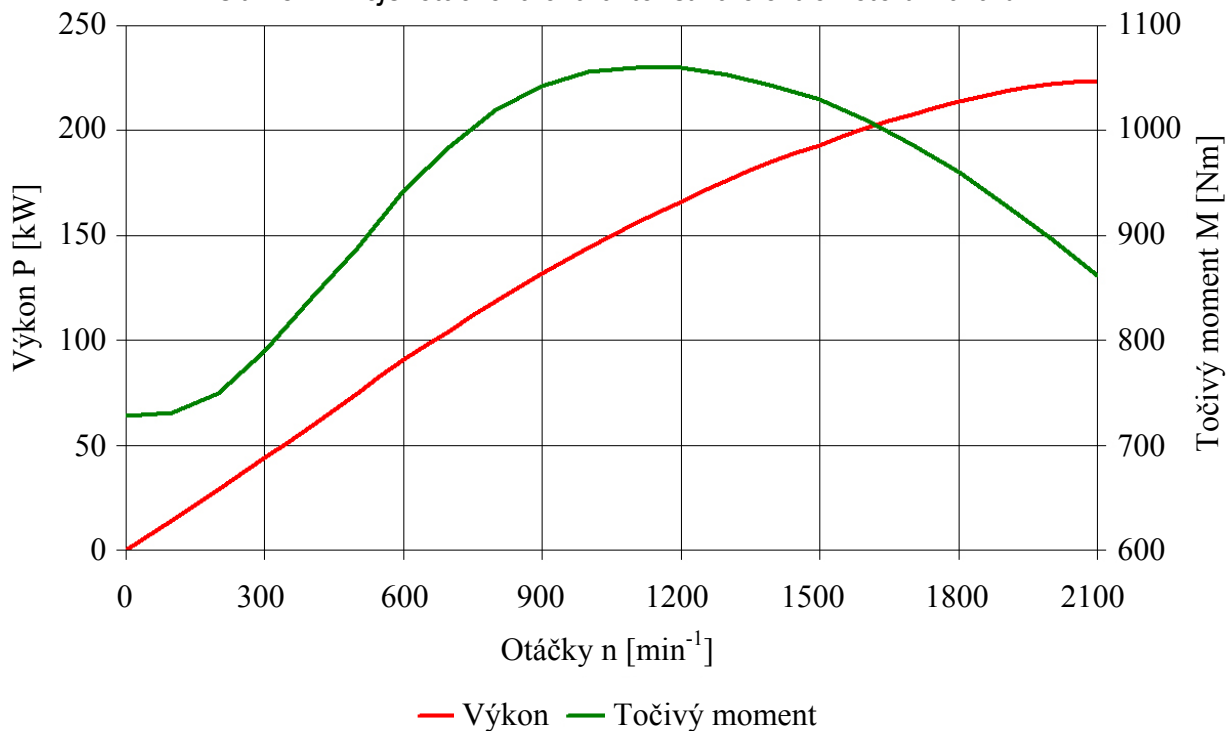
Maximální výkon	250 kW
Kontinuální výkon	225 kW
Maximální krouticí moment	1 060 Nm
Otáčky motoru při jmen. výkonu	2 100 min ⁻¹
Nominální napětí	480 V
Napěťový rozsah	660 – 900 V
Rozměry (Š×V×H)	870×710×587 mm
Hmotnost	411 kg
Účinnost při max. výkonu	93 %

Obr. 31. Motor Ballard A 660 V250.



Chlazení elektromotoru je realizováno chladicí kapalinou (směs 50 % voda / 50 % glykol). Motor nemá, na rozdíl od svých kolegů, integrovanou převodovku, dává tak zákazníkovi možnost nechat si navrhnout firmou Ballard typ dle svých požadavků, nebo připojit převodovku jiného výrobce nebo vlastní výroby. K motoru je možné připojit převodovku prostřednictvím SAE příruby.

Obr. 32. Vnější otáčková charakteristika elektromotoru Ballard.



4.7 Převodovka, kloubová hnací hřídel, spojka a zadní náprava

Pro vhodnou úpravu hnací charakteristiky pohonu autobusu (s ohledem na převod rozvodovky i_R zadní nápravy a charakteristiku motoru) je použita pětistupňová automatická převodovka vlastní konstrukce, typ 50.232.01. Přibližné vnější rozměry byly odečteny z výkresové dokumentace převodovek s podobnými provozními parametry a vnitřním uspořádáním z Atlasu převodových ústrojí [2] (pro přesné zjištění rozměrů převodovky by bylo třeba navrhnout vnitřní části - soukolí, hřídele, řazení a uložení, od kterých se odvíjí vnější tvar skříně, což není náplní této práce).

Převodovka nemá zpětný chod, jízda dozadu je realizována změnou smyslu otáčení elektromotoru, přičemž řazení je v tomto případě elektronicky omezeno pouze na první rychlostní stupeň a neutrál. Maximální a minimální převodový poměr převodovky byl určen vzhledem k maximální požadované stoupavosti a rychlosti autobusu. Zjednodušený návrh jednotlivých převodových stupňů, pilový diagram a hnací charakteristika viz. **příloha 8**, str. 65-70.

K přenosu hnací síly od převodovky k rozvodovce zadní nápravy může být využita, s ohledem na podobné přenášené krouticí momenty, stávající podélná kloubová hnací hřídel. Též typ zadní nápravy není třeba, s ohledem na použitou koncepci pohonu, měnit za jiný druh. Jelikož je možné plynule regulovat otáčky elektromotoru od nuly, mohla být rozjezdová spojka vypuštěna.

4.8 Ostatní systémy

Komunikační a řídicí systémy

Řídicí jednotka má za úkol optimalizovat provoz jednotlivých částí pohonu a kontrolovat funkci celého systému vzhledem k jeho výstupnímu výkonu a účinnosti. Správná funkce a spolupráce jednotlivých subsystémů je k provozu s maximální účinností klíčová a často vyžaduje kompromisy v dílčích funkcích podsystémů. Řídicí jednotka palivových článků a řídicí jednotka vozidla se často sdružují do jedné plně programovatelné řídicí jednotky autobusu (obr. 33). Ovládací software je vytvořen "na míru" všem nainstalovaným komponentům a vytváří ho specializované firmy, např. ISE Corporation.



Obr. 33. Řídicí jednotka.

Multiplexory, systémové spínače a kontrolní systémy jsou společně s ostatními prvky elektroinstalace propojeny kabelovými svazky. Algoritmy řízení realizuje inteligentní moderní software integrovaný do nejnovějších mikroprocesorů. Tento systém musí vyhovovat nejposlednějším mezinárodním standardům komunikace. Všechny hlavní systémy včetně palivových článků, hnacího systému, energetického akumulčního systému, systému ovládání a řízení i druhotné systémy spolu komunikují pomocí standardu typu CAN (J1939 Controls Area Network). Tento systém je velice snadné aktualizovat, je velice spolehlivý, monitoruje vše v reálném čase z jednoho vhodného umístění a naprosto jednoduše dokáže odstraňovat zjištěné závady. K tomuto systému je možno připojit (v prostoru řidiče a zádí) přenosný počítač a monitorovat tak podskupiny hnacího systému přímo v provozu v reálném čase. Díky jednotkám typu RDU se zbudovaným GPS (Global position system) lze provádět diagnostiku též na dálku. RDU je vysoce výkonný počítačový systém, který monitoruje všechny CAN sběrnice. Vyznačuje se systémem pro vysokorychlostní bezdrátovou komunikaci GPRS. Tak je zajištěno stahování dat ze sběrnice CAN za provozu do centrální databáze. Jestliže například palubní počítač zjistí neobvyklou změnu v tlaku vzduchu a teplotě chlazení,

okamžitě generuje příslušná varování k údržbě příslušného systému, která později prověří vzduchový a chladicí systém. Takováto diagnostika zlepšuje předpověď poruch a snižuje náklady na údržbu autobusu. Data se dále shromažďují a využívají ke zlepšení konstrukce další generace autobusu.

Bezpečnostní systémy

Bezpečnostní systémy jsou u autobusů poháněných vodíkem velmi důležité. Kontrolní zařízení typu GFI (Ground Fault Interrupters) neustále kontrolují činnost palivových článků a elektrická vedení, aby při poruše či havárii nedošlo u obsluhy a cestujících k úrazu elektrickým proudem. Výkonové systémy jsou totiž v provozu pod vysokým napětím, přičemž se vyskytují v těsné blízkosti vody, která je ochlazuje na optimální teplotu. V případě zkratu dochází k okamžitému odpojení všech těchto systémů způsobem, který nesmí ohrozit lidské životy.

Vodíkové nádrže, které jsou plněny pod vysokým tlakem, kladou velké nároky na potrubní systém a jeho armatury. Celý systém vedení vodíku musí být konstruován takovým způsobem, aby byl schopen několikanásobně překročit pracovní tlaky a odolávat tak velkým přetížením. Speciální senzory reagující na vodík jsou namontovány z vnější strany kapotáže autobusu, v oddělení palivových článků a v oblasti čerpání paliva. Tyto senzory jsou nakalibrovány tak, aby již při úniku vodíku na jednu čtvrtinu jeho meze zápalnosti, způsobené např. netěsnostmi, byl autobus odstaven a speciálním ventilem vysoký tlak ve vedení snížen odpuštěním vodíku do atmosféry. Také se musí automaticky odjistit speciální hasicí zařízení typu Halotron, které též neustále prostřednictvím detektorů plamenů a kouře kontroluje oddělení palivových článků a výkonových systémů.

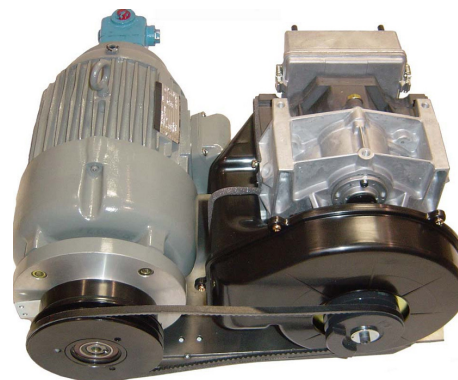
Ostatní

K příslušenství palivových článků patří kompresor pro dopravu vzduchu k palivovým článkům a čerpadlo pro chlazení systému palivových článků. K tomuto účelu může sloužit např. systém vzduchový kompresor a hydraulické čerpadlo ThunderVolt (obr. 34) od firmy ISE Corporation. Parametry tohoto systému v tabulce 10.

Tab. 10. Systém ThunderVolt – parametry.

Elektromotor	5,5 kW / 1 800 min ⁻¹
Kompresor	0,35 – 0,7 MPa / 3080 min ⁻¹
	0,46 – 0,35 m ³ .min ⁻¹
Čerpadlo	Lamelové 12 MPa / 1 800 min ⁻¹
	15 l.min ⁻¹
Hladina hluku	50 dB
Rozměry (Š×V×H)	610×381×406 mm
Celková hmotnost	91 kg
Celková účinnost	90 %

Obr. 34. Systém ThunderVolt.



Mimo jiných musí být v autobuse nainstalovány další elektricky poháněné kompresory, které dodávají potřebný vzduch brzdovému ústrojí, systému ovládaní dveří, klimatizaci a systému odpružení umožňující klesání a stoupání podvozku autobusu a elektricky poháněné čerpadlo oleje pro posilovač řídicího ústrojí (v tomto případě lze využít systémů stávajícího autobusu). Dále elektricky poháněné ventilátory s chladiči (výměníky tepla) pro odvod tepla, snížení teploty chladících kapalin.

4.9 Zástavba navržených částí pohonu do autobusu

Dle poskytnuté technické dokumentace autobusu byl vytvořen úplný 3D model střechy, zádě a části podlahy v aplikaci ProENGINEER 2001. V tomto softwaru byly též vymodelovány i ostatní navržené části pohonu dle jejich základních vnějších rozměrů. Do vytvořených prostorů autobusu byly vhodně umístěny jednotlivé části pohonu, umístění vychází ze stávajících koncepcí a je patrné z obrázku 35.

Nádrže na vodík jsou uloženy v samostatném svařovaném rámu, podélně v přední části autobusu v počtu čtyřech kusů. Nad nádržemi je z trubek vystavěn ochranný rám, který též slouží k uchycení vnějšího krytu (opláštění) nádrží. Nádrže jsou k rámu přišroubovány pomocí dělených objímek za hrdla. Regulátory tlaku jsou umístěny směrem k zádi autobusu.

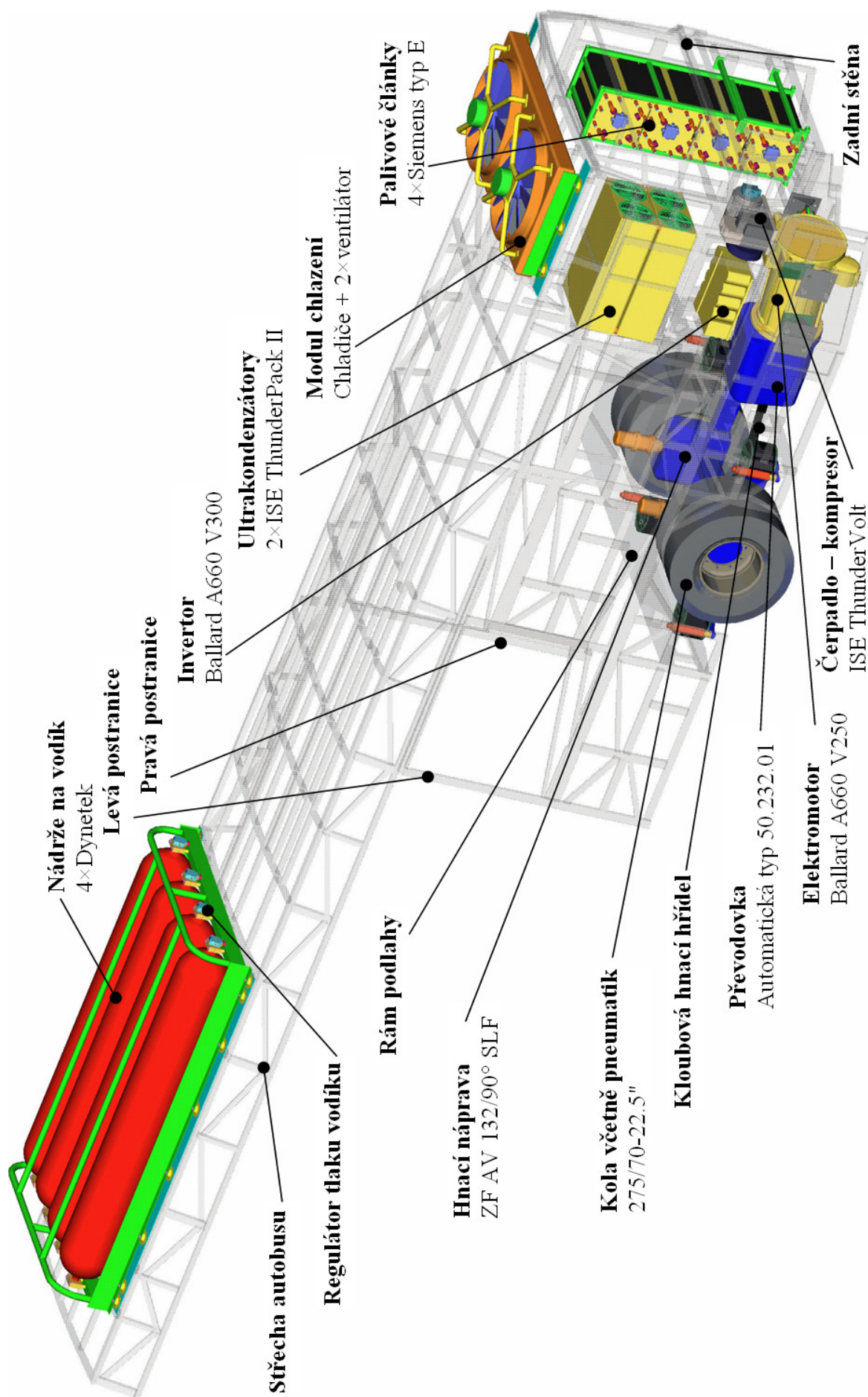
Hnací hřídel společně s rovinou vozovky svírá úhel 5°, s podélnou rovinou autobusu úhel 10°. Osy převodovky a elektromotoru jsou tak natočeny pod stejnými úhly jako hnací hřídel. Převodovka je s elektromotorem spojena přírubou. Elektromotor je uchycen v konstrukci motorového prostoru na čtyřech místech, uložení je pružné (použití silenbloků).

Invertor, příslušenství palivových článků a ultrakondenzátory jsou přišroubovány k rámu, který je součástí vnitřní konstrukce autobusu. Palivové články jsou vloženy do samostatného rámu a jako celek připevněny k vnitřním částem konstrukce autobusu. Kolem těchto systémů pohonu je ponechán dostatek místa, které je potřeba pro další části elektroinstalace (rozvodné skříně, bezpečnostní a kontrolní systémy, panely apod.), pro značné množství kabelů a potrubních systémů (potrubí chlazení elektromotoru a invertoru, potrubí chlazení palivových článků, potrubní systém přívodu vzduchu, potrubí systém přívodu vodíku) a další příslušenství.

Systém pro odvod tepla z chladicích okruhů (chladiče s ventilátory) je umístěn na střeše v zadní části autobusu. V případě dostatečné únosnosti konstrukce střechy, by mohl být na střechu nainstalován další rám se čtyřmi tlakovými nádržemi na vodík, čímž by se zdvojnásobil dojezd autobusu.

Obrázky ze zástavby pohonu do autobusu z aplikace ProENGINEER viz. *příloha 9*, str. 71-72, v elektronické podobě na CD-ROM, soubor "**Prezentace zástavby pohonu.exe**".

Obr. 35. Zástavba navržených částí pohonu do autobusu – ProENGINEER.



5 PŘEDPOKLÁDANÉ PROVOZNÍ PARAMETRY AUTOBUSU

Provozní parametry autobusu vycházejí z nově navržených hlavních částí pohonu a z ostatních parametrů stávajících systémů autobusu Tedom viz. *příloha 7*, str. 64. Ostatní parametry byly odhadnuty dle podobných pohonů jiných výrobců.

Celková obsaditelnost se sníží o 6 osob, protože prostor pro cestující v zádi autobusu zaujímá systém palivových článků s příslušenstvím. Celková hmotnost pohonu včetně nádrží na vodík byla stanovena součtem jednotlivých částí systému a odhadem zvětšena o hmotnost nenaprojektovaných částí (elektrická síť, systém chlazení, systémy řízení a kontroly apod.). Hnací charakteristika autobusu viz. *příloha 8*, str. 70, předpokládaná účinnost pohonu viz. kapitola 5.1 - vybrané parametry autobusu uspořádané v tabulce 11.

Tab. 11. Vybrané parametry autobusu Tedom po přestavbě.

Typ vozidla	Autobus typu ZEV (Zero Emission Vehicle)	Městský, nízkopodlažní, dvounápravový, třídvéřový
Obsaditelnost	Celkem	86 osob
Výkon	Palivové články (Siemens)	232 kW
	Ultrakondenzátory (ISE)	0,65 kWh
	Elektromotor (Ballard)	225 kW / 2 100 min ⁻¹ (max. 250 kW)
		1 060 Nm / 1 100 min ⁻¹
Palivo	Typ	Plynný vodík o čistotě 99,998 %
	Potřebný tlak	1,2 MPa
	Průtok	max. 5 g.s ⁻¹
Uložení paliva	Tlakové nádrže	Kompozitové (Dynetek)
	Tlak	45 MPa
	Celková kapacita	45 kg vodíku (1 212 l)
Okysličovadlo	Typ	Okolní vzduch
	Potřebný tlak	0,35 MPa
	Průtok	0,45 m ³ .min ⁻¹
Provozní teplota	Palivové články	65 – 80 °C
Chlazení	Výkonové systémy	50 % voda / 50 % glykol
	Tlak	12 MPa
	Průtok	15 l.min ⁻¹
Elektrický výkon	Rozsah napětí	600 – 900 V
	Úprava výkonu	Vodou chlazený IGBT invertor (Ballard)
	Komunikační rozhraní	J1939 Controls Area Network
Převodovka	Typ	Automatická pětirychlostní 50.232.01
	Odstupňování	7,78 – 3,63 – 1,83 – 1,00 – 0,59
Hnací náprava	ZF AV 132/90° SLF	Portálový typ, hypoidní převod 6,20:1
Hmotnost	Pohon včetně nádrží	cca. 2 650 kg
Emise	CO, NO _x , HC, SO, CO ₂ , PČ	0,000
Výkonnostní ukazatele	Maximální rychlost	90 km.h ⁻¹
	Maximální zrychlení	1,74 m.s ⁻²
	Maximální stoupavost	55 %
	Hodinová spotřeba paliva	cca. 9 kg.h ⁻¹
Dojezd	Na jednu náplň paliva	cca. 250 km
Účinnost pohonu	Celková maximální	44 %

Pořizovací cena jednoho autobusu s palivovými články na vodík, odhadem dle informací jiných výrobců, zcela jistě v současné době neklesne pod 30 miliónů korun. V ceně jsou započteny veškeré komponenty pohonu, autobus bez hnacího ústrojí, montáž, materiál a výroba ostatních potřebných částí atd. Největší měrou se na výsledné hodnotě podílí kompletní systém palivových článků, který odpovídá přibližně ceně 6 miliónů korun (cca. 25 000 Kč/kW). Dále je třeba si uvědomit skutečnost, že v České republice není doposud vystavěna žádná vodíková čerpací stanice, což znamená další investice. Náklady na čerpací stanici s jedním stojanem odpovídají hodnotě 12,5 miliónů Kč, další stojan znamená investici 5 miliónů Kč.

5.1 Předpokládaná účinnost pohonu

Přibližná celková účinnost transformace energie obsažené ve vodíku na mechanickou energii přivedenou na kola autobusu je dána dílčími účinnostmi hnacího ústrojí:

Určení účinnosti převodovky η_P :

$$\eta_P = 1 - \xi_O - \xi_V - \xi_R = 0,9485 \approx 95 \%$$

$\xi_O = 2,0,02$...ztráty třením v ozubení (čelní soukolí) převodovky včetně ložisek

$\xi_V = 0,01$...ztráty ventilační, v ucpávkách a broděním v oleji

$\xi_R = 0,0015$...ztráty rozpojených řadicích členů

Určení účinnosti rozvodovky zadní nápravy η_R :

$$\eta_R = 1 - \xi_O - \xi_V = 0,90 \approx 90 \%$$

$\xi_O = 0,09$...ztráty třením v ozubení (hypoidní soukolí) převodovky včetně ložisek

$\xi_V = 0,01$...ztráty ventilační, v ucpávkách a broděním v oleji

Určení účinnosti hnacího hřídele η_H :

$$\eta_H = 1 - \xi_H = 0,98 \approx 98 \%$$

$\xi_H = 0,02$...ztráty na kloubové hnací hřídeli

Účinnosti jednotlivých částí hnacího ústrojí:

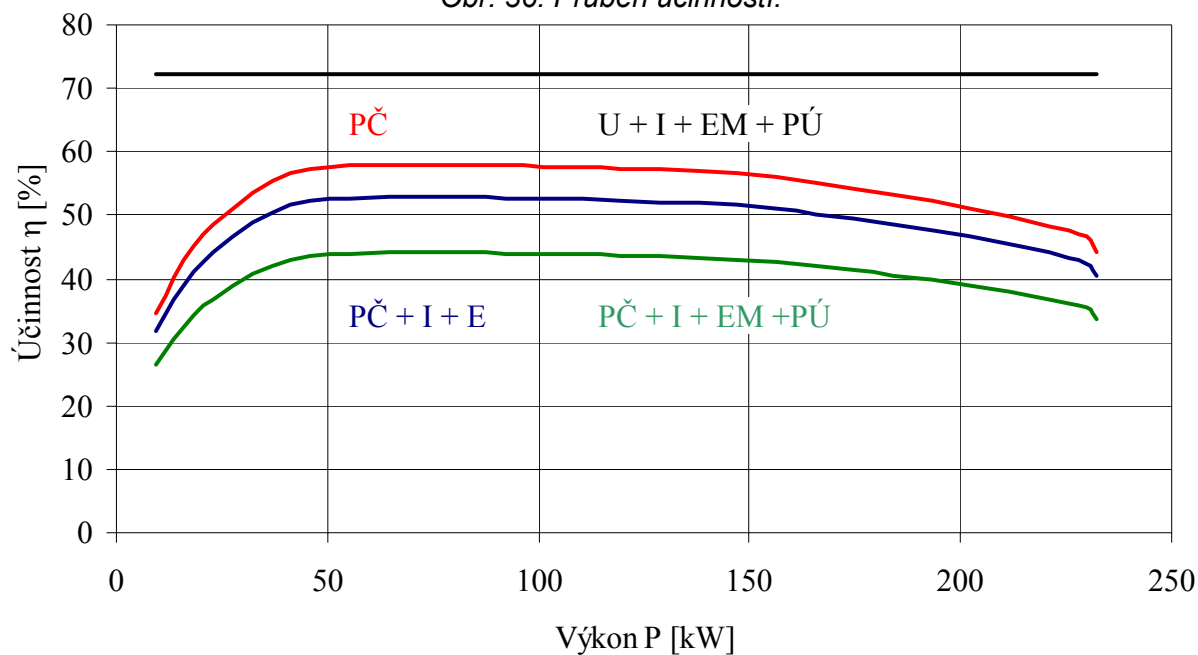
- Účinnost palivových článků (přeměna chemické energie paliva na energii elektrickou) včetně jejich příslušenství (čerpadla, kompresory...): $\eta_{PC} = 35 - 58 \%$.
- Účinnost akumulačního systému – ultrakondenzátorů (nabíjení a vybíjení kondenzátorů) $\eta_U = 95 \%$.
- Účinnost invertoru (přeměna stejnosměrného proudu na střídavý a naopak, regulace elektromotoru) $\eta_I = 98 \%$.
- Účinnost trakčního elektromotoru (přeměna elektrické energie na energii mechanickou a naopak) $\eta_{EM} = 93 \%$.
- Účinnost převodového ústrojí (změna krouticího momentu, přenos krouticího momentu na jízdní ústrojí – kola). Účinnost převodovky $\eta_P = 95 \%$; Účinnost kloubové hnací hřídele $\eta_H = 98 \%$, účinnost rozvodovky $\eta_R = 90 \%$. Celková účinnost převodového ústrojí $\eta_{PU} = \eta_P \cdot \eta_H \cdot \eta_R = 0,8379 \approx 83,5 \%$.

Celková účinnost hnacího ústrojí není konstantní a závisí na aktuálním odebíraném výkonu (viz. graf průběhu účinnosti na obr. 36). Předpokládaná maximální účinnost transformace energie obsažené ve vodíku na mechanickou energii přivedenou na kola by mohla být:

$$\eta_{Cmax} = \eta_{PC} \cdot \eta_I \cdot \eta_{EM} \cdot \eta_{PU} = 44 \%$$

Zajímavé porovnání účinností pohonu palivovými články a pohonu naftovým motorem u autobusů MAN viz *příloha 6*, str. 63.

Obr. 36. Průběh účinností.



Legenda: PČ - palivové články včetně příslušenství; U - ultrakondenzátory; I - invertor; EM - elektromotor; PÚ - převodové ústrojí.

6 ZÁVĚR

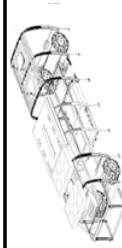
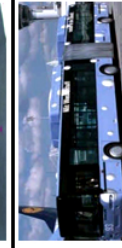
Autobusy poháněné palivovými články by se již brzy mohly stát první aplikací technologie palivových článků na současném trhu, ale tak jako u jiných trhů, musí být jejich výroba ekonomicky únosná. Nynější tržní cena jednoho autobusu poháněného palivovými články přesahuje částku jednoho miliónu amerických dolarů, s porovnáním se špičkovým dieselovým autobusem, jehož cena se pohybuje pod částkou 300 000 dolarů, jsou náklady na tyto autobusy stále ještě značně vysoké. Trh s palivovými články si nemůže dovolit být spokojený se současnou situací a předpokládat, že autobusy poháněné palivovými články jsou jedinou nebo nejlepší budoucí volbou dopravy. Tento trh čelí a nadále musí čelit rostoucí konkurenci jiných druhů alternativních pohonů, jako např. pohonu zemním plynem, který se již osvědčil a značně rozšířil, nebo nárůstu diesel-elektrických hybridních pohonů, které se stále více uplatňují v běžném provozu.

Další významnější spornou skutečností je, že většina aktuálních autobusů je postavena "na míru" v rámci nějakého specifického projektu pouze v jednom, maximálně několika kusech. Pouze o autobusu Citaro můžeme tvrdit, že byl opravdu testován ve větším počtu v těch nejnepríznivějších podmínkách. Zdá se, že nárůst produkce a standardizace technologií pro tyto autobusy a další nárůst aplikací využívajících palivových článků jsou zatím v nedohlednu, ale nedá se též říct, že by se to nemohlo změnit. Například Čína má aktuálně připravený jeden velký demonstrační projekt a několik menších projektů, které by měli poslat do ulic nové autobusy s palivovými články do konce příštího roku, a pomoci tak urychlit vývoj této nadějné technologie pohonu.

Jeden z nejvýznamnějších faktorů, který hovoří ve prospěch autobusů s palivovými články, je jejich politická hodnota. Autobusy jsou výrobci viděny jako "společensky dobrá věc", což je něco, co může vládní politika přímo podporovat. Tento faktor spolu s technologií vodíkových palivových článků, která se zabývá ekologickými otázkami, by potenciálně mohl přinutit přijmout autobusy s palivovými články mnohem dříve a urychlit tak jejich rozvoj a prodej.

Aktuálně je mnoho autobusů s palivovými články ve zkušební a hodnotící fázi. Většina projektů netestuje jen samotný chod těchto autobusů, ale zabývá se též ohlasem veřejnosti, problematikou doplňování paliv a související infrastrukturou, nebo zaváděním nových standardů a norem, které jsou podmínkou k provozu v příslušných zemích. Je to základní kámen práce, díky níž uvidíme i v následujícím roce v ulicích Spojených států, Kanadě, Číně, Japonsku a Evropě další nové autobusy s pohonem palivovými články, čímž se zase o krok přiblížíme vodíkové budoucnosti.

PŘÍLOHA 1 – Přehled autobusů s pohonem palivovými články

Výrobce	Provoz	Model	Rok	Typ pohonu	Typ pal. článků	Výrobce pal. článků	Dojezd	Max. rychlost	Typ paliva	Obrázek
Bus Manufacturing U.S.A., Inc.	univerzita Georgetown I. generace	9 m dálkový autobus	1994 1995	palivové články/akumulátory	50 kW PAFC	Fuji Electric	402 km	90 km/h	metanol	
NovaBus Corporation, Volvo	univerzita Georgetown II. generace, Washington D.C., Metro Area Transit Authority	12 m dálkový autobus	1998	palivové články/akumulátory	100 kW PAFC	UTC Fuel Cells	563 km	106 km/h	metanol	
NovaBus Corporation, Volvo	univerzita Georgetown II. generace demonstrační autobus	12 m dálkový autobus	2000	palivové články/akumulátory	100 kW PEMFC	Ballard	563 km	106 km/h	metanol	
není stanoven	univerzita Georgetown III. generace v plánu	12 m platforma autobusu	2003	palivové články/akumulátory	240 kW PEMFC	není stanoven	-	-	metanol	
NovaBus Corporation, Volvo	demonstrační program New York, Washington D.C.	12 m dálkový autobus	1999	palivové články/akumulátory	ZAFC	Arotech	-	105 km/h	zinek	
NovaBus Corporation, Volvo	Nevada Transit Agency veřejný provoz 2-5 autobusů	12 m dálkový autobus	2001	palivové články/akumulátory	ZAFC	Arotech	-	-	zinek	
Neoplan	letišť Mnichov	Centroliner N 4421 nízkopodlažní	1998	palivové články	140 kW PEMFC	Siemens	150 km	30 km/h	2 580 l stlačený vodík	
Neoplan	dvouletý veřejný provoz v německém letovisku Oberstdorf dotován bavorským státem	Midi Bus N 8008 FC	1999	palivové články/akumulátory	40 kW PEMFC	Nuvera	600 km	50 km/h	stlačený vodík	

Výrobce	Provoz	Model	Rok	Typ pohonu	Typ pal. článků	Výrobce pal. článků	Dojezd	Max. rychlost	Typ paliva	Obrázek
Neoplan	vhodný k prodeji	33 místný N 8012 Bavaria II	2000	pal. články/ setrvačnickový pohon	80 kW PEMFC	Proton Motor Fuel Cell	250 km	80 km/h	600 l stlačený vodík	
New Flyer Industries, Ltd.	zkoušební koncept	New Flyer P1 model 40 nízkopodlažní	1993 světové prven- ství	palivové články/ akumulátory	90 kW PEMFC	Ballard	400 km	95 km/h	stlačený vodík	
New Flyer Industries, Ltd.	zkoušební koncept	New Flyer P2 nezmenšený nízkopodlažní	1995	palivové články/ akumulátory	260 kW PEMFC	Ballard	400 km	-	2 738 l stlačený vodík	
New Flyer Industries, Ltd.	3 demonstrační autobusy Chicago(1997), Vancouver (1998) po dobu 2 let	New Flyer P3 model H40LF nízkopodlažní	1997	palivové články/ akumulátory	205 kW PEMFC	Ballard	400 km	-	2 738 l stlačený vodík	
New Flyer Industries, Ltd.	program Natural Resources Canada a program Hydrogenics Winnipeg, Manitoba, Kanada	Invero 12 m nízkopodlažní	2005	palivové články/ akumulátory	180 kW PEMFC	Hydrogenics	-	-	stlačený vodík	
EvoBus: DaimlerChrysler Company	540 h testů do roku 1997 2 týdny silniční testy v Oslu 1999 Německo	Nebus 405 12 m nízkopodlažní	1997	palivové články/ akumulátory	205 kW PEMFC	Ballard	250 km	80 km/h	1 050 l stlačený vodík	
EvoBus: DaimlerChrysler Company	demonstrační autobus Sun Line Transit, AC Transit, CaFCP	ZeBus (P4) 12 m nízkopodlažní	1999	palivové články/ akumulátory	205 kW PEMFC	Ballard	-	-	stlačený vodík	
EvoBus: DaimlerChrysler Company	33 autobusů pod programem CUTE, ECTOS a STEP Perth, Austrálie	Citaro (P5) 12 m nízkopodlažní	1997 2003	palivové články/ akumulátory	205 kW PEMFC	Ballard	200 km	80 km/h	stlačený vodík	

Výrobce	Provoz	Model	Rok	Typ pohonu	Typ pal. článků	Výrobce pal. článků	Dojezd	Max. rychlost	Typ paliva	Obrázek
Gillig Corporation	3 autobusy pod programem VTA San Metro Transportation District CaFCP & CARB	12 m Phantom nízkopodlažní	2004	palivové články/akumulátory	205 kW PEMFC	Ballard	-	-	stlačený vodík	
Irisbus: Renault V.I. Iveco Co.	5 demonstračních autobusů Turín, Itálie, Madrid Berlín, Paříž	12 m nízkopodlažní	2001 2002	palivové články/akumulátory	62 kW PEMFC	UTC Fuel Cells	-	-	stlačený vodík	
NABI	Sun Line Transit Palm Springs, Kalifornie	13,5 m 45C-LFW nízkopodlažní	2000	palivové články/akumulátory	170 kW PEMFC	UTC Fuel Cells	-	-	stlačený vodík	
MAN	veřejný provoz Erlangen a Nuremberg, Německo dotováno bavorským státem	12 m, NL263 nízkopodlažní	2000	palivové články/akumulátory	120 kW PEMFC	Siemens	250 km	80 km/h	1 548 l stlačený vodík	
MAN	letišť Mnichov	12 m, NL nízkopodlažní Bavaria I	2003	palivové články/akumulátory	68 kW PEMFC	Ballard	300 km	-	1 640 l stlačený vodík	
MAN	prototyp Německo	12 m NL 163 BZ nízkopodlažní	2005	palivové články/akumulátory	120 kW PEMFC	Siemens	250 km	-	1 530 l stlačený vodík	
MAN	předpokládané využití v programu THERMIE Berlin, Kopenhagen, Lisabon	12 m NL 223 nízkopodlažní	?	palivové články/ultra-kondenzátory	150 kW PEMFC	Nuvera	-	-	700 l kapalný vodík	
Thor Industries (ThunderPower LLC)	veřejný provoz v Sun Line Transit od 6.12.2002	9 m El Dorado E-Z Rider nízkopodlažní	2001	palivové články/akumulátory	75 kW PEMFC	UTC Fuel Cells	322 km	90 km/h	stlačený vodík	

Výrobce	Provoz	Model	Rok	Typ pohonu	Typ pal. článků	Výrobce pal. článků	Dojezd	Max. rychlost	Typ paliva	Obrázek
Van Hool	žádný demonstrační program (projekt EUREKA)	18 m městský autobus	1995	palivové články/akumulátory	78 kW PAFC	Elenco	300 km	-	700 l kapalný vodík	
Van Hool	3 autobusy veřejný provoz AC Transit	A330 12 m nízkopodlažní	2005	palivové články/akumulátory	PENMFC	UTC Fuel Cells	400 km	105 km/h	stlačený vodík	
Volvo (NovaBus Corporation)	2 prototypy projekt BVG Berlin	15,3 m dvoupodlažní	2005	palivové články	PENMFC	Proton Motor Fuel Cell	-	-	vodík	
Hino Motors Ltd. (Toyota)	prototyp v rámci vlastních testů	FCHV-BUS1 nízkopodlažní	2001	palivové články/akumulátory	160 kW PENMFC	Toyota	290 km	80 km/h	stlačený vodík	
Hino Motors Ltd. (Toyota)	veřejný provoz Kazunobu Iida metropole Tokio léto 2003	FCHV-BUS2 nízkopodlažní	2002	palivové články/akumulátory	180 kW PENMFC	Toyota	300 km	80 km/h	stlačený vodík	
DICP & Sunrise Power Ltd.	univerzita Tsinghua, Čína II. generace (2003)	minibus	2001 2003	palivové články	40 kW PENMFC	-	160 km	90 km/h	stlačený vodík	
DICP & Sunrise Power Ltd.	univerzita Tsinghua (Chinese Dalian Institute of Chemical Physics), Čína	městský autobus	2002	palivové články	75 kW PENMFC	-	-	-	stlačený vodík	
DICP FCB & Sunrise Power Ltd.	univerzita Tsinghua, Čína Shanghai ShenLi High Tech Co. III. generace	městský autobus	2004	palivové články	100 kW PENMFC	-	-	-	stlačený vodík	

Výrobce	Provoz	Model	Rok	Typ pohonu	Typ pal. článků	Výrobce pal. článků	Dojezd	Max. rychlost	Typ paliva	Obrázek
Scania (Hydrogen systems N.V.)	letišť Mnichov	městský autobus nízkopodlažní	2000	palivové články	-	-	250 km	-	350 l kapalný vodík	
Scania	prototyp v projektu Air Liquide, CEA, JOULE, SAR, univerzita Genoa	městský autobus nízkopodlažní	2001	palivové články/akumulátory	2x50 kW PEMFC	-	250 km	80 km/h	800 l stlačený vodík	
Macchi-Ansaldo (EC project EQHPP)	testován pouze firmou Macchi v rámci projektu EQHPP	městský autobus	1997	palivové články/akumulátory	45 kW PEMFC	Nuvera	400 km	-	600 l kapalný vodík	
Enova Systems	program U.S. Air Force, High Technology Development Corporation & Hydrogenics	9 m letištní autobus	2004	palivové články/akumulátory	20 kW	Hydrogenics	-	-	vodík	

PŘÍLOHA 2 – Přehled lokalit vodíkových čerpacích stanic, schéma vodíkové čerpací stanice

USA, Kanada, Austrálie

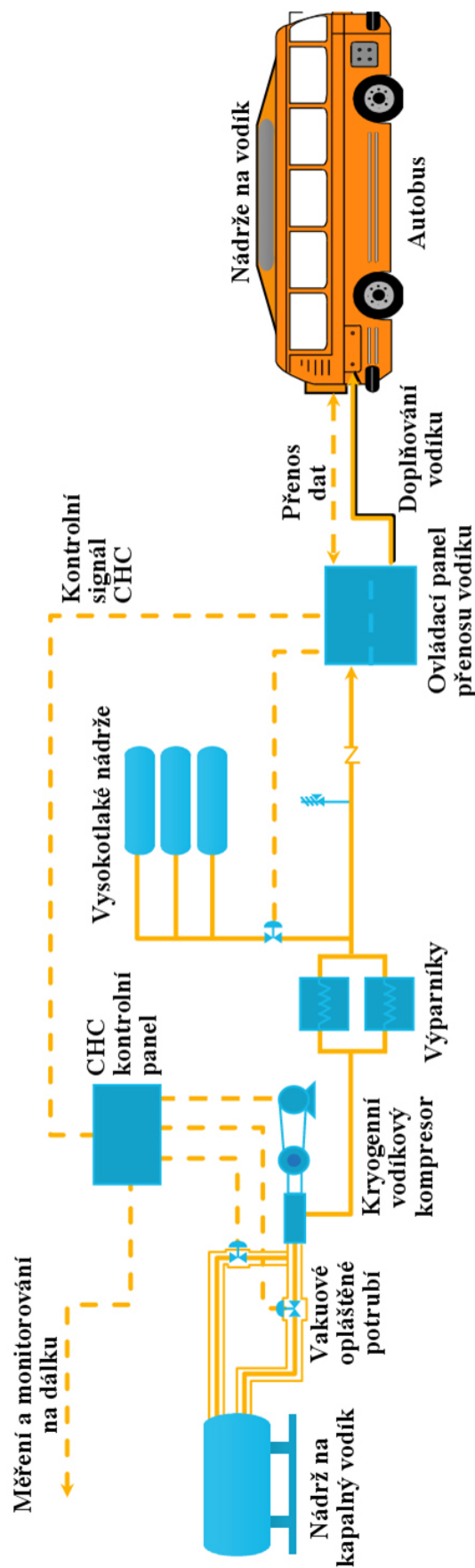
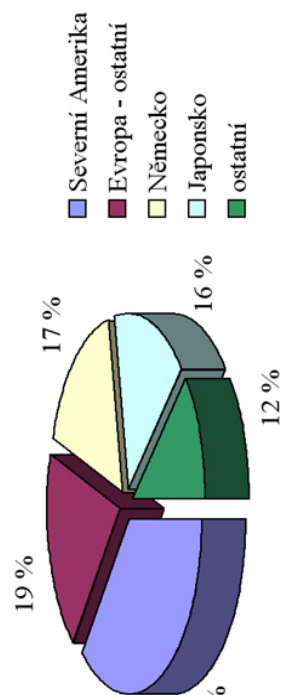
- Kalifornie: Auburn, Davis, Diamond Bar, Oakland, Riverside, Irvine, Thousand Palms, Sacramento, Torrance (2x), Oxnard, Chula Vista, Thousand Palms, Richmond, Los Angeles;
- Michigan: Dearborn, Ann Arbor, Milford, Southfield;
- Chicago: Illinois;
- Crane: Indiana;
- Arizona: Phoenix (2x);
- Las Vegas: Nevada;
- Washington DC.;
- Pensylvánie: Penn State;
- Severní Karolína: Charlotte;
- Kanada: Toronto (4x), Surrey BC.;
- Austrálie: Perth.

Evropa

- Německo: Mnichov (2x), Hamburg (2x), Naben, Russelsheim, Berlin (2x), Erlangen, Stuttgart, Copenhagen, Howaldwerke-Deutsche Werft;
- Lisabon;
- Švédsko: Malmo, Stockholm;
- Anglie: Londýn;
- Nizozemsko: Amsterdam;
- Lucembursko;
- Portugalsko: Porto;
- Španělsko: Madrid, Barcelona;
- Island: Reykjavik;
- Severní Itálie: Torino; Milano;
- Belgie: Oostmalle, Leuven.

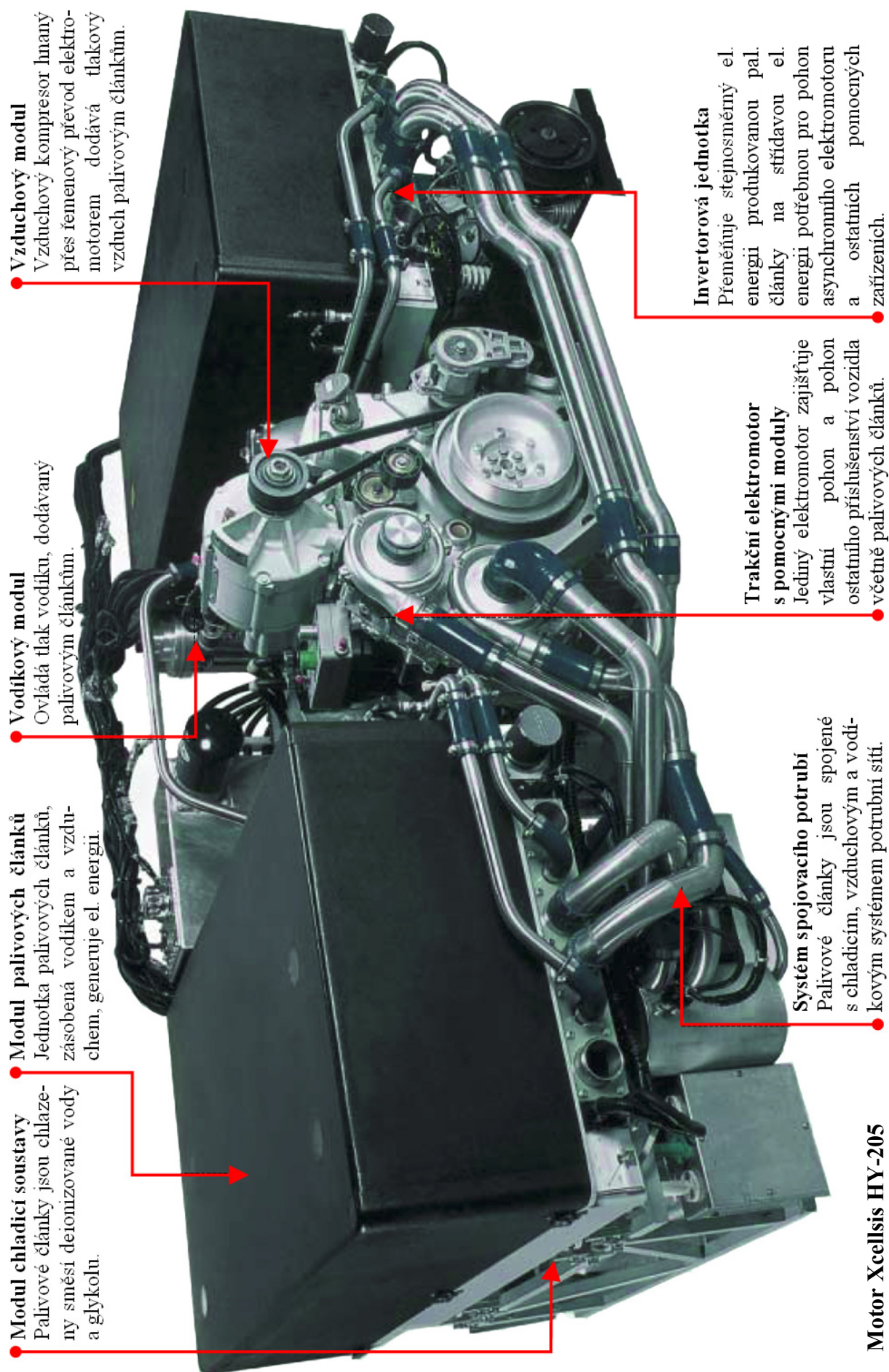
Japonsko, ostatní

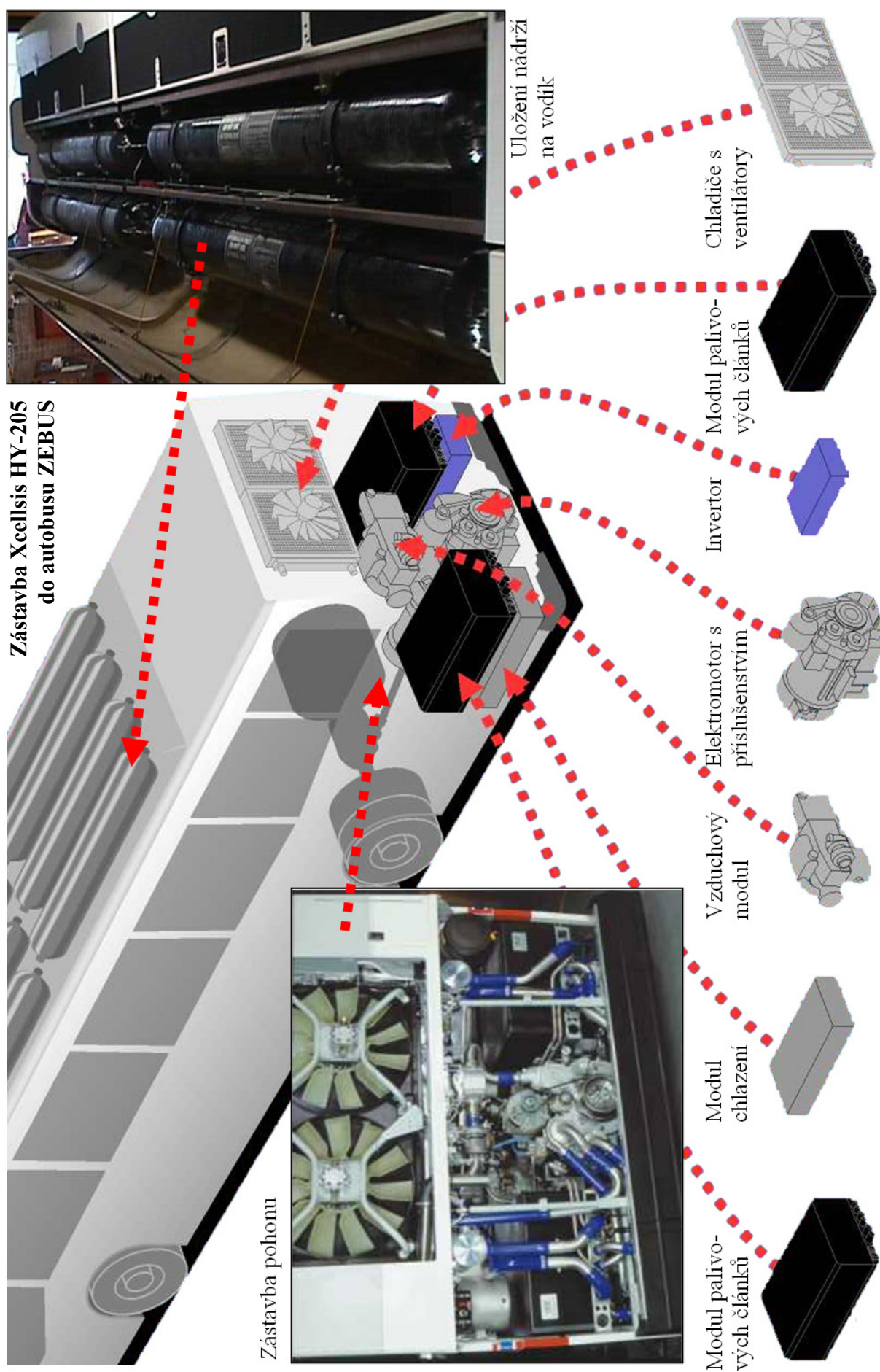
- Japonsko: Osaka, Takamatsu, Tsurumi, Yokohama (2x), Ome, Tokai, Hadano, Ariake, Kawasaki City, Senju;
- Singapur;
- Tchaj-wan: Taoyuan;
- Severní Korea.



PŘÍLOHA 3 – Pohonná jednotka Xcellsis HY-205 firmy Ballard**Technické parametry**

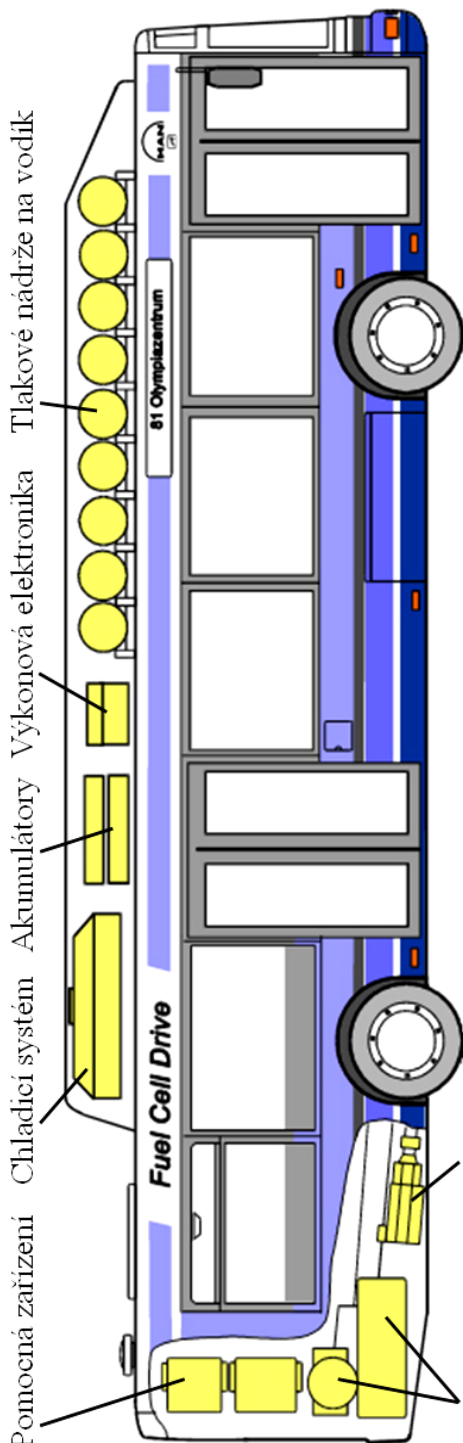
Emise	CO	0,000
	NO _x	0,000
	HC	0,000
	SO	0,000
	CO ₂	0,000
	Pevné částice	0,000
Výkon	Výkon na hnacím hřídeli	190 kW / 2100 min ⁻¹
	Krouticí moment	1050 Nm / 800 min ⁻¹
	Účinnost pohonu	35 % až 45 %
Palivo	Typ	Plynný vodík při okolní teplotě
	Potřebný vstupní tlak (min.)	1,2 MPa (12 barů)
	Průtok (max.)	5 g.s ⁻¹
Vzduch	Systém dodávky	Dvojitý kompresor
	Průtoková rychlost (max.)	0.30 kg.s ⁻¹
Chladicí systém	Chlazení palivových článků a převodovky	Čistá voda / čistý glykol
	Chlazení elektromotoru	Chladicí olej
Provozní teploty	Pracovní teplota pal. článků	65 °C až 80 °C
	Okolní teplota při provozu	-20 °C až 40 °C
	Okolní teplota při stání	-20 °C až 50 °C
Tlak	Provozní tlak (max.)	0,22 MPa (2,2 barů)
Elektrický výkon	Rozsah napětí	550 V – 900 V
	Úprava výkonu	Kapalinou chlazený IGBT inverter
	Ochrana	Integrované zjišťování poruch
Řídicí systém	CPU	Mikrořadič 32 bit, 24 MHz, CAN rozhraní
	Komunikační rozhraní	Jednotka CAN 1S011898 - 1S011992
Systém dyn. brzdění	Zdroj - vstup	Retardér
Převodovka	Připojení	SAE příruba
Rozměry	Délka	2 500 mm
	Výška	1 330 mm
	Šířka	1 600 mm
Hmotnost	Celková	2 170 kg





PŘÍLOHA 4 – Uspořádání hybridního pohonu autobusu MAN – technické parametry, schéma zapojení

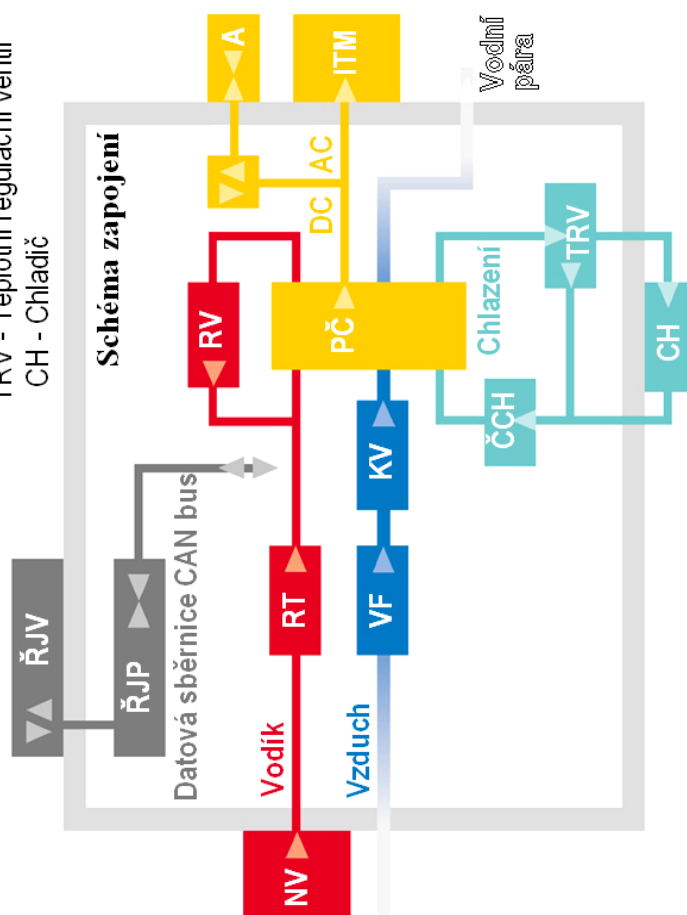
Pomocná zařízení Chladicí systém Akumulátory Výkonová elektronika Tlakové nádrže na vodík



Palivové články Elektromotor s převodovkou a hnacím hřídelem
Invertor

Legenda:

ŘJV - Řídicí jednotka vozidla
ŘJP - Řídicí jednotka pal. článků
NV - Nádrže na vodík
RT - Regulátor tlaku
RV - Recirkulace vodíku
VF - Vzduchový filtr
KV - Kompressor vzduchu
PČ - Palivové články
ITM - Invertor - Trakční motor
A - Akumulátory
ČCH - Čerpadlo chlazení
TRV - Teplovní regulační ventil
CH - Chladíč



Technická data

- Nizkopodlažní autobus, typ MAN NL 163 BZ, délka 18 m, výška 3,4 m, hmotnost 18 t.
- Asynchronní motor typu Siemens ELFA model PV5135, max. výkon 150 kW, max. krouticí moment 700 N.m / 1 000 min⁻¹.
- Invertor IGBT Siemens model ELFA DUO. Převodovka ZF typ 5HP502C.
- Palivové články Siemens, 4 moduly, počet elementárních článků 440 ks, hmotnost 220 kg, celkový výkon 120 kW, napětí 250 - 450 VDC, provozní teplota 60 °C, tlak vzduchu 0,15 MPa, spotřeba vodíku při jmenovitém zatížení 8 kg.h⁻¹.
- Nikl-metalhydridové akumulátory, kapacita 13,2 kWh, napětí 400 - 700 VDC.
- Tlakové nádrže na vodík Dynetek, 9 kusů, tlak 25 MPa, celková kapacita 1 530 l.
- Chlazení - voda/glykol. Dojezd 200 - 300 km.

PŘÍLOHA 5 – Uspořádání hybridního pohonu autobusu Scania

1. Systém palivových článků:

- dva moduly po 110 článcích,
- výstupní výkon: 2 x 50 kW,
- tichý kompresor s filtrací,
- DC/AC inverter,
- účinnost systému 52 - 57 %,
- vodní chlazení.

Tlakové nádrže
na vodík

Chladicí
ventilátory

Pomocný
inverter

Kompresor
a čerpadlo
chladicího
systému

Akumulátory

Hnací náprava

2. Nádrže na vodík:

- nádoby z nerezové oceli,
- maximální tlak 20 MPa,
- kapacita 800 litrů,
- vysoký stupeň bezpečnosti.

3. Akumulátorový modul:

- 44 vzájemně propojených 12 V olověných akumulátorů,
- napětí bateriového modulu 528 V,
- měrná energie 35 W.h.kg⁻¹,
- měrný výkon 380 W.kg⁻¹,
- nízký vnitřní odpor,
- dlouhá životnost,
- mikroprocesorový řídicí systém,
- chlazení vzduchem.

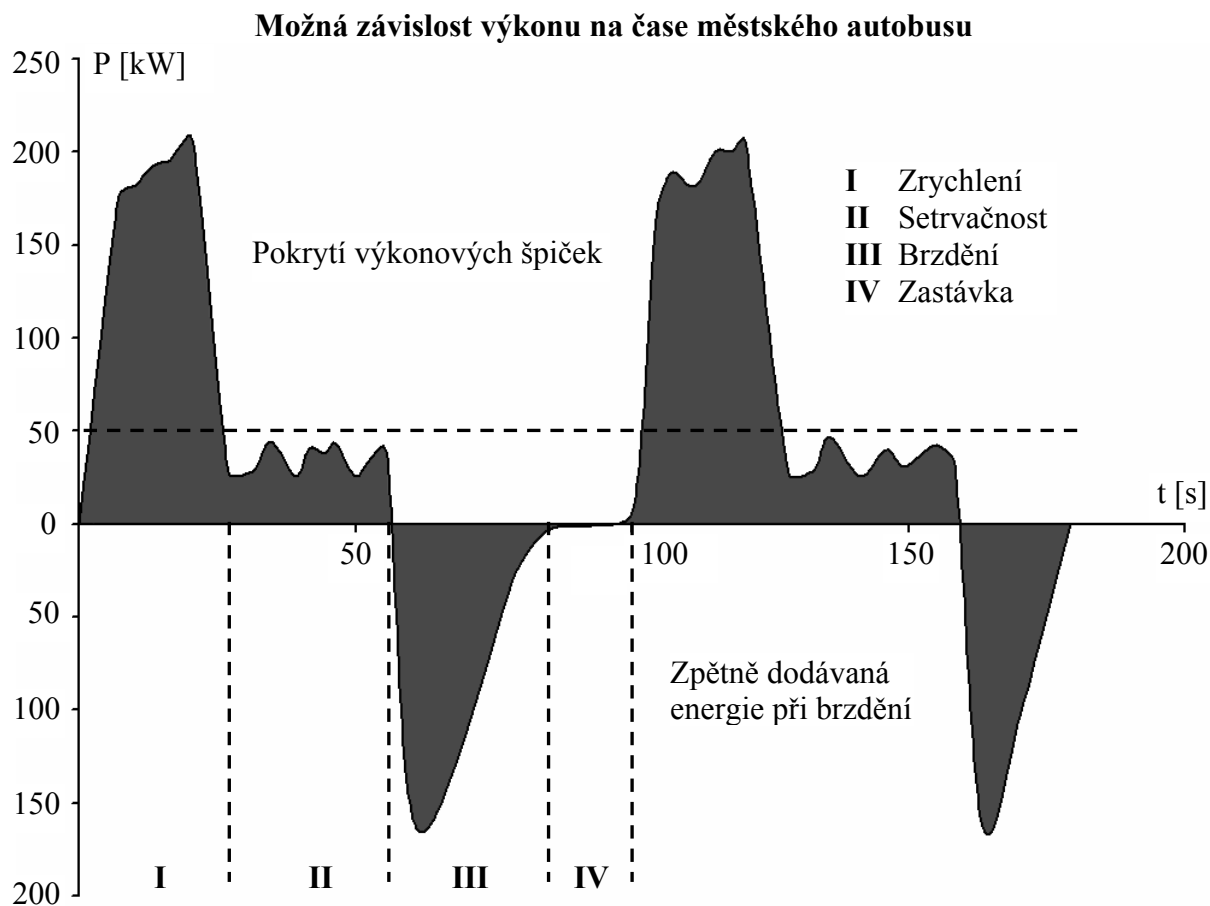
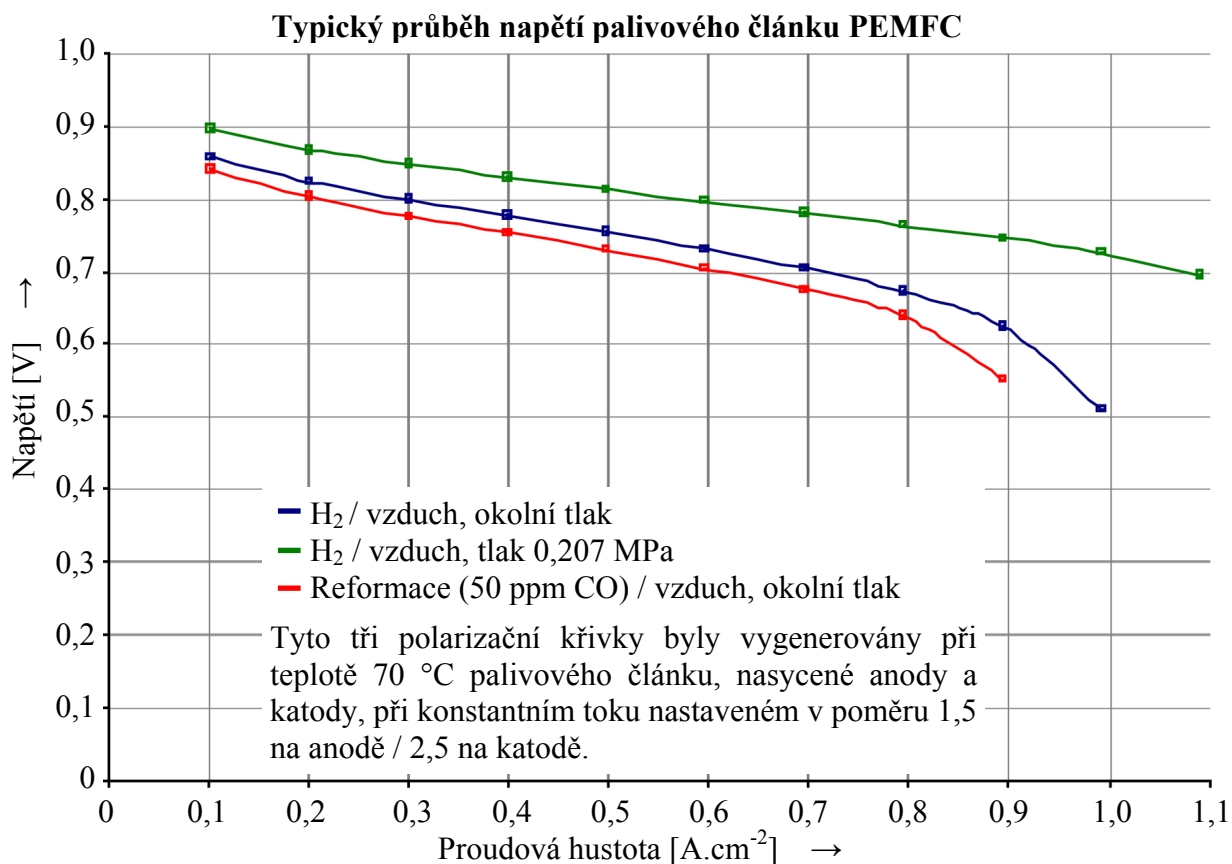
4. Hnací soustava:

- dva vysoce výkonné, vodou chlazené elektromotory, uložené v nábojích kol,
- vodou chlazený inverter řízený mikroprocesorem, technologie IGBT,
- vysoká účinnost hnací soustavy, nízký hluk a vibrace (< 70 dB),
- systém rekuperačního brzdění.

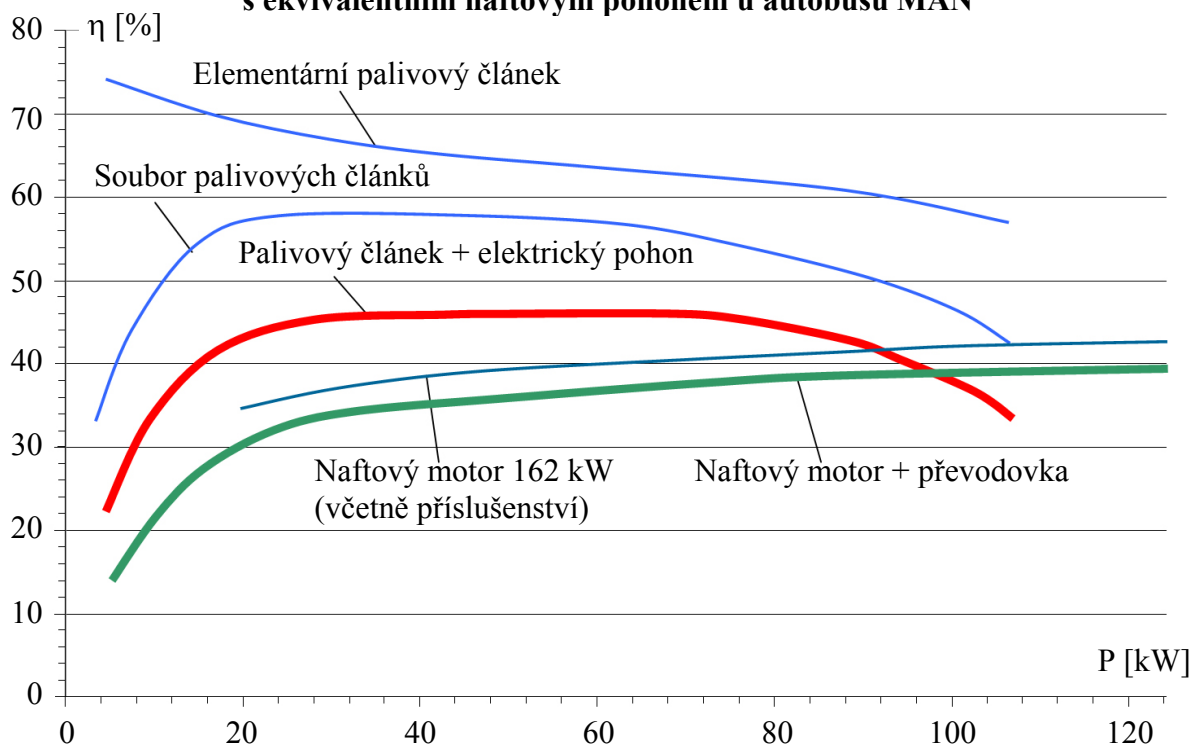
Ostatní parametry:

- nízkopodlažní konstrukce,
- kapacita: 15 sedících a 37 stojících pasažérů,
- nulové emise,
- maximální rychlost 80 km.h⁻¹,
- zrychlení 0 - 30 km.h⁻¹ za 7 s,
- dojezd 250 km.

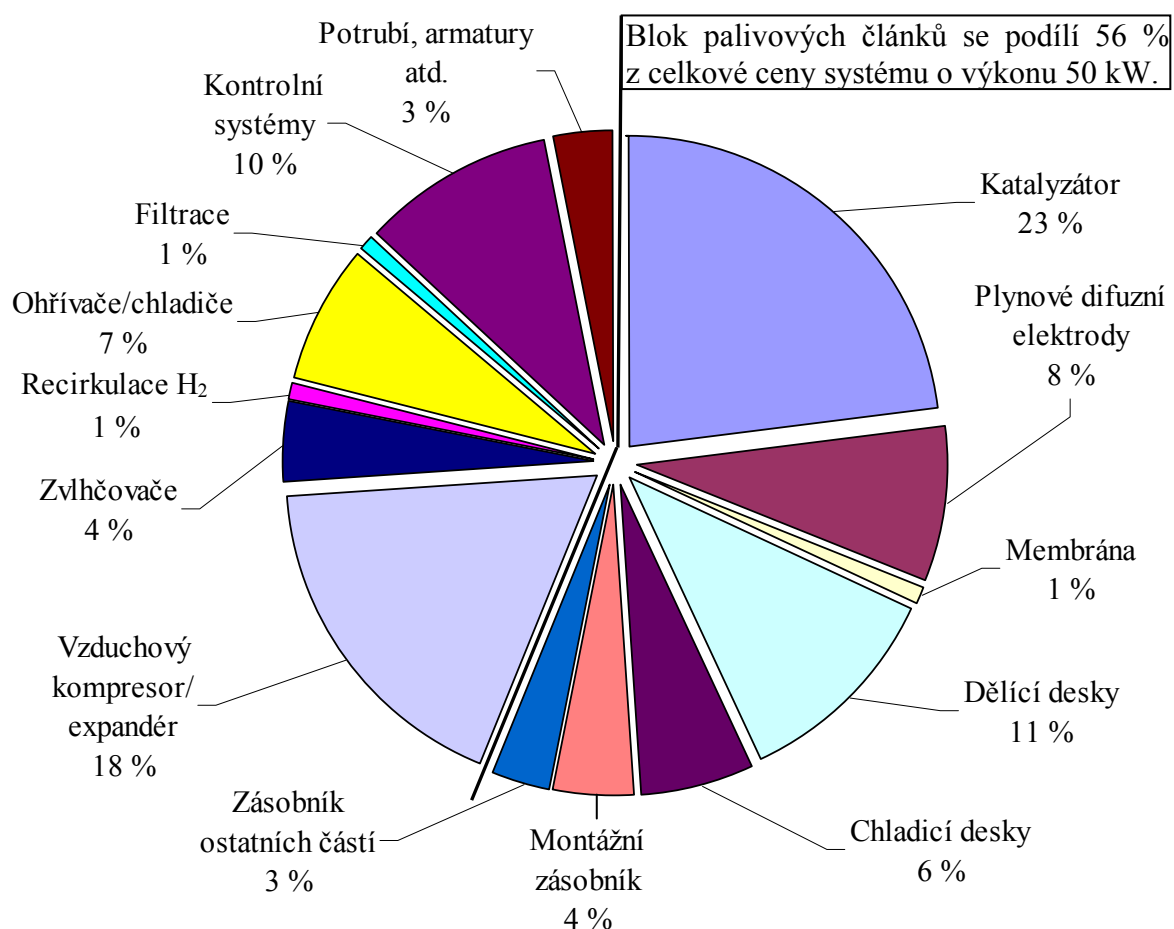
PŘÍLOHA 6 – Grafy



Porovnání účinnosti pohonu palivovými články s ekvivalentním naftovým pohonem u autobusů MAN



Rozložení nákladů na systém palivových článků



PŘÍLOHA 7 – Technické parametry autobusu Tedom

Typ vozidla	Autobus	Městský, nízkopodlažní, dvounápravový, třídvéřový
Obsaditelnost	Celkem	92 + 4 osob
	Sedící	29 + 4 osob
	Stojící	63 osob
Vnější rozměry	Délka	11 990 mm
	Šířka	2 550 mm
	Výška	3 300 mm
	Rozvor	6 020 mm
	Minimální poloměr zatočení	9,6 m
Konstrukce	Karoserie	Svařovaná samonosná konstrukce vysoké tuhosti
	Materiál karoserie	Tenkostěnné uzavřené profily z nerezové oceli s tloušťkou stěny 2 a 3 mm
	Materiál vnějšího opláštění	Hliníkový plech o tloušťce 2,0 mm a plasty s povrchovou barevnou úpravou
	Materiál bočních vík	Plech z lehké slitiny o tloušťce 2,0 mm
	Materiál střechy	Polyesterový plast (vyztužený skleněným vláknem) o tloušťce 2,5 mm
	Materiál čela a zádi	Jednotlivý zesílený sklolaminátový panel
	Způsob opláštění	Vlepeny do skeletu
	Tepelná izolace	Izolované rohoží ISOVER s hliníkovou fólií
	Boční a zadní okna	Vlepeny do karosérie, jednoduchá, tvrzená, tónovaná
	Dveře	Sestava dveří 2+2+2 Šířka všech dveří 1350 mm Elektropneumatické ovládání Blokace otevření při rychlosti nad 3 km.hod ⁻¹
	Přední a zadní podběhy	Uhlíková ocel o tloušťce 8 mm
	Nástupní výška	240 mm
	Výška podlahy	240 / 350 mm
Zadní náprava	ZF AV 132/90° SLF	Portálový typ, hypoidní převod 6,20:1
Přední náprava	ZF RL 85	Pevná náprava, typ posilovače ZF 8098
Odpružení	Pneumaticko-hydraulické tlumiče pérování dvojčinné	Elektronický systém ovládání výšky a tlaku ve vlnovcích (ECAS)
	Systém snižování	90 mm
	Systém zvedání	55 mm
	Přední odpružení	Vzduchové vlnovce 2 ks Tlumiče pérování 2 ks
	Zadní odpružení	Vzduchové vlnovce 4 ks Tlumiče pérování 4 ks
Brzdová soustava	Provozní brzdy	Pneumatické, nezávislé okruhy předních a zadních kol, kotoučové brzdy na přední i zadní nápravě, ABS i ASR
	Parkovací brzdy	Pneumaticky ovládané pružinové válce, působící na zadní kola
	Zastávková brzda	Automaticky aktivovaná po otevření dveří
Kola	Ocelové ráfky	7.50-22.5“
	Bezdušové pneumatiky	Michelin 275/70-22.5“

PŘÍLOHA 8 – Zjednodušený návrh převodových stupňů

Seznam označení

a	$[\text{ms}^{-2}]$	- zrychlení vozidla
B	$[\text{m}]$	- šířka vozidla
c_x	$[1]$	- součinitel odporu vzduchu
f	$[1]$	- součinitel valení
F_k	$[\text{N}]$	- hnací síla
F_{kadh}	$[\text{N}]$	- adhezní síla
g	$[\text{ms}^{-2}]$	- gravitační zrychlení
H	$[\text{m}]$	- výška vozidla
h_T	$[\text{m}]$	- výška těžiště od vozovky
i	$[1]$	- převodový poměr
L	$[\text{m}]$	- délka vozidla
l	$[\text{m}]$	- rozvor vozidla
l_p	$[\text{m}]$	- vzdálenost těžiště k přední nápravě
l_z	$[\text{m}]$	- vzdálenost těžiště k zadní nápravě
m_c	$[\text{kg}]$	- celková hmotnost
M_f	$[\text{Nm}]$	- moment odporu valení kola
M_k	$[\text{Nm}]$	- hnací moment na kole
M_{max}	$[\text{Nm}]$	- maximální krouticí moment
M_{nmax}	$[\text{Nm}]$	- moment při maximální otáčkách
m_p	$[\text{kg}]$	- pohotovostní hmotnost
n_{max}	$[\text{min}^{-1}]$	- maximální otáčky
$n_{M\text{max}}$	$[\text{min}^{-1}]$	- otáčky při maximálním krouticím momentu
$n_{P\text{max}}$	$[\text{min}^{-1}]$	- otáčky při maximálním výkonu
O_a	$[\text{N}]$	- odpor stoupání
O_f	$[\text{N}]$	- odpor valení
O_s	$[\text{N}]$	- odpor setrvačnosti
O_v	$[\text{N}]$	- odpor vzduchu
P_{max}	$[\text{kW}]$	- maximální výkon
Q	$[\text{kg}]$	- užitečná hmotnost
q	$[1]$	- poměr dvou po sobě jdoucích převodů - kvocient
R	$[1]$	- rozsah rychlostních stupňů
r_d	$[\text{m}]$	- dynamický poloměr kola
s	$[\%]$	- stoupání
S_x	$[\text{m}^2]$	- čelní plocha vozidla
v	$[\text{kmh}^{-1}]$	- rychlost vozidla
y	$[1]$	- stupeň progresivity
z	$[1]$	- počet převodových stupňů
Z_p	$[\text{N}]$	- radiální reakce mezi kolem a vozovkou na přední nápravě
Z_z	$[\text{N}]$	- radiální reakce mezi kolem a vozovkou na zadní nápravě
α	$[\circ]$	- úhel podélného sklonu vozovky
ϕ	$[1]$	- součinitel adheze
η_{pu}	$[1]$	- účinnost převodového ústrojí
ρ_{vz}	$[\text{kgm}^{-3}]$	- měrná hustota vzduchu
ζ	$[1]$	- součinitel vlivu rotačních hmot

Návrh kinematického schématu převodovky

Zvolena byla převodovka typu 50.232.01, jakožto stupňová převodovka řazená pod zatížením se stálým převodem na vstupu. Jedná se o převodovku s pěti rychlostními stupni pro jízdu vpřed a žádným rychlostním stupněm pro jízdu vzad, dvěma stupni volnosti a třemi hřídeli ve dvou osách. Předloховý hřídel je umístěn nad vstupním - výstupním hřídelem z důvodů snížení ztrát. Ozubená kola jednotlivých převodů jsou ve stálém záběru, řazení je realizováno synchronizačními spojkami. Koncepce uspořádání pohonu autobusu, které přímo souvisí s návrhem převodovky, a popis hnacího ústrojí viz. obr. 22, str. 34.

Kinematické schéma převodovky. →

Legenda: a – vstupní hřídel; e – předloховý hřídel; n – výstupní hřídel; S_{1-5} – řazení rychlostních stupňů I - V synchronizačními spojkami.

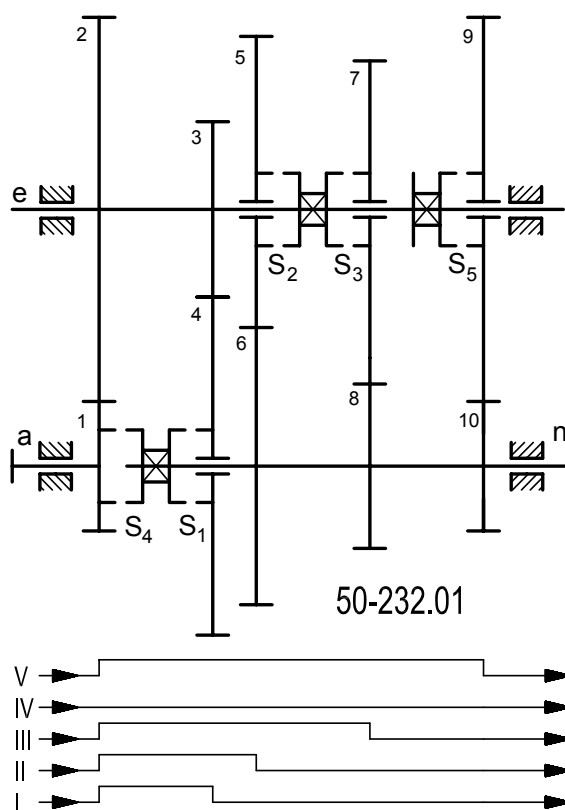
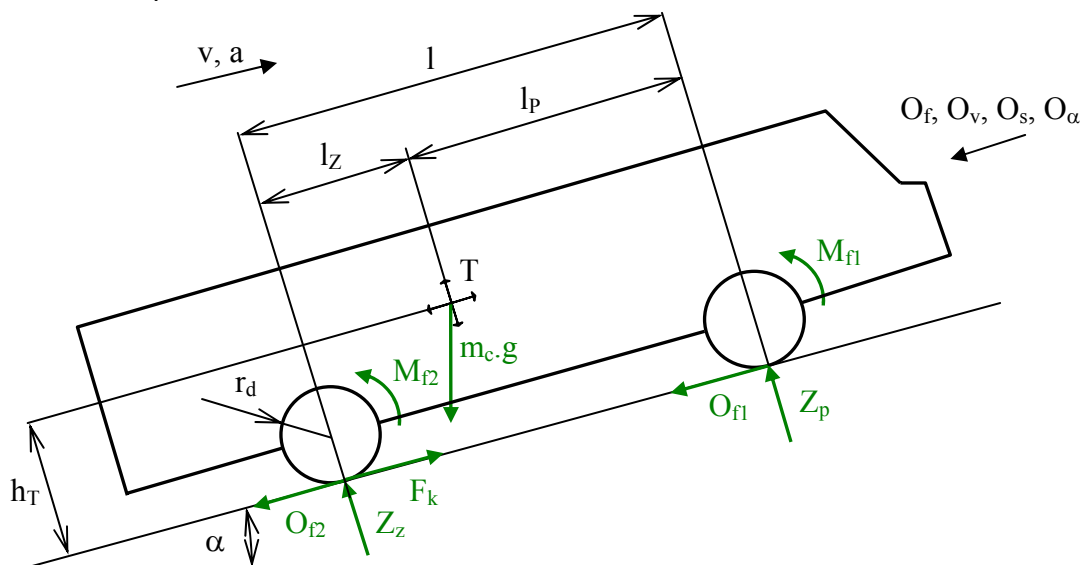


Schéma sil působících na autobus.



Návrh jednotlivých převodových poměrů

Vstupní parametry pro výpočet (dány nebo vhodně voleny):

$P_{\max} := 225 \text{ kW}$	při otáčkách	$n_{P\max} := 2100 \text{ min}^{-1}$
$M_{\max} := 1060 \text{ Nm}$	při otáčkách	$n_{M\max} := 1100 \text{ min}^{-1}$
$M_{n\max} := 862 \text{ Nm}$	při otáčkách	$n_{\max} := 2100 \text{ min}^{-1}$

$$\begin{aligned}
 m_p &:= 14500 \quad \text{kg} & Q &:= 6450 \quad \text{kg} & (86 \text{ osob, každá o hmotnosti } 75 \text{ kg}) \\
 m_c &:= m_p + Q & r_d &:= 0.416 \quad \text{m} & g &:= 9.81 \quad \text{ms}^{-2} \\
 B &:= 2.55 \quad \text{m} & H &:= 3.3 \quad \text{m} & L &:= 11.99 \quad \text{m} \\
 S_x &:= B \cdot H & c_x &:= 0.8 & \rho_{vz} &:= 1.25 \quad \text{kgm}^{-3} \\
 f &:= 0.017 & \phi &:= 0.8 & \eta_{pu} &:= 0.835 \\
 \zeta &:= 2.5 & l &:= 6.02 \quad \text{m} & l_p &:= 3.40 \quad \text{m} \\
 l_z &:= 2.62 \quad \text{m} & h_T &:= 1.45 \quad \text{m}
 \end{aligned}$$

Maximální adhézní stoupavost autobusu (předpoklady: $Q_s = 0$ a $O_v = 0$)

$$\text{hnací síla je omezena adhezní silou} \quad F_k \leq F_{kadh} = (\phi + f) \cdot Z_z \quad (1)$$

$$\text{dále platí: } O_{f1} + O_{f2} = O_f = m_c \cdot g \cdot f \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

$$M_{f1} + M_{f2} = M_f = O_f \cdot r_d \quad (3)$$

rovnice rovnováhy:

$$F_k - O_{f1} - O_{f2} - m_c \cdot g \cdot \sin(\alpha) = 0 \quad (4)$$

$$Z_z \cdot l - m_c \cdot g \cdot h_T \cdot \sin(\alpha) - m_c \cdot g \cdot l_p \cdot \cos(\alpha) - M_{f1} - M_{f2} = 0 \quad (5)$$

dosazení (2) (3) do (4) (5), po úpravě:

$$Z_z = \frac{m_c \cdot g}{l} \cdot [(l_p + f \cdot r_d) \cdot \cos(\alpha) + h_T \cdot \sin(\alpha)] \quad (6)$$

$$F_k = m_c \cdot g \cdot (f \cdot \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) \quad (7)$$

dosazení (6) (7) do (1), po úpravě:

$$\alpha_{\max} := \text{atan} \left[\frac{l_p \cdot (\phi + f) - f \cdot [l - r_d \cdot (\phi + f)]}{l - h_T \cdot (\phi + f)} \right]$$

$$\alpha_{\max}^{\circ} := \frac{\alpha_{\max} \cdot 180}{\pi} \quad \alpha_{\max}^{\circ} = 29 \quad \dots \text{max. úhel podélného sklonu vozovky}$$

$$s_{\max} := 100 \cdot \tan(\alpha_{\max}) \quad s_{\max} = 55.451 \quad \% \quad \dots \text{max. adhézní stoupavost}$$

Minimální celkový převodový poměr

z max. rychlosti, kterou má autobus dosáhnout $v_{\max} := 90 \quad \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

$$v_{\max} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{p\max}}{i_{c.\min}} \cdot r_d$$

$$i_{c.\min} := \frac{2 \cdot 3.6 \pi \cdot n_{p\max} \cdot r_d}{60 \cdot v_{\max}} \quad i_{c.\min} = 3.659$$

Maximální celkový převodový poměr (předpoklady: $Q_s = 0$ a $O_v = 0$)

z max. stoupání, které má autobus překonat: $s := 56 \%$

$$\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{s}{100}\right) \quad \alpha^\circ := \frac{\alpha \cdot 180}{\pi} \quad \alpha^\circ = 29.249$$

pro hnací sílu platí: $F_k = \frac{M_k}{r_d} = \frac{M_{\max} \cdot i_{c.\max} \cdot \eta_{pu}}{r_d} \quad (8)$

dosazení (6) (8) do (1), po úpravě:

$$i_{c.\max} := (\phi + f) \cdot \frac{m_c \cdot g \cdot r_d}{M_{\max} \cdot \eta_{pu} \cdot l} \cdot [(l_p + f \cdot r_d) \cdot \cos(\alpha) + h_T \cdot \sin(\alpha)] \quad i_{c.\max} = 48.258$$

Minimální a maximální převodový poměr převodovky

$i_R := 6.2$...převodový poměr rozvodovky na zadní nápravě

$$i_{\min} := \frac{i_{c.\min}}{i_R} \quad i_{\min} = 0.590 \quad i_{\max} := \frac{i_{c.\max}}{i_R} \quad i_{\max} = 7.783$$

Návrh jednotlivých převodových poměrů

$i_5 := i_{\min}$...i pátého převodového stupně $i_1 := i_{\max}$...i prvního převodového stupně

rozsah převodovky: $R := \frac{i_1}{i_5} \quad R = 13.188$

Volba progresivního odstupňování převodovky stupeň progresivity $y = \text{konst.}$

Volba kvocientu: $q_{4_5} := 1.695$

počet převodových stupňů: $z := 5$ pak $y := \sqrt[\frac{z^2 - 3z + 2}{2}]{\frac{R}{q_{4_5}^{(z-1)}}} \quad y = 1.081$

$$q_{3_4} := y \cdot q_{4_5} \quad q_{4_5} = 1.695$$

$$q_{2_3} := y \cdot q_{3_4} \quad q_{2_3} = 1.982$$

$$q_{1_2} := y \cdot q_{2_3} \quad q_{1_2} = 2.142$$

celkové převody:

$$i_1 := i_{\max} \quad i_2 := \frac{i_1}{q_{1_2}} \quad i_3 := \frac{i_2}{q_{2_3}} \quad i_4 := \frac{i_3}{q_{3_4}} \quad i_5 := \frac{i_4}{q_{4_5}}$$

$$i_1 = 7.783 \quad i_2 = 3.633 \quad i_3 = 1.833 \quad i_4 = 1.000 \quad i_5 = 0.590$$

převody vzhledem k předloze:

$$i_p := \sqrt{i_1} \quad i_p = 2.790 \quad \dots i \text{ předlohy}$$

$$\begin{array}{ccccc} i_1 := \frac{i_1}{i_p} & i_2 := \frac{i_2}{i_p} & i_3 := \frac{i_3}{i_p} & i_4 := i_4 & i_5 := \frac{i_5}{i_p} \\ i_1 = 2.790 & i_2 = 1.302 & i_3 = 0.657 & i_4 = 1 & i_5 = 0.212 \end{array}$$

Výkonnostní ukazatele autobusu

Maximální rychlost

Předpoklady: $O_\alpha = 0$ ($\alpha = 0$), $O_s = 0$

$$\text{rovnice rovnováhy } F_k - O_f - O_v = 0 \quad (9)$$

kde $O_v = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot S_x \cdot v_{\max}^2$ a maximální rychlost je při bezvětrí

dosazením (2) (8) do (9) po úpravách

Given

$$\frac{M_{n\max} \cdot i_{c,\min} \cdot \eta_{pu}}{r_d} = f \cdot m_c \cdot g + \frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot S_x \cdot \left(\frac{v_{\max}}{3.6} \right)^2$$

$$\text{Find}(v_{\max}) = 93 \quad \text{km} \cdot \text{h}^{-1} \quad 93 > 90 \quad \text{km} \cdot \text{h}^{-1} \quad \dots \text{vyhovuje}$$

nebo z maximální výkonu motoru

Given

$$P_{\max} \cdot 10^3 = \frac{1}{\eta_{pu}} \cdot \left[f \cdot m_c \cdot g \cdot \frac{v_{\max}}{3.6} + \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot S_x \cdot \rho_{vz} \cdot \left(\frac{v_{\max}}{3.6} \right)^3 \right]$$

$$\text{Find}(v_{\max}) = 100 \quad \text{km} \cdot \text{h}^{-1} \quad 100 > 90 \quad \text{km} \cdot \text{h}^{-1} \quad \dots \text{vyhovuje}$$

Maximální zrychlení

Předpoklady: $O_\alpha = 0$ ($\alpha = 0$)

$$\text{rovnice rovnováhy: } F_k = O_f + O_s \quad (10)$$

$$\text{kde } O_s = a_{\max} \cdot m_c \cdot \zeta \quad (11)$$

dosazení (2) (11) do (10) a pak (10) (6) do (1), po úpravě:

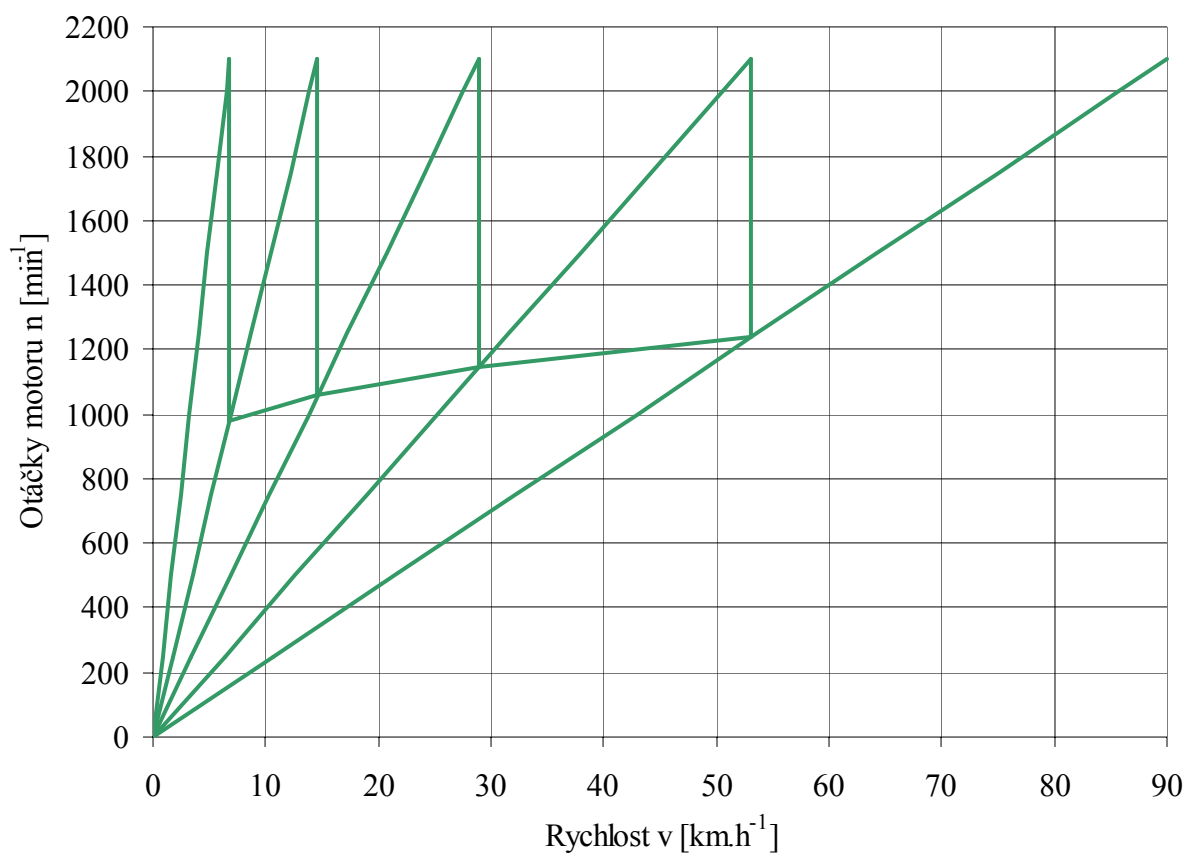
$$a_{\max} := \frac{g}{\zeta} \cdot \left[\frac{(\phi + f) \cdot (l_p - f \cdot r_d)}{1} - f \right] \quad a_{\max} = 1.740 \quad \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Maximální stoupavost

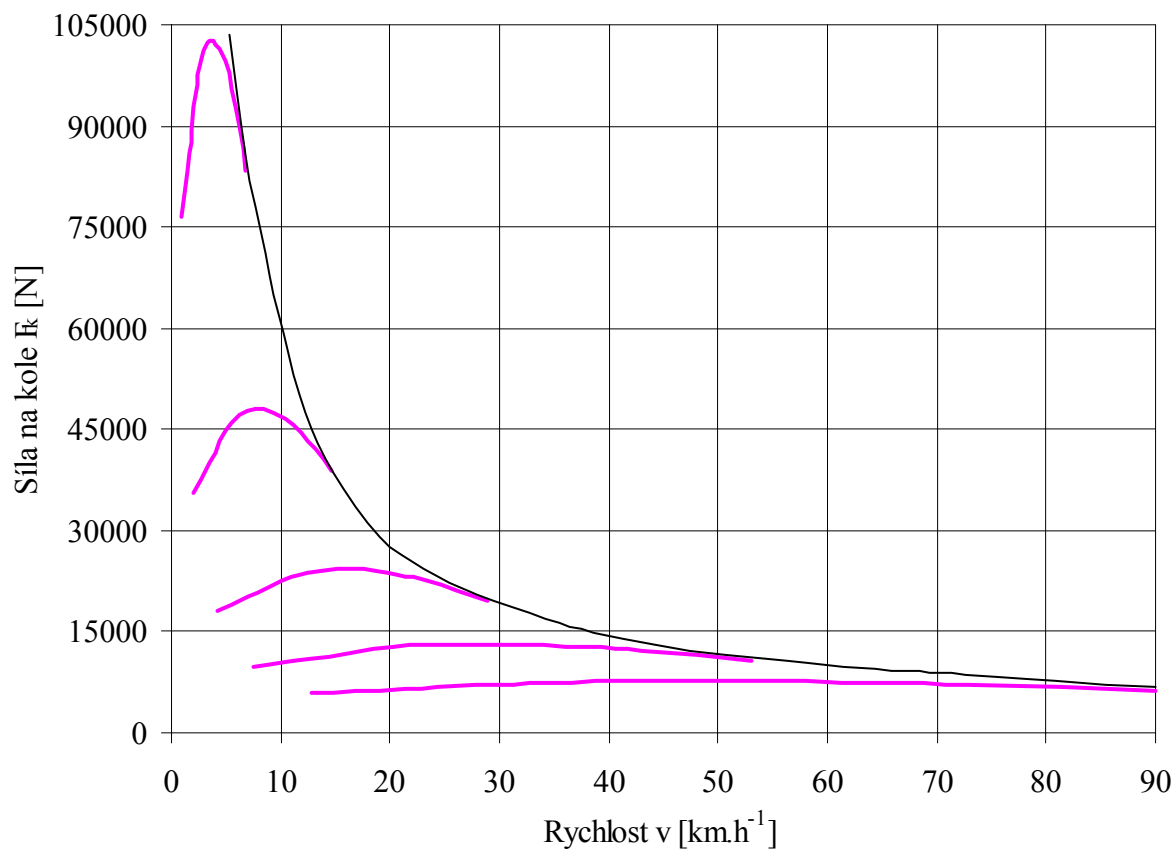
Byla již odvozena, předpoklady: $O_s = 0$ a $O_v = 0$

$$s_{\max} := \frac{l_p \cdot (\phi + f) - f \cdot [1 - r_d \cdot (\phi + f)]}{1 - h_T \cdot (\phi + f)} \quad s_{\max} = 0.55$$

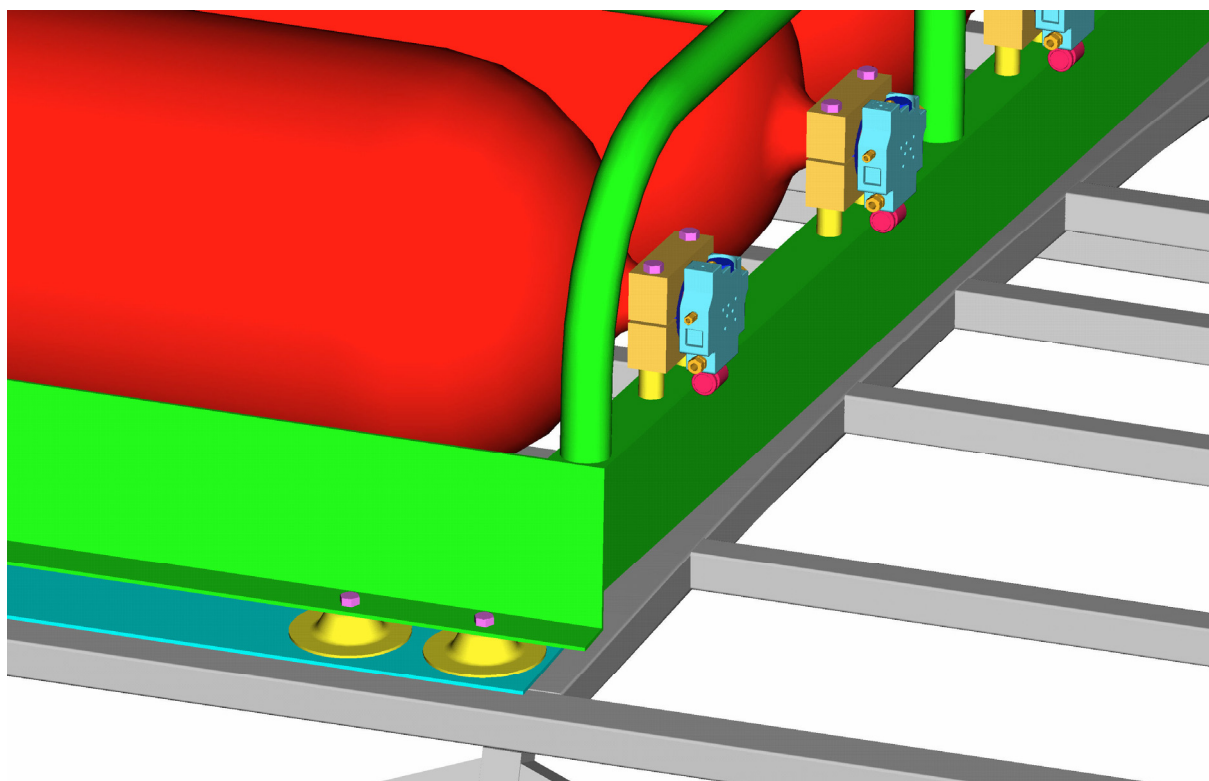
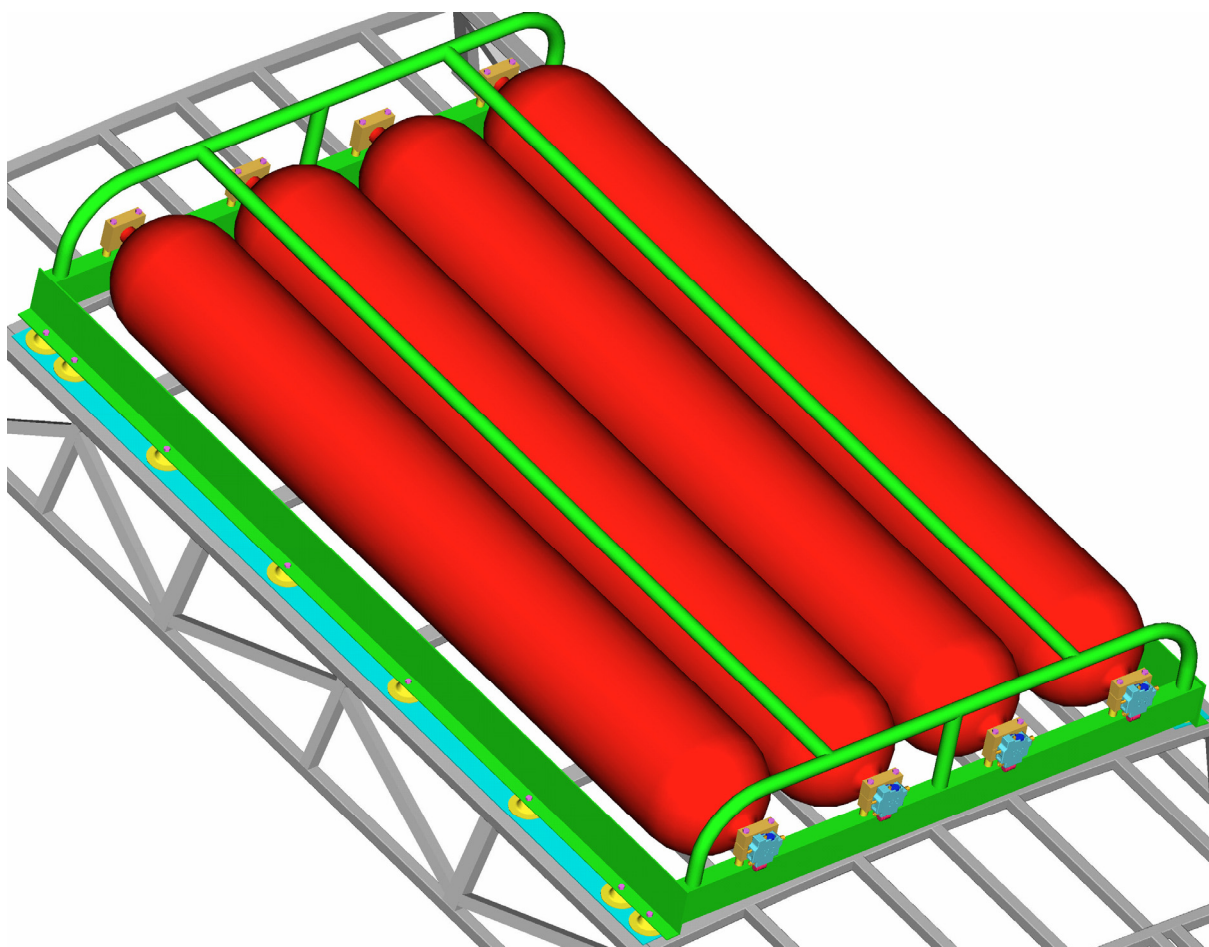
Pilový diagram

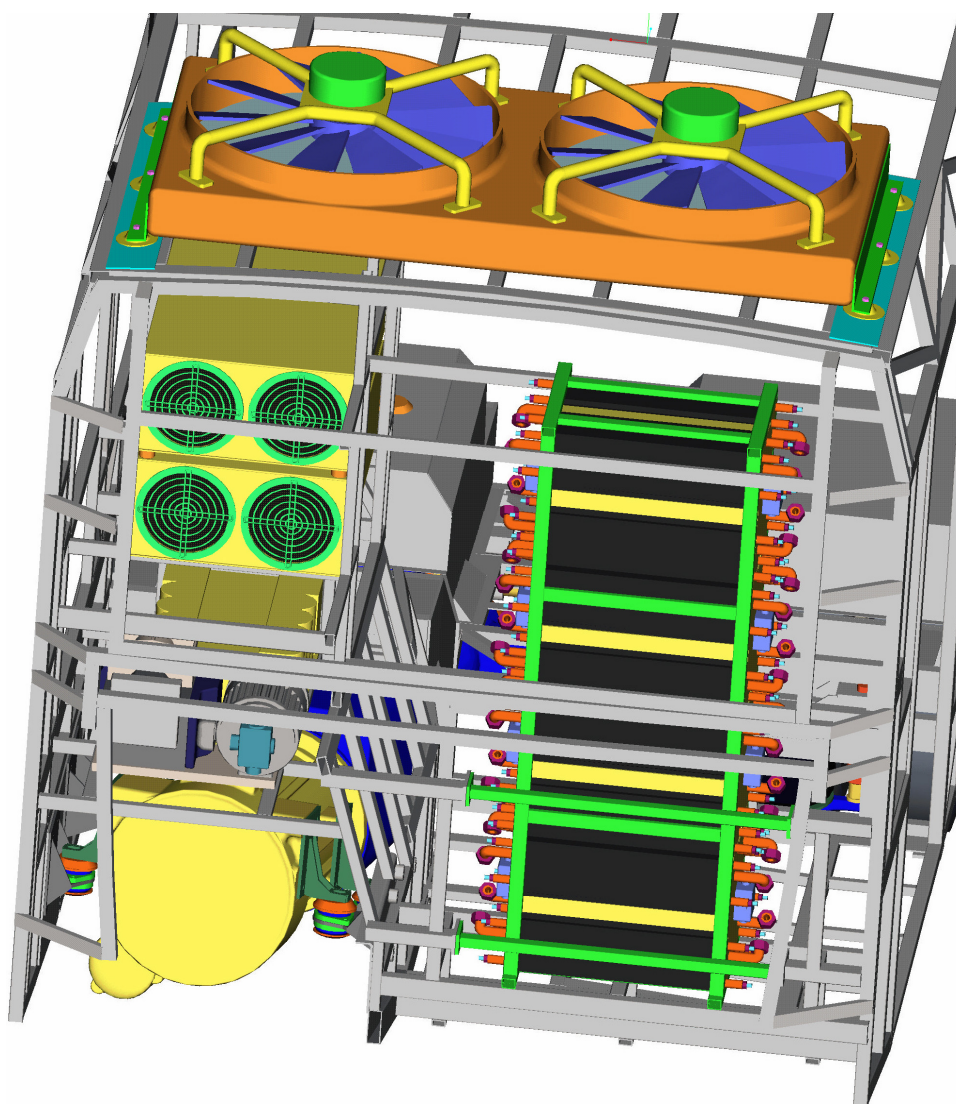
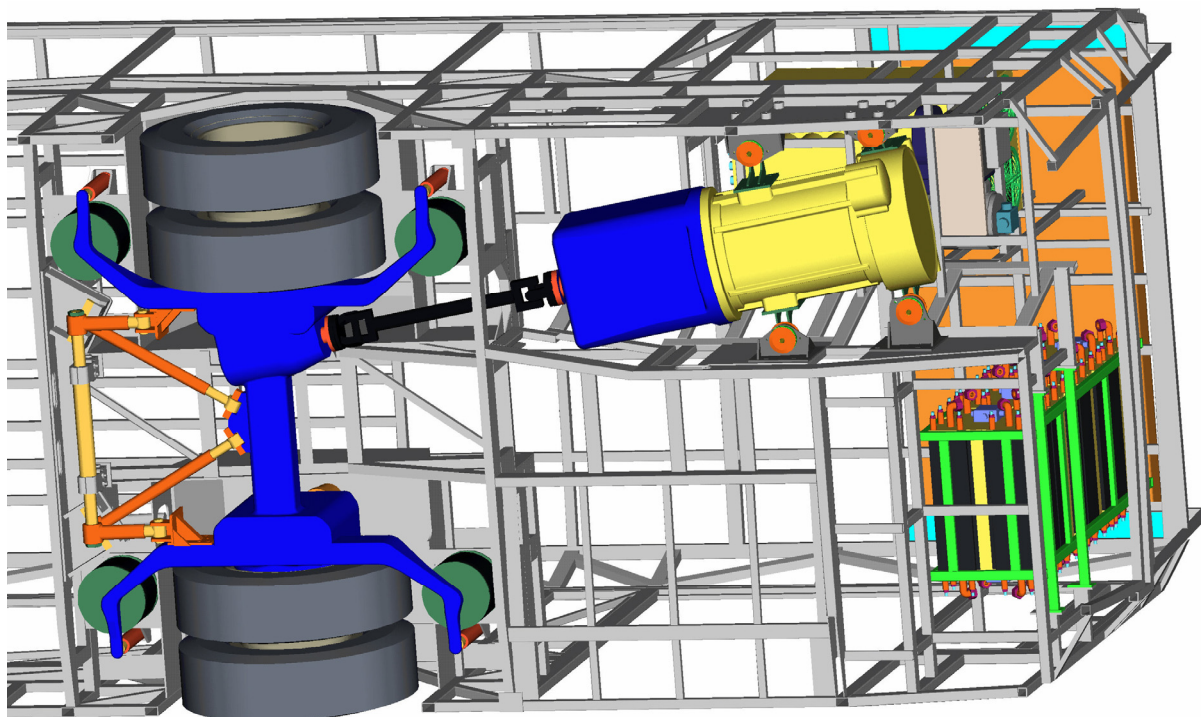


Hnací charakteristika autobusu



PŘÍLOHA 9 – 3D Model sestavy z aplikace ProENGINEER





Seznam použité literatury a další zdroje

- [1] Kříž, R. – Vávra, P.: Strojírenská příručka, 6. svazek. Praha 1995.
- [2] Šalamoun, Č.: Atlas převodových ústrojí. Praha 1972.
- [3] Vlk, F.: Alternativní pohony vozidel. Brno 2004.
- [4] Vlk, F.: Koncepce motorových vozidel. Brno 2000.
- [5] Vlk, F.: Převodová ústrojí motorových vozidel. Brno 2000.
- [6] Adamson, K., Fuel Cell Today: Fuel Cell Market Survey - Buses. /Výzkumná zpráva./ 2004.
- [7] Breakthrough Technologies Institute: Fuel Cell Vehicle World Survey. /Výzkumná zpráva./ Washington, D.C. 2004.
- [8] Cropper, M., Fuel Cell Today: Fuel Cell Market Survey - Buses. /Výzkumná zpráva./ 2003.
- [9] Global Environment Facility: GEF/UNDP Fuel-Cell Bus Programme. /Výzkumná zpráva./ New York 2004.
- [10] Grosse, J.: PEM-Fuel Cell Demonstrators at Siemens. /Výzkumná zpráva./ Siemens AG.
- [11] Hrdlička, P. - Pravdík, K.: Autobusy s vodíkovým pohonem v Karlových Varech. /Výzkumná zpráva./ Univerzita Pardubice, Pardubice 2001.
- [12] Macek, J.: Současné trendy ve vývoji pohonných jednotek automobilů. /Výzkumná zpráva./ ČVUT, Praha 2002.
- [13] Newell, K.: Low Cost, High Efficiency, High Pressure Hydrogen Storage /Výzkumná zpráva./ Quantum Technologies, Inc. 2004.
- [14] Pidanič, J. - Starý, K.: Vodík jako alternativní ekologické palivo. /Výzkumná zpráva./ Univerzita Pardubice, Pardubice 2001.
- [15] Slezák, M. - Varga, J.: Využití alternativních zdrojů energie v dopravě. /Výzkumná zpráva./ Univerzita Pardubice, Pardubice 2001.
- [16] Thomas, C.E. – James, B.D.: Economics & Greenhouse Gas Benefits of Fuel Cell Buses /Výzkumná zpráva./ Directed Technologies, Inc.; Arlington, Virginia 2000.
- [17] Wurster, R.: Hydrogen in Transport: Past - Present – Future. /Výzkumná zpráva./ Univerzita Murdoch, Austrálie 2003.
- [18] Andersson, C.: On Auxiliary Systems in Commercial Vehicles. /Disertační práce/ Univerzita Lund, Švédsko 2004.
- [19] College of the Desert: Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies - Fuel Cell Bus Maintenance. 2001.
- [20] A United Technologies Company [online]
<<http://www.utcfuelcells.com/transportation/index.shtm>>
- [21] Ballard Power Systems - Fuel Cell Technology Leadership [online]
<<http://www.ballard.com/>>
- [22] DaimlerChrysler [online]
<<http://www.daimlerchrysler.com/>>

- [23] Dynetek Industries Ltd. [online]
<<http://www.dynetek.com/>>
- [24] ENOVA - Hybrid Electric and Fuel Cell Drive Systems & Components [online]
<<http://www.enovasystems.com/>>
- [25] FCB Workshop Presentation Summarie [online]
<<http://www.undp.org/gef/fuel-cell/summarie>>
- [26] Fuel Cell Partnership [online]
<<http://www.fuelcellpartnership.org/>>
- [27] Fuel Cell Store [online]
<<http://www.fuelcellstore.com/>>
- [28] Fuel Cell Technology Leadership [online]
<<http://www.xcellsis.com/>>
- [29] Hydrogen Based Commerce [online]
<<http://www.ch2bc.org/indexa3.htm>>
- [30] International Clearinghouse for Hydrogen Commerce [online]
<<http://www.ch2bc.org/>>
- [31] ISE - Electric and Hybrid-Electric Buses and Trucks Drive Systems [online]
<<http://www.isecorp.com/>>
- [32] New Flyer [online]
<<http://www.newflyer.com/>>
- [33] Northeast Advanced Vehicle Consortium [online]
<<http://www.navc.org/>>
- [34] Tedom s.r.o. [online]
<<http://www.tedom.cz>>
- [35] The Online Fuel Cells Information Resource [online]
<<http://www.fuelcells.org/>>

Poděkování

- Ing. Ladislavovi Stránskému, TEDOM Jablonec n.N., za poskytnutí nezbytné technické dokumentace k autobusu TEDOM a umožnění vykonání odborné praxe v rámci studia ve firmě TEDOM s.r.o., Jablonec nad Nisou.
- Doc. Ing. Josefovi Laurinovi, CSc., vedoucímu diplomové práce.