



**FAKULTA
ELEKTROTECHNICKÁ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI**

2011

Pracoviště: Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Výzkumná zpráva č.: 22160-15-11

Čistě elektrické autobusy

Druh úkolu: Vědecko-výzkumný

Řešitelé: Ing. T. Komrska

Vedoucí úkolu: Zdeněk Peroutka

Počet stran: 23

Datum vydání: leden 2011

Revize: 1

Tento projekt byl realizován za finanční podpory z prostředků
státního rozpočtu prostřednictvím Ministerstva průmyslu a obchodu ČR
projekt č. FR-TI1/343.

Anotace

Výzkumná zpráva se zabývá čistě elektrickými autobusy, které pro svůj pohon využívají mobilní zdroje energie, jakými jsou baterie či superkapacitory. Jedná se tedy o vozidla pro hromadnou přepravu osob, která nejsou připojena k trakčnímu vedení. Zpráva kromě představení některých konkrétních elektrických autobusů, řeší také otázky porovnání rozšíření elektrických autobusů ve srovnání s hybridními, elektromechanické koncepce, ekonomiku provozu, návaznost na nadřazené systémy nebo trendy a očekávané směry vývoje.

1 Úvod – čistě elektrické autobusy vs. hybridní elektrické autobusy

Čistě elektrické autobusy používají jako zdroj elektrické energie mobilní zdroje, tj. ve většině případů baterie, v menší míře pak superkapacity. Čistě elektrický pohon je nasazován spíše u menších autobusů, tj. u městských autobusů přepravujících cestující na kratší vzdálenosti relativně nízkou rychlostí, což je způsobeno omezenou kapacitou a výkonem dostupných baterií. Mobilní zdroj elektrické energie je nejproblematictější součástí této technologie, kapacita a náklady jsou velkou překážkou – dosažení většího dojezdu se neobejde bez enormního nárůstu hmotnosti vozidla. Navíc pro většinu dopravních společností není možné odstavit vozidlo z provozu pro nabití. Hlavní potenciál těchto vozidel tak zůstává u zakázek, kde je tvrdý požadavek na bezemisní provoz, jako jsou aplikace v uzavřených prostorech nebo v tzv. zelených zónách.

Hybridní autobusy naproti tomu dosáhly daleko výraznější pozice na trhu a jsou provozovány v daleko větší míře, než čistě elektrické autobusy. Počet objednávek této technologie se zvyšuje a stále více dopravních společností už nekupuje pouze demonstrační vzorky, ale celé série vozů. Tato technologie se dostala na konkurenceschopnou úroveň a je komerčně zajímavá, ačkoli se stále vypořádává s některými nepříznivými problémy, jakými jsou pořizovací náklady, životnost baterií, apod.

Site	Number	Size	Bus Company
Anaheim, CA	10	22'	Ebus
Atlanta, GA (Emory Univ.)	5	22'	Ebus
Chattanooga, TN	12	22'	Advanced Vehicle Systems (AVS)
Colorado Springs, CO	5	22'	Ebus
Hampton, VA	8	22'	AVS
Los Angeles, CA	18	22'	Ebus
Miami Beach (status uncertain after Sept. 2005)	10	22'	AVS
Mobile, AL	4	22'	Ebus
New Haven, CT	4	22'	Ebus
Santa Barbara, CA	20 total		
	1	22'	APS
	3	22'	BMI
	10	22'	Ebus
	6	22'	Specialty Vehicle Manufacturing Corp.

Obrázek 1 Elektrické autobusy poháněné bateriemi v provozu v USA k červenci 2005.

Active Deployments or Confirmed Pending Deliveries of Hybrid-Electric Buses in the U.S. and Canada (as of July 2005)

Location	Ordered	Delivered or date due	Size	Bus Company	Battery	Fuel
GM Allison Transmission						
Albuquerque, NM	N/A	12	60'	New Flyer	NiMH	Diesel
Austin, TX	N/A	2	40'	New Flyer	NiMH	Diesel
Baltimore, MD	10	2006	40'	New Flyer	NiMH	Diesel
Charlotte, NC	N/A	2	40'	Gillig	NiMH	Diesel
Chicago, IL	10	2006	40'	New Flyer	NiMH	Diesel
Cleveland, OH	21	2006	60'	New Flyer	NiMH	Diesel
Edmonton, AB	2	2006	40'	New Flyer	NiMH	Diesel
Eugene, OR	11	2006	60'	New Flyer	NiMH	Diesel
Hartford/Stamford, CT	N/A	2	40'	New Flyer	NiMH	Diesel
Honolulu, HI	N/A	10	60'	New Flyer	NiMH	Diesel
Houston, TX	N/A	4	40'	S&S Repower	NiMH	Diesel
Indianapolis, IN	N/A	2	40'	Gillig	NiMH	Diesel
Louisville, KY	N/A	5	40'	Gillig	NiMH	Diesel
Norwalk, CA	N/A	2	40'	Gillig	NiMH	Diesel
N. Central NJ to New York City	N/A	4	40'	MCI	NiMH	Diesel
Orange County, CA	N/A	2	40'	New Flyer	NiMH	Diesel
Philadelphia, PA	N/A	32	40'	New Flyer	NiMH	Diesel
Pittsburgh, PA	N/A	4	40'	Gillig	NiMH	Diesel
Portland, OR	N/A	2	40'	New Flyer	NiMH	Diesel
San Joaquin, CA	N/A	2	40'	Gillig	NiMH	Diesel
Salt Lake City, UT	N/A	3	40'	New Flyer	NiMH	Diesel
San Juan, Puerto Rico	4 (+10 options)	4	35'	New Flyer	NiMH	Diesel
Seattle/King County	N/A	214	60'	New Flyer	NiMH	Diesel
Seattle/Sound Transit	N/A	22	60'	New Flyer	NiMH	Diesel
Seattle/Sound Transit	N/A	1	40'	New Flyer	NiMH	Diesel
Shreveport, LA	N/A	2	40'	Gillig	NiMH	Diesel
Springfield, MA	N/A	1	40'	Gillig	NiMH	Diesel
St. Paul, MN	N/A	3	40'	Gillig	NiMH	Diesel
Victoria, Canada	N/A	6	12 m.	New Flyer	NiMH	Diesel
Yosemite National Park	N/A	18	40'	Gillig	NiMH	Diesel
BAE Systems						
New York, NY	325	225 delivered 100, end of 2005	40'	Orion Bus Industries	Lead Acid	Diesel
Roosevelt Island, NY	4	2005/early 2006	40'	Orion Bus	Lead Acid	Diesel
San Francisco, CA	56 + 56 options	2006	40'	Orion Bus	Lead Acid	Diesel
Toronto, Canada	150	2006	40'	Orion Bus	Lead Acid	Diesel
Westchester Co, NY	4	2005/early 2006	40'	Orion Bus	Lead Acid	Diesel
ISE Corporation						
Chicago, IL	10	2006	40'	New Flyer	Ultracapacitor	Diesel
Edmonton, AB	2	2006	40'	New Flyer	Ultracapacitor	Diesel
Elk Grove, CA	21	21	40'	Gillig	Ultracapacitor	Gasoline
Fresno, CA	2 (+options)	2	40'	New Flyer	Ultracapacitor	Gasoline
Gardena, CA	18	Fall 2005	40'	New Flyer	Ultracapacitor	Gasoline
Long Beach	47 + 60 options	47	40'	New Flyer	Ultracapacitor	Gasoline
Montebello, CA	5 (+options)	5	40'	New Flyer	Ultracapacitor	Gasoline
Norwalk, CA	2 (+options)	2	40'	New Flyer	Ultracapacitor	Gasoline
Oakland, CA	10	2006	30'	Van Hool	Undecided	Gasoline
Orange County, CA	2 (+options)	2	40'	New Flyer	Ultracapacitor	Gasoline
Princeton/Trenton, NJ	3	3	40'	Nova Bus	Zebra, converting to ultracap	Diesel
San Bernardino, CA	3 (+options)	3	40'	New Flyer	Ultracapacitor	Gasoline
Azure Dynamics Corporation						
Bronx Clean Commuter Bus	5	1 st quarter 2006	22'	Workhouse P42, G1	NiMH	Gasoline
Ebus, Inc.: All Ebus hybrids use either a diesel or propane fueled microturbine						
Coral Gables, FL	N/A	5	22'	Ebus	NiCd	Diesel
Galveston, TX	N/A	3	22'	Ebus	NiCd	Propane
Gulfport/Biloxi, MS	N/A	4	22'	Ebus	NiCd	Propane
Indianapolis, IN	N/A	5	22'	Ebus	NiCd	Diesel
Knoxville, TN	N/A	4	22'	Ebus	NiCd	Propane
Monrovia, CA	N/A	2	22'	Ebus	NiCd	Propane
Muncie, IN	N/A	1	22'	Ebus	NiCd	Diesel
Pasadena, CA	N/A	5	22'	Ebus	NiCd	Diesel
Sevierville, TN	N/A	4	22'	Ebus	NiCd	Propane
Visalia, CA	N/A	3	22'	Ebus	NiCd	Diesel

Obrázek 2 Hybridní elektrické autobusy v provozu v USA a Kanadě k červenci 2005.

Zdroj: U.S. Department of Transportation: Analysis of Electric Drive Technologies For Transit Applications: Battery-Electric, Hybrid-Electric, and Fuel Cells.

2 Nejběžnější evropští výrobci autobusů

Tato kapitola si klade za cíl ověřit, zda tradiční evropští výrobci autobusů, jakými jsou Solaris, Mercedes, Renault, Irisbus, Volvo, MAN, Iveco či Neoplan, se neubírají cestou čistě elektrického autobusu.

- 1) **Volvo** - zdá se nemá čistě elektrický bus, pouze paralelní hybridní bus s kombinací diesel a elektřiny, také v provedení double decker pro Londýn. Paralelní hybridní pohon byl vyvinutý Volvo Group. Úspora paliva se předpokládá 20% – 25%. U klasické jednopodlažní varianty, která už je v provozu, bylo docíleno úspory paliva 30%.

Zdroj: http://www.allcarselectric.com/blog/1022024_volvo-unveils-double-decker-hybrid-bus.

Volvo na svých stránkách uvádí, že jeho hybridní autobus s označením 7700 dosahuje snížení emisí až o 50% a úspory paliva až 35%.

Zdroj:

http://www.volvobuses.com/bus/global/en-gb/products/City%20buses/Volvo%207700%20Hybrid/Pages/Introduction_new.aspx

- 2) **Mercedes** – nemá ve svém sortimentu čistě elektrický autobus. V nabídce se vedle dieselových městských autobusů řady Citaro objevují verze s CNG, diesel hybrid nebo fuel cell hybrid. Diesel hybrid: kloubový autobus se třemi nápravami s pohonem typu sériový hybrid s dieselem 160 kW, 4válcový motor, objem 4.8 l, Euro 4, napájející baterie Li-ion umístěné na střeše o kapacitě 19.4 kWh a 4 elektrické motory o výkonu 80 kW (každý), které jsou umístěné na centrální a zadní nápravě. Výrobce uvádí úspory paliva 20%-30%.

Zdroje: http://en.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_Citaro#Hybrid_electric_version
<http://www2.mercedes-benz.co.uk>.

- 3) **Solaris** – nemá ve své nabídce čistě elektrický autobus. Solaris nabízí z vozidel využívající elektrickou energii buď trolejbusy (s pohony Cegelec, Škoda nebo Medcom) nebo hybridní autobusy, kde dodává tři různé varianty: a) Urbino 12 hybrid je 12m dlouhý paralelní hybrid, diesel Cummins 6.7l, 162 kW, Li-ion baterie uložené pod sedadly, elektrický motor 44kW, hnaná zadní náprava, systém start-stop. Další hybridy jsou Urbino 18 Hybrid Allison a Urbino 18 Hybrid Vossloh Kiepe.

Zdroj: <http://www.solarisbus.pl/en/hybrid.html>

- 4) **Iveco (Irisbus)** – nenabízí čistě elektrický autobus ani žádnou hybridní variantu. Z elektrických vozidel má Iveco ve svém sortimentu dodávku Iveco Eco Daily Electric s čistě elektrickým pohonem (asynchronní motor 60 či 80 kW, trakční baterie Zebra Z5 – niklové elektrody v keramické struktuře s tuhým elektrolytem solí chloridu hliníku (NaAlCl₄) a negativní

elektrody z taveného sodíku. Kladná elektroda je tvořena rozpuštěným niklem ve vybitém stavu a nikl chloridem v nabitém stavu. Baterie pracují při teplotě 260°C a tedy nejsou citlivé na vnější teploty. Baterie jsou 100% recyklovatelné a nepotřebují údržbu.

Zdroj: http://web.iveco.com/czech/press-room/tiskove-zpravy/Pages/Daily_ELECTRIC.aspx

- 5) **Renault** – nemá ve své nabídce žádný elektrický autobus.
- 6) **MAN (spolupráce s Neoplanem)** – z autobusů patří do skupiny EEV (enhanced environmentally friendly vehicle) nabízí pohony s CNG, diesel hybrid nebo vodíkový pohon. Čistě elektrický autobus firma MAN nenabízí. Hybridní autobus MAN Lion's City Hybrid: sériový hybrid, režim start&stop, dodány např. do Mnichova, Paříže, Barcelony, Milána nebo Vídně. Hybrid využívá ultracapacity o výkonu 200 kW umístěné na střeše (napětí 750 V), dva elektromotory 75 kW a 6válcový diesel 6,9l o výkonu 184 kW. Výrobce deklaruje úspory paliva až 30% při provozu v centru města a okolo 15% při provozu na perifériích.

Zdroje:

http://www.mantruckandbus.com/en/Products_and_solutions/MAN_Bus/Stadtbusse/Stadtbusse.jsp

http://www.man-ag.com/MAN-Downloadgalleries/All/2Presse/Publikationen/2010_Forum/MAN_Forum_0310_EN.pdf

3 Subdodavatelé elektrické výzbroje

- 1) Cegelec – Solaris, SOR Libchavy
- 2) Škoda Electric – Solaris, Breda
- 3) Medcom (PL) – Solaris
 - Varšava, Polsko, <http://www.medcom.com.pl>,
 - AC a DC výkonové systémy, trakční měniče,
 - Spojení s Varšavskou technickou univerzitou,
 - Výzbroj pro trolejbusy, lokomotivy, metra apod.
- 4) UQM Technologies
 - Longmont, Colorado, USA, <http://www.uqm.com>,
 - elektromotory, generátory a výkonová elektronika – vývoj a výroba
 - důraz na výkonové systémy pro elektrická vozidla, hybridní vozidla a vozidla s palivovými články,
 - elektrické pohony 5 – 200 kW, motory s permanentními magnety 500 W – 200 kW, 12 V – 800 V, 30 rpm – 120 000 rpm,

- pomocné systémy (aktuátory, generátory, motory pro ventilátory a čerpadla) 100 W - 25 kW.
- DC – DC měniče a DC – AC měniče 1,5 – 25 kW.

5) Ansaldo Electric Drives – Breda

- Janov, Itálie, www.ansaldoelectricdrives.com,
- 30 let zkušenosti s elektrickými pohony pro elektrická a hybridní vozidla.

Drive type	AC	AC	AC	AC	AC	AC
Motor type	Induction	Induction	Induction	Induction	Induction	Induction
Nominal power	7,5 kW	15 kW	30 kW	70 kW	130 kW	180 kW
Max power	15 kW	30 kW	60 kW	140 kW	150 kW	250 kW
Max speed	7000 rpm	9000 rpm	9000 rpm	8000 rpm	4000 rpm	4000 rpm
Converter type	IGBT Inverter	IGBT Inverter	IGBT Inverter	IGBT Inverter	IGBT Inverter	IGBT Inverter
Cooling system	Water	Water	Water	Water	Water	Water
Typical application	City car	City car	Van	Van/minibus	12 m bus	18 m bus

4 Čistě elektrické autobusy

4.1 SOR Libchavy – SOR EBN 10.5 (ČR)

- čistě elektrický autobus českého výrobce SOR,
- nízkopodlažní autobus určený pro hromadnou přepravu osob v městském provozu na kratší vzdálenosti,



Technické údaje: Elektrický autobus SOR EBN 10.5	
Typ autobusu	Čistě elektrický poháněný bateriemi
Počet náprav	2
Pohotovostní hmotnost vozidla	10 200 kg
Délka vozidla	10,37 m
Počet sedadel vč. řidiče/počet míst k stání	19 (+9) +1/66
Konstrukční rychlost	80 km/h
Motor	Asynchronní, šestipólový 120 kW/400 V AC, max. přetíž. 200%
Elektromotor + měnič	
Baterie	LiFePO ₄ , 180 článků 2,5-4,25V/300 Ah

Dobíjení	- pomalé 32A 8 hodin - rychlodobíjení 4 hodiny 200 - 250 A, 1,8 - 2,3 kWh/min
Brzdění rekuperací	Ano
Dojezd	Maximální dojezd prázdného vozu 250 km/170 kWh Provozní dojezd 110 – 130 km, 120km pro 2-3 zastávky/km
Životnost	
Brzdový systém	Wabco PAN19-1
Nezávislé topení	Naftové, 24 kW
Ekonomická vyčerpatelnost akumulátorů pro dosažení životnosti 400 000 km 70% (max. 80%)	
Příklady dojezdů pro průměrné obsazení 50% (42 osob): - městský provoz 9,4 kWh/100 t*km – 100 (110) km (124 kWh/100 km) - meziměstský provoz 7 kWh/100 t*km – 130 (150) km (92 kWh/100 km)	

- Zdroj: <http://www.sor.cz/site/elektrobus-sor-ebn-105>.

4.2 Tecnobus Gulliver (Itálie)

- italský čistě elektrický minibus,
- délka 5,3 m,
- 10 míst k sezení + 10 k stání,
- maximální rychlost 33 km/h,
- maximální stoupavost 16%,
- baterie Zebra – Sodium liquid s provozní teplotou 270 – 300°C,
- doba nabíjení 8 hodin,
- Zdroje: www.tecnobus.it, <http://www.tc.gc.ca/eng/programs/environment-utsp-casestudypublictransit-1707.htm>.



4.3 Breda Menarinibus - Zeus M 200 E (Itálie)

- italský čistě elektrický minibus, délka 5,8 m, váha 4 200 kg,
- 9 míst k sezení a 11 k stání,
- motor AC 30 kW (max. 60 kW), 260 Nm, vodou chlazený, dodavatel Ansaldo Electric Drives,



- měnič technologie IGBT, Ansaldo Electric Drives,
- maximální rychlost 45 km/h,
- trakční baterie: 78 článků Li-pol, 288 V, 200 Ah, 57.6 kWh, uložené v zadní části vozu,
- nabíječ 380 V, 20 Ah, nabíjení 10 hodin,
- monitorování baterií přes centrální řídicí jednotku, stav, úroveň nabití,
- Zdroj: <http://www.bredamenarinibus.it/en/prodotti/prodotti.php?cat=5&id=43>

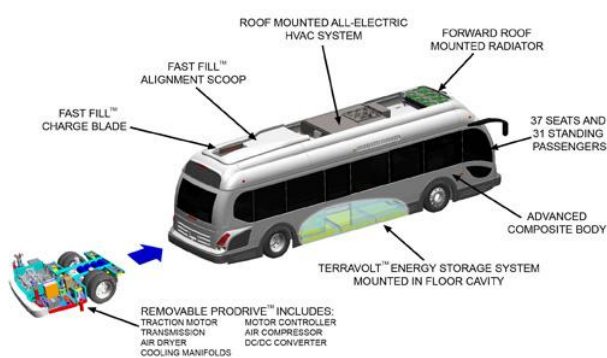
4.4 EcoRide BE35 electric bus (USA)

- čistě elektrický autobus vyvinutý ve spolupráci UQM Technologies (elektromotory, generátory, výkonová elektronika, USA, www.uqm.com) a Proterra LLC (elektrobusy, USA, www.proterra.com).



Technické údaje: Elektrický autobus Proterra BE35	
Model	Proterra FCBE 35 – plně elektrický autobus
Datum testů	26. 3. 2009
Typ autobusu	Čistě elektrický poháněný bateriemi
Počet náprav	2
Pohotovostní hmotnost vozidla	12 300 kg
Délka vozidla	10,7 m
Rám skříně	Ocelový
Skříň	Monokok z uhlíkových vláken
Počet sedadel vč. řidiče/počet míst k stání	38/34
Pohon	Elektrický pohon součástí integrovaného výměnného systému ProDrive
Elektromotor + měnič	UQM Power Phase/150 (150 kW, 650 Nm)
Baterie	Proterra/TerraVolt 55 (55,2 kWh, 380 V DC)
Rozšiřující pohonná jednotka (volitelné)	Vodíkový palivový článek 32kW pro dobíjení baterií, diesel, benzin, CNG
Brzdění rekuperací	Ano
Přední náprava	ZF/RL 75 E
Zadní náprava	ZF/AV 132
Životnost	12 let/500 000 mil (800 000 km)

- *Elektrický pohon UQM® PowerPhase®150:*
 - trakční motor s permanentními magnety,
 - jmenovitý výkon 100 kW, maximální 150 kW, točivý moment 650 Nm,
 - údajně umožňuje využít až 90% kinetické energie při brzdění,
 - součástí integrovaného systému ProDrive (viz dále).
- *Integrovaný systém ProDrive:*
 - výměnný integrovaný blok tvořící zadní část vozidla,
 - integruje elektrický pohon UQM, 3stupňovou převodovku Borg Warner eGearDrive, zadní nápravu, kompresor, chlazení, DC-DC měnič.
 - převodovka umožňuje z hlediska účinnosti provoz trakčního motoru v pásmu 92 - 95% pro režim jízdy i režim brzdění,
 - pro prodloužení dojezdu může být vozidlo doplněno o pomocnou vodíkovou jednotku HYPM – 16 vodíkových článků o jmenovitém výkonu 32 kW pro dobíjení baterií či jiným typem generátoru pro dobíjení baterií (diesel, benzin, CNG).

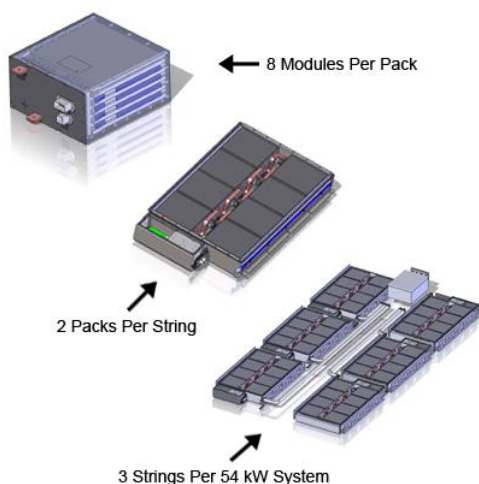


Obrázek 3 Proterra ProDrive system.



Obrázek 4 Proterra ProDrive system.

- *Proterra TerraVolt Energy Storage System*
 - soubor baterií o napětí 380V a kapacitě 55 kWh, patentovaný Proterrou,
 - údajně jediný průmyslový systém, který se může plně nabít během 10 minut s nejdelší životností mezi dostupné systémy pro aplikace v těžkém provozu,
 - uložený v podlaze vozu, sběrač pro dobíjení umístěn na střeše,
 - aktivní chlazení systému,
 - sofistikované řízení baterií na úrovni článků zvyšuje účinnost a životnost



Obrázek 5 Proterra TerraVolt Energy Storage System.



Obrázek 6 Proterra - střešní sběrač pro nabíjení.

- *FastFill – nabíjecí stanice:*

- o technologie rychlého nabíjení na trase,
- o automatické připojení střešního sběrače k nabíječi bez zásahu řidiče,
- o autobus lze dobít do 10 min během výměny pasažérů,
- o bezdrátové vzdálené řízení dobíjecí stanice ulehčující proceduru,
- o nabíjení TerraVolt systému z 0 na 95% s účinností >92% během 6 minut.

- *Ekonomika provozu:*

- o Dosahuje dle tzv. „ekvivalentního dojezdu na galon dieselu*“ 17.5 - 29 mil/galon $\approx$ 28 – 46 km/3,79 l $\approx$ 7,4 - 12,24 km/l $\approx$ 8,2 - 13,5 l/100 km (pokud 1 galon = 3,79 l; 1 míle = 1,6 km).
- o Při ceně dieselu \$3/galon (\$0,8/l), ceně elektřiny \$0.12/kWh, průměrné roční najeté vzdálenosti 40 000 mil (60 000 km) a při “ekvivalentní spotřebě dieselu” 20 mil/galon (11,8 l/100 km), ($\approx$ 2 kWh/míle) => úspora \$300 000 za 12 let životnosti ve srovnání s konvenčním dieselem.
- o Spotřeba běžného autobusu s naftovým motorem dle Proterra: 3,86 míle/galon (61,4 l/100 km).
- o Hybridní autobusy dosahují dle Proterra cca: 4,5 míle/galon (52,6 l/100 km).
- o S přihlédnutím k očekávanému růstu cen dieselu oproti elektřině výrobce deklaruje Proterra úsporu paliva dokonce \$430 000 za 12 let (zdražení nafty o 150% za posledních 12 let a elektřiny o 38%).

- *Test za účelem porovnání spotřeby energie s naftovými motory.*

Tři fáze:

- a) CBD – central business district: 2 míle, 7 zastávek/míli, max. rychlost 32 km/h (21,3 Mpg $\approx$ 11,1 l/100 km).
- b) Arterial: 2 míle, 2 zastávky/míli, max. rychlost 64 km/h (17,55 Mpg $\approx$ 13,5 l/100 km).
- c) Commuter: 4 míle s 1 zastávkou, max. rychlost 64 km/h (29,23 Mpg $\approx$ 8,1 l/100 km).
- o V každé zastávce autobus setrval 7 s. Jeden testovací jízdní cyklus zahrnuje 3 fáze „CBD“, 2 fáze „Arterial“ a 1 fázi „Commuter“, tedy dohromady 14 mil (22,4 km). Po tomto testovacím jízdním cyklu byl autobus nabit v depu na vysoce výkonném nabíječi – AeroVironment's AV-900 a dobíjení spotřebované energie probíhalo v řádech minut (10 – 20 min). Dojezd lze rozšířit vodíkovým palivovým článkem.
- *Návaznost na nadřazené systémy (smart grids)*
 - o nadřazené řízení vozidla vyvinuté Proterrou pro efektivní řízení zdroje energie a požadavků vozidla,
 - o řízení monitoruje každou jednotku vozidla a přizpůsobuje činnost za účelem dosažení maximální účinnosti celého systému (zejména jednotek nesouvisejících přímo s pohonem vozu – pomocné pohony, klimatizace),
 - o řízení využívá systém GPS a adaptivní logiku pro predikci energetických potřeb vozu během jízdy,
 - o u vozidel s opakovaným jízdním profilem (linkové městské autobusy) si adaptivní logika po dokončení cyklu zapamatuje profil a přizpůsobí řízení za účelem dosažení maximální účinnosti, snížení emisí (u rozšířených verzí s dobíjecím generátorem) a omezení hluku,
- *Zdroje:*
 - <http://www.matternetwork.com/2009/2/energy-efficient-transit.cfm>,
 - http://www.uqm.com/news_article.php?aid=104,
 - <http://www.proterra.com/index.php/products>.

*ekvivalent dieselu (Mpg – miles per gallon) – jedná se o počet ujetých mil elektrickým autobusem po využití energie 38,2 kWh. Tato energie je přitom obsažená v 1 galonu nafty. Jedná se tedy o srovnávací parametr s naftovými motory. Testy probíhaly ve třech prostředích:

4.5 Čína – čistě elektrický autobus se superkapacitory



Obrázek 7 Čínský elektrický autobus se superkapacitory.



Obrázek 8 Uložení superkapacitorů.

Technické údaje: Čína – elektrický autobus se superkapacitory	
Typ autobusu	Čistě elektrický poháněný superkapacitory
Počet náprav	2
Hmotnost	10 850 kg
Délka vozidla	9,7 m
Maximální rychlost vozidla	50 km/h
Pohon/elektromotor	Elektrický stejnosměrný motor s PM
Jmenovitý/maximální výkon	60 kW/90 kW
Jmenovitý/maximální točivý moment	230/300 Nm
Jmenovité napětí/proud	190V, 350A
Jmenovité otáčky	3500 ot/min
Měnič	DC – DC, dvoukvadrantový s IGBT
Vstupní napětí	160 – 320 V =
Výstupní napětí/max. výst. trvalý proud	0 – 190 V =/350 A
Superkapacitory	
Napětí	160 – 320 V
Kapacita	14 kWh
Dobíjení	<15 minut
Uspořádání	600 článků spojených sério-paralelně
Parametry 1 článku	0,8 - 1,6 V/
Dojezd s plně nabitými superkapacitory	25 km při průměrné rychlosti 30 km/h
Přední náprava	ZF/RL 75 E
Zadní náprava	ZF/AV 132
Životnost	12 let/500 000 mil (800 000 km)

- *Vlastnosti:*

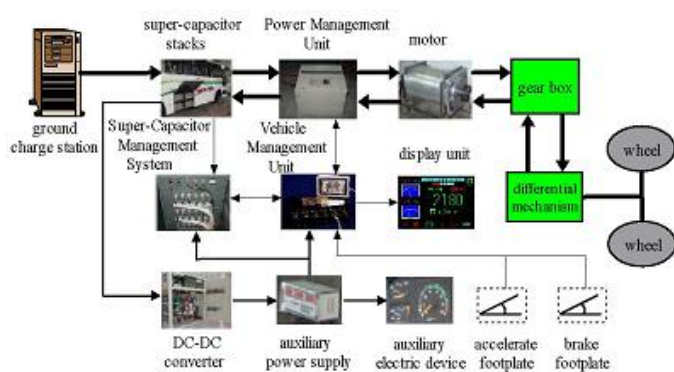
- autobus byl navržen pro městský provoz, kde se předpokládá dobíjení v zastávkách a kde vzdálenost mezi zastávkami je <20 km,
- výhody superkapacitorů oproti bateriím (dle autora) – vyšší hustota výkonu, nízký vnitřní odpor, větší hloubka vybíjení, nezávislost na teplotě, 100 000x vyšší životnost,
- nevýhody superkapacitorů oproti bateriím (dle autora) – menší hustota energie,
- stejnosměrný motor s permanentními magnety (NdFeB) je napájen ze superkapacitorů přes DC – DC měnič,
- při brzdění jsou rekuperací superkapacity dobíjeny.

- *Superkapacitory – řízení:*

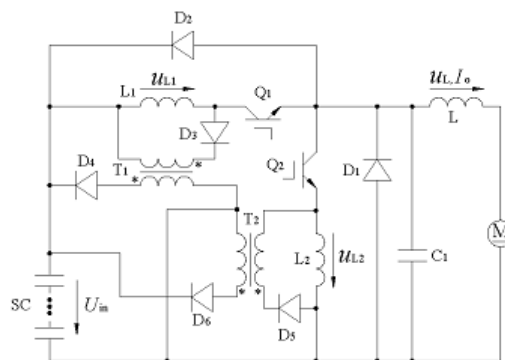
- implementovaný systém řízení superkapacitorů,
- monitorování napětí, proudu a teploty,
- rozvažování napětí na článkách,
- ochrana před přebitím a úplným vybitím,
- komunikace s řídicí jednotkou vozidla.

- *Nadřazená řídicí jednotka vozidla:*

- tvoří interface s řidičem a monitoruje požadavky od plynového a brzdového pedálu,
- monitoruje stav superkapacitorů, počítá nejlepší moment pro pohon či brzdění, diagnostikuje poruchy, přepětí, podpětí, teploty, apod.



Obrázek 9 Schéma elektrovýzbroje.



Obrázek 10 Dvoukvadrantový DC - DC měnič.

- *Zdroj:*

Chunbo Zhu et al.: The Development of an Electric Bus with Super-Capacitors as Unique Energy Storage. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC'06, 6.-8. Sept. 2006, Windsor.

5 Návaznost na nadřazené řízení

5.1 Inteligentní nadřazené řízení (adaptace a predikce)

- Inteligentní systém dopravy (ITS – Intelligent Transportation System) - termín se vztahuje ke snaze využít informační a komunikační technologie u vozidel a v dopravní infrastruktuře za účelem zlepšení nepříznivých faktorů, jakými jsou zejména doba jízdy, spotřeba paliva, opotřebení vozidel, bezpečnost apod.
- Umožňuje vozidlům sdílet minulé, současné a předpovídané informace.
- U elektrických a hybridních vozidel jde především o minimalizaci spotřeby elektrické energie, kterou umožní nadřazené řízení vozidla ve spolupráci s ITS.
- Strategie nadřazeného řízení vozidla mohou být rozděleny do následujících typů:
 - a) Řízení založené na pravidlech – používá heuristické algoritmy, jako jsou neuronové sítě či fuzzy logika, které určují nejlepší řešení podle vzorů. Zakládá se na statických proměnných, avšak hybridní a elektrická vozidla jsou dynamické systémy s více proměnnými.
 - b) Řízení rozpoznávající vzory – dosahuje lepších výsledků než a), avšak je omezeno na vzory uložené v paměti, které se nepřizpůsobí současné situaci (akcelerace, rekuperační energie, doba zastávky).
 - c) Dynamické programování – založeno na znalosti aktuálních dat pro modelování jízdy. V současné době lze toto řízení implementovat za předpokladu spolupráce se systémy ITS (inteligentní systém dopravy) a GPS (globální navigační systém), které umožňují predikování. Nevýhodou může být zpracovávání velkého množství dat v reálném čase.
 - d) „Dvouškálové“ dynamické programování – optimalizované dynamické programování, umožňuje rychlejší výpočet díky segmentování dopravních dat.
- V souvislosti s co nejefektivnější spotřebou elektrické energie z baterií je potřebné implementovat inteligentní prediktivní bateriový řídicí systém, schopný dynamicky reagovat na náhodné budoucí dopravní situace. Takový systém sestává ze šesti základních modulů:
 - a) TDE (Traffic Data Extractor) – výběr dopravních informací z ITS, jakými jsou plynulost dopravy, stav světelné křižovatky apod. Data jsou pak dále využita pro výběr alternativní trasy.
 - b) VOH (Vehicle Operation Mode) – informace o aktuálním stavu vozidla (rychlost, převodový stupeň, stav nabití baterií apod.).
 - c) TMI (Trip Model Identifier) – modelování jízdních podmínek včetně jízdního profilu, stoupání, délka trasy, apod. Využívá se GPS.

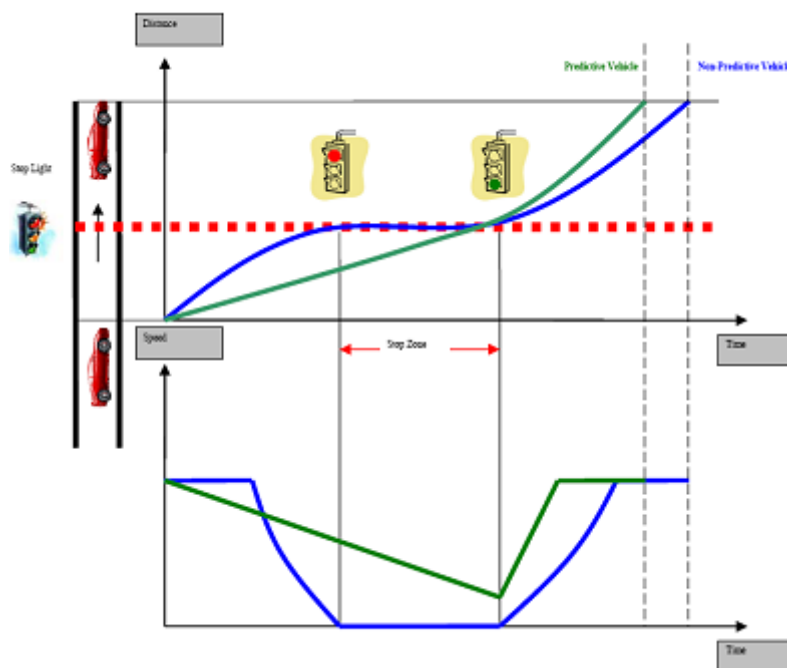
- d) TMD (Trip Model Deflector) – přesměrování trasy na základě zpracování dopravních informací.
 - e) SOCO (State of Charge Optimizer) – optimalizace stavu nabití baterií, základními kritérii tohoto modulu jsou dynamika a pohotovost.
 - f) DFC (Driver Feedback Control) – poskytuje řidiči zpětnou vazbu o stylu jízdy včetně rychlosti, zrychlení, brzdění apod.
- Pro správná jízdní doporučení je klíčová předpověď spotřeby energie založená na modelu:

$$\Delta = \left\{ \alpha + \beta_1 R_T V + \left[\frac{\beta_2 M_v a^2 V}{1000} \right]_{a>0} \right\} \Delta t,$$

kde R_T je celková trakční síla, M_v je hmotnost vozidla, V rychlost vozidla, a zrychlení vozidla, α je konstantní podíl paliva naprázdno, β_1 je účinnost pohonu a β_2 je účinnost během zrychlení. Parametry, jež mají být optimalizovány, jsou doba jízdy $T(i)$ a energie baterií $\delta(i)$. Můžeme určit tedy určit ztrátovou funkci jako:

$$C = \sum_{i=0}^{j-1} [t(i) + \delta(i)] = \sum_{i=0}^{j-1} TC[x(i), u(i)],$$

kde j je počet segmentů celkové trasy, TC jsou celkové náklady na trasu, celkový čas a energie, $x(i)$ je dynamický stavový vektor vozidla skládající se z rychlosti, stavu nabití baterií, točivého momentu motoru, trasy vozidla. $u(i)$ je řídicí vektor vozidla obsahující doporučenou rychlost, doporučené zrychlení a brzdění, doporučenou trasu apod. Optimalizační problém spočívá v nalezení řídicího vektoru $u(i)$.



Obrázek 11 Průjezd vozidla křižovatkou s inteligentním nadřazeným řídicím systémem oproti standardu.

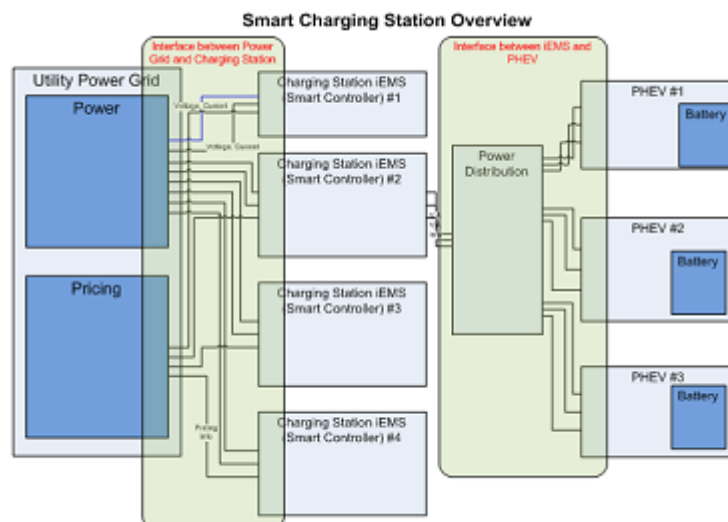
- Zdroje:

Abdul-Hak, M.; Al-Holou, N.: ITS Based Predictive Intelligent Battery Management System for Plug-In Hybrid and Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. 7-10 Sept. 2009, Dearborn, USA.

Antonis I. A., Emadi A.: Adaptive Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. 7-10 Sept. 2009, Dearborn, USA.

5.2 Smart Grids – chytré sítě

- větší rozšíření elektrických vozidel (Electric Power Research Institute, USA, předpokládá, že v roce 2050 62% vozidel budou hybridní elektrická vozidla) = potenciální hrozba pro stabilitu sítě při nekontrolovatelném dobíjení baterií (nestabilita napětí, blackouty),
- řešením může být centrální inteligentní řídicí systém (iEMS – intelligent energy management system) regulující spotřebu elektrické energie,
- předpokládá se existence městských parkovišť vybavených inteligentními nabíjecími stanovišti,
- tato stanoviště by měla využívat komunikační platformu pro informování centrálního řídicího systému iEMS o nabíjecím procesu přistaveného vozidla využívajícího elektrickou energii,
- centrální řídicí systém by pak vykonával patřičná rozhodnutí,



Obrázek 12 Navrhované inteligentní nabíjecí parkoviště pro vozidla využívající elektrickou energii.

- Zdroje:

Kulshrestha P. et al.: Evaluation of ZigBee Communication Platform for Controlling the Charging of PHEVs at a Municipal Parking Deck. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. 7-10 Sept. 2009, Dearborn, USA.

6 Trendy a očekávané směry vývoje

6.1 Bezkontaktní nabíjení elektrických vozidel

- úvahy o použití indukčního nabíjení baterií vozidla,
- nabíječ tvořen měničem a feromagnetickým materiálem zabudovaným v silnici,
- frekvence 1-200 kHz, mezera max. 100 mm pro dosažení účinnosti až 90%,
- uvažovaný výkon nabíječe 20 – 60 kW,
- realizovatelné pro nižší rychlosti vozidla (do 50 km/h) a délky nabíjecí dráhy v řádech desítek metrů.
- Zdroj: Pantic, Z. et al.: Inductively Coupled Power Transfer for Continuously Powered Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. 7-10 Sept. 2009. Dearborn, USA.

6.2 Mobilní zdroje energie – rozvoj

- vývoj těchto technologií je klíčový pro další rozvoj čistě elektrických a hybridních vozidel,
- zásadní a zároveň nejvíce problematické parametry: hustota energie, výkonová hustota, rychlost nabíjení/vybíjení, počet nabíjecích cyklů, životnost, stárnutí - pokles kapacity, teplotní závislost a bezpečnost,

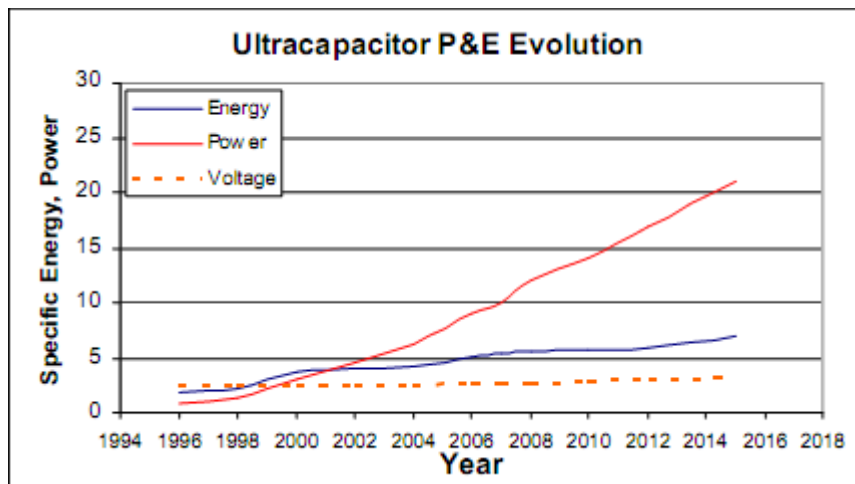
System	Neg elec	Pos elec	OCV	Theory Ah/kg	Theory Wh/kg	Practical Wh/kg
Pb-acid	Pb	PbO ₂	2.1	83	171	20-40
Nickel-cadmium	Cd	NiOOH	1.35	162	219	40-60
Ni-metal hydride	MH	NiOOH	1.35	178	240	60-80
Sodium-sulfur	Na	S	2.1 → 1.78 (2.0)	377	787	80-100
Sodium-metal chloride (300C)	Na	NiCl ₂	2.58	305	787	80-100
Lithium ion	Li _x C ₆	Li _{1-x} MO ₂ M=Co, Ni, Mn	4.2 → 3.0 (4.0)	95 @ x=0.6	380	150-200
Lithium polymer	Li	VO _x	3.3 → 2.0 (2.6)	340	884	150

Obrázek 13 Porovnání parametrů dostupných technologií baterií.

Chemistry	Maturity	Thermal	Performance
LiNiCoAlO ₂ 4.xV/cell	Proven	Unstable at high C/x rates	High energy, good power
LiNiCoMnO ₂ 4.xV/cell	Improving	Limited durability experience	High energy, good power
LiMn ₂ O ₄ 3.8V/cell	Improving	Limited life at high temperature	High capacity fade, moderate power
LiFePO ₄ 3.6V/cell	Mature	Very stable	Low energy, rel high power

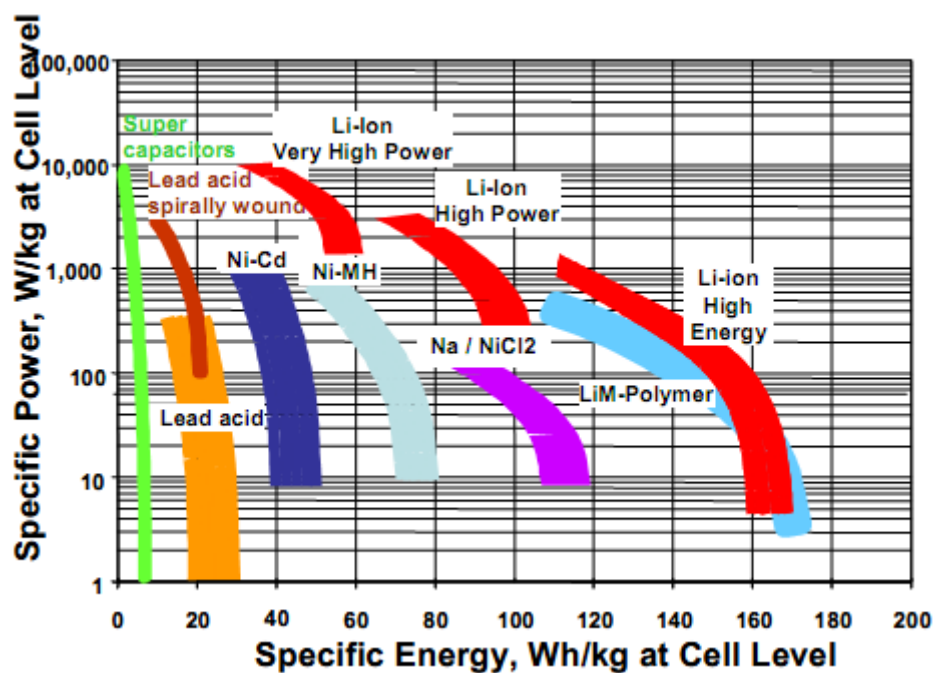
Obrázek 14 Přehled používaných a potenciálních technologií baterií typu Li-ion.

- dostupné a potenciální technologie Li-ion:
 - LNCAO – schopné pojmout velké množství energie, dobrý výkon, zaváděno do komerční sféry, znepokojení zůstává u stability při velkých nabíjecích a vybíjecích proudech,
 - LNMC – velké množství energie, dobrý výkon, avšak dosud nepotvrzená životnost,
 - LM₂O₄ – pokles kapacity, limitovaná životnost při zvýšené teplotě, velký otazník,
 - LFPO (LiFePO₄) – přední zástupce technologie Li-ion, prokázaná velká stabilita nanofosfátových elektrod, relativně dobrá hustota energie a vysoký výkon,
- ultrakapacity – očekávaný vývoj napětí na 1 buňku 3 V a specifické hustoty výkonu nad 20 kW/kg,



Obrázek 15 Očekávaný trend vývoje ultrakapacitorů.

- *hybridní mobilní zdroj elektrické energie* – spojení baterií a ultrakapacitorů
 - zásadní rozpor v návrhu článku – buď je zaměřen na hustotu výkonu, nebo na hustotu energie, dosáhnout oboje je zásadní problém (článek typu very high power Li-ion dosahuje 35% kapacity článku high energy Li-ion – viz Obrázek 16),



Obrázek 16 Porovnání parametrů článků s designem zaměřeným na hustotu výkonu nebo energie.

- očekává se tedy integrace baterií a ultrakapacitorů,
- ultrakapacitor by zajistil výkon a měl by tak zmírnit protiklad požadavků na hustotu výkonu a energie u baterií,
- při zmírněném požadavku na hustotu výkonu by se mohl využít skutečný potenciál technologie Li-ion (hustota energie > 200 Wh/kg),

- integrace otevírá vedle zvýšení hustoty energie řadu dalších otázek a možností – snížení teplotních rázů na li-ion a teplotní závislosti – nižší teplotní dimenzování umožní hustší uložení článků, potenciální prodloužení životnosti, zlepšení bezpečnosti apod.
- Zdroj: Miller, J. M.: Energy Storage System Technology Challenges facing Strong Hybrid, Plug-in and Battery Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC'06, 6.-8. Sept. 2006, Windsor.

7 Závěr

Výzkumná zpráva se zabývá čistě elektrickými autobusy, které pro svůj pohon využívají mobilní zdroje energie, jakými jsou baterie či superkapacity. Jedná se tedy o vozidla pro hromadnou přepravu osob, která nejsou připojena k trakčnímu vedení.

Hlavní závěry

- Z hlediska rozšíření a nasazení ve světě jednoznačně převažují hybridní elektrické autobusy nad čistě elektrickými.
- Hlavní evropští výrobci autobusů nejdou cestou čistě elektrických vozidel a nabízejí v kategorii nízkoemisních technologií hybridní autobusy.
- Existuje český výrobce SOR Libchavy nabízející čistě elektrický autobus.
- Itálie má dva výrobce elektrických minibusů – BredaMenarinibus a Tecnobus.
- V USA je zajímavý koncept čistě elektrického autobusu Proterra podporovaný státem, který dosahuje velmi dobrých parametrů, zejména času dobíjení, ačkoli se jedná o bateriový autobus.
- Čína podporuje čistě elektrické autobusy, zajímavé jsou koncepty se superkapacity.
- Z hlediska elektromechanické koncepce jednoznačně dominuje řešení uložení hnacího motoru v blízkosti zadní nápravy a pohon celé zadní nápravy. Nic nenasvědčuje tomu, že by se u elektrických autobusů vyskytovalo nasazení koncepce pohonu se samostatně hnanými jednotlivými koly (každé kolo má svůj motor). Z hlediska baterií převládá uložení v zadní části vozu.
- Dá se očekávat vývoj v oblasti inteligentního nadřazeného řízení, který bude v budoucnu napojen na GPS a ITS, bude zpracovávat velké množství aktuálních dat v reálném čase a bude schopen adaptace na současnou situaci a sofistikovaného rozhodování. Inteligentní nadřazené řízení by mělo zajistit efektivní nakládání s disponibilní energií baterií či superkapů a zlepšit tak provozní parametry.
- Problematika tzv. chytrých sítí (smart grids) bude pravděpodobně řešena až s větším rozšířením hybridních a elektrických vozidel. Předpokládá se inteligentní rozvržení nabíjení

vozidel na parkovištích založené na komunikaci s vozidly tak, aby nebyla ohrožena stabilita sítě.

- Největším problémem čistě elektrických vozidel i hybridních vozidel jsou stále zdroje energie a s nimi spojený omezený dojezd a akceschopnost. Jedná se zejména o problematické parametry baterií a superkondenzátorů (hustota energie a výkonu, životnost). Nadějný se zdá být koncept hybridního zdroje, který integruje baterie, superkapacitory a výkonovou elektroniku. Superkapacitory by měly zajistit dobrou výkonovou hustotu a návrh bateriových článků se tak může soustředit na hustotu energie.

8 Použitá literatura

- [1] U.S. Department of Transportation: Analysis of Electric Drive Technologies For Transit Applications: Battery-Electric, Hybrid-Electric, and Fuel Cells.
- [2] http://www.allcarselectric.com/blog/1022024_volvo-unveils-double-decker-hybrid-bus
- [3] http://www.volvobuses.com/bus/global/en-gb/products/City%20buses/Volvo%207700%20Hybrid/Pages/Introduction_new.aspx
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_Citaro#Hybrid_electric_version
- [5] <http://www2.mercedes-benz.co.uk>
- [6] <http://www.solarisbus.pl/en/hybrid.html>
- [7] http://web.iveco.com/czech/press-room/tiskove-zpravy/Pages/Daily_ELECTRIC.aspx
- [8] http://www.mantruckandbus.com/en/Products_and_solutions/MAN_Bus/Stadtbusse/Stadtbusse.jsp
- [9] http://www.man-ag.com/MAN-Downloadgalleries/All/2Presse/Publikationen/2010_Forum/MAN_Forum_0310_EN.pdf
- [10] <http://www.medcom.com.pl>
- [11] <http://www.uqm.com>
- [12] www.ansaldoelectricdrives.com
- [13] <http://www.sor.cz/site/elektrobus-sor-ebn-105>
- [14] www.tecnobus.it
- [15] <http://www.tc.gc.ca/eng/programs/environment-utsp-casestudypublictransit-1707.htm>
- [16] <http://www.bredamenarinibus.it/en/prodotti/prodotti.php?cat=5&id=43>
- [17] www.proterra.com
- [18] <http://www.matternetwork.com/2009/2/energy-efficient-transit.cfm>
- [19] http://www.uqm.com/news_article.php?aid=104
- [20] Chunbo Zhu et al.: The Development of an Electric Bus with Super-Capacitors as Unique Energy Storage. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC'06, 6.-8. Sept. 2006, Windsor.
- [21] Abdul-Hak, M.; Al-Holou, N.: ITS Based Predictive Intelligent Battery Management System for Plug-In Hybrid and Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. 7-10 Sept. 2009, Dearborn, USA.
- [22] Antonis I. A., Emadi A.: Adaptive Control Strategy for Hybrid Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. 7-10 Sept. 2009, Dearborn, USA.
- [23] Kulshrestha P. et al.: Evaluation of ZigBee Communication Platform for Controlling the Charging of PHEVs at a Municipal Parking Deck. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. 7-10 Sept. 2009, Dearborn, USA.
- [24] Pantic, Z. et al.: Inductively Coupled Power Transfer for Continuously Powered Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. 7-10 Sept. 2009. Dearborn, USA.
- [25] Miller, J. M.: Energy Storage System Technology Challenges facing Strong Hybrid, Plug-in and Battery Electric Vehicles. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2006. VPPC'06, 6.-8. Sept. 2006, Windsor.