



**Univerzita Pardubice**  
**Dopravní fakulta Jana Pernera**

# **Návrh řešení hybridního autobusu**

**Jan Pátek**

**Bakalářská práce**  
**2010**

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Jan PÁTEK  
Osobní číslo: D06057  
Studijní program: B3709 Dopravní technologie a spoje  
Studijní obor: Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě  
Název tématu: Návrh řešení hybridního autobusu  
Zadávající katedra: Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

### Zásady pro vypracování:

- 1) Úvod
- 2) Přehled variant možných řešení, jejich porovnání.
- 3) Analýza volby spalovacího motoru.
- 4) Energetické výpočty.
- 5) Konkrétní návrh uspořádání komponentů hybridního autobusu.
- 6) Návrh silového ovládacího systému.
- 7) Závěr

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tisková**

Seznam odborné literatury:

Gregora S.; Ouředník J.: Elektrotechnika a zabezpečovací technika v dopravní infrastruktuře, skripta Upa 2005

Jansa F.: Dynamika a energetika elektrické trakce, NADAS 1980

Vydrňal T.: Návrh alternativního zdroje energie pohonu elektromobilu, Bakalářská práce KEEZ

Vlk F.: Vozidlové a spalovací motory, nakladatelství Vlk, Brno 2003

Takáts M.: Měření emisí spalovacích motorů, skripta ČVUT Praha 1997

Vedoucí bakalářské práce:

**doc. Ing. Stanislav Gregora, Ph.D.**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **5. ledna 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2010**

prof. Ing. Bohuslav Cudák, CSc.  
děkan

L.S.

prof. Ing. Vladimír Šebek, CSc.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. března 2010

## Čestné prohlášení

Prohlašuji:

Tuto 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 podle § 60 ods. 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 prezentačním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 22. 5. 2010

Jan Pátek

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Doc.Ing.Stanislavu Gregorovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, všestrannou pomoc, vstřícnost a ochotu při tvorbě této bakalářské práce.

## **Anotace**

Cílem této bakalářské práce je provést návrh hybridního pohonu určeného pro příměstský autobus. Práce analyzuje jednotlivé varianty řešení hybridního pohonu a na základě této analýzy je zvoleno konkrétní jeho řešení. Hlavním cílem práce jsou energetické výpočty a stanovení základních parametrů jednotlivých komponentů pohonu, přičemž hlavní úkol byl zaměřen na dimenzaci prvku pro ukládání energie – superkapacitor. V práci jsem provedl energetickou bilanci pro vytipovaný vozební úsek, ze které vychází algoritmus řízení. V závěru práce je naznačeno blokové schéma silového obvodu a jeho řízení.

### **Klíčová slova**

Hybridní pohon, vznětový motor, trakční motor, akumulátor energie

## **Annotation**

The main aim of this bachelor is to make a proposal of a hybrid engine, intended for a suburban bus. The bachelor is analysing individuals alternations of a solutions to a hybrid engine. Than, on the basis of this analysis is elected it's concrete solution. The main aim if my work are the power calculations and seting of basic parametrs of particular components of the mechanism, whereas the main task is aimed to a component's dimension for stocking the energy –superkapacitor. In my bachelor I have made a power balance for intended segment, from which the algoritm of proceeding is coming-out. In the conclusion of my bachelor is indicated the sectional schema of power circuit and it's proceeding.

### **Keywords**

Hybrid drive, diesel engine, traction motor, energy accumulator

# Obsah

Úvod.....	9
1 Přehled variant možných řešení, jejich porovnání.....	11
1.1 Sériový hybridní pohon.....	11
1.2 Paralelní hybridní pohon .....	12
1.3 Kombinovaný hybridní pohon.....	13
1.4 Kombinovaný hybridní pohon s elektrickým děličem výkonu.....	15
2 Analýza volby spalovacího motoru.....	17
3 Energetické výpočty .....	20
3.1 Přehled odporových sil působících na vozidlo.....	20
3.2 Zadané parametry a podmínky provozu hybridního autobusu .....	24
3.3 Návrh výkonu spalovacího motoru/generátoru.....	25
3.4 Návrh akumulčního zdroje energie.....	28
3.5 Energetická analýza – stanovení kapacity superkapacitoru.....	29
3.6 Návrh trakčního motoru.....	39
4 Konkrétní návrh uspořádání komponentů hybridního autobusu .....	40
5 Návrh silového obvodu.....	41
Závěr .....	44
Seznam literatury .....	46
Seznam zkratk.....	48
Seznam obrázků .....	49
Seznam grafů.....	50
Přílohy .....	51



## Úvod

V dnešní době je kladen velký důraz na ochranu životního prostředí. Konstrukteři automobilových koncernů a je jedno zda se zabývají konstrukcí osobních vozů, nákladních vozů nebo autobusů jsou nuceni, aby jejich nové vozy produkovali méně skleníkových plynů než tomu bývalo v minulosti. Vyspělé země se zavázali podpisem Kjótské smlouvy tohoto docílit a produkci skleníkových plynů snížit. Evropská unie vydala evropské emisní standardy, kterými se řídí i česká republika. První s těchto standardů EURO 1 byl vydán v roce 1993 a byl poměrně benevolentní. Norma určovala stejné množství emisí benzínových i naftových motorů navíc emise  $\text{NO}_x$  a HC se sčítali. Daleko tvrdší je nejnovější evropská norma EURO 5 z března 2009. Norma EURO 5 postihuje především vznětové motory které se snaží co se produkce emisí týče srovnat s motory benzínovými.

Jako možná řešení k snížení emisí a tím splnění emisních norem se jeví koncept hybridního pohonu. Hybridní pohon je založen na kombinaci minimálně dvou rozdílných zdrojů energie. Nejčastěji se využívá spalovacího motoru a elektromotoru. V úvahu přichází i varianta, kde je spalovací motor nahrazen palivovým článkem. Další možnost skýtá nahrazením spalovacího motoru plynovým motorem na CNG.

Myšlenka hybridního pohonu není v žádném případě novátorská. První experimenty s hybridními pohony u automobilů se datují do roku 1899, kdy americký konstruktér A. J. Allenen skombinoval tehdy ještě nedokonalý Ottův spalovací motor s elektromotorem. V roce 1905 si koncept hybridního pohonu nechal patentovat H. Piper. V té době byli ceny pohonných hmot v porovnání s těmi dnešními směšné. Navíc akumulátory energie byli značně nedokonalé, proto se myšlenkou hybridního pohonu dále nezabývali. V současnosti je situace zcela opačná. Vývoj cen pohonných hmot neustále roste a jednou z možných řešení snížení spotřeby pohonných hmot a s nimi spjaté rostoucí náklady je aplikace hybridního pohonu .

V bakalářské práci se pokusím rozebrat možná řešení hybridních pohonů využívající spalovacího motoru, která se běžně používají (sériový pohon, paralelní pohon, kombinovaný pohon a pohon s děličem výkonu) a zvolené vhodné řešení aplikuji na návrh hybridního autobusu. V návrhu se budu rovněž zabývat dimenzováním jednotlivých komponent autobusu, jakož jsou dimenzování

spalovacího a trakčního motoru či vhodného akumulčního prvku. Dále navrhnu silové schéma jednotlivých komponent s možným řízením tohoto pohonu.

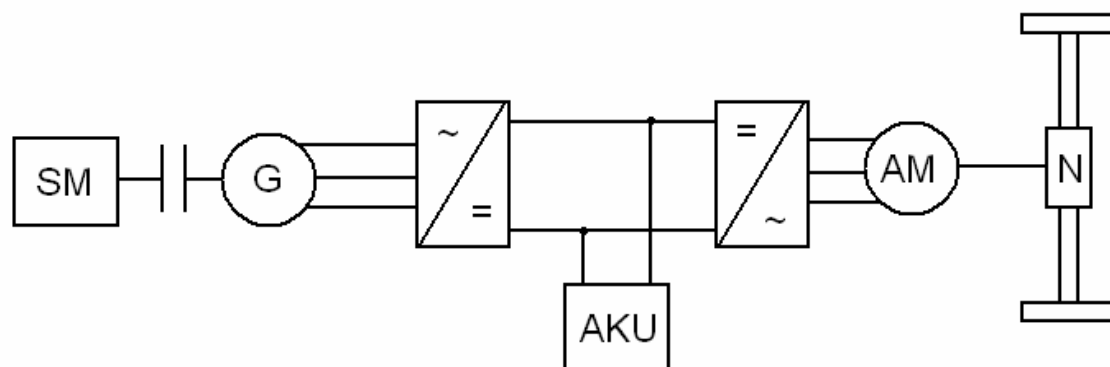
# 1 Přehled variant možných řešení, jejich porovnání

Hybridní pohon představuje jednu z cest jak snížit ekologickou zátěž vyplívající z provozu spalovacího motoru. Koncept hybridního pohonu je založen na kombinaci spalovacího motoru a elektrického motoru doplněným vhodným akumulátorem energie. Pro hybridní pohony se jako akumulátory energie používají elektrochemické akumulátory či superkapacitory.

## 1.1 Sériový hybridní pohon

Sériová hybridní soustava je tvořena spalovacím motorem, který pohání pouze generátor, ale s poháněnými koly není mechanicky spojen. Takto vyrobená elektrická energie napájí přímo trakční motor. Základem této kombinace je spalovací motor pevně spojený s generátorem. Spalovací motor zde pracuje s největší možnou účinností protože otáčky spalovacího motoru nejsou svázány s otáčkami kol náprav. Pohonná náprava je pak poháněna trakčním elektromotorem. Obvykle se využívají trakční asynchronní motory s výkonovými konvertory, které umožňují dosažení téměř ideálních trakčních vlastností. Nedílnou součástí této koncepce je také vhodný akumulátor energie, který pokryje výkonové špičky při akceleraci nebo při jízdě do svahu. Blok spalovací motor/generátor poskytuje trakčnímu elektromotoru konstantní výkon jehož velikost by stačila na pokrytí dlouhé jízdy bez brždění (dálnice). Akumulátory energie by se uplatnili zejména v městském provozu kde dochází k častému zastavení při kterém je možné dobití akumulčního členu rekuperačním bržděním.

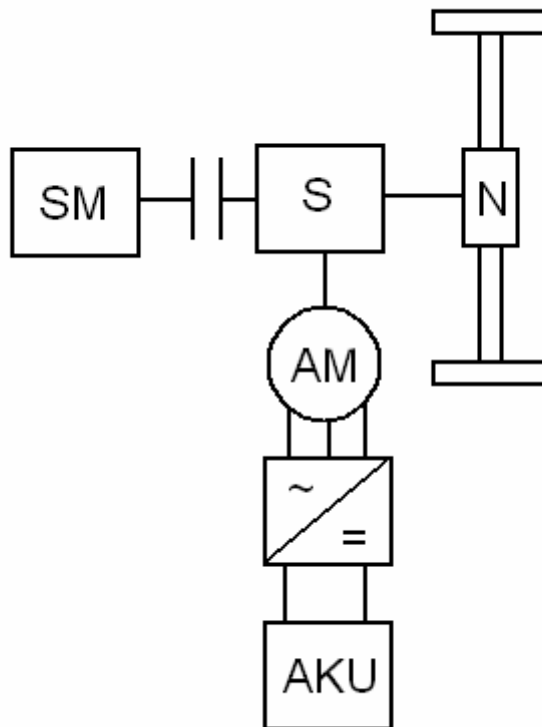
Výhodou sériového uspořádání je možnost dosažení takřka ideálního pracovního bodu spalovacího motoru, tak aby jeho účinnost byla při daném výkonu maximální. Naopak nevýhodou tohoto uspořádání představují vyšší ztráty při přenosu energie. [1]



Obr. 1 Schéma sériového hybridního pohonu [4]

## 1.2 Paralelní hybridní pohon

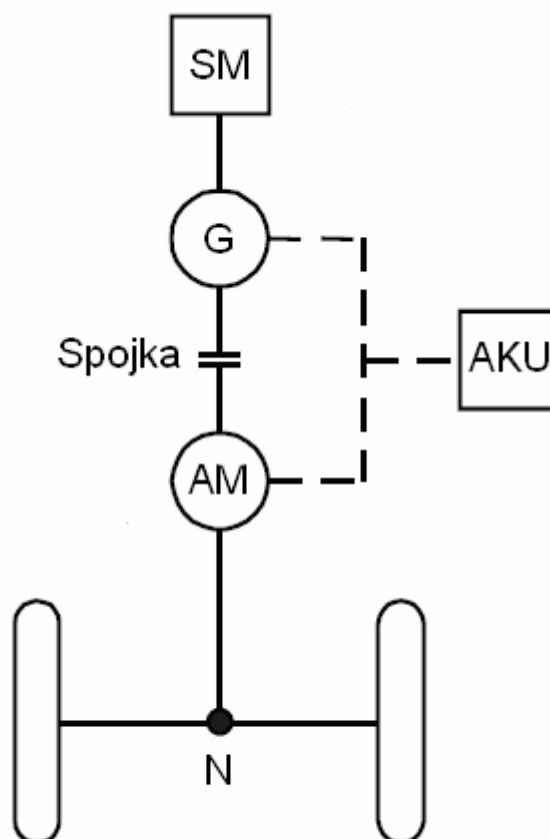
Paralelní hybridní pohon je tvořen klasickým přenosem výkonu spalovacího motoru přes slučovač momentu na hnací nápravu. Ve slučovači momentu dochází k sčítání momentu spalovacího a trakčního motoru. Přínos paralelního pohonu spočívá ve zvýšení účinnosti spalovacího motoru vhodnou volbou pracovního bodu. Protože jsou otáčky spalovacího motoru pevně svázány s rychlostí vozidla je toto zvýšení účinnosti v jistých mezích. Spalovací motor podobně jako je tomu v případě sériového pohonu poskytuje vozidlu konstantní výkon. V případě, že je výkon poskytovaným spalovacím motorem větší než výkon požadovaný dochází k rozdělení tohoto výkonu na část přímo pohánějící hnací nápravu a na část, která se v trakčním motoru pracující v generátorovém režimu mění na elektrickou energii dobíjející akumulací prvek. Takto uložená elektrická energie je poté využívána pro napájení trakčního motoru při požadavku na větší výkon než je schopen spalovací motor poskytnout. Výhodou paralelního pohonu v porovnání se sériovým pohonem vyšší účinnost přenosu energie. [1]



Obr. 2 Schéma paralelního hybridního pohonu [4]

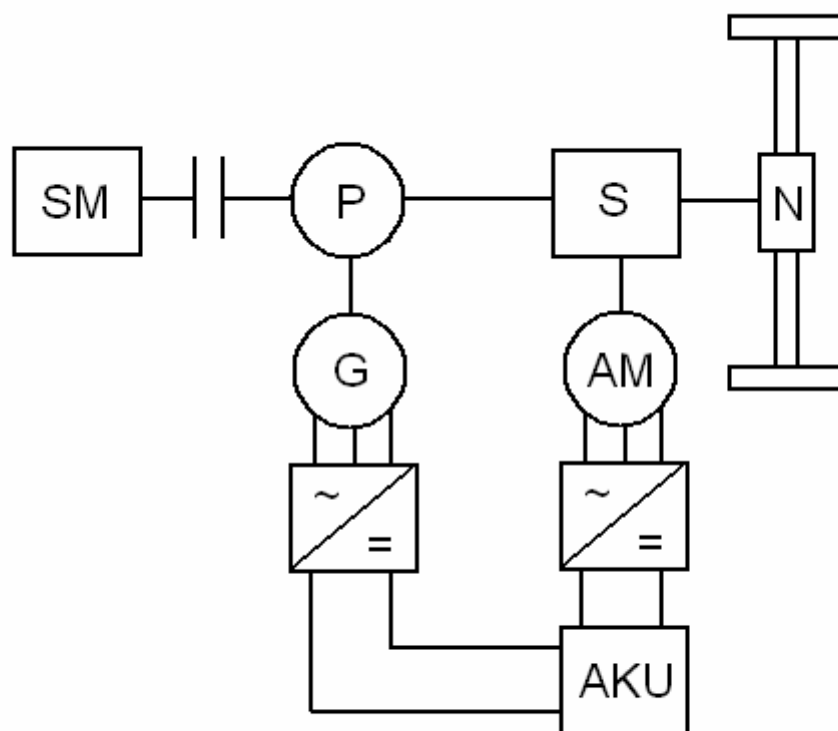
### 1.3 Kombinovaný hybridní pohon

Kombinované pohony můžeme rozdělit na přepínatelné a na pohony s děličem výkonu. Jestliže je u přepínatelného pohonu spojka rozpojena pracuje pohon jako sériový. Při sepnuté spojce naopak jako paralelní. Princip obou pohonů je zcela totožný jako tomu bylo v případě sériového a paralelního pohonu, rovněž jejich výhody a nevýhody jsou zcela totožné.



**Obr. 3 Kombinovaný přepínatelný pohon [1]**

Základem pohonu s děličem výkonu je planetová převodovka se dvěma stupni volnosti. Tato převodovka umožňuje dle požadovaného výkonu rozdělení výkonu spalovacího motoru na část, která se mechanicky přenáší na hnací kola přes slučovač momentu a na část, která pohání generátor. Energie vyrobená generátorem poté dobíjí akumulátor energie. V případě brždění pracuje elektromotor jako generátor a vzniklá energie dobíjí akumulátor. Jako dělič výkonu lze použít i stroje s rotujícím státorem či rotorem (kapitola 1.4). Výhodou tohoto systému je zachování optimálního pracovního bodu spalovacího motoru a oproti sériovému systému snížení ztrát při přenosu výkonu. [1]

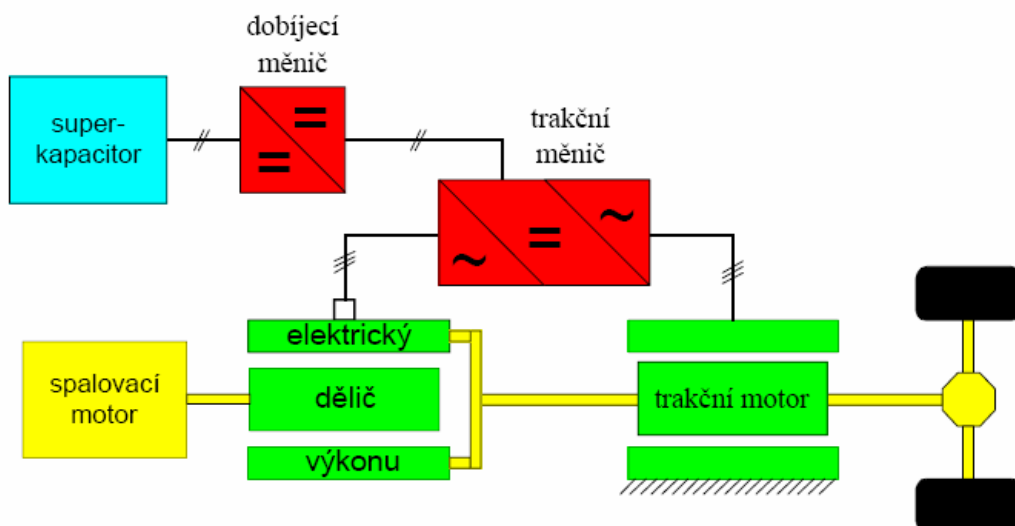


**Obr. 4 Schéma kombinovaného pohonu s mechanickým děličem výkonu [4]**

## **1.4 Kombinovaný hybridní pohon s elektrickým děličem výkonu**

Elektrický dělič výkonu je tvořen speciálním strojem s rotujícím státorem a rotorem. Rotor tohoto stroje je spojen s hřídelí spalovacího motoru jehož výkon se přes vzduchovou mezeru přenáší elektromagnetickými silami na stator. Rotující stator děliče výkonu je spojen s elektromotorem a s výstupní hřídelí. Moment spalovacího motoru se tak přičítá k hnacímu momentu elektromotoru. Při rozjezdu vozidla z nulové rychlosti se celý výkon spalovacího motoru mění v děliči výkonu na elektrickou energii která napájí trakční elektromotor. Tento systém je totožný se sériovým pohonem s tím rozdílem, že moment na hřídeli za elektromotorem je větší o moment spalovacího motoru. Jakmile se vozidlo začne pohybovat klesnou rozdílné otáčky statoru a rotoru elektrického děliče a v důsledku toho dochází ke snížení elektrického výkonu děliče i trakčního motoru. Zbývající výkon poskytovaný spalovacím motorem se přenáší elektromagnetickými silami přes vzduchovou

mezeru na stator a dále pak na hnací nápravu vozidla. S postupným zvyšováním rychlosti klesá podíl výkonu přenášejícím se elektricky a zvětšuje se část výkonu přenášená mechanicky. V důsledku toho klesají ztráty vznikající v elektrických strojích. [1]



**Obr. 5 Kombinovaný hybridní pohon s elektrickým děličem výkonu [1]**

Na základě provedení analýzy a porovnání výhod a nevýhod jednotlivých variant jsem se rozhodl pro aplikaci sériového konceptu. Je sice pravda, že oproti paralelnímu a kombinovanému konceptu vykazuje sériový koncept nižší účinnost. Na druhou stranu u sériového konceptu lze dosáhnout rovnoměrného zatížení motoru a výborné trakční charakteristiky. Další výhodou je možnost realizace individuálního pohonu pro každé kolo samostatně. Což je předpoklad pro realizaci protismykové ochrany.



## 2 Analýza volby spalovacího motoru

Spalovací motor hybridního pohonu je základní jednotka, která společně s generátorem poskytuje vozidlu konstantní výkon. Spalovací motor přitom pracuje v optimálním režimu ve kterém motor produkuje nižší obsah škodlivých látek a motor má také menší spotřebu pohonných hmot. V hybridních autobusech využívající jako primární zdroj energie spalovací motory (používají se i palivové články) se využívají vznětové motory. Vznětový motor i při své práci v optimálním režimu produkuje vyšší množství škodlivých látek než při spalováním CNG. V dnešních ekologických autobusech jsou proto vznětové motory nahrazovány motory spalující CNG. Do budoucna by rovněž vznětové motory hybridních autobusů mohli být nahrazeny motory spalující CNG.

Zkratka CNG (Compressed Natural Gas) znamená stlačený zemní plyn. V zásobnících plynu umístěných na střeše autobusu dosahuje tlak až 200 bar. Zemní plyn CNG se skládá z 85% z metanu, z 10% z dusíku a z 5% z vyšších uhlovodíků. Přestože zemní plyn řadíme společně s naftou a benzínem mezi fosilní paliva vznikají při spalování CNG v plynových motorech výrazně nižší emise než je tomu v případě benzínových či vznětových motorů.

Při spalování jak kapalných tak plyných paliv vznikají škodlivé látky. Jejich množství je ovlivněno jak druhem paliva, tak konstrukcí spalovacího motoru a vhodným katalytickým filtrem. Při spalování paliv se do ovzduší uvolňuje CO o jehož odstranění se plně stará katalyzátor. Odstranění  $\text{NO}_x$  je poněkud náročnější. Největším problémem spalováním CNG je odstranění uhlovodíků HC ve výfukových plynech. Běžné Pt/Rh katalyzátory jsou schopné efektivně odstranit zbylé  $\text{C}_5^+$  z výfukových plynů vzniklé spalováním kapalného paliva. K odstranění metanu je však zapotřebí zhruba o 50% vyšší teplota než poskytuje Pt/Rh katalyzátor. Jestliže jsou u CNG legislativně omezeny emisní množství nemetanových uhlovodíků jako je tomu v USA, je použití plyného paliva z ekologického hlediska zcela bezproblémové. U nás je situace zcela odlišná, vozidla využívající CNG musí splňovat stejné emisní limity uhlovodíků do kterých se počítá i metan. Zde tedy vzniká problém neboť běžné katalyzátory by nemuseli dosáhnout požadovaného snížení emisí. Tento problém je nyní řešen konstrukcí katalyzátoru s obsahem

paladia. Paladium způsobí pokles potřebné oxidační teploty při kterém se uhlovodíky odstraňují.

Výhoda plynových motorů spočívá v jejich naprosté spolehlivosti a to i při nižších teplotách. Vznětový motor musí být vybaven předžahovací soustavou, aby byl vznětový motor při nižších teplotách vůbec schopen rozběhu. Plynové motory mají o něco větší rozměry v porovnání se vznětovými motory, což je dáno nižší výhřevností plynového paliva (nafta 35,27MJ/l, zemní plyn 34,08MJ/m<sup>3</sup>) je tedy zapotřebí většího objemu motoru. Plynové motory pracují se stechiometrickým poměrem  $\lambda=1$  tedy v oblasti chudých směsí což není pro silniční vozidla příliš ideální a může docházet k nepravidelnosti chodu plynového motoru.

Z hlediska množství spotřebovaného paliva mají plynové motory o 20 – 25% vyšší spotřebu pohonných hmot než je tomu u vznětového motoru. Spotřeba paliva je samozřejmě ovlivněna rychlostním režimem ve kterém je motor provozován. Na druhou stranu je vyšší spotřeba plynových motorů vykompenzována nižší cenou paliva v porovnání s motorovou naftou o 40 – 45%.

Z hlediska produkce emisí vykazuje plynový motor daleko příznivější hodnoty než je tomu u naftových motorů. Plynové motory jsou rovněž daleko tiší a to i v porovnání se vznětovými motory vybaveny systémem common-rail. Pro splnění emisních limitů postačí plynovým motorům pouze zpětnovazební lambda regulace, která udržuje  $\lambda=1$ . Což je určité konstrukční zjednodušení v porovnání se vznětovými motory. U vznětových motorů jsou emisní limity splněny vybavením vznětového motoru zpětným zavedením výfukových plynů. Množství zpětně zavedených výfukových plynů je řízeno otevíráním či zavíráním EGR ventilu, mezichladičem, SCR katalyzátorem a filtrem pevných částic.

Jak je z výše uvedeného patrné skýtá v sobě plynový motor řadu výhod, ale i některé nevýhody. Jako největší problém se v současnosti jeví malá infrastruktura plicích stanic. Náklady na vybudování plynových stanic s provozní obsluhou nebo vybavením servisního pracoviště vhodným odvětráváním jsou značné. Proto je zde nutné zamýšlení nad efektivitou provozu plynových motorů. Existuje zde možnost mít vlastní malou kompresorovou stanici, která je napojena na nízkotlaké veřejné plynové potrubí. Takové stanice vyrábí např. švýcarská firma Sulzer pod názvem

Fuel Maker. Stanice má výkon 3 m<sup>3</sup>/h (běžné velké stanice mají výkon okolo 1000 m<sup>3</sup>/h).

Plynové motory jsou určitě do budoucna vhodnou náhradou vznětových motorů a to i pro velmi ekologické hybridní pohony, jejichž efektivita by se tím ještě zvýšila. V současné době by se provoz hybridního autobusu na plynový pohon nevyplatil a to hlavně z důvodu nedostačující infrastruktury. Proto se ve svém návrhu hybridního autobusu budu věnovat vznětovým motorům. [2, 3]

### 3. Energetické výpočty

Pro stanovení výkonových parametrů trakčního pohonu a akumulačního komponentu energie - superkapacitoru bude zapotřebí provést trakční výpočty, které budou zahrnovat výpočty vozidlových odporů a urychlujících sil. Pomocí těchto výpočtů bude stanoven výkon spalovacího motoru a generátoru. Dále bude provedena energetická analýza pro vytypovaný vozební úsek, ze které bude stanovena potřebná kapacita akumulátoru energie.

#### 3.1 Přehled odporových sil působících na vozidlo

Na pohyb vozidla působí vnější odporové síly vyvolané okolním prostředím. Tyto síly působí proti pohybu vozidla a tím pohyb zpomalují (valivý odpor, odpor ze stoupání, odpor setrvačný, vzdušný odpor). Odporová síla může také pohyb vozidla urychlovat, pokud síla působí ve směru pohybu ( vozidlo jede z kopce). Jestliže síla urychluje pohyb vozidla je značena (-).

##### Značení jízdnicích odporů:

- Valivý odpor..... $O_f$
- Odpor tření v převodovém ústrojí ..... $O_t$
- Odpor stoupání..... $O_s$
- Odpor setrvačný ..... $O_z$
- Vzdušný odpor vozidla..... $O_v$

##### Valivý odpor:

Valivý odpor  $O_f$  vzniká jako následek styku pneumatiky kola s vozovkou. Jestliže je povrch na kterém se vozidlo pohybuje natolik tvrdý, že nedochází k deformaci povrchu, dochází k deformaci pneumatik. V přední nápravě dochází ke stlačování pneumatiky a v zadní nápravě se kolo vrátí do původního tvaru. Velikost síly, která stlačení vyvolává, je větší než síla která uvede pneumatiky do původního stavu. Síly se sobě nerovnají protože během tohoto děje vznikají ztráty, které se přeměňují v teplo. Velikost odporu je ovlivněna velikostí, druhem a nahuštěním pneumatik.

$$O_f = f_r G = f_r mg \text{ [N]} \quad (3.1)$$

kde:

$O_f$  – je valivý odpor vozidla

$G$  – je celková tíha

$f_r$  – součinitel valivého odporu závisí především na povrchu vozovky

### **Odpor tření v převodovém ústrojí:**

Část výkonu motoru se ztrácí při přenosu výkonu z motoru přes převodovku na hnací nápravu. Tyto ztráty jsou způsobeny třením v převodovém ústrojí. Výkon ztracený třením v převodovém ústrojí  $P_t$  lze pokládat za úměrný přenášenému výkonu motoru  $P_m$  a je dán vztahem:

$$P_t = P_m (1 - \eta_t) \text{ [W]} \quad (3.2)$$

kde:

$(1 - \eta_t)$  - je ztrátový součinitel

$\eta_t$  - mechanická účinnost převodového ústrojí.

### **Odpor stoupání:**

Při pohybu vozidla do stoupání je velikost odporu dána náklonem vozovky a složkou tíhy rovnoběžnou s povrchem vozovky. Odpor stoupání je při jízdě vozidla do svahu kladný. Při jízdě vozidla ze svahu naopak záporný a dochází k urychlování pohybu. Nepředstavuje tedy odpor, ale pohon vozidla. Při výpočtech se na místo úhlu stoupání ve stupních používá sklon svahu s udávaný v procentech.

$$O_s = \pm G \sin \alpha \text{ [N]} \quad (3.3)$$

Kde:

$G$  – je celková tíha [N]

$\alpha$  – úhel stoupání

$$\alpha = \arctg \frac{s}{100} \quad (3.4)$$

### **Odpor setrvačný:**

Setrvačný odpor vozidla se začne uplatňovat v okamžiku zrychlování vozidla. V tomto okamžiku působí proti směru zrychlení síla setrvačnosti, která vyvolá

setrvačný odpor  $O_z$ . Tento odpor nabývá kladných hodnot při zrychlování a naopak záporných hodnot při zpomalování. Setrvačný odpor je dán vztahem:

$$O_z = O_{zp} + O_{zr} \quad (3.5)$$

kde:

$O_{zp}$  – je odpor zrychlení posuvné části

$O_{zr}$  – odpor zrychlení rotačních částí

$$O_{zp} = \vartheta ma \quad [\text{N}] \quad (3.6)$$

kde:

$a$  – zrychlení vozidla

$m$  – hmotnost vozidla

$\vartheta$  - součinitel rotačních částí

$$O_{zr} = \left( \frac{J_m i^2 \eta + \sum J_k}{r_v^2} \right) a \quad [\text{N}] \quad (3.7)$$

kde:

( $J_m$  – moment setrvačnosti rotujících částí motoru [ $\text{kg.m}^2$ ],  $\eta$  – mechanická účinnost převodového ústrojí,  $\sum J_k$  – součet momentů setrvačnosti kol [ $\text{kg.m}^2$ ],  $r_v$  – poloměr valení poháněného kola [ $\text{m}$ ],  $a$  – zrychlení vozidla [ $\text{m/s}^2$ ])

### Vzdušný odpor vozidla:

Vzdušný odpor vozidla je způsoben tlakovým působením vzduchu na čelní plochu vozidla, dále pak třením vzduchu o povrch vozidla a vzduchem proudící chladicí soustavou nebo z ventilačních ztrát otáčení kol.

$$O_v = \frac{\rho_a}{2} c_x S_c v_r^2 \quad [\text{N}] \quad (3.8)$$

kde:

$c_x$  – součinitel odporu vzduchu

$S_v$  – čelní plocha vozidla [ $\text{m}^2$ ]

$\rho_a$  – měrná hustota vzduchu [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]

$v_r$  – rychlost vzduchu proudící kolem vozidla [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

Součinitel odporu vzduchu je  $c_x$  je závislý na možnosti obtékání vzduchu kolem vozidla. Konstanta se měří v aerodynamickém tunelu.

### **Celkový jízdní odpor:**

Celkový jízdní odpor získáme sečtením jednotlivých jízdních odporů tedy:

$$F_k = O_f + O_v + O_s + O_z \text{ [N]} \quad (3.9)$$

kde:

$O_f$  – Odpor valení

$O_v$  – Odpor vzduchu

$O_s$  – Odpor stoupání

$O_z$  – Odpor setrvačný

### 3.2 Zadané parametry a podmínky provozu hybridního autobusu

- Spalovací motor hybridního autobusu musí pracovat v optimálním režimu při minimální spotřebě a minimální produkci emisí.
- Při dlouhé jízdě bez zastavení (po dálnici) musí být spalovací motor schopen dodat potřebný výkon bez akumulčního prvku
- Při rozjezdech hybridního autobusu, jízdě do svahu, předjíždění bude potřebný výkon dorovnávat akumulční prvek.
- Celková hmotnost vozidla při plném obsazení (104 pasažérů)  $m=18000\text{kg}$
- Součinitel odporu vzduchu  $c_x=0,65$
- Součinitel valivého odporu  $f=0,015$
- Čelní plocha vozidla  $S_\xi=7\text{ m}^2$
- Maximální zrychlení autobusu  $a=1\text{ m/s}^2$
- Maximální zpomalení autobusu  $a_z=2,5\text{ m/s}^2$
- Napětí superkapacitoru  $U_{\text{cap}}=160\text{V}$
- Součinitel vlivu rotačních částí  $\vartheta = 1,05$
- Mechanická účinnost převodového ústrojí  $\eta_t = 0,9$
- Účinnost pohonných elektromotorů  $\eta_m = 0,9$
- Účinnost měniče a superkapacitoru  $\eta_{sc} = 0,85$
- Maximální uvažované stoupání činí 12%
- Maximální rychlost hybridního autobusu mimo obec  $100\text{ km.h}^{-1}$
- Maximální rychlost hybridního autobusu v obci  $50\text{ km.h}^{-1}$



### 3.3 Návrh výkonu spalovacího motoru/generátoru

Spalovací motor sériového hybridního autobusu je základní pohonnou jednotkou celého pohonu. Motor je přitom provozován v ideální oblasti otáček tak, aby produkce emisí a množství spotřebovaného paliva byly co nejnižší. Při návrhu spalovacího motoru musíme počítat s dvěmi variantami provozu. A to buď dlouhodobá a nepřerušovaná jízda vyšší rychlostí mimo obec (jízda po dálnici) nebo jízda v městském provozu s častými zastávkami. V prvním případě musí být spalovací motor schopen sám poskytnout dostatečný výkon k pohonu hybridního autobusu, neboť zde není prostor k nabíjení akumulčního členu a jeho použití by vedlo k totálnímu vybití. V druhém případě, kdy dochází k častému zastavení je akumulční člen pravidelně dobíjen, rekuperačním brzděním a jeho energie je využita při akceleraci autobusu, nebo k hrazení jiných zvýšených výkonových požadavků. Při stanovování samotného výkonu motoru vycházíme z velikosti odporových sil, které je nutno pro pohyb požadovanou rychlostí překonávat. Výkon spalovacího motoru je stanoven pro pohyb hybridního autobusu konstantní rychlostí. [2]

Stanovení výkonu spalovacího motoru bude vycházet z pracovních cyklů, ve kterých bude motor provozován. Jednou z výchozích podmínek je jízda maximální rychlostí v mimoměstském provozu. Jiná situace bude v případě, kdy vozidlo bude provozováno v zastávkovém provozu a navíc s měnícími se sklonovými poměry. Tam se bude muset provést energetická bilance určitého jízdního cyklu.

Výpočet výkonu spalovacího motoru při jízdě po rovině maximální rychlostí 100 km/h.

Výpočet odporu vzduchu:

$$O_v = \frac{\rho_a}{2} c_x S_c v_r^2 = \frac{1,202}{2} \cdot 0,65 \cdot 7 \cdot \left(\frac{100}{3,6}\right)^2 = 2,1 \text{ kN}$$

Výpočet odporu valení:

$$O_f = G_v f_r = m g f_r = 18 \cdot 10^3 \cdot 9,80665 \cdot 0,015 = 2,64 \text{ kN}$$

Celkový jízdní odpor roven součtu odporových sil:

$$F_k = \sum_i O_i = O_v + O_f = 2,1 + 2,64 = 4,74 \text{ kN}$$

Pro stanovení výkonu spalovacího motoru uvádí literatura [11] následující vztah:

$$P_{SM/G} = \frac{v}{1000 \cdot \eta_t \eta_m} \left( m \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \rho_a c_x S_e v^2 \right) \text{ [kW]} \quad (3.10)$$

kde:

první člen rovnice v závorce představuje valivý odpor vozidla a druhý součinitel odporu vzduchu.

$v$  – rychlost vozidla (dosazováno v m/s)

$\eta_t$  - účinnost převodového ústrojí

$\eta_m$  – účinnost elektromotoru

Pro jednoduchost lze vztah upravit na:

$$P_{SM/G} = F_k \cdot \frac{v}{3,6 \eta_t \eta_m} \text{ [W]} \quad (3.11)$$

Výkon spalovacího motoru je tedy po dosažení stanoven:

$$P_{SM/G} = F_k \frac{v}{3,6 \cdot \eta_t \eta_m} = 4,74 \cdot 10^3 \frac{100}{3,6 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 162,4 \text{ kW}$$

Spalovací motor/generátor rovněž poskytne dostatečný výkon pro jízdu do stoupání ( $s=5\%$ ) rychlostí 47 km/h.

Z vypočteného výkonu nyní můžeme zvolit vhodný spalovací motor/generátor. Jako ideální se jeví dieslový motor od firmy MAN, který je co se výkonu týče téměř shodný s teoreticky stanoveným výkonem. Konkrétně se jedná o motor MAN D 0826 LUH 12. Tento motor je rovněž použit v sériovém hybridním autobuse Ultracapbus.

#### Jmenovité parametry motoru MAN D 0826:

- Dieslový spalovací motor
- Výkon motoru 162 kW
- Točivý moment 900 N.m

- Obsah motoru 6871 ccm
- Hluk při stání autobusu 94 dB
- Hluk při jízdě autobusu 80 dB

**Jmenovité parametry generátoru:**

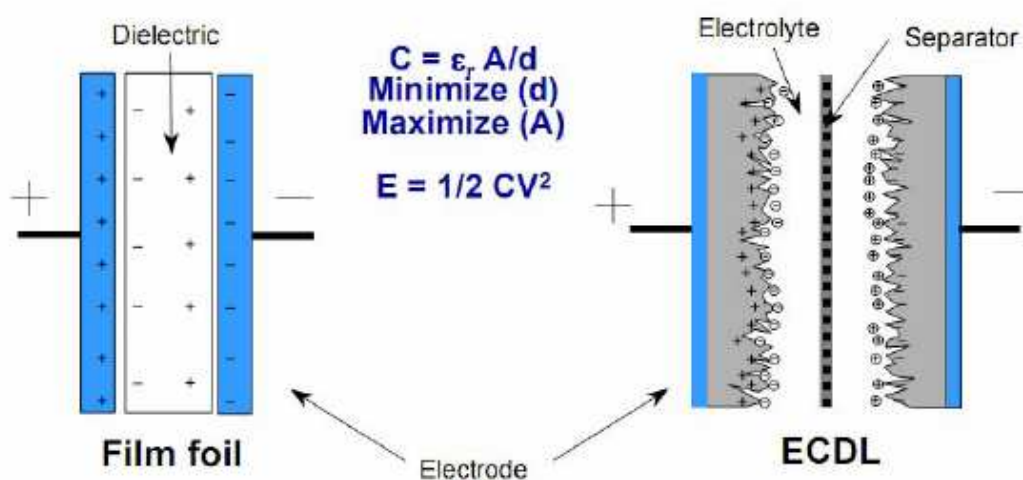
- Typ generátoru Voith TFM-G/26
- Výkon 150 kW
- Točivý moment 900 N.m

### 3.4 Návrh akumulčního zdroje energie

Druhou metodou pro stanovení výkonových parametrů je metoda energetické analýzy, kde je proveden energetický rozbor jízdních cyklů, kdy je energie vynakládána jen z generátoru, respektive doplňována ze superkapacitoru a stav kdy je energie rekuperována do energetického zásobníku.

Jako vhodný akumulční prvek energie přicházejí v úvahu elektrochemické akumulátory či superkapacitory. Zejména kvůli možnosti velice rychlého ukládání energie, kterou využijeme zejména při rekuperačním brždění volíme superkapacitor.

Superkapacitor je prvek, který svou konstrukcí v podstatě představuje elektrolytický kondenzátor, který je vyroben technologií umožňující dosáhnout kapacitu stovek až tisíců Faradů. Tato technologie využívá elektrochemickou dvouvrstvu, proto se také superkapacitor označuje zkratkou EDLC (Elektrochemic Double Layer Capacitor). Na obr. 6 se nachází vnitřní struktura superkapacitoru v porovnání s klasickým kondenzátorem.



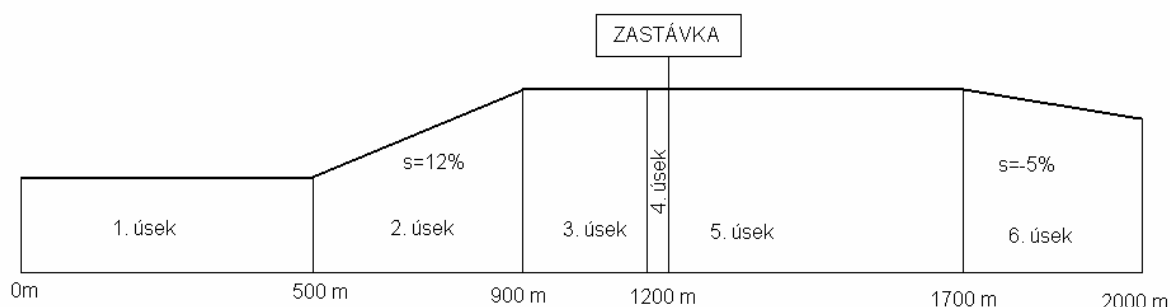
**Obr. 6 Porovnání běžného kondenzátoru se strukturou superkapacitoru[7]**

Energie v superkapacitoru je uložena ve formě elektrostatického náboje, proto je v porovnání s akumulátory ve kterých je energie vázaná chemicky mnohem rychlejší. Princip superkapacitoru je patrný z obrázku 6. Při přiložení napájecího napětí na elektrody dojde k přesunu kladných iontů k záporné elektrodě a záporných iontů ke kladné elektrodě. Povrch hliníkových elektrod je potažen vrstvou aktivního uhlíku. Aktivní uhlík je nanášen ve formě prášku tvořenými velmi malými částicemi,

který vytváří velice pórovitý povrch, jehož plocha v 1 g prášku vytváří plochu až 2000m<sup>2</sup>. Elektrody kondenzátoru jsou odděleny separátorem. Elektrolyt v superkapacitoru může být tekutý nebo ve formě gelu. Tloušťka dielektrika je velice malá 10<sup>-10</sup>m. Právě díky kombinaci veliké plochy a zanedbatelné tloušťce dielektrika je superkapacitor schopen pohltit tak veliké náboje. [7]

### 3.5 Energetická analýza - stanovení kapacity superkapacitoru

Na obr.7 je znázorněn příklad vozebního úseku. Vozební úsek je rozdělen na několik částí, pro každou část nyní určíme velikost zatížení superkapacitoru. Autobus se po celém úseku (s výjimkou rozjezdu na začátku, brzděním před zastávkou a rozjezdem za zastávkou) pohybuje konstantní rychlostí 50 km/h se zrychlením  $a=1 \text{ m/s}^2$  (po dobu 5 s rozjezdu s  $a=0,5 \text{ m/s}^2$ ) a se záporným zrychlením  $a_z=2,5 \text{ m/s}^2$ .



Obr. 7 Zadaný profil vozebního úseku

#### Fáze jízdy – zrychlení z 0 km/h na 9 km/h, spal. motor vypnut (1. úsek)

Po dobu 5 s se vozidlo urychluje s počátečním zrychlením  $a_x=0,5 \text{ m/s}^2$ , dosáhne tedy rychlosti  $v=9 \text{ km/h}$ .

Potřebná dráha na rozjezd:

$$s = \frac{1}{2} a_x \Delta t^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 5^2 = 6,25 \text{ m}$$

Výpočet odporu vzduchu:

$$O_v = \frac{\rho_a}{2} c_x S_c v_r^2 = \frac{1,202}{2} \cdot 0,65 \cdot 7 \cdot \left(\frac{9}{3,6}\right)^2 = 17,0 \text{ N}$$

Výpočet setrvačného odporu hmot:

$$O_z = \vartheta m a_x = 1,05 \cdot 18 \cdot 10^3 \cdot 0,5 = 9,4 \text{ kN}$$

Výpočet valivého odporu:

$$O_f = G_v f_r = m g f_r = 18 \cdot 10^3 \cdot 9,80665 \cdot 0,015 = 2,64 \text{ kN}$$

Celkový jízdní odpor je roven:

$$F_k = \sum_i O_i = O_v + O_z + O_f = 17 + 9,4 \cdot 10^3 + 2,64 \cdot 10^3 = 12 \text{ kN}$$

Požadovaný výkon:

$$P_k = F_k \frac{v}{3,6 \eta_t \eta_m \eta_{sc}} = 12,0 \cdot 10^3 \cdot \frac{9}{3,6 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,85} = 43,5 \text{ kW}$$

Úbytek energie v superkapacitoru (vybití):

$$W_{sc} = P_k t = 43,5 \cdot 10^3 \cdot 5 = 220 \text{ kJ}$$

**Fáze jízdy – zrychlení ( $a_x=1 \text{ m/s}^2$ ) z počáteční rychlosti  $v=9 \text{ km/h}$  na  $50 \text{ km/h}$  start spal. motoru (1.úsek)**

Pro stanovení požadované energie superkapacitoru stanovíme hodnotu středního výkonu aritmetickým průměrem.

**Zrychlení na  $20 \text{ km/h}$ :**

$$O_v=84,3 \text{ N}$$

$$O_z=18,9 \text{ kN}$$

$$O_f=2,64 \text{ kN}$$

$$F_k=21,62 \text{ kN}$$

Požadovaný výkon:

$$P_k = F_k \frac{v}{3,6\eta_t\eta_m\eta_{sc}} = 21,62 \cdot 10^3 \cdot \frac{20}{3,6 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,85} = 174,4 \text{ kW}$$

**Zrychlení na 30 km/h:**

$$O_v = 189,5 \text{ N}$$

$$O_z = 18,9 \text{ kN}$$

$$O_f = 2,64 \text{ kN}$$

$$F_k = 21,72 \text{ kN}$$

Požadovaný výkon:

$$P_k = F_k \frac{v}{3,6\eta_t\eta_m\eta_{sc}} = 21,72 \cdot 10^3 \cdot \frac{30}{3,6 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,85} = 262,8 \text{ kW}$$

**Zrychlení na 40 km/h:**

$$O_v = 337 \text{ N}$$

$$O_z = 18,9 \text{ kN}$$

$$O_f = 2,64 \text{ kN}$$

$$F_k = 21,87 \text{ kN}$$

Požadovaný výkon:

$$P_k = F_k \frac{v}{3,6\eta_t\eta_m\eta_{sc}} = 21,87 \cdot 10^3 \cdot \frac{40}{3,6 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,85} = 352,9 \text{ kW}$$

**Zrychlení na 50 km/h:**

$$O_v = 526,6 \text{ N}$$

$$O_z = 18,9 \text{ kN}$$

$$O_f = 2,64 \text{ kN}$$

$$F_k = 22 \text{ kN}$$

Požadovaný výkon:

$$P_k = F_k \frac{v}{3,6\eta_t\eta_m\eta_{sc}} = 22 \cdot 10^3 \cdot \frac{50}{3,6 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,85} = 443,8 \text{ kW}$$

Stanovení středního výkonu:

$$P_{stř} = \frac{\sum P_k}{n} = \frac{174,4 \cdot 10^3 + 262,8 \cdot 10^3 + 352,9 \cdot 10^3 + 443,8 \cdot 10^3}{4} = 308,4 \text{ kW}$$

Energetická bilance superkapacitoru:

Poskytovaný výkon generátorem  $P_{spal/gen} = 150 \text{ kW}$

Stanovení požadovaného výkonu superkapacitoru:

$$\Delta P = P_{stř} - P_{spal/gen} = 308,4 - 150 = 158,8 \text{ kW}$$

Doba potřebná na akceleraci z 9 km/h na 50 km/h

$$v_x = v_{x0} + a_x t \Rightarrow t = \frac{v_x - v_0}{a_x} = \frac{\frac{50}{3,6} - \frac{9}{3,6}}{1} = 11,34 \text{ s}$$

Potřebná dráha na rozjezd:

$$s = \frac{1}{2} a_x \Delta t^2 = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 11,34^2 = 64,29 \text{ m}$$

Úbytek energie v superkapacitoru (vybití):

$$W_{sc} = \Delta P t = 158,8 \cdot 10^3 \cdot 11,34 = 1800 \text{ kJ}$$

**Fáze jízdy – pohyb konstantní rychlostí 50 km/h (1. úsek):**

Výpočet odporu vzduchu:

$$O_v = \frac{\rho_a}{2} c_x S_{\dot{c}} v_r^2 = \frac{1,202}{2} \cdot 0,65 \cdot 7 \cdot \left(\frac{50}{3,6}\right)^2 = 526,6 \text{ N}$$

Výpočet valivého odporu:

$$O_f = G_v f_r = m g f_r = 18 \cdot 10^3 \cdot 9,80665 \cdot 0,015 = 2,64 \text{ kN}$$



Celkový jízdní odpor:

$$F_k = \sum_i O_i = O_v + O_f = 526,6 + 2,64 \cdot 10^3 = 3,17 \text{ kN}$$

Požadovaný výkon:

$$P_k = F_k \frac{v}{3,6 \eta_t \eta_m \eta_{sc}} = 3,17 \cdot 10^3 \cdot \frac{50}{3,6 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,85} = 63,9 \text{ kW}$$

Energetická bilance superkapacitoru:

Poskytovaný výkon generátorem  $P_{spal/gen} = 150 \text{ kW}$

Stanovení požadovaného výkonu superkapacitoru (superkapacitor se nabíjí):

$$\Delta P = P_k - P_{spal/gen} = 63,9 - 150 = -86,1 \text{ kW}$$

Přírůstek energie v superkapacitoru (nabíjení):

$$W_{sc} = \Delta P t = 86,1 \cdot 10^3 \cdot 31 = 2669,1 \text{ kJ}$$

Pozn. čas  $t$  jsem určil ze znalosti vzdálenosti nutné na rozjezd, kterou jsem odečetl

od celkové vzdálenosti 1. úseku. Tedy  $t = \frac{s}{v} = \frac{500 - 70,5}{\frac{50}{3,6}} = 31 \text{ s}$

**Fáze jízdy – pohyb konstantní rychlostí 50 km/h se sklonem vozovky 12% (2. úsek)**

Výpočet odporu vzduchu:

$$O_v = \frac{\rho_a}{2} c_x S_c v_r^2 = \frac{1,202}{2} \cdot 0,65 \cdot 7 \cdot \left(\frac{50}{3,6}\right)^2 = 526,6 \text{ N}$$

Výpočet valivého:

$$O_f = G_v f_r = m g f_r = 18 \cdot 10^3 \cdot 9,80665 \cdot 0,015 = 2,64 \text{ kN}$$

Výpočet odporu stoupání:

$$O_s = G \sin \alpha = m g \sin \alpha = 18 \cdot 10^3 \cdot 9,80665 \cdot \sin 6^\circ 5' = 19,9 \text{ kN}$$

kde:

$$\alpha = \arctg \frac{s}{100} = \arctg \frac{12}{100} = 6^\circ 5'$$

Celkový jízdní odpor:

$$F_k = \sum_i O_i = O_v + O_f + O_s = 526,6 + 2,64 \cdot 10^3 + 19,9 \cdot 10^3 = 23,1 \text{ kN}$$

Požadovaný výkon:

$$P_k = F_k \frac{v}{3,6 \eta_i \eta_m \eta_{sc}} = 23,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{50}{3,6 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,85} = 466 \text{ kW}$$

Energetická bilance superkapacitoru:

Poskytovaný výkon generátorem  $P_{spal/gen} = 150 \text{ kW}$

Stanovení požadovaného výkonu superkapacitoru (superkapacitor se vybíjí):

$$\Delta P = P_k - P_{spal/gen} = 466 - 150 = 316 \text{ kW}$$

Úbytek energie v superkapacitoru (vybíjení):

$$W_{sc} = \Delta P t = 316 \cdot 10^3 \cdot 28,8 = 9100,8 \text{ kJ}$$

Pozn. čas  $t$  jsem určil ze znalosti dráhy a rychlosti ve 2. úseku. Tedy

$$t = \frac{s}{v} = \frac{400}{\frac{50}{3,6}} = 28,8 \text{ s}$$

### **Fáze jízdy – pohyb konstantní rychlostí 50 km/h (3. úsek)**

Před zastavením:

Výpočet odporu vzduchu:

$$O_v = \frac{\rho_a}{2} c_x S_c v_r^2 = \frac{1,202}{2} \cdot 0,65 \cdot 7 \cdot \left(\frac{50}{3,6}\right)^2 = 526,6 \text{ N}$$

Výpočet valivého odporu:

$$O_f = G_v f_r = m g f_r = 18 \cdot 10^3 \cdot 9,80665 \cdot 0,015 = 2,64 \text{ kN}$$

Celkový jízdní odpor:

$$F_k = \sum_i O_i = O_v + O_f = 526,6 + 2,64 \cdot 10^3 = 3,17 \text{ kN}$$

Požadovaný výkon:

$$P_k = F_k \frac{v}{3,6\eta_t\eta_m\eta_{sc}} = 3,17 \cdot 10^3 \cdot \frac{50}{3,6 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,85} = 63,9 \text{ kW}$$

Energetická bilance:

Poskytovaný výkon generátorem  $P_{spal/gen} = 150 \text{ kW}$

Stanovení požadovaného výkonu superkapacitoru (superkapacitor se nabíjí):

$$\Delta P = P_k - P_{spal/gen} = 63,9 - 150 = -86,1 \text{ kW}$$

Přírůstek energie v superkapacitoru (nabíjení):

$$W_{sc} = \Delta P t = 86,1 \cdot 10^3 \cdot 18,8 = 1618,6 \text{ kJ}$$

Pozn. čas  $t$  jsem určil z výpočtu brzděné a celkové dráhy viz 4. úsek.

$$t = \frac{s}{v} = \frac{300 - 37,8}{\frac{50}{3,6}} = 18,8 \text{ s}$$

**Fáze jízdy – brždění do stanice z 50 km/h**

**Jízdní odpory při zpomalení na 40 km/h:**

S uvažovaným záporným zrychlením  $a_z = 2,5 \text{ m/s}^2$  autobus zastaví za:

$$v_x = v_{x0} + a_x t \Rightarrow t = \frac{v_x - v_0}{a_x} = \frac{0 - 50}{3,6 \cdot 2,5} = 5,5 \text{ s}$$

Přičemž ujede dráhu:

$$s = \frac{1}{2} a_x \Delta t^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,5 \cdot 5,5^2 = 37,8 \text{ m}$$

Jízdní odpory při rychlosti 40 km/h:

Výpočet odporu vzduchu:

$$O_v = \frac{\rho_a}{2} c_x S_{\tilde{c}} v_r^2 = \frac{1,202}{2} \cdot 0,65 \cdot 7 \cdot \left(\frac{40}{3,6}\right)^2 = 337 \text{ N}$$

Výpočet valivého odporu:

$$O_f = G_v f_r = m g f_r = 18 \cdot 10^3 \cdot 9,80665 \cdot 0,015 = 2,64 \text{ kN}$$

Celkový jízdní odpor:

$$F_k = \sum_i O_i = O_v + O_f = 527,5 + 2,64 \cdot 10^3 = 3,16 \text{ kN}$$

**Jízdní odpory při zpomalení na 30 km/h:**

$$O_v = 189,5 \text{ N}$$

$$O_f = 2,64 \text{ kN}$$

$$F_k = 2,8 \text{ kN}$$

**Jízdní odpory při zpomalení na 20 km/h:**

$$O_v = 84,3 \text{ N}$$

$$O_f = 2,64 \text{ kN}$$

$$F_k = 2,72 \text{ kN}$$

**Jízdní odpory při zpomalení na 10 km/h:**

$$O_v = 21,1 \text{ N}$$

$$O_f = 2,64 \text{ kN}$$

$$F_k = 2,66 \text{ kN}$$

**Střední hodnota jízdních odporů:**

$$F_{stř} = \frac{\sum F_k}{n} = \frac{3,16 \cdot 10^3 + 2,8 \cdot 10^3 + 2,72 \cdot 10^3 + 2,66 \cdot 10^3}{4} = 2,83 \text{ kN}$$

**Rekuperační energie:**

Velikost energie při rekuperačním brždění lze stanovit z rovnice pro kinetickou energii. Při brždění na vozidlo působí rovněž vozidlové odpory, které část energie maří. Tedy výslednou vzniklou energii lze stanovit podle rovnice:

$$W_{sc} = \frac{1}{2}mv^2 - F_b \cdot s_b$$

kde:

první člen rovnice na pravé straně představuje kinetickou energii. Druhý člen na pravé straně představují ztráty ve vozidlových odporech.

Přírůstek energie v superkapacitoru (nabíjení):

$$W_{sc} = \frac{1}{2} \cdot 18 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{50}{3,6} \right)^2 - 2,83 \cdot 10^3 \cdot 37,8 = 1629 \text{ kJ}$$

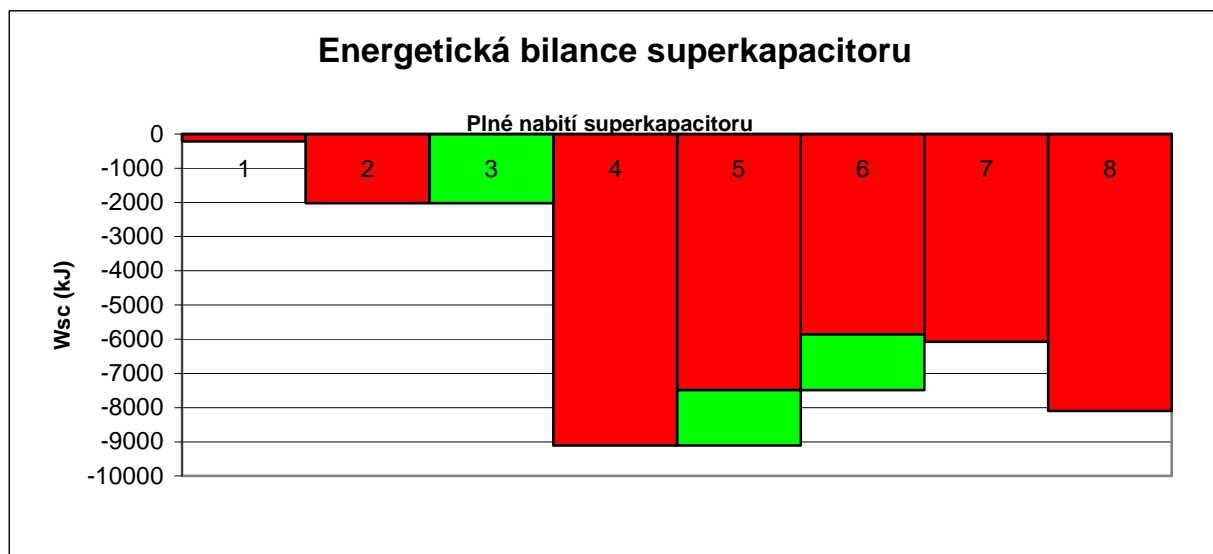
### Fáze jízdy – rozjezd ze zastávky z nulové rychlosti (5. úsek)

V této části vozebního úseku bychom při výpočtu postupovali obdobně jako v případě 1. úseku. Rovněž energetická bilance superkapacitoru by byla zcela totožná neboť oba úseky jsou stejně dlouhé. Z tohoto důvodu zde výpočet neuvádím

### Fáze jízdy - Autobus se pohybuje ze svahu s=5% konstantní rychlostí 50 km/h. (6. úsek)

V této části vozebního úseku se hybridní autobus pohybuje výběhem.

Na základě provedení energetické bilance nyní provedeme návrh superkapacitoru. Při návrhu vycházíme z vozebního úseku, který nejvíce zatěžuje superkapacitor. Jak je z grafu patrné nejnáročnější je 2. vozební úsek.



**Graf 1 Energetická bilance superkapacitoru**

Legenda ke grafu:

Zelená barva – nabíjení

Červená barva – vybíjení

Sloupec 1 – Rozjezd po dobu 5 s kryje superkapacitor (spalovací motor vypnut)

Sloupec 2 – Akcelerace na rychlosti 50 km/h (spalovací motor zapnut)

Sloupec 3 – Konstantní rychlost 50 km/h po rovině

Sloupec 4 – Konstantní rychlost 50 km/h po svahu se sklonem 12%

Sloupec 5 – Konstantní rychlost 50 km/h po rovině

Sloupec 6 – Rekuperační brždění do stanice

Sloupec 7 – viz. sloupec 1

Sloupec 8 – viz. sloupec 2

Celková energie uložená v superkapacitoru je tedy:

$$W_{sc} = \frac{1}{2}CU^2 \text{ [kJ]} \quad (3.12)$$

kde:

C – kapacita superkapacitoru

U – napětí na superkapacitoru

Pro praktické využití uložené energie lze zohlednit pouze její část. Při větším vybití superkapacitoru než 50% dochází k poklesu jmenovitého napětí na superkapacitoru a k nárůstu proudu, který obvodem protéká.

$$W_{sc} = \frac{1}{2}C \left[ U - \left( \frac{U}{2} \right) \right]^2 = \frac{3}{8}CU^2 \text{ [kJ]} \quad (3.13)$$

Výsledná požadovaná kapacita je rovna:

$$C_{sc} = \frac{8W_{sc}}{3U^2} = \frac{8.9100.10^3}{3.160^2} = 948\text{F}$$

### 3.6 Návrh trakčního motoru

Trakční motor v sériovém hybridním autobuse přenáší výkon na hnací nápravu vozidla a tím vozidlo pohání. V případě rekuperačního brždění přechází trakční motor do generátorového režimu. Jako motory v hybridních pohonech se nejčastěji využívají asynchronní motory.

Asynchronní motory jsou velice spolehlivé stroje, což je dáno jejich konstrukční jednoduchostí. Rovněž jejich cena je velice příznivá. Princip asynchronního motoru je založen na vzájemném působení elektromagnetického pole statoru a proudů, které toto pole vyvolává ve vodičích rotoru. Cívkami statoru procházejí tří-fázové střídavé proudy které vyvolávají točivé magnetické pole. Točivé magnetické pole statoru protíná vodiče rotoru ve kterých se indukuje napětí, které v uzavřeném obvodu rotoru vyvolá proudy. Vznikne tedy moment, který působí proti příčině vzniku proudů a následkem toho se rotor roztočí ve směru točivého magnetického pole. Aby se ve vodičích rotoru mohlo indukovat napětí musí být rychlost rotoru a rychlost točivého magnetického pole rozdílné. [5]

Potřebný výkon trakčního motoru je stanoven z největšího požadovaného výkonu. Přičemž asynchronní motor lze po jistou dobu provozovat v oblasti přetížení. Pro naše potřeby je tedy postačující trakční motor o výkonu 200kW.

Jako vhodný trakční motor se jeví asynchronní motor typu TAM 1051C6. Tento motor je 6 – pólový, 2 – ložiskový asynchronní motor s kotvou nakrátko. Součástí motoru je čidlo snímání otáček.

#### **Jmenovité parametry asynchronního motoru:**

- Typ motoru TAM 1051C6
- Výkon: 200 kW
- Napětí: 425 V
- Proud: 353 A
- Frekvence: 70 Hz
- Otáčky: 1384 ot/min
- Moment: 1381 N.m

## 4 Konkrétní návrh uspořádání komponentů hybridního autobusu



**Obr. 8 Rozložení komponentů v hybridním autobuse [8]**

Na Obr. 8 je uveden možný návrh řešení umístění jednotlivých komponentů hybridního pohonu. Vlevo se nachází spalovací Dieslův motor o výkonu 162 kW motor je typu MAN D 0826. Spalovací motor je spojen s generátorem. Generátor je typu Voith TFM-G/26 o výkonu 150 kW. Střídavá elektrická energie vyrobená v generátoru je poté usměrněna v usměrňovači. V případě, že spalovací motor dodává větší výkon než je zapotřebí dochází k dobíjení superkapacitoru, který je umístěn na střeše autobusu. Asynchronní trakční motor je napájen tří-fázovým střídavým proudem z frekvenčního měniče. Asynchronní motor je typu TAM 1051C6 o celkovém výkonu 200 kW.

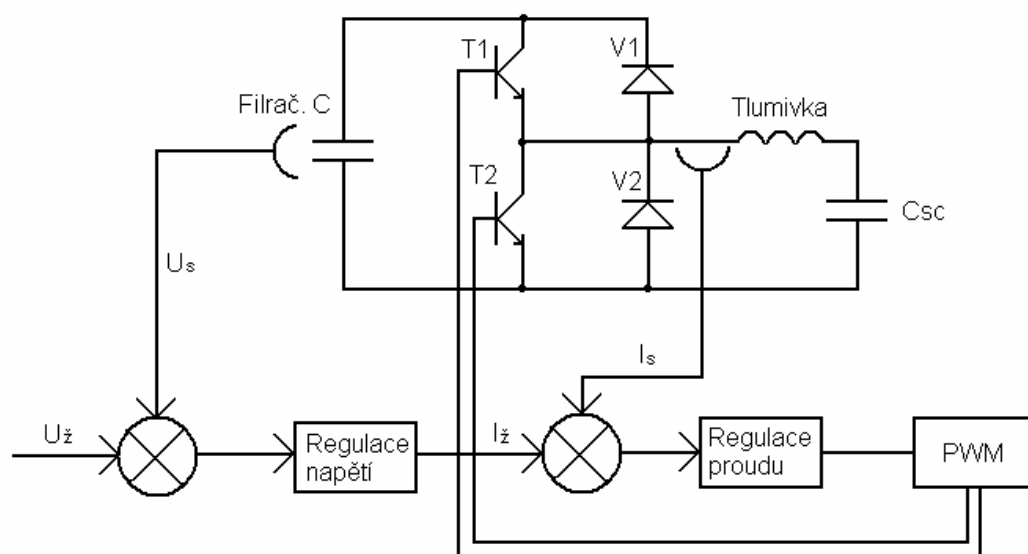
Pod pojmem přídavný agregát máme na mysli hydraulický brzdový systém, který v případě vozidel využívající rekuperační brzdění plní záložní bezpečnostní funkci v případě poruchy trakčního motoru. Dle zákona je tento brzdový systém povinný.



## 5 Návrh silového obvodu

Algoritmus řízení hybridního pohonu patří vzhledem ke své složitosti mezi nejnáročnější problémy hybridních pohonů. Ve své práci uvedu blokové schéma silového obvodu a regulační schéma stejnosměrného meziobvodu, které řídí tok elektrické energie do superkapacitoru.

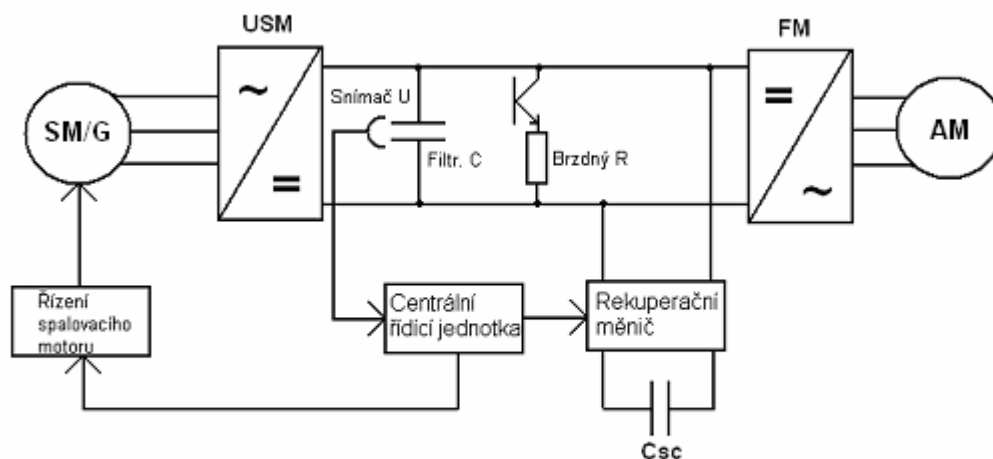
Algoritmus řízení hybridního pohonu je řešen s ohledem na aktuálně požadovaný výkon. Spalovací motor však může pracovat pouze v optimálním spalovacím režimu. Pokud požadovaný výkon je větší než může spalovací motor vzhledem ke své činnosti v optimálním režimu poskytnout, musí chybějící potřebný výkon dodat superkapacitor. Jestliže spalovací motor poskytuje výkon, který je větší než výkon požadovaný nebo hybridní autobus rekuperačně brzdí dobíjí tato energie superkapacitor ( v případě rekuperačního brzdění a plně nabitého superkapacitoru by se vzniklá elektrická energie mařila v brzděném odporu).



**Obr. 9 Blokové schéma řešení stejnosměrného meziobvodu**

Na obr. 9 je znázorněno blokové schéma stejnosměrného meziobvodu, které na základě vyhodnocování napětí a proudu v obvodu snímané čidly určí jestli bude energie ze superkapacitoru odebírána nebo se bude superkapacitor naopak dobíjet.

Princip regulace spočívá v porovnání požadované hodnoty napětí, která je dána požadovanou velikostí napětí ve stejnosměrném meziobvodu s aktuální hodnotou napětí snímaným čidlem. V případě vybíjení superkapacitoru dochází k poklesu napětí v meziobvodu. Na výstupu regulátoru napětí je žádaná hodnota proudu, která má při poklesu napětí zápornou polaritu. Žádaný proud je porovnáván se skutečnou hodnotou proudu ve stejnosměrném meziobvodu. Na základě tohoto porovnání jsou generovány šířkově pulzní modulací (PWM) pulzi, které spínají tranzistory T1 a T2. Při nabíjení superkapacitoru dojde k sepnutí tranzistoru T1 naopak při vybíjení je sepnut tranzistor T2.



**Obr. 10 Blokové schéma řešení silového obvodu**

Základním komponentem silového schématu na obr.10 je spalovací motor, který je řízen prostřednictvím řídicí jednotky spalovacího motoru. Ta je ovládána centrální řídicí jednotkou. Centrální řídicí jednotka poskytuje řídicí jednotce spalovacího motoru informaci, o velikosti napětí ve stejnosměrném meziobvodu. Řídicí jednotka spalovacího motoru kontroluje velikost požadovaného výkonu a v případě, že je požadavek na výkon nižší než spalovací motor dodává a superkapacitor je plně nabit. Řídicí jednotka spalovacího motoru poté vypne spalovací motor. Rovněž také kontroluje zapnutí spalovacího motoru při rozjezdu z nulové rychlosti, kdy je elektromotor po určitou dobu napájen pouze superkapacitorem. V případě, že je superkapacitor nabit.

Spalovací motor/generátor poskytuje elektrickou energii, která je usměrněna v usměrňovači a napájí stejnosměrný meziobvod. Kondenzátor zapojený v meziobvodu plní funkci filtračního členu, který se snaží udržet konstantní napětí ve stejnosměrném meziobvodu. V obvodu je zapojen brzdící odpor, který v případě, že asynchronní motor pracuje v generátorovém režimu při rekuperačním brždění maří elektrickou energii v případě plně nabitého superkapacitoru.

Důležitou částí obvodu je rekuperační měnič, který prostřednictvím centrální řídicí jednotky určuje nabíjení a vybíjení superkapacitoru. Princip rekuperačního měniče je uveden na obr.9

## Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout vhodné řešení hybridního pohonu určeného pro pohon autobusu. Včetně návrhu jednotlivých komponentů pohonu tj. spalovacího motoru, trakčního motoru a akumulátoru energie.

V první kapitole této práce jsem se zabýval analýzou možných řešení hybridního pohonu. V úvahu připadali řešení s využitím sériového, paralelního nebo kombinovaného pohonu. Okrajově jsem se také zmínil o možnosti realizace za pomoci děliče výkonu a to jak mechanického s využitím planetární převodovky, tak i elektrického. Z porovnání výhod a nevýhod jednotlivých návrhů jsem se přiklonil k aplikaci sériového konceptu.

V druhé kapitole této práce jsem se zabýval analýzou vznětového motoru. Okrajově jsem se také zmínil o možnosti nahrazení naftového motoru, motorem spalující zemní plyn tedy CNG. V analýze jsem provedl srovnání vznětového a plynového motoru. Zajímal jsem se zejména o produkci emisí, hustoty sítí čerpacích stanic a o ceny pohonných hmot. Zjistil jsem, že plynové motory produkují několikanásobně nižší množství emisí než vznětový motor. Cena paliva je rovněž u plynového motoru o 40 – 45% nižší. Určitým problémem se tak jeví poměrně malá síť čerpacích stanic nabízejících CNG. Při aplikaci motoru na CNG je tedy nutné uvažovat dostupnost čerpacích stanic. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl aplikovat v hybridním autobusu vznětový motor.

Ve třetí kapitole jsem se zabýval energetickými výpočty ze kterých, jsem stanovil výkon spalovacího motoru, elektromotoru a akumulačního členu. Při výpočtu požadovaného výkonu spalovacího motoru jsem vycházel ze zadaných parametrů a podmínek provozu autobusu. Z jízdních odporů a z požadované rychlosti autobusu jsem stanovil výkon motoru na 162,4 kW. Poté jsem vhodný motor dohledal v katalogových listech. Je jím motor od firmy MAN a to motor MAN D 0826. Součástí motoru je rovněž generátor Voith TFM-G/26 o výkonu 150 kW.

Dále jsem se ve třetí kapitole zabýval návrhem vhodného akumulačního prvku. S ohledem na získávání energie rekuperačním brzděním jsem se jako vhodný akumulační prvek rozhodl aplikovat superkapacitor, který je svými vlastnostmi vhodnější při akumulaci energie. Superkapacitor je schopen energii daleko rychleji pohltit i uvolnit než chemické akumulátory. Superkapacitor se v pohonu autobusu

uplatní zejména v městském provozu. Při rozjezdu autobusu bude po dobu 5 sekund jediným zdrojem energie. Superkapacitor bude rovněž pomáhat při akceleraci vozidla nebo jízdy do svahu, kde v případě dostatečného nabití dorovná požadovaný výkon. Naopak při brždění vozidla superkapacitor pohltí s ohledem na účinnost část vzniklé energie. Při stanovení potřebné kapacity superkapacitoru jsem vycházel ze zadaného vozebního úseku, ve kterém jsem provedl rozbor zatížení superkapacitoru při jízdách manévrech v jednotlivých částech vozebního úseku. Na základě tohoto rozboru jsem navrhl kapacitu superkapacitoru na 948 F.

Jako trakční motor jsem se rozhodl použít asynchronní motor a to zejména kvůli své jednoduchosti, spolehlivosti a příznivé ceně v porovnání se stejnosměrnými motory. Při stanovení požadovaného výkonu trakčního motoru jsem vycházel z největšího výkonového zatížení vozebního úseku a zhodnotil jsem možnou tepelnou přetížitelnost motoru. Výkon trakčního motoru jsem tedy navrhl na 200 kW.

V závěru práce jsem se zabýval návrhem silového obvodu a řízením hybridního pohonu. Řízení je založeno na snímání obvodových veličin a jejich vyhodnocení v centrální řídicí jednotce, která reguluje rekuperační měnič a jednotku řízení spalování motoru.

Z výsledků mé práce plyne, že koncept hybridního pohonu je jedna z možných cest vedoucí ke snížení emisí vznětových motorů a omezení jejich spotřeby pohonných hmot. Do budoucna by mohli být vznětové motory hybridních pohonů nahrazeny plynovými motory, což by vedlo k zvýšení efektivity hybridních pohonů.

## Seznam literatury

- [1] ČEŘOVSKÝ, Zdeněk. *Hybridní pohony automobilů a výzkumné pracoviště hybridních pohonů* [online]. [s.l.], [2006]. 6 s. článek. České vysoké učení technické v Praze, Katedra elektrických pohonů a trakce. Dostupné z WWW: <<http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2002/k314-SYMEP.pdf>>.
- [2] GREGORA, Stanislav, MAŠEK, Zdeněk. *Přenosové systémy s vyšší účinností, využívání energetického obsahu paliva - Hybridní vozidla* [online]. [s.l.], [2009]. 9 s. článek. Univerzita Pardubice, Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě.
- [3] BAROŇOVÁ, Pavlína. *Využití alternativních zdrojů v dopravě* [online]. Zlíně, 2008. 55 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická. Dostupné z WWW: [https://www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download\\_this\\_unauthorized=8597](https://www.stag.utb.cz/apps/stag/dipfile/index.php?download_this_unauthorized=8597).
- [4] NOVÁK, Jaroslav. *Elektromechanické systémy v dopravě a ve strojírenství*. Vyd. 1. Praha : ČVUT, 2002. 86 s. ISBN 80-01-02457-1.
- [5] MĚŘIČKA, Jiří; HAMATA, Václav; VOŽENÍLEK, Petr. *Elektrické stroje*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1994. 311 s. ISBN: 80-01-01020-1.
- [6] *Trakční asynchronní motor* [online]. [s.l.] : [s.n.], [199?] [cit. 2010-04-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.pragoimex.cz/i/File/1TAM%201051C6.pdf>>.
- [7] MAŠEK, Zdeněk, et al Superkapacitory v dopravní technice. In . [s.l.] : [s.n.], 2008 [cit. 2010-04-01]. Dostupné z WWW: <<http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/vts25/2511.pdf>>.
- [8] KERSCHL, Stefan; HIPPE, Eberhard; LEXEN, Gerald Effizienter Hybridantrieb mit Ultacaps für stadtbusse. In . [s.l.] : [s.n.], 2005 [cit. 2010-04-04]. Dostupné z WWW: <[http://www.aachener-kolloquium.de/pdf/Votr\\_Nachger/Kersch.pdf](http://www.aachener-kolloquium.de/pdf/Votr_Nachger/Kersch.pdf)>.
- [9] GREGORA, Stanislav; OUŘEDNÍČEK, Jan. *Elektrotechnika a zabezpečovací technika v dopravní infrastruktuře*. Vyd. 1. Pardubice : Univerzita Pardubice, 2005. 128 s. ISBN 80-7194-768-7.

[10] TAKÁTS, Michal. *Měření emisí spalovacího motoru*. Vyd. 1. Praha : ČVUT, 1994. 111 s. ISBN 80-01-01053-8.

[11] EHSANI, Mehrdad, et al. *Modern electric, Hybrid electric, and Fuel cell vehicles*. Vyd. 1. London : CRC PRES, 2005. 300 s. ISBN 0-8493-3154-4

## Seznam zkratk

AKU	- Akumulátor energie (chemické akumulátory, Superkapacitor)
AM	- Asynchronní motor
CNG	- Zemní plyn (Compressed Natural Gas)
FM	- Frekvenční měnič
G	- Generátor
N	- Náprava
P	- Planetová převodovka (Součást mechanického děliče výkonu)
PWM	- Šířkově pulsní modulace
S	- Slučovač momentu
SM	- Spalovací motor
SM/G	- Blok spalovacího motoru, generátoru
USM	- Usměrňovač



## Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma sériového hybridního pohonu [4] .....	12
Obr. 2 Schéma paralelního hybridního pohonu [4] .....	13
Obr. 3 Kombinovaný přepínatelný pohon [1] .....	14
Obr. 4 Schéma kombinovaného pohonu s mechanickým děličem výkonu [4] .....	15
Obr. 5 Kombinovaný hybridní pohon s elektrickým děličem výkonu [1] .....	16
Obr. 6 Porovnání běžného kondenzátoru se strukturou superkapacitoru [7] .....	28
Obr. 7 Zadaný profil tratě .....	29
Obr. 8 Rozložení komponentů v hybridním autobuse [8] .....	40
Obr. 9 Blokové schéma řešení stejnosměrného meziobvodu .....	41
Obr. 10 Blokové schéma řešení silového obvodu .....	42
Obr.11 asynchronní trakční motor [6] .....	50

## Seznam grafů

Graf 1 Energetická bilance superkapacitoru.....	37
-------------------------------------------------	----

## Přílohy



Obr.11 asynchronní trakční motor [6]