

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Modelové řízení hybridních pohonů automobilů MHD
Bc. Radek Vosáhlo

Diplomová práce
2009

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek VOSÁHLO**

Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**

Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**

Název tématu: **Modelové řízení hybridních pohonů automobilů MHD**

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

Dle pokynů vedoucího diplomové práce

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:
Dle pokynů vedoucího diplomové práce

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Milan Graja, CSc.**
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.
vedoucí katedry

dne

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Prohlašuji:

Tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 25. května 2009

Bc. Radek Vosáhlo

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Milanu Grajovi, CSc. za řadu cenných rad a konzultací, které mi pomohly úspěšně dokončit diplomovou práci.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jaroslavu Havlovi z DPmP za materiály, které mi ke zpracování diplomové práce poskytl a Mgr. Veronice Štusové za pomoc s překladem zahraničních materiálů.

Anotace

Hlavním cílem této práce je možný model řešení hybridního pohonu pro vozidla MHD. Důvodem je velký zájem výrobců o tuto problematiku a perspektiva této konstrukce v nejbližších letech. Zavedení těchto vozidel by mělo pozitivní vliv na ekologii a ekonomii provozu, stejně jako na zlepšení trakčních a dynamických vlastností. Výsledkem práce je návrh daného modelu, zhodnocení ekologického dopadu a ekonomičnost daného projektu.

Dále je zde uveden přehled možných zdrojů elektrické energie, stručný přehled současných autobusů s těmito pohony a pokud byly dostupné, tak i jejich parametry. Podklady pro tuto práci tvoří především zahraniční odborná literatura a informace ze sítě internet.

Klíčová slova

hybridní pohony, baterie, ekologie, ekonomie

Annotation

The main objective of this thesis is a possible solution of a hybrid driving mechanism for public transport vehicles. The purpose is a strong producers' interest in these problems, and the perspective of this construction in coming years. Using these vehicles would positively influence ecology and operating economy, as well as the improvement of traction and dynamic qualities. The result of the thesis is a particular model concept, evaluating the ecological impact, and the particular project economics.

Furthermore, a survey of possible electricity sources, a brief survey of present buses using these driving mechanism and their parameters if available, are introduced. All the data used for this thesis are mostly acquired in foreign technical literature and in the internet.

Keywords

hybrid propulsion systems, batteries, environmental science, economy

Obsah

1 Úvod	str.9
2 Zdroje elektrické energie hybridních pohonů	str.10
2.1 Akumulátorové baterie	str.10
2.2 Superkondenzátory	str.11
2.3 Palivové články	str.13
2.3.1 Typy palivových článků	str.14
2.3.2 Využití palivových článků	str.15
2.4 Setrvačnick	str.16
2.5 Dílčí závěr	str.17
3 Analýza modelových řešení	str.18
3.1 Sériové pohony	str.18
3.2 Paralelní pohony	str.19
3.3 Kombinované pohony	str.20
3.4 Dílčí závěr	str.21
4 Přehled současných automobilů s hybridními pohony	str.22
4.1 Úvod	str.22
4.2 Přehled autobusů s hybridním pohonem	str.22
4.3 Dílčí závěr	str.34
5 Model hybridního pohonu	str.35
5.1 Výpočet výkonu pohonu	str.35
5.2 Energetická bilance jízdního cyklu	str.39
5.2.1 Vlastní výpočet	str.40
5.3 Dílčí závěr	str.43
6 Ekologická zátěž	str.44
6.1 Výpočet ekologické zátěže starými autobusy a novým modelem	str.44
6.2 Dílčí závěr	str.47
7 Závěr	str.48

1 Úvod

Počátky automobilní techniky sahají až do 19. století. Jejich cílem bylo ulehčit lidem práci a také zvýšit pohodlí při cestování. Dříve byly automobily znakem moci a bohatství, takže je měli pouze lidé s vyšším postavením ve společnosti. Proto z důvodu zabezpečení přepravy osob začala vznikat městská hromadná doprava. První zmínky v Pardubickém regionu jsou z poloviny 20. století, kdy měla MHD zabezpečit přepravu osob na vlakové nádraží a odsud mohli lidé cestovat vlakem po nově vybudované železniční síti.

První zmínky o trolejových vozidlech se datují k roku 1903. V té době to byl jen prototyp elektromobilu, který pomocí dvou tyčových sběračů odebíral stejnosměrný proud z vodičů. První pravidelná autobusová doprava zde začala v roce 1908, ale jednalo se spíše o regionální dopravu. Další plány na rozvoj MHD se až do 50. let nedařilo realizovat.

Od té doby doprava v našem městě výrazně zhoustla stejně tak jako jinde ve světě. Se zvýšenou hustotou provozu se ale zvyšují nejen náklady na provoz, ale i znečištění životního prostředí. Proto se výrobci začali zabývat také alternativními pohony, které můžeme již dnes vidět v ulicích měst.

Hybridní pohon

Automobil s hybridním pohonem představuje vozidlo, které při svém pohonu využívá více než jeden zdroj energie. Hybridní pohony využívají především výhod jednotlivých pohonů při různých pracovních stavech vozidla.

Dnes se testují a vyvíjejí tyto druhy hybridních pohonů:

- spalovací motor + elektromotor + akumulátor,
- spalovací motor + elektromotor + externí přívod elektrické energie (trolej),
- spalovací motor + setrvačnick,
- plynová turbína + generátor + akumulátor + elektromotor.

Ve své práci se zabývám jen malou částí této problematiky se zaměřením na první z těchto druhů hybridních pohonů. Hlavním cílem mé práce je ideový návrh vlastního modelu řízení hybridního pohonu vozidla MHD. Cílová skupina jsou autobusy pro městský provoz, neboť v městské provozu nejvíce vyniknou výhody tohoto druhu pohonu.

2 Zdroje elektrické energie hybridních pohonů

2.1 Akumulátorové baterie

Akumulátor elektrický - vratný elektrochemický článek, užívaný jako zdroj stejnosměrného elektrického proudu

Akumulátorové baterie dělíme podle použití na startovací, trakční a staniční. Startovací akumulátory slouží pro spouštění motorů, trakční akumulátory pro napájení trakčních motorů a staniční akumulátory pro napájení stálých sítí. V mé práci řeším pouze problematiku trakčních akumulátorů. Akumulátory dělíme do několika skupin podle materiálu elektrod:

- k nejrozšířenějším patří akumulátor elektrický kyselý olověný; kladnou elektrodou je olověná deska s oxidem olovičitým, zápornou elektrodou pórovitá olověná deska, elektrolytem roztok kyseliny sírové nasycený síranem olovnatým.
- akumulátor elektrický alkalický Ni-Cd nebo Ni-Fe, kladná elektroda je z hydratovaného oxidu niklitého, zápornou elektrodu tvoří jemně rozptýlené kadmium (Cd) nebo železo (Fe). Jsou konstruovány jako otevřené (problém ekologicky závadného kadmia) nebo hermetizované. Provozní teplotou je teplota okolí.
- Nikl – metalhydridové akumulátory Ni-MH jsou mezi výrobci elektromobilů a hybridních automobilů nejrozšířenější. Oproti ostatním se rychle dobíjejí, mají velkou měrnou kapacitu, díky čemuž jsou i lehčí.

Typ akumulátoru	Měrná energie (Wh/kg)	Měrný výkon (W/kg)	Účinnost (%)	Životnost (počet cyklů)	Odhad měrných nákladů (US \$/kWh)
Olověný	35-50	150-400	80	500-1000	100-150
Ni-Cd	30-50	100-150	75	1000-2000	250-350
Ni-Mh	60-80	200-300	70	1000-2000	200-350
Al-Air	200-300	100	<50	-	-
Zn-Air	100-220	30-80	60	500	90-120
Na-S	150-240	230	85	1000	200-350
Na-S-Cl	90-120	130-160	80	1000	250-350
Li-Pol	150-200	350	-	1000	150
Li-Ion	80-130	200-300	>95	1000	200

Tab. 1 - Základní parametry vybraných akumulátorů (převzato z [1])

Dále akumulátory dělíme na údržbové a bezúdržbové. Jejich bezúdržbovost spočívá v tom, že u nich nemusíme dolévat destilovanou vodu, kterou se elektrolyt dolévá tak, aby v něm byly elektrody ponořeny. Správnou údržbou akumulátorů dosahujeme delší životnosti a spolehlivosti akumulátorů.

2.2 Superkondenzátory (upraveno podle [2])

Akumulátory stále tvoří úzké hrdlo využití drobné elektroniky. Jejich dlouhé nabíjení, nízká kapacita, malá proudová zatížitelnost a životnost jsou omezujícími faktory pro návrh špičkových zařízení. Všechny problémy vyřeší kondenzátory z nanotrubeček s vysokou kapacitou.

Superkondenzátory nejsou nová věc. Už v roce 1957 si General Electric nechal patentovat kondenzátor s porézní uhlíkovou elektrodou. Na tomto principu jsou vysokokapacitní kondenzátory založeny dodnes a používají se v mnoha aplikacích včetně hybridních automobilů. Jejich nevýhodou je desetkrát až dvacetkrát menší kapacita v poměru k hmotnosti (3 až 5 Wh/kg) a vyšší cena. Jinak převažují výhody – rychlé nabití a vysoké vybíjecí proudy, trvanlivost mnoho tisíc cyklů, nízká toxicita a účinnost vyšší než 95 %. Uhlíkovou elektrodu tvoří grafitový aerogel (extrémně porézní pěna) podobný nanopěně. Nyní vědci vytvořili elektrody z pole nanotrubeček, které nabízí ještě větší plochu k uložení elektronů v kondenzátoru, tak zvyšují jeho měrnou kapacitu na úroveň běžných akumulátorů.

Nanotrubky - představte si je jako stočenou šestiúhelníkovou síť – např. pláštěv včelího vosku zatočenou do trubky – do každého rohu šestiúhelníku dejte atom uhlíku a přiměřeně zmenšete tak, aby výsledek měl v průměru pár nanometrů a na délku pár mikrometrů.

Nanopěna - vědci z Canberské univerzity bombardovali cíl ze sklovitého uhlíku (Což je grafit s nějakými příměsemi, který se také používá jako elektroda) umístěný v trubce z oxidu křemičitého vyplněné argonovou atmosférou laserem s frekvencí 10 tisíc pulzů za vteřinu. Když dosáhnul teploty kolem 10 tisíc °C (To už byl v plynné stavu – teplota vypařování grafitu je 3500 °C) začal se usazovat na stěnách trubky a vytvořil křížící se síť uhlíkových trubiček dlouhých pouze několik nanometrů, kterou vědci nazvali nanopěnou. Na nanopěně jsou nejzajímavější její magnetické vlastnosti. Je totiž přitahována magnety. Zvláštní také je, že po několika hodinách při pokojové teplotě své magnetické vlastnosti ztratí. Je polovodivá a vzhledem ke své nízké hustotě (pouze 0,02 g/cm³) také velmi špatně vede teplo.

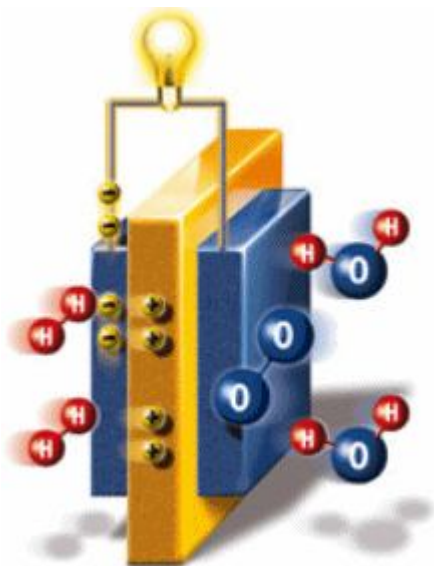
charakteristika	olověná baterie	superkondenzátor
nabíjecí doba	1 -5 h	0,3 - 30 s
vybíjecí doba	0,3 - 3 h	0,3 - 30 s
měrná energie [Wh.kg ⁻¹]	10 - 100	1 10
měrný výkon [W.kg ⁻¹]	< 1000	< 10 000
životnost [počet cyklů]	1000	> 500 000
účinnost nabíjení/vybíjení [%]	70 - 85	85 - 98

Tab. 2 - Porovnání AKB a superkondenzátoru

Superkondenzátory jsou ideální náhradou za akumulátory. Až se budou vyrábět levně s dostatečnou kapacitou a nízkou hmotností, nebudou mít v podstatě nevýhody. Vysoká účinnost, kapacita, nabíjecí rychlosti a vybíjecí proudy, vysoká odolnost, téměř neomezená životnost a nízké ztráty jsou přesvědčivé argumenty v jejich prospěch.

2.3 Palivové články (upraveno podle [3])

Palivový článek je elektrochemické zařízení, uskutečňující přímou přeměnu chemické energie vodíku a kyslíku na energii elektrickou, vodu a teplo. Tato přeměna se děje katalytickými reakcemi na elektrodách a je v podstatě založena na obráceném principu elektrolýzy vody.



Obr. 1 - Schéma pal. článku (převzato z [3])

Palivový článek se skládá z elektrolytu (žlutá barva), elektrod (modrá barva) a elektrického okruhu. Elektrolyt musí být iontově vodivý, v našem případě se jedná o proton vodič. Pro elektrický proud musí být dielektrikem, elektrony tedy propouštět nesmí. Vodík je přiváděn k anodě, na které se katalyticky štěpí na protony a elektrony. Protony přechází elektrolytem ke katodě, zatímco uvolněné elektrony přechází vnějším vedením a produkují elektrický proud. Ke katodě je přiváděn kyslík, který zde katalyticky reaguje s prostoupenými protony a elektrony za vzniku vody. Na obou elektrodách vzniká potenciální rozdíl kolem jednoho voltu, který při zatížení článku poklesne obvykle na hodnoty 0,5 – 0,8 V. Aby bylo dosaženo potřebného vyššího napětí, jsou desítky cel sériově uspořádány do jednotlivých svazků stavebnicovým způsobem. Jednotlivé svazky mohou být opět libovolně propojovány sériově nebo paralelně podle požadavků na výstupní napětí a proud.

Palivem do palivových článků může být vodík v plynném nebo kapalném stavu, dále nepřímá, vodík obsahující paliva. Z nich je vodík uvolňován tzv. reformovacím procesem. Mezi nejvýznamnější nepřímé zdroje vodíku patří zemní plyn, metan, propan a metanol, případně etanol.

2.3.1 Typy palivových článků

Palivové články se však dělí především podle typu elektrolytu. V současné době rozeznáváme následujících pět systémů (závorky obsahují zkratky běžně užívané v literatuře):

- Alkalické články (AFC's – alkaline fuel cells), v nichž je elektrolytem zpravidla zředěný hydroxid draselný KOH;
- Polymerní membránové články (PEM FC's – proton exchange fuel cells), v nichž je elektrolytem tuhý organický polymer;
- Články s kyselinou fosforečnou (PAFC's – phosphoric acid fuel cells), jejichž elektrolytem je jmenovaná kyselina (HPO₃);
- Články s roztavenými uhličitany (MCFC's – molten carbonate fuel cells), v nichž je elektrolyt tvořen směsí roztavených uhličitánů;
- Články s tuhými oxidy (SOFC's – solid oxide fuel cells), kde elektrolytem jsou oxidy vybraných kovů.

Druh	Nízkoteplotní		Středněteplotní	Vysokoteplotní		
	Alkalické AFC (Alkaline Fuel Cells)	Membránové PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cells)		Přímé metanolové DMFC (Direct Methanol Fuel Cells)	S tavenými karbonáty MCFC (Molten Carbonate Fuel Cells)	S pevnými oxidy SOFC (Solid Oxide Fuel Cells)
Elektrolyt	hydroxid draselný	kontoměničná membrána	kontoměničná membrána	kyselina fosforečná	tavené karbonáty lithia, vodíku, draslíku	oxid zirkoničitý s příměsí yttria
Pracovní teplota [°C]	60-100	20-80	20-130	170-250	600-650	800-1000
Pohyblivý iont	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ²⁻
Účinnost [%] (elektrická)	45-60	40-60	40	38-45	45-60	50-65
Výkon [kW]	do 20	do 250	do 10	50 - stovky	do několika MW	do několika MW
Požívané palivo	Vodík	Vodík, Reformovaná paliva	Methanol (Ethanol)	Vodík, Reformovaná paliva	Vodík, Nepřímá paliva	Všechny druhy bez reformování
Možné aplikace	Kosmické lodě, lodě, ponorky	Universální	Přenosné články	Výroba energie	Výroba energie	Výroba energie

Tab. 3 - Rozdělení a parametry palivových článků (převzato z [3])

2.3.2 Využití palivových článků

Přenosné palivové články

Zdroje elektrické energie pro elektronické přístroje, například pro notebooky, digitální fotoaparáty, záložní zdroje energie (UPS) pro stolní počítače, zdroje energie pro přenosné vysílače atp. Typický jmenovitý výkon těchto zařízení je v řádu desítek wattů a povětšinou se jedná o tzv. nízkoteplotní palivové články – membránové či přímé etanolové palivové články (PEM FC, DMFC).

Mobilní palivové články

Zdroje elektrické energie v nejrůznějších dopravních prostředcích. Vývoj těchto článků je zaměřen zejména na pohonné jednotky pro osobní automobily s typickými výkony v řádu desítek kilowattů na bázi iontoměničných membrán (PEM FC), které jako palivo využívají především plynný či zkapalněný vodík, popř. metanol. Ostatní aplikace mobilní palivových článků pokrývají široké spektrum využití i výkonů: jízdní kola, malé nákladní automobily a vozítka, autobusy; či speciální aplikace – výzkumné ponorky, kajak atp.

Stacionární palivové články

Zdroje elektrické a tepelné energie s širokým rozsahem instalovaných výkonů v závislosti na předpokládaném využití a dané specifikaci. Pro stacionární články se využívají všechny typy článků s výjimkou alkalických a přímých metanolových. Články s rozsahem jednotek kilowatt jsou určeny jako výhradní zdroj energie pro zajištění dodávek elektřiny a tepla do ucelených systémů (např.: pro byty a rodinné domy) nebo jako záložní zdroj většího rozsahu s využitím odpadního tepla produkovaného palivovým článkem. Články s výkonem v řádu desítek až stovek kilowatt se využívají jako zdroje energie (většinou jako součást bivalentního systému) pro větší celky (např. administrativní budovy, telekomunikační budovy, hotely, nemocnice). Typickým primárním palivem je zemní, popř. degazační, plyn, který je nutné na vstupu do palivového článku tzv. reformovat na vodík.

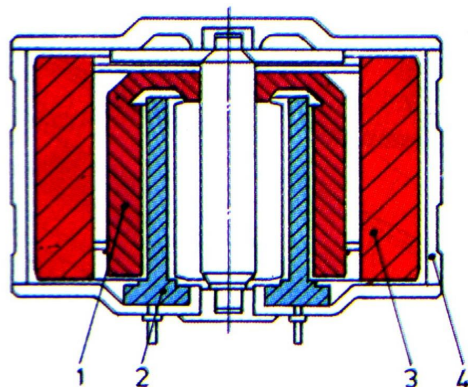
Speciální palivové články

Zařízení určené zejména jako zdroje elektřiny pro kosmický výzkum, kde se využívají jedinečně alkalické palivové články (AFC) spotřebávající velmi čistý vodík. Důvodem je extrémně vysoká cena těchto článků (USD/kW), neboť elektrody jsou vyráběny ze zlata či platiny. Výhodou je stabilita a jejich vysoká provozní spolehlivost. Například vesmírný program SKYLAB americké vesmírné agentury NASA využíval alkalických článků v extrémních podmínkách kosmického prostoru po dobu delší než patnáct let bez jediné poruchy.

2.4 Setrvačnick

Setrvačnick je rotační zařízení pro akumulaci kinetické energie. Obvykle má tvar dutého nebo plného válce, případně kola s paprsky. Využívá se jeho momentu setrvačnosti. Jeho hlavními částmi je stator a rotor. Jeho cílem je dlouhodobě rotovat s co nejmenšími ztrátami. Na statoru je elektrické vinutí, rotor mívá permanentní magnety. Při roztáčení setrvačnicku je na elektrické vinutí přiváděn elektrický proud, který vytváří točivé pole a roztáčí rotor setrvačnicku. V případě potřeby pohánění elektromotoru se odebírá indukovaný proud z vinutí statoru. Výhodou je rychlé roztočení a velká setrvačnost umožňující rychlé dobíjení akumulátorů. Pracuje při nízkých teplotách a neobsahuje žádné zdraví škodlivé chemikálie. Nevýhodou je, že pracuje pouze při spuštění motoru. Vhodný jako pomocný zdroj energie.

Moment setrvačnosti – je fyzikální veličina, která vyjadřuje míru setrvačnosti tělesa při otáčivém pohybu. Její velikost závisí na rozložení hmoty v tělese vzhledem k ose otáčení. Body (části) tělesa s větší hmotností a umístěné dále od osy mají větší moment setrvačnosti (převzato z [4]).



Obr. 2 – Schéma setrvačnickového akumulátoru (vakuový s odsáváním pro stanice APS) (převzato z [5])

- 1 – rotor s permanentním magnetem
- 2 – statorové vinutí
- 3 – setrvačnick vinutý závitem
- 4 – vakuová tlaková nádoba

2.5 Dílčí závěr

V dnešní době je již velké množství typů elektromotorů a akumulátorů, takže jejich výběr bude zvažovat pravděpodobně podle cílové skupiny vozidel. Ve skupině osobních vozidel bude pro výrobce asi nejdůležitějším kritériem cena, protože ta je pro kupujícího většinou rozhodující, zatímco ve skupině vojenských vozidel bude největší důraz kladen na požadované výkony a co nejmenší rozměry a hmotnosti. Věda i technika jdou ale stále kupředu, a tak se jen stěží dá říct, co budou výrobci ve svých vozidlech používat.

3 Analýza modelových řešení

Hybridní pohon je kombinace spalovacího motoru s akumulátorem energie, kterým může být elektrický akumulátor energie (akumulátorová baterie) nebo mechanický akumulátor energie (setrvačnick). Cílem je najít takové propojení hnacích jednotek, aby se využilo co nejvíce z jejich specifických předností. Dříve se jednalo spíše jen o prototypy osobních automobilů, především Toyoty a Hondy, ale dnes se touto problematikou zabývá stále více firem. Pro nákladní vozy a autobusy je to především americká Allison Division koncernu GM. Účelem je vytvořit takové kombinace zdrojů energie, aby se v průběhu jízdy co nejlépe využilo jejich specifických výhod. U dnešních automobilů s hybridním pohonem se využívá především kombinace spalovacího motoru s elektromotorem a dvěma zásobníky energie, tvořenými palivovou nádrží a sadou elektrických akumulátorů.

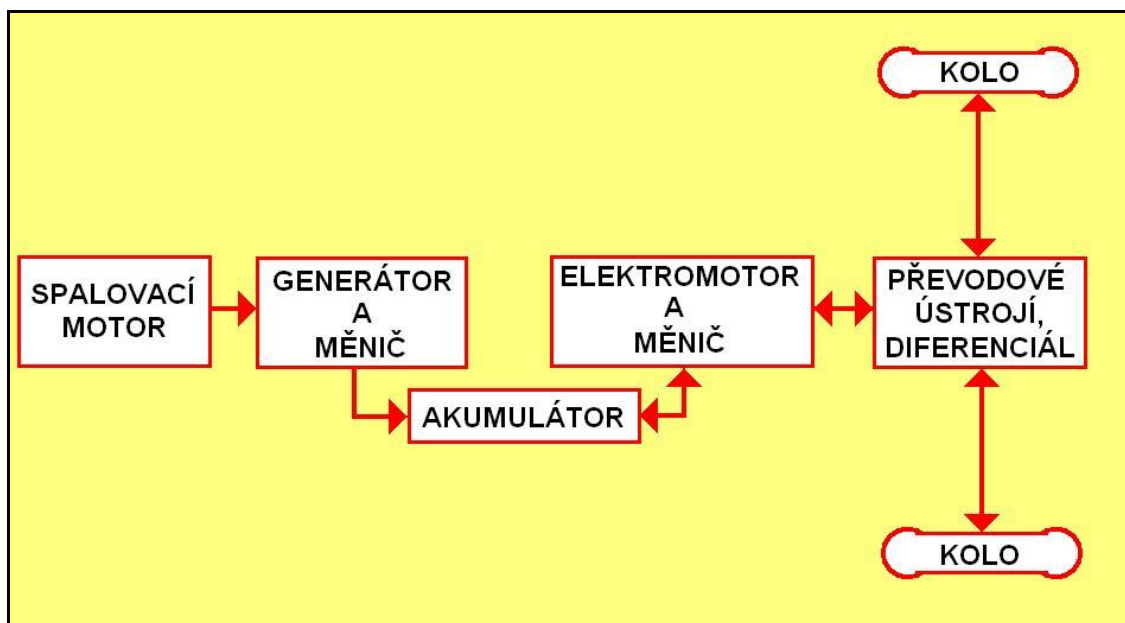
Pohony lze dělit podle principu činnosti (propojení hnacích jednotek) na:

- sériové,
- paralelní,
- kombinované.

3.1 Sériové pohony

U sériových pohonů je spalovacím motorem jako hlavním zdrojem energie poháněn generátor, který napájí trakční motor popřípadě akumulátory. Výhodou této skupiny je možnost nastavení pracovního bodu tak, aby jeho účinnost při daném výkonu byla maximální, tj. aby spalovací motor pracoval v optimálních otáčkách vzhledem k poměru výkonu a spotřeby paliva. Nevýhodou jsou však ztráty při přeměnách energie v elektrických strojích.

Pohon vozidla zabezpečuje trakční motor, který je spojen přímo s hnacími koly, takže v této soustavě odpadá potřeba převodného ústrojí z důvodu změny jízdního režimu.. Můžeme se ale u těchto vozidel setkat ještě s koncovými převody, které mají za úkol zvýšit točivý moment, u osobních vozidel se nepoužívají, aby poháněcí soustava byla co nejjednodušší. Při sjíždění svahu je spalovací motor v klidu a rekuperovaná část kinetické energie automobilu se využívá k dobíjení baterií. Generátor slouží rovněž jako spouštěč spalovacího motoru.



Obr. 3 – Blokové schéma sériového zapojení (převzato z [1])

Výhody sériových hybridních pohonů :

- nižší spotřeba paliva,
- větší ohleduplnost k životnímu prostředí,
- není nutná složitá elektronika pro řízení chodu motoru.

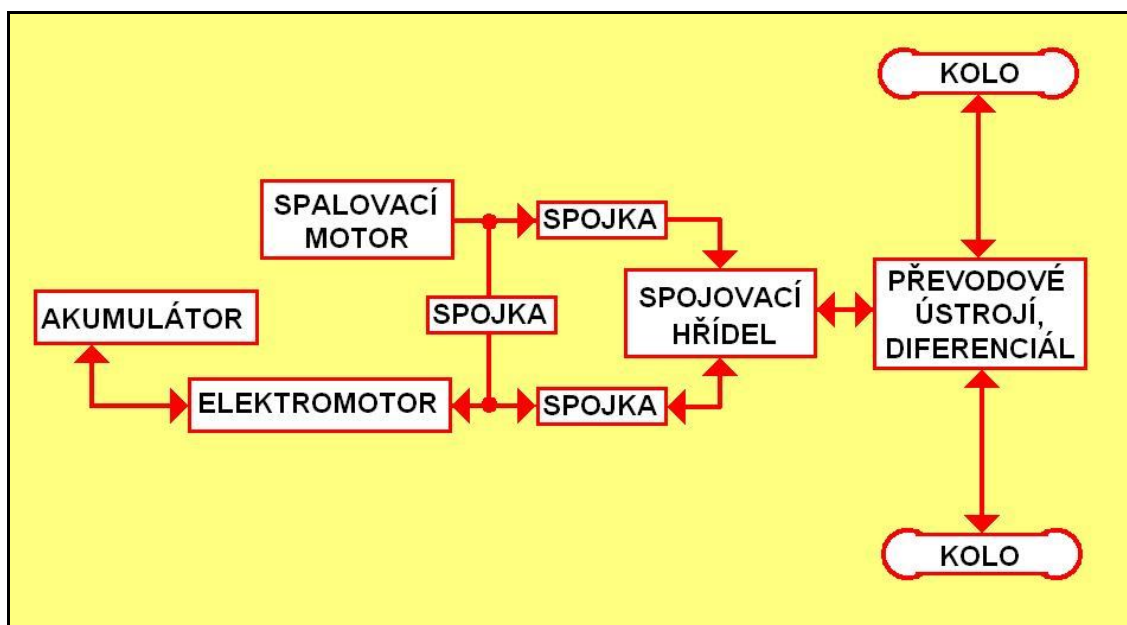
Nevýhody sériových hybridních pohonů :

- vyšší pořizovací cena vozidla,
- ztráty při přeměnách energie v elektrických strojích,
- vyšší hmotnost oproti srovnatelným vozům.

3.2 Paralelní pohony

Paralelní pohon je tvořen klasickým uspořádáním pohonu automobilů rozšířeným o elektrický stroj, který je umístěn mezi motorem a převodovkou nebo na výstupním hřídeli z převodovky, a to v případě použití jak manuální tak automatické převodovky. Oba motory pracují současně. Základním pohonným prvkem vozidla je spalovací motor. Přínos tohoto typu spočívá opět ve zlepšení účinnosti vhodnou volbou pracovního bodu, ovšem jen v jistých mezích, což je dáno vazbou mezi spalovacím motorem a rychlostí jízdy vozidla. Úspor se dosahuje při nízkých momentech spalovacího motoru tím, že motor pracuje s větším momentem než požadovaným a jeho výkon se rozděluje na pohon kol a dobíjení akumulátorů pomocí elektrického stroje. Energie akumulátoru je pak zpětně použita k pohonu vozidla. Samotný přenos výkonu má oproti sériovému pohonu vyšší účinnost. Při jízdě ze svahu opět

využíváme elektromotoru k dobíjení baterií. Stejný princip dobíjení akumulátorů je i při brzdění automobilu. Napájení elektromotoru je prováděno buď přímo z akumulátorů, nebo od generátoru.



Obr. 4 – Blokové schéma paralelního zapojení (převzato z [1])

Výhody paralelních hybridních pohonů :

- nižší spotřeba paliva,
- větší ohleduplnost k životnímu prostředí,
- nedochází k velkému nárůstu hmotnosti.

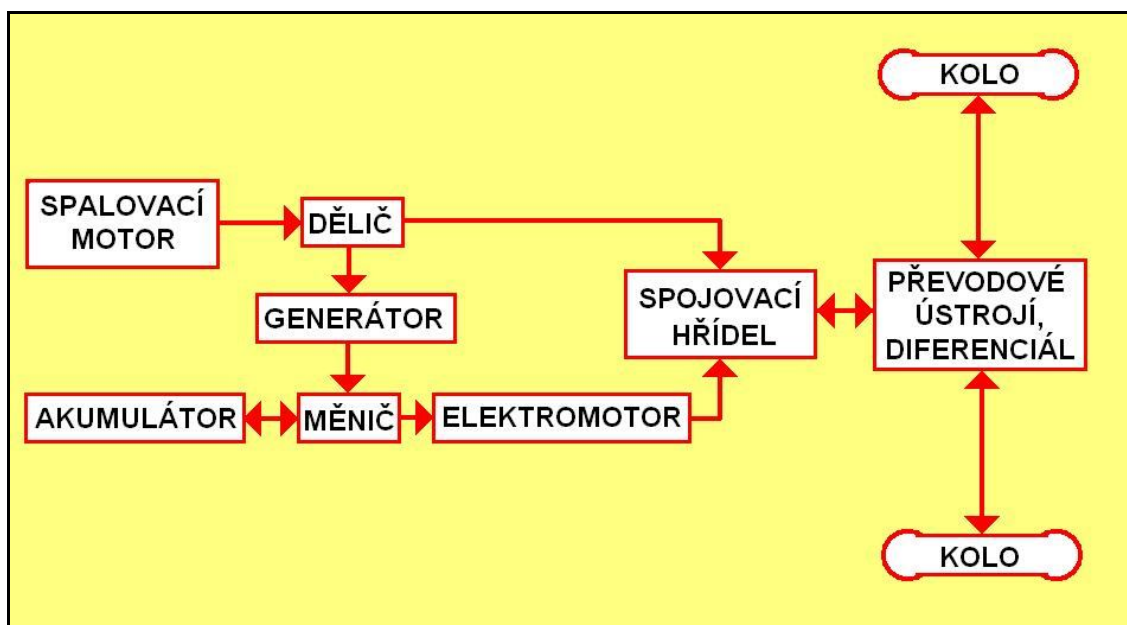
Nevýhody paralelních hybridních pohonů :

- vyšší pořizovací cena vozidla,
- obtížná synchronizace spalovacího motoru a elektromotoru.

3.3 Kombinované pohony

Kombinované pohony můžeme rozdělit do dvou základních skupin a to na přepínatelné pohony, které mohou pracovat v režimu obou předchozích variant pohonu v závislosti na poloze spojky, která je vložena mezi spalovací a elektrický motor, a na pohony s dělením výkonu. Přepínatelné pohony při rozpojené spojně pracují jako sériové pohony a při sepnuté spojně jako paralelní pohony. U pohonů s dělením výkonu se jako děliče obvykle používá planetová převodovka diferenciální, která dělí hnací výkon od motoru na pohon hnacích kol a na pohon generátoru, který pak podle charakteru jízdy napájí buď akumulátory

nebo trakční motor, nebo elektrický dělič výkonu spojený se spalovacím motorem i elektromotorem.



Obr. 5 – Blokové schéma kombinovaného zapojení (převzato z [1])

Výhody kombinovaných hybridních pohonů :

- nižší spotřeba paliva,
- díky dělení výkonu planetovou převodovkou menší ztráty.

Nevýhody kombinovaných hybridních pohonů :

- vyšší pořizovací cena vozidla,
- složitost pohonu,
- vyšší nároky na údržbu.

3.4 Dílčí závěr

Každá z variant pohonu má své specifické uplatnění a záleží hlavně na podmínkách, za kterých bude vozidlo provozováno. Volba konstrukčního uspořádání pohonu je na konstrukčním týmu daného vozidla s volbou kompromisu mezi jednoduchostí a hmotností. Pro menší vozidla je nejvhodnější paralelní, pro větší kombinovaný, a pro ty nejtěžší nákladní automobily sériový hybridní pohon, obzvláště při pohonu všech kol.

4 Přehled současných automobilů

4.1 Úvod

Vývoj pokračuje stále kupředu a na trhu se objevuje více a více značek s modely hybridních autobusů, ať už se jedná o autobusy klasické krátké, kloubové nebo i patrové. U jednotlivých firem se můžeme setkat jak s využitím jednoduššího sériového pohonu, tak složitějšího paralelního, případně smíšeného pohonu.

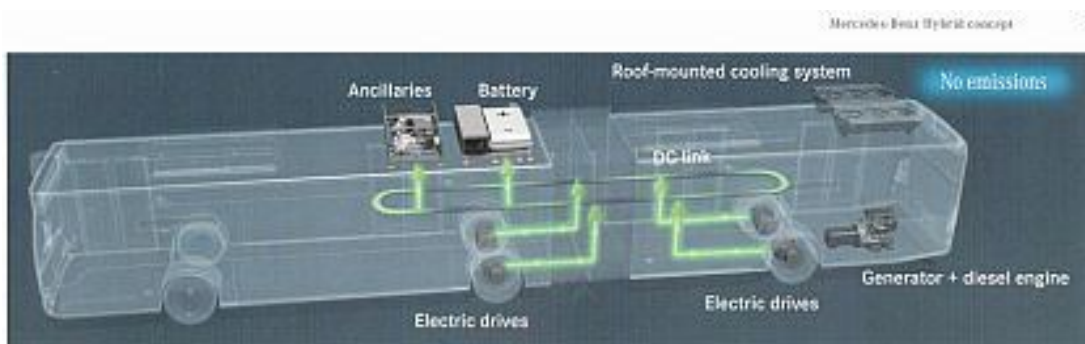
Jelikož ale není dostatek ucelených informací o jednotlivých, je tato část věnována jen jakémusi přehledu toho, co je dnes možné vidět na silnicích. Studie a prototypy zde nejsou zmiňovány. Do přehledu jsem zahrnul jen konstrukční řešení hybridního pohonu s klasickým spalovacím motorem a elektromotorem. Ostatní konstrukční řešení zde nejsou řešena.

4.2 Přehled současných autobusů

Mercedes-Benz Citaro G BlueTec Hybrid (upraveno podle [6])

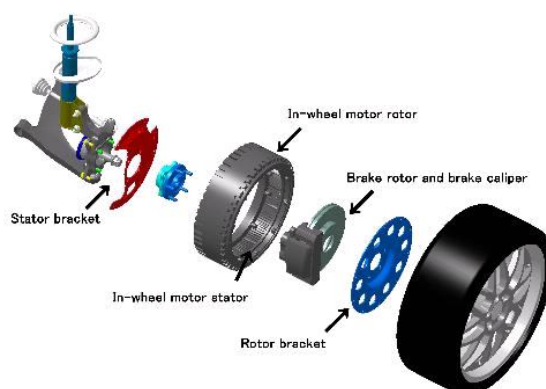
Jedná se o nízkopodlažní vozidlo se sériovým hybridním pohonem a je určeno pro provoz ve městech. Dosahuje kapacity až 140 cestujících.

Čtyřválcový vznětový motor autobusu Citaro se sériovým hybridem již nepracuje jako stálý pohonný agregát, nýbrž slouží jako generátorový pohon pro výrobu elektrického proudu. Tento proud je akumulován v bezúdržbových lithium-iontových akumulátorech s kapacitou 19,4 kWh na střeše autobusu Citaro. Baterie nejsou napájeny pouze dieslovým generátorem, nýbrž také energií získanou při brzdění, takzvanou rekuperací.



Obr. 6 – Uspořádání pohonu (převzato z [7])

Vlastní pohon kol autobusu Citaro G BlueTec Hybrid zajišťují čtyři elektrické motory umístěné přímo v nábojích kol na střední a zadní nápravě kloubového autobusu. Jejich celkový výkon 320 kW je pro kloubový autobus velkoryse dimenzován i pro těžké provozní podmínky. Pohon dvou náprav zajišťuje mohutnou trakci. Inteligentní provozní strategie zajišťuje účelné rozdělení energie mezi různé agregáty.



Obr. 7 – Rozkreslený pohon kola (převzato z [8])

Energie získaná při brzdění během dojíždění do zastávek nebo k semaforům je využívána jak pro napájení stojícího vozidla, tak i při rozjezdu. Tak může hybridní autobus fungovat na zastávkách, při stání a při zrychlování čistě elektricky a tím prakticky bez emisí, včetně výrazného snížení hluku. Cílem je, aby Citaro G BlueTec Hybrid na náročné městské lince ujel přibližně polovinu vzdálenosti bez běžícího vznětového motoru.

Místo obvyklých velkoobjemových řadových šestiválců se zdvihovým objemem dvanáct litrů, používaných v kloubových autobusech, je zde použit kompaktní čtyřválec o objemu 4,8 l a výkonu 160 kW (218 k). Hmotnost motoru se tímto způsobem snižuje z přibližně 1000 kg na pouhých 450 kg. Protože není diesellový motor v hybridním autobusu používán jako pohonný agregát, nemusí poskytovat špičkový výkon a proto může operovat velmi ekonomicky a ekologicky v oblasti svého nejvyššího bodu účinnosti v úzkém rozsahu otáček. Autobus nepotřebuje běžnou automatickou převodovku, což zlepšuje účinnost a současně také snižuje hmotnost. Nárůst hmotnosti prototypu Citaro G BlueTec Hybrid činí pouze asi jednu tunu v porovnání s běžným kloubovým autobusem poháněným vznětovým motorem a také další optimalizace jsou možné.

Vedlejší agregáty, jako klimakompresor, čerpadlo servořízení a kompresor stlačeného vzduchu již nejsou poháněny spalovacím motorem, nýbrž samostatně elektromotorem.

To vede k dalšímu zlepšení účinnosti, protože všechny agregáty jsou poháněny pouze v případě potřeby. Díky elektrickému pohonu lze vedlejší agregáty umístit s velkou dávkou volnosti, například na střeše autobusu. Důsledná optimalizace všech jednotlivých agregátů dělá z autobusu Citaro G BlueTec Hybridbus celosvětový unikát.



Obr. 8 – Autobus MB Citaro Hybrid (převzato z [7])

V závislosti na nasazení počítají vývojáři u autobusu Citaro G BlueTec Hybrid se spotřebou sníženou o 20 až 30 % oproti klasickému vznětovému motoru (v l/100 km). Navzdory řádově o jednu třetinu vyšší ceně za hybridní pohon se má vůz Citaro G BlueTec Hybrid amortizovat přibližně za 6 let. Vedle ekologických hledisek proto při vývoji hrají velkou roli také ekonomické úvahy. Důkaz k tomu poskytne autobus v nadcházejících letech, pak půjde v zákaznických testech do reálného linkového provozu. Sériová výroba je plánována na rok 2009.

Solaris Urbino 18 Hybrid (upraveno podle [9])

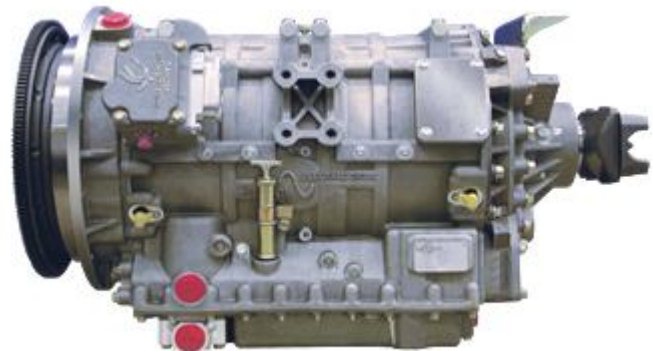
Tento model využívá pro svůj pohon účinný hybridní systém E^V50 firmy Allison Transmission. Tento systém je Allisonem vyráběn od října 2003. Za tuto dobu bylo vyrobeno více než 1 000 kusů E^V50 pro zákazníky v USA a Kanadě. Solaris Bus & Coach S.A. ve spolupráci s firmou Allison Transmission v roce 2006 přizpůsobil tento systém hybridního pohonu evropským podmínkám.



Obr. 9 - Motor Cummins ISBe5 250B (převzato z [9])

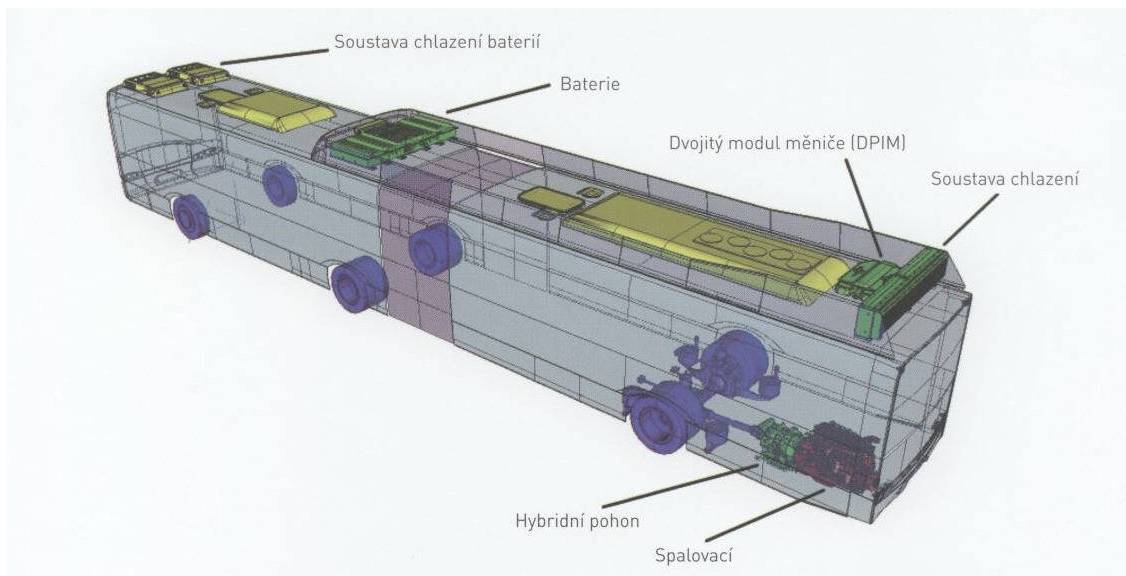
Vznětový motor použitý v I. generaci byl Cummins o objemu 8,9 l a výkonu 243 kW byl ve II. generaci nahrazen menším motorem Cummins ISBe5 250B. Tento motor při objemu 6,7 l a výkonu 178 kW poskytuje maximální krouticí moment 1 005 Nm při 1 500 ot.min⁻¹. Motor v současné době splňuje emisní limity dle normy 2006/81E (EURO 5) a v nejbližší době bude splňovat nejpřísnější emisní limity EEV.

Srdcem hybridního systému je modul E^V50, který svými rozměry a vzhledem připomíná klasickou automatickou převodovku. Tento modul spojuje činnost 2 elektromotorů, každého o výkonu 75 kW, 2 synchronních spojek a 3 planetových soukolí. Energie získaná při brzdění a deceleraci (rekuperace) je uskladňována v NiMH bateriích na střeše vozidla. Životnost těchto baterií je 6 let. Uskladněná energie je následně využívána pro pohon vozidla. Všechny přebytky výkonu vznětového motoru jsou využívány pro dobíjení baterií. Dvojitý modul (DPIM – Dual Power Inverter Module) řídí a rozděluje požadovaný výkon pro každý element hybridního pohonu.



Obr. 10 - Řídicí modul E^V50 (převzato z [9])

Další výraznou změnou oproti I. generaci je umístění pohonného systému. Tento byl umístěn stejně jako v ostatních typech autobusů SOLARIS, v zadní části autobusu, přičemž poháněnou je 3 náprava. Toto řešení přineslo větší možnost využití prostoru pro cestující, ale zejména lepší trakční vlastnosti vozidla. Ostatní komponenty pohonu jsou umístěny na střeše vozidla. NiMH baterie jsou umístěny na střeše před kloubovým mechanismem, dvojitý modul DPIM a chladicí systém pohonu je instalován na střeše na konci vozidla. SOLARIS Urbino 18 Hybrid je pouze o 300 kg těžší v porovnání s tradiční diesellovým autobusem SOLARIS Urbino 18.



Obr. 11 – Uspořádání pohonu (převzato z [9])

Volvo 7700 Hybrid (upraveno podle [10])

Volvo 7700 Hybrid je první hybridní autobus této značky na trhu. Výrobce udává až 30% úsporu paliva a návratnost investice 5 až 7 let. Poptávka po ekonomičtějším pohonu v dopravě je čím dál silnější a to z mnoha důvodů. Jedním z nejdůležitějších je, že je třeba snížit emise, které mají vliv na naše klima. Dalším je vysoká cena ropy a jejím očekávaným nárůstem v dohledné budoucnosti. S nižší spotřebou paliva jsou šetrnější k životnímu prostředí.



Obr. 12 – Autobus Volvo 7700 Hybrid (převzato z [10])

Volvo 7700 Hybrid výrazně přispívá ke zlepšení životního prostředí. Nižší spotřeba paliva snižuje i produkci emisí skleníkových plynů CO₂ až o 30%. Vznětový motor v autobusu splňuje emisní limity EURO V. Produkce NO_x poklesly o 40 až 50% ve srovnání s konvenčními pohony. Hybridní technologie je známá již dlouhou dobu, ale i přes zvýšené nároky na životní prostředí byla příliš drahá a s malou úsporou pohonných hmot. Tato situace se s nástupem Volva 7700 Hybrid mění.

Volvo se rozhodlo vytvořit paralelní hybridní pohon, který bude využit v autobusech i nákladních automobilech a stavebních strojích v rámci skupiny. V dlouhodobém horizontu to znamená velký objem produkce, což snižuje náklady na jeden kus.

Hybridní koncept Volva zvaný I-SAM a zahrnuje kombinovaný startér, elektromotor, generátor a elektronickou řídicí jednotku. I-SAM spolupracuje s naftovým motorem, Volva uznávanou převodovkou I-Shift a lithium-iontovou baterií, která je při brzdění dobíjena přes elektromotor/generátor. Tato baterie poskytuje výkon elektromotoru pro pohon autobusu.

Jako paralelní hybrid, může být autobus poháněn nezávisle elektromotorem, dieslovým motorem nebo oběma motory současně. Díky tomu by mohl být autobus vybaven menším, 5 litrovým dieslovým motorem – ve srovnání s 9 litrovým motorem dieslové verze Volva 7700. Výkon autobusu se zvýší, ale spotřeba paliva se sníží.

Dalším velkým přínosem technologie hybridu Volva je , že dieslový motor bude na autobusových zastávkách a na semaforech vypnutý – START/STOP systém. Autobus se začne rozjíždět poháněn elektromotorem a až dosáhne rychlosti 15-20 km.h⁻¹, automaticky se nastartuje dieslový motor. Po vybití baterií bude autobus poháněn pouze dieslovým motorem.



Obr. 13 –Motorová část (převzato z [10])



Obr. 14 - Označení (převzato z [10])

Toto řešení je hlavně přínosem pro životní prostředí ve městech. Pasažéři, chodci a ostatní uživatelé cest jsou ušetřeni od hluku a výfukových plynů. Hybridní technologie je velmi vhodná pro vozidla s častým rozjezdem a brzděním, ideální pro autobusy ve městech s hustým dopravním provozem. Výhodou paralelního hybridního pohonu, kterou si Volvo zvolilo, je , že autobusy dobře fungují i v předměstské dopravě s nižší intenzitou zastávek. Důvodem je mechanické propojení mezi dieslovým motorem a hnací hřídelí nápravy. Tím je zabráněno ztrátám při přechodu z mechanické energie na elektrickou a zpět. Mnoho velkých provozovatelů potřebuje dostat autobus během jeho životnosti do různých oblastí a to není možné s technologií, která je vhodná pouze pro extrémní městskou dopravu.



Obr. 15 – Autobus Volvo 7700 Hybrid (převzato z [10])

Narozdíl od jiných výrobců jsou všechny součásti na hybridní pohon z vlastního vývoje firmy Volvo. Tomu automobilka přičítá velký vliv na úspory a zároveň tím chce zajistit velmi vysokou spolehlivost. Volvo předpokládá, že hybridní autobus bude mít srovnatelnou životnost a délku meziúdržbových intervalů jako klasický diesel.

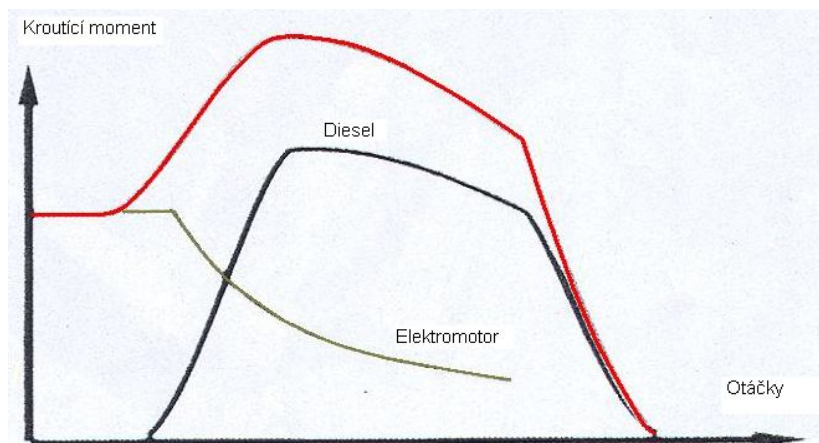
New Flyer (upraveno podle [11])

Americká firma New Flyer je průkopníkem nových technologií na trhu a je hrdá na svoji nabídku kompletní řady hybridních autobusů pro plnění dopravních služeb. Hybridní autobusy New Flyer jezdí již od roku 1997, déle než kterákoli jiná značka v USA nebo Kanadě. Autobusy najezdily přes 12 milionů mil – více než všechny ostatní značky dohromady. Změny oproti základnímu modelu jsou minimální, zajišťují tak jednoduché zařazení do vozového parku. Během návrhu byly údržba a opravy dvě rozhodující otázky, u kterých se nedělaly kompromisy, takže vývojáři stanovili omezené množství nových dílů. Díky tomu změny nemají téměř žádný vliv na jejich běžnou údržbu a její technologické postupy. Technici jsou okamžitě obeznámeni s autobusem. Jako u všech firemních produktů, školení, servis, díly a dokumentace jsou k dispozici po celém území USA a Kanady.

Udávaná úspora paliva se pohybuje mezi 14 a 30%, což samozřejmě snižuje náklady na pohonné hmoty a tím i přes 30% času ušetřeného na dotankování techniky. Autobusy nabízejí také nižší emise oproti autobusům s konvenčním pohonem. Nezávislé testy ukázali snížení CO₂ a NO_x až o 90%.

Plně zatížený autobus s paralelním hybridním pohonem zrychluje hladce a rychle z 0 na 40 mph za 23,3 s a maximální rychlost je přes 65 mph. Tyto hybridní pohony mají velký výkon, díky kterému jejich stoupavost činí přes 20°. Veškeré další agregáty jako je kompresor jsou poháněny elektricky a tím zůstává více energie na samotný pohyb autobusu.

Výrobce udává i dosažení zvýšené spolehlivosti. Zvýšený točivý moment motoru s elektromotorem během akcelerace výrazně snižuje opotřebení vlastního motoru. Zpráva firmy King Country Transit udává, že průměrná vzdálenost ujetá mezi servisními údržbami je u nových modelů více než 7 200 mil, což znamená výrazné snížení nákladů na ujetou míli.



Obr. 16 – Ukázka momentových charakteristik (převzato z[9])

Rekuperace energie brzděním má dvě významné výhody – převádí energii, která by byla jinak zmařena běžným brzděním, do baterií, kde je uložena pro budoucí využití elektrickým pohonem. Dále výrazně prodlužuje životnost brzd. Při rychlostech do 10 mph je využíván elektrický pohon k hladkému zastavení vozidla, čímž se sníží opotřebení brzdových bubnů a brzdových destiček a tím prodlužuje životnost brzd. Delší intervaly při údržbách znamenají úspory za práci a materiál.

Hybridní autobusy jsou tišší, ekologičtější a s plynulejším chodem než konvenční pohony. Dopravní společnost SEPTA má ve svém vozovém parku 32 nových autobusů značky NEW FLYER s hybridním pohonem, které využívá v běžném denním provozu bez zvláštního zacházení a dosáhly vyšší spolehlivosti než autobusy s konvenčním pohonem. Kromě snížení emisí, které potvrdilo rozsáhlé testování, mají autobusy s hybridním pohonem o 25% vyšší kilometrový výkon, vynikající životnost brzdového obložení a lepší akceleraci.



SPECIFICATIONS

	DE40LF	DE60LF	GE40LF
Length	40.8' (12.5m) over bumpers 39.6' (12.2m) over body	61.6' (18.8m) over bumpers 60.4' (18.4m) over body	40.8' (12.5m) over bumpers 39.6' (12.2m) over body
Width	102" (2.6m) over body	102" (2.6m) over body	102" (2.6m) over body
Height - Roof	132" (3.35m) w/roof mount	132" (3.35m) w/roof mount	132" (3.35m) w/roof mount
Floor Height - Front Door	15.5" with 305 tires 12.5" kneeled	15.5" with 305 tires 12.5" kneeled	15.5" with 305 tires 12.5" kneeled
Interior Height - Floor to Ceiling	94" above front axle; 77" above rear axle	94" above front axle; 77" above rear axle	94" above front axle; 77" above rear axle
Tire Size	305/70R22.5	305/70R22.5	305/70R22.5
Aisle Width	24" minimum	24" minimum	24" minimum
Weight	CW: 29,900 lb. (13,562 kg) GVWR: 40,350 lb. (18,302 kg)	CW: 43,700 lb. (19,820 kg) GVWR: 63,880 lb. (28,980 kg)	CW: 29,300 lb. (13,290 kg) GVWR: 40,350 lb. (18,302 kg)
Approach Angle	9.01°	9.01°	9.01°
Departure Angle	8.76°	8.76°	8.76°
Breakover Angle	9.38°	Front: 11.29°; Rear: 8.35°	9.38°
Turning Radius (outside)	44.0' with 305 tires	38.6' with 305 tires	44.0' with 305 tires
Wheelbase	293" (7.4m)	Front: 228.22" (5.8m) Rear: 302.77" (7.7m)	293" (7.4m)
Number of Doors	2	2 or 3	2
Wheelchair Accessibility	600 lb. Capacity (30.5"W X 44"L); Flip out ramp at front door	600 lb. Capacity (30.5"W X 44"L); Flip out ramp at front door	600 lb. Capacity (30.5"W X 44"L); Flip out ramp at front door
Wheelchair Locations	2 – Front location	2 – Front location	2 – Front location
Seats	Up to 40 (39 w/floor heaters)	Up to 62	Up to 40 (39 w/floor heaters)
Standees	Up to 43 standees	Up to 53 standees	Up to 43 standees
Floor	ACQ Pressure Preserved Plywood; Tarabus, RCA, Altro, Treadflex	ACQ Pressure Preserved Plywood; Tarabus, RCA, Altro, Treadflex	ACQ Pressure Preserved Plywood; Tarabus, RCA, Altro, Treadflex
Electrical System	Vansco Multiplex System	Vansco Multiplex System	Vansco Multiplex System
Cooling System	Young Touchstone: tested and certified to meet engine manufacturer's requirements	Young Touchstone: tested and certified to meet engine manufacturer's requirements	Nissens: tested and certified to meet engine manufacturer's requirements
Engine Options	Cummins ISL; 280 HP	CAT C9; 330 HP	Ford Triton V10 6.8 L
Fuel Tank	112 useable US gal. (424 l); single tank	125 useable US gal. (473 l); double tank	112 useable US gal. (424 l); single tank
HVAC	Thermo King T11 rear mounted w/auxiliary roof mounted A/C for energy storage temperature control	Thermo King (rear mounted on trailer section - roof mounted on tractor section); Thermo King auxiliary roof mounted A/C for energy storage temperature control	Sutrak rear mounted, hermetically sealed with electrically driven compressor
Axles	MAN or ArvinMeritor	MAN or ArvinMeritor	MAN or ArvinMeritor
Transmission	Allison E ^P 40 Drive™	Allison E ^P 50 Drive™	ISE-Siemens ThunderVolt™ TB40-HG
System Controller	2 – Allison 1000 Series™	2 – Allison 1000 Series™	ThunderVolt™
Dual Power Inverter Module	General Motors	General Motors	Siemens
Energy Storage	Ni-MH	Ni-MH	Ultracapacitors

Tab. 4 – Modely značky New Flyer a jejich specifikace (převzato z[11])

Gillig Hybrid (upraveno podle [12])

Firma GILLIG byla založena před 115 lety, v roce 1890 v San Franciscu, za účelem úpravy a výroby nákladních vozíků a kočárů - hlavních dopravních prostředků té doby. GILLIG se přizpůsobil nové technologii bez použití koní, ale v roce 1906 továrna vyhořela při velkém zemětřesení. Toto neštěstí firmu nezničilo, závod byl brzy přestavěn, a začala výroba prvních autobusů. Následovala výroba školních a vojenských autobusů.

Kreativní návrhy a agresivní řešení problémů vedlo k mnoha patentovaným inovacím vozidel, jako je patentovaný California Top pro výletní vozy dvacátých let, první způsob přepravy byl školní autobus v letech třicátých, první autobus s motorem uloženým vzadu v roce 1959 a první autobus s pohonem na LNG 1992 - všechny výrobky s využitím pokročilých technologií.

GILLIG je druhým největším výrobcem autobusů v Severní Americe a vyrábí kolem 1200 až 1300 autobusů ročně pro stovky různých zákazníků, od Aljašky až po Floridu.

Většina autobusů GILLIG je dnes poháněna nejčistšími a nejúčinnějšími vznětovými motory. Dnešní čisté vznětové motory jsou úspornější a také produkují až o 90% méně emisí výfukových plynů. S pomocí paliva s nízkým obsahem síry a filtry pevných částic budou motory ještě ekologičtější. Významný pokrok ve snížení produkce výfukových plynů, spolu s výhodou trvanlivosti a účinnosti paliva zaručuje, že dieselové motory budou pohonem i pro nové modely autobusů.

Nicméně vědí, že vývoj nových technologií postupuje kupředu, takže i nadále investuje do nových technologií a hledá další generace motorů pro pohon autobusů - a věří, že právě hybridní pohony jsou tím správným krokem. Vývoj hybridního pohonu autobusu firmy GILLIG začal počátkem devadesátých let a byl výsledkem let výzkumů a testů, které zahrnovaly oblast testování mnoha alternativních paliv (methanol, ethanol, bionaftu, CNG, LNG, LPG a vodíkové palivové články). Diesel hybrid byl vybrán jako nejslibnější nový pohonný systém s nejmenším znepokojením a nejvíce výhodami.

V roce 1996 firma představila svůj první hybridní autobus. Byl to sériový hybridní pohonný systém, který byl následován v roce 2001 prvním paralelním hybridním pohonem autobusu, který byl kdy vyroben. Tento 40 stop dlouhý autobus byl poháněn hybridním pohonným systémem od firmy GM Allison, který je využit jako pohonný systém i pro

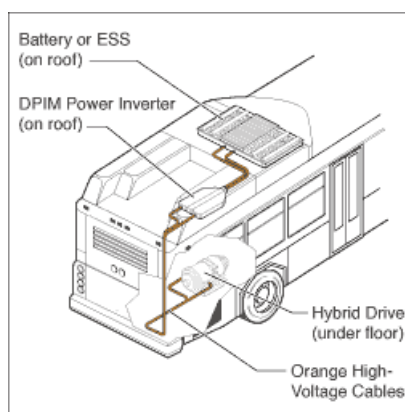
současné modely. Výhodou paralelního hybridního pohonu je vyšší efektivnost a vyšší dosahovaná rychlost než u sériového pohonu.

GILLIG hybrid je variantou nízkopodlažního modelu, který je poháněn paralelním diesel elektrickým hybridním pohonem. Snižuje emise, šetří palivo a je méně hlučný než autobusy s konvenčním pohonem, takže je šetrnější k životnímu prostředí, ekonomicky výhodnější a také pohodlnější pro cestující.



Obr. 17 – Uspořádání pohonu (převzato z [12])

Hybridní pohonná jednotka je dodávána divizí Allison amerického koncernu GM a využívá nejnovější paralelní pohon, který je účinnější než tradiční sériový pohon. Dlouhá životnost, bezpečnost a bezúdržbové NiMH baterie ukládající brzdovou energii.



Obr. 18 – Uspořádání pohonu (převzato z [12])

GILLIG také studuje hybridní pohonné systémy od jiných výrobců, jakož i další technologie, jako je elektrické trolejbusy a palivovými články poháněné autobusy. Výhodou trolejbusů a palivovými články poháněných autobusů je, že vozidla mají nulové emise (ZEB's – zero emission buses). Nicméně, trolejbusy potřebují zpětný vodič systému považovaný některými jako vizuální znečištění a palivové články jsou stále velmi drahé a není

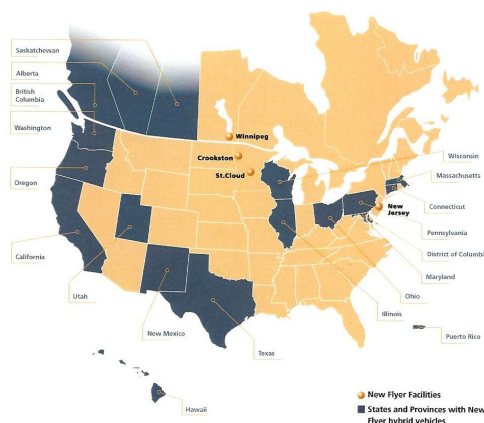
vybudována infrastruktura sítě čerpacích stanic pro tyto vozidla. Nicméně GILLIG bude držet krok s technologiemi a bude pokračovat na výzkumu a využití nejlepších pohonných systémů, které jsou v dané době dostupné.

Spolu s vývojem těchto pohonných systémů, GILLIG nadále zlepšuje produkty a služby prostřednictvím neustálého zlepšování našeho programu a prostřednictvím zpětné vazby od zákazníků. Zlepšení zahrnuje snadnější údržbu a výměnu součástí s omezenou životností, jejich redukovanou hmotnost a vyšší odolnost vůči korozi. Další oblasti zlepšení jsou: více snadno recyklovatelných materiálů, vyšší komfort pro cestující a zvýšení využití systémů pro inteligentní vozidla, jako jsou bezpečnostní kamery, vylepšený řídicí systém apod.

Tento model je k dostání jako 30, 35 a 40 stop dlouhý nízkopodlažní autobus. Náhradní díly jsou z velké části shodné na všechny tři modely a tím se snižují náklady na jejich výrobu. Testy ukazují tyto autobusy jako nejspolehlivější, nejtišší a nejušpornější. Je to způsob jak šetřit peníze a palivo a přitom být chválen veřejností a ekology.

4.3 Dílčí závěr

Výsledkem u tohoto bodu práce bylo zjištění, že se používají převážně složitější paralelní hybridní pohony, ačkoli se můžeme setkat s jednodušším sériovým řešením pohonu. Jedním z největších dodavatelů částí hybridních pohonů je divize Allison koncernu GM, která dodává pohonný modul pro jednotlivé výrobce jako jsou americký Gillig nebo polský Solaris. Dále je patrné, že vývoj hybridních pohonů se odvíjí především pro zámorí, kde je využití těchto technologií v dopravě mnohem častější než v Evropě. Za Evropu je největším průkopníkem v provozování těchto strojů Německo.



Obr. 19 – Provoz autobusů New Flyer s hybridním pohonem ve státech USA -modře označeno (převzato z [11])

5 Návrh vlastního modelu

Pro svoji práci využívám podvozek autobusu typu Iveco Citelis, neboť jsou od výrobce dostupná potřebná data a jedná se o klasický nízkopodlažní autobus, který je konstrukčně jednodušší.

5.1 Výpočet výkonu pohonu

K výpočtům jsem využil hodnot vozidla Iveco Citelis 12 M Diesel. Některé hodnoty výrobce neudává a musely být experimentálně změřeny. Toto vozidlo mi slouží pouze jako příklad pro moji práci.

Motor je třeba zvolit dostatečně výkonný pro zachování dobrých jízdních vlastností vozidla, především stoupavosti, která u našeho modelu činí 10% a to při maximální přípustné hmotnosti 18 000kg. Zároveň jsem stanovil jako minimální rychlost jízdy do tohoto stoupání 50km.h⁻¹. Maximální rychlost vozidla je 110km.h⁻¹. Při výpočtu jsem uvažoval motory uložené v kolech bez konečných převodů.

Výpočet maximálních otáček vozidlového kola $n_{m \max}$:

$$\text{Maximální rychlost vozidla} \quad V_{\max} = 110 \quad [\text{km.h}^{-1}]$$

$$\text{Dynamický poloměr kola} \quad r_d = 0,465 \quad [\text{m}]$$

$$\text{Celkový převodový poměr} \quad i_c = 1 \quad [-]$$

$$V = 0,377 \cdot \frac{n_m \cdot r_d}{i_c} \quad (1)$$

Úpravou vzorce (1) vyjádříme otáčky motoru n_m :

$$V = 0,377 \cdot \frac{n_m \cdot r_d}{i_c} \Rightarrow n_m = \frac{V \cdot i_c}{0,377 \cdot r_d} \quad [\text{ot.min}^{-1}] \quad (2)$$

Po dosazení maximální rychlosti V_{\max} do upraveného vzorce dostaneme maximální otáčky motoru $n_{m \max}$:

$$n_{m \max} = \frac{V_{\max} \cdot i_c}{0,377 \cdot r_d} = \frac{110 \cdot 1}{0,377 \cdot 0,465} = 627,5 \quad [\text{ot.min}^{-1}]$$

Výpočet otáček vozidlového kola n_m při jízdě do maximálního stoupání α_{max} požadovanou rychlostí V :

Požadovaná rychlost vozidla $V = 50$ [km.h⁻¹]

Dynamický poloměr kola $r_d = 0,465$ [m]

Celkový převodový poměr $i_c = 1$ [-]

Dosažením požadované rychlosti do upraveného vzorce (2) dostaneme:

$$n_m = \frac{V \cdot i_c}{0,377 \cdot r_d} = \frac{50 \cdot 1}{0,377 \cdot 0,465} = 286 \quad [\text{ot. min}^{-1}]$$

V obou případech otáčky motoru odpovídají rychlosti otáčení vozidlového kola. Tento výpočet slouží k určení převodových poměrů tak, aby pohon mohl pracovat v optimálním režimu. Samotné konstrukční řešení již není obsahem této práce.

Celkový jízdní odpor F_{ψ} při jízdě maximální rychlostí V_{max} po rovině:

Obecný výpočet celkového jízdního odporu se skládá ze součtů odporu valení, odporu do stoupání a odporu vzduchu.

$$F_{\psi} = m_c \cdot g \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + 0,048 \cdot c_x \cdot S_{\epsilon} \cdot V^2 \quad [\text{N}] \quad (3)$$

Pro výpočet odporu vzduchu musíme nejprve vypočítat velikost čelní plochy vozidla S_{ϵ} . Hodnoty použité pro výpočet čelní plochy jsem čerpal z materiálů výrobce vzorového autobusu Iveco Citelis [13].

- Výpočet čelní plochy autobusu S_{ϵ} :

Šířka autobusu $\check{s} = 2,500$ [m],

Výška autobusu $h = 2,979$ [m].

$$S_{\epsilon} = 0,8 \cdot \check{s} \cdot h \quad [\text{m}^2] \quad (4)$$

$$S_{\epsilon} = 0,8 \cdot \check{s} \cdot h = 0,8 \cdot 2,5 \cdot 2,979 = 5,958 \quad [\text{m}^2]$$

- *Výpočet celkového jízdního odporu*

<i>Celková hmotnost vozidla</i>	$m_c = 18\,000$	[kg]
<i>Maximální rychlost vozidla</i>	$V_{max} = 110$	[km.h ⁻¹]
<i>Úhel stoupání</i>	$\alpha = 0$	[°]
<i>Gravitační zrychlení</i>	$g = 9,81$	[m.s ⁻²]
<i>Součinitel valivého odporu</i>	$f = 0,015$	[-]
<i>Součinitel odporu vzduchu</i>	$c_x = 0,65$	[-]
<i>Velikost čelní plochy autobusu</i>	$S_\xi = 5,958$	[m ²]

Hodnotu součinitele odporu vzduchu volím jako střední hodnotu z běžně užívaného rozmezí pro autobusy $c_x = 0,5 - 0,8$. Součinitel valivého odporu pro asfaltovou vozovku volím běžně užívanou hodnotu $f = 0,015$.

Po dosazení do vzorce (3) dostaneme:

$$F_\psi = 18000 \cdot 9,81 \cdot (0,015 \cdot \cos 0^\circ + \sin 0^\circ) + 0,048 \cdot 0,65 \cdot 5,958 \cdot 110^2 = 4\,897,96 \text{ [N]}$$

Celkový jízdní odpor F_ψ při jízdě požadovanou rychlostí V do maximálního stoupání α_{max} :

<i>Celková hmotnost vozidla</i>	$m_c = 18\,000$	[kg]
<i>Požadovaná rychlost vozidla</i>	$V = 50$	[km.h ⁻¹]
<i>Úhel stoupání</i>	$\alpha_{max} = 5$	[°]
<i>Gravitační zrychlení</i>	$g = 9,81$	[m.s ⁻²]
<i>Součinitel valivého odporu</i>	$f = 0,015$	[-]
<i>Součinitel odporu vzduchu</i>	$c_x = 0,65$	[-]
<i>Velikost čelní plochy autobusu</i>	$S_\xi = 5,958$	[m ²]

$$F_\psi = m_c \cdot g \cdot (f \cdot \cos \alpha_{max} + \sin \alpha_{max}) + 0,048 \cdot c_x \cdot S_\xi \cdot V^2 \quad \text{[N]} \quad (5)$$

$$F_\psi = 18000 \cdot 9,81 \cdot (0,015 \cdot \cos 5^\circ + \sin 5^\circ) + 0,048 \cdot 0,65 \cdot 5,958 \cdot 50^2 = 18\,493,30 \text{ [N]}$$

Po provedení výpočtů jsem zjistil, že hnací síla potřebná pro splnění požadavků kladených na naše vozidlo se bude odvíjet od stoupavosti vozidla, neboť odpory při jízdě maximální rychlostí jsou výrazně nižší.

Výpočet výkonu motoru P_{max} :

Celkový jízdní odpor	$F_{\psi} = 18\,493,30$	[N]
Rychlost vozidla	$V = 50$	[km.h ⁻¹]
	$v \approx 13,89$	[m.s ⁻¹]
Mechanická účinnost motoru	$\eta_m = 0,83$	[-]

$$F_{\psi} \cdot v = P_{max} \cdot \eta_m \quad (6)$$

Úpravou vzorce (6) vyjádříme maximální výkon motoru P_m :

$$F_{\psi} \cdot v = P_{max} \cdot \eta_m \Rightarrow P_{max} = \frac{F_{\psi} \cdot v}{\eta_m} \quad [\text{W}] \quad (7)$$

Po dosazení do upraveného vzorce (7) dostaneme maximální výkon motoru P_{max} :

$$P_{max} = \frac{F_{\psi} \cdot v}{\eta_m} = \frac{18\,493,30 \cdot 13,89}{0,83} = 309\,484,26 \quad [\text{W}]$$

Pro mechanickou účinnost motoru volím běžně užívanou hodnotu $\eta_m = 0,83$.

Výpočet točivého momentu motoru:

$$F_T = F_{\psi} \quad (8)$$

$$\frac{M_m \cdot \eta_m \cdot i_c}{r_d} = m_c \cdot g \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + 0,048 \cdot c_x \cdot S_{\xi} \cdot V^2 \quad (9)$$

$$\Rightarrow M_m = \frac{[m_c \cdot g \cdot (f \cdot \cos \alpha + \sin \alpha) + 0,048 \cdot c_x \cdot S_{\xi} \cdot V^2] \cdot r_d}{\eta_m \cdot i_c}$$

$$M_m = \frac{[18\,000 \cdot 9,81 \cdot (0,015 \cdot \cos 5^\circ + \sin 5^\circ) + 0,048 \cdot 0,65 \cdot 5,958 \cdot 50^2] \cdot 0,465}{0,83 \cdot 1} = 10\,360,71 \quad [\text{Nm}]$$

Tyto hodnoty by byly jako minimální, pokud by se jednalo o sériový hybridní pohon bez jakéhokoli uvažovaného převodu. Při použití například konečných převodů by se požadovaný točivý moment snížil.

5.2 Energetická bilance uvažovaného jízdního cyklu

Pro energetickou bilanci a další výpočty jsem si stanovil jízdní cyklus o 10 zastávkách po 500 metrech. Pro zjednodušení nejsou uvažovány křižovatky. Předpokládám, že autobus bude plně zatížen po celou dobu jízdy. Dále v zastávkách bude stát po dobu jedné minuty. Jelikož jsem nikde nenašel žádný možný přepočítání kilometrů na motohodiny, zavádím zde z mé dosavadní praxe v armádě české republiky přepočítání dle našich interních předpisů. Pro převod mechanické energie na elektrickou se udává účinnost mezi 70 a 80%. Pro autobus je limitující hodnota maximálního zrychlení i zpomalení 2 m.s^{-2} , což je hodnota, kterou je průměrně zdatný stojící cestující schopen vyrovnat úklonem těla.

Délka jednoho úseku	$l_0 = 500 \text{ [m]}$
Doba stání v zastávce	$t_s = 1 \text{ [min]}$
Uvažovaná hmotnost	$m_c = 18\,000 \text{ [kg]}$
Přepočítání mh/km	$1 \text{ [mh]} = 25 \text{ [km]}$
Uvažovaná účinnost	$\eta = 0,75 \text{ [-]}$
Uvažované zrychlení	$a = 2 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$
Uvažované zpomalení	$a = 2 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$
Počáteční rychlost	$V_0 = 0 \text{ [km.h}^{-1}\text{]}$
Maximální rychlost	$V_1 = 50 \text{ [km.h}^{-1}\text{]}$
	$v_1 = 13,89 \text{ [m.s}^{-1}\text{]}$
Průměrná spotřeba	$\Phi = 28/100 \text{ [l.km}^{-1}\text{]}$
Výhřevnost mot. nafty	$H = 42 \text{ [MJ.kg}^{-1}\text{]}$
Hustota nafty	$\rho = 0,83 \text{ [kg.dm}^{-3}\text{]}$
Šířka autobusu	$\check{s} = 2,5 \text{ [m]}$
Výška autobusu	$h = 2,979 \text{ [m]}$
Velikost čelní plochy	$S_\xi = 5,958 \text{ [m}^2\text{]}$
Součinitel odporu vzduchu	$c_x = 0,65 \text{ [-]}$
Úhel stoupání	$\alpha = 0 \text{ [}^\circ\text{]}$
Tíhové zrychlení	$g = 9,81 \text{ [m.s}^{-2}\text{]}$
Experimentálně zjištěná konstanta	$k = 0,333 \text{ [-]}$

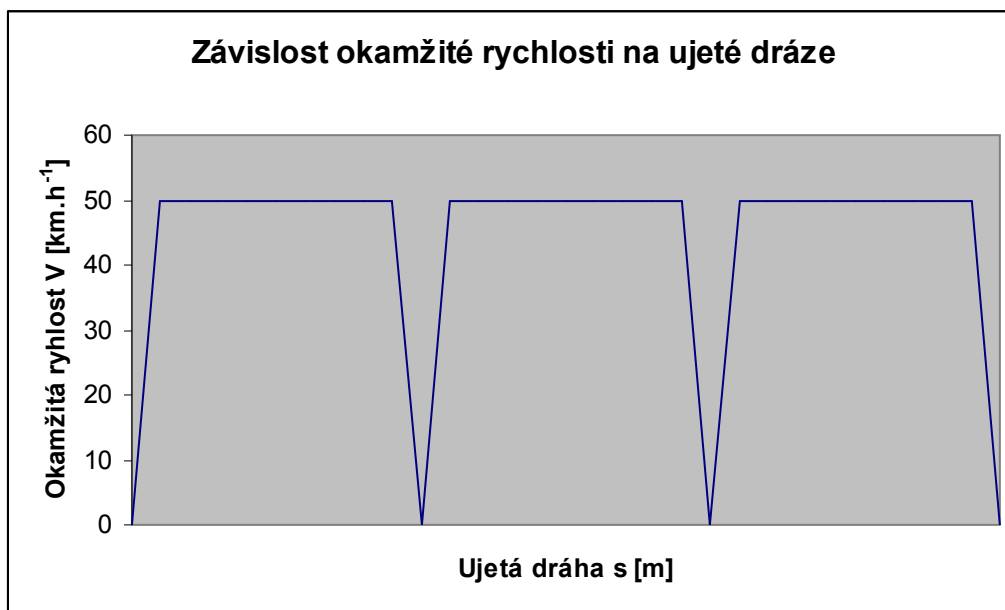
Tab. 5 – Vstupní hodnoty pro výpočet energetické bilance

Délka úseku mezi zastávkami odpovídá celorepublikovému průměru sítě MHD. Doba stání v zastávce je určena vlastní zkušeností při přepravě. Celková hmotnost vozidla je limitována zákonem o provozu na pozemních komunikacích. Uvažovaný přepočítání motohodin na kilometry je převzat z mé praxe v AČR. Hodnotu účinnosti převodu mechanické energie na elektrickou a opačně jsem stanovil jako střední hodnotu z literaturou udávaného rozmezí (převzato z [13]). Průměrná spotřeba je přepočítána ze stávajících modelů splňujících emisní limity EURO IV a výrobcí udávanou úsporou paliva až 30%. Tuto hodnotu jsem vzal jako

limitující. Vlastnosti paliva jako výhřevnost a hustota jsou převzaty z tabulek. Určení experimentálně zjištěné konstanty k je popsáno v další části práce.

5.2.1 Vlastní výpočet

Pro vlastní výpočet jsou využity obecně známé vzorce z mechaniky převzaty z [4].



Obr. 20 – Graf závislosti okamžité rychlosti na ujeté dráze (část jízdního cyklu)

Doba rozjezdu a brzdění:

$$v = a \cdot t \quad [\text{s}] \quad (10)$$

$$v = a \cdot t \Rightarrow t = \frac{v_1}{a} = \frac{13,89}{2} = 6,945 \quad [\text{s}]$$

Dráha ujetá během rozjezdu a brzdění:

$$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \quad [\text{m}] \quad (11)$$

$$s = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 6,945^2 = 48,23 \quad [\text{m}]$$

Kinetická energie rozjetého autobusu:

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [\text{J}] \quad (12)$$

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot 18000 \cdot 13,89^2 = 1\,736\,388,90 \quad [\text{J}]$$

Velikost jízdních odporů rozjetého autobusu:

$$F_{\psi} = m_c \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha + 0,048 \cdot c_x \cdot S_{\xi} \cdot V_1^2 \quad [\text{N}] \quad (13)$$

$$F_{\psi} = 18000 \cdot 9,81 \cdot 0,015 \cdot \cos 0^{\circ} + 0,048 \cdot 0,65 \cdot 5,958 \cdot 50^2 = 3\,113,42 \quad [\text{N}]$$

vyjádřeno jako energie (práce)

$$E_O = F \cdot s \quad [\text{J}] \quad (14)$$

$$E_O = 3\,113,42 \cdot 48,23 = 150\,160,25 \quad [\text{J}]$$

Výkon dobitý během brzdění:

$$P_B = \frac{E_K - E_O}{t} \cdot \eta \quad [\text{W}] \quad (15)$$

$$P_B = \frac{1736388,90 - 150\,160,25}{6,945} \cdot 0,75 = 171\,298,99 \quad [\text{W}]$$

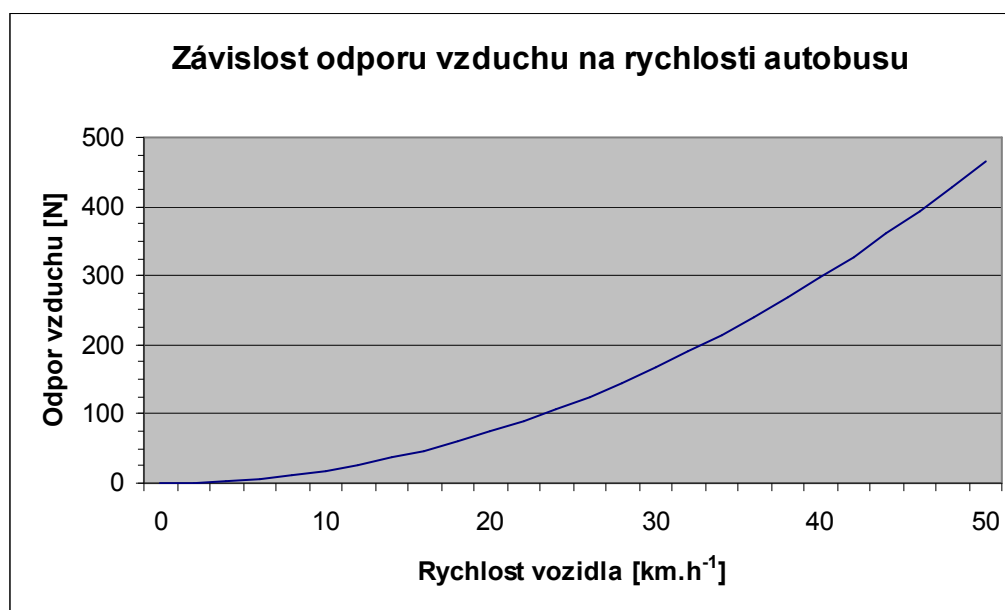
Výkon potřebný pro rozjezd autobusu:

- Velikost jízdních odporů rozjíždějícího se autobusu na rovině F_R

$$F_R = m_c \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha + 0,048 \cdot k \cdot c_x \cdot S_{\xi} \cdot V_1^2 \quad [\text{N}] \quad (15)$$

$$F_R = 18000 \cdot 9,81 \cdot 0,015 \cdot \cos 0^{\circ} + 0,048 \cdot 0,333 \cdot 0,65 \cdot 5,958 \cdot 50^2 = 3\,113,42 \quad [\text{N}]$$

k – zjištěno experimentálními výpočty v programu MS EXCEL 2003



Obr. 20 – Graf závislosti odporu vzduchu na rychlosti autobusu

Ukázka z výpočtů v programu MS EXCEL 2003:

Okamžitá rychlost	V	[km.h ⁻¹]	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2
Okamžitý odpor vzduchu	F	[N]	0	0,01	0,05	0,10	0,19	0,29	0,42	0,57	0,74
Plocha pod křivkou	S	[N.km.h ⁻¹]		0,01		0,06		0,15		0,29	

Tab. 6 – Ukázka z výpočtů v MS EXCEL 2003

Součet ploch pod křivkou	$\sum S$	[N.km.h ⁻¹]	7 745,79
Celková plocha	S_C	[N.km.h ⁻¹]	23 236,20
Podíl	p	[%]	33,34
Exp. zjištěná konstanta	k	[-]	0,333

Tab. 7 – Vypočítané hodnoty z programu MS EXCEL 2003

Při výpočtech jsem uvažoval, že poměr plochy odporu vzduchu při rychlosti 50 km.h⁻¹ a plochy odporu vzduchu při rozjezdu ležící pod křivkou, udává hledanou konstantu k pro výpočet odporu vzduchu při rozjezdu.

- *Stálá síla působící během zrychlení F_{ZR} :*

$$F_{ZR} = m \cdot a \quad [\text{N}] \quad (16)$$

$$F_{ZR} = 18\,000 \cdot 2 = 36\,000 \quad [\text{N}]$$

- *Výsledná odpor F_V :*

$$F_V = F_R + F_{ZR} \quad [\text{N}] \quad (17)$$

$$F_V = F_R + F_{ZR} = 36\,000 + 3\,113,42 = 39\,113,42 \quad [\text{N}]$$

- *Potřebná energie (vykonaná práce) pro rozjezd autobusu E_R :*

$$E_R = F_V \cdot s \quad [\text{J}] \quad (18)$$

$$E_R = 39\,113,42 \cdot 48,23 = 1\,886\,440,25 \quad [\text{J}]$$

- *Potřebný výkon pro rozjezd autobusu P_R :*

$$P_R = \frac{E_R}{t \cdot \eta_C} \quad [\text{W}] \quad (19)$$

$$P_R = \frac{E_R}{t \cdot \eta_C} = \frac{1\,886\,440,25}{6,945 \cdot 0,83} = 327\,259,84 \quad [\text{W}]$$

Výkon získaný během stání v zastávce P_z :

$$\begin{aligned} E &= \Phi \cdot \rho \cdot H \quad [\text{MJ} \cdot 100\text{km}^{-1}] & (20) \\ E &= 28 \cdot 0,83 \cdot 42 = 976,08 \quad [\text{MJ} \cdot 100\text{km}^{-1}] \\ E &= 9,761 \quad [\text{MJ} \cdot \text{km}^{-1}] \end{aligned}$$

s využitím přepočtu na motohodinu

$$\begin{aligned} 1 \text{ [mh]} &= 25 \text{ [km]} \\ E_{mh} &= 25 \cdot E \quad [\text{J} \cdot \text{mh}^{-1}] & (21) \\ E_{mh} &= 25 \cdot 9,761 = 244,025 \quad [\text{MJ} \cdot \text{mh}^{-1}] \end{aligned}$$

přepočítáno na dobu stání v zastávce

$$\begin{aligned} 1 \text{ [mh]} &= 60 \text{ [mm]} \\ E_{mm} &= \frac{E_{mh}}{60} \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}] \\ & (22) \\ E_{mm} &= \frac{244,025}{60} = 4,067 \quad [\text{MJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \end{aligned}$$

z toho získaný výkon P_z

$$\begin{aligned} P_z &= \frac{E_{mm}}{60} \cdot \eta \quad [\text{W}] & (23) \\ P_z &= \frac{E_{mm}}{60} \cdot \eta = \frac{4067000}{60} \cdot 0,75 = 50\,837,5 \quad [\text{W}] \end{aligned}$$

V konstrukčním provedení se systémem START/STOP s tímto výkonem nemůžeme počítat, neboť diesellový motor bude během stání v zastávce nečinný.

5.3 Dílčí závěr

Podle provedených výpočtů je návrh pohonu limitován jízdou požadovanou rychlostí do maximálního stoupání. Vlastní návrh konstrukčního řešení již není obsahem této práce, neboť je to rozsahově i časově náročnější.

Z výše uvedené energetické bilance je zřejmé, že při vhodně zvolené velikosti akumulátorů jsme při námi zvoleném modelu schopni ušetřit více než 50% energie její rekuperací při brzdění. Skutečná hodnota úspor již záleží na reálném jízdním cyklu a samotného provedení a řízení hybridního pohonu.

6 Ekologická zátěž

Při provozu vozidel vzniká ekologická zátěž v podobě škodlivých emisí výfukových plynů. První norma ohledně škodlivých emisí se datují do roku 1983. Postupem času se norma zpříšňovala a dnes je v platnosti již EURO V.

Ve své práci využívám data Dopravního podniku města Pardubice, na kterém aplikuji svoji práci, která se týká návrhu obměny vozového parku. V současné době dopravní podnik provozuje stále ještě osm autobusů splňujících pouze emisní limity normy EURO 0. Při jejich obměně autobusy s hybridním pohonem uvažuji, že nové autobusy by již v optimálním pracovním režimu splňovaly limity normy EURO 6, která má vstoupit v platnost v roce 2014.

6.1 Výpočet ekologické zátěže starými autobusy a novým modelem

Používané autobusy dělím dále do dvou skupin. První skupinu tvoří autobus KAROSA B731 s motorem LIAZ ML 636 a automatickou převodovkou VOITH. Celkový nájezd této skupiny autobusů činil v roce 2008 cca 75 000km s průměrnou spotřebou 40,25l motorové nafty na 100km. Druhou skupinu tvoří KAROSA B732 s motorem LIAZ 636 E a mechanickou převodovkou PRAGA. Celkový nájezd této skupiny autobusů činil v roce 2008 cca 135 000km s průměrnou spotřebou 30,57l motorové nafty na 100km. Třetí skupinu tvoří navrhovaný model s nájezdem 210 000km a průměrnou spotřebou 28l na 100km. Tato spotřeba je teoretická. Při udávaném snížení spotřeby až o 30% oproti konvenčním pohonům jsem uvažoval jako příklad model IRISBUS PS09D1 s motorem IVECO CURSOR 8 s automatickou převodovkou VOITH. Tento model splňuje emisní limity normy EURO 4 a jeho průměrná spotřeba činí 39,67l na 100km. Při uvažované úspoře 30% z cca 40l dostaneme hodnotu 28l, z čehož jsem dále vycházel ve svých výpočtech ekologické zátěže uvažovaného modelu splňujícího emisní limity EURO 6.

Uvažované hodnoty pro další výpočty	Platná od	Modelové měrné emise [g/kWh]			
		CO	HC	NO _x	částice
EURO 0	1990	11,2	2,4	14,4	-
EURO 1	1993	6,0	1,5	10,0	0,5
EURO 6	2014	1,5	0,13	0,4	0,01

Tab. 8 – Emisní limity dle jednotlivých norem

Další úvahy vycházejí z předpokladů:

- výhřevnost nafty $H = 42 \text{ MJ/kg}$,
- hustota nafty $\rho = 0,83 \text{ kg/dm}^3$,
- průměrná měrná spotřeba paliva pro EURO 0 $m_{pe}=250 \text{ [g/kWh]}$,
- průměrná měrná spotřeba paliva pro EURO 6 $m_{pe}=210 \text{ [g/kWh]}$.

První skupina:

- průměrná spotřeba energie na ujetou vzdálenost 100km při spotřebě $\Phi = 40,25 \text{ [l]}$,

$$E = \Phi \cdot \rho \cdot H \quad [\text{MJ} \cdot 100\text{km}^{-1}]$$

$$E = 40,25 \cdot 0,83 \cdot 42 = 1403,115 \quad [\text{MJ} \cdot 100\text{km}^{-1}]$$

$$E = 14,031 \quad [\text{MJ} \cdot \text{km}^{-1}]$$

- průměrná práce motoru na dráze 1km,

$$W = E / (m_{pe} \cdot H) \quad [\text{kWh} \cdot \text{km}^{-1}]$$

$$W = 14,031 / (0,25 \cdot 42) = 1,336 \quad [\text{kWh} \cdot \text{km}^{-1}]$$

- vlastní výpočet emisí.

$$\text{obecně: } M_E = W \cdot 75000 \cdot L_E \cdot 10^{-3} = 93,541 \cdot L_E \quad [\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

$$\text{CO: } M_E = 93,541 \cdot 11,2 = 1047,659 \quad [\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

$$\text{HC: } M_E = 93,541 \cdot 2,4 = 224,498 \quad [\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

$$\text{NO}_x: M_E = 93,541 \cdot 14,4 = 1346,990 \quad [\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

$$\text{PM: } M_E = 93,541 \cdot 0,5 = 46,771 \quad [\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

Druhá skupina:

- průměrná spotřeba energie na ujetou vzdálenost 100km při spotřebě $\Phi = 30,57$ [l],

$$E = \Phi \cdot \rho \cdot H \quad [\text{MJ} \cdot 100\text{km}^{-1}]$$

$$E = 30,57 \cdot 0,83 \cdot 42 = 1065,670 \quad [\text{MJ} \cdot 100\text{km}^{-1}]$$

$$E = 10,657 \quad [\text{MJ} \cdot \text{km}^{-1}]$$

- průměrná práce motoru na dráze 1km,

$$W = E / (m_{pe} \cdot H) \quad [\text{kWh} \cdot \text{km}^{-1}]$$

$$W = 10,657 / (0,25 \cdot 42) = 1,015 \quad [\text{kWh} \cdot \text{km}^{-1}]$$

- vlastní výpočet emisí.

$$\text{obecně: } M_E = W \cdot 135000 \cdot L_E \cdot 10^{-3} = 137,014 \cdot L_E \quad [\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

$$\text{CO: } M_E = 137,014 \cdot 11,2 = 1534,557 \quad [\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

$$\text{HC: } M_E = 137,014 \cdot 2,4 = 328,834 \quad [\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

$$\text{NO}_x: M_E = 137,014 \cdot 14,4 = 1973,002 \quad [\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

$$\text{PM: } M_E = 137,014 \cdot 0,5 = 68,507 \quad [\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}]$$

Produkci pevných částic norma EURO 0 nelimituje, proto tento údaj nahrazují jen čistě pro orientaci hodnotami normy EURO 1 u obou skupin.

Třetí skupina:

- průměrná spotřeba energie na ujetou vzdálenost 100km při spotřebě $\Phi = 28$ [l],

$$E = \Phi \cdot \rho \cdot H \quad [\text{MJ} \cdot 100\text{km}^{-1}]$$

$$E = 28 \cdot 0,83 \cdot 42 = 976,1 \quad [\text{MJ} \cdot 100\text{km}^{-1}]$$

$$E = 9,761 \quad [\text{MJ} \cdot \text{km}^{-1}]$$

- průměrná práce motoru na dráze 1km,

$$W = E / (m_{pe} \cdot H) \quad [\text{kWh} \cdot \text{km}^{-1}]$$

$$W = 9,761 / (0,21 \cdot 42) = 1,107 \quad [\text{kWh} \cdot \text{km}^{-1}]$$

- vlastní výpočet emisí.

$$\text{obecně: } M_E = W \cdot 210000 \cdot L_E \cdot 10^{-3} = 232,470 \cdot L_E \quad [\text{kg.rok}^{-1}]$$

$$\text{CO: } M_E = 232,470 \cdot 1,5 = 348,705 \quad [\text{kg.rok}^{-1}]$$

$$\text{HC: } M_E = 232,470 \cdot 0,13 = 30,221 \quad [\text{kg.rok}^{-1}]$$

$$\text{NO}_x: M_E = 232,470 \cdot 0,4 = 92,988 \quad [\text{kg.rok}^{-1}]$$

$$\text{PM: } M_E = 232,470 \cdot 0,01 = 2,325 \quad [\text{kg.rok}^{-1}]$$

Porovnání vypočtených hodnot:

Skupina	Vypočtené hodnoty emisí [kg.rok ⁻¹]			
	CO	HC	NO _x	částice
1	1147,659	224,498	1346,990	46,771
2	1534,557	328,834	1973,002	68,507
celkem	2582,216	553,332	3319,992	115,278
3	348,705	30,221	92,988	2,325
rozdíl	2233,511	523,111	3227,004	112,953

Tab. 9 – Porovnání jednotlivých skupin autobusů a jejich roční produkce emisí při daném nájezdu

6.2 Dílčí závěr

Z výše uvedených z výpočtů ekologické zátěže je zřetelně vidět rozdíl v ekologické zátěži starými a novými autobusy. Výsledné hodnoty jsou shrnuty v následující tabulce. Při aplikaci na celý vozový park by tento rozdíl v poměrných číslech nebyl tak veliký, neboť následující skupina autobusů již splňuje emisní limity normy EURO III a EURO IV. Navíc obměna vozového parku i v takto malé skupině, jedná se o 8 autobusů, je značně nákladnou záležitostí.

Skupina	Vypočtené hodnoty emisí [g.km ⁻¹]			
	CO	HC	NO _x	částice
1	15,302	2,993	17,960	0,624
2	11,367	2,436	14,615	0,507
průměr	12,296	2,635	15,809	0,549
3	1,661	1,439.10 ⁻⁴	3227,004	1,107.10 ⁻⁵

Tab. 10 – Porovnání jednotlivých skupin autobusů a jejich produkce emisí při ujetí dráhy 1 kilometru

7 Závěr

Ve své práci jsem neuváděl studie vozidel s hybridními pohony, neboť to nebylo ani cílem mé práce, ale také z důvodu nedostatku informací o těchto vozidlech. Při řešení modelu řízení hybridního pohonu jsem se zabýval hlavně energetickou bilancí a ekologickou zátěží na životní prostředí. Vypočítané hodnoty potřebných výkonů a momentů jsou brány jako maximální, ale výsledné hodnoty se mohou lišit dle použitého konstrukčního řešení. Toto jsem nechal otázkou otevřenou s možností pokračování v práci na tomto tématu, ale vlastním rozsahem by nebylo možné tuto problematiku obsáhnout v daném rozsahu.. Možnosti využití hybridních pohonů jsou veliké a myslím, že v budoucnu se stanou naprosto běžnou poháněcí soustavou.

Při aplikaci na data Dopravního podniku města Pardubic je názorně vidět výrazný rozdíl v ekologičnosti starého a nového řešení. Podle udávaných hodnot je návratnost investice zhruba 6 let a to i bez dotací ze strany státu. V případě některých evropských zemí jsou tyto typy vozidel, a to ne jen prostředků MHD, státem zvýhodněny, protože ekologie je dnes jedno z nejfrekventovanějších témat a je snaha dělat vše co nejšetrněji s ohledem na ekologii. V takovém případě se návratnost investice ještě urychlí. Vezmeme-li v úvahu, že životnost autobusu se dnes počítá na 15 let, i bez dotačních prostředků nám bude více jak polovinu své životnosti autobus spořit.

Do budoucna si ale osobně myslím, že by se od hybridních pohonů pro prostředky MHD mohlo ustoupit a nahradí je plně elektrizovaná vozidla. Již dnes jsou prototypy elektroautobusů, které na jedno nabití ujedou vzdálenost cca 70 kilometrů a opětovné nabití trvá pouhých 10 minut.

Přehled používaných symbolů

V	rychlost	[km.h ⁻¹]
n_m	otáčky motoru	[ot.min ⁻¹]
r_d	dynamický poloměr kola	[m]
i_c	celkový převodový poměr	[-]
V_{max}	maximální rychlost	[km.h ⁻¹]
F_ψ	celkový jízdní odpor	[N]
α	stoupání	[°]
α_{max}	maximální stoupání	[°]
c_x	součinitel odporu vzduchu	[-]
m_c	celková hmotnost autobusu	[kg]
g	gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
S_č	velikost čelní plochy autobusu	[m ²]
š	šířka autobusu	[m]
h	výška autobusu	[m]
f	součinitel valivého odporu	[-]
v	rychlost	[m.s ⁻¹]
P_{max}	maximální výkon	[W]
η_m	účinnost motoru	[-]
η	účinnost přeměny energie	[-]
M_m	točivý moment motoru	[Nm]
F_v	výsledný odpor autobusu	[N]
E_R	energie pro rozjezd autobusu	[J]
P_R	výkon pro rozjezd autobusu	[W]
P_Z	výkon získaný během stání v zastávce	[W]
E	energie paliva	[MJ.km ⁻¹]
E_{mh}	energie paliva na motohodinu	[MJ.mh ⁻¹]
E_{mm}	energie paliva na motominutu	[MJ.mm ⁻¹]
W	průměrná práce na 1 km	[J]

Seznam použité literatury

- [1] Petříček O. – Pracovní zpráva 2003
- [2] <http://www.techblog.cz/technologie/kondenzatory-z-nanotrubek-nahradi-akumulatory.html>
- [3] http://www.enviros.cz/palivove_clanky
- [4] www.wikipedia.cz
- [5] Melicher M., Bršlica V. – Výzkumná zpráva číslo 0795-4-2004
- [6] <http://news.auto.cz/uzitkove/svetova-premiera-mercedes-benz-citaro-g-bluetec-hybrid.html>
- [7] http://www.treehugger.com/files/2008/01/citaro_hybrid_bus_dekra_2008.php
- [8] <http://jcwinnie.biz/wordpress/?p=2211>
- [9] prezentace firmy Solaris
- [10] <http://www.busportal.cz/modules.php?name=article&sid=5286>
- [11] http://www.newflyer.com/index/hybrid_buses_intro
- [12] <http://www.gillig.com/New%20GILLIG%20WEB/default.htm>
- [13] <http://www.karosa.cz/main.php?show=products&language=czech>