



ELEKTRICKÉ ZDROJOVÉ SOUSTROJÍ PRO PRODLOUŽENÍ DOJEZDU ELEKTROBUSU

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Jaroslav Ettl**
Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.





ELECTRIC SOURCE MACHINERY FOR EXTENDING THE RANGE OF ELECTROBUS

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2302T010 – Machine and Equipment Systems
Author: **Bc. Jaroslav Ettl**
Supervisor: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav Ettl**
Osobní číslo: **S12000432**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**
Název tématu: **Elektrické zdrojové soustrojí pro prodloužení dojezdu elektrobuse**
Zadávací katedra: **Katedra vozidel a motorů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Na základě literární rešerše shrňte a kriticky zhodnoťte možnosti a způsoby použitelné k prodlužování dojezdu elektrických vozidel, zejména autobusů, dobíjením jejich akumulátorů za provozu na jízdní trase.
2. Zpracujte projekt zdrojového soustrojí se spalovacím motorem na CNG pro dobíjení akumulátorů městských elektrobuse včetně instalace soustrojí do elektrobuse SOR.
3. Proveďte hodnocení navrženého projektu z hlediska provozních parametrů elektrobuse SOR, ekonomie jeho provozu a vlivu na životní prostředí.

Rozsah grafických prací: **Výkresová dokumentace**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 str.**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] ČERNÝ, Jan a Lukáš PECH. Studie elektrobusů délky 11-12 m se zvýšenou obsaditelností a prodlouženým dojezdem. Libchavy: SOR Libchavy spol. s r.o., 2013.
- [2] SLAVÍK, Jakub. E-mobilita v MHD. Situace a vývojové trendy v elektrických autobusech pro městskou dopravu. Consulnting Services, 2013. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/42.php>.
- [3] SORGER, Helfried et al. Single Cylinder 25 kW Range Extender for High Compactness and NVH Performance. In: 23rd Aachen Colloquium Automobile and Technology 2014, konané ve dnech 6.-7. října 2014 v Aachen. Eurogress Aachen.
- [4] Firemní literatura SOR Libchavy spol. s r.o.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Josef Laurin, CSc.**
Katedra vozidel a motorů

Datum zadání diplomové práce: **6. března 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **6. června 2016**

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 6. března 2015

Prohlášení

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 Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá způsoby prodlužování dojezdu elektrovozidel, a to především městských elektrobusů. Uvádí několik konkrétních příkladů dobíjení akumulátorů na trase během pobytu elektrobusu ve stanici nebo v průběhu jízdy. Dále se zabývá návrhem zdrojového soustrojí se spalovacím motorem na CNG pro průběžné dobíjení akumulátorů elektrobusu SOR. Návrh je na závěr zhodnocen z hlediska provozních parametrů, po ekonomické a ekologické stránce.

Klíčová slova

elektrovozidlo, elektrobus, akumulátory, dobíjení, generátorová jednotka, trakční elektrosoustava

Annotation

This thesis describes ways of extending the range of electric vehicles and especially urban electro buses. It shows several concrete examples of charging batteries on its route while being in bus stops or during the ride. Then it also describes suggestion of range extender with CNG piston engine for continuous charging of SOR electrobus battery. At the end, suggestion is reviewed in terms of operating parameters, economics and ecology.

Key words

electric vehicle, electrobus, batteries, charging, range extender, electric traction system

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu doc. Ing. Josefu Laurinovi CSc., za odborný dohled a cenné rady, dále panu Ing. Robertu Voženílkovi Ph.D. a Ing. Pavlu Jandurovi za poskytnuté konzultace, panu Ing. Janu Černému za poskytnuté materiály a především bych rád poděkoval celé mé rodině, která mě po celou dobu studia plně podporovala.

Děkuji Vám všem.

Obsah

Seznam zkratk, symbolů a jednotek	3
Seznam obrázků.....	5
Seznam tabulek.....	6
1 Úvod.....	7
2 Historie elektromobility.....	8
3 Lithium iontové akumulátory	9
3.1 Li-ion akumulátory vs. konvenční palivo	10
4 Elektromobilita v městské autobusové dopravě	11
5 Průběžné dobíjení	12
5.1 TOSA Charging system.....	12
5.2 Volvo opportunity charging system.....	12
5.3 Elektrobus Siemens/Rampini	13
5.4 Bombardier PRIMOVE	14
6 Range extender	15
6.1 Pístový spalovací motor s generátorem	15
6.2 Wankelův motor s generátorem	16
6.3 Lineární spalovací motor s generátorem	18
6.3.1 Funkční princip lineárního spalovacího motoru	19
6.4 Mikroturbína s generátorem	20
6.4.1 Zjednodušený popis funkčního principu mikroturbíny.....	21
6.4.2 Mikroturbína Capstone C30 a Capstone C65.....	21
6.5 Palivový článek	22
6.5.1 Zjednodušený popis funkčního principu palivového článku	23
6.5.2 Trihybus.....	24
6.6 Zhodnocení RE	25
7 Elektrobus SOR EBN 11.....	27
7.1 Akumulátory elektrobusu SOR EBN 11	27
7.2 Porovnání provozních parametrů	28
8 Volba RE	30
8.1 Jednoválcový RE od AVL.....	30
9 Přestavba pístového spalovacího motoru na pohon CNG.....	35
9.1 Příslušenství palivových systémů na CNG	35
9.2 Návrh komponentů pro přestavbu na CNG.....	37
10 Konstrukční řešení zástavby	42

11 Trakční elektrosoustava.....	45
11.1 Chlazení motoru.....	47
12 Zhodnocení	48
13 Závěr.....	52
14 Zdroje	53
Přílohy	55

Seznam zkratk, symbolů a jednotek

NMC/LTO	[-]	Li-ion akumulátor - katoda je tvořena sloučeninou niklu, hořčíku a kobaltu, anoda sloučeninou lithia a titanu
NMC/C	[-]	Li-ion akumulátor - katoda je tvořena sloučeninou niklu, hořčíku a kobaltu, anoda uhlíkem
LTO	[-]	Li-ion akumulátor s anodou ze sloučeniny lithia a titanu
AC	[-]	střídavý proud
DC	[-]	stejnosměrný proud
PSM	[-]	pístový spalovací motor
RE	[-]	range extender
CNG	[-]	stlačený zemní plyn
LPG	[-]	zkapalněný ropný plyn
PEMFC	[-]	nízkoteplotní palivový článek s polymerní protonově vodivou membránou
EŘJ	[-]	elektronická řídicí jednotka
V_{PL}	[dm ³]	objem náplně válce
η_{PL}	[%]	účinnost naplnění válce
n	[min ⁻¹]	otáčky motoru
V_{CNG}	[dm ³]	objem zemního plynu
$\dot{V}_{CNG}$	[dm ³ ·min ⁻¹]	objemová spotřeba zemního plynu
ρ_{CNG}	[kg·m ⁻³]	hustota zemního plynu
m_{CNG}	[kg]	hmotnost zemního plynu
$\dot{m}_{CNG}$	[kg·h ⁻¹]	hmotnostní spotřeba zemního plynu
H_{CNG}	[kWh·kg ⁻¹]	výhřevnost zemního plynu
m_r	[kg]	celková hmotnost rotačních hmot
m_{vr}	[kg]	hmotnost vývažku rotačních hmot
r	[mm]	poloměr kliky

r_{vr}	[mm]	vzdálenost vývažku od osy rotace
ω	[rad·s ⁻¹]	úhlová rychlost klikového hřídele
x	[mm]	poloha pístu PSM
l	[mm]	délka ojnice PSM
λ	[-]	klikový poměr, součinitel přebytku vzduchu
α	[rad]	poloha natočení klikového hřídele
β	[rad]	poloha natočení ojnice
v	[m·s ⁻¹]	rychlost přímočarého pohybu pístu
a	[m·s ⁻²]	zrychlení přímočarého pohybu pístu
F_p	[N]	setrvačné síly posuvných hmot
$F_I F_{II}$	[N]	setrvačné síly posuvných hmot prvního a druhého řádu
$m_{vp-1} m_{vp-2}$	[kg]	hmotnost vývažku posuvných hmot prvního řádu
$r_{vp-1} r_{vp-2}$	[mm]	vzdálenost vývažku posuvných hmot prvního řádu od osy rotace
r_{CNG}	[J·kg ⁻¹ K ⁻¹]	měrná plynová konstanta zemního plynu
τ	[s]	doba provozu
p	[MPa]	tlak zemního plynu
τ_o	[s]	doba otevření vefukovacího ventilu
Q_{chl}	[kW]	výkon chlazení
$\dot{m}_{chl}$	[kg·s ⁻¹]	průtok chladicí kapaliny
c_{p-ch}	[kJ·kg ⁻¹ K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita chladicí kapaliny
Δt	[K]	tepelný spád chladiče

Seznam obrázků

Obr. 1 Systém průběžného dobíjení TOSA [4].....	12
Obr. 2 Volvo 7900 v dobíjecí stanici [4]	13
Obr. 3 Průběžně dobíjený E-bus Siemens/Rampini [4].....	13
Obr. 4 Bombardier PRIMOVE [10].....	14
Obr. 5 RE od MAHLE [15]	15
Obr. 6 RE od AVL [18].....	16
Obr. 7 Audi A1 etron [20].....	17
Obr. 8 RE s Wankelovým motorem od AVL [19].....	18
Obr. 9 - rozdělení lineárních spalovacích motorů	19
Obr. 10 Lineární spalovací motor s generátorem - Toyota [13].....	20
Obr. 11 Tepelný oběh mikroturbíny [6]	22
Obr. 12 Mikroturbína Capstone C30 [23]	23
Obr. 13 Schéma palivového článku s polymerní protonově vodivou membránou [22]	23
Obr. 14 Palivočlánkový autobus – Trihybus [21].....	24
Obr. 15 Charakteristika akumulátoru WBLYP- 300AH [16].....	28
Obr. 16 RE od AVL [18].....	31
Obr. 17 - klikový mechanismus PSM.....	32
Obr. 18 Schéma vyvažovacího mechanismu	33
Obr. 19 Vyvažovací mechanismus posuvných hmot [18].....	34
Obr. 20 Střešní nosič vysokotlakých nádob pro autobus SOR s pohonem na CNG	37
Obr. 21 Upravený střešní nosič vysokotlakých nádob pro CNG.....	38
Obr. 22 Upevnění vysokotlakých nádob pro CNG na upraveném střešním nosiči.....	38
Obr. 23 Vysokotlaké nádoby pro CNG na střešním nosiči spolu s rámem pro upevnění laminátové kapotáže.....	39
Obr. 24 Celková podoba střešní nástavby s vysokotlakými nádobami pro CNG včetně laminátové kapotáže	39
Obr. 25 Regulátor tlaku - Landi Renzo [17]	40
Obr. 26 Vefukovací ventil CNG - Delphi [17].....	41
Obr. 27 Řez vefukovacím ventilem na CNG [17]	41
Obr. 28 Blokové schéma palivového systému na CNG	42
Obr. 29 Bateriový box elektrobusu SOR EBN 11.....	43

Obr. 30 Rám k upevnění RE	44
Obr. 31 Upevněný RE v rámu	44
Obr. 32 Zástavba RE do elektrobusu SOR EBN 11	45
Obr. 33 Schéma trakční elektrosoustavy elektrobusu SOR s RE.....	46
Obr. 34 Střešní nástavba s kapalinovým chladičem	47

Seznam tabulek

Tab. 1 Porovnání potenciální a užité energie Li-ion akumulátorů a běžných paliv	10
Tab. 2 Parametry RE od MAHLE [15].....	15
Tab. 3 Parametry RE od AVL [18]	16
Tab. 4 Parametry RE od AVL s Wankelovým motorem [19, 20].....	18
Tab. 5 Parametry mikroturbíny C30 a C65 [23]	22
Tab. 6 Parametry Li-ion akumulátoru WB-LYP300AHA [16]	27
Tab. 7 Porovnání provozních parametrů vybraných elektrobusů [4]	29
Tab. 8 Parametry regulátoru NG2-8 [17]	40
Tab. 9 Přibližná hmotnost RE i s veškerým příslušenstvím.....	49
Tab. 10 Porovnání ceny jednoho vozokilometru elektrobusu a autobusu s pohonem na naftu a zemní plyn	49
Tab. 11 Pořizovací a provozní náklady elektrobusu a autobusu s pohonem na naftu a zemní plyn	50
Tab. 12 Pořizovací a provozní náklady pro elektrobus SOR EBN 11 s RE na zemní plyn	50

1 Úvod

Mnozí lidé, a to i z řad odborníků, považují elektromobilitu za způsob přepravy budoucnosti. V současné době se ale elektromobilita stále potýká s problémem, jak efektivně uskladnit dostatečné množství elektrické energie. Akumulátory, ač při ohlédnutí do historie dostaly velkých změn, jsou schopny uskladnit větší množství energie, mají větší životnost atd., stále zcela nesplňují požadavky na ně kladené.

V teoretické části diplomové práce o této problematice pojednávám v souvislosti s provozem městských elektrobusů. Elektrobusy poskytovaná dopravní obslužnost je v tomto případě přijatelná, ovšem standardně nedosahuje požadavků, které jsou kladeny na běžné městské autobusy. Mnoho firem se tak zabývá způsoby, jak tyto rozdíly vykompenzovat případně eliminovat. Zásadním problémem elektrobusů je dostatečná dojezdová vzdálenost při rozumné hmotnosti použitých akumulátorů. Řešením může být průběžné dobíjení na provozované trase nebo zástavba malé generátorové jednotky přímo do elektrobusu. Oběma těmito variantami se práce zabývá, a v praktické části diplomové práce řeším návrh generátorové jednotky, neboli range extender, pro elektrobus SOR EBN 11, a úpravu pro provoz na zemní plyn včetně zástavby do vozidla.

Je důležité si uvědomit, že provoz elektrobusů, resp. všech elektrovozidel, má svůj význam, neboť přispívají ke snížení jak lokální, tak globální produkce výfukových plynů a k celkovému snížení energetické náročnosti přepravy. Platí to i v případě hybridních kombinací, jako jsou sériově hybridní nebo paralelně hybridní pohony na naftu, benzín, případně zemní plyn.

2 Historie elektromobility

Prvopočátky vozidel využívající k pohybu elektrickou energii jsou datovány již od počátku 19. století. První známý elektromobil byl sestaven holandským profesorem Sibrandusem Stratinghem a jeho asistentem Christopherem Beckerem již roku 1835, tedy přibližně 50 let před prvním automobilem se spalovacím motorem. Na přelomu 19. a 20. století se těšil elektromobil velké oblibě a v Americe byl rozšířenější než automobil se spalovacím motorem. Elektromobil v porovnání s jeho benzínovým protějškem byl jednodušší konstrukce, snáze se obsluhoval, nekouřil a měl tichý chod, ovšem olověné akumulátory jako zdroj energie byly choulostivé, s omezenou životností, těžké a umožňovaly pouze malý dojezd. Tento zásadní nedostatek byl příčinou, proč elektromobil neobstál vůči konkurenci se spalovacím motorem. [1]

O prosazení automobilu s benzínovým motorem se ve velké míře zasloužil americký konstruktér Henry Ford, když jako vůbec první zavedl roku 1908 sériově vyráběný a tedy finančně dostupný automobil poháněný spalovacím motorem, Ford T. Od té doby mají vozidla se spalovacím motorem dominantní postavení, ovšem ani elektromobily nezůstaly bez povšimnutí. Elektromobilita se také dále uplatňovala a rozvíjela v oblastech, kde např. není vyžadováno velkých dojezdových vzdáleností, jsou požadovány nízké emise, nebo bylo možné nahradit akumulátory pevným trakčním vedením.

Vývoj akumulátorů ušel od počátku 19. století velký kus cesty, v dnešní době tak disponují větší kapacitou a vyšší životností. Příznivému vývoji ohledně akumulátorů ve velké míře pomohlo masivní rozšíření mobilních zařízení, jako jsou mobilní telefony, notebooky, tablety atd. V elektromobilitě se tak dnes, podobně jako ve výše zmíněných mobilních zařízeních, ve velké míře uplatňují akumulátory Lithium iontové, neboli Li-ion akumulátory.

3 Lithium iontové akumulátory

Li-ion akumulátor je obecný název pro akumulátory, ve kterých dochází během vybíjení a nabíjení k pohybu Lithiových iontů – kationtů. Vlastnosti Li-ion akumulátorů se liší v závislosti na použitém elektrolytu, materiálovém složení a struktuře elektrod.

Elektrolyt:

- kapalný
- gelový
- polymerový

Kladná elektroda:

- kobalt
- nikl
- mangan
- vanad
- titan
- niob
- železo-fosfát
- železo-ytrium-fosfát

Záporná elektroda:

- především různé formy uhlíku
- další materiály jako například sloučenina lithia a titanu

V nabídce výrobců se tak lze například setkat s dělením na:

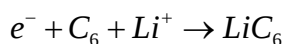
- základní výrobní řady
- řady se zvýšenou kapacitou
- řady pro velké vybíjecí proudy
- speciální řady pro extrémní výkonové zatížení
- řady pro trvalé dobíjení

Li-ion akumulátory se mohou lišit deklarovaným jmenovitým napětím, jmenovitou kapacitou a životností. Obecně lze říci, že Li-ion akumulátory disponují relativně vysokou proudovou hustotou, dobrou životností a malým samovybíjením. Nevýhodou je stárnutí baterií, postupné snižování maximální možné kapacity, a to bez ohledu na používání. [2]

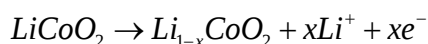
Princip Li-on akumulátoru je vysvětlen na příkladu, kde je anoda vyrobena z uhlíku, katoda je oxidem kovu a elektrolyt tvoří lithiová sůl v organickém rozpouštědle.

Nabíjení:

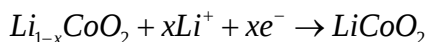
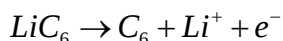
na anodě tvořené uhlíkem dochází k redukci:



na katodě k oxidaci:



Vybíjení:



Z předchozích rovnic vyplývá, že elektrolyt nezasahuje do proudotvorných reakcí a plní pouze funkci iontového vodiče. Proto Li-ion akumulátory potřebují pouze velmi malé množství elektrolytu. Tato skutečnost se výraznou měrou podílí na vysoké měrné energii Li-ion akumulátorů (např. na rozdíl od olověných akumulátorů). [3]

3.1 Li-ion akumulátory vs. konvenční palivo

Výzkumné centrum automobilového průmyslu, na základě iniciativy Flanders' DRIVE, hodnotilo Li-ion akumulátory z hlediska kapacity, ceny, životnosti, výkonu, bezpečnosti a dobíjení.

Z hlediska výkonu, životnosti a bezpečnosti byly nejlépe hodnoceny akumulátory NMC/LTO. Katoda tohoto akumulátoru je tvořena sloučeninou niklu, hořčíku a kobaltu, anoda sloučeninou lithia a titanu. Nevýhodou těchto akumulátorů je vysoká pořizovací cena a menší kapacita.

Naproti tomu akumulátory NMC/C disponují relativně vysokou kapacitou a lze je považovat za výhodný kompromis všech klíčových vlastností. Katoda tohoto akumulátoru je opět tvořena sloučeninou niklu, hořčíku a kobaltu, ale anodu tvoří uhlík.

V následující tabulce je porovnání potenciální a užité energie vybraných Li-ion akumulátorů a běžných paliv motorových vozidel. Vycházím z předpokladu že k přeměně potenciální energie (výhřevnost paliva, elektrická energie uskladněná v akumulátoru) na užitou (mechanickou energii) dochází tak, jak je ve vozidlech běžné.

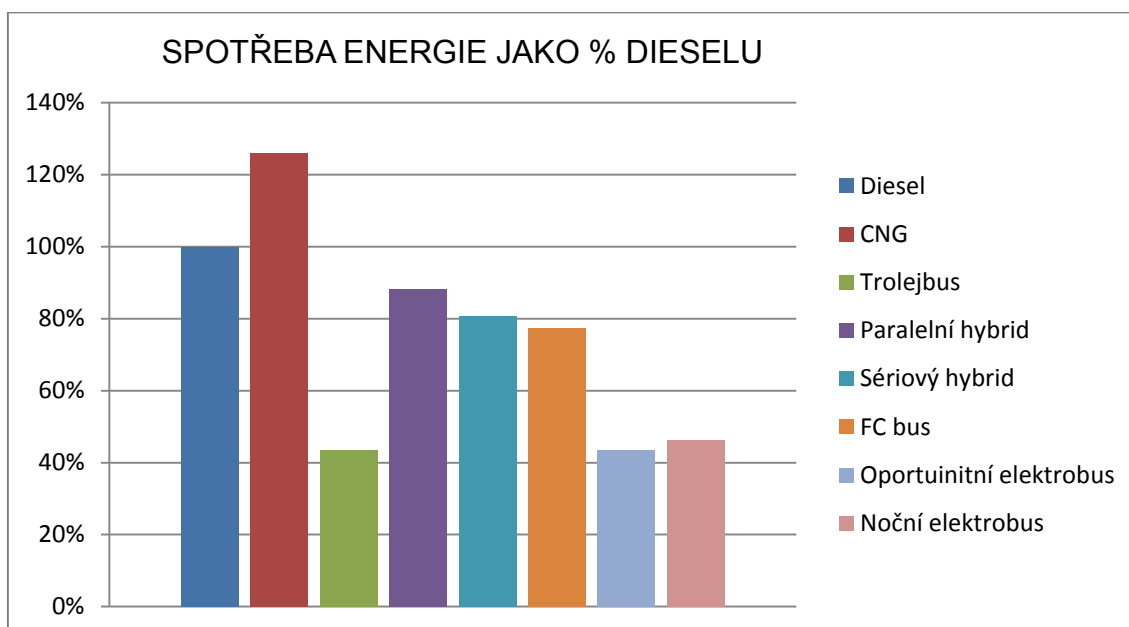
	Potenciální energie/kg	Účinnost motoru	Užitná energie/kg
Benzin	12.1 kWh·kg ⁻¹	33%	3 991 Wh·kg ⁻¹
Nafta	11.8 kWh·kg ⁻¹	45%	5 310 Wh·kg ⁻¹
LPG	12.8 kWh·kg ⁻¹	30%	3 840 Wh·kg ⁻¹
LTO/NMC	70-80 Wh·kg ⁻¹	80%	56-64 Wh·kg ⁻¹
C/NMC	150-220 Wh·kg ⁻¹	80%	120-176 Wh·kg ⁻¹

Tab. 1 Porovnání potenciální a užité energie Li-ion akumulátorů a běžných paliv

Z výše uvedeného je zřejmé, že ani dnes nedisponují akumulátory takovou „kapacitou“ jako konvenční paliva. Ovšem to neznamená, že by elektromobilita neměla svůj význam.

4 Elektromobilita v městské autobusové dopravě

Elektrický pohon je, jak z lokálního hlediska, tak z globálního hlediska, se zohledněním výroby energie, nejekologičtější. Relativně příznivé jsou i diesel-hybridní kombinace, ať už v sériovém, či paralelním uspořádání. Využití elektrických autobusů v městské hromadné dopravě tak představuje potenciál, jak snížit produkci lokálních i globálních emisí, a také potenciál k celkové úspoře energie viz. Graf 1. [4]



Graf 1 Průměrná spotřeba energie jako % dieselu v roce 2012 [11]

Pokud budeme hovořit o klasickém elektrobuse, disponují tato vozidla v současné době dojezdem na jedno nabití přibližně 150 až 180 km, ovšem denní proběh autobusů se pohybuje okolo 250 až 300 km. Pouze jediný výrobce nabízí městský elektrobuses s dojezdem až 250 km na jedno nabití. Jedná se o 12 m elektrobuses BYD s celkovou kapacitou akumulátorů 324 kWh. Velká dojezdová vzdálenost je vykoupena velkým zástavbovým prostorem pro akumulátory, velkou hmotností akumulátorů a tedy relativně malou obsaditelností a vyššími provozními náklady. Kapacita cestujících elektrobusesu BYD je pouhých 68 osob, pro srovnání kapacita klasického 12m autobusesu je přibližně 100 osob. [4]

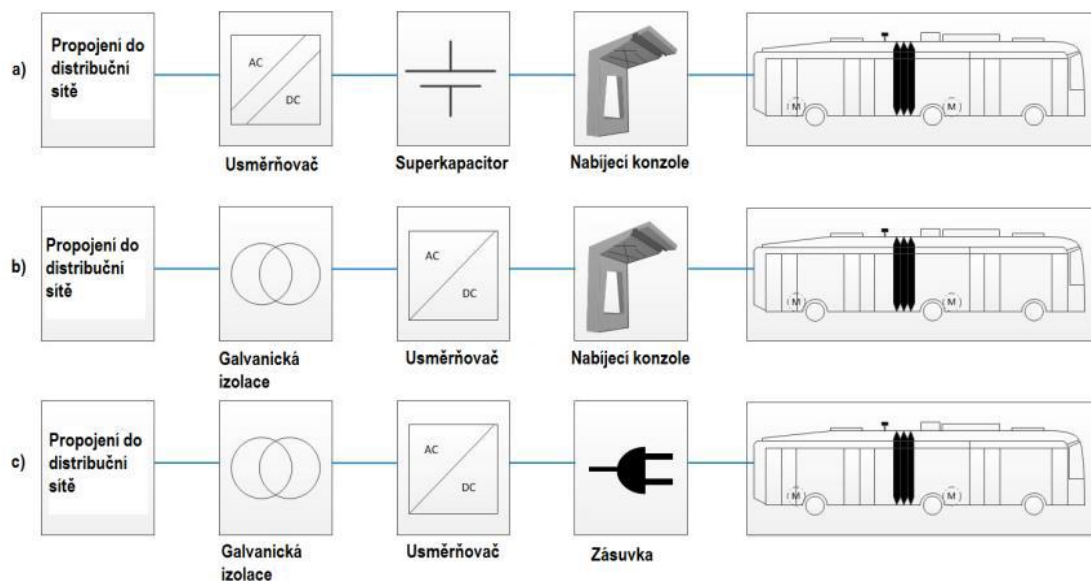
Zástavba větších a těžších akumulátorů za účelem zvýšení maximální dojezdové vzdálenosti tedy není efektivní a výrobci elektrobusesů i dopravní podniky si toho jsou vědomi. Výhodnějším řešením je instalace dobíjecích stanic na trase elektrobusesu k částečnému, nebo i plnému dobití akumulátorů během provozu.

5 Průběžné dobíjení

Již dnes je v nabídce řada zajímavých a potenciálně výhodných systémů průběžného dobíjení elektrobuseů a neustále vznikají další. Dále uvádím jen příklad několika již dostupných řešení.

5.1 TOSA Charging system

Jedná se o kombinovaný nabíjecí systém vyvinutý společností ABB o výkonu 50/200/400 kW, který umožňuje dobíjení trakčních akumulátorů ve vybraných stanicích na trase, v cílové stanici, a v depu během odstávky. [4, 8]



Obr. 1 Systém průběžného dobíjení TOSA [4]

Trakční akumulátory LTO disponují kapacitou 40 kWh. Dobíjení na trase a v cílové stanici je samoobslužné, vybrané stanice jsou vybaveny dobíjecí konzolí, naproti tomu elektrobuse je vybaven laserem naváděným robotickým ramenem, vzájemná komunikace mezi konzolí a elektrobusem je zajištěna GPS. Po připojení robotického ramene do konzole dojde k přenosu energie. Nabíjení na trase pak probíhá výkonem 400 kW, tzv. flash trvá pouhých 15 s, nabíjení v cílové stanici probíhá při polovičním výkonu 200 kW po dobu 3 až 4 minut a nabíjení během odstávky v depu probíhá ze zásuvky výkonem 50 kW po dobu 45 minut. [4, 8]

5.2 Volvo opportunity charging system

Automatizovaný systém dobíjení vyvinutý ve spolupráci firmy Siemens a Volvo představuje dobíjecí stanice se speciálním výsuvným pantografem, který se během dobíjení zasune do kolejnic na střeše vozidla. Tato dobíjecí stanice je obvykle umístěna na konečné stanici. Před začátkem dobíjení je autobus uzemněn. Přesné navádění obstarává wifi systém. Dobíjení probíhá proudem až 400 A při 750 V. [4]

Zajímavostí je, že Volvo tento systém aplikovalo na svůj paralelně hybridní autobus Volvo 7900 plugin hybrid. [4]



Obr. 2 Volvo 7900 v dobíjecí stanici [4]

5.3 Elektrobuses Siemens/Rampini

Společnost Siemens ve spolupráci s výrobcem autobusů Rampini vyvinula elektrobuses vybavený sběračem proudu podobným, jako jsou vybaveny trolejbusy. Ten mu umožňuje průběžné dobíjení během odstávek z dvoustopého trakčního vedení na trolejbusových nebo tramvajových tratích. [4]



Obr. 3 Průběžně dobíjený E-bus Siemens/Rampini [4]

Trakční akumulátory u zmíněného elektrobuse jsou Lithium-Feritické s kapacitou 96 kWh a dojezd elektrobuse na jedno nabití se pohybuje od 100 do 150 km. Průběžné rychlodobíjení probíhá přibližně 600 V a 95 A po dobu 15 až 20 minut, resp. 1 minuta nabíjení odpovídá přibližně 1% dobité kapacity. Výhodou tohoto technického řešení je využití již existující infrastruktury trolejbusové, případně tramvajové trati a nevyžaduje tak výstavbu další specifické infrastruktury určené k průběžnému dobíjení elektrobuse. Nevýhodou jsou, z důvodu bezpečnosti, vyšší nároky kladené na elektroinstalaci ve vozidle, a také skutečnost, že ve městech bez dvoustopého trakčního vedení je toto řešení nepoužitelné. [4]

5.4 Bombardier PRIMOVE

Uvedená řešení průběžného dobíjení měla, krom jiného, jednu společnou nevýhodu, a to mechanicky složité přípojné zařízení, která se mohou v průběhu používání projevovat svou poruchovostí.

Bombardier PRIMOVE je systém průběžného indukčního dobíjení, který je k dispozici napříč platformami, nyní i pro 12 m městský autobus. Systém tvoří pevná a vozidlová část dobíjecího zařízení včetně nově vyvinutých trakčních baterií PRIMOVE. Základem pevné části je primární vinutí, v němž vzniká elektromagnetické pole a je instalované těsně pod povrchem vozovky ve vybraných stanicích. Pevnou část dále tvoří DC napájecí kabely a měniče na střídavé napětí primárního vinutí, systém SCADA pro řízení a diagnostiku dobíjecí stanice a systém detekce vozidla, neboť pevná část je zapnutá pouze během dobíjení.

Naproti tomu vozidlovou část tvoří sběrnice na spodku vozidla a s kompenzačním kondenzátorem slouží k přeměně elektromagnetického pole primárního vinutí pevné části na střídavý proud. Dále navazuje měnič, který transformuje střídavý proud na stejnosměrný proud pro dobíjení baterií. Dobíjením lze přenášet výkon až 200 kW. Vozidlová část je doplněna ještě detekčním systémem, který zajišťuje komunikaci s pevnou částí a koordinuje její zapnutí a vypnutí. [10]



Obr. 4 Bombardier PRIMOVE [10]

Ukrytí pevné části pod povrchem vozovky minimalizuje její opotřebení a poruchovost v důsledku klimatických vlivů i vandalismu. Za předpokladu promyšleného rozmístění dobíjecích stanic ve frekventovaných přestupních uzlech tak, aby je bylo možno využít pro co nejvíce vozidel, se může jednat o celkově efektivní řešení.

Je evidentní, že trend bezdrátového nabíjení zasáhl i oblast E-mobility. Diskutabilní by ovšem mohla být bezpečnost tohoto provedení pro pasažéry se slabou srdeční funkcí, užívající kardiostimulátor. Těmto lidem se obecně nedoporučuje ani manipulace s obyčejnými permanentními magnety.

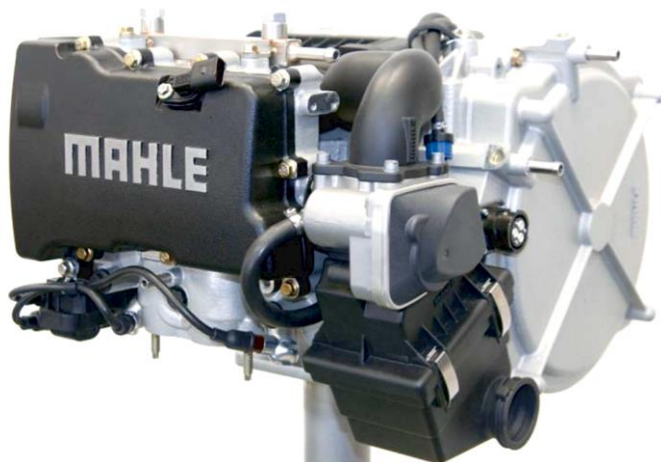
6 Range extender

Range extender (dále pouze RE), neboli malá generátorová jednotka, je další možností, jak prodloužit maximální dojezdovou vzdálenost elektrobuse. Obvykle se jedná o soustrojí tepelného stroje a elektrického generátoru. V dnešní době je na trhu několik technických řešení RE, každé disponuje jistými výhodami a nedostatky.

6.1 Pístový spalovací motor s generátorem

Pístové spalovací motory netřeba hlouběji představovat, neboť jejich princip je obecně dobře znám. Kombinace spalovacího motoru s elektrickým generátorem je pro malé generátorové jednotky s relativně malým výkonem typické. Podobně tomu je i v případě RE. V dnešní době je na trhu mnoho firem které se zabývají vývojem a prodejem RE s pístovým spalovacím motorem. Nabízí se také individuální řešení problému, kdy je pro potřeby navýšení dojezdové vzdálenosti elektromobilu, elektrobuse a podobně, použita kombinace samostatného motoru a samostatného generátoru.

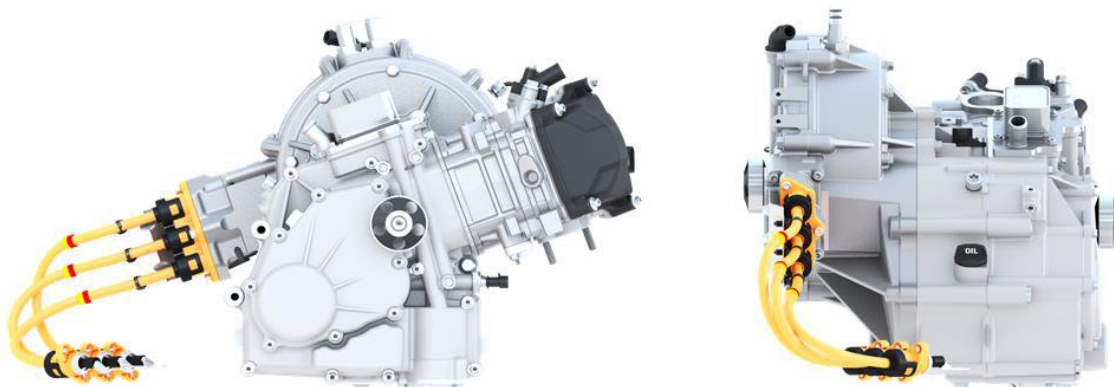
Vývojem a distribucí kompaktních RE se zabývají například MAHLE a AVL.



Obr. 5 RE od MAHLE [15]

MAHLE	
Motor	čtyřdobý, benzínový
Počet válců	2 v řadě
Objem	900 cm ³
Maximální výkon	30 kW při 4000 min ⁻¹
Spotřeba paliva	minimum 240 g.kWh ⁻¹
Emise	splňuje Euro 6*
El. generátor	synchronní s permanentními magnety
Nominální napětí	320 V
Rozměry	327 x 416 x 481 mm
Úhel Instalace	vertikální nebo horizontální
Hmotnost motoru včetně generátoru	70 kg

Tab. 2 Parametry RE od MAHLE [15]



Obr. 6 RE od AVL [18]

AVL	
Motor	čtyřdobý, benzínový
Počet válců	1
Objem	430 cm ³
Maximální výkon	28 kW při 6000 min ⁻¹
Emise	splňuje Euro 6*
El. generátor	synchronní s permanentními magnety
Nominální napětí	320-420 V
Rozměry	470 x 356 x 386 mm
Hmotnost motoru včetně generátoru	40 kg

Tab. 3 Parametry RE od AVL [18]

**Motory dle katalogu výrobce odpovídají podmínkám Euro 6. Pravdivost této informace je však dosti diskutabilní, neboť tento předpis vztahuje produkci emisí na km provozu. Tedy pokud uvedený RE splňuje předpis Euro 6, tak za jakých podmínek?*

6.2 Wankelův motor s generátorem

Na úvod bych rád upřesnil, že pod pojmem Wankelův motor je myšlen motor s rotujícím pístem, který byl prvně sestaven v roce 1958.

Konstrukce Wankelova motoru, motoru s rotujícím pístem je velmi jednoduchá, neboť neobsahuje žádné ventily, ani vačkového hřídele, pouze sací a výfukové kanály. Píst má podobu konvexního trojúhelníku, který excentricky rotuje okolo hřídele. Vrcholy pístu jsou stále v kontaktu s povrchem pracovního prostoru, který tvoří křivka - epitrochoida. Tak vznikají tři oddělené prostory a za chodu v každém probíhá právě jedna fáze čtyřtakového cyklu. Za jedno otočení pístu, tak motor vykoná tři pracovní fáze. O hladký pohyb pístu je postaráno vnitřním ozubením, které se odvaluje po pevném pastorku upevněném na bloku motoru. Výstupní hřídel je pro každý píst opatřen excentrickou vačkou, ta převádí excentrický rotační pohyb pístu na rotační pohyb hřídele. Hřídel se otočí za jednu otáčku pístu třikrát.

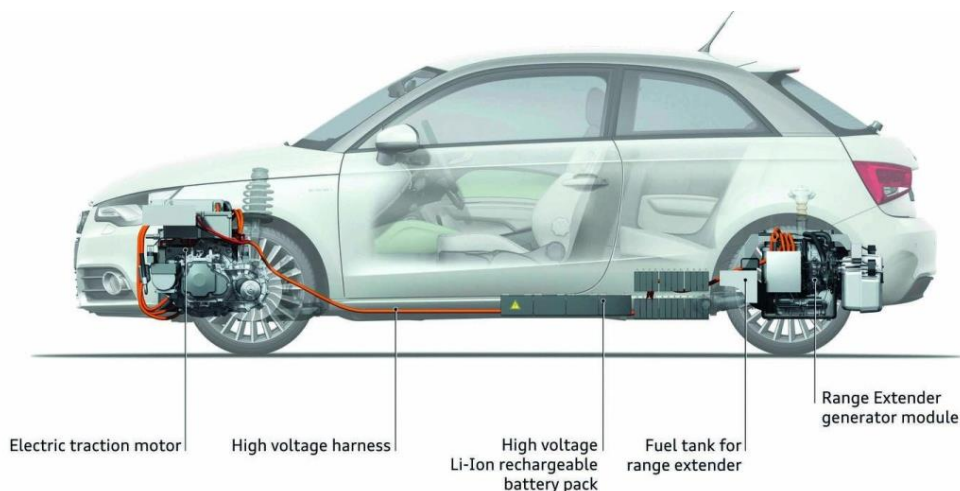
Na první pohled zajímavé technické řešení trpí několika klíčovými nedostatky. Zásadním problémem je nižší životnost. Motory Wankel se od začátku své existence potýkají s problémy těsnění vrcholů pístu, které se velmi rychle opotřebovávalo. Motor

tak ztratil kompresi a docházelo k profukům mezi jednotlivými komorami. Tento nedostatek se podařilo postupem času zmírnit, nicméně životnost Wankelova motoru stále nedosahuje životnosti klasického 4-taktního motoru.

Wankel také nedisponuje efektivitou jako 4-taktní pístový motor, vykazuje vyšší spotřebu paliva a vyšší produkci emisí. Na vině je tvar spalovacího prostoru, menší kompresní poměr a problematické chlazení. V dlouhém a úzkém prostoru je hoření směsi podstatně složitější než ve válcovém prostoru pístového motoru. Menší kompresní poměr je dán tvarem pístu a pracovního prostoru. Problematické chlazení je způsobeno nerovnoměrným tepelným zatížením pracovního prostoru. Oblast v místě sání je neustále ochlazována a naopak v oblasti svíčky a výfuku dochází k neustálému ohřevu. V pracovním prostoru také nedochází k profukování při výměně náplně tak, jako u pístových motorů.

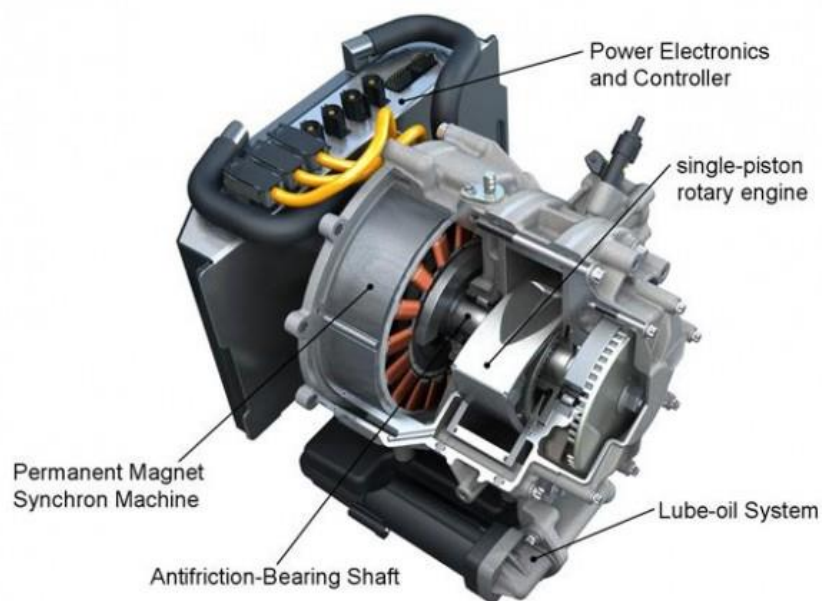
Na druhou stranu Wankelův motor disponuje řadou předností. Především jednoduchou konstrukcí a hladkým chodem. Ten umožňuje dosažení vyšších provozních otáček. Motor je také díky své kompaktní konstrukci menší a lehčí než pístové motory. Z tohoto úhlu pohledu se tedy zdá být zajímavým řešením coby RE pro elektromobily a podobně.

V roce 2010 se tak RE s Wankelovým motorem objevil v konceptu Audi A1 etron. Malý automobil do městského provozu disponoval Li-ion akumulátory o kapacitě 12 kWh, které samy o sobě umožňovaly dojezd automobilu na jedno nabití pouhých 50 km. Spolu s RE v podobě Wankelova motoru ale dosahoval dojezdové vzdálenosti až 250 km, a to se spotřebou 1,9 l na 100 km. [20]



Obr. 7 Audi A1 etron [20]

RE s Wankelovým motorem vyvinula firma AVL. Kompaktní generátorová jednotka byla tvořena motorem s jedním rotujícím pístem a synchronním generátorem s permanentními magnety. Tato jednotka byla jako součást celého zástavbového modulu s kompletním příslušenstvím, včetně palivové nádrže, umístěna do zadní části vozidla.



Obr. 8 RE s Wankelovým motorem od AVL [19]

	AVL
Motor	Wankel
Pracovní komory	1
Objem	254 cm ³
Výkon motoru	18 kW při 5000 min ⁻¹
Spotřeba	275 g·kWh ⁻¹
Emise	splňuje Euro 6*
Hluk	65 dB
El. generátor	synchronní s permanentními magnety
Nominální napětí	320-420 V
Výkon generátoru	15 kW
Hmotnost motoru včetně generátoru	29 kg

Tab. 4 Parametry RE od AVL s Wankelovým motorem [19, 20]

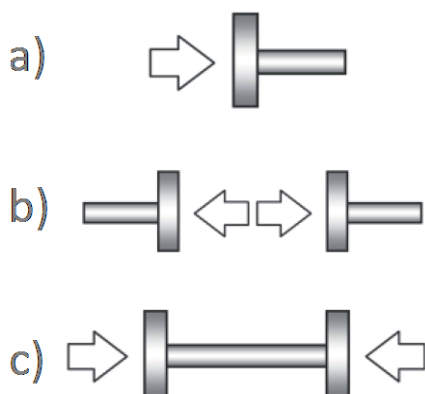
Audi A1 e-tron s Wankelovým motorem se doposavad nezačalo vyrábět. Vzhledem k problematickým vlastnostem tohoto motoru není záhadou, že zůstalo pouze u konceptu. Dle dostupných informací nedošlo ani k žádné masové produkci zmíněného RE ze strany samotné AVL. Na místo toho firma AVL vyvinula ve spolupráci s firmou Rotax RE s klasickým jednoválcovým pístovým spalovacím motorem.

6.3 Lineární spalovací motor s generátorem

Lineární spalovací motory s generátorem jsou v současné době ve vývojové fázi a vyjma pár prototypů doposavad nevznikla žádná funkční aplikace. Uvádím je tedy pouze pro úplnost, jako zajímavost, nikoliv jako dostupné technické řešení prodloužení dojezdové vzdálenosti bateriových elektrovozidel.

6.3.1 Funkční princip lineárního spalovacího motoru

Lineární spalovací motor může mít více podob. Vždy jej tvoří píst s permanentními magnety a motorový blok se statorovým vinutím. Zasouváním a vysouváním permanentních magnetů je ve statorovém vinutí dle zákona elektromagnetické indukce indikován proud. Lineární spalovací motory nedisponují setrvačnickem, při každém vratném pohybu pístu tak musí dojít k expanzi. Z tohoto důvodu pracují lineární spalovací motory ve dvoudobém režimu. Čtyřdobé provedení je teoreticky možné, ale výrazně složitější, a dle dostupných informací nebyl takovýto motor doposavad sestaven.

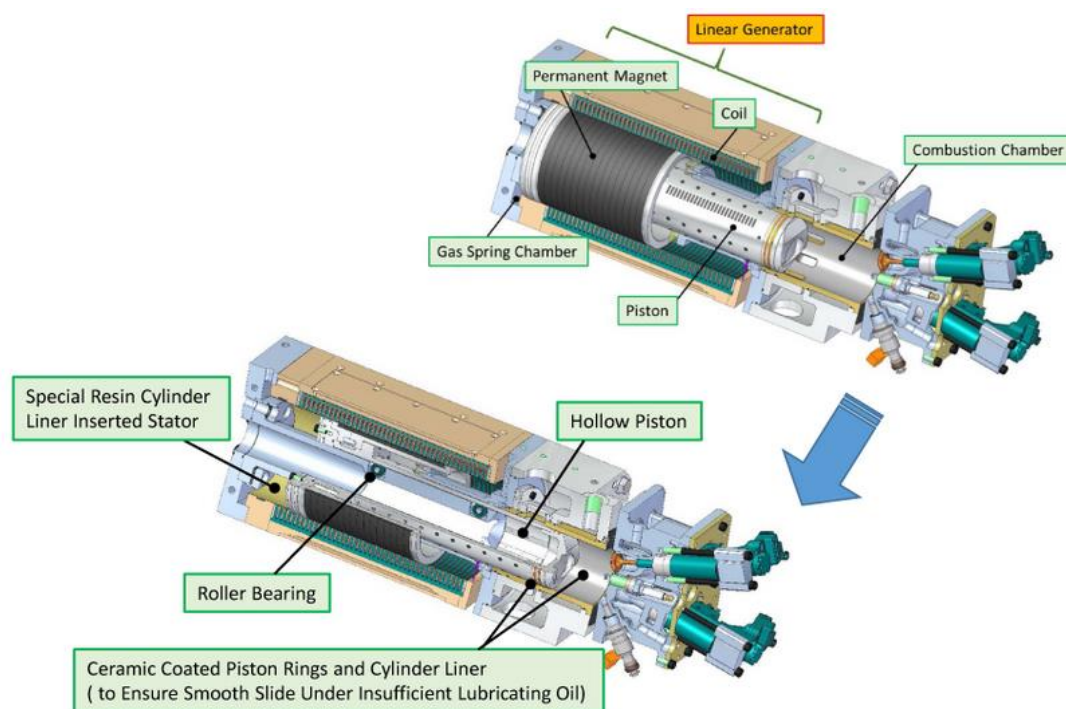


Obr. 9

Lineární motory mohou pracovat s jedním jednoduchým pístem, s dvěma jednoduchými protilehlými písty a s dvojčinným pístem viz Obr. 9. Varianty a) b) vyžadují pro vratný pohyb pístu opakovanou přeměnu kinetické a potenciální energie tak, aby píst v dolní úvrati měl dostatek energie ke kompresi a mohl dosáhnout horní úvrati. U varianty c) s dvojčinným pístem dochází při expanzi v jedné spalovací komoře, ke kompresi v druhé, protilehlé komoře.

Velkým problémem lineárních spalovacích motorů bylo udržet je dlouhodobě v chodu. První myšlenka lineárního motoru je známa už od roku 1971, ovšem až s příchodem a rozvojem mechatroniky bylo reálné se touto myšlenkou zabírat. Absence setrvačnicku znamenala, že pokud nedošlo k zážehu palivové směsi a motor takzvaně vynechal, došlo okamžitě k jeho zastavení. Tímto problémem se dlouhodobě zabýval tým docenta Ondřeje Vysokého z ČVUT, který vyvinul funkční prototyp lineárního spalovacího motoru s dvojčinným pístem a "virtuálním setrvačnickem". Motor je jím řízen s přesností na setiny rychlostí 10 000 výpočtů za sekundu. [12]

Vývoj RE v podobě lineárního spalovacího motoru - generátoru představila na jaře roku 2014 automobilka Toyota - Obr. 10. V jejím podání se jedná o lineární motor s jedním jednoduchým pístem. Vratný pohyb pístu je zajištěn pneumatickou pružinou ve spodní části motoru. Tuhost pružiny lze řídit dle potřeby tlakovým ventilem. [13]



Obr. 10 Lineární spalovací motor s generátorem - Toyota [13]

6.4 Mikroturbína s generátorem

Mikroturbínou se rozumí malá spalovací turbína, která spolu s elektrickým generátorem tvoří generátorovou jednotku. Elektrický generátor je s turbínou obvykle spojen napřímo, bez mechanického převodu. Z důvodu vysokých provozních otáček mikroturbíny se používají vysokorychlostní generátory, které jsou pro provoz ve vysokých otáčkách přímo konstruovány. Absence převodového ústrojí znamená podstatné zjednodušení celého soustrojí. Jediným pohyblivým dílem soustrojí tak může být hřídel s kompresorovým a turbínovým kolem a s rotorem generátoru. Hřídel bývá usazen ve vzduchem mazaných ložiskách, které jsou určeny k provozu ve vysokých otáčkách, až do $120\,000\text{ min}^{-1}$, a nevyžadují mazání olejem nebo tukem. Jednoduchá konstrukce a absence olejového hospodářství je příznivá z pohledu údržby, hmotnosti zástavbových rozměrů atd.

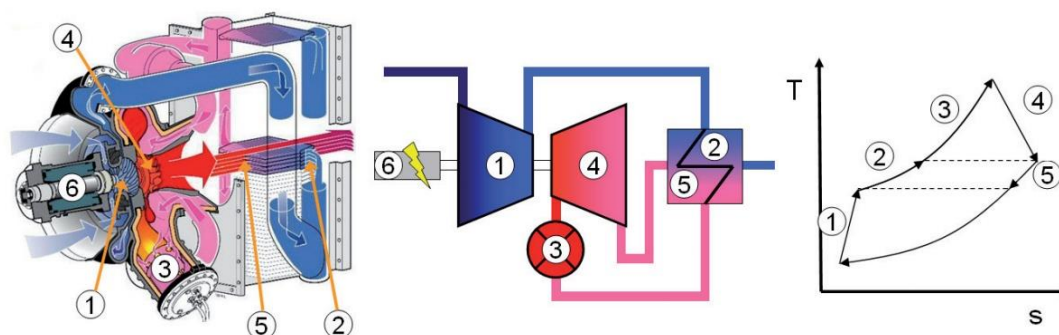
Mikroturbína může spalovat jak plynná (CNG, LPG, bioplyn), tak kapalná paliva (nafta, petrolej). Spalování je kontinuální s minimální produkcí škodlivých plynů jako CO a NO_x. Další výhodou je hladký a vyvážený chod, v případě mobilní aplikace jako je elektrobuses tak mikroturbína neovlivňuje cestovní komfort z hlediska vibrací.

Nevýhodou je vyšší cena za kW výkonu, která se pohybuje přibližně v rozsahu 700 až 850 €/kW. Příčinou je nízká poptávka, například v roce 2010 bylo vyrobeno pouze 800 jednotek s výkonem nižším jak 100 kW. [6, 7]

6.4.1 Zjednodušený popis funkčního principu mikroturbíny

Mikroturbína pracuje s otevřeným tepelným okruhem. Soustrojí je nejprve roztočeno startérem, kompresor začne stlačovat nasávaný vzduch do spalovací komory, kam je pod tlakem přiváděno i palivo. Směs paliva a vzduchu je jednorázově elektricky zapálena, hoření dále probíhá kontinuálně. Hořením se zvětšuje objem a dochází k expanzi, expandující spaliny roztáčí oběžné kolo turbíny. Po velmi krátkém čase je hoření stabilizováno. Mikroturbína disponuje určitým rozsahem pracovních otáček, které lze regulovat množstvím paliva. [6, 7]

Účinnost soustrojí mikroturbíny lze zvýšit zavedením rekuperace tepla, kdy je v tepelném výměníku odpadní teplo vzniklých spalin využito k předehřevu vzduchu před samotným spalováním. [6, 7]



Obr. 11 Tepelný oběh mikroturbíny [6]

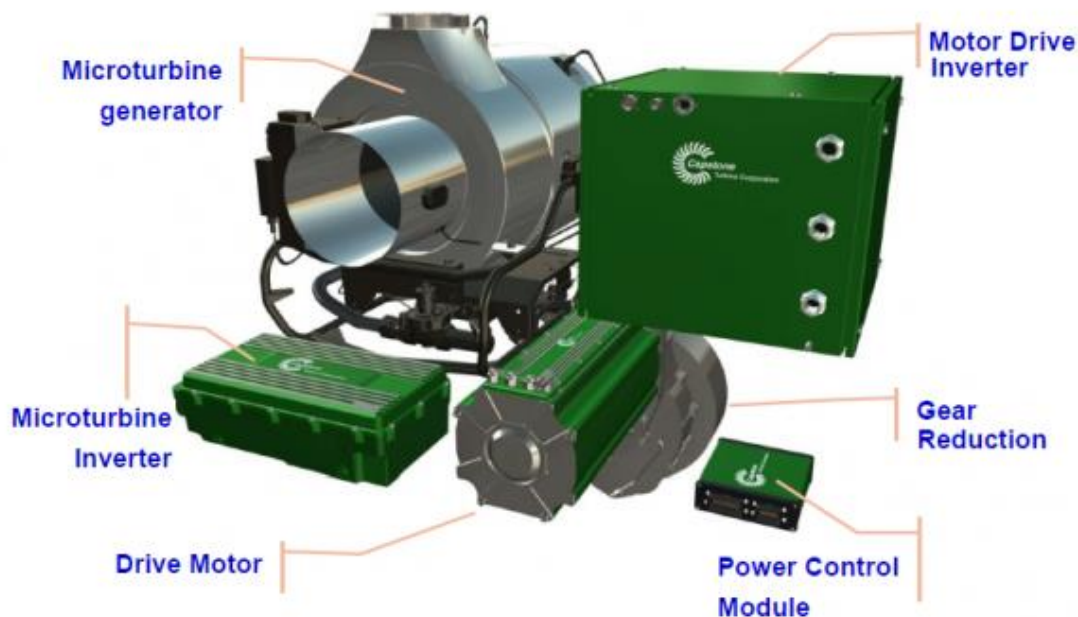
Ovšem i v případě použití rekuperace tepla, dosahují mikroturbíny obecně nižší tepelné účinnosti než klasické pístové spalovací motory. Tato vlastnost je dána charakteristikou pracovního diagramu, kde kompresor mikroturbíny dosahuje daleko nižší komprese než pístové motory.

Neznámou veličinou je bohužel životnost mikroturbín coby RE, neboť zkušenosti z provozu v mobilních aplikacích jsou minimální. Garantovaná životnost stacionárních mikroturbín, v malých kogeneračních jednotkách, bývá s pravidelným servisem cca po 8 000 hodin, cca 80 000 hodin [6]. Lze však předpokládat, že vliv vibrací a otřesů nebude zanedbatelný, stejně jako četné studené starty.

6.4.2 Mikroturbína Capstone C30 a Capstone C65

Firma Capstone patří k předním výrobcům mikroturbín. Vedle vývoje a výroby turbínových jednotek určených ke stacionárnímu použití a výrobě elektřiny se zabývá i vývojem RE.

Mikroturbíny Capstone C30 a Capstone C65 jsou malé jednohřídelové spalovací turbíny s jednoduchým jednostupňovým radiálním kompresorem, přímo spojeným s vysokorychlostním generátorem o jmenovitém výkonu 30 kW a 65 kW. Mikroturbíny spalují jak plynná tak kapalná paliva, a to při nízké produkci škodlivých emisí NO_x a CO. [23]



Obr. 12 Mikroturbína Capstone C30 [23]

	C30	C65
El. výkon	30 kW	65 kW
El. účinnost	26%	29%
Průtok výfukových plynů	0.31 kg·s ⁻¹	0.49 kg·s ⁻¹
Rozměry včetně generátoru	57.2 x 72.9 x 83.6 cm	66.6 x 89.3 x 75.9 cm
Hmotnost včetně generátorem	91 kg	135 kg
Hluk	65 dB	70 dB
Palivo	zemní plyn, diesel, biodiesel, kerosin	
Emise NO _x	<9 ppm pro zemní plyn <35 ppm pro kapalné palivo	
Emise CO	<50 ppm pro zemní plyn <15 ppm pro diesel	

Tab. 5 Parametry mikroturbíny C30 a C65 [23]

6.5 Palivový článek

Palivový článek je zařízení, které elektrochemickou reakcí přeměňuje chemickou energii kontinuálně přiváděného paliva s oxidačním činidlem na energii elektrickou.

V laboratorních podmínkách mohou tato zařízení dosahovat účinnosti až 60%, v reálných podmínkách se účinnost pohybuje od 35 – 50% dle zatížení a typu palivového článku. Vysoká účinnost je dána zejména tím, že přeměna energie je přímá, nikoliv přes mezistupně (tepelnou a mechanickou), jako je tomu např. u spalovacích motorů. [21]

Palivové články lze rozdělit dle chemického složení elektrolytu, provozních teplot a paliva. Nízkoteplotní palivové články spalují s kyslíkem, většinou vzdušným, vodík

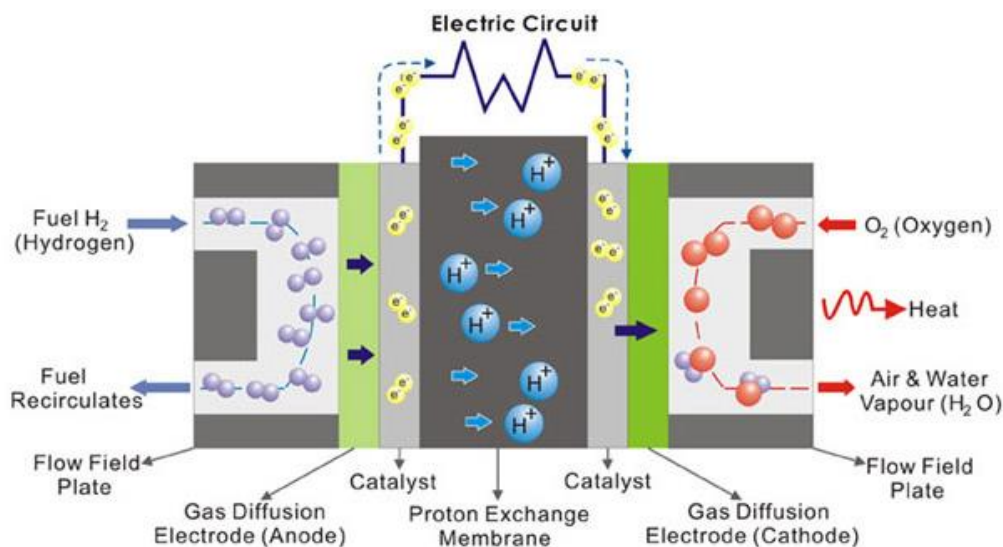
nebo methanol, vysokoteplotní články mohou spalovat i některá konvenční uhlovodíková paliva. Vzhledem k rozdílným provozním parametrům nacházejí jednotlivé typy článků uplatnění v různých aplikacích. Nízkoteplotní palivové články jsou využívány k výrobě elektrické energie především v mobilních aplikacích, vysokoteplotní články naopak převládají v kombinované výrobě elektrické energie a tepla v aplikacích stacionárních.

Pro dosažení požadovaného jmenovitého výkonu jsou palivové články často spojovány do větších celků. Pokud je řeč o palivovém článku, obvykle je tím myšlen již soubor několika elementárních článků. Počet článků v jednom souboru není nikterak omezen, je tak možné konstruovat energetické jednotky v širokém rozsahu výkonu od několika wattů po megawatty, a to při zachování takřka stejné celkové účinnosti.

Nevýhodou palivového článku je skutečnost, že ač se nejedná o novou technologii, doposavad nedošlo k většímu rozšíření. Tomu odpovídá vysoká cena za kW výkonu. A ačkoliv jsou palivové články považovány za relativně spolehlivé, disponují pouze omezenou životností, která je běžně garantována na 5 až 20 tis. hodin.

6.5.1 Zjednodušený popis funkčního principu palivového článku

Základ každého palivového článku tvoří dvě porézní elektrody, anoda a katoda, oddělené tenkou vrstvou elektrolytu. PEMFC je nízkoteplotní palivový článek s polymerní protonově vodivou membránou. Elektrody jsou tvořeny porézním uhlíkem a malými částicemi platiny, která slouží jako katalyzátor.

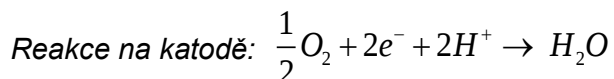


Obr. 13 Schéma palivového článku s polymerní protonově vodivou membránou [22]

Na anodu je přiváděn vodík, který je působením katalyzátoru disociován na kladné ionty a elektrony. Kationty procházejí polymerní vrstvou elektrolytu a elektrony vnějším okruhem, kde mohou konat užitečnou práci.

Reakce na anodě: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Kyslík přiváděný na katodu reaguje s vodíkovými kationty a elektrony z vnějšího okruhu, výsledkem reakce je voda a odpadní teplo.



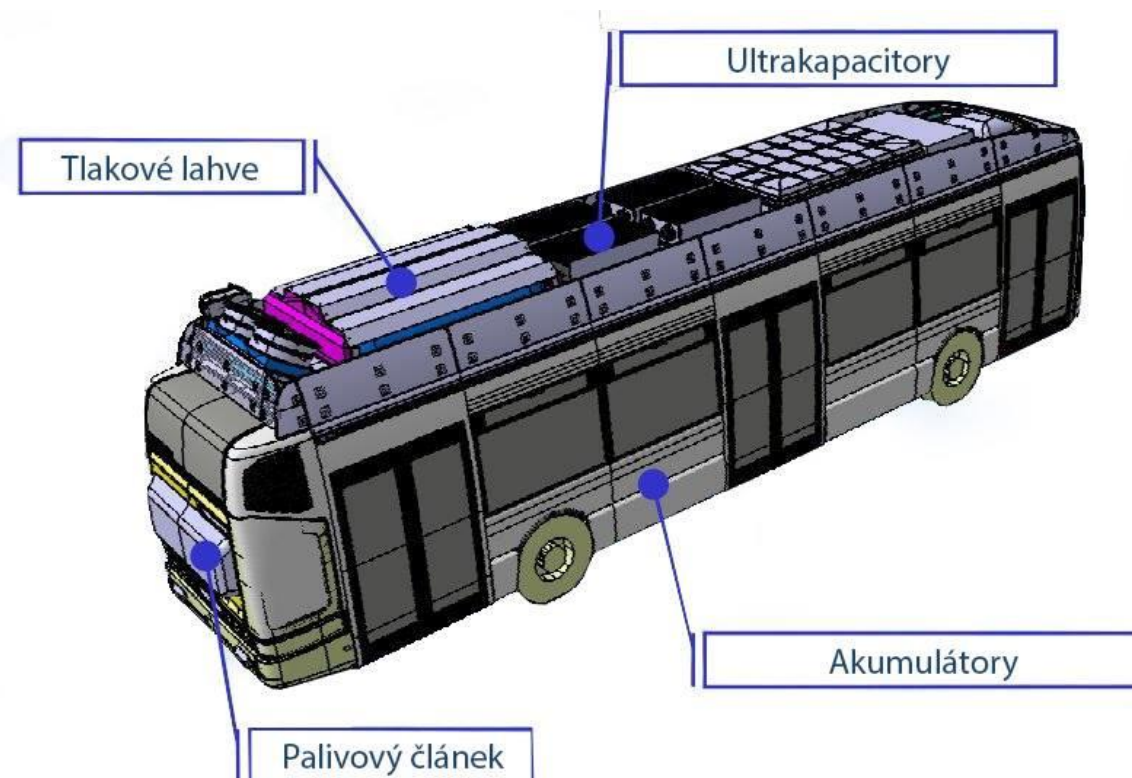
Uvedený palivový článek PMFC disponuje vysokou proudovou hustotou, jedná se tedy o rozměrově menší a lehčí zařízení. Nízké provozní teploty umožňují rychlejší najíždění a okamžitou odezvu na změnu požadovaného výkonu. Z těchto důvodů je PEMFC vhodný pro mobilní aplikace, jako je například RE pro elektrobus.

Nevýhodou je omezená životnost a vysoká pořizovací cena, která je dána kusovou výrobou a také vysokou cenou použitých materiálů. Cena za kW výkonu PEMFC článku se pohybuje okolo 1 000 €. [6]

6.5.2 Trihybus

Příkladem mobilní aplikace palivového článku budiž městský elektrobus - Trihybus, který provozuje a vlastní Ústav jaderného výzkumu v Řeži.

Hlavním zdrojem elektrické energie je vodíkový palivový článek s protonvýměnnou membránou (PEMFC) o výkonu 50 kW. Sekundárními zdroji jsou lithium-iontové akumulátory a ultrakapacitory. Palivem je stlačený vodík. Množství vodíku při maximálním plnicím tlaku 350 bar je 20 kilogramů a je uskladněn ve střešní nástavbě autobusu ve čtyřech vysokotlakých kompozitních nádobách o celkovém objemu 820 l. Celkový dojezd Trihybusu při plném natankování je cca 275 km. [21]



Obr. 14 Palivočlánekový autobus – Trihybus [21]

Velkou komplikací v případě použití palivového článku, který spaluje pouze čistý vodík, je až na výjimky neexistující síť čerpacích stanic. Ostatně tak tomu bylo i v případě Trihybusu, který si vyžádal vybudování vlastní vodíkové infrastruktury. Za normálních podmínek by budování celé infrastruktury pro potřeby jednoho vozidla bylo zcela nemyslitelné. Ovšem, ač je Trihybus využíván k běžné dopravní obslužnosti v Neratovicích, jedná se čistě o experimentální vozidlo. Pořizovací náklady na vozidlo, včetně vývoje, byly vyčísleny na 58.6 mil Kč, a náklady na vybudování vodíkové infrastruktury 25 mil. Kč. [21]

6.6 Zhodnocení RE

RE je obvykle soustrojím tepelného stroje a elektrického generátoru. Výjimku tvoří palivový článek, kde dochází k přímé přeměně chemické energie v elektrickou.

Pístový spalovací motor + generátor

Pístové spalovací motory byly po dlouhou dobu své existence neustále zdokonalovány. V dnešní době tak vykazují účinnost od 30 do 45% v závislosti na konstrukci a použitém palivu. Míra produkce škodlivin ve výfukových plynech odpovídá přísné legislativě a je relativně nízká. Pístové motory jsou a vždy budou zdrojem vibrací a hluku. Je ale možné tyto rušivé projevy zmírnit, například vyvažováním motoru, zatlumením motorového prostoru atd. Zásadními výhodami pístových spalovacích motorů je jejich dostupnost a životnost.

- vibrace
- hluk
- + cena
- + životnost

Wankelův motor + generátor

Parametry Wankelova motoru jako účinnost, emise, míra hluku jsou srovnatelné s klasickým pístovým motorem. Výhodou je relativně vyvážený chod, který se navenek projevuje jen nízkou mírou vibrací. Zásadním nedostatkem je nízká životnost, která je příčinnou minimální nabídky a poptávky.

- malá životnost
- vyšší pořizovací cena v důsledku malé nabídky a poptávky
- + nízká míra vibrací

Mikroturbína + generátor

Mikroturbína je po technické stránce zajímavým řešením. Není zdrojem vibrací a v důsledku kontinuálního spalování dochází jen k nízké produkci škodlivých plynů. Na druhou stranu disponuje zpravidla nižší účinností než pístové spalovací motory a je zdrojem nepříjemného vysokofrekvenčního hluku. Zásadní nevýhodou je pořizovací cena, která je v důsledku takřka kusové výroby velmi vysoká - cca 700 až 850 € za kW výkonu.

- vysokofrekvenční hluk
- účinnost 26-29%

- cena 700-850 € za kW výkonu
- + emise
- + není zdrojem vibrací

Palivový článěk

Palivové články mohou dosahovat v důsledku přímé přeměny chemické energie na elektrickou vysoké účinnosti. Bohužel podobně jako mikroturbíny představují velmi nákladnou investici, ke všemu s omezenou životností.

- cena ~1 000 € za kW výkonu
- omezená životnost
- + není zdrojem vibrací
- + není zdrojem hluku
- + účinnost až 50%
- + emise

Lineární spalovací motor + lineární generátor

Lineární spalovací motor v současné době nepředstavuje možné technické řešení.

Po kritickém zhodnocení dostupnosti, smysluplnosti a použitelnosti jednotlivých RE je tím jediným správným a skutečně možným řešením klasický spalovací motor s elektrickým generátorem. Ostatní možnosti jsou buď příliš drahé, nespolehlivé, nebo méně efektivní.

Při porovnání RE a systémů průběžného dobíjení je třeba posoudit aplikaci té či oné technologie v rámci podmínek konkrétního provozu. Oportunitní systémy mají tu výhodu, že provoz elektrobuseů zůstává v lokálním měřítku absolutně bezemisní. Nevýhodou je vlastní nákladná infrastruktura, která má své opodstatnění pouze při provozu více elektrobuseů stejného výrobce. Naproti tomu RE není bezemisní řešení a jeho použití se nabízí spíše při provozu menšího počtu vozidel.

7 Elektrobus SOR EBN 11

Městský nízkopodlažní elektrobus SOR EBN 11 je dvounápravový, třídvéřový elektrobus, určený k hromadné přepravě osob na kratší vzdálenosti v městském provozu. Kapacita cestujících je 92 osob z toho 29 sedících.

Elektrobus pohání kapalinou chlazený šestipólový elektromotor TAM 1049 Pragoimex o jmenovitém výkonu 120 kW. Jedná se moderní elektromotor, který disponuje řadou výhod:

- hmotnost necelých 400 kg – v porovnání se vzduchem chlazenými motory velice nízká
- absence chladicího ventilátoru – s tím spojená vyšší účinnosti a nižší hlučnosti
- ložiska elektromotoru se nepřehřívají
- elektromotor umožňuje více jak dvojnásobnou přetížitelnost

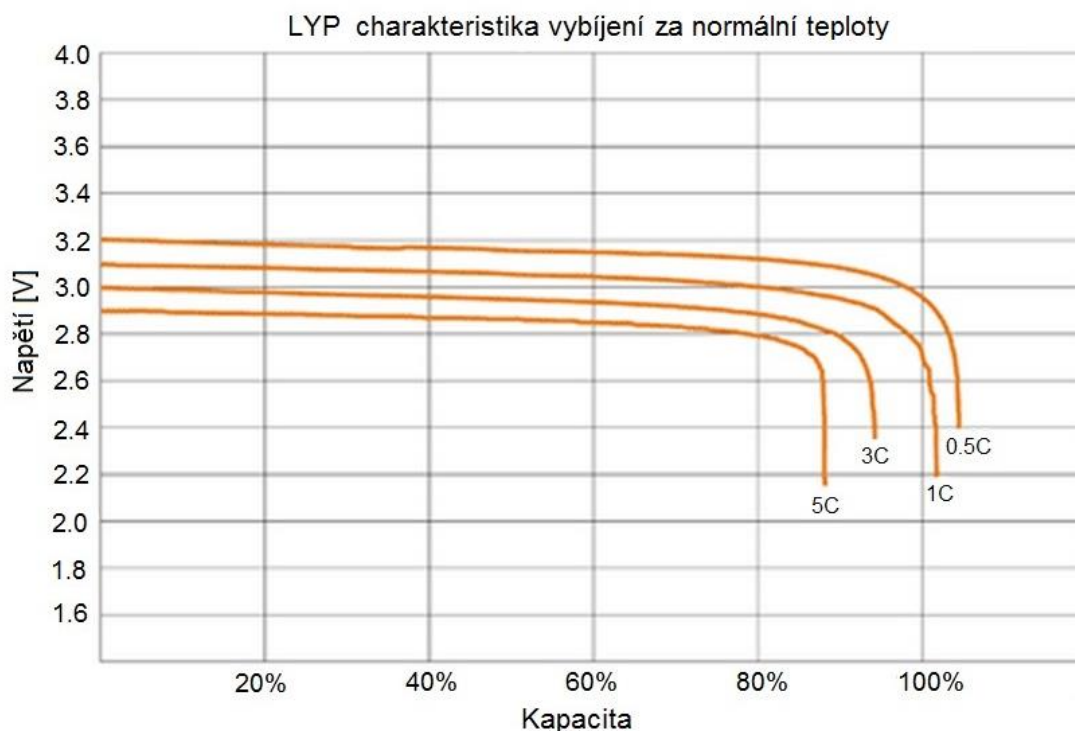
Stejně jako elektromotor je kapalinou chlazený i trakční měnič, který je tak velmi kompaktní a relativně lehký. Odpadního tepla je využito pro vytápění interiéru. Samozřejmostí celého pohonu je rekuperace.

7.1 Akumulátory elektrobusu SOR EBN 11

Trakční výzbroj elektrobusu tvoří bateriový box 180 Li-ion akumulátorů. Konkrétně se jedná o akumulátory s katalogovým označením WB-LYP300AHA s kapacitou 300Ah. Katoda akumulátoru je tvořena sloučeninou LiFeYPO_4 (LiFePO_4 s příměsí Yttria), anoda grafitem. Jedná se o velmi bezpečné akumulátory s plochou charakteristikou napětí při vybíjení.

		WB-LYP300AHA
Nominální kapacita		300 Ah
Jmenovité napětí		3.2 V
Napětí	nabíjení	4 V
	vybíjení	3.2-2.8 V
Vnitřní odpor		$<<0.3 \text{ m}\Omega$
Maximální odběr proudu	Konstantní	$<3 \text{ CA}$
	impuls	$<10 \text{ CA}$
Maximální nabíjecí proud		900 A (3 CA)
Standardní nabíjecí/vybíjecí proud		150 A (0.5 CA)
Životnost	vybití do hloubky 80%	$>>5000$ cyklů
	vybití do hloubky 70%	$>>7000$ cyklů
Míra samovybíjení		$<<3\%$
Pracovní teplota		$-45-80^\circ\text{C}$
Hmotnost		9.7 kg $\pm$ 250 g
Rozměry		298 x 362 x 55.5 mm

Tab. 6 Parametry Li-ion akumulátoru WB-LYP300AHA [16]



Obr. 15 Charakteristika akumulátoru WBLYP- 300AH [16]

Každý akumulátor je sledován z hlediska přebíjení, podbíjení a teploty. V případě zvýšené teploty je celý box chlazen. Naopak pro provoz v extrémních mrazech, je na přání možné jej vybavit ohřevem. [5]

Akumulátory je doporučeno vybíjet maximálně z 80% kapacity. Dojezd elektrobusu na jedno nabití je v závislosti na obsazenosti a náročnosti trasy přibližně 110 až 160 km. Standardní dobítí akumulátorů, včetně vybalancování, probíhá proudem 32 A po dobu 8 hodin. Lze ale dobíjet proudem až 250 A, kdy se čas nabíjení zkracuje až na 1 hodinu. [5]

7.2 Porovnání provozních parametrů

Průměrná spotřeba elektrobusu SOR EBN 11 v přepočtu na kilometr a počet možných cestujících je v porovnání s jinými elektrobusy, různých značek a provedení, velmi příznivá vis. Tab. 7. Menší provedení, elektrobus SOR EBN 8, v tomto ohledu patrně doplácí na relativně vysokou kapacitu akumulátorů a malou kapacitu cestujících. [4]

Z Tab. 7 je dobře patrný kompromis mezi dojezdovou vzdáleností, kapacitou akumulátorů a počtem cestujících.

	Délka [m]	Celková kapacita cestujících	Kapacita akumulátorů [kWh]	Spotřeba [kWh/km]	Dojezd [km]	Kapacita akumulátorů [Wh/místkm]	Spotřeba energie [Wh/místkm]
ZEUS	5.9	36	58	0.44	120	13	12
SOR EBN 8*	8	51	173	0.76	159	21	15
AMZ CZ10E	10	83	230	1.04	170	16	13
SOR EBN 11*	11.1	85	173	0.89	136	15	10
ERABUS	11.48	86	218	1.02	150	17	12
BYD	12	68	324	1.17	194	25	17
Solaris Urbino E12	12	85	210	1.04	141	18	12

Tab. 7 Porovnání provozních parametrů vybraných elektrobusů [4]

**dojezdy elektrobusů SOR jsou uváděny pro případ, že jsou akumulátory vybíjeny maximálně do hloubky 70% své kapacity*

8 Volba RE

Volbu RE ovlivňuje několik faktorů, jako požadavky na kompaktní rozměry celého agregátu, dostatečný výkon pro dosažení požadované dojezdové vzdálenosti a v neposlední řadě adekvátní míra vibrací. Karoserie elektrobusu SOR je poměrně málo tuhá, je to daň za menší hmotnost, a z toho plynoucí menší provozní náklady. Požadovaný elektrický výkon RE vyplývá z kapacity akumulátorů, průměrné dojezdové vzdálenosti a požadované dojezdové vzdálenosti.

Zástavba RE bude provedena s předpokladem, že motor RE bude při provozu elektrobusu takřka nepřetržitě v chodu. Toto řešení umožňuje zvolit RE s relativně nízkým výkonem, a tedy s relativně malými zástavbovými rozměry a hmotností.

Přibližný požadovaný výkon RE lze určit jednoduchou úvahou:

- celková kapacita akumulátoru je 173 kWh, při vybití maximálně do hloubky 80% je k provozu využita kapacita 138.4 kWh
- dojezdová vzdálenost je s průměrnou spotřebou $0.89 \text{ kWh}\cdot\text{km}^{-1}$ 155.5 km
- průměrná rychlost městského autobusu je závislá na lokalitě a hustotě provozu, přibližně lze hovořit o 20 až $35 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$
- požadovaná dojezdová vzdálenost je přibližně 250 km
- účinnost dobíjení LiFeYPO_4 akumulátoru 95%

požadovaná kapacita akumulátoru = denní proběh autobusu · průměrná spotřeba

požadovaná kapacita akumulátoru = 223 kWh

počet hodin provozu bez mezičasu ve stanicích = $\frac{\text{požadovaná dojezdová vzdálenost}}{\text{průměrná rychlost}}$

počet hodin provozu bez mezičasu ve stanicích = $7 \div 13 \text{ h}$

minimální výkon generátoru = $\frac{\text{požadovaná kapacita} - \text{současná užitečná kapacita}}{\text{počet hodin v provozu} \cdot \text{účinnost dobíjení}}$

minimální výkon generátoru = $7 \div 12.7 \text{ kW}$

Prostoje ve stanicích nejsou z časového hlediska zdaleka zanedbatelné, ovšem měla by existovat možnost motor generátorové jednotky při pobytu ve stanici vypnout. Jedním z důvodů použití elektrovozidel je lokálně bezemisní provoz. Není tedy úplně žádoucí, aby elektrobus při pobytu ve stanici zbytečně obtěžoval okolí výfukovými plyny z RE.

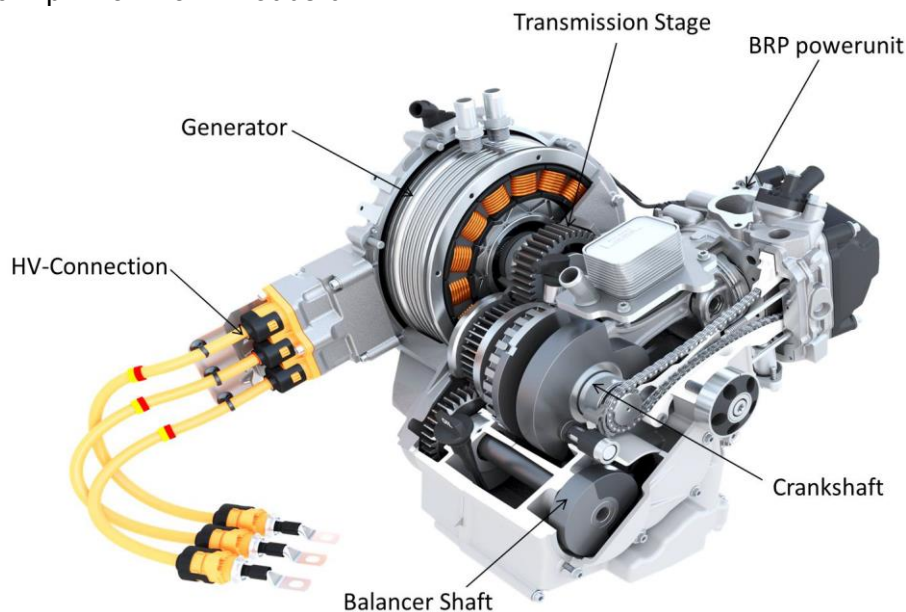
8.1 Jednoválcový RE od AVL

Jednoválcový RE od AVL, který již byl stručně představen, jsem zvolil hned z několika důvodů:

- dostatečný elektrický výkon generátoru
- velmi kompaktní rozměry RE, především v ose klikového hřídele z důvodu malého počtu válců
- ač se jedná o jednoválcový motor, tak je zdrojem relativně malé míry vibrací

RE byl vyvinut AVL ve spolupráci s firmou BRP Rotax. Cílem spolupráce byla kompaktní generátorová jednotka s dostatečným výkonem pro potřeby běžných elektrovozidel, za rozumnou cenu. Pohonná jednotka RE vznikla úpravou vidlicového dvouválce Rotax 1000 4-tec. Zjednodušeně řečeno, motoru byl odejmut jeden válec a byl dovybaven vyvažováním. Výkon takto upraveného motoru o objemu 430 cm³ je uváděn 28 kW při 6000 min⁻¹.

Motor pohání přes transmisní hřídel s převodem 1:1 synchronní generátor s permanentními magnety. Uváděný výstupní výkon generátoru je 25 kW při 420 V resp. 320 V při maximálním odběru.



Obr. 16 RE od AVL [18]

Výkon RE při provozu na CNG

Spotřeba palivové směsi motoru s objemem válce 0.430 dm³ při plnicí účinnosti 80% a jmenovitých otáčkách 6000 min⁻¹:

$$V_{PL} = V \cdot \eta_{PL} = 0.430 \cdot 0.8 = 0.344 \text{ [dm}^3\text{]}$$

$$\dot{V}_{CNG} = V_{PL} \cdot \frac{n}{2} = 0.344 \cdot \frac{6000}{2} = 1032 \text{ [dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}\text{]} \Rightarrow 61.92 \text{ [m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{]}$$

Stechiometrické směsi při $\lambda = 1$ přibližně odpovídá poměr 9.8 m³ vzduchu na 1 m³ zemního plynu. Tedy při objemové spotřebě palivové směsi 61,92 m³·h⁻¹ je spotřeba vzduchu 56,19 m³·h⁻¹ a 5,73 m³·h⁻¹ zemního plynu.

Spotřeba zemního plynu o hustotě 0.7 kg·m⁻³ v kg·h⁻¹:

$$\dot{m}_{CNG} = \dot{V}_{CNG} \cdot \rho_{CNG} = 5.73 \cdot 0.7 = 4.01 \text{ [kg} \cdot \text{h}^{-1}\text{]}$$

Výkon motoru při celkové účinnosti 30% a výhřevnosti zemního plynu 13.6 kWh·kg⁻¹:

$$\dot{m}_{CNG} \cdot H_{CNG} \cdot \eta = 4.01 \cdot 13.6 \cdot 0.3 = 16.4 \text{ [kW]}$$

Účinnost elektrického generátoru při přeměně mechanické energie motoru na elektrickou je 90%. Při přestavbě RE na zemní plyn se elektrický výkon sníží na 14.8 kW.

Vyvažování motoru

Pístové spalovací motory se mohou navenek projevovat vibracemi, které jsou způsobeny setrvačnými silami a klopnými momenty od setrvačných sil rotačních a posuvných hmot. Setrvačné síly rotačních hmot mají konstantní velikost nezávisle na poloze natočení klikového hřídele a působí vždy ve směru kliky. Mohou tak být poměrně snadno zcela vyváženy vhodnou úpravou klikového hřídele.

Velikost vývažku setrvačných sil od rotačních hmot lze stanovit na základě jednoduché rovnice:

$$m_r \cdot \omega^2 \cdot r = m_{vr} \cdot \omega^2 \cdot r_{vr}$$

m_r - celková hmotnost rotačních hmot

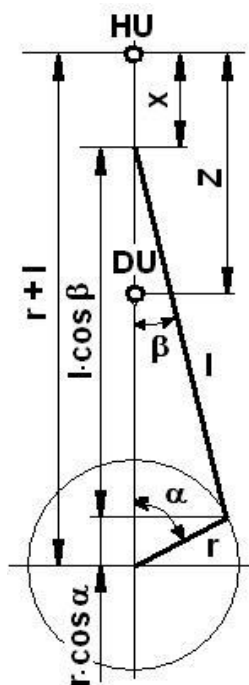
m_{vr} - hmotnost vývažku

r - poloměr kliky

r_{vr} - vzdálenost vývažku od osy rotace

ω - úhlová rychlost

Problematika ohledně setrvačných sil posuvných hmot je podstatně složitější, neboť tyto síly jsou funkcí polohy natočení klikového hřídele. Tato závislost vyplývá z kinematiky klikového mechanismu.



Obr. 17

Poloha pístu "x" vyjádřena z geometrické podmínky:

$$x = r + l - r \cdot \cos(\alpha) - l \cdot \cos(\beta)$$

Klikový poměr:

$$\lambda = \frac{r}{l} = \frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)}$$

Ze závislosti goniometrických funkcí:

$$(\sin(\beta))^2 + (\cos(\beta))^2 = 1$$

Vyjádřeno a dosazeno do rovnice:

$$\cos(\beta) = \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot (\sin(\alpha))^2}$$

Předpis Taylorova rozvoje:

$$f(u) = f(0) + f'(0) \cdot \frac{u}{1!} + f''(0) \cdot \frac{u^2}{2!} + \dots$$

Definice parametru "u":

$$u = \lambda^2 \cdot (\sin(\alpha))^2$$

Vyjádření funkce "f" v závislosti na parametru "u":

$$f(u) = \sqrt{1 - u}$$

Vyjádření Taylorovy řady a dosazení do rovnice polohy pístu:

$$x = r + l - r \cdot \cos(\alpha) - l \cdot \left[1 - \frac{1}{2} \cdot \lambda^2 \cdot (\sin(\alpha))^2 - \frac{1}{8} \cdot \lambda^4 \cdot (\sin(\alpha))^4 - \dots \right]$$

Taylorova řada rychle konverguje. Pro orientační výpočty tak postačí pouze první dva členy řady. Vyjádření polohy pístu v závislosti na poloze natočení klikového hřídele:

$$x = r \cdot \left[1 - \cos(\alpha) + \frac{\lambda}{2} \cdot (\sin(\alpha))^2 \right]$$

Vyjádření rychlosti a zrychlení pístu:

$$v = r \cdot \omega \cdot \left[\sin(\alpha) + \frac{\lambda}{2} \cdot \sin(2\alpha) \right]$$

$$a = r \cdot \omega^2 \cdot [\cos(\alpha) + \lambda \cdot \cos(2\alpha)]$$

Výpočet setrvačné síly posuvných hmot:

$$F_p = m_p \cdot a$$

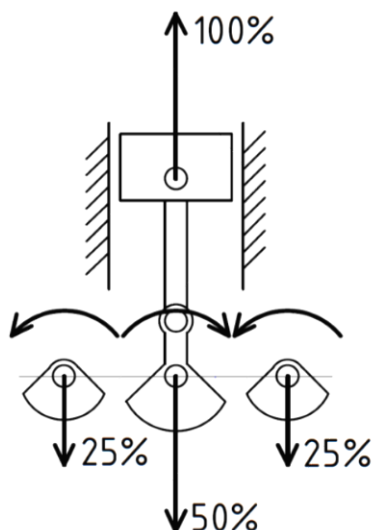
$$F_p = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot [\cos(\alpha) + \lambda \cdot \cos(2\alpha)]$$

Vyjádření setrvačné síly posuvných hmot I. a II. řádu po roznásobení rovnice:

$$F_p = m_p \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos(\alpha) + m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \lambda \cdot \cos(2\alpha)$$

$$F_p = F_I + F_{II}$$

Uvedený motor je vybaven vyvažovacím mechanismem setrvačných sil posuvných hmot prvního řádu. Vyvážení bylo provedeno dle schématu na Obr. 18. Maximální hodnota setrvačné síly posuvných hmot odpovídá 100%. Závaží umístěné na klikovém hřídeli působí, vlivem odstředivé síly, v opačném směru silou 50%. Zbýlých 50% je rozděleno na dva vyvažovací hřídele v poměru 1:1 (25% a 25%), které se s převodem 1:1 otáčejí proti smyslu otáčení klikového hřídele a jsou spolu s klikovým hřídelem umístěny v jedné rovině. Použití dvou vyvažovacích hřídelů také eliminuje vznik klopných momentů.



Obr. 18 Schéma vyvažovacího mechanismu

Velikosti vývažků setrvačných sil od posuvných hmot lze stanovit dle následujících rovnic:

$$0.5 \cdot m_p \cdot \omega^2 \cdot r = m_{vp-1} \cdot \omega^2 \cdot r_{vp-1}$$

$$0.25 \cdot m_p \cdot \omega^2 \cdot r = m_{vp-2} \cdot \omega^2 \cdot r_{vp-2}$$

m_p - celková hmotnost posuvných hmot

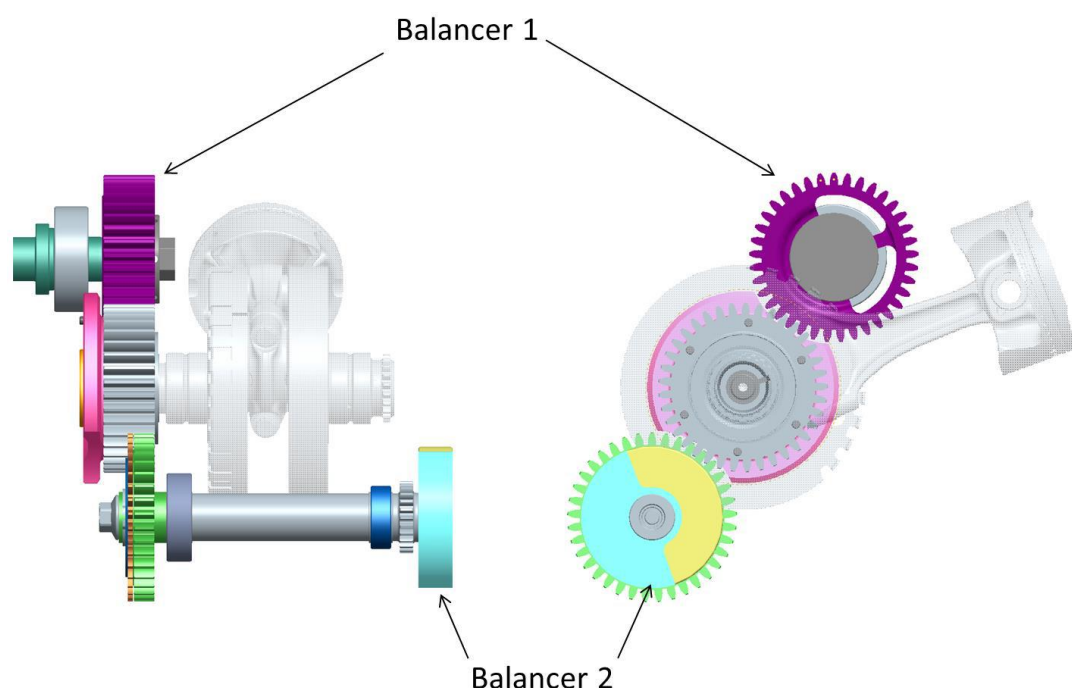
$m_{vp-1,2}$ - hmotnost vývažků

r - poloměr kliky

$r_{vp-1,2}$ - vzdálenost vývažků od osy rotace

Pozn.: velikost vývažku na klikovém hřídeli je dána součtem velikosti vývažku pro setrvačné síly rotačních hmot a vývažku pro setrvačné síly posuvných hmot:

$$m_{vp-1} + m_{vr}$$



Obr. 19 Vyvažovací mechanismus posuvných hmot [18]

Uvedený motor je z hlediska vnějších účinků setrvačných sil od rotačních hmot a setrvačných sil od posuvných hmot prvního řádu zcela vyvážený. Stejně tak se zdá být vyvážený z hlediska vnějších účinků klopných momentů od setrvačných sil rotačních hmot a setrvačných sil posuvných hmot prvního řádu.

9 Přestavba pístového spalovacího motoru na pohon CNG

Úprava původního benzinového motoru na motor plynový spočívá především v zástavbě nového palivového systému s příslušenstvím pro CNG. Tvorbu palivové směsi lze uskutečnit pomocí směšovače v sání motoru nebo vefukováním CNG vefukovacími ventily.

Směšovače plynu patří mezi nejstarší a nejjednodušší systémy. Zemní plyn proudí z tlakové nádrže přes bezpečnostní ventil a regulátor tlaku do směšovače, který je umístěn v sacím potrubí motoru. Dávkování zemního plynu bývá u novějších palivových systémů řízeno zpravidla šoupátkem umístěným v přívodu plynu do směšovače ovládaným elektronickou řídicí jednotkou.

Vefukování plynu může být provedeno jako:

- jednobodové vefukování do sání motoru
- vícebodové vefukování do sání motoru
- přímé vefukování plynu do válců motoru

Systém jednobodového vefukování do sání motoru je de facto vyspělejší nástupce směšovače. Místo směšovače je ve společné části sacího potrubí všech válců motoru nainstalován vefukovací ventil ovládaný elektronickou řídicí jednotkou na základě údajů z lambda sondy a dalších senzorů.

V případě vícebodového vefukování do sání motoru je každému válci přiřazen jeden vefukovací ventil, který je umístěn v sacím potrubí v blízkosti sacích ventilů a připojený na společný palivový rail spolu se snímačem tlaku a teploty. Vefukovací ventily jsou, stejně jako v případě jednobodového vefukování, ovládány elektronicky řídicí jednotkou na základě údajů od snímačů na motoru.

Přímé vefukování zemního plynu do válců disponuje všemi výhodami vícebodového vefukování, k tomu doprava zemního plynu až do spalovacího prostoru znamená vyšší objemovou účinnost než u předchozích systémů a motor tak disponuje celkově příznivějšími parametry.

9.1 Příslušenství palivových systémů na CNG

Celý palivový systém se skládá z vysokotlaké a z nízkotlaké části. Vysokotlaká část obsahuje palivové nádrže, plnicí ventil, bezpečnostní ventily a vysokotlaké potrubí. Nízkotlaká část obsahuje směšovač, nebo tlakový zásobník a vefukovací ventily, senzor teploty a tlaku zemního plynu a nízkotlaké potrubí. Vysokotlaká a nízkotlaká část je oddělena regulátorem tlaku.

Jednotlivé komponenty palivových systémů vyrábějí a dodávají například firmy BRC, Viale, Delphi, Westport Innovations, Ventrex Automotive GmbH, Landi Renzo, Fuel Systems Solutions, Quantum technologies.

Vozidlo provozované na CNG musí splňovat předpis evropské hospodářské komise EHK 110.

Palivové nádrže

Plyn je při tlaku až 200 bar uchován v tlakových nádobách, které jsou v nízkopodlažním autobusu umístěny standardně na střeše. Nádoby mohou být celokovové nebo z kompozitu.

Plnicí ventil

Plnicí ventil slouží k plnění palivové nádrže vozidla zemním plynem. Součástí plnicího ventilu je kovový filtr nečistot a zpětný ventil.

Bezpečnostní ventily

Každá tlaková nádoba je opatřena bezpečnostním ventilem. Jedná se o komplet několika bezpečnostních prvků, které mají za úkol zamezit případně eliminovat možné škody:

- ruční ventil - slouží k manuálnímu uzavření tlakové nádoby v případě potřeby
- nadprůtokový ventil - při nadměrném průtoku plynu, kdy je např. poškozeno palivové vedení v důsledku dopravní nehody, uzavře tlakovou nádobu
- ochranná pojistka - při zvýšení tlaku zemního plynu v tlakové nádobě, nebo při zvýšení teploty nad 110°C, zajistí řízené odpouštění zemního plynu
- elektromagneticky ovládaný ventil - uzavírá přívod plynu do motoru při vypnutém zapalování - nemusí být nutně součástí každá tlakové nádoby

Regulátor tlaku plynu

Upravuje tlak plynu z palivové nádrže na pracovní tlak nízkotlaké části palivového systému. Velikost tlaku je dána pracovním tlakem směšovače nebo vefukovacích ventilů. Zatímco směšovače pracují pouze s mírným přetlakem nebo i podtlakem, vefukovací ventily pracují s výrazně vyšším přetlakem, a to od 5 do 9 barů. Regulátory jsou standardně dvoustupňové, na mechanickém nebo elektronickém principu. Protože v regulátorech plyn expanduje a mohlo by dojít k zamrznutí, jsou regulátory napojeny na ohřev - chladicí okruh motoru.

Zapalovací svíčka

Zapalovací svíčky pro motory na CNG mají modifikovanou konstrukci. Vzdálenost elektrod je menší než 0.7 - 0.9 mm. Střední elektroda bývá vyrobena z materiálu s vysokou odolností proti korozi, nízkou tepelnou roztažností, nízkou teplotní a elektrickou vodivostí a vysokou životností. Je možné se například setkat se stříbrnými, platinovými, nebo platino - iridiovými elektrodami. Dalším rozdílem je vyšší zapalovací napětí na svíčce. U klasické svíčky pro benzínové motory se napětí pohybuje okolo 14 kV, doporučené zapalovací napětí pro motory na zemní plyn se pohybuje mezi 16 až 18 kV.

Katalytický reaktor

Motory na zemní plyn využívají katalytické reaktory se složením platiny, paladia a rhodia v poměru 5:0:1, které je pro plynové motory specifické.

9.2 Návrh komponentů pro přestavbu na CNG

Tlakové láhve

Minimální kapacita tlakových lahví je přímo úměrná spotřebě CNG a dennímu proběhu autobusu. K tomu je dále třeba připočíst množství zbytkového plynu, který při plnění tlakových lahví na 200 barů a pracovnímu tlaku v nízkotlaké části do 9 barů odpovídá přibližně 10% kapacity.

Minimální kapacita tlakových lahví v kg při hodinové spotřebě CNG $4.01 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ a denním proběhu autobusu až 13 h:

$$m_{\text{CNG}} = \dot{m}_{\text{CNG}} \cdot \tau \cdot 1.1 = 4.01 \cdot 13 \cdot 1.1 = 57.4 \text{ [kg]}$$

Přibližný objem 57.4 kg stlačeného zemního plynu na 200 bar dle stavové rovnice ideálního plynu ($r_{\text{CNG}} = 518 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$, $T = 288 \text{ K}$):

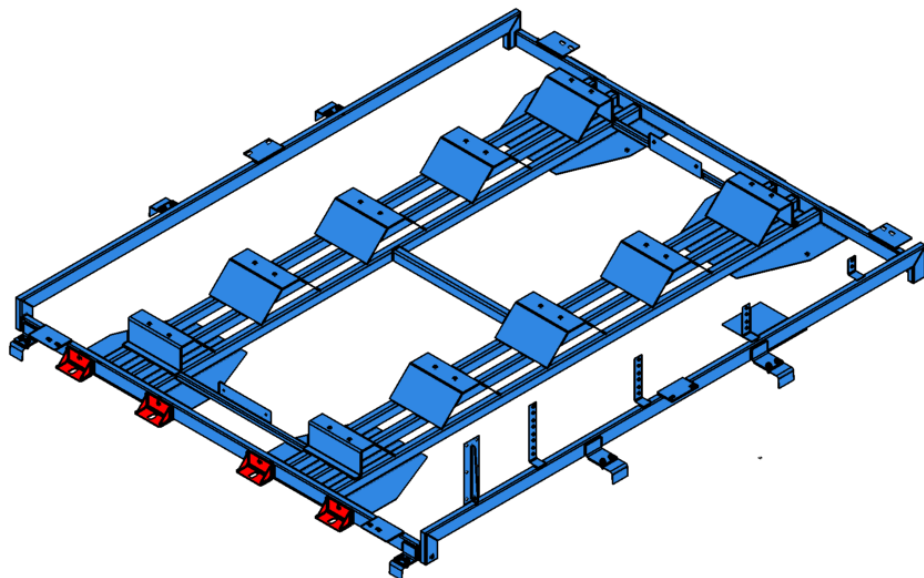
$$p \cdot V_{\text{CNG}} = m_{\text{CNG}} \cdot r_{\text{CNG}} \cdot T$$
$$V_{\text{CNG}} = 0.43 \text{ [m}^3\text{]}$$

Tlakové nádoby volím z kompozitu od výrobce ULLIT, a to z více důvodů. Ze strany firmy SOR se jedná o ověřeného dodavatele, neboť tlakové nádoby tohoto výrobce již využívá několik autobusů SOR s pohonem na stlačený zemní plyn. Tlakové nádoby z kompozitu jsou výrazně lehčí - přibližně třikrát - než nádoby ocelové. Menší hmotnost znamená menší spotřebu energie na kilometr provozu.

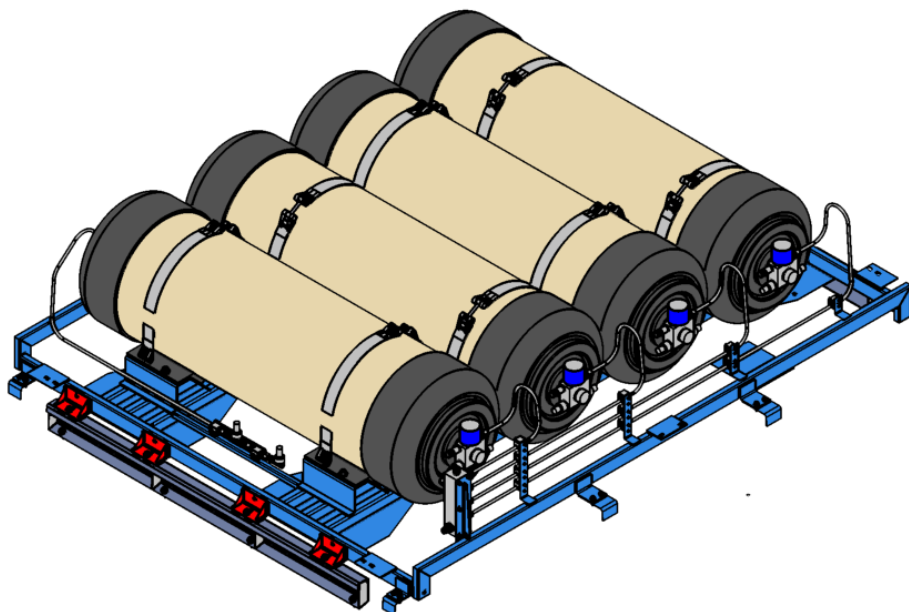


Obr. 20 Střešní nosič vysokotlakých nádob pro autobus SOR s pohonem na CNG (kapacita 4 x 310l)

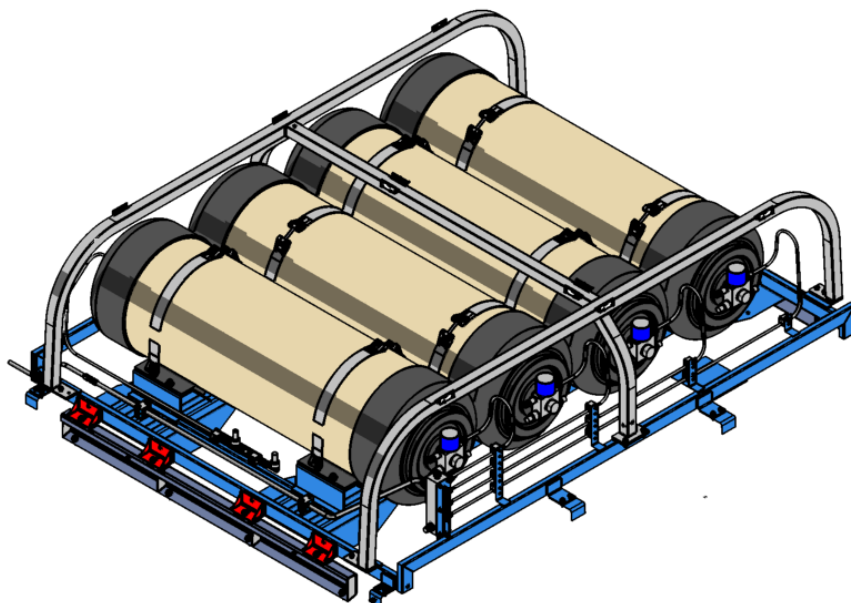
Tlakové nádoby s kapacitou 4 x 120 l budou umístěny ve střešní nástavbě. Celková kapacita 0.48 m³ (až 64 kg CNG) je pro potřeby RE dostatečná. K upevnění tlakových nádob lze použít upravený nosič vysokotlakých nádob z autobusu SOR s pohonem na CNG.



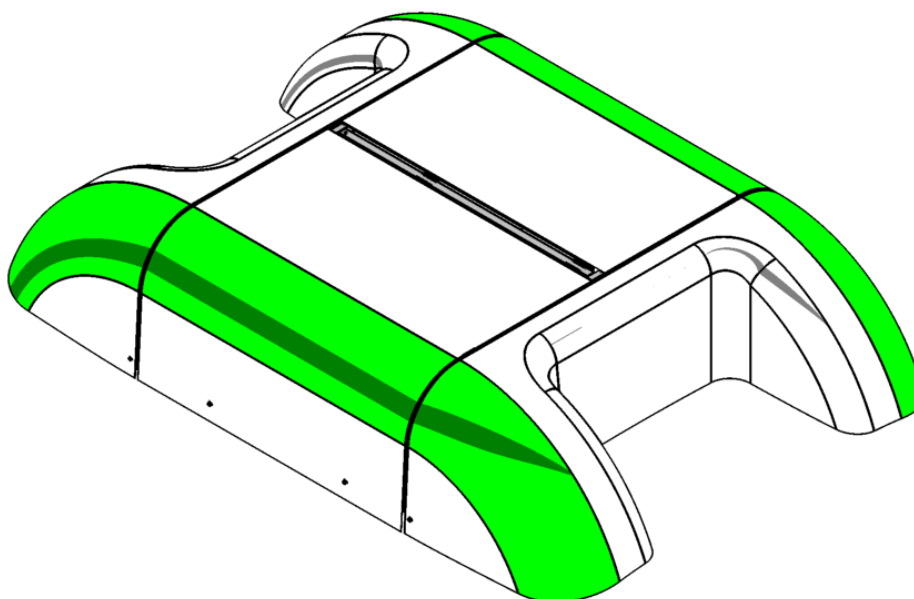
Obr. 21 Upravený střešní nosič vysokotlakých nádob pro CNG



*Obr. 22 Upevnění vysokotlakých nádob pro CNG
na upraveném střešním nosiči*



Obr. 23 Vysokotlaké nádoby pro CNG na střešním nosiči spolu s rámem pro upevnění laminátové kapotáže



Obr. 24 Celková podoba střešní nástavby s vysokotlakými nádobami pro CNG včetně laminátové kapotáže

Upevnění upraveného nosiče vysokotlakých nádob ke střešní konstrukci elektrobusu SOR je stejné jako v případě autobusu SOR s pohonem na CNG.

Regulátor tlaku

Ke snížení tlaku CNG z 200 bar na pracovní hodnotu 8 bar lze použít dvoustupňový regulátor tlaku od společnosti Landi Renzo. Tlak je regulován pomocí membrány a regulačního šoupátka. Regulátor je vybaven bezpečnostním uzavíracím ventilem a přípojkami na chladicí okruh motoru. [17]

NG2-8	
Regulované médium	zemní plyn
Provozní tlak	20 až 260 bar
Výstupní tlak	8 bar
Maximální průtok	45 kg·h ⁻¹
Otevírací tlak přetlakového ventilu	18 bar
Pracovní teplota okolí	-40 až 120°C
Pracovní teplota plynu	-40 až 100°C
Pracovní teplota chladicí kapaliny	-40 až 100°C
Napětí elektromagnetického ventilu	12/24 V

Tab. 8 Parametry regulátoru NG2-8 [17]



Obr. 25 Regulátor tlaku - Landi Renzo [17]

Vefukovací ventil pro zemní plyn

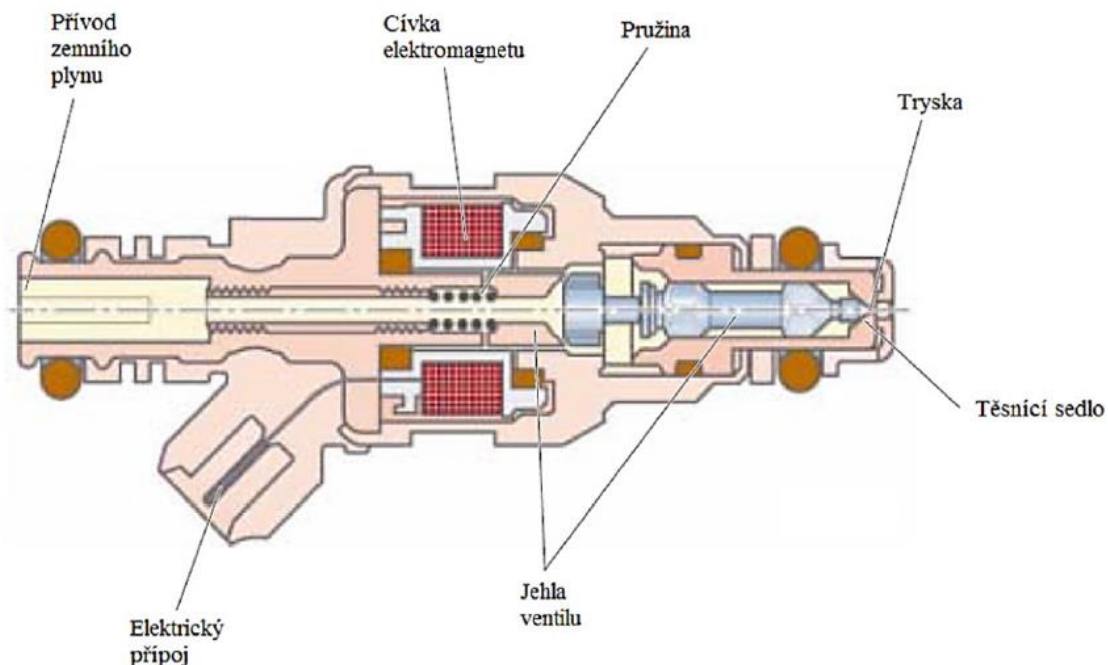
K vefukování zemního plynu jsem zvolil ventil od společnosti Delphi, který umožňuje optimální dávkování a vysoký průtok paliva do 9 barů. Ventil je optimalizován pro specifické chemické a fyzikální vlastnosti zemního plynu. Tedy i přes nízké mazací schopnosti zemního plynu je zaručena dostatečná odolnost proti opotřebení a životnost uváděná výrobcem se pohybuje na hranici 400 milionů cyklů. [17]

- Tlak plynu před jehlou trysky: 800 kPa
- Hmotnostní průtok ventilem při daném tlakovém spádu: $3.7 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$



Obr. 26 Vefukovací ventil CNG - Delphi [17]

Otevírání ventilu funguje na elektromagnetickém principu. Aktivací elektromagnetu se přitáhne jehla trysky vefukovacího ventilu a dojde k expanzi plynu do sání motoru.



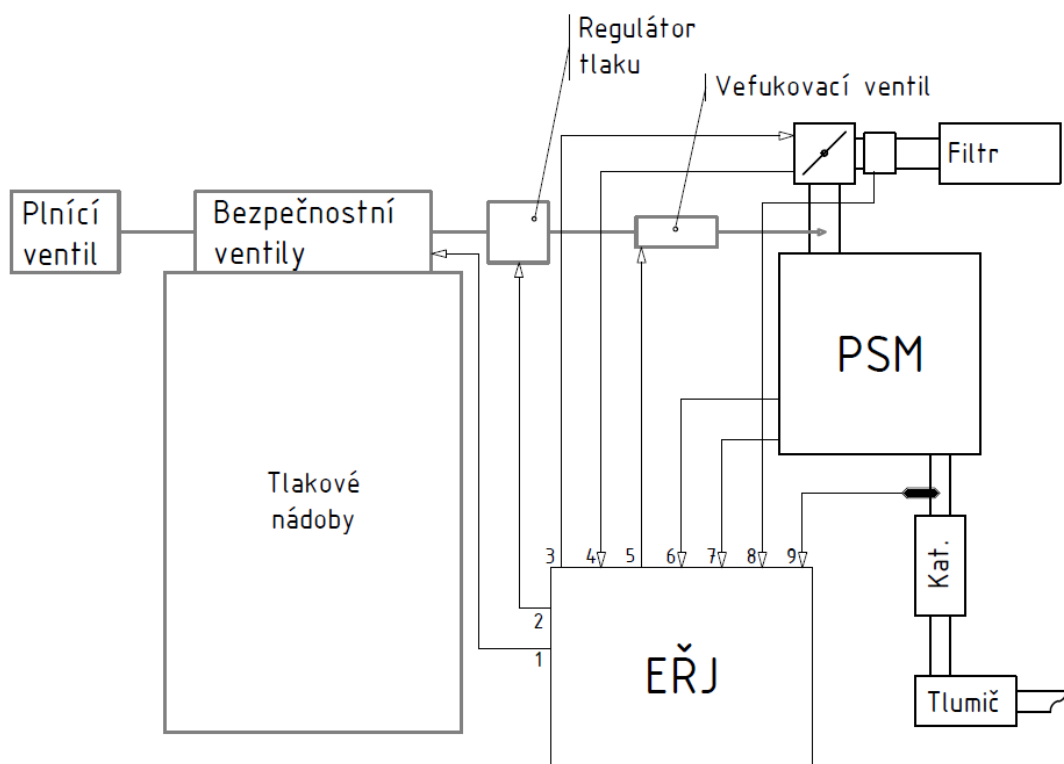
Obr. 27 Řez vefukovacím ventilem na CNG [17]

Doba otevření ventilu je dána hmotnostním průtokem a množstvím CNG na jeden pracovní cyklus motoru. Objem palivové směsi při atmosférickém tlaku je 0.344 dm^3 . Podíl vzduchu ku CNG stechiometrické směsi při $\lambda = 1$ je 9.8:1. Množství CNG na jeden pracovní cyklus tak odpovídá 0.032 dm^3 , resp. $2.23 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$.

Doba otevření ventilu na jeden pracovní cyklus:

$$\tau_o = \frac{m_{CNG}}{\dot{m}_{CNG}} = \frac{2.23 \cdot 10^{-5}}{3.7 \cdot 10^{-3}} = 0.006 \text{ [s]}$$

Motor využívá systém vstřikování paliva do sacího kanálu. Jelikož bude motor provozován jako monovalentní, nabízí se umístění vefukovacího ventilu namísto benzínového vstřikovače.



Obr. 28 Blokové schéma palivového systému na CNG

1,2 - ovládání elektromagnetického bezpečnostního ventilu, 3 - ovládání škrťací klapky,
 4 - poloha škrťací klapky, 5 - ovládání vefukovacího ventilu, 6 - snímání otáček motoru,
 7 - snímání polohy natočení klikového hřídele, 8 - množství nasávaného vzduchu,
 9 - signál z lambda sondy

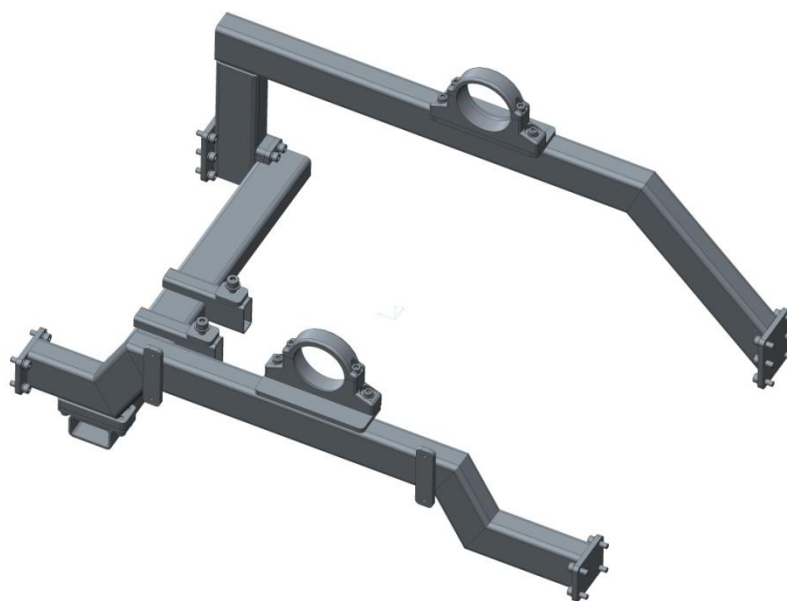
10 Konstrukční řešení zástavby

Jedním z požadavků na zástavbu RE do elektrobusu SOR EBN 11 je maximálně využít stávající konstrukci elektrobusu. V úvahu přicházejí pouze drobné úpravy. Po prostudování stávající konstrukce a dispozice jsem usoudil, že jediným přijatelným řešením je zástavba RE pod bateriový box ve volném prostoru za trakčním elektromotorem. O možnosti takového provedení je přesvědčen i vedoucí konstrukce firmy SOR, pan Ing. Černý.

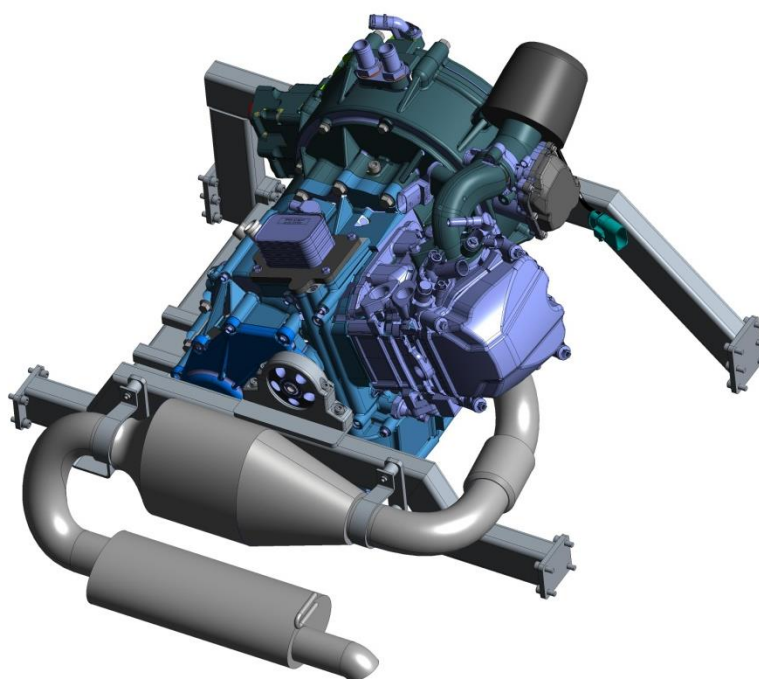


Obr. 29 Bateriový box elektrobusu SOR EBN 11

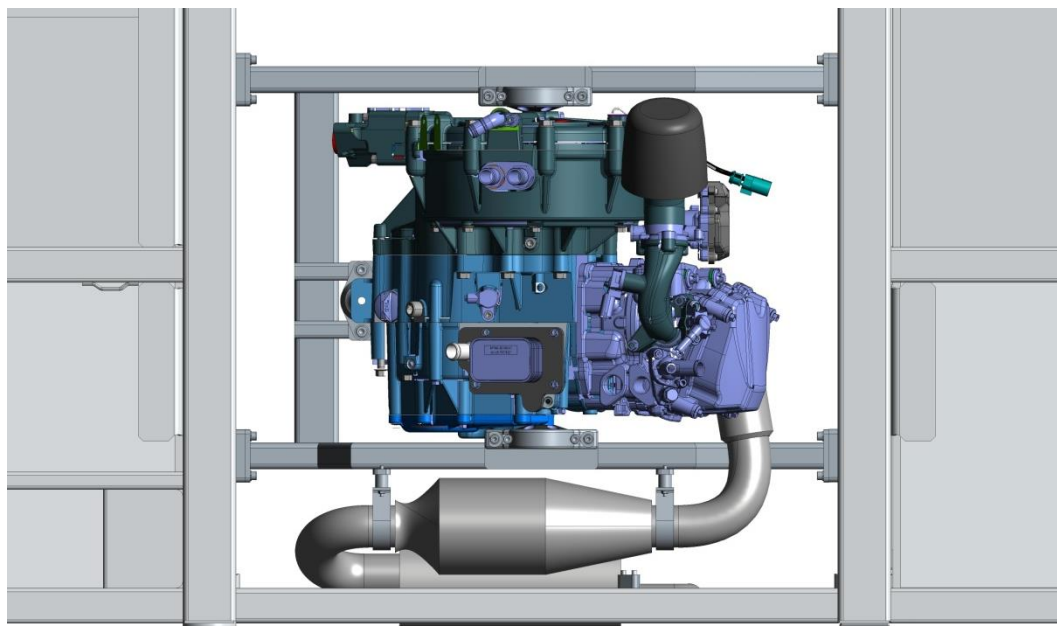
K upevnění RE jsem navrhl rám, který je montován ze tří částí, každá svařená z ocelových profilů. RE je v rámu uchycen pružně ve třech bodech. Rám je přišroubován k podélným profilům rámové konstrukce karoserie.



Obr. 30 Rám k upevnění RE



Obr. 31 Upevněný RE v rámu

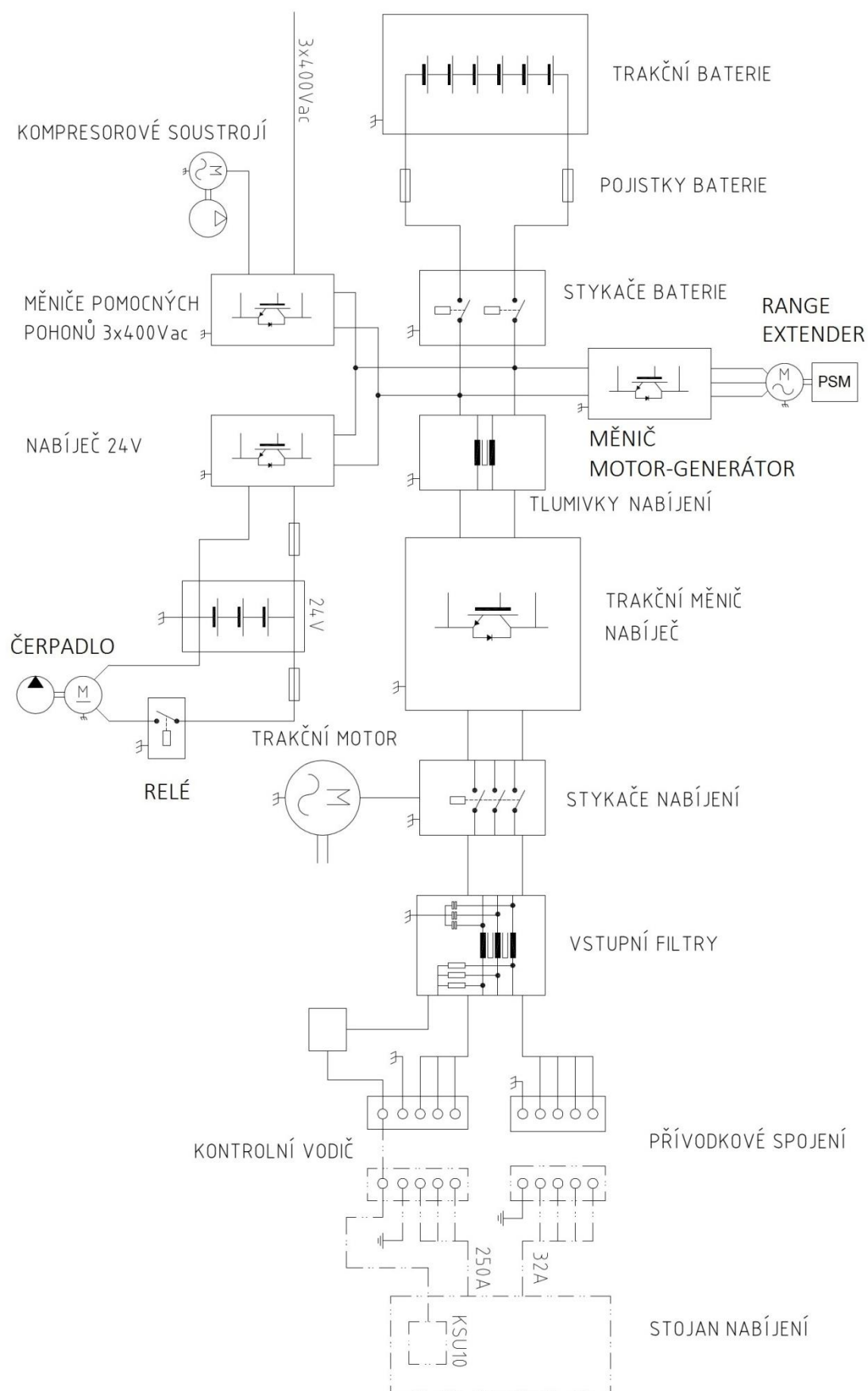


*Obr. 32 Zástavba RE do elektrobusu SOR EBN 11
(pohled shora)*

11 Trakční elektrosoustava

Ač je primární úlohou el. generátoru RE výroba el. proudu, plní také úlohu el. startéru spalovacího motoru. Výstup el. generátoru je k trakční elektrosoustavě elektrobusu připojen přes trakční měnič DC/3xAC. Trakční měnič v generátorovém režimu RE usměrňuje střídavý proud na stejnosměrný a v motorovém režimu, tedy v režimu el. startéru, mění stejnosměrný proud na střídavý s plynulou změnou frekvence až na rozběhové otáčky spalovacího motoru. Připojení el. generátoru k trakční soustavě elektrobusu je patrné z kompletního schématu trakční elektrosoustavy na Obr. 33.

Na Obr. 33 je také patrné připojení elektricky poháněného čerpadla vodního chlazení. Čerpadlo je připojeno k nízkonapěťové části na 24 V z olověných akumulátorů. Olověné akumulátory jsou součástí stávající trakční elektrosoustavy. Slouží k napájení palubní sítě elektrobusu a v průběhu jízdy jsou dle potřeby dobíjeny z trakčních Li-ion akumulátorů.

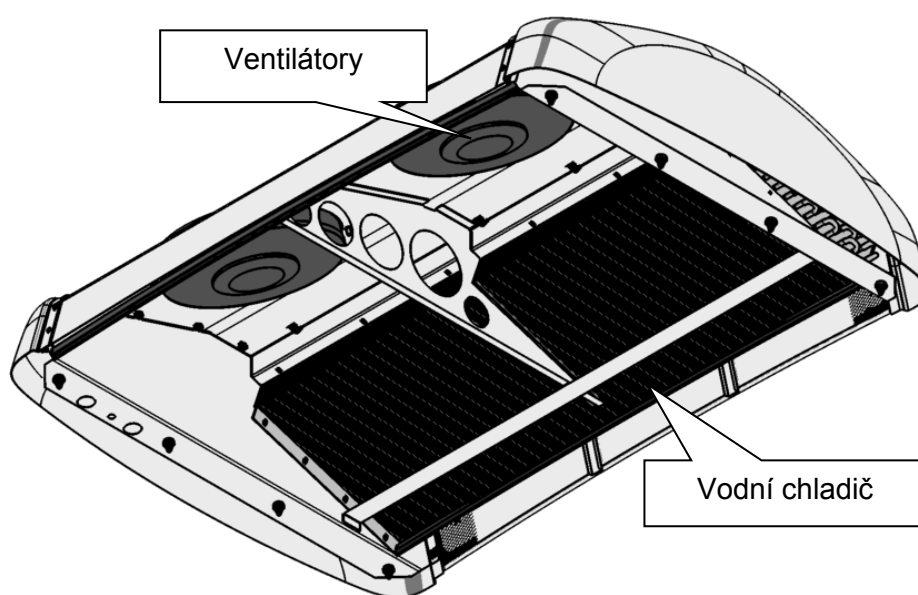


Obr. 33 Schéma trakční elektrosoustavy elektrobusu SOR s RE

11.1 Chlazení motoru

Jelikož je motor RE chlazen chladicí kapalinou je třeba počítat se zástavbou chladiče. K tomuto účelu se nabízí střešní nástavba, kde je možné využít již existující řešení. Jak již bylo řečeno elektromotor i trakční měnič elektrobuse SOR jsou také chlazeny kapalinou a chladič je umístěn ve střešní nástavbě. Pro chladič motoru RE je možné využít existující střešní nástavbu a pouze zvolit adekvátně výkonný vodní chladič.

Odhadovaný výkon motoru RE po přestavbě na plyn je 16.4 kW. Tomuto výkonu přibližně odpovídá výkon potřebného chlazení Q_{chl} . Výkon chladiče elektromotoru a trakčního měniče je přibližně 16 kW. Nabízí se tedy použití stávající střešní nástavby i s chladičem.



Obr. 34 Střešní nástavba s kapalinovým chladičem

Tepelný spát Δt na chladiči je cca 7°C resp. 7 K. Čerpadlo chladicího okruhu je poháněno elektricky. Potřebný průtok čerpadla lze stanovit následující postupem (měrná tepelná kapacita chladicí kapaliny c_{p-ch} odpovídá 3.9 kJ·kg⁻¹·K⁻¹):

$$Q_{chl} = \dot{m}_{ch} \cdot c_{p-ch} \cdot \Delta t \Rightarrow \dot{m}_{ch} = \frac{Q_{chl}}{c_{p-ch} \cdot \Delta t}$$

$$\dot{m}_{ch} = \frac{16}{3.9 \cdot 7} = 0.59 \left[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \right] \approx 0.57 \left[\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \right]$$

S ohledem na vypočtený průtok je použitelné například elektrické vodní čerpadlo od firmy Continental.

12 Zhodnocení

Zástavbou pístové spalovací generátorové jednotky do elektrobusu dojde k hybridizaci pohonu. Vznikne tak hybridní autobus se sériově hybridním pohonem. Je obecně platné, že sériově hybridní pohon je pouze malým producentem lokálních emisí a de facto po čistě lokálně bezemisních pohonech je producentem nejmenším.

Hybridní kombinace elektromotoru a spalovacího motoru je často považována za dočasné řešení do příchodu akumulátorů s dostatečnou kapacitou. Minimálně do té doby se ale jedná o potenciálně zajímavé řešení, kterým se reálně zabývá celá řada firem. Hovoříme ale většinou o benzinovém nebo dieselovém hybridním pohonu, hybridní pohon na CNG je celkem rarita. Lze to odůvodnit hned dvojím způsobem:

Jednak vozidla s pohonem na CNG nejsou sami o sobě, oproti vozidlům s benzinovým nebo dieselovým pohonem, příliš rozšířená. Co je příčinou tohoto fenomén by bylo na dlouhé úvahy a v podstatě není úkolem této práce se jím zabývat. Druhým důvodem by mohla být hmotnost. Příslušenství motoru s pohonem na CNG je poměrně hmotné, pokud přihlídneme ke skutečnosti, že výrobci elektromobilů případně elektrobusů vyvíjejí velké úsilí na snížení hmotnosti vozidla tak, aby alespoň částečně vykompenzovali hmotnost těžkých akumulátorů, může se hybridní pohon na CNG s těžkými tlakovými nádobami zdát poněkud nešťastný.

V případě řešení zástavby RE do elektrobusu, se tak nabízí porovnání navrženého řešení s navýšením kapacity akumulátorů k dosažení požadované dojezdové vzdálenosti - 250 km. Pokud uvažuji dosavadní průměrnou spotřebu 0.89 kWh/km konstantní, velikost navýšené kapacity lze určit následující úvahou:

požadovaná kapacita akumulátoru = denní proběh autobusu · průměrná spotřeba

požadovaná kapacita akumulátoru = 223 kWh

skutečná kapacita akumulátoru = $\frac{\text{požadovaná kapacita akumulátoru}}{\text{podíl užitečné kapacity}}$

skutečná kapacita akumulátoru = 278.8 kWh

navýšení kapacity = skutečná kapacita akumulátoru - současná kapacita akumulátoru

navýšení kapacity = 105.8 kWh

Kapacita jednoho Li-ion akumulátoru je maximálně 0.96 kWh. Hmotnost akumulátoru je 10 kg. Bez mála 106 kWh odpovídá 111 Li-ion akumulátorům o celkové hmotnosti **1110 kg**. Tento součet nezahrnuje případné nosiče a úpravy karoserie, použitou kabeláž atd.

Bilance hmotnosti pro použitý RE a příslušenství je přibližně následující - Tab. 9.

	Hmotnost
RE	40 kg
Upevňovací rám na RE	11 kg
Upevňovací rám na tlakové nádoby	135 kg
Tlakové nádoby (prázdné)	160 kg
Palivo - CNG	64 kg
Nástavba s chladičem	50 kg
Celkem	460 kg

Tab. 9 Přibližná hmotnost RE i s veškerým příslušenstvím

Ač je to pouze přibližný výpočet a v Tab. 9 jsou uvedeny pouze komponenty s významnějším podílem hmotnosti, lze na základě něho posoudit, o jakou úsporu hmotnosti se v případě použití RE na CNG namísto dalších akumulátorů jedná. Z Tab. 9 je ale také dobře patrné, jakou měrou se na celkovém součtu hmotnosti podílí tlakové nádoby na CNG a upevňovací rám pro tlakové nádoby. V případě provozu RE na benzín by hmotnost palivových nádrží byla zanedbatelná.

Na druhou stranu RE provozován na zemní plyn produkuje v porovnání s benzínovým motorem až o 25% nižší emise CO₂, o 20% nižší emise NO_x a až o 80% méně uhlovodíků. Takřka neprodukuje aromatické uhlovodíky, aldehydy a pevné částice. Vykazuje minimální produkci oxidu siřičitého a oxidu uhelnatého. Tedy pokud má být přínosem elektrických autobusů snížení lokální produkce výfukových emisí, je spalovací motor provozován na zemní plyn při hybridizaci pohonu elektrobuse vhodným řešením.

Z ekonomického hlediska je situace přibližně následující, v Tab. 10 jsou porovnány ceny jednoho vozokilometru standardního elektrobuse, dieselového autobusu a autobusu s pohonem na CNG. Tab. 10 zohledňuje pouze náklady na energii, nikoliv pořizovací náklady a náklady na údržbu autobusů. V takovém případě je cena jednoho vozokilometru elektrobuse výrazně nižší.

	Nafta	CNG	Elektřina
Cena potenciální energie	3.16 Kč·kWh ⁻¹	1.96 Kč·kWh ⁻¹	4.5 Kč·kWh ^{-1*}
Průměrná spotřeba paliva	0.4 dm ³ ·km ⁻¹	0.5 m ³ ·km ⁻¹	–
Hustota při 15°C	822 kg·m ⁻³	0.7 kg·m ⁻³	–
Výhřevnost paliva	11.8 kWh·kg ⁻¹	13.6 kWh·kg ⁻¹	–
Průměrná spotřeba energie	3.88 kWh·km ⁻¹	4.76 kWh·km ⁻¹	0.89 kWh·km ^{-1**}
Cena za vozokilometr	12.26 Kč·km⁻¹	9.33 Kč·km⁻¹	4.01 Kč·km⁻¹

Tab. 10 Porovnání ceny jednoho vozokilometru elektrobuse a autobusu s pohonem na naftu a zemní plyn

**uváděná cena elektřiny je za tzv. denní tarif*

***průměrná spotřeba elektrobuse SOR*

Ovšem pořizovací cena elektrobuse je oproti ceně běžného autobusu výrazně vyšší. Například cena standardního 12 m dieselového nízkopodlažního městského autobusu SOR je cca 5 milionů. Oproti tomu cena elektrobuse SOR EBN 11 je cca 8.5 milionu. Dalším problémem je omezená životnost akumulátorů. Ta odpovídá cca 400 tis. km, tedy přibližně polovině životnosti autobusu. Cena nových akumulátorů je dnes

cca 2 miliony Kč. Naproti tomu u běžného autobusu se s takto výraznými investicemi v průběhu životnosti nepočítá.

Pro bližší zhodnocení finanční nákladovosti Tab. 11 uvažují cenu energií do budoucna jako neměnnou.

	Dieselový autobus	Autobus CNG	Elektrobus
Pořizovací cena	5 mil. Kč	6.5 mil. Kč	8.5 mil. Kč
Cena energií po ujetí 800 tis. km	9.8 mil. Kč	7.5 mil. Kč	3.2 mil. Kč
Výměna akumulátorů	–	–	2 mil. Kč
Náklady celkem*	14.8 mil. Kč	14 mil. Kč	13.7 mil. Kč

Tab. 11 Pořizovací a provozní náklady elektrobuse a autobusu s pohonem na naftu a zemní plyn

**do celkových nákladů nejsou zahrnuty běžné servisní prohlídky, menší opravy atp.*

Z Tab. 11 vyplývá, že celková bilance je pro elektrobuse poměrně příznivá, a to i přes vysoké pořizovací náklady a nutnou výměnu akumulátorů. V praxi lze očekávat provozní náklady elektrobuse ještě o něco nižší, neboť dopravní společnosti, které elektrobuse provozují, budou mít jistě tendenci využívat k dobíjení akumulátorů převážně tzv. noční tarif. Samotné elektrobuse by měly být také dále schopny těžit ze své mechanické jednoduchosti. Pokud je ale elektrobus osazen RE s pístovým spalovacím motorem, tak se celá záležitost zkomplikuje a finanční bilance Tab. 11 se změní v neprospěch elektrobuse.

V případě využívání RE je akumulátorům část elektřiny dodána standardně ze sítě a část z generátoru. Cena elektřiny vyrobené RE se odvíjí od ceny paliva. Celková cena je dána poměrem elektřiny dodané ze sítě a elektřiny vyrobené RE. Konkrétně v tomto případě elektrická energie dodaná standardním dobíjením ze zásuvky odpovídá 138 kWh. Zástavba RE je dimenzována na 13-hodinový provoz na plný výkon 14.8 kW. Spotřeba CNG odpovídá 4.01 kg CNG za hodinu. Z toho vyplývá, že množství energie vyrobené RE v průběhu jednoho pracovního proběhu elektrobuse je maximálně 192 kWh a to při celkové spotřebě 52 kg CNG. Očekávané množství vyrobené energie RE v průběhu jednoho pracovního proběhu je pouze 85 kW. Tomu odpovídá spotřeba pouze 23 kg CNG.

	Předpokládané využití RE	Maximálně využitý RE
Pořizovací cena	10 mil. Kč*	
Průměrná cena za kWh	5.5 Kč·kWh ⁻¹	6.8 Kč·kWh ⁻¹
Průměrná spotřeba	0.89 kWh·km ⁻¹	
Cena energií po ujetí 800 tis. km	4.4 mil. Kč	4.8 mil. Kč
Výměna akumulátorů	2 mil. Kč	
Náklady celkem*	16.4 mil. Kč	16.8 mil. Kč

Tab. 12 Pořizovací a provozní náklady pro elektrobus SOR EBN 11 s RE na zemní plyn

**Očekávám, že zástavbou RE se zvýší pořizovací cena autobusu o cca 1 až 1.5 mil. Kč.*

Ač jsou výše uvedené výpočty velmi přibližné, lze z nich vyčíst, že provoz samotného elektrobusu je srovnatelný, resp. nepatrně výhodnější, než provoz klasického autobusu, případně autobusu s pohonem na CNG. Nicméně nelze zapomínat, že elektrobus trpí neduhem omezené dojezdové vzdálenosti. Pokud je elektrobus osazen RE, je tento nedostatek minimalizován, ovšem za cenu zvýšení pořizovacích a provozních nákladů.

13 Závěr

Diplomová práce ve své úvodní části pojednává o problematice elektrovozidel, přesněji o problematice uskladnění elektrické energie. Ač akumulátory urazily od počátku elektromobility velký kus cesty, stále trpí řadou nedostatků - relativně nízkou kapacitou, omezenou životností atd. V návaznosti na problematiku akumulátorů se práce zabývá problematikou městských elektrobusů.

Městské elektrobusy nabízejí cestujícím stejné podmínky dopravní obslužnosti jako klasické autobusy. Jejich nevýhodou je omezená dojezdová vzdálenost, která bývá maximálně 150 km, denní proběh běžného městského autobusu ale 250 až 300 km. Tento nedostatek se snaží řešit celá řada firem různými systémy průběžného dobíjení a několik těchto systémů je v práci blíže specifikováno. Zpravidla se jedná o systémy, které vyžadují vybudování vlastní nákladné infrastruktury. Problémem může být vzájemná nekompatibilita systémů od jednotlivých výrobců. Jedná se tedy o řešení vhodné pro dopravní podniky, které provozují více vozidel - elektrobusů jednoho výrobce. Otázkou ale zůstává další vývoj těchto systémů, resp. zda bude vybudovaná infrastruktura vyhovovat požadavkům i další generaci elektrobusů.

Další možností, jak zvýšit dojezdovou vzdálenost elektrobusu, resp. elektrovozidla, je zástavba RE. Vývojem a distribucí RE se zabývá mnoho firem a může mít mnoho podob. Lze se setkat s RE s pístovým spalovacím motorem, s Wankelovým motorem, s plynovou turbínou nebo s palivovým článkem. V diplomové práci je uvedena specifikace několika konkrétních RE v různých provedení a hlavně vzájemné porovnání předností a nedostatků jednotlivých provedení. Nejběžnější a obvykle také nejvýhodnější je RE v podobě generátorové jednotky s pístovým spalovacím motorem.

V praktické části se práce zabývá návrhem, resp. volbou RE s pístovým spalovacím motorem a jeho úpravou pro provoz na CNG. Dále je řešena zástavba RE a vysokotlakých nádob, zapojení elektrosoustavy a chlazení motoru RE. Výsledkem je koncept úpravy elektrobusu na sériově hybridní autobus s agregátem na CNG.

Na závěr práce je celý koncept zhodnocen jak po ekonomické, tak ekologické stránce. Ekologicky je koncept přínosný především nízkou lokální produkcí výfukových emisí. Zhodnotit navržený koncept z pohledu ekonomického je poměrně složité. Je zřejmé, že počáteční investice dalece přesahují pořizovací náklady klasického autobusu, ovšem provozní náklady elektrobusů obecně, i případných hybridních kombinací, jsou v současnosti vlivem příznivé ceny za kWh elektrické energie a vysoké účinnosti elektromotorů nižší. Tedy samotný elektrobus, při současných cenách za energii a pořizovacích nákladech autobusu a elektrobusů, může být ve výsledku více či méně výhodnější než klasický autobus (výsledný součet bude hodně ovlivněn tarifem nabíjení akumulátorů - denní/noční proud). U navrženého konceptu lze očekávat celkové náklady v porovnání s klasickým autobusem spíše vyšší, v ideálním případě snad srovnatelné (akumulátory budou dobíjeny především nočním proudem, cena zástavby RE bude snížena...).

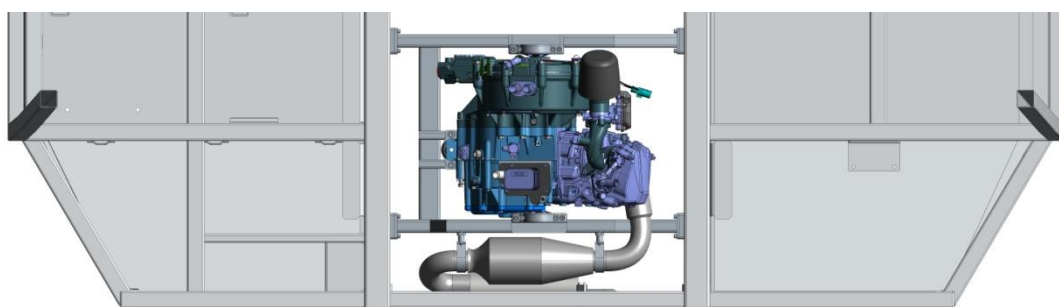
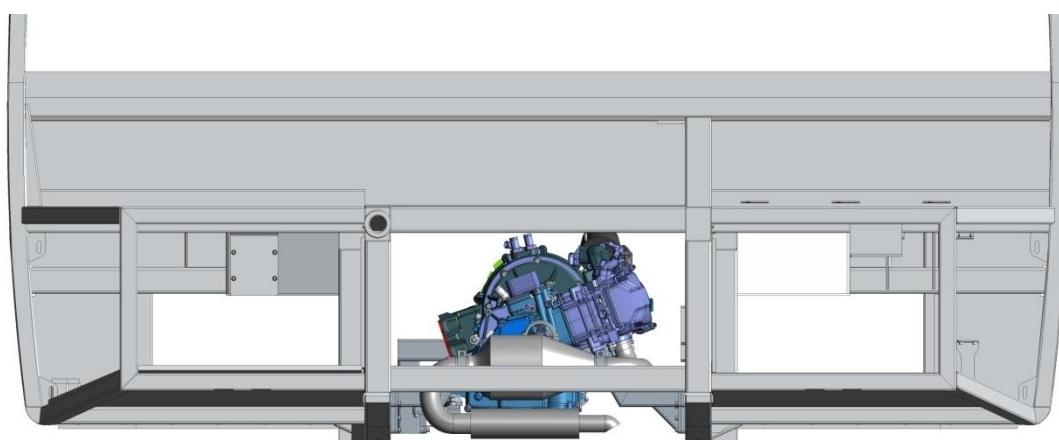
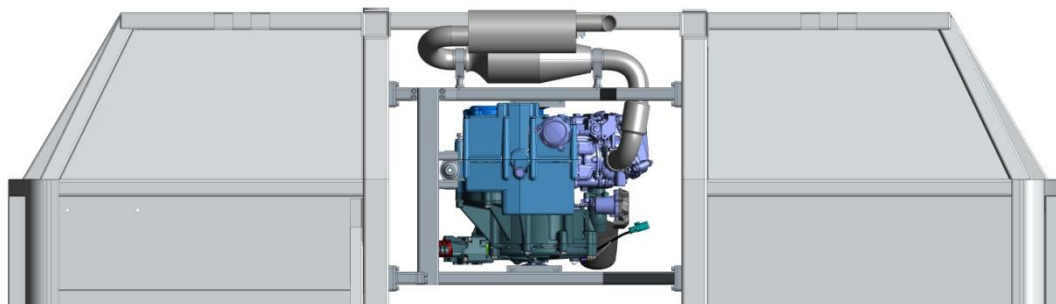
14 Zdroje

- [1] Historie elektromobilů a automobilů na CNG v osobní dopravě. In: [online]. [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.ekobonus.cz/historie-elektromobilu-a-automobilu-na-cng-v-osobni-doprave>
- [2] Rozdělení hermetických lithiových akumulátorů. [online]. [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory/rozdeleni-hermetickych-lithiovych-akumulatoru>
- [3] Záporná elektroda lithných sekundárních článků [online]. [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_veřejne.php?file_id=10210.
Doktorská práce.
- [4] E-mobilita v MHD. In: [online]. [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/42.php>
- [5] Elektrobusy SOR. [online]. [cit. 2015-02-17]. Dostupné z: <http://www.sor.cz/site/elektrobusy>
- [6] Studie zu Range Extender Konzepten für den Einsatz in einem batterieelektrischen Fahrzeug – REXEL. [online]. [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: <http://www.dlr.de/fk/Portaldata/40/Resources/dokumente/publikationen/Abschlussbericht - REXEL - 2012-03-26.pdf>
- [7] Mikroturbína [online]. [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: <http://www.mikroturbina.cz/mikroturbina.htm>
- [8] Clean and energy-efficient vehicles. In: [online]. [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://www.flandersdrive.be/sites/default/files/publicaties/Clean%20%26%20Energy-Efficient%20Vehicles.pdf>
- [9] Projekt TOSA E-BUS nabíjecí systém ABB. In: [online]. [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/pdf/SeminarEbusy/Kuzelka.pdf>
- [10] Bombardier PRIMOVE: 200kW indukční dobíjení na veřejných komunikacích [online]. [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://www.proelektrotechniky.cz/elektromobilita/45.php>
- [11] Urban buses: alternative powertrains for Europe. In: [online]. [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: <http://www.fch-ju.eu/page/publications>
- [12] Linear Combustion Engine [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.lceproject.org/index.php>
- [13] Free Piston Engine Linear Generator [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.tytlabs.com/tech/fpeg/index.html>
- [14] Palivové články [online]. [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/410-palivove-clanky>

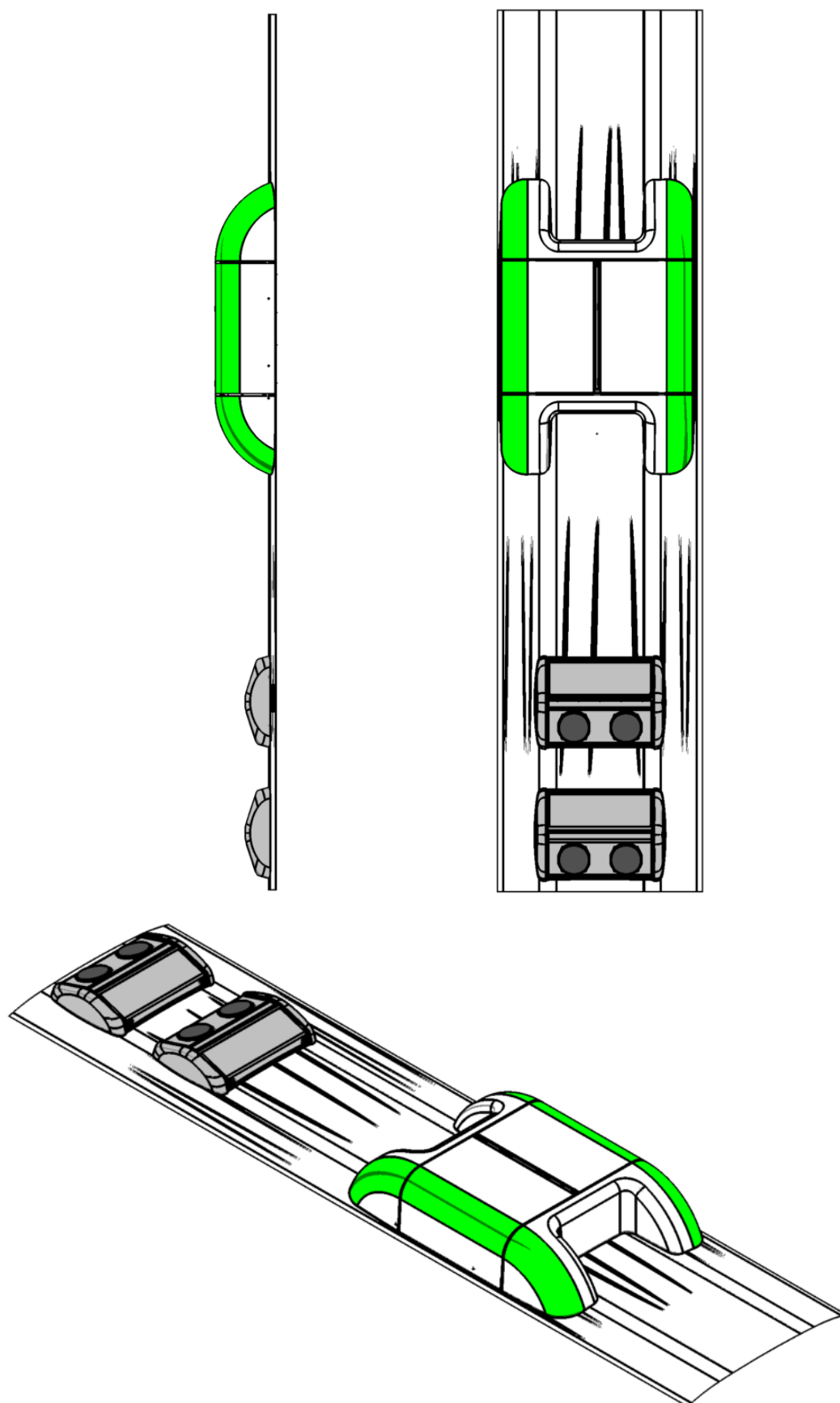
- [15] DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT AND COMPACT RANGE EXTENDER ENGINE [online]. [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.mahle.com/>
- [16] WB-LYP300AH [online]. [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-lyp300aha?category_id=176
- [17] HULÍNSKÁ, Linda. ÚPRAVA SPALOVACÍHO MOTORU PRO PROVOZ NA ZEMNÍ PLYN. Liberec, 2013. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [18] Single Cylinder 25kW Range Extender for High Compactness and NVH Performance [23rd Aachen Colloquium Automobile and Technology 2014]. [cit. 2015-05-10]. info: <http://www.aachener-kolloquium.de/>
- [19] AVL Rotary Range Extender [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.fuerex.eu/userdata/file/2013.01.30-eMobility-Conference-Graz/FUEREX-eMobility-P04-Rotary_REX_concept-AVL-Sifferlinger-2013.01.30.pdf
- [20] Electric Vehicle with Range Extender – The developement challenge [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.espan.at/uploads/media/E-Mobilitaet_Praesentationen_Teil5.pdf
- [21] TriHyBus - Vodíkový autobus s palivovými články [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.h2bus.cz/>
- [22] Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.g-energy.com.my/fuel_cell_tech_PEMFC.html
- [23] Capstone Drive Solution - Range Extender [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: http://www.capstoneturbine.com/docs/CAP1100_Drive_Solution_Range_Extender_LR.pdf

Přílohy

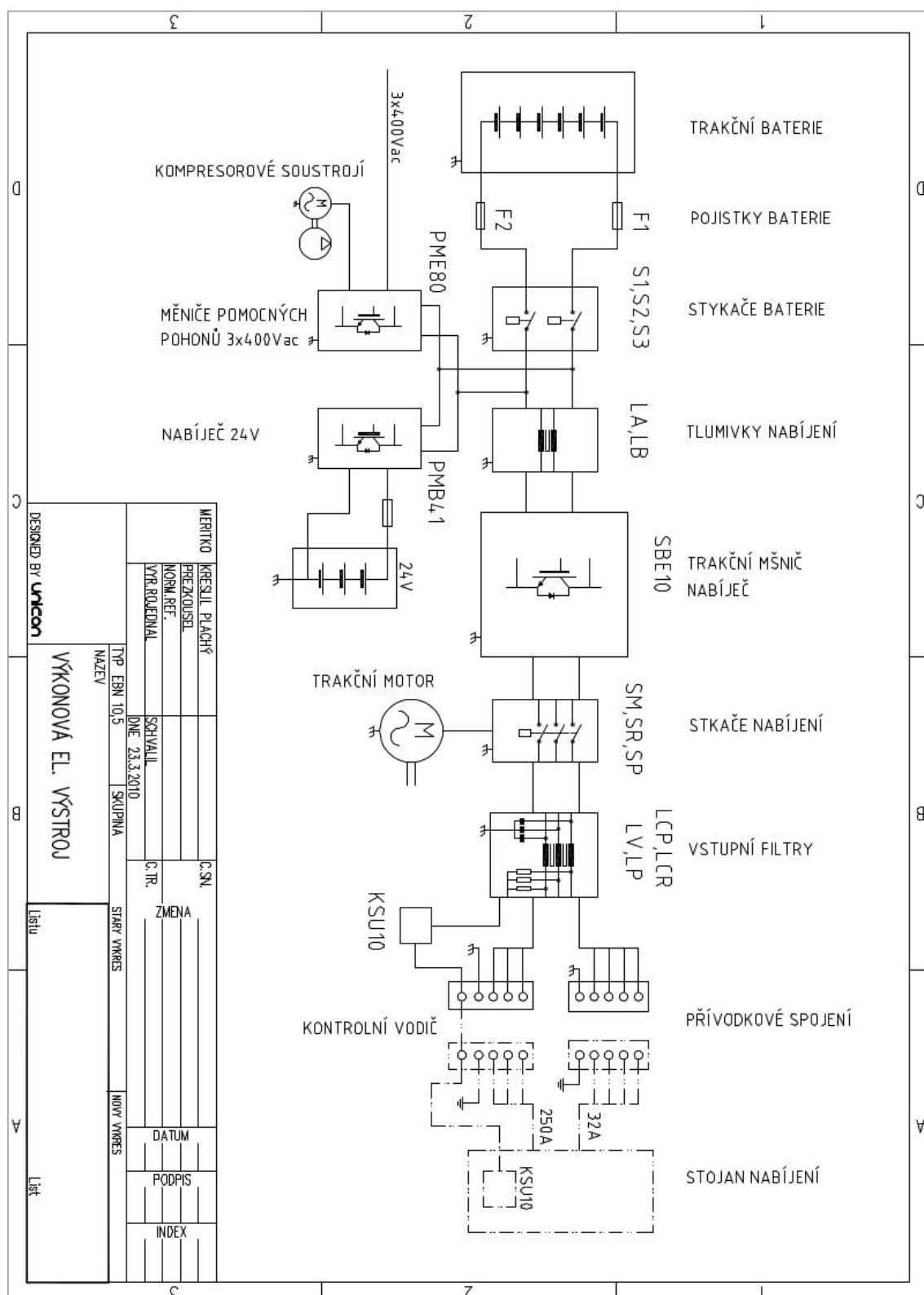
Příloha 1: Vizualizace zástavby RE od AVL v elektrobusu SOR EBN 11



Příloha 2: Vizualizace střechy včetně chladících boxů a nástavby s tlakovými lahvemi



Příloha 3: Původní zapojení trakční elektrosoustavy elektrobusu SOR EBN 11



Příloha 4: Výkresová dokumentace

KVM-DP-691-100	Ram
KVM-DP-691-110	Predni_nosnik
KVM-DP-691-120	Zadni_nosnik
KVM-DP-691-130	Podelny_nosnik
KVM-DP-691-14	Svorka 1-2
KVM-DP-691-15	Svorka 2-2
KVM-DP-691-111	Patka_1
KVM-DP-691-112	Uchyt
KVM-DP-691-113	Patka_zavit_2
KVM-DP-691-121	Patka_4
KVM-DP-691-122	Patka_zavit_3
KVM-DP-691-123	Drzak_vyfuk
KVM-DP-691-131	Patka_2
KVM-DP-691-132	Patka_3
KVM-DP-691-133	Upevneni_drzak