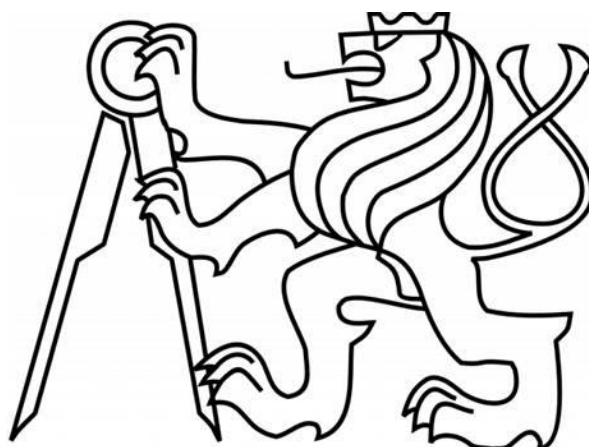


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní



STUDIE MULTIHYBRIDNÍHO MĚSTSKÉHO VOZIDLA

Diplomová práce

V oboru dopravní systémy a technika

2015

Bc. Martin Šolc



K616.....Ústav dopravních prostředků

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Bc. Martin Šolc

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika

Název tématu (česky): **Studie multihybridního městského vozidla**

Název tématu (anglicky): Multi-hybrid city vehicle study

Zásady pro vypracování

Při zpracování diplomové práce se řiďte osnovou uvedenou v následujících bodech:

- Analýza, rozbor a řešení problémů individuální dopravy ve městech s ohledem na hustotu, parkování, životní prostředí a energetickou náročnost.
- Dynamika a energetická analýza alternativních druhů pohonů s ohledem na městskou individuální dopravu.
- Návrh multihybridního vozidla individuální dopravy.
- "Well to wheels" analýza multihybridního vozidla a porovnání s dosavadním stavem.

Rozsah grafických prací: Dle pokynů vedoucího diplomové práce

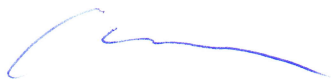
Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: First Jiří: Zkoušení automobilů a motocyklů
First Jiří: Energetická analýza pozemní dopravy
Kameš Josef: Alternativní pohony automobilů

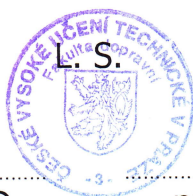
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří First**

Datum zadání diplomové práce: **26. června 2013**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce: **30. listopadu 2015**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia



doc. Ing. Petr Bouchner, Ph.D.
vedoucí
Ústavu dopravních prostředků



prof. Dr. Ing. Miroslav Svítek
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.




Bc. Martin Šolc
jméno a podpis studenta

V Praze dne 2. června 2015

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užívání tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 30. 6. 2015


.....

PODĚKOVÁNÍ

Úvodem je mojí příjemnou povinností poděkovat vedoucímu své diplomové práce, panu Ing. Jiřímu Firstovi za cenné náměty a připomínky v průběhu jejího zpracovávání.

Zvláštní poděkování patří Ing. Janu Plomerovi, Ph.D. za poskytnuté konzultace a rady z oblasti hybridních pohonů vozidel.

V neposlední řadě děkuji rodině za obětavou podporu, bez které by zvládnutí studia nebylo možné.

ABSTRAKT

Autor: Šolc Martin

Název práce: Studie multihybridního městského vozidla

Škola: ČVUT v Praze, Fakulta dopravní

Akademický rok: 2014/2015

Tato Diplomová práce seznamuje s nejčastějšími problémy individuální dopravy ve městech a s možnostmi snížení jejich dopadů na životní prostředí. Část práce je věnována řešení komplikací, jako je vysoká intenzita dopravy, parkování a produkce veškerých druhů emisí. Dále jsem se zaměřil na možnosti použití alternativních pohonů včetně jejich energetických analýz. V druhé polovině práce představuji vlastní koncept podpůrného setrvačnickového systému vozidla, využitelného při jízdě ve městě. Efektivnost navrženého pohonu vystihuje provedená analýza v poslední kapitole.

Klíčová slova: Doprava ve městech, alternativní pohony, rekuperace energie, setrvačník, well to wheels analýza.

ABSTRACT

Author: Šolc Martin

Thesis: Multi-hybrid city vehicle study

Institute: Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences

Academic year: 2014/2015

The Master thesis deals with the most common problems connected with transportation in cities and at the same time with possibilities for reduction of its impact on the environment. The first part of the thesis provides solutions for traffic jams, parking issues, as well as, solution for exhaust-emission control. Furthermore, the thesis is focused on a potential and energetic analysis of alternative drive systems. The aim of the second part is design of unique concept of a supporting flywheel system which can be applied for a city driving. Effectiveness of this drive is represented by the well to wheels analysis in the last chapter of the thesis.

Keywords: City transport, alternative drive systems, energy recuperation, flywheel, well to wheel analysis.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK – obecná část práce

B+R	Bike and ride
CNG	Compressed natural gas
CVT	Continuously variable transmission
EGR	Exhaust gas recirculation
HOV	High occupancy vehicle
HZS	Hasičský záchranný sbor
K+R	Kiss and ride
KERS	Kinetic Energy Recovery System
LNG	Liqiufied natural gas
LPG	Liqiufied petroleum gas
MHD	Městská hromadná doprava
NEDC	New European Driving Cycle
P+R	Park and ride
PA	Porous asphalt
PDZ	Proměnné dopravní značení
PIT	Proměnné informační tabule
RDS-TMC	Radio data service – traffic message channel
RZS	Rychlá záchranná služba
SSZ	Světelné signalizační zařízení
WHO	World health organisation

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK – výpočtová část práce

ω_1	Úhlová rychlost hlavního hřídele	$[s^{-1}]$
ω_2	Úhlová rychlost hřídele pohonu setrvačnicku	$[s^{-1}]$
ω_3	Úhlová rychlost setrvačnicku	$[s^{-1}]$
ω_k	Úhlová rychlost kol vozidla	$[s^{-1}]$
ω_{k0b}	Úhlová rychlost kol při začátku brzdění (rekuperace)	$[s^{-1}]$
ω_{k0r}	Úhlová rychlost kol před rozjezdem ($\omega_{k0r} \sim 0$)	$[s^{-1}]$
ω_{ksb}	Úhlová rychlost kol po synchronizaci otáček hřídelů (po brzdění)	$[s^{-1}]$
ω_{ksr}	Úhlová rychlost kol po synchronizaci otáček hřídelů (po rozjezdu)	$[s^{-1}]$
ω_{1b}	Úhlová rychlost hlavního hřídele při začátku brzdění (rekuperace)	$[s^{-1}]$
ω_{1r}	Úhlová rychlost hlavního hřídele před rozjezdem ($\omega_{1r} \sim 0$)	$[s^{-1}]$
ω_{2b}	Úhlová rychlost hřídele pohonu setrvačnicku při začátku brzdění	$[s^{-1}]$
ω_{2r}	Úhlová rychlost hřídele pohonu setrvačnicku před rozjezdem	$[s^{-1}]$
ω_{sb}	Úhlová rychlost hřídelů po synchronizaci otáček (po brzdění)	$[s^{-1}]$
ω_{sr}	Úhlová rychlost hřídelů po synchronizaci otáček (po rozjezdu)	$[s^{-1}]$
n_{1b}	Otáčky hlavního hřídele při začátku brzdění	$[\text{min}^{-1}]$
n_{1r}	Otáčky hlavního hřídele před rozjezdem	$[\text{min}^{-1}]$
n_{2b}	Otáčky hřídele pohonu setrvačnicku při začátku brzdění	$[\text{min}^{-1}]$
n_{2r}	Otáčky hřídele pohonu setrvačnicku před rozjezdem	$[\text{min}^{-1}]$
$i_{set.}$	Převodový poměr setrvačnickových převodovek	$[-]$
$i_{dif.}$	Převodový poměr diferenciálu	$[-]$
$i_{ks.}$	Převodový poměr v kuželovém soukolí	$[-]$
M_{sb}	Celkový synchronizační moment při brzdění	$[\text{N.m}^{-1}]$
M_{sr}	Celkový synchronizační moment při rozjezdu	$[\text{N.m}^{-1}]$
M_{oS}	Odporový moment v setrvačnickové soustavě	$[\text{N.m}^{-1}]$
M_{oV}	Odporový moment působící na vozidlo	$[\text{N.m}^{-1}]$

J_V	Redukovaný moment setrvačnosti soustavy vozidlo + kola	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}]$
J_S	Redukovaný moment setrvačnosti setrvačnickové soustavy	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}]$
J_k	Moment setrvačnosti kola ($J_k = 0,763 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}]$
$J_{\text{set.}}$	Moment setrvačnosti setrvačnicku	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}]$
$r_{\text{set.}}$	Poloměr setrvačnicku	$[\text{m}]$
$m_{\text{set.}}$	Hmotnost setrvačnicku	$[\text{kg}]$
$m_{\text{voz.}}$	Hmotnost vozidla	$[\text{kg}]$
r_k	Dynamický poloměr pneumatiky	$[\text{m}]$
T_b	Doba synchronizace hřídelů při brzdění (rekuperaci)	$[\text{s}]$
T_r	Doba synchronizace hřídelů při rozjezdu	$[\text{s}]$
v	Rychlost vozidla	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
v_{ob}	Rychlost vozidla při začátku brzdění (rekuperace)	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
v_{or}	Rychlost vozidla před rozjezdem ($v_{\text{or}} \sim 0$)	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
v_{sb}	Rychlost vozidla po synchronizaci otáček hřídelů (po brzdění)	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
v_{sr}	Rychlost vozidla po synchronizaci otáček hřídelů (po rozjezdu)	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
a_b	Zpomalení vozidla	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
a_r	Zrychlení vozidla	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
E_{ks}	Kinetická energie setrvačnickové soustavy	$[\text{kJ}]$
E_{kV}	Kinetická energie vozidla	$[\text{kJ}]$

ÚVOD	11
1 PROBLÉMY INDIVIDUÁLNÍ DOPRAVY VE MĚSTECH	13
1.1 VYSOKÁ INTENZITA DOPRAVY	14
1.1.1 Intenzita dopravy a rychlost vozidel.....	14
1.1.2 Intenzita dopravy v jízdnicích.....	15
1.1.3 Skladba dopravního proudu	16
1.2 PARKOVÁNÍ VE MĚSTECH	16
1.2.1 Odstavná parkoviště.....	17
1.2.2 Parkování v centru měst.....	18
1.3 ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ.....	20
1.3.1 Hluk a vibrace	20
1.3.2 Exhalace.....	28
1.3.3 Elektromagnetické záření.....	35
1.3.4 Světelné emise	36
1.3.5 Nečistoty.....	37
2 ŘEŠENÍ PROBLÉMŮ INDIVIDUÁLNÍ DOPRAVY	37
2.1 DOPRAVNÍ PROSTŘEDEK.....	37
2.1.1 Úprava složení výfukových plynů	38
2.1.2 Redukce hluku vyvolaným motorem.....	43
2.1.3 Redukce hluku z pneumatik	43
2.2 DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURA.....	44
2.2.1 Složení vozovkových krytů	44
2.3 SYSTÉMY ŘÍZENÍ DOPRAVY	45
2.3.1 Dopravně – informační systémy (DIS).....	46
2.3.2 Proměnné dopravní značení (PDZ) a zařízení pro provozní informace (ZPI).....	46
2.3.3 RDS-TMC.....	47
2.3.4 Liniové řízení provozu.....	48
2.3.5 Zelená vlna	49
2.4 NÁSLEDNÁ OPATŘENÍ	49
2.4.1 Vyhrazený jízdnicí pruh.....	49
2.4.2 Omezení vjezdu do vybraných zón.....	50
2.4.3 Carsharing.....	50

3	ALTERNATIVY V DOPRAVĚ	51
3.1	ALTERNATIVY POHYBU DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ.....	51
3.2	ALTERNATIVY POHONU DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ.....	51
3.2.1	Alternativní paliva pro spalovací motory	52
3.2.2	Elektrický pohon.....	59
3.2.3	Vodíkový pohon.....	64
3.2.4	Hybridní pohon.....	66
3.2.5	Porovnání energetické hustoty alternativních pohonů	72
3.2.6	Produkce vozidel s alternativním pohonem.....	75
4	NÁVRH KONCEPTU POHONU VOZIDLA	79
4.1	POPIS PRINCIPU ČINNOSTI SYSTÉMU	79
4.2	PROVOZNÍ REŽIMY SETRVAČNÍKOVÉHO POHONU.....	82
4.2.1	Brzdění – rekuperace energie	82
4.2.2	Rozjezd – využití akumulované energie	83
4.3	TECHNICKÝ POPIS JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT POHONU.....	84
4.3.1	Setrvačnickové spojky.....	84
4.3.2	Setrvačnickové převodovky	85
4.3.3	Setrvačnick	85
4.3.4	Řídící elektronika	86
4.4	ENERGETICKÝ VÝPOČET	87
4.4.1	Stanovení otáček hlavního hřídele (rekuperační režim)	88
4.4.2	Stanovení redukováných momentů setrvačnosti.....	88
4.4.3	Stanovení celkového synchronizačního momentu.....	91
4.4.4	Stanovení doby synchronizace hřídelů.....	91
4.4.5	Stanovení synchronizované úhlové rychlosti hřídelů.....	94
4.4.6	Stanovení rychlosti vozidla po synchronizaci otáček hřídelů.....	94
4.4.7	Stanovení zpomalení/zrychlení vozidla.....	95
4.4.8	Stanovení množství kinetické energie.....	95
4.5	PREZENTACE VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ	96
4.5.1	Rekuperační režim.....	96
4.5.2	Režim rozjezdu	98
4.6	SOUHRN POZNATKŮ	101

5	WELL TO WHEELS ANALÝZA	103
5.1	NEDC CYKLUS	104
5.2	ANALÝZA NAVRŽENÉHO POHONU.....	105
6	ZÁVĚR	108
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	110

ÚVOD

S nejistými prognózami týkajícími se zásob nerostných surovin určených pro výrobu konvenčních paliv vystupuje otázka budoucího pohonu dopravních prostředků. Z dlouhodobých průzkumů vyplývá, že světové zásoby fosilních paliv a to především ropy nejsou neomezené, nicméně není možné s jistotou konstatovat její zbývající množství. Některé zdroje uvádí, že množství ropy na zemi je stále v řádu miliard barelů, což by mělo pokrýt energetické požadavky při stávajícím tempu spotřeby na příštích 40 let. Podstatným tématem je i vývoj ceny za barel ropy. Při nadcházejícím snižování zásob, které je dále umocněno četnými světovými krizemi, bude samozřejmě patrný nárůst její ceny a pozdější dostupnost obtížně odhadnutelná. V budoucnu může snadno nastat situace, kdy kvůli konfliktu ropných mocností dojde k omezení dodávek, z čehož plyne i zhroucení ne jenom automobilového průmyslu. V souvislosti se zaváděním přísnějších emisních limitů pro veškerá průmyslová odvětví je dále často diskutovaným předmětem i negativní vliv spalování ropných produktů na životní prostředí. Jedovaté spaliny přímo ohrožují lidské zdraví, a zároveň v důsledku produkce oxidu uhličitého, jako zástupce tzv. skleníkových plynů, dochází k celosvětovému dopadu v podobě oteplování planety.

Z výše uvedených důvodů je v posledních dekadách snahou najít takový zdroj energie (popř. kombinaci více druhů energie), který by konzervativní způsob pohonu vozidel zpočátku alespoň částečně nahradil a v budoucnu potřebu neobnovitelných zdrojů eliminoval úplně..

Nejprve je však nutné zdůraznit hlavní problémy dopravy ve městech, které především zahrnují environmentální a prostorové aspekty. Je důležité si uvědomit jakými konkrétními nedostatky je současný stav dopravy zatížen a dále předložit možnosti jejich, alespoň částečného odstranění.

Nynější trend v oblasti ekologie a vývoje dopravních prostředků směřuje k získávání a výrobě alternativních pohonných hmot v součinnosti s minimalizací nákladů a zatížení životního prostředí spojených s jejich výrobou.

Dalším směrem je vývoj a produkce hybridních vozidel, které kombinují více druhů pohonů a dále jsou schopny rekuperace kinetické energie. energii, která by jinak byla zmařena brzděním, je možné dočasně uložit a následně využít. Mimo již zavedenou technologii

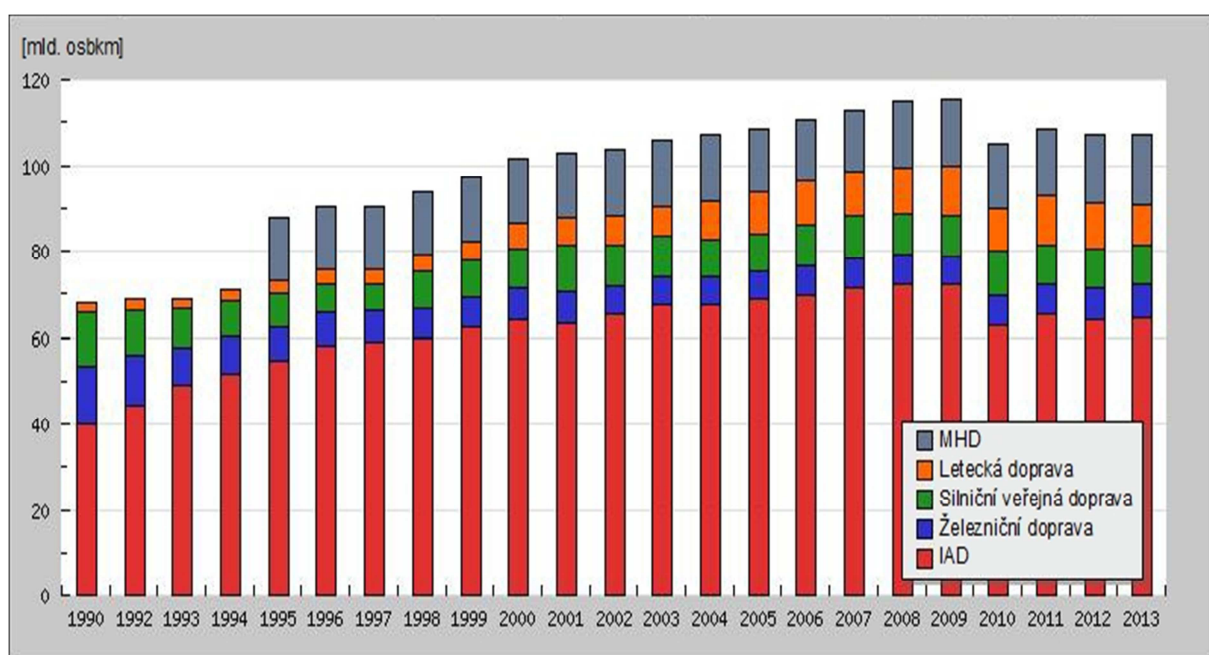
spočívající v dobíjení akumulátorů během zpomalování lze uvést setrvačnickovou akumulaci energie, která byla používána už v minulých dobách. Nyní se ale s uplatněním moderního konstrukčního řešení a s podporou elektroniky opět dostává do popředí.

1 PROBLÉMY INDIVIDUÁLNÍ DOPRAVY VE MĚSTECH

Doprava v intravilánu sebou nese určitá specifika v porovnání s extravilánem. Město v sobě skýtá nespočet výhod jako je příležitost zaměstnání, vzdělávání a obecně nabízí širokou škálu poskytovaných služeb. To ovšem znamená každodenní přítomnost vysoké koncentrace lidí, kteří jednak do měst cestují a dále se na relativně malé ploše pohybují. Nynější doba je obrazem individualismu a pohodlí obyvatel, což vede k využívání individuální automobilové dopravy na úkor městské hromadné dopravy. IAD však dostupný prostor využívá mnohem méně efektivně, než je tomu v případě MHD.

V porovnání s ostatními druhy dopravy mají osobní automobily celosvětově dominantní zastoupení (dnes se po světě pohybuje cca 750 milionů osobních automobilů). Očekává se, že v období let 2000 – 2020 bude nárůst osobní dopravy činit až 35 %. [6],[7]

Níže je zobrazeno porovnání přepravních výkonů¹ osob v ČR, zastoupené jednotlivými typy dopravních prostředků.



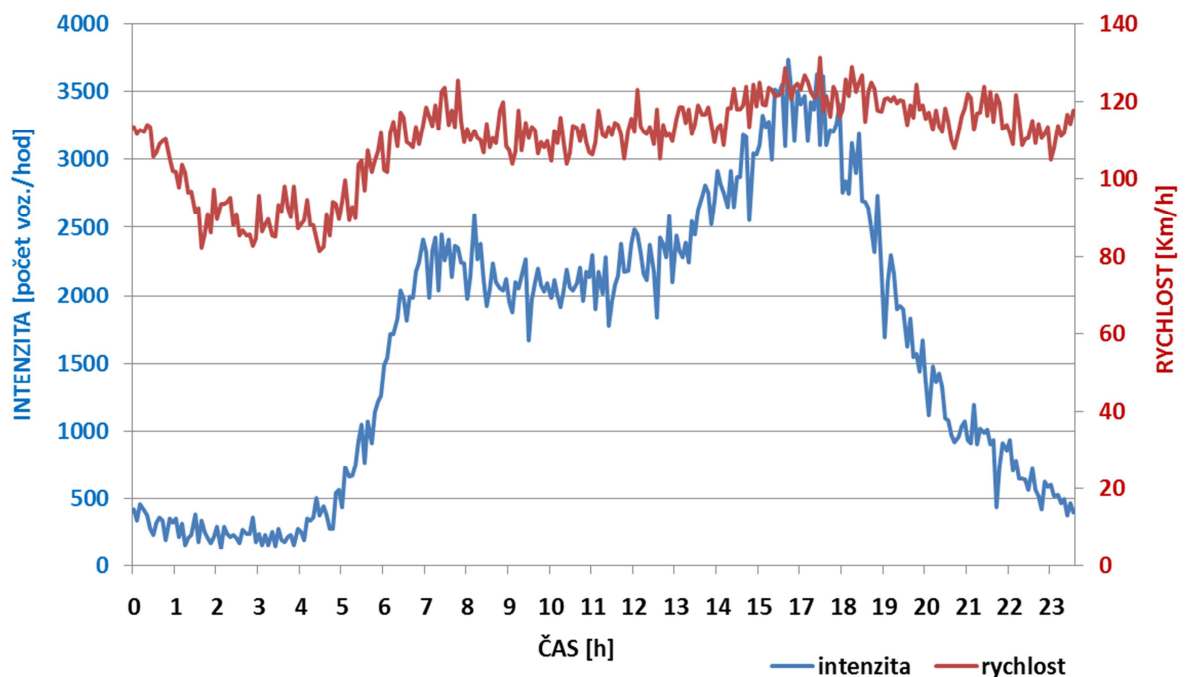
Obrázek 1—1: Vývoj přepravních výkonů osobní dopravy podle typu dopravního prostředku [mld. osbkm] [68]

¹ Přepravní výkon udává výsledek přepravy (přepravených osob popř. množství zboží) při daném dopravním výkonu. Hodnotí se tak vytíženost i efektivnost dopravy. Osobokilometr (osbkm) - představuje přepravu jedné osoby na vzdálenost jednoho kilometru. Vypočítá se jako součin dopravního výkonu (tedy vzdálenosti, kterou ujede daný dopravní prostředek) a počtu přepravených osob. [8]

1.1 VYSOKÁ INTENZITA DOPRAVY

Narůstající počet automobilů vjíždějících do prostorově omezených oblastí má za následek vznik četných kongescí. Z toho obecně plyne i zhoršení kvality životních podmínek pro místní obyvatele a dekonstace např. historické části města. V souvislosti s městskými okruhy nesmíme opomenout ani vliv kamionové dopravy na okolní prostředí. Na grafech níže je demonstrativně uveden typický průběh vybraných dopravních parametrů v průběhu 24h všedního dne (středa). Reálné měření bylo provedeno na strategických místech páteřních komunikací hl. města Prahy.

1.1.1 Intenzita dopravy a rychlost vozidel



Obrázek 1—2: Časová závislost intenzity dopravy a rychlosti vozidel

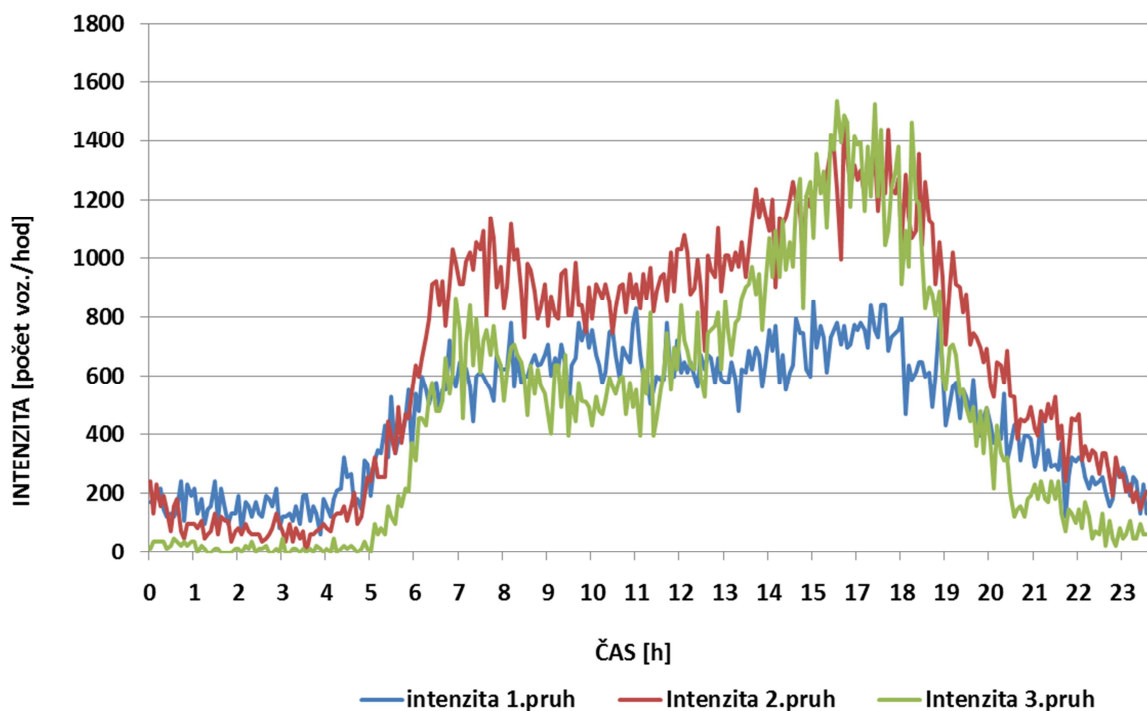
Charakter intenzity dopravy (v průběhu vybraného dne) má ustálenou podobu bez (z dlouhodobého pohledu) významných nezvyklostí. Jedná se vždy o ranní a odpolední dopravní špičku, mezi nimiž je dopravní sedlo, kdy je intenzita zpravidla nižší. V tomto konkrétním případě stagnuje v rozsahu cca 4h (od 8:30 do 12:30) na hodnotě přibližně 2 100 vozidel za hodinu.

Ranní špička je především vyvolána dojížděním lidí do zaměstnání, popř. do škol. Dle grafu je u ranní špičky patrný prudší nárůst intenzity než u špičky odpolední, což může být vysvětleno závaznou dobou začátku pracovní směny popř. výuky.

V období dopravního sedla je majoritní pohyb vozidel uskutečněn především díky služebním (pracovním) cestám; příměstské dopravě; spediční přepravě nákladu, zásilek atp.

V průběhu odpoledne se ke skupině vozidel z období dopravního sedla (služební cesty, mhd, přeprava zásilek) přidává i početná skupina lidí cestujících z práce domů a tak se intenzita dopravy začíná navyšovat, čímž vzniká odpolední špička. Ta ale nemá tak strmý náběh jako ranní špička. Vysvětlení dle mého názoru spočívá v tom, že lidé mají rozdílnou délku pracovní doby popř. délku výuky (v závislosti na dni v týdnu). Intenzita dopravy tím pádem pozvolna narůstá během celého odpoledne, až do svého maxima, které zde nastává okolo 18h.

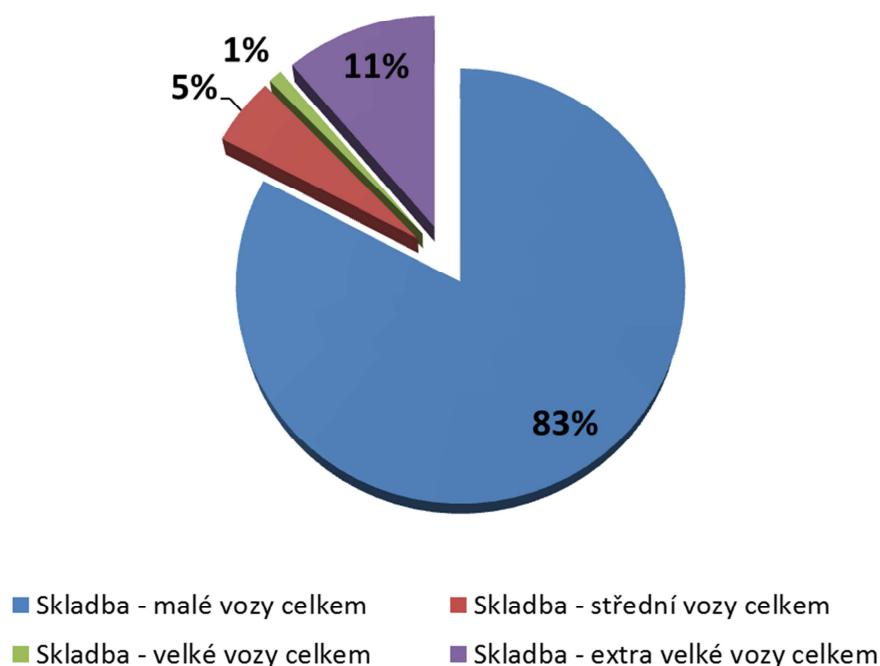
1.1.2 Intenzita dopravy v jízdních pruzích



Obrázek 1—3: Časová závislost intenzity dopravy v jednotlivých pruzích

Z grafu je patrný citelný nárůst intenzit ve středním a levém pruhu, v intervalu mezi 12 – 18h. Možné vysvětlení spočívá v předjíždění pomalu jedoucích vozidel (např. kamionů), v době kdy je mnohonásobně zvýšená pravděpodobnost výskytu těchto pomalých vozidel vlivem celkově markantní intenzity způsobené odpolední dopravní špičkou.

1.1.3 Skladba dopravního proudu



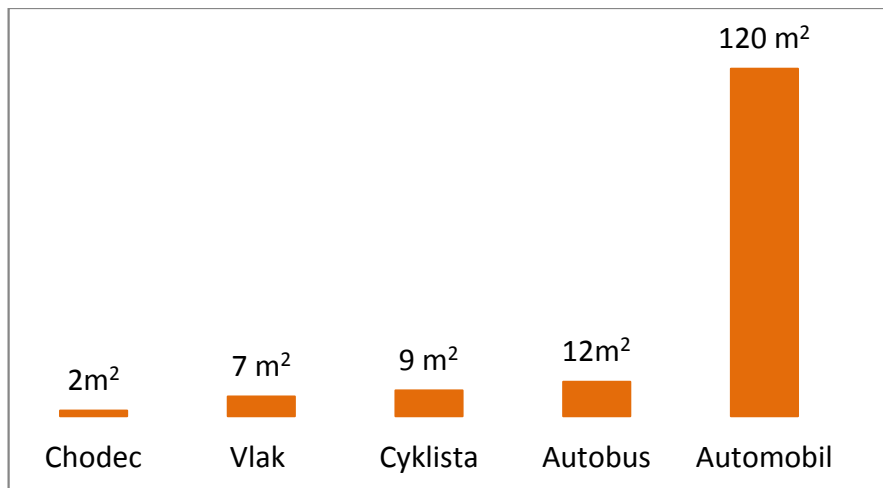
Obrázek 1—4: Zastoupení vozidel ve sledovaném dopravním proudu

Z grafu vyplývá zcela jednoznačný výsledek – zpracováním záznamů v rámci jednoho dne bylo prokázáno většinové procentuální zastoupení malých (osobních) vozidel, což odpovídá každodenní situaci v provozu.

POZN.: Celkově se osobními vozidly uskutečňuje asi 60 % [6] veškeré osobní dopravy na světě, a proto je především důležité zabývat se protipatřeními negativních vlivů dopravy právě u osobních automobilů.

1.2 PARKOVÁNÍ VE MĚSTECH

Parkování, tedy doprava v klidu, je z hlediska městského provozu snad nejčastěji zmiňovaný problém. Omezené prostorové možnosti vlivem stávající zástavby neumožňují pohodlné rychlé a bezpečné zaparkování všech účastníků provozu. Současný pohled na řešení této situace je spíše takový, že prioritou není vybudování nových parkovacích míst ve městech (v některých částech to není ani možné).



Obrázek 1—5: Prostorová náročnost jednotlivých druhů dopravy [m²/os.] [69]

Je spíše vhodné najít způsob jak přimět řidiče, aby více používali prostředky hromadné dopravy. Tímto by došlo k redukci mnoha problémů ať už ekonomických, environmentálních či problémů týkající se bezpečnosti silničního provozu nebo záboru půdy dopravním prostředkem. Případná výstavba nových parkovišť je totiž řešení krátkodobé, omezené, protože s růstem parkovacích ploch neustále roste i množství automobilů a tímto způsobem nelze situaci řešit do nekonečna.

1.2.1 Odstavná parkoviště

Velmi pozitivní vliv na snížení počtu vozidel ve vnitřních částech města mají odstavná parkoviště P+R, která jsou nejčastěji umístěná na okrajích města poblíž stanic metra, typicky na hlavních příjezdových cestách do města. Jejich provozní doba je totožná s provozní dobou metra, čili od cca 4:00 do 1:00 hodin. Výhodou následného užití MHD pro dotyčného řidiče je relativně přesná znalost času příjezdu do vybrané lokality ve vnitřní části města. V případě IAD by tento čas byl obtížně predikovatelný, závislý na aktuální dopravní situaci, která se v průběhu dne mění, mnohokrát i nečekaně (nehody, uzavírky atd.).

POZN.: Nicméně aby mohlo z pohledu cestujícího dojít k objektivnímu posouzení vhodnosti typu přepravy po městě z hlediska doby přepravy je zapotřebí uvážit i další faktory. Hlavně jde o započítání doby potřebné k zaparkování, zakoupení parkovacího lístku a dále i čas k přesunu do konkrétní stanice metra, intervaly mezi jízdami souprav, případně i dobu přesunu při přestupech mezi linkami. Veškeré další srovnávací výpočty doby přepravy by se odvíjeli od vybrané denní doby, kdy by se cestující chtěl po městě pohybovat. V případě

dopravní špičky, kdy je vysoká intenzita dopravy, IAD pozbývá smysl a MHD ji překoná v mnoha ohledech. Avšak v období mimo špičku nabízí IAD pohodlnou a rychlou obslužnost po městě.

Na podobném principu jsou založena i parkoviště typu B+R vybavená uzamykatelnými stojany pro jízdní kola, která mohou být částí parkovišť P+R. Na výpadových cestách z města jsou dále často umístěna parkoviště (resp. vyhrazené pruhy) s označením K+R. Ty povolují krátká zastavení osobních vozidel v blízkosti vlakových stanic či jiných zastávek veřejné dopravy za účelem vyzvednutí osob pro následnou spolujízdu.

1.2.2 Parkování v centru měst

Kromě velkokapacitních stání uvedených níže, se i v centru měst vyskytují obvyklé parkovací plochy. Především jde o hlídaná parkoviště s omezeným počtem míst, která poskytují i možnost dlouhodobého parkování ovšem za výrazný poplatek. Příležitost pro parkování v hustě obydlených městských částech eventuálně umožňují i vnitrobloky budov.

Podzemní garáže

Zatímco na okrajích měst se s oblibou využívají rozlohou výrazná odstavná parkoviště, v centru, až na pár výjimek, příliš místa kvůli přítomné zástavbě není. Investoři vyhledávají a skupují opuštěné pozemky, na kterých stojí zchátralé stavby. Taková místa nazýváme termínem „brownfields“. Typicky sem spadá dlouhodobě nevyužívané území s dřívější průmyslovou či zemědělskou činností popř. bývalé vojenské objekty (areály). [9]

Na těchto prostranstvích se budují moderní obchodní centra popř. lukrativní kancelářské prostory. Nicméně každý komerční prostor, kde se předpokládá vysoká koncentrace lidí, si žádá výstavbu dostatečného počtu parkovacích míst a to je v těchto případech možné realizovat nejlépe prostřednictvím podzemních garáží. Parkování v podzemí skrývá hlavní výhody v elegantním využití místa pod zastavěnou plochou, z čehož plyne estetická nenarušenost okolí vozidly. Negativem je po technické stránce náročná výstavba (především, aby nedošlo k narušení statiky přilehlých objektů a dále i vliv spodní vody). Z hlediska následného provozu musí být tyto hromadné garáže vybaveny bezpečnostními prvky, tj. detektory kouře a škodlivých látek, systémem odvětrávání a hasicím zařízením (např. pomocí sprinklerových hasících hlavíc).

Na vozy využívající alternativní paliva se dále vztahují jistá omezení. Vyhláška provozovateli podzemních garáží totiž nařizuje povinnost zajistit tři různé systémy odvětrávání, pokud chce umožnit vjezd vozidlům na stlačený zemní plyn (CNG). Vozy na zkapalněný ropný plyn (LPG) nesmí v podzemních garážích parkovat vůbec. [10]

Zóny placeného stání

Velká města mají ve vnitřních oblastech zaveden systém placeného parkování. Konkrétně v Praze jsou od roku 1996 ve vybraných obvodech (1, 2, 3, 7) postupně zřizovány zóny zpoplatněného stání, které jsou barevně rozlišeny podle typu používání.

- Modře vyznačené zóny

Jsou především určeny pro parkování rezidentů a podnikatelských subjektů s dlouhodobou parkovací kartou. V období mezi 6:00 – 8:00 h je možné tato místa využít i bez parkovací karty, nicméně pouze s max. délkou parkování 3 min. [11]

- Oranžová zóna a zelená zóna

Zahrnuje oblast pro krátkodobé parkování návštěvníků placené prostřednictvím parkovacích automatů. Lístek se umístí za přední sklo vozidla tak, aby byl při kontrole čitelný. Tyto parkovací zóny jsou zpoplatněny ve všední den v době 8:00 – 18:00 hod. (v době 18:00 – 08:00 hod. je možné zde parkovat bez poplatku). Oranžová zóna umožňuje parkování o max. délce 2 hodin, zelená do 6 hodin. [11]

Speciální garážová stání

Další možností jak zajistit parkování jsou tzv. automatické parkovací systémy. Jsou to v podstatě parkovací domy s počítačově řízeným automatizovaným procesem založení a vyložení vozidla. Jde o stavby určené výhradně k odstávce vozidel - řidič nemá do prostoru objektu přístup (s výjimkou místa určeného k předání a převzetí vozidla). Tato metoda poskytuje kryté parkování v centrech velkých měst, sídlištích, v administrativních centrech a všude tam, kde je nedostatek místa pro klasická parkovací stání. [12]

1.3 ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Produkce emisí rozmanitého druhu je považována za nejzávažnější problém v souvislosti s provozem dopravní techniky v celosvětovém měřítku. Individuální doprava ovlivňuje životní prostředí několika hlavními faktory. Mimo dříve již jmenovaného záboru prostoru, jsou specifikovány konkrétní emise, které doprava vyvolává:

- *Hluk a vibrace*
- *Exhalace*
- *Elektromagnetické záření*
- *Světlo*
- *Nečistoty [63]*

Z pohledu sledované jednotky je možné emise rozdělit do dvou skupin:

- 1) Emise, u kterých je sledovaný energetický faktor (hluk, vibrace, elektromagnetické záření, světlo).
- 2) Emise, u kterých je sledovaný hmotnostní faktor (exhalace, nečistoty).

1.3.1 Hluk a vibrace

Hluk

Zvuk je mechanické vlnění, pohybující se v látkovém prostředí. Slyšitelné spektrum zvuku se u člověka nachází v intervalu 16 Hz až 20 kHz (za jeho hranicemi člověk zvuk nevnímá).

Doprava a průmysl jsou odvětví s největší mírou produkce hluku. Hluk je definován jako zvuk vysoké intenzity mající škodlivý vliv na lidské zdraví (konkrétní účinky na člověka jsou subjektivní). Základními charakteristikami popisující zdroj zvuku (akustické emise) jsou *akustický výkon*, a dále jeho *frekvence a směr působení*.

Hluk měřený v životním prostředí (tedy v místě jeho příjmu), je definován veličinami (akustickými emisemi), mezi které patří:

- *Hladina akustického tlaku L*
- *Ekvivalentní hladina akustického tlaku L_{Aeq}*
- *Hladina expozice hluku L_{Ae} [63]*

Hladina akustického tlaku L

Je nejdůležitější veličinou pro hodnocení hluku. Definována je jako následek změn tlaku vzduchu, způsobených zvukovými vlnami. Nejnižší akustický tlak, vnímaný lidským uchem, se nazývá práh slyšitelnosti. Nejvyšší akustický tlak, který ještě lidské ucho snese, se nazývá práh bolesti. [1]

Pro eliminaci práce s čísly o velkém rozsahu, se používá zhuštěná logaritmická stupnice s jednotkami dB (decibely):

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [dB]$$

p *efektivní hodnota sledovaného akustického tlaku [Pa]*

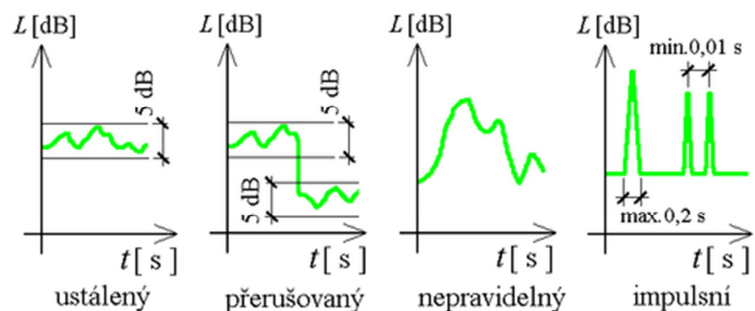
p_0 *referenční hodnota akustického tlaku (pro vzduch $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa)*

POZN.: Tato hodnota zároveň odpovídá minimálnímu akustickému tlaku, který je nepoškozený lidský sluch ještě schopen zaregistrovat.

Z rovnice plyne, že každému zvýšení akustického tlaku o jeden řád odpovídá zvýšení hladiny akustického tlaku o 20 dB.

Podle časového průběhu hladin akustického tlaku, lze hluk dále rozdělit na:

- *Ustálený*
- *Proměnný*
 - o *Přerušovaný*
 - o *Nepravidelný*
- *Impulsivní*



Obrázek 1—6: Rozdělení hluku [70]

Právě z důvodu četné proměnnosti a kolísání zvuků je pro účely posuzování hluku v životním prostředí zavedeno kritérium *ekvivalentní hladina akustického tlaku*.

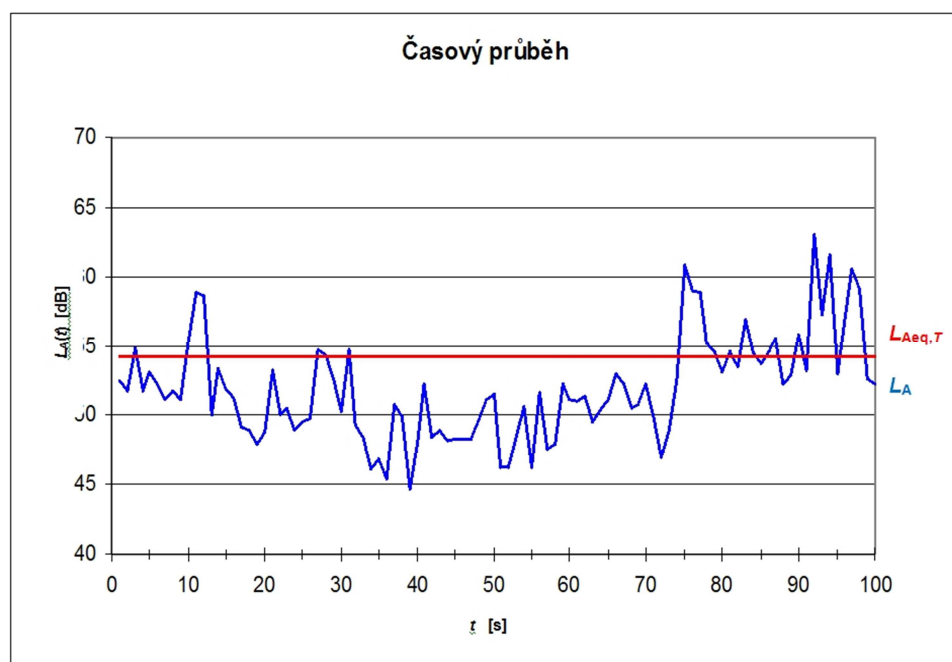
Ekvivalentní hladina akustického tlaku L_{Aeq}

Je způsob sledování množství akustické energie, které je člověk vystaven po zvolenou dobu. Vyhodnocení probíhá na základě stanovení průměrné hladiny akustického tlaku zvuku, která energeticky odpovídá všem naměřeným zvukům o různé intenzitě po dobu časového intervalu (T). [63]

$$L_{Aeq} = 10 \cdot \log \left[\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{p(T)}{p_0} dT \right] \quad [dB]$$

$p(T)$ okamžitý akustický tlak [Pa]

T doba, ke které se ekvivalentní hladina vztahuje



Obrázek 1—7: Ekvivalentní hodnota akustického tlaku L_{Aeq} [71]

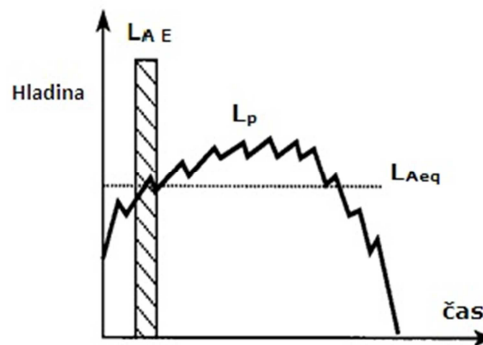
Nejvyšší přípustné limity hluku vyplývají z nařízení vlády č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací.:

Pro hluk v životním prostředí se ekvivalentní hladina akustického tlaku určuje pro celou denní dobu (6:00 h – 22:00 h) a celou noční dobu (22:00 h – 6:00 h). Pro venkovní prostředí je základní hladina L_{Aeq} určena limitem do 50 dB ve dne a do 40 dB v noci. [13]

Limit hluku ze silniční dopravy je upraven na 55 dB resp. 45 dB, což je odůvodněno možností použít korekci + 10 dB (A) oproti základní hladině v oblastech, těsně přiléhajících k dálnicím, silnicím I. a II. třídy a v místech situovaných u hlavních městských komunikací (magistrál). [13]

Hladina expozice hluku L_{Ae}

Využívá se v případě, kdy je možné identifikovat jednotlivé hlukové události, jako např. průjezdy vozidel, průlety letadel atd. Hladina expozice vystihuje akustický tlak vybrané události v libovolně dlouhém časovém intervalu, vztažený na normovanou dobu ($t = 1s$). Tímto je možné jednotlivé události navzájem porovnávat. [63]



Obrázek 1—8: Hladina expozice hluku L_{Ae} [72]

Vibrace

Stejně jako v případě zvuku, i vibrace jsou mechanické kmitání. Avšak oproti hluku, který se šíří hlavně vzduchem, vibrace jsou na člověka přenášeny z pevných konstrukcí. Vibrace vznikají pohybem tuhých těles, jejichž body kmitají kolem své rovnovážné polohy.

V souvislosti s provozem dopravní techniky je nejčastější příčinou vibrací:

- *Pohyb mechanismů vozidel (nevyvážené díly s rotačním, kmitavým a vratným pohybem; vůle v pohyblivých součástech)*
- *Nevyvážená kola*
- *Nerovnosti infrastruktury [1]*

Tyto zdroje mají za následek negativní vliv na lidské zdraví ale i na statiku budov přiléhajících ke komunikacím. Účinky vibrací (a tím i hluku) jsou dále umocněny hmotností, rychlostí jízdy a technickým stavem vozidel.

Sledované faktory u vibrací jsou:

- *Frekvence (kmitočet)*
- *Zrychlení*
- *Amplituda (rozkmit)*
- *Směr působení*
- *Rychlost*

Při hodnocení vibrací se postupuje dle normových metod. Základní veličinou používanou k popisu mechanického pohybu je zrychlení vibrací vyjádřené směrovou hladinou $L(a)$ [dB], vztaženou k referenčnímu zrychlení a_0 ($1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) či směrovou efektivní hodnotou a_{ef} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$].

1) Směrová hladina zrychlení vibrací

$$L(a) = 20 \log \frac{a_{ef}}{a_0} \quad [\text{dB}]$$

a_{ef} *efektivní hodnota zrychlení vibrací v měřeném místě [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]*

a_0 *referenční hodnota zrychlení 10^{-6} [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]*

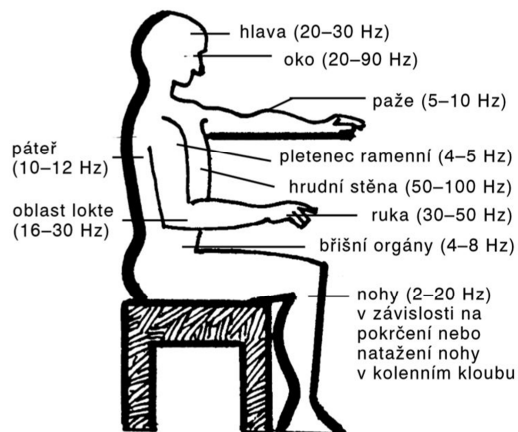
2) Směrová efektivní hodnota zrychlení vibrací

$$a_{ef} = \frac{a_{max}}{\sqrt{2}} = 0,707 a_{max} \quad [\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$$

a_{max} *maximální amplituda zrychlení*

Konkrétní účinky vibrací na člověka ovlivňuje jejich frekvence a způsob přenosu vibrací:

- *Celkové vibrace přenášené na sedící či stojící osobu*
 - o Způsobují rezonance částí těla, napětí svalů, negativní vliv na páteř
- *Celkové vertikální vibrace*
 - o Při frekvenci nižší než 1 Hz vyvolávají kinetózy (nevolnost, zvracení)
- *Místní vibrace přenášené na ruce*
 - o Přímý styk s vibrujícími přístroji (poškození kloubů, šlach, svalů, nervů)
- *Místní vibrace přenášené zvláštním způsobem*
 - o Působení vibrací na část těla přiléhající ke zdroji vibrací (křovinořez – stehno, pánev; motorový nosič – páteř) [14]



Obrázek 1—9: Rezonanční frekvence jednotlivých částí těla [73]

Důležité je věnovat pozornost tzv. rezonančním frekvencím, při kterých dochází ke zvýšení amplitudy kmitání exponovaných částí těla nad hodnoty působících vibrací. Každá část těla a tkáň rezonuje s jinou frekvencí vibrace. Obecně lze říci, že nejsledovanější oblast je okolo 5 Hz. Je to oblast tzv. základních rezonancí, mající hlavně vliv na horní část trupu a břišní orgány. [14],[16]

Dále je třeba při jízdě v dopravních prostředcích (automobil, vlak i letadlo) zohlednit vibrace o frekvencích do 500 Hz. Jedná se o frekvenční pásma pro rezonanci lebky, způsobující únavu a zhoršení reakčního času na podněty (-> faktor zvyšující počet dopravních nehod). [15]

Mezi hlavní zdroje hluku (a vibrací) v dopravě patří:

- *Hluk z pohonné soustavy vozidla*
- *Hluk vznikající interakcí kola – vozovka*
- *Aerodynamický hluk [63]*

Hluk (a vibrace) způsobené pohonným ústrojím vozidla

Samotný konvenční spalovací motor produkuje hluk především díky proudění plynných a kapalných látek zapojených do cyklicky se opakujících termodynamických dějů uvnitř spalovacího prostoru. Při pracovní době „sání“ je palivová směs přivedena do pracovního prostoru válce, kde dochází k její „kompresi“. Během cyklu „expanze“ dochází k prudkému zvýšení teploty a tlaku ve válci, což je doprovázeno výrazným zvukovým efektem a vibracemi. Při expanzi je píst prudce stlačen do dolní úvratě - následkem toho motor koná práci. [17] V případě diesellových motorů je hluk umocněn většími pracovními tlaky (vyšší kompresní poměr). Tyto motory jsou tak snadno identifikovány charakteristickým zvukovým projevem.

Zanedbatelná a to hlavně u starších vozidel není ani hlučnost ventilového rozvodu, ozubení převodovky, rozvodového hřídele, diferenciálu, ložisek a také náhonu agregátů (alternátor, čerpadlo chladícího okruhu, klimatizace atd.). [17]

Hluk (a vibrace) způsobené pohybem vozidla

Nejen pohonné jednotky automobilů jsou zdrojem hluku a vibrací, ale je jím i samotný pohyb dopravních prostředků. I přes snahu redukovat emise typu aerodynamický a valivý hluk, mnohé oblasti jim jsou vystaveny a je nezbytné považovat je za nedílnou součást dopravního proudu.

Aerodynamický hluk

Příčinou aerodynamického hluku je zvuk vznikající obtékáním tělesa proudem vzduchu a s ním spojené tlakové změny. Projevuje se až při dosažení vysokých rychlostí vozidel (aerodynamický hluk roste s rychlostí). Stěžejní je tvar a jakost povrchu celé karosérie a z toho plynoucí odpor vzduchu dopravního prostředku, od kterého se odvíjí míra hlučnosti. S tím souvisí veličina aerodynamický součinitel odporu vzduchu (C_x) reflektující aerodynamickou čistotu vozidla. U současných osobních vozidel se tento koeficient pohybuje v intervalu 0,3 – 0,4. V případě sportovních aut je možné dosáhnout hodnoty 0,25 a naopak tahače popř. autobusy reprezentují rozsah 0,7 – 0,9. Dlouhodobou snahou ve vývoji vozidel je vytvoření správného tvaru kapoty, který by tento hluk redukoval a současně snížil spotřebu paliva. Za těmito účely se s oblibou využívají aerodynamické tunely popř. počítačové modely zobrazující proudnice obtékajícího média (vzduchu). Nicméně tvar karosérie nepodléhá jen kritériu nízkého odporu, ale musí se zvážit i míra praktičnosti při provozu automobilu. [18],[19]

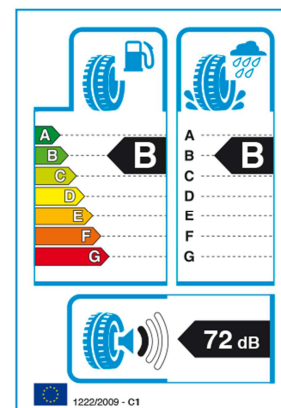


Obrázek 1—10: Obtékání vozidla v aerodynamickém tunelu [74]

Valivý hluk




Hluk je v tomto případě způsoben konstrukčním a materiálovým provedením pneumatik a rozhodující je také struktura obrusné vrstvy vozovky. Každá pneumatika, schválená pro provoz na veřejných komunikacích je podrobena přísným bezpečnostním testům. Podléhá mimo jiné vizuální prohlídce, zkoušce nevyváženosti i testování rentgenem pro případné odhalení vnitřních poruch pláště a dále musí splňovat i nová nařízení.

Od roku 2012 je (dle předpisu EU 1222/2009) povinností výrobců zveřejňovat doplňující informace. Prostřednictvím tzv. štítků, které jsou graficky podobné štítkům určující spotřebu elektrické energie domácích spotřebičů, se definují vlastnosti pneumatik v oblasti výše spotřeby paliva vozidla, účinnosti brzdění na mokré vozovce a právě i vnější hlučnosti. Předpis má tedy hlavní podstatu ve zvyšování úrovně bezpečnosti, ekonomické a ekologické efektivity silniční dopravy.[20]



Obrázek 1—11: Doplňující informace o pneumatikách [75]

Úrovně hluku pneumatik se dělí do 3 kategorií a jsou uváděny v decibelech (dB), relativně k novým evropským hladinám vnější hlučnosti pneumatik, které mají být zavedeny do roku 2016. [20]

-  **1 zvuková vlna**
= již nyní 3 dB pod budoucím evropským limitem
-  **2 zvukové vlny**
= v souladu s budoucím evropským limitem
-  **3 zvukové vlny**
= v souladu se současným evropským limitem

Obrázek 1—12: Úrovně hluku pneumatik [76]

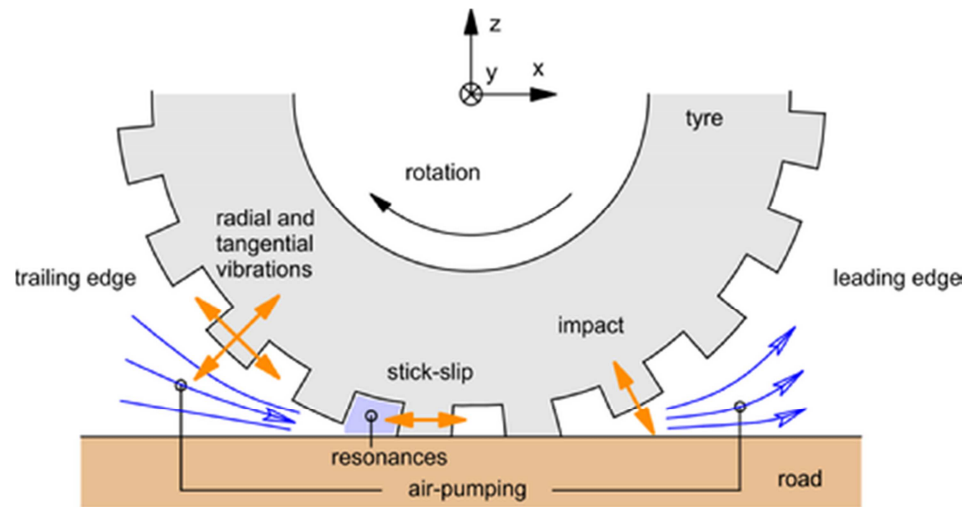
Hluk vznikající kontaktem dezénu s vozovkou je citelný v intervalu rychlostí cca 50 – 120 km/h [21]; označuje se termínem „valivý hluk“ a skládá ze dvou základních složek:

- *Radiální oscilace pneumatik*
- *Rezonance; sání a stlačování vzduchu pneumatikami*

Radiální oscilace pneumatik (radial vibrations)

Její příčina je v nepravidelnostech povrchu vozovky, které vyvolávají radiální kmity. Pokud tyto nerovnosti mají v horizontální rovině velikost od cca 30 mm do 100 mm, vibrace jsou přenášeny do běhounu a bočních stěn pneumatik (intenzita hluku roste s velikostí vertikálních nerovností). Vibrace jsou nejvíce citelné, když nerovnosti na vozovce mají

stejnou vzdálenost, jako je kontakt mezi pneumatikou a silnicí (pro osobní vozidla je tato hodnota kolem 8 cm). Toto splňují například dlažební kostky, které jsou známy svým nepohodlným povrchem pro provoz automobilů. [22]



Obrázek 1—13: Zdroje hluku z pneumatik [77]

Rezonance; sání a stlačování vzduchu pneumatikami (air-pumping)

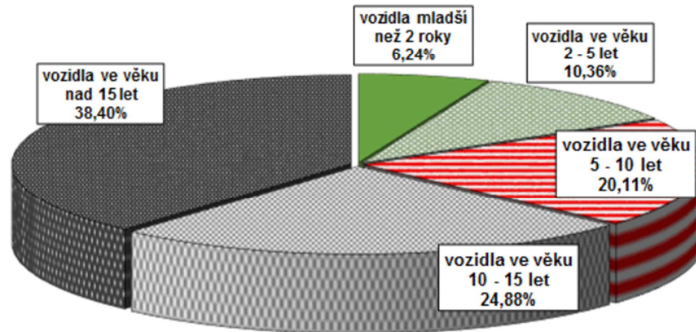
Pokud dojde k valení kola na velmi hladkém povrchu vozovky, vzduch v zadní části kontaktní plochy je nasáván, před kolem stlačován a následně hlučně uniká. Tímto způsobem je generován hluk o vysokých frekvencích („syčení“). Dezén pneumatiky s řadou bočních drážek dále působí v místě styčných ploch jako akustické rezonátory, které umocňují vyzářování zvuku. Tento zdroj hluku lze potlačit tím, že povrch vozovky bude mít jemnou texturu (nerovnosti v horizontálním směru menší než 30 mm) nebo porézní obrušnou vrstvou. V prvním případě může vzduch unikat vodorovně mezi nerovnostmi dříve, než je stlačen a v druhém stlačovaný vzduch odejde díky dutinám (pórům) v krytu. [22]

1.3.2 Exhalace

Mnohé země po celém světě (včetně České republiky) mají zastaralý vozový park. Vysoké stáří vozidel má za následek splnění pouze starších (méně přísných) norem EURO, stanovujících limitní hodnoty škodlivých plynů ze spalovacích motorů.

Struktura parku osobních automobilů v ČR (stav k 31.12.2014)

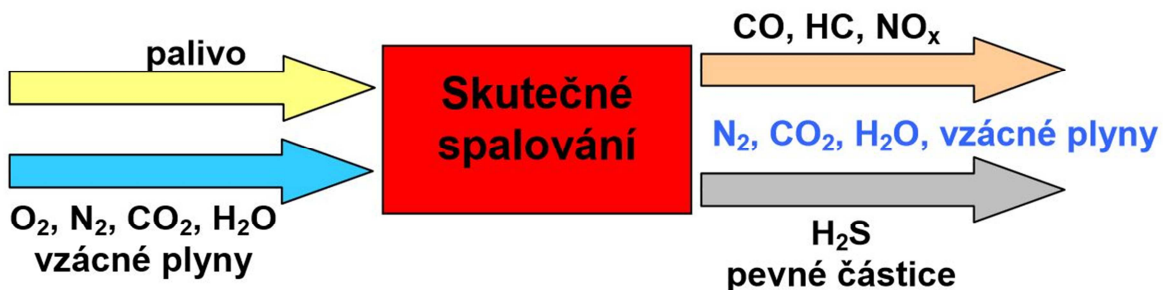
Registrace celkem 4 893 562 ks, průměrný věk 14,49 roku



Obrázek 1—14: Stáří vozového parku v ČR [78]

Škodlivé plyny ze spalovacího procesu

Vzhledem k tomu, že skutečné hoření palivové směsi není dokonalé (tepelné ztráty, nedokonalé promísení paliva se vzduchem atd.), musíme počítat se vznikem vedlejších produktů. Vznik veškerých škodlivin, je rozhodujícím způsobem ovlivněn stylem tvoření směsi, průběhem hoření, tvarem a teplotou spalovacího prostoru. Jejich úplné odstranění je v podstatě nemožné, nicméně pomocí dostupných technických prostředků mohou být velmi účinně konvertovány na méně škodlivé látky.



Obrázek 1—15: Produkce látek při spalování [79]

Oxid uhličitý (CO₂)

Velmi dobře známý oxid ze skupiny tzv. skleníkových plynů. Jeho složení atmosféře zabraňuje propuštění tepelného slunečního záření odraženého od zemského povrchu do vesmíru. Záření se tak vrátí zpět na zem a pozvolně dochází k jejímu oteplování. Oxid uhličitý je v souvislosti s dopravou následkem oxidační reakce s oxidem uhelnatým v katalyzátorech vozidel. [24],[25]

Míra produkce oxidu uhličitého spalovacími motory je přímo určena spotřebou paliva.

Množství CO₂ je celosvětově sledováno a podléhá regulacím. Průměrná úroveň emisí CO₂ v roce 2013 byla v EU u nových osobních automobilů 127 g/km (limit pro rok 2015 je 130 g/km). Od roku 2021 bude limit pro emise oxidu uhličitého činit 95 g/km, což zhruba odpovídá spotřebě 3,9 litru paliva na ujetých 100 km. [23]

Oxid uhelnatý (CO)

Jedovatý plyn vznikající hlavně u zážehových motorů při nedostatku kyslíku ve směsi (příliš bohatá směs – směšovací poměr $\lambda < 1$). Nejvíce je produkován po startu motoru, kdy teplota katalyzátoru nedosáhla pracovní úrovně. Je charakterizován silnou chemickou afinitou na hemoglobin (krevní látky zajišťující přenos kyslíků z plic do tkání). Tato vazba je přibližně 200x silnější než v případě kyslíku, proto je omezeno okysličování orgánů. Možným varováním před přítomností CO ve vzduchu je prvotní otrava domácích zvířat, protože se plyn drží při zemi. Symptomy u zasažených jedinců se liší v závislosti na výši koncentrace - zpočátku jde o bolest hlavy, pocity slabosti, ale v případě silnější otravy může dojít až k bezvědomí a srdeční zástavě. [24],[25]

Nespálené uhlovodíky (HC)

Jedná se o toxické popř. i karcinogenní látky vzniklé (stejně jako emise CO) jako produkty nedokonalého spalování při nedostatku kyslíku ve směsi. Vliv na HC má i zpomalení chemických reakcí v lokálních studených místech, kde je nízká teplota plamene v kombinaci s pomalým hořením (např. stěny válce). Palivo se tak nepřemění nebo přemění jen částečně na CO₂ a H₂O. Ideální směšovací poměr pro minimalizaci těchto exhalací je při přebytku vzduchu, tedy $\lambda = 1,1 - 1,2$ (chudá směs). [24],[25]

Nespálené uhlovodíky jsou např. alkeny (tvoří přízemní ozon) či aldehydy (působí negativně na sliznice a oči). Za nejnebezpečnější prvky této skupiny se považují polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU) např. benzo(a)pyren, který je karcinogenní a způsobuje mutace organismu.[25]

Oxidy dusíku (NO_x)

Oxidy dusíku vznikají hlavně za vysokých teplot a tlaků při hoření motorových paliv oxidací dusíku přítomného v palivové směsi. NO_x dosahují maxima produkce při $\lambda = 1,05 - 1,1$.

- *Oxid dusičitý* je společně s oxidy síry (SO_x) součástí takzvaných kyselých dešťů a ve spojení s kyslíkem a těkavými látkami (VOC) dochází k tvorbě přízemního ozónu, poškozujícího dýchací soustavu člověka.
- *Oxid dusnatý* je dalším zástupcem skleníkových plynů, znemožňujících propouštění tepelného záření ze země do vesmíru.

Po zdravotní stránce u člověka vyvolávají respirační onemocnění. Plyny dráždí sliznice dýchacích cest, což vede k pocitům dušnosti a nucení ke kašli. [24],[25]

Oxidy síry (SO_x)

Do ovzduší se uvolňují při spalování fosilních paliv v průmyslu. Hlavním zástupcem je jedovatý a štiplavý *oxid siřičitý* SO_2 . Jeho přítomnost je ukazatelem znečištění venkovního ovzduší. Plyn oxiduje se vzdušným kyslíkem na *oxid sírový* SO_3 a ten za přispění vody (vodní páry) konvertuje na kyselinu sírovou (H_2SO_4), která má spolu s kyselinou siřičitou hlavní podíl na kyselých deštích.

Negativně působí na horní cesty dýchací a oční spojivky. Nejvíce zasaženou skupinou jsou osoby trpící chronickými chorobami kardiovaskulárního a dýchacího systému, staří lidé a děti. [24],[25]

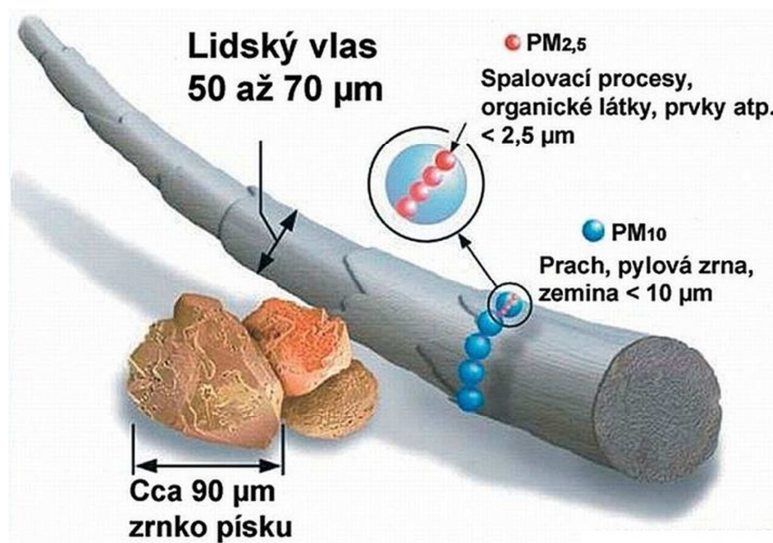
Tetraethylolovo

Tato sloučenina olova byla využívána v palivu jako aditivum pro zpomalení jeho hoření a zvýšení oktanového čísla. Olovo sloužilo i jako mazadlo sedel ventilů spalovacích motorů. Využívání této, pro lidský organismus toxické látky (napadá kostní dřeň a krevní buňky), bylo ukončeno se zavedením třícestných katalyzátorů, které by jinak tetraethylolovo zničilo. [24],[25]

Pevné částice (PM)

Hlavním charakteristickým znakem PM je velikost těchto drobných částic. Často je např. uváděno označení PM_{10} či $\text{PM}_{2,5}$ atd. (čísla znamenají maximální velikost částic uvedených v mikrometrech). Čím menší částice, tím je pro jedince závažnější, protože mají tendenci se dostat hlouběji do dýchací soustavy (do plicních sklípků inklinují částice o frakcích PM_1).

V PM mohou být zastoupeny škodliviny v podobě sazí, popílku, uhlovodíků včetně pesticidů či těžkých kovů. Konkrétní složení závisí na jejich původu. [24],[25]



Obrázek 1—16: Porovnání velikosti pevných částic [80]

Následky vdechování PM se (jako v případě NO_x) projevují respiračním onemocněním, např. sklony k astmatu. Dle světové zdravotnické organizace (WHO) vede navýšení dlouhodobé koncentrace $\text{PM}_{2,5}$ o $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ k nárůstu počtu předčasných úmrtí až o 6 %.

Zdrojem PM v souvislosti se spalovacími procesy vozidel jsou hlavně vznětové motory, proto se využívají filtry pevných částic (viz. dále – kapitola *Úprava složení výfukových plynů*). Ostatní zdroje pevných částic způsobené provozem dopravní techniky jsou uvedeny v kapitole *Nečistoty*.

Emisní normy EURO

Norma EURO je závazná evropská norma určující limitní hodnoty výfukových exhalací. V průběhu let je pomocí těchto norem nařizováno postupné snižování úrovně maximálních limitů škodlivých látek, které vozidla produkují. Nejčastěji se jedná o oxid uhelnatý (CO), oxidy dusíku (NO_x), uhlovodíky (HC) a prachové částice (PM). Tato omezení platí pro nová vozidla, uvedená na trh (na vozidla vyrobená před platností aktuální normy se příslušná omezení nevztahují). Konkrétní výše limitů se liší v závislosti na kategorii vozidla a na druhu použitého paliva (benzín, diesel). Následující přehled se týká osobních automobilů. Z tabulky je například patrné, že norma EURO 5 je oproti EURO 4 pětinasobně přísnější v maximální produkci pevných prachových částic (PM) v případě dieselových motorů.

Tabulka 1—1: Limitní hodnoty jednotlivých EURO norem (Autolexicon.cz)

Norma	Platnost	CO	HC	NO _x	HC + NO _x	PM
DIESEL						
Euro 1	Červenec 1992	3,16	-	-	1,13	0,18
Euro 2	Leden 1996	1,0	-	-	0,70	0,08
Euro 3	Leden 2000	0,64	-	0,50	0,56	0,05
Euro 4	Leden 2005	0,50	-	0,25	0,30	0,025
Euro 5	Září 2009	0,50	-	0,180	0,230	0,005
Euro 6	Září 2014	0,50	-	0,080	0,170	0,005
BENZÍN						
Euro 1	Červenec 1992	3,16	-	-	1,13	-
Euro 2	Leden 1996	2,2	-	-	0,5	-
Euro 3	Leden 2000	2,3	0,20	0,15	-	-
Euro 4	Leden 2005	1,0	0,10	0,08	-	-
Euro 5	Září 2009	1,0	0,10	0,060	-	0,005
Euro 6	Září 2014	1,0	0,10	0,060	-	0,005

Imisní limity

Imise jsou škodlivé látky vznikající v důsledku produkce emisí z různých zdrojů znečišťování. V podstatě se jedná o plošné rozptýlení škodlivin ve vzduchu a půdě, které společně vytvářejí celkové chemické znečištění atmosféry - smog. Jejich koncentrace je v porovnání s emisemi několikanásobně nižší. K regulaci množství slouží limity vycházející ze zákona o ochraně ovzduší 201/2012 Sb. a vyhlášky o způsobu posuzování a vyhodnocení úrovně znečištění 330/2012 Sb. Tabulka níže obsahuje sledované látky včetně jejich povoleného množství a počtu ročního překročení.

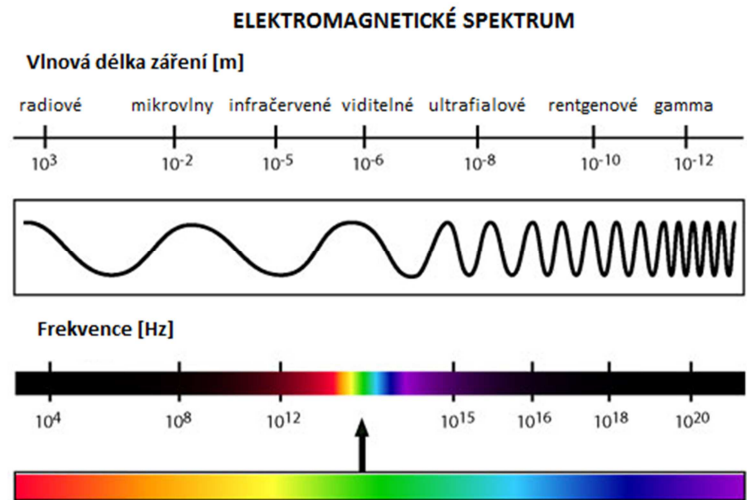
Tabulka 1—2: Hodnoty imisních limitů (Chmi.cz)

Znečišťující látka	Doba průměrování	Imisní limit [$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]
Oxid siřičitý SO_2	1 hodina	350 (max. 24x za rok)
	24 hodin	125 (max. 3x za rok)
Oxid dusičitý NO_2	1 hodina	200 (max. 18x za rok)
	kalendářní rok	40
Prachové částice PM_{10}	24 hodin	50 (max. 35x za rok)
	kalendářní rok	40
Prachové částice $\text{PM}_{2,5}$	kalendářní rok	25
Olovo (Pb)	kalendářní rok	0,5
Oxid uhelnatý (CO)	maximální denní 8hod. klouzavý průměr	10 000
Benzen	kalendářní rok	5
Arsen (As)	kalendářní rok	6
Cadmium (Cd)	kalendářní rok	5
Nikl (Ni)	kalendářní rok	20

1.3.3 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření je způsobené různými vlnovými délkami (resp. frekvencemi), mající původ v rozmanitých zdrojích. Jednotlivé druhy elektromagnetického záření zahrnují:

- *Rádiové záření*
- *Mikrovlny*
- *Infračervené záření*
- *Viditelné světlo*
- *Ultrafialové záření*
- *Rentgenové záření*
- *Záření gama* [1]



Obrázek 1–17: Přehled elektromagnetického záření [81]

Vztah mezi vlnovou délkou a frekvencí elektromagnetické vlny:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [m] \quad \lambda = v \cdot T \quad [m]$$

- λ *vlnová délka vlny [m]*
 v *rychlost šíření záření (dle prostředí) [m.s⁻¹]*
 f *frekvence vlny [Hz]*
 T *perioda [s]*

POZN.: Čím vyšší je vlnová délka, tím nižší je frekvence.

V souvislosti s provozem dopravní techniky je především nutné zmínit vliv palubní elektroniky a vysokonapěťové zapalovací obvody zážehových motorů na rádiové záření. To se projevuje rušením televizního a rádiového vysílání. Technickým řešením je proto důležité zajistit tzv. elektromagnetickou kompatibilitu, která jednak eliminuje rušení elektronických systémů vozidla okolím a zároveň zdroje ve vozidle neruší ostatní zařízení. [1]

Elektromagnetické záření je definováno následujícími veličinami (a jednotkami):

- | | |
|--|---------------------------|
| - <i>Intenzita elektrického pole</i> ($\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$) | - <i>Frekvence</i> (Hz) |
| - <i>Zrychlení elektrického pole</i> (dB) | - <i>Vlnová délka</i> (m) |

1.3.4 Světelné emise

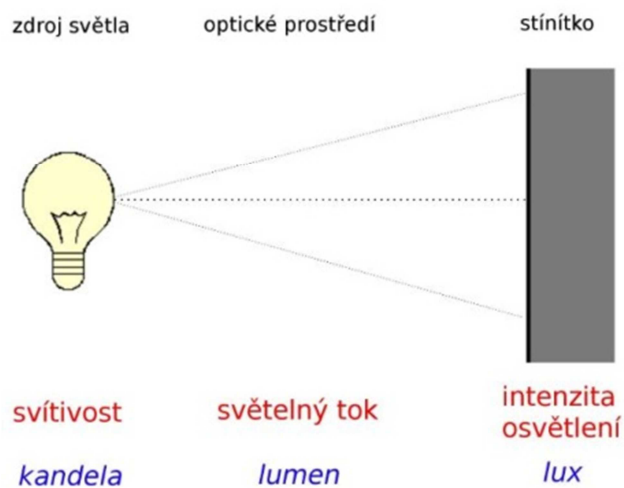
Světlo patří do kategorie elektromagnetického záření a jako jediné je pro lidské oko viditelné. Vlnová délka světla se pohybuje v rozsahu 400 – 800 nm (každý světelný odstín má konkrétní vlnovou délku).

Mimo důležité zajištění viditelnosti pro řidiče a dávání signalizace o změně směru jízdy ostatním účastníkům provozu, mohou světelné emise působit i nepříznivě. To se projevuje:

- *Oslněním ostatních řidičů (vliv na bezpečnost provozu)*
- *Zátěží na okolí komunikací způsobené nadměrným jasem (vliv na životní prostředí)*

Světelné emise jsou definovány následujícími veličinami (a jednotkami):

- *Svítivost (kandela) – vyjadřuje vlastnost zdroje světla*
- *Světelný tok (lumen) – vztahuje se k přenosu světla prostředím*
- *Osvětlení (lux) – určuje účinky světla při jeho dopadu na povrch tělesa*
- *Odrazivost (kandela/lux) – představuje množství odraženého světla*



Obrázek 1—18: Světelné veličiny [82]

Světelné emise vozidel jsou legislativně stanoveny intervalem svítivosti (tedy minimální a maximální úrovní svítivosti). [1]

1.3.5 Nečistoty

Při každodenním provozu dopravních prostředků vzniká znečištění komunikací, mající především původ v pevných látkách různé velikosti. Mezi nečistoty z běžného provozu lze zahrnout:

- *Abraze brzdového a spojového obložení*
- *Abraze pneumatik*
- *Zvíření prachu z vozovky*
- *Posyp silnic*
- *Nečistoty z vozidel*
- *Ztráty převáženého materiálu [63]*

V případě poruchy či nehody vozidla je dále častým jevem únik provozních kapalin (palivo, olej, brzdová či chladicí kapalina) na komunikaci a do blízkého okolí.

2 ŘEŠENÍ PROBLÉMŮ INDIVIDUÁLNÍ DOPRAVY

V této kapitole je zahrnuto řešení nejvýraznějších dopravních problémů uvedených v předchozí části. Jak již bylo zmíněno, dopravní provoz obecně způsobuje emise všeho druhu. Nicméně na emisní zátěži prostředí se podílejí jednotlivé obory dopravy různě. Zmíněné návrhy opatření proto budou kategorizovány do třech hlavních oblastí:

- *Dopravní prostředek*
- *Dopravní infrastruktura*
- *Řízení dopravy*

2.1 DOPRAVNÍ PROSTŘEDEK

Samotné dopravní prostředky (a hlavně spalovací motory) mají zásadní vliv na produkci emisí. Jsou výhradním zdrojem plynných exhalací a zanedbatelné nejsou ani hlukové emise. Z těchto důvodů je nutné věnovat technickým zařízením, redukcí tyto problémy, náležitou pozornost.

2.1.1 Úprava složení výfukových plynů

K docílení přijatelného chemického složení výfukových plynů je nutné do spalovací soustavy konvenčních motorů zařadit další technické prostředky. Jak již bylo uvedeno, mezi nejvíce sledované škodlivé látky ve spalinách uhlovodíkových paliv se řadí oxid uhelnatý (CO), oxidy dusíku (NO_x) a nespálené uhlovodíky (HC). V případě naftových motorů je důležité se zaměřit i na pevné prachové částice (PM).

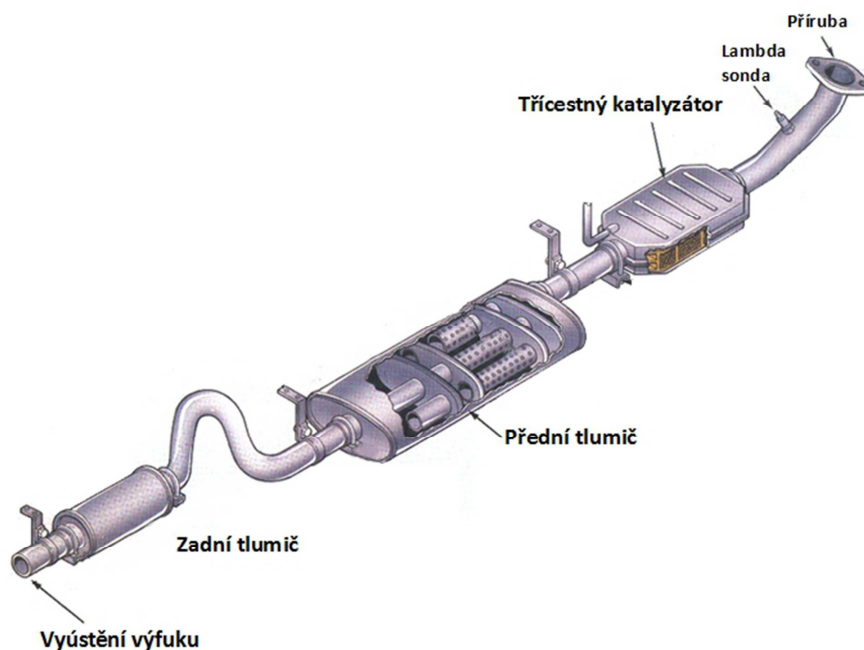
Katalytický konvektor

Zařízení obecně známé jako katalyzátor je schopno prostřednictvím chemických procesů přeměnit zdravotně závadné látky na látky, které mají výrazně nižší dopad na životní prostředí. Výfukové plyny procházející skrze vnitřní uspořádání katalyzátoru jsou ovlivňovány reakcemi se vzácnými kovy a výsledkem je pouze produkce netoxických plynů.

Dle schopnosti redukovat škodlivé látky, katalyzátory dělíme na:

- *Dvoucestné (oxidační)*
- *Třícestné (oxidačně – redukční)*

Z principu chemických procesů se redukcí rozumí odebírání kyslíku sloučeninám a oxidací naopak jejich obohacování kyslíkem.



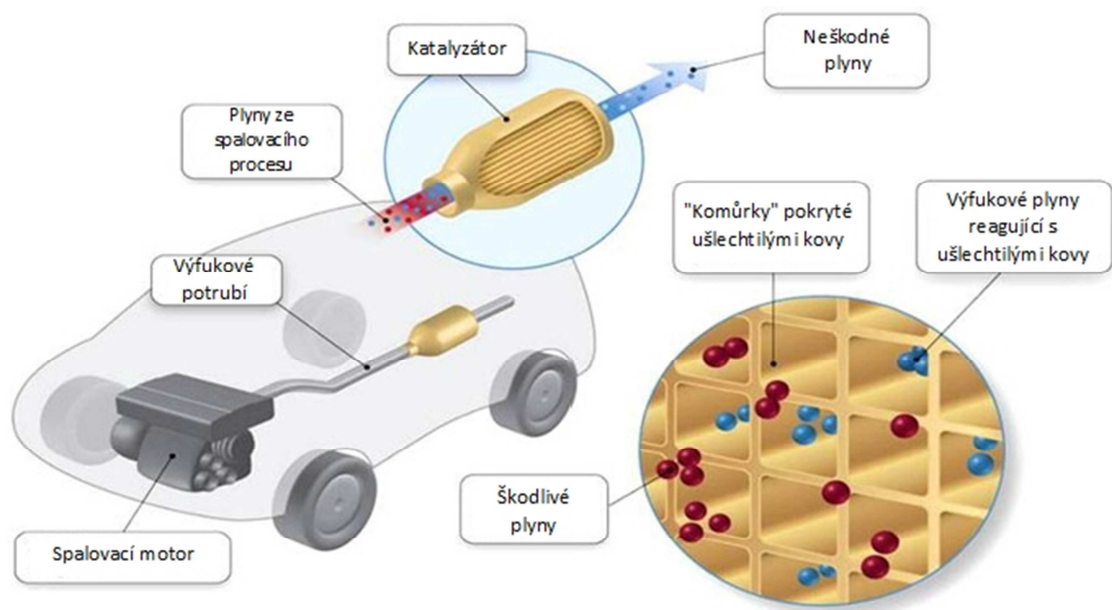
Obrázek 2—1: Výfuková soustava vozidla [83]

Dvoucestný katalyzační systém (oxidační)

Jedná se původní typ katalyzátoru používaný již od poloviny 70. let 20. století (prvním vozidlem s katalyzátorem byl Cadillac Seville). Oxidací dochází k přeměně oxidu uhelnatého (CO) na oxid uhličitý (CO₂) a nespálené uhlovodíky se konvertují na vodu (H₂O) a oxid uhličitý. Nevýhodou je však nízká efektivita štěpení oxidů dusíku, způsobujících hlavně respirační onemocnění. Nicméně jeho použití je v některých zemích s mírnějšími emisními limity dostačující. [26]

Třícestný katalyzační systém (oxidačně – redukční)

Většina benzínových vozidel v současnosti využívá třícestné katalyzátory. Oproti dvoucestnému systému navíc disponuje schopností redukovat oxidy dusíku na dusík (N) a oxid uhličitý. Po technické stránce je katalyzátor složen z keramického nebo kovového těla ve tvaru včelích pláství k dosažení větší činné plochy, ale zároveň pro zachování kompaktních rozměrů. Tyto „komůrky“ jsou pokryty vrstvou ušlechtilých kovů, jako je platina (pro chemickou oxidaci) a rhodium (pro chemickou redukci). [26]



Obrázek 2—2: Katalyzátor vozidla [84]

K zajištění správného průběhu chemických reakcí je ovšem důležitá provozní teplota (300 – 600 °C), jinak má katalyzátor nízkou účinnost. Z tohoto důvodu může být výfuková soustava dále doplněna (v závislosti na typu vozidla), druhým katalyzátorem, který se umísťuje do oblasti těsně za sběrné potrubí z válců motoru, kde zplodiny mají vyšší teplotu. [26]

Katalyzátor dnes poskytuje již zaběhnutý standart v oblasti ochrany životního prostředí. Současné technologie provedení katalyzátorů umožňují odstranit až 97 % uhlovodíků (HC), 96 % oxidu uhelnatého (CO) a 90 % oxidů dusíku (NO_x). [26]

Pro jeho správnou funkčnost a dlouhou životnost je však důležité dodržovat základní pravidla. Především se jedná o použití správného složení paliva (-> výhradně bezolovnatý benzín). V opačném případě dochází k zanesení činných ploch katalyzátoru olovem a tím k omezení přeměny látek. Dále nesmí nastat kontakt nespáleného paliva s katalyzátorem, kde by směs mohla vzplanout a teplota překročit přípustnou mez, což by narušilo jeho strukturu. Tato situace může například nastat při roztahování vozidla při nefunkčnosti zapalování. [26]

Po mechanické stránce jsou obzvláště katalyzátory s keramickým tělem náchylné k poškození od nerovností či překážek na vozovce.

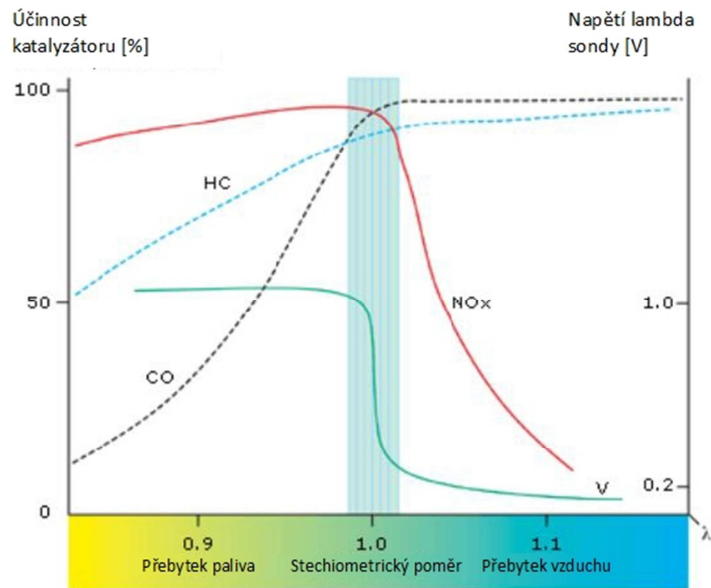
Lambda sonda

Nezbytnou součástí třícestných katalyzátorů je tzv. lambda sonda, která funguje jako elektrochemický snímač množství zbytkového kyslíku ve výfukových plynech (vyhodnocuje, zda spalovaná směs je bohatá nebo chudá).

Pro dosažení vysoké účinnosti katalyzátoru musí být palivová směs udržována v oblasti velmi blízké směšovací poměru $\lambda = 1,0$ (tzv. stechiometrický poměr²). Ideální stechiometrický poměr pro benzín je 14,7 : 1, (tj. 14,7 jednotek vzduchu na 1 jednotku paliva). V případě $\lambda < 1$ se jedná o bohatou směs, tj. menší objem vzduchu než u stechiometrické směsi a při $\lambda > 1$ jde o chudou směs, tj. větší objem vzduchu než u stechiometrické směsi. [27]

POZN: Studený motor potřebuje pro rovnoměrný chod bohatší směs ($\lambda < 1$) -> lambda regulace tedy může být spuštěna až po překročení určité teploty motoru. [27]

² Stechiometrický poměr je objemový příp. hmotnostní poměr vzduchu k palivu, který vyjadřuje kolik vzduchu je třeba k dokonalému spálení jedné (hmotnostní nebo objemové) jednotky paliva. V praxi není nikdy tohoto poměru zcela dosaženo, a to především z důvodu velmi krátkého času, který je v motoru s vnitřním spalováním k dispozici, při jednom spalovacím cyklu. [28]



Obrázek 2—3: Účinnost přeměny škodlivých látek při různém poměru vzduch/palivo [85]

Lambda sonda spolehlivě pracuje až při dosažení teploty cca 500 °C, proto se dříve umísťovala co nejbližší k motoru, aby bylo možné regulaci směsi provádět hned po startu studeného motoru. Moderní typy sond jsou však konstruovány jako elektricky vyhřívané, umístěné dále od motoru (-> dochází k jejich menšímu teplotnímu namáhání). [27]

Lambda sonda obsahuje dvě elektrody - jedna slouží jako snímač okolního (referenčního) vzduchu a druhá je v kontaktu s výfukovými plyny. Vlivem rozdílné koncentrace kyslíku vzniká mezi elektrodami elektrické napětí, jehož hodnota vyjadřuje množství kyslíku ve spalínách. Velikost napětí je předávána do řídicí jednotky motoru, která upravuje směšovací poměr palivo – vzduch tak, aby motor vždy pracoval v optimálním režimu.

Filtr pevných částic (DPF)

Ve spalovacím procesu dieselového motoru vznikají pevné částice (PM), obsahující karcinogenní prvky, které oxidačním katalyzátorem není možné odstranit. Jemná síta filtru, umístěného za katalyzátorem slouží k zachytávání sazí a propouští jen výfukové plyny. Plošná instalace filtrů do všech nových vozidel s naftovým motorem probíhá od roku 2009 a to kvůli splnění limitních hodnot PM v rámci emisní normy EURO 5. [29],[30]

Filtry po čase, v závislosti na stylu provozu vozidla, podléhají čištění (regeneraci). Úroveň zanesení filtrů je kontrolována řídicí jednotkou, která zároveň upozorní na potřebu jejich vyčištění. Ta spočívá ve spálení usazených částic za vyšších teplot (viz. *aktivní regenerace*).

Existují dva typy regenerace filtru pevných částic:

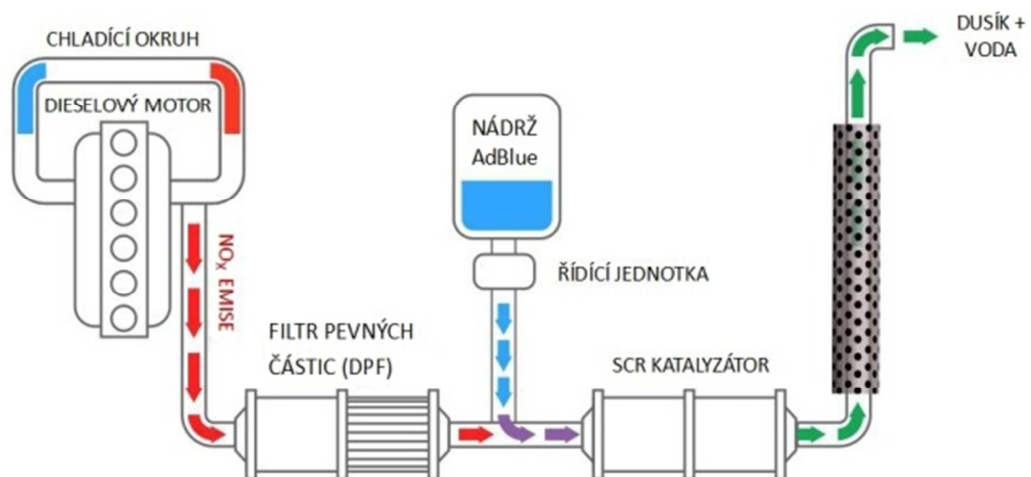
- *Pasivní* – probíhá zcela automaticky při běžné jízdě za ustálených podmínek (např. pokud vozidlo jede delší trasu po dálnici). Teplota spalin se v tomto režimu čištění pohybuje kolem 350 – 500 °C.
- *Aktivní* – spouští se po ujetí cca 1000 km v případě, že vozidlo je využíváno pouze na krátké trasy se studeným motorem. Typicky se jedná o městský provoz, kde nedochází k průběžným (pasivním) regeneracím. Teplota spalin je úpravou vstřikováním uměle zvýšena až na teplotu 600 °C, při které dojde ke spálení částic ve filtru. [29],[30]

Čištění filtrů může být v závislosti na výrobci provedeno pouze s využitím spalování motorové nafty, příp. některé typy filtrů využívají i přídavná aditiva podporující hoření.

Systém selektivní katalytické redukce (SCR)

Vznětové motory neumožňují využít třícestný katalyzátor a konvertovat tak i oxidy dusíku na ekologicky neškodný dusík. Důvodem je skutečnost, že tyto motory pracují s přebytkem vzduchu ($\lambda > 1$), a v této oblasti je účinnost přeměny oxidů dusíku minimální. Jednou z možností jak snížit podíl NO_x u naftových motorů je přivést výfukové spaliny zpět do spalovacího prostoru (technologie EGR), popř. uplatnit systém selektivní katalytické redukce.

Systém SCR (rozšířený hlavně u nákladních vozidel a diesellových lokomotiv) využívá k dodatečnému štěpení oxidů dusíku (NO_x) chemickou reakci mezi spalinami a roztokem močoviny (aditivum AdBlue), injektovaným do horkých spalin výfukového potrubí.

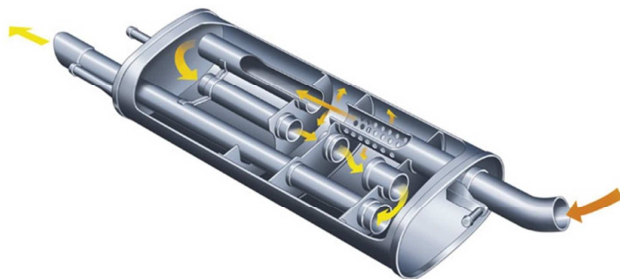


Obrázek 2—4: Systém selektivní katalytické redukce (SCR) [86]

Působením tepla nejdříve dochází k rozkladu směsi AdBlue (močovina s vodou), čímž vzniká amoniak (NH_3) a oxid uhličitý (CO_2). Amoniak následně reaguje s oxidy dusíku ze spalovacího procesu a mění je na dusík (N) a vodní páru vycházející z výfuku. [31]

2.1.2 Redukce hluku vyvolaným motorem

K účinnému snížení hluku z pohonné jednotky přispívá několik výfukových tlumičů (obvykle dva nebo tři ve výfukové soustavě vozidla). Vnitřní uspořádání tlumiče je provedeno systémem přepážek a komor, mezi kterými proudí perforovaným potrubím spaliny. Výfukové plyny procházející tímto labyrintem snižují svoji rychlost a akustické vlny tak ztrácejí na intenzitě. [32]



Obrázek 2—5: Proudění spalin výfukovým tlumičem [87]



Obrázek 2—6: Vnitřní uspořádání tlumiče [88]

2.1.3 Redukce hluku z pneumatik

Konstrukční provedení „tichých“ pneumatik je možné realizovat za pomoci speciální polyuretanové pěny, umístěné z vnitřní strany běhounu. Tato úprava přináší redukci hluku hlavně pro posádku vozidla. [33]



Obrázek 2—7: Pneumatika s protihlukovou úpravou [89]

Vnější vyzařovaný hluk lze potlačit použitím směrových běhounů bez uzavřených prostor v kombinaci s nepravidelně uloženými bloky různého tvaru. Efekt těchto možností je dále umocněn použitím měkké gumové směsi. [21]



Obrázek 2—8: Pneumatika Hankook Ventus V12 evo [90]



Obrázek 2—9: Dezén pneumatiky Yokohama ADVANdB (decibel) [91]

Na obrázcích jsou patrné drážky, které neprocházejí k vnější straně pneumatiky a tím zamezují bočnímu unikání vzduchu (a zároveň hluku) do okolního prostředí.

2.2 DOPRAVNÍ INFRASTRUKTURA

Také složení a technický stav dopravní infrastruktury ovlivňuje výslednou produkci hluku. Důležité však je na tento problém pohlížet komplexně - tedy nezaměřovat se výhradně na provedení a materiálové složení pneumatik, ale především právě na jejich styk s povrchem vozovky.

2.2.1 Složení vozovkových krytů

Snižování hluku prostřednictvím speciálních směsí se projeví především u komunikací s rychlostí nad 50 km/h (při nižších rychlostech převládá hluk motoru vozidla). Z hlediska použití asfaltových krytů velmi dobré protihlukové vlastnosti vykazuje drenážní asfalt.

Drenážní asfalt (PA) se primárně využívá pro účinný odvod srážkové vody z povrchu vozovky, kdy je póry přivedena na nepropustnou vrstvu a dále pomocí drenáže mimo silnici. Tento druh asfaltu je charakterizován svojí vysokou mezerovitostí – až 28 % (převážně je složen z velké frakce kameniva), čímž se ve struktuře vytváří póry, které jednak pohlcují zvukové vlny a dále umožňují odcházení stlačovaného vzduchu. [34]

Nejmenší produkci hluku jednoznačně vykazují asfaltové směsi modifikované pryžovým granulátem z recyklovaných pneumatik. Tento způsob pochází z USA a jeho první použití se datuje do období 60. let 20. století. Pryž v asfaltové směsi díky své elasticitě pozitivně ovlivňuje adhezní vlastnosti vozidla a dále je účinná v pohlcování akustického vlnění, které lze zredukovat až o 12 dB oproti běžnému krytu. V kontextu s ČR je však tento způsob málo rozšířený. [35]

Nevýhodu moderního složení vozovek lze předpokládat ve vysoké pořizovací ceně související s použitými materiály a technologií pokládky asfaltové vrstvy. Takto vynaložené náklady se však navrátí v podobě úspory za výstavbu neestetických protihlukových stěn a valů, které již nebudou mít v budoucnu opodstatnění. Použití méně hlučných povrchů silnic by mělo být prioritně realizováno na vytížených infrastrukturách v blízkosti zástavby.

2.3 SYSTÉMY ŘÍZENÍ DOPRAVY

Na základě snahy snížit jízdní dobu a tím i produkci emisí byly vyvinuty systémy založené na včasném upozornění všech účastníků provozu. Kongesce jsou nejčastěji způsobeny vlivem nečekaných událostí (nehoda, povětrnostní podmínky atd.) popř. jde o opakovaný jev způsobený nedostatečnou kapacitou komunikací.

Optimálním řízením dopravního proudu se zajišťuje plynulý pohyb vozidel v intravilánu. V současné době se k řízení dopravy využívají hlavně telematické systémy a to prostřednictvím:

- *Zastavováním vozidel (SSZ)*
- *Změnou parametrů dopravního proudu*
- *Změnou směru dopravního proudu [64]*

Výsledkem správně fungujícího řízení dopravy následně je:

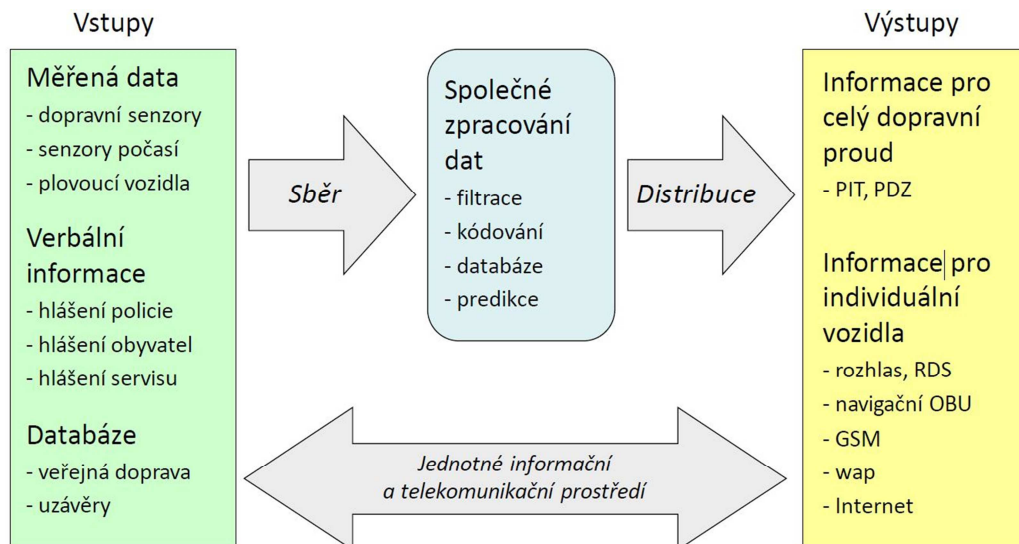
- *Zkrácení doby jízdy (při dodržování pokynů a doporučení) za současného zvýšení bezpečnosti provozu*
- *Snížení spotřeby paliva (a tedy i produkce exhalací)*

2.3.1 Dopravně – informační systémy (DIS)

Principem činnosti DIS je nepřetržitý sběr dat o nestandardních událostech na dopravních infrastrukturách (rozličná omezení, dopravní nehody atd.). Tato činnost je zajištěna jak účastníky provozu, policií tak i dopravními senzory.

Data jsou shromažďována v dopravních informačních centrech (DIC). Po odfiltrování případných chyb a zpracování, je důležité zajistit jejich včasnou a spolehlivou distribuci řidičům. To může být zajištěno dvěma způsoby:

- *Hromadně* -> *Proměnné dopravní značení (PDZ), zařízení pro provozní informace (ZPI)*
- *Individuálně* -> *RDS-TMC, GSM, internet [64]*



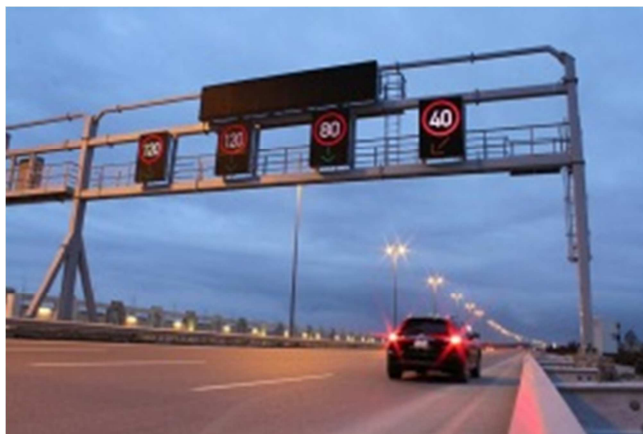
Obrázek 2—10: Princip činnosti DIS [92]

2.3.2 Proměnné dopravní značení (PDZ) a zařízení pro provozní informace (ZPI)

ZPI řidičům zobrazuje informace o aktuálním stavu dopravy prostřednictvím textu na tabuli (panelu), umístěné nad nebo vedle komunikace. Formou piktogramu proměnného dopravního značení (PDZ) jsou řidiči upozorňováni na druh vzniklé komplikace v provozu. Systém hlavně funguje ve spolupráci s liniovým řízením dopravy (viz. níže), ale je možný i samostatný provoz varovných proměnných značek. [36]

Zobrazované informace lze rozdělit do čtyř základních skupin:

- *Předem plánované události (uzavírka, opravy a údržba komunikace)*
- *Nepředvídatelné situace (nehoda, překážka provozu, odstavené vozidlo, atd.)*
- *Vliv povětrnostních podmínek (vítr, viditelnost, srážky, sjízdnost)*
- *Zvýšené intenzity provozu (silný provoz, tvorba kolon) [36]*

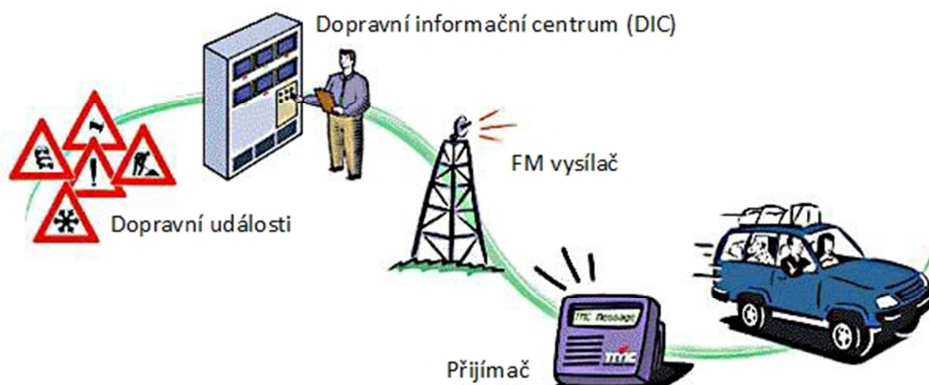


Obrázek 2—11: Proměnné dopravní značení [93]

V klidových situacích jsou na tabulích uvedeny odhady dojezdových časů do vybraných cílů na trase (travel time).

2.3.3 RDS-TMC

Zástupcem přenosu dopravních informací pro jednotlivá vozidla je systém RDS – TMC. Přenos informací je realizován v zakódované podobě prostřednictvím datového kanálu (RDS), který je přenášen v rámci FM vysílání.



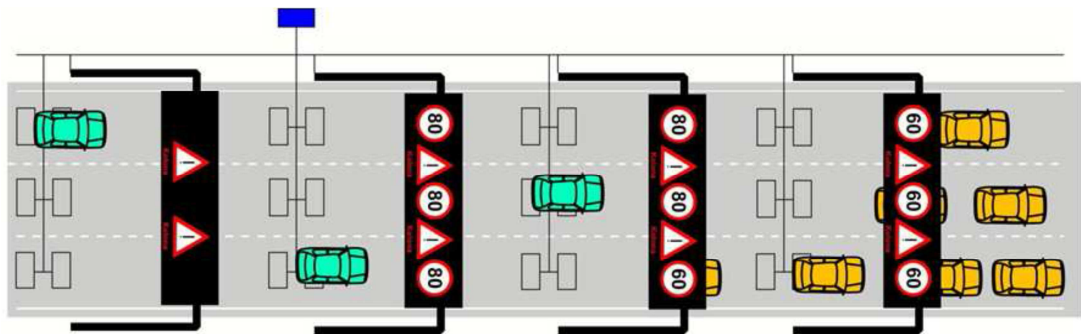
Obrázek 2—12: Princip činnosti RDS – TMC [94]

Satelitní navigace v automobilu, doplněná o anténu pro příjem FM vysílání, tato data přijme a zobrazí. Výpočetní systém aktivně přiřazuje vozidlům optimální trasu a doporučení na základě aktuální dopravní situace. Řidič je tak v reálném čase informován o veškerých závažných událostech, které se na jeho trase momentálně vyskytují, a může na ně reagovat dle svého uvážení resp. využít nabízenou objízdnu trasu. [37]

2.3.4 Liniové řízení provozu

System je tvořený portály (v rozestupu cca 1200 m) s proměnným dopravním značením, umístěnými nad komunikací. Zpravidla je tento systém zaveden na vytížených městských okruzích, magistrálách a dálnicích, popř. u vjezdů do tunelů.

Účelem liniového řízení dopravy je na základě shromážděných dat z DIC postupně snižovat rychlost vozidel či vozidla směřovat do vybraných jízdních pruhů pro zachování plynulosti dopravního proudu. Nižší rychlost v případě vysoké intenzity vozidel zároveň umožní bezpečně kratší rozestupy mezi nimi, čímž dojde ke zvýšení propustnosti komunikace. [38]



Obrázek 2—13: Liniové řízení dopravy [95]

Nedílnou součástí portálů jsou detektory (senzory), shromažďující následující údaje:

- *Počet a rychlost vozidel (obsazenost)*
- *Intenzita dopravního proudu*
- *Skladba dopravního proudu*

Shromážděná data z detektorů jsou vyhodnocena a předána řidičům prostřednictvím PDZ popř. ZPI.

Výhody liniového řízení dopravy:

- *Zvýšení propustnosti komunikace (nejlepší výsledky při rychlosti vozidel cca 80 km/h)*
- *Zajištění harmonizace dopravního proudu -> snížení rizika dopravních nehod*
- *Plynulost dopravy -> snížení dopadů na životní prostředí*
- *Snížení pravděpodobnosti tvorby kongescí*
- *Zkrácení jízdních časů [65]*

2.3.5 Zelená vlna

K zajištění plynulosti dopravy ve městech se s úspěchem využívá sladění signálních programů sousedních řadičů SSZ. Pokud řidiči dodržují stanovenou rychlost tak na všech světelných křižovatkách zapojených do koordinace vždy zastihnou signál „volno“ (odtud termín „zelená vlna“). [39]

Při zavádění koordinace je vhodné v dané lokalitě zvážit složení dopravního proudu (nákladní vozidla), velká stoupání, malé poloměry směrových oblouků a úzké jízdní pruhy. Tyto faktory totiž vedou ke snižování rychlosti jízdy.

2.4 NÁSLEDNÁ OPATŘENÍ

Následnými opatřeními se rozumí zavádění jistých provozních omezení pro řidiče. Pokud by nedocházelo k produkci emisí z dopravy, tak by jejich zřizování bylo bezpředmětné. Mezi standardně využívané prostředky například patří výstavba protihlukových stěn a valů a různé metody zklidňování dopravy (obytné a pěší zóny, zóny 30). Níže popsané způsoby znázorňují vybraná inovativní řešení pro dopravu ve městech.

2.4.1 Vyhrazený jízdní pruh

Pro prostředky MHD jsou na vybraných frekventovaných komunikacích vyhrazené jízdní pruhy. Jejich účelem je v kombinaci s dalšími prvky preference hromadné dopravy zamezit zdržení vozů MHD v kongescích tvořených ostatními vozidly. Tímto způsobem je zajištěna plynulost jízdy a relativně přesné dodržování jízdních řádů, čímž se zvyšuje atraktivnost MHD pro cestující.

Ve velkých světových městech (zejména v USA, v Austrálii a omezeně i v Evropě) se dokonce využívá jízdní pruh vyhrazený pouze pro osobní vozidla s vícečlennou posádkou (dvě a více osob). Tyto pruhy jsou označovány jako „HOV“. Jedná se o zajímavý benefit, který zajišťuje výrazné zrychlení přepravy a tím i snížení spotřeby paliva (-> nižší produkce škodlivých látek, které jinak souvisí s jízdou v kolonách). Speciální pruh zajistí i bezproblémový průjezd vozidlům s právem přednosti v jízdě (HZS, RZS, policie).

2.4.2 Omezení vjezdu do vybraných zón

Tato myšlenka je založena na radikálním snižování množství vozidel především ve vnitřních částech měst. Tzv. nízkoemisní zóny jsou definované lokality, do kterých je omezen vjezd vozidel způsobujících větší znečištění, resp. povolen vjezd vozidlům, jejichž emise nepřesahují limitní úrovně. Jako omezující kritérium se tedy nabízí využít znalost množství produkovaných škodlivých látek (exhalací) vozidla, což zohledňují různé úrovně EURO normy. Na základě splnění těchto norem bude řidičům vydána příslušná tzv. emisní plaketa (plakety budou barevně rozlišeny dle ekologické náročnosti vozidla).

V kompetenci zastupitelů měst je vymezení území nízkoemisní zóny a rozhodnutí jak přísnou emisní normu ve vybraných lokalitách zavedou. Pokud by závazně zvolili striktnější limity, tak vzhledem k vysokému stáří automobilů, bude mít spousta řidičů vjezd do centra města znemožněn.

2.4.3 Carsharing

V poslední době je často zmiňován termín „carsharing“ tedy sdílení aut více uživateli. Carsharing představuje zajímavou alternativu k pronájmu nebo k vlastnictví automobilu. Princip fungování tohoto systému je založen na postupném a předem naplánovaném předávání vozidel mezi žadateli, kteří si je však musí včas rezervovat na požadovanou dobu. Služba je určena především těm řidičům, jejichž měsíční kilometrový nájezd je malý a potřeba vozu pouze občasná. Důvodem, proč se myšlenkou carsharingu velká města začala zabývat, je enormní hustota automobilů v ulicích.

Konkrétně v Praze se od roku 1990 do roku 2012 zvýšil počet vozů z 336 000 na téměř 953 000. Hlavní město tak počtem aut na obyvatele předstihlo i nejmotorizovanější západoevropská města. [40]

3 ALTERNATIVY V DOPRAVĚ

Alternativy k zavedenému standardu v dopravě mají především ekonomický a ekologický význam a dělí se na dvě hlavní oblasti:

- *Alternativy ke způsobu **pohybu** dopravních prostředků*
- *Alternativy ke způsobu **pohonu** dopravních prostředků*

3.1 ALTERNATIVY POHYBU DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ

Konvenční způsob **pohybu** pozemních dopravních prostředků je odvalování kola po vozovce, popř. po kolejnici.

Níže uvedené alternativy najdou uplatnění hlavně ve specifických aplikacích.

- *Odvalování pásů* – využití především u sněžných či vojenských vozidel (rolby, tanky)
- *Pohyb třením* – využití nízkého součinitele smykového tření povrchu (sněžné skútry)
- *Bezkontaktní levitace* – využití magnetického pole u vlaků Maglev
- *Spirální pohyb* – kola vozidel jsou nahrazena podélně umístěnými šroubovicemi
- *Kombinace speciálních pohybů* – hlavně u experimentálních vozidel, např. sněžné sáně Tatra V855

3.2 ALTERNATIVY Pohonu DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ

Konvenční způsob **pohonu** dopravních prostředků je čtyřdobý spalovací motor využívající **benzín** či **naftu**.

Hlavním důvodem vývoje alternativních pohonů pro dopravní prostředky je snaha o omezení závislosti na neobnovitelných fosilních palivech a to především ze dvou důvodů:

- 1) Nelze přesně předpovědět zbývající světovou zásobu ropy, odkud plyne i cena paliv založených na její bázi (benzín a nafta).
- 2) Se spalováním ropných látek souvisí problematika ekologické zátěže životního prostředí.

Mezi hlavní alternativy pohonu lze zahrnout:

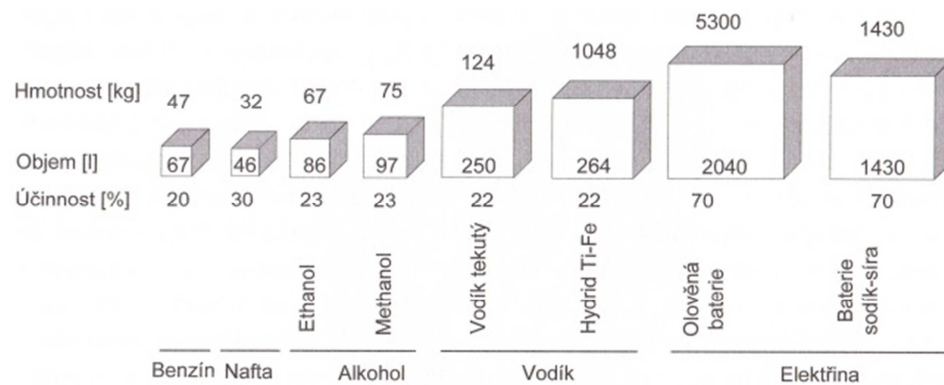
- *Alternativní paliva*
- *Elektrický pohon*
- *Vodíkový pohon*
- *Hybridní pohon*

3.2.1 Alternativní paliva pro spalovací motory

Předně je důležité vysvětlit, proč jsou konvenční pohonné hmoty stále oblíbené a proč nedošlo k plošnému zavedení alternativních paliv již dříve.

Proces výroby benzínu a nafty z ropy je po několik desetiletí zavedený a vyzkoušený a vzhledem ke kapalnému stavu je možná jejich snadná přeprava (ropovody, cisterny).

Z pohledu řidičů jde především o důvěru v běžná paliva. Plnění nádrží automobilů deriváty z ropy je díky velkému počtu výdejních míst dostupné a rychlé. Zároveň energie uložená v těchto palivech poskytuje v porovnání s ostatními druhy pohonů delší ujetou dráhu na jednotku objemu paliva. [2],[5]



Obrázek 3—1: Hmotnostní a prostorové porovnání nádrží různých druhů energie vztažené k dráze ujeté s 55 l benzínu [96]

Výhodou dodatečného použití alternativních paliv je skutečnost, že není nutné provádět výrazné konstrukční zásahy do stávající pohonné jednotky. Jde především o změny v palivovém systému (úpravy vstřikování, doplnění ovládacích ventilů, popř. další nádrže). Největším benefitem je nižší produkce škodlivých látek během jejich spalování při zachování dostatečné energie a nízká cena paliv.

K plošnému rozšíření alternativních paliv, je však nutná informovanost řidičů a zajištění jejich dostupnosti v podobě vybudování husté sítě čerpacích stanic.

Každý druh paliva je definován základními charakteristikami, popisující jeho vlastnosti:

- **Spalné teplo** – je definováno množstvím uvolněné energie při dokonalém spálení jednotky paliva (1 kg popř. 1 l) za konstantního tlaku. Předpokládá se, že voda vzniklá reakcí i původně obsažená v palivu je v kapalném stavu.
- **Výhřevnost** – lze popsat jako spalné teplo zmenšené o výparné teplo vody vzniklé během hoření paliva (voda je uvažována v plynném stavu). Hodnota výhřevnosti je tedy vždy nižší než hodnota spalného tepla.
- **Oktanové číslo** - udává odolnost paliva proti detonačnímu spalování během stlačení ve válci.
- **Hustota látky**
- **Viskozita látky**
- **Chemické složení**
- **Charakteristické teploty**
 - o teplota tuhnutí
 - o teplota vzplanutí
 - o teplota hoření [3]

Biogenní paliva

Jde o paliva, která mají původ v biomase. Biomasou se rozumí hmota rostlinného původu, která je prostřednictvím dalšího zpracování popř. chemických dějů transformována na zdroj energie. Tato paliva mohou být různého skupenství – pevná, kapalná, plynná. V souvislosti s pohonnými hmotami vozidel se především jedná o kapalnou formu (bionafta, bioethanol, methanol) nebo plynou formu (bioplyn). Mezi nejčastější výchozí suroviny patří olejnin, obiloviny, cukrová řepa a třtina, brambory, kukuřice, a odpadní biomasa jako jsou zbytky z rostlinné výroby. [2],[3]

Kvalita biopaliv musí vyhovovat příslušným normám odpovídajícím konvenčním motorovým palivům.

Klíčovou vlastností těchto látek je jejich neropný původ a možnost obnovy. Z pohledu globálního dopadu je spalováním biopaliv produkováno méně skleníkového plynu CO₂ (-> až o 70 %). Nicméně některé studie uvádějí vysokou produkci oxidů dusíku.

Velkým benefitem pro řidiče je zejména výsledná cena biopaliv, ta je vzhledem k současné nulové spotřební dani (stav k 04/2015) o poznání nižší než v případě benzínu či nafty. Samotný proces pěstování a zpracovávání energetických plodin je totiž finančně náročný a bez daňové podpory ze strany státu by tato paliva nebyla příliš konkurenceschopná.

Do roku 2020 musí Česká Republika, stejně jako ostatní země Evropské Unie, dosáhnout deseti procentního podílu biopaliv na celkové spotřebě pohonných hmot. V roce 2013 se v ČR prodalo 257 milionů litrů bionafty a jen 14 milionů litrů E85, což je v porovnání se sedmi miliardami litrů běžných pohonných hmot stále velmi malé množství. [41]

Níže podrobněji rozvádím dvě v současné době nejpoužívanější biogenní paliva. Alternativou pro vznětové motory je bionafta a v případě zážehových motorů pak bioethanol.

Bionafta (MEŘO)

Čistá bionafta (B100) je alternativní palivo založené na základě metylesterů nenasycených mastných kyselin rostlinného původu. Jedná se o čistou nažloutlou kapalinu bez mechanických nečistot, považovanou za ekologickou náhradu motorové nafty. V souvislosti s ČR se nejvíce používá metylester řepkového oleje – MEŘO (v Americe pak především produkty ze sóje). Při výrobě MEŘO jsou jako vstupní suroviny použity olejnaté plodiny, především slunečnice a řepka. K produkci 1000 kg bionafty (880 litrů) je zapotřebí asi 2,5 tuny řepky. Celý proces je složen z lisování semen, filtrování a následné chemické reakce oleje, metanolu a katalyzátoru na methylester a glycerin. [42],[44]

POZN.: Čistý rostlinný olej získaný extrakcí nebo lisováním lze použít jako palivo ve vznětových motorech přímo bez dalších úprav, problémem ale bývají jeho špatné vlastnosti (vysoká viskozita, špatná stabilita a nízké cetanové číslo).

V porovnání s motorovou naftou dochází při spalování bionafty k produkci menšího množství emisí nespálených uhlovodíků. Zároveň také MEŘO neobsahuje síru, čímž se předchází vzniku oxidů síry SO_x , které jsou příčinou kyselých dešťů. Dále bionafta není toxická, neobsahuje těžké kovy ani žádné škodlivé látky. Její vysoká mazací schopnost snižuje opotřebení naftového motoru a prodlužuje životnost vstřikovacích čerpadel. [42]

Jednou z hlavních nevýhod bionafty je však energetická náročnost celého výrobního procesu a také vysoká produkce skleníkových plynů během její výroby. Při kontaktu bionafty s vodou

(např. ze vzdušné vlhkosti) vznikají mastné kyseliny způsobující korozi v potrubí a jsou agresivní vůči běžným nátěrům a pryžím (nebezpečí pro hadice, těsnění atd.). V provozu se projeví její nižší výhřevnost poklesem výkonu motoru a vyšší spotřebou (cca o 8 – 10 %). V zimním období může nastat problém s jejím zamrznutím (odolává pouze teplotám do cca -10 °C). [42]

Další možností je použití směsné motorové nafty (SMN 30), která obsahuje pouze 30 % bionafty a zbytek tvoří motorová nafta. Na rozdíl od čisté bionafty (B100) je možné ji využít ve většině dieslových motorů, bez rizika ztráty záruky od výrobce vozidla. Při použití vyšší koncentrace bionafty jsou nutné úpravy motoru (palivová řídicí jednotka). [43]

V současné době musí výrobci paliv (dle nařízení EU) přidávat minimálně 6 % bionafty do veškeré běžné motorové nafty.

Bioethanol

Další ze skupiny biopaliv je ethanol. Jedná se o bezvodný alkohol vyrobený z plodin s dostatečným množstvím cukrů (cukrová řepa, brambory atd.). Jako konkrétní výchozí produkty jsou používány plodiny, které je možné pěstovat v zemi, kde následně probíhá výroba bioethanolu. Podstatou výroby ethanolu je získání cukru ze surovin a následné alkoholové kvašení za působení kvasinek. Vzniklá zápara se poté destiluje a tím se dosáhne 96 % lihu v roztoku. Vedlejším produktem destilace jsou lihové výpalky, které naleznou uplatnění v podobě krmiv či hnojiva. Pro další zvýšení lihovitosti je nutné prostřednictvím molekulových sít odstranit vodu, tak se dosáhne téměř stoprocentního lihu. [44]

Tabulka 3—1: Produkční potenciál výroby bioethanolu z různých plodin (Cukr-listy.cz)

Surovina	Produkce bioethanolu [l/t]	Surovina	Produkce bioethanolu [l/t]
Kukuřice	360	Cukrová třtina	70
Rýže	430	Cukrová řepa	110
Ječmen	250	Brambory	110
Pšenice	110	Batata	125
Sladký čirok	60	Cassava	180

V případě výroby ethanolu z obilí (např. pšenice, triticales a kukuřice), tedy surovin bohatých na škrob, předchází kvašení další úprava. Ta spočívá v přeměně škrobu na sacharidy za působení enzymů mikroorganismů. Další průběh výroby je již totožný s výše uvedeným.

Výhodou použití bioethanolu v zážehových motorech je vyšší oktanové číslo, nižší náklady na výrobu paliva, ale hlavně díky zvýšenému obsahu kyslíku v ethanolu při spalování vzniká až o 70 % méně škodlivých látek oproti benzínu.

Palivo E 85, které je dostupné asi na stovce benzínových pump v ČR tvoří směs 85 % bioethanolu a 15 % ropného benzínu natural 95 (na zimu se míchá směs E 70 obsahující 70 % lihu a 30 % benzínu). Pakliže by řidič chtěl použít výhradně toto palivo, musí mít k tomu uzpůsobený motor (přidání palivové jednotky k motoru vozidla), v opačném případě je spalována chudá směs, projevující se nestabilním chodem motoru (propad výkonu při akceleraci) a zvýšení teploty spalování (motor je méně chlazen palivem). Příčinou je rozdílný stechiometrický poměr paliv. V případě benzínu je tento poměr 14,7:1 a u lihu 9:1 – je tedy nutné navýšit množství vstřikovaného paliva, čili zajistit bohatší směs. [45]

Bez dodatečných úprav motoru je možné přidat nižší množství bioethanolu do benzínu, nicméně požadovaná ekonomická úspora není tak viditelná jako v případě jízdy pouze na palivo E 85.

Podle zákona musí být v běžném benzínu minimálně 4,1 % bioethanolu (norma připouští až 10 % obsahu ethanolu).

LPG

Velmi oblíbenou alternativou ke konvekčním palivům je zkapalněný ropný plyn – LPG. Jedná se o směs plynů – propanu a butanu, které se mimo jiné používají v tlakových nádobách např. k vytápění či vaření. Jeho klíčovou vlastností pro řidiče je především jeho nízká cena (není zatíženo vysokou spotřební daní, jako je tomu v případě benzínu). Dále pak hustá síť čerpacích stanic, nízká cena přestavby (úpravy) vozidla a ekologická nenáročnost. Kvalitní LPG totiž obsahuje malé množství uhlovodíků a mnohem méně síry než benzín -> nižší produkce oxidu siřičitého (SO₄). LPG má v porovnání s benzínem a naftou vyšší hmotnostní výhřevnost - až 46,4 MJ/kg oproti hodnotám 43,5 MJ/kg resp. 42,5 MJ/kg. Nicméně jeho objemová výhřevnost je nižší a tomu odpovídá i vyšší spotřeba plynu při zachování stejného kompresního poměru. [2],[3]



Obrázek 3—2: Nádrž LPG [97]

Velkou nevýhodou a to především v souvislosti s městským provozem je zákaz vjezdu vozidel s LPG pohonem do podzemních garáží (na rozdíl od CNG). Důvodem je hustota této směsi, která je větší než hustota vzduchu, proto se v případě jeho úniku kumuluje při zemi a tvoří tak výbušnou směs.

Zemní plyn

Zemní plyn je další energetickou alternativou k benzínu či naftě. Jedná se však (stejně jako ropa) o neobnovitelnou surovinu, nicméně s mnohem většími zásobami. Zemní plyn je především tvořen základním uhlovodíkem - metanem CH_4 (až 98 %). Metan není toxický, takže při jeho spalování je životního prostředí zatěžováno mnohem méně než v případě spalování benzínu či nafty. Dokonce lépe vyhovuje i z hlediska množství oxidu uhličitého CO_2 při spalování. Světové zdroje metanu jsou obrovské a pro tyto energetické účely není potřebné jeho další zpracovávání. Tím se pořizovací cena množstevní jednotky plynu v součinnosti s nízkou spotřební daní, garantovanou do roku 2020, dále snižuje. [2],[46]

CNG

Vozidla uzpůsobená na provoz stlačeným zemním plynem – CNG mají tlakovou tlustostěnnou nádobu, umožňující bezpečné uložení plynu. Na rozdíl od LPG je CNG do vozidla ukládáno v plynné formě, prostřednictvím vícestupňového kompresoru. Hodnota tlaku 20 MPa zajistí potřebné množství uložené energie a tím i praktický dojezd. Velmi příznivé jsou provozní náklady, které odpovídají pouze asi polovině ceny benzínu (cena 1 m^3 CNG, energeticky odpovídající zhruba 1 l benzínu, je k 08/2015 asi 18 Kč). [46]

Nutností jsou však vysoké počáteční výdaje za dodatečnou přestavbu palivové soustavy a doplnění dalšího technického vybavení jako je řídicí jednotka a elektroinstalace. CNG je šetrné k životnímu prostředí – jeho spalování splňuje emisní normu EURO 5.



Obrázek 3—3: Nádrž CNG [98]

Omezení při používání CNG jako alternativního paliva je malá síť čerpacích stanic, nepatrné snížení výkonu vozidla a zmenšení zavazadlového prostoru z důvodu zástavby hmotných a rozměrných tlakových nádrží (nesmí se používat nádrž toroidního tvaru místo rezervy jako v případě LPG). Nádrž podléhá pravidelným ročním kontrolám, aby se předešlo možnému unikání plynu a dle legislativy je každých 5 let nutné provést podrobnou kontrolu (revizi) na mechanický stav nádrže. [47]

LNG

Zkapalněný zemní plyn LNG představuje méně využívanou možnost pohonu vozidel. Tato forma se především používá pro jeho přepravu na dlouhé vzdálenosti (pomocí speciálních tankerů). Lodní přeprava zkapalněného plynu je považována za perspektivní z důvodu obrovských ložisek zemního plynu a úspory nákladů za budování plynovodu.

Majoritní podíl ve složení LNG má stejně jako u CNG metan. Plyn je však v tomto případě ochlazen na teplotu -160 až -170 °C (za normálního tlaku) a tvoří průzračnou, namodralou kapalinu o hustotě $0,4 \text{ kg/m}^3$, která není jedovatá a nezpůsobuje korozi v potrubí. V porovnání s přírodní formou zemního plynu toto skupenství zaujímá asi 600x menší objem (jeho zkapalněním dosáhneme 3x delší ujeté vzdálenosti než v případě CNG při stejném objemu nádrže). Z toho plyne i vysoká výhřevnost, která se přibližuje hodnotě 55 MJ/kg. [2],[48]



Obrázek 3—4: Nádrž LNG [99]

Podmínkou použití tohoto paliva je zajištění kryogenních nádrží, umožňující jeho uchování při velmi nízkých teplotách. Tato potřeba je dána vlastností samotného metanu, jehož teplota varu za atmosférického tlaku je $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oteplování způsobuje jeho zplynování a tak je možné jej v kapalném stavu udržet pouze omezenou dobu (řádově několik dní, v závislosti na kvalitě tepelné izolace nádrže). Nevýhodou je oproti CNG i složitější a nákladnější technologie celého systému (energetická náročnost zkapalňování, plnění vozidel, ventily pro odvod plynu z nádrží, tlakové spínače a regulátory, atd.). [48]

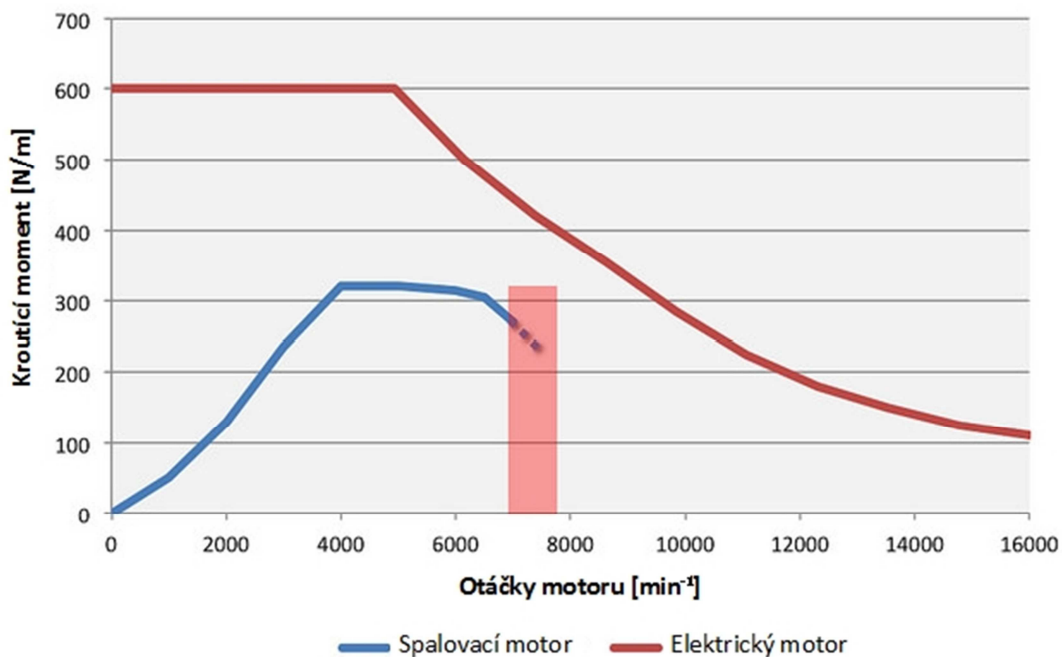
V současné době se technologie LNG (jako pohonná hmota) využívá spíše pro dálkovou nákladní dopravu a uplatnění nachází i v železniční dopravě.

3.2.2 Elektrický pohon

Čistě samotný provoz elektromobilů³ v sobě ukrývá v souvislosti s městským provozem výrazný potenciál. Životní prostředí není zatíženo žádnými přímými emisemi. V případě majoritního zastoupení elektromobilů v dopravním proudu, by odpadla potřeba zřizovaných protiopatření.

Z hlediska přeměny energie je elektromotor v porovnání se spalovacím motorem jednoznačně výhodnější a to z důvodu mnohem větší účinnosti (až 90 %). Konvenční benzínový motor přitom dosahuje pouze účinnosti cca 30 %, v případě naftového motoru je tato hodnota asi 35 %. Elektromotor má dále mnohem příznivější průběh krouticího momentu v celém rozsahu provozních otáček (není nutné používat složitou převodovku). [2]

³ Elektromobil je vozidlo poháněné elektromotorem, napájeným výhradně akumulátory různého provedení.



Obrázek 3—5: Porovnání kroutícího momentu u spal. motoru (Porsche 911) a elektromotoru (Tesla S) [100]

Po konstrukční stránce je elektropohon podstatně jednodušší (nejsou přítomny žádné mechanické prvky, kardan, startér, diferenciál atd.) a má kompaktní rozměry pro zástavbu -> velký prostor pro posádku i zavazadlový prostor.

Pokud ale uvážíme i proces výroby a distribuce elektrické energie, časově náročnější dobíjení akumulátorů a jejich omezenou kapacitu a životnost, malý počet dobíjecích míst a dále i vysokou pořizovací cenu vozidel, zjistíme, že pozitivní vlastnosti elektromobilu nejsou relevantní. Samostatnou kapitolou zůstává řešení ekologické zátěže způsobené vyřazenými akumulátory.

Často zmiňovaným problémem je i extrémní tichost elektromobilu. Mnohdy je to pochopitelně považováno za výhodu, ale především v místech s vysokou koncentrací lidí, a hlavně neslyšících, může dojít k jejich ohrožení. Nicméně ve městě se obvykle vozidla pohybují pomaleji a v některých zemích bude povinností je vybavit zvukovým výstražným zařízením.

V globálním měřítku se výhradně elektrický pohon dosud neseťkal s větším zájmem řidičů a jeho hlavní doménou tak pravděpodobně zůstanou pouze krátké vzdálenosti (např. pohyb po průmyslových areálech či výrobních budovách). Situace by se pravděpodobně změnila s vývojem nových technologií provedení akumulátorů.

Typy používaných elektromotorů

Elektromotory jsou prostředky pro přeměnu elektrické energie na mechanickou práci (v případě rekuperačního režimu je tomu opačně). Fungují na principu silových účinků magnetického pole (vzájemné přitahování a odpuzování elektromagnetů). Konstrukčně se každý elektromotor skládá z elektrického obvodu (vinutí - cívky s izolacemi) a magnetického obvodu (elektricky izolované transformátorové plechy). Základními částmi elektromotoru jsou stator a rotor.

Stator je pevná a vnější část motoru, která představuje magnet popř. elektromagnet.

Rotor je hybná část motoru s magnetickým obvodem, hřídelí a vinutím

V běžném rotačním motoru je umístěn rotor tak, aby magnetické pole vytvářené ve vodičích rotoru a magnetické pole statoru vyvíjely krouticí moment přenášený na rotor stroje.

Stejnoseměrné motory

Jedná se o historicky nejstarší typ motoru. Stator je tvořen dvěma magnety popř. elektromagnety (napájenými ze stejnosměrného zdroje), čímž se vytváří magnetické pole. Rotor elektromotoru je na povrchu opatřen žlábkami, ve kterých jsou natočena vinutí. Tato vinutí jsou vyvedena na komutátor složený z několika navzájem izolovaných lamel, ke kterým přiléhají uhlíky. Připojením uhlíků na zdroj stejnosměrného proudu, vznikne kolem vinutí magnetické pole. Úkolem komutátoru je při každém otočení cívky o 180° měnit směr toku proudu a tím i magnetické póly cívky. To způsobí, že jsou proti sobě vždy části magnetu, které se navzájem odpuzují, cívka se tak roztáčí a motor koná práci.

Nevýhodou tohoto uspořádání je, že se elektrická energie do rotoru přivádí přes soustavu rotujícího komutátoru a sběracího ústrojí (kartáčů), které podléhají opotřebení. [2],[49]

Podle způsobu zapojení vinutí statoru a rotoru rozlišujeme motory:

- *S cizím buzením* -> budící vinutí napájeno s cizího, nezávislého zdroje
- *Derivační* -> budící vinutí připojeno paralelně ke kotvě
- *Sériový* -> budící vinutí v sérii s kotvou
- *Kompaundní* (smíšené buzení) -> část budícího vinutí je derivační a část sériová

Pro účely pohonu vozidel jsou stejnosměrné motory v současné době nahrazovány motory střídavými. Se stejnosměrnými motory se můžeme setkat v tramvajích či trolejbusích.

Střídavé motory

Statorové vinutí je složeno nejméně ze tří svazků, pootočených vzájemně o 120° a napájeno třífázovým střídavým proudem. Toto vinutí způsobuje točivé magnetické pole. Velkou výhodou oproti stejnosměrným motorům je, že obíhajícímu rotoru nemusí být přiveden žádný proud (odpadá vinutí kotvy), neboť ten je vybuzován rotujícím magnetickým polem. Vlivem působení indukovaného proudu působí síly magnetického pole na kotvu (rotor), která se otáčí. Podle toho jestli se rotor otáčí synchronně nebo asynchronně s točivým polem, se střídavé motory dělí na asynchronní a synchronní. Podmínkou v aplikaci střídavých motorů jako pohonu vozidel je použití měniče. Ten slouží k převedení stejnosměrného proudu dodávaného akumulátorem na proud střídavý. [2],[49]

- *Asynchronní motor (nejpoužívanější)*
 - o magnetické pole indukuje v rotoru napětí a vzniklý proud (zpožděný za fázovým napětím o 90°) vytvoří magnetický tok, vyvolávající silové působení na rotor a tím i jeho otáčení.
 - o krouticí moment na výstupním hřídeli je pouze za předpokladu, že rychlost rotace magnetického pole statoru se oproti mechanickým otáčkám rotoru liší (-> tzv. skluz motoru). V případě synchronních otáček motoru se magnetické pole statoru vůči rotoru nepohybuje, tím se v rotoru neindukuje napětí a nevzniká krouticí moment. [2],[49]
- *Synchronní motor*
 - o Rotor se snaží zachovat svoji konstantní polohu vůči otáčivému magnetickému poli (vytvářeným průchodem střídavého proudu ve statoru) a drží se v synchronismu, tedy bez skluzu.
 - o Když se motor zatíží, vzroste vzdálenost mezi póly rotoru a póly s točivým polem. Rotor se pak otáčí s jistým úhlem (úhel zatížení) "za" točivým polem. V případě nadměrného zatížení motor ztratí synchronizaci, skokově klesne výkon a dojde k jeho zastavení [2],[49]

Elektrické akumulátory

Jsou prostředky umožňující přeměnu chemické energie na energii elektrickou a následné uchování elektrického náboje pro pozdější využití.

Na rozdíl od baterií je u akumulátorů možné provést opakované nabití a vybití.

Principem každého článku jsou dvě elektrody tvořené různým materiálem. Kladná elektroda (anoda) i záporná elektroda (katoda) jsou ponořeny v chemickém roztoku (elektrolytu) umožňující jejich vodivé spojení a přenos nabitých částic (elektronů) mezi nimi. Na základě rozdílného elektrického potenciálu elektrod je určeno napětí článku. Jeho obvyklá výše se pohybuje v intervalu 1 – 4 V v závislosti na konkrétním typu článku (použitých elektrod).

Základní charakteristiky elektrických článků:

- *Výkonová hustota [W/kg]* – udává poskytovaný výkon na jednotku hmotnosti -> určení rychlosti a zrychlení vozidla. [2]
- *Energetická hustota [Wh/kg]* – udává obsah energie na jednotku hmotnosti -> určení doby provozu elektromotoru. [2]

Existuje mnoho typů akumulátorů a technologií výroby:

Olověné akumulátory (Pb)

Uplatňují se pro napájení palubní sítě vozidla a hlavně díky schopnosti dodávat vysoké rázové proudy i pro pohon el. startéru motoru. Elektrolyt je tvořen, jednak zředěnou kyselinou sírovou popř. může být ztužený do formy gelu (tzv. gelové akumulátory). Napětí článku odpovídá 2,1 V (akumulátor pro osobní vozidla je složen ze 6-ti sériově spojených článků, -> nominální napětí autobaterie je 12,6 V). Nevýhodou je jeho velká hmotnost kvůli olověným elektrodám a nízká energetická hustota. [2],[50]

Nikl – kadmiové akumulátory (Ni-Cd)

V dnešní době už méně rozšířený typ akumulátoru, především díky obsahu jedovatého kadmia a tendencí k tzv. paměťovému efektu⁴. Dále ve srovnání s Ni-Mh a Li-ion typy má nižší měrnou kapacitu. Charakterizovány jsou však dlouhou životností, spolehlivostí a mechanickou odolností. Dobře snáší i zatížení vysokými proudy a skladování ve vybitém stavu. [2],[50]

⁴ Paměťový efekt je jev, kdy se zkracuje životnost akumulátoru snižováním kapacity, pokud je dobíjen dříve, než je zcela vybit.

Nikl – metal hydridové akumulátory (Ni-Mh)

Tento typ akumulátorů nahradil zastaralou Ni-Cd technologii, která neumožňovala ukládání vyšší kapacity a díky kadmiu byla zdravotně závadná. Hlavní výhodou je skutečnost, že netrpí paměťovým efektem a novější typy mají i malý vnitřní odpor, čili minimální samovybití. Mezi nevýhody se řadí nízké napětí na článek – 1,2 V a nižší klimatická a mechanická odolnost. Technologie Ni-Mh je v hybridních vozidlech zastoupena Toyotou Prius. [2],[50]

Lithium – Iontové akumulátory (Li-ion)

Li-Ion v současnosti představují nejvíce využívané články především v souvislosti s napájením elektroniky (mobilní telefony, notebooky atd.). V závislosti na použité technologii (Li-pol, Li-Fe..) se konkrétní vlastnosti mohou lišit. Obecně jejich oblíbenost spočívá ve vysoké hustotě energie při malé hmotnosti, kompaktních rozměrech a dlouhé životnosti (až 2 000 cyklů). Články také disponují nejnižší úrovní samovybití a nejsou náchylné k paměťovému efektu. Nevýhoda spočívá v omezení velikosti nabíjecího proudu a náchylnosti k podvybití, což má za následek zničení akumulátoru. [2],[50]

Většina dnešních elektrických vozidel je napájena právě tímto druhem akumulátorů z důvodu příznivého poměru kapacita/hmotnost/velikost. Typickým příkladem, využívající technologii Li-ion, je elektromobil Tesla S.

3.2.3 Vodíkový pohon

Vodíkový pohon je považován za technologii budoucnosti. Nedílnou součástí výfukových plynů všech spalovacích motorů je oxid uhličitý, který způsobuje globální dopad na zemi v podobě jejího oteplování. Nulová produkce veškerých škodlivých exhalací včetně CO₂ je hlavní devizou vodíku. Příčinou stále malé rozšířenosti vozidel disponujících vodíkovým pohonem je jeho náročná výroba (v přírodě se jako samotný prvek nevyskytuje) a rozličná technická omezení. Vodík je možné získat prostřednictvím:

- *Výroby z fosilních paliv*
- *Elektrolýzy vody*
- *Extrakce biomasy (především dřevní odpady) [51]*

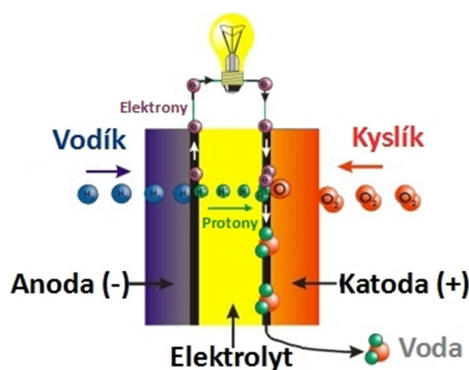
Existují dva rozdílné principy využívání vodíku ve vozidle:

- *Přímé přidávání vodíku do upraveného spalovacího motoru*
- *Palivové články [51]*

Cestou přímého spalování vodíku se například vydala automobilka BMW s prototypem luxusní limuzíny Hydrogen 7. Nicméně tento způsob využití vodíku není příliš rozšířený a pojí se s ním řada problémů spojených se zpracováním, skladováním a tankováním tekutého vodíku, jehož teplota se blíží absolutní nule.

Palivové články

Slibnější jsou ve spojitosti s vodíkem palivové články. Ty fungují podobně jako akumulátory - vyrábějí elektřinu z energie uvolňované při chemické reakci. Palivový článek je tvořen dvěma elektrodami a elektrolytem. Toto uspořádání se nazývá palivová cela (palivové články jsou obvykle tvořeny souborem palivových cel). Výkon palivového článku je dán velikostí povrchu elektrod a počtem cel zapojených v sérii.



Obrázek 3—6: Princip palivového článku [101]

Palivo (vodík) je přiváděno na anodu pokrytou tenkou vrstvou uhlíku a platiny, která slouží jako katalyzátor a způsobuje rozdělení vodíku na kladně a záporně nabitě částice (protony a elektrony). Tenká polymerní membrána (elektrolyt) propouští ke katodě pouze protony. Elektrony jsou nuceny postupovat ke katodě vnějším okruhem, a tím konají práci (výroba elektrické energie). Nakonec se na katodě sloučí protony a elektrony (vzniklé rozkladem vodíku) s kyslíkem, což vede ke vzniku tepla a vytékání vody ze článku. Voda resp. vodní pára je jediným odpadním produktem z vodíkového článku, proto tento způsob přeměny energie nezatěžuje životní prostředí -> nulové emise. Chemická reakce v palivovém článku a tím i výroba elektrické energie probíhá tak dlouho, dokud je přiváděno palivo a okysličovadlo. [52]

Základní princip přeměny energie je pro všechny palivové články stejný. Jednotlivé typy se však mohou lišit materiálem elektrod, použitým elektrolytem, pracovní teplotou a konkrétními chemickými reakcemi na anodě a katodě. V souvislosti s pohonem dopravní techniky má největší význam právě vodíkový palivový článek. [52]

Palivové články se obecně vyznačují vysokou účinností (cca 50 - 75 %). To je docíleno tím, že přeměna energie je přímá – nedochází k vícestupňové transformaci jako např. u spalovacího motoru. [53]

Nevýhodou palivového článku je jeho menší účinnost při větším zatížení, proto je často v hybridních pohonech využíván pro průběžné dobíjení akumulátorů.

3.2.4 Hybridní pohon

Hybridním pohonem vozidel se rozumí využívání alespoň dvou rozdílných druhů pohonů. Kombinací různých technologií lze pokrýt nevýhody některé z nich. V závislosti na podmínkách a stylu jízdy je možné zvolit, jaká pohonná jednotka bude pohyb vozidla obstarávat, popř. lze využít jejich sdružený výkon.

V současné dekádě je nejpoužívanější kombinací spalovací motor s elektromotorem a akumulátorem, čehož je příkladem i první sériově vyráběný hybrid na světě - Toyota Prius.

Díky průběžnému dobíjení akumulátorů prostřednictvím motorgenerátoru poháněného spalovacím motorem není nutné používat rozměrné a těžké bateriové celky s vysokou kapacitou jako v případě elektromobilů. Na druhou stranu hmotnost vozidla naroste právě kvůli přítomnosti více motorů a doplňujícím technickým prostředkům.

K dosažení další úspory paliva u hybridů přispívá i rekuperace kinetické energie během brzdění (systém KERS).

Možné kombinace pohonů hybridních vozidel:

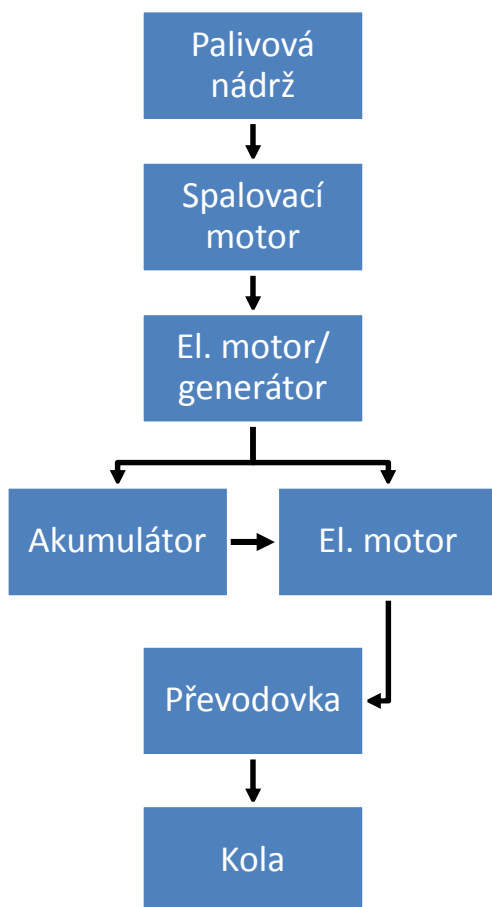
- *Spalovací motor + elektromotor + akumulátor*
- *Spalovací motor + elektromotor + externí přívod elektrické energie (hybridní trolejbus)*
- *Spalovací motor + setrvačnick*
- *Elektromotor + setrvačnick -> tzv. elektromechanická baterie*
- *Elektromotor + akumulátor + palivový článek*

Sériové uspořádání hybridního pohonu

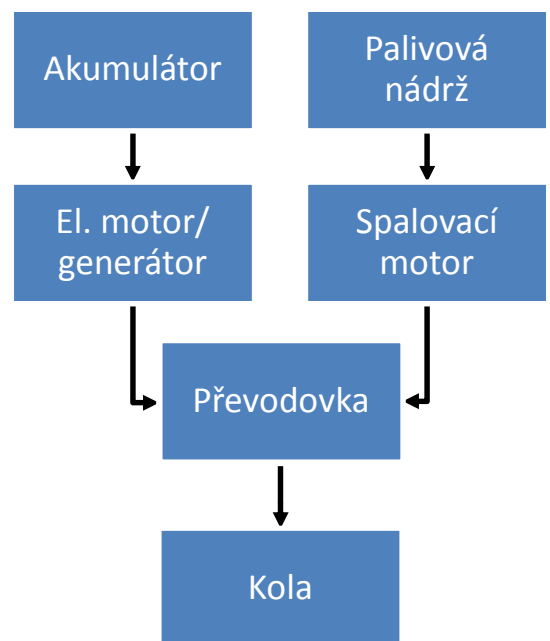
Vlastní pohon vozidla obstarávají pouze elektromotory, odebírající energii z generátoru nebo z trakčních akumulátorů. Jednotlivé prvky jsou uspořádány „za sebou“. Úkolem spalovacího motoru je pouze uvést do pohybu generátor, který produkovanou energii poskytuje elektrickým motorům (v případě nižšího požadavku na výkon vozidla se část této energie ukládá v akumulátoru). [2]

Klíčová vlastnost tohoto uspořádání spočívá v provozu spalovacího motoru v optimálním režimu (úzkém rozsahu otáček) vzhledem k jeho termodynamické účinnosti. Nevýhodou ovšem je vzájemná závislost jednotlivých pohonů a vzhledem k vícenásobné přeměně energie i nižší účinnost systému. [2]

HYBRIDNÍ SÉRIOVÉ USP.



HYBRIDNÍ PARALELNÍ USP.



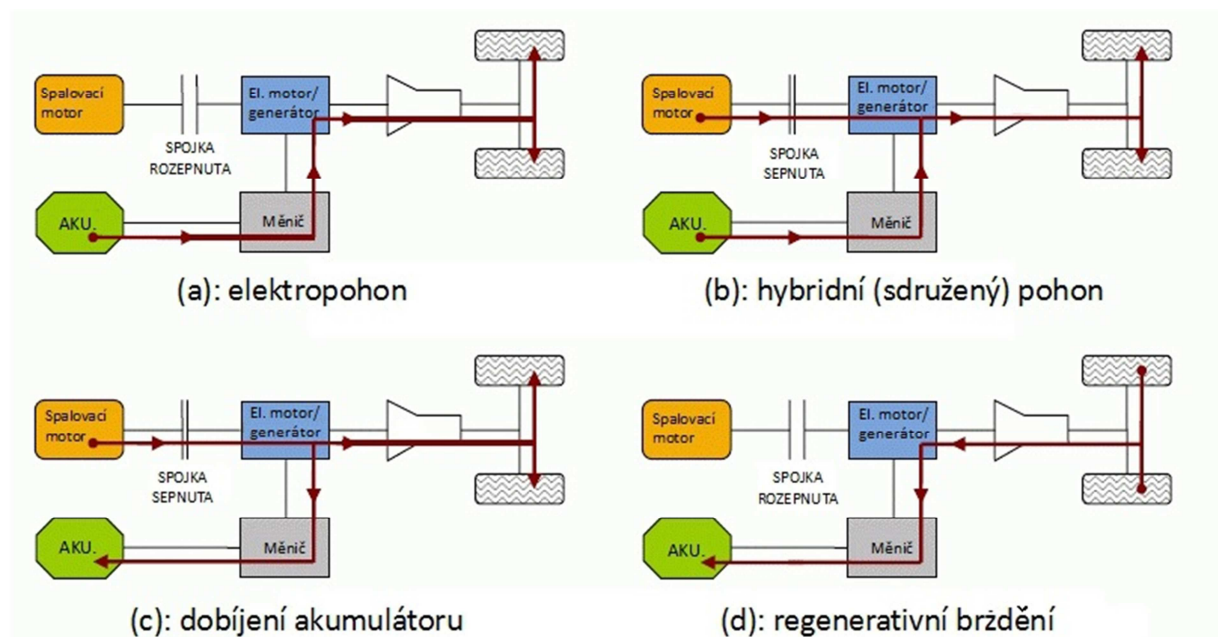
Paralelní uspořádání hybridního pohonu

Většina v dnešní době prodávaných hybridních vozidel je právě v paralelním uspořádání. Předností paralelního uspořádání je vzájemná nezávislost jednotlivých typů pohonů, které jsou spojeny mechanickou vazbou (převodovkou). [2]

V extravilánu výkon obvykle obstarává spalovací motor a v intravilánu pak elektromotor (situace „a“ na obr. 3–7). Stejně jako v případě sériového uspořádání elektromotor funguje i jako generátor elektrické energie pro dobíjení akumulátoru během brzdění (situace „d“) – viz. kapitola *Rekuperace kinetické energie (KERS)*.

Další možná situace – vozidlo je poháněno spalovacím motorem, blíží se průjezd městem a v akumulátoru není dostatek energie pro napájení elektromotoru. Spojka motor/generátoru je sepnuta a generátor průběžně dobíjí akumulátor (situace „c“).

V případě potřeby kratšího intenzivního zrychlení je možné využít i sdružený výkon pohonů (situace „b“).



Obrázek 3–7: Provozní režimy paralelního hybridního pohonu [102]

Rekuperace kinetické energie (KERS)

V hybridních vozidlech se často využívá rekuperace kinetické energie (tzv. regenerativní brzdění). Jedná se o způsob získávání energie během zpomalování vozidel a její dočasné ukládání. Tato energie by se jinak přeměnila na teplo (tření brzd. obložení), což není efektivní.

Krátkodobé ukládání energie je v dopravních prostředcích nejčastěji provedeno dvěma způsoby:

- *Elektricky*
- *Mechanicky*

Akumulace energie v elektrických akumulátorech

Možným příkladem pro osobní automobily je část komplexního systému EfficientDynamics od společnosti BMW. Energie vznikající při brzdění nebo jízdě bez sešlápnutého plynového pedálu je využita pro dobíjení akumulátoru. Jakmile řidič uvolní plynový pedál, zapojí se alternátor, který přeměňuje kinetickou energii vozidla na elektrickou. Pokud je akumulátor plně dobitý, alternátor se od motoru odpojí, což vede k nižšímu zatížení motoru. Výsledkem je tedy vyšší výkon pro akceleraci vozidla a nižší spotřeba paliva. [54]

Systém KERS má od roku 2009 zastoupení i v vozech Formule 1. Důvodem zavedení je však pouze krátkodobé zvýšení výkonu vozů a tím i pozvednutí atraktivity celého závodu. K výrobě elektrické energie pro dobíjení lithiových akumulátorů při brzdění se využívá speciální generátor spojený s hnací hřídelí vozu. V případě potřeby zrychlení, což je iniciováno stisknutím tlačítka na volantu monopostu, generátor funguje opačně (jako elektromotor) poháněný energií akumulátoru. [55]

Jisté omezení může být v technologii použitých akumulátorů. Akumulátory jsou totiž během rekuperace zatíženy vysokým dobíjecím proudem a zároveň musí být schopny tento proud poskytnout při následné potřebě zrychlení.

K plnému využití potenciálu akumulátorů by mohlo případně dojít ve spojení s tzv. superkondenzátory. Ty se vyznačují vysokou kapacitou a dále jsou schopny pokrýt proudové špičky od generátoru. Prostřednictvím řídicí elektroniky by následně umožňovaly dobíjet akumulátory přijatelnými proudy.

Akumulace energie pomocí setrvačnicku

Samotný princip mechanické akumulace energie v dopravních prostředcích není na rozdíl od elektrické varianty výsadou moderní doby. Už v 60. letech minulého století švýcarská společnost Oerlikon vyvinula prostředek hromadné dopravy zvaný „Gyrobús“. Jednalo se

o konstrukčně upravený autobus vybavený ocelovým rotujícím diskem o průměru 1,6 m, hmotností 1,5 t a svislou osou rotace umístěném ve vnitřním prostoru vozidla. Na vybraných zastávkách byly umístěny speciální stanice pro napájení elektromotoru roztácející setrvačnick, čímž dosáhl otáček (cca $3\,000\text{ min}^{-1}$) a z toho plynoucí i velké kinetické energie. Po odpojení od elektrické sítě pracoval motor v režimu generátor (poháněný rotujícím setrvačnickem) a produkoval el. energii pro napájení trakčních elektromotorů. Ty také umožňovaly rekuperaci energie roztáčením setrvačnicku při brzdění vozidla. [56]



Obrázek 3—8: Gyrobus [103]



Obrázek 3—9: Setrvačnick umístěný v prostoru pro cestující [104]

Naakumulovaná energie vystačila na cca 6 km jízdy v závislosti na obsazení (hmotnosti) autobusu. Velkou výhodou bylo ušetření finančních prostředků na výstavbu nevzhledné trolejové soustavy a nulová produkce přímých emisí. Celkově se systém ale neosvědčil z důvodu omezeného vnitřního prostoru vozidla a ztížené ovladatelnosti vlivem gyroskopického efektu, který vyvolával těžký setrvačnick. [56]

V roce 2011 společnost Volvo představila svůj návrh mechanického způsobu rekuperace energie. Hlavním polem působnosti mají být osobní vozidla, kde si za hlavní cíl klade snížení spotřeby pohonných hmot a z toho plynoucí i menší zatížení životního prostředí. Koncepce počítá s kombinací spalovacího motoru, který bude běžným uspořádáním pohánět přední kola vozidla, a setrvačnicku. V případě dostatečného množství uložené energie v setrvačnicku budou přes převodovku s plynule měnitelným převodem (CVT) poháněna zadní kola

a spalovací motor tak dočasně nemusí být v provozu. Nicméně právě převodovka CVT, jejíž hlavním úkolem je roztáčení setrvačnicku při širokém rozsahu rychlosti vozidla a následný přenos uložené energie na kola při akceleraci, může být potenciálním zdrojem poruchovosti systému. [57]



Obrázek 3—10: Prototyp setrvačnickového systému společnosti Volvo [105]

Na rozdíl od minulých dob je nynější snahou konstruktérů hmotnost setrvačnicku snížit, ale zároveň zvýšit jeho otáčky kvůli dostatečné akumulaci energie.

V tomto konkrétním případě systém umožňuje samotný válec z uhlíkových vláken (s ocelovým jádrem) o celkovém průměru 200 mm a hmotnosti 6 kg roztáčet až na $60\,000\text{ min}^{-1}$. Tím se zajistí dodatečné zvýšení výkonu vozidla až o 60 kW po dobu 10 s. [57]

Kvůli požadavku na uchování využitelné energie setrvačnicku po delší dobu, Volvo používá setrvačnickový celek precizně uložený v ložiskách s nízkým odporem a ve vakuu k minimalizaci tření o vzduch. [57]

Celý systém je umístěn v pevné schránce z důvodu zajištění bezpečnosti v případě nehody vozidla.

3.2.5 Porovnání energetické hustoty alternativních pohonů

Energetická hustota je jeden z klíčových parametrů při porovnávání jednotlivých druhů pohonů. Pokud je tato hodnota u pohonné látky vysoká, tak k výrobě požadované energie potřebujeme menší objem paliva. Z opačného pohledu, lze věc vyjádřit jinak. Do určitého objemu dokážeme vměstnat o tolik více této energie, o kolik vyšší je energetická hustota daného paliva. Je tedy zřejmé, že k efektivnímu provozu je výhodné použít palivo s vysokou energetickou hustotou.

Účelem následujícího porovnání má jednak být provedení energetické analýzy používaných paliv v individuální dopravě. Dále chci poukázat na dva zcela, po energetické stránce odlišné zdroje energie pro pohon vozidel – paliva x akumulátory.

Pokud porovnáme konvenční paliva s palivy alternativními po stránce výhřevnosti (energetické hustoty), zjistíme, že hodnoty jsou víceméně podobné alespoň řádem. Pokud však do přehledu zahrneme i energetickou hustotu akumulátorů tak pochopíme hlavní důvod malé rozšířenosti elektropohonu. I přes neustálý technologický vývoj nebyl dosud nalezen způsob jak při kompaktních rozměrech a zároveň nízké hmotnosti článků uchovat v akumulátorech dostatečné množství elektrické energie, které lze snadno a rychle doplnit.

Množství energetické hustoty paliv lze vyjádřit dvěma způsoby. Podle vztahu energie k objemu nebo hmotnosti:

1 J/l (joule/litr) = množství energie uložené v každém litru paliva.

1 J/kg (joule/kilogram) = množství energie uložené v každém kilogramu paliva.

→ Přepočít: $1 \text{ J/l} = 1 \text{ J/kg} \cdot \text{hustota látky}$

V případě akumulátorů se energetická hustota udává v jednotkách **Wh/kg (Watt hodina/kilogram)** popř. **kWh/kg (kilowatt hodina/kilogram)**.

K porovnání paliv s akumulátory na energetické úrovni je třeba uvést vztahy mezi výše zmíněnými jednotkami:

1 Ws = 1 J	1 Wh = 3600 J	1 kWh = 3600 000 J = 3,6 MJ → 1 MJ = 0,278 kWh
------------	---------------	---

Tabulka 3—2: Porovnání energetických hustot [2],[3],[4]

Zdroj energie	Výhřevnost paliva (energetická hustota)			Hustota paliva	Energetická hustota (přepočet)		Oktanové číslo
	[MJ/kg]	[MJ/l]	[MJ/m ³]		[kWh/kg]	[kWh/l]	
<i>Konvenční paliva</i>							
Benzín	43,5	32,2	--	740	12,1	8,9	91-98
Nafta	42,5	35,7	--	840	11,8	9,9	--
<i>Alternativní paliva</i>							
LPG	46,4	25,1	--	540	12,9	7	100-110
CNG	49,5	--	34,2	0,68	12,5	--	120-130
LNG	54,8	22,0	--	0,4	15,2	6,1	120-130
Bionafta B100 (MEŘO)	37,3	32,8	--	880	10,4	9,1	--
Bioethanol (E85)	26,4	21,0	--	790	7,3	5,8	104-109
<i>Li-ion akumulátory Elektromobilu</i>	Energie akumulátoru			Hmotnost			
	[kWh]			[kg]			
Tesla model S	60			550	0,109		
Nissan LEAF	24			294	0,082		

Z uvedeného přehledu je patrné, že oproti akumulátorům ostatní paliva umožňují uchovat až sto a více násobek energie při zachování stejné hmotnosti. Hodnota 60 kWh, která představuje plně nabitý akumulátor elektromobilu TESLA S, energeticky odpovídá pouze asi 5 kg, resp. 6,7 l benzínu v nádrži konvenčního vozidla.

Nicméně srovnávání energie uložené v akumulátorech s výhřevností paliv není úplně objektivní. Velkou roli především hraje účinnost přeměny energie. Ta se u dnešních bezkartáčových elektromotorů blíží 95 %, zatímco spalovací motory dosahují hodnot kolem 30 % (benzínové motory 30 % a naftové 35 %). Další méně rozšířenou informací, je schopnost elektromotoru rekuperovat při brzdění kinetickou energii, ukládanou zpět do akumulátorů ve formě elektrického náboje. Podmínky pro rekuperaci jsou však závislé na stylu a charakteru jízdy a proto její vliv nebude do následujícího výpočtu zahrnut.

V dalším porovnání uvádím základní typy používaných motorů v automobilovém průmyslu a k nim vybraná typická paliva (popř. akumulátory). Ve sloupci „využitelná energie“ je uvedeno skutečné množství kinetické energie získané z kilogramu akumulátorů (popř. z litru paliva) se zřetelem na účinnost jednotlivých druhů motorů.

Tabulka 3—3: Využitelná energie – vliv účinnosti pohonů

Typ motoru	Palivo/typ akumulátorů	Energetická hustota		Účinnost motoru	Využitelná energie	
		kWh/kg	kWh/l		kWh/kg	kWh/l
				[--]		
Zážehový motor	Benzín	12,1	8,9	0,30	3,63	2,67
	LPG	12,9	7	0,30	3,87	2,10
Vznětový motor	Nafta	11,8	9,9	0,35	4,13	3,47
	Bionafta B100	10,4	9,1	0,35	3,64	3,19
Elektromotor	Li-Ion	0,109	--	0,95	0,103	--

Kvůli vysoké účinnosti elektromotoru a naopak nízké účinnosti spalovacích motorů, se citelný rozdíl energetických hustot z minulého přehledu výrazně snižuje. Ovšem i přes tyto skutečnosti činí rozdíl 35-ti násobek ve prospěch benzínu. Čili abych použil analogii k výpočtu bez započítání účinností, tak v tomto případě by 60 kWh energie akumulátoru odpovídala asi 16,5 kg, resp. 22,5 l benzínu.

Pokud uvážíme vozidlo s 50 l nádrží benzínu, tak se započtením účinnosti motoru dosáhneme hodnoty energie 133,5 kWh při hmotnosti cca 37 kg. V případě 550 kg těžkých akumulátorů elektromobilu tato hodnota energie dosahuje asi 57 kWh. Pakliže bychom požadovali energetický ekvivalent k 50 litrům benzínu ve formě akumulátorů, tak by jejich hmotnost činila enormních 1 288 kg.

Závěrem tohoto výpočtu lze konstatovat, že na 1 kWh vykonané energie je zapotřebí asi 275 g benzínu (resp. 375 ml). V případě elektrického pohonu musíme na stejné množství energie zajistit 9,7 kg akumulátorů.

POZN.: V přehledu zároveň byla prokázána i nižší objemová energetická hustota LPG oproti benzínu (kWh/l), což dokazuje i tvrzení z praxe, že jízdou na LPG dosáhneme větší spotřeby paliva. Nepatrně vyšší spotřeba je však v tomto případě plně kompenzována jeho cenou.

3.2.6 Produkce vozidel s alternativním pohonem

V souvislosti s technologickým vývojem a snižováním nároků na spotřebu paliva bylo sestaveno mnoho prototypů od různých výrobců vozidel. Nicméně ne u všech se podařilo vyřešit technické problémy a jen vybrané modely se dostaly do prodeje ke koncovým zákazníkům. Níže uvedený přehled zahrnuje nejúspěšnější vozidla s alternativním pohonem v celosvětovém měřítku.

Toyota PRIUS

Je typickou ikonou v prostředí hybridních pohonů. Na celém světě jich bylo v rámci několika vývojových generací prodáno přes 2,5 mil. kusů, což z ní právem činí nejprodávanější hybrid. V Evropě se prodává od roku 2000 v několika generačních modelech. V roce 2012 vznikla modelová řada PRIUS+, která pojme až 7 pasažérů. Disponuje celou řadou elektronických podpůrných prostředků zvyšující pohodlí a bezpečnost řidiče (adaptivní tempomat, přednázarový bezpečnostní systém, inteligentní parkovací asistent). Veškeré provozní režimy, nastavení a monitorování toků energie jsou zobrazeny na multimediální dotykové obrazovce. [58]



Obrázek 3—11: Hybrid Toyota PRIUS [106]



Obrázek 3—12: Palubní deska Toyota PRIUS [107]

Současná generace vozidla pohon obstarává kombinace spalovacího motoru o výkonu 73 kW a elektromotoru (50 kW). V případě modelu PRIUS akumulátorový systém zahrnuje Niklmetal – hybridový akumulátor o napětí 201,6 V a kapacitě 6,5 Ah. Pokud by si zákazník vybral model PRIUS + tak získá Lithium – iontový akumulátor o kapacitě 5 Ah. Nejvyšší verzí Toyoty PRIUS je tzv. Plug-in Hybrid, umožňující navíc přímé nabíjení akumulátorů z elektrické sítě. Tato verze by se měla do sériové výroby dostat ke konci roku 2015. [58]

Nissan LEAF

V USA a Japonsku byl na trh uveden v roce 2010 a o rok později se dočkali i zákazníci v Evropě. Je považován za vůbec nejprodávanější výhradně elektrické vozidlo (Plug-in). Za čtyři roky se ho po celém světě prodalo 150 000 kusů. Cena vozu se pohybuje kolem 30 000 USD v závislosti na výši poskytované dotace v jednotlivých kontinentech popř. státech. Jeho devizou je vysoká úspěšnost v crash testech organizace EURO NCAP, kde získal 5 hvězdiček. Test probíhal se sériově dodávanou Li-Ion baterií, umístěnou pod zadními sedadly. Původní obavy z jejího možného poškození a tím i ohrožení posádky elektrický proudem, popř. požárem se nepotvrdily. [59]



Obrázek 3—13: Elektromobil Nissan LEAF [108]

Pohon elektromobilu zajišťuje vpředu umístěný střídavý synchronní motor o výkonu 80 kW dodávající krouticí moment 280 Nm, v rozsahu otáček 0 – 10 390 min⁻¹. Přenos výkonu na kola je uzpůsoben pomocí stálého převodu o poměru 7,94. O napájení elektromotoru se stará Lithium-iontový akumulátor kapacity 24 kWh, který mu na jedno dobití zajistí dojezd až 200 km (dle stylu jízdy). Společnost Nissan svým technologiím výroby akumulátoru věří a poskytuje záruku na jejich stav, pokud klesne kapacita během 5 let (popř. za 100 000 ujetých kilometrů) pod určenou mez. [59]

Chevrolet VOLT (GM)

Volt je příkladným zástupcem tzv. sériového hybridního pohonu doplněným systémem Plug-in. Spalovací motor tedy pracuje v optimálních otáčkách a plní funkci pohonu generátoru pro výrobu elektrické energie, následně využité elektromotorem. První generace byla na

Americký trh uvedena na konci roku 2010 (v Evropě je ojedinele k vidění pod názvem Opel Ampera). Pohon se skládá ze 111 kW elektromotoru, a spalovacího čtyřválcového motoru o objemu 1,4 l a výkonu 55 kW. Akumulátor typu Li-Ion má kapacitu 16 kWh a pouze s jeho využitím vozidlo ujede 60 km (stejně jako v případě Nissanu, i Chevrolet poskytuje zákazníkům záruku na stav akumulátorů). Pokud však započítáme i plnou nádrž paliva, celkový dojezd odpovídá cca 550 km. [60]



Obrázek 3—14: Hybrid Chevrolet VOLT [109]

Zavedením druhé generace vozidla (pravděpodobně v roce 2016) dojde k vylepšení v oblasti pohonu a přibude i jedno místo k sezení (na celkových pět). Stávajícímu elektromotoru bude nově sekundovat odlehčený (hliníkový) benzinový motor o zdvihovém objemu 1,5 l produkující výkon 75 kW. Li-ion akumulátory mají kapacitu 18,4 kWh a výrazně menší počet článků. Předpokladem výrobce je dojezd 80 kilometrů pouze na elektrický pohon. [61]

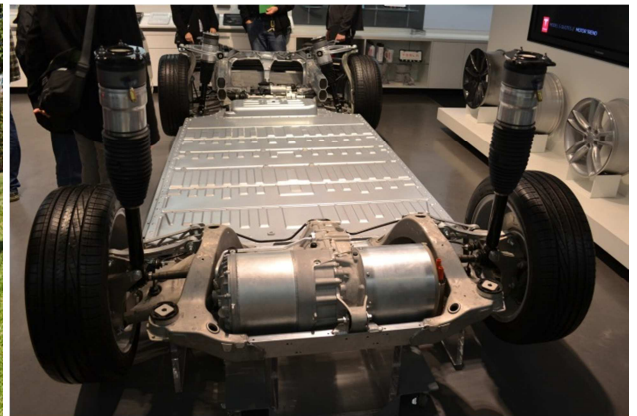
Tesla model S

Tak jako je Toyota Prius považována za nejvyspělejší hybrid, je Tesla S v současné době spojována s dokonalým elektromobilem. Americká společnost Tesla motors, která od doby svého vzniku vyvinula 3 modely (roadster, model X a model S), nemá v porovnání s ostatními výrobci dlouhou tradici. Byla založena teprve v roce 2003 v Americkém Silicon Valley a její specializací jsou výhradně elektromobily. Konkrétně Tesla roadster byl představen již v roce 2008 (šlo o první sériově vyráběný elektromobil). Největší úspěch ale Tesla sklízí s modelem S, jehož prodej byl zahájen v roce 2012 v USA a v průběhu času získal mnoho ocenění, především z oblasti použité technologie, bezpečnosti provozu a ekologie.

V blízké době se očekává i prodej prvního elektrického SUV – model X, který nyní (04/2015) podléhá testování prototypu.



Obrázek 3—15: Elektromobil Tesla S [110]



Obrázek 3—16: Tesla S – detail pohonného ústrojí [111]

Na rozdíl od ostatních vozidel této kategorie si u modelu S může zákazník vybrat elektromotor o různém výkonu a provedení a tím i kapacitu použitého akumulátoru. K dispozici jsou 3 varianty uspořádání pohonných jednotek.

S nejnižší kapacitou akumulátoru (60 kWh) bude dodáván motor o výkonu 225 kW, pohánějící pouze zadní nápravu. Pokud se však kupující rozhodne pro vyšší, 85 kWh verzi tak má možnost volby mezi předchozí motorizací a tzv. duálním pohonem, kde je výkon 225 kW rovnoměrně rozdělen mezi obě nápravy prostřednictvím samostatných motorů.

Nejvýkonnější verze je rovněž vybavena dvěma třífázovými asynchronními motory ale s výkonem 353 kW vzadu a 166 kW vpředu, poskytující krouticí moment až 600 Nm. Tato konfigurace udělí automobilu o celkové hmotnosti 2100 kg (520 kg zaujímá hmotnost akumulátoru) rychlost až 255 km/h. Energie (85 kWh) uložená v lithium – iontových článcích je v porovnání s ostatními elektromobily asi trojnásobná, z čehož plyne i nadstandartní dojezd - až 400 km.

Dle zmíněných velmi atraktivních parametrů lze očekávat i vysokou pořizovací cenu vozidla. Ta je pro Evropský trh stanovena na částku asi 72 000 Euro za nejnižší verzi motorizace. [62]

4 NÁVRH KONCEPTU POHONU VOZIDLA

Cílem této kapitoly je představení a dokázání funkčnosti navrženého inovativního uspořádání pohonu vozidla.

Z široké škály současných hybridních trakcí jsem se zaměřil na podpůrný setrvačnickový pohon, který má dle mého názoru výrazný potenciál. Setrvačnick je zařízení s dlouhou životností a spolehlivostí, nepodléhající žádným ztrátovým přeměnám jako je tomu např. u akumulátorů. Samozřejmostí je i nulové zatížení životního prostředí při provozu.

Setrvačnick, jako krátkodobý akumulátor energie, se používá v situacích s častým zrychlováním a brzděním – typicky ho tedy lze využít při jízdě ve městě. Jedná se o způsob akumulace energie, která v jistém okamžiku přebývá a dala by se využít ve chvílích jejího nedostatku.

Celkově si od systému slibuji alespoň částečné omezení používání spalovacího motoru ve městech z důvodů zmíněných v předchozích kapitolách. Zároveň věřím v jeho relativně jednoduchý princip činnosti, z čehož by měla vyvstat i nízká míra poruchovosti systému.

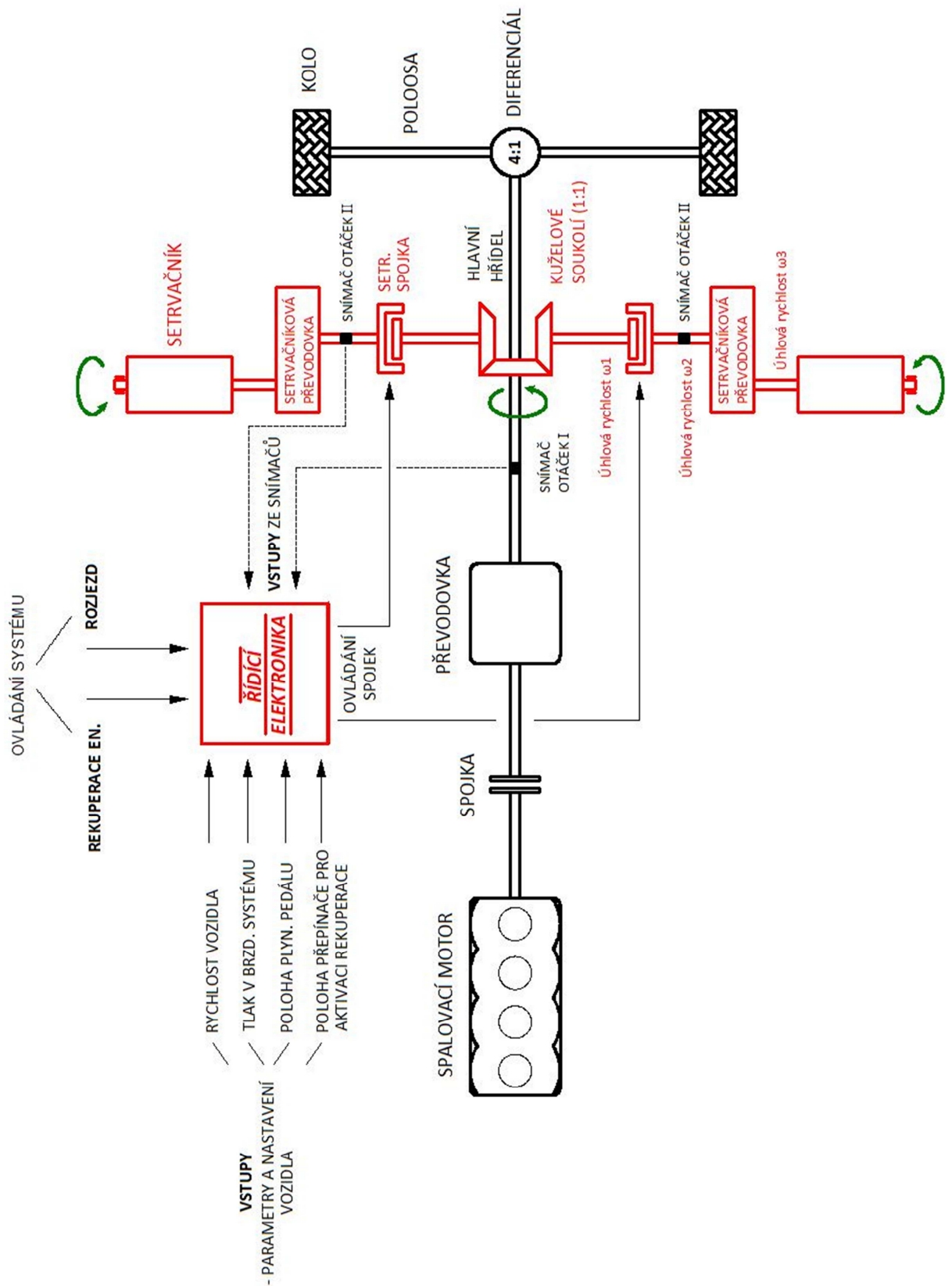
4.1 POPIS PRINCIPU ČINNOSTI SYSTÉMU

Koncepce stávající trakční soustavy vozidla (spalovací motor – spojka – převodovka) zůstane zachována. Pro zjednodušení a lepší názornost je systém pojat v uspořádání zadního pohonu kol s motorem uloženým podélně vpředu vozidla.

Na hlavní hřídel mezi převodovku a diferenciál bude umístěn kuželový převod zajišťující rozvedení otáček do příčného směru vozidla pro pohon setrvačnicků. Součástí návrhu jsou dále prvky pro uvádění setrvačnicků do pohybu (setrvačnickové spojky), samotný setrvačnick s převodovkou a nezbytné elektronické řízení.

Kinetická energie jedoucího automobilu a jeho kol, bude transformována na kinetickou energii rotujících setrvačnicků, což vyvolá zpomalení vozidla. Pokud dojde k dostatečnému urychlení setrvačnickových hmot vlivem předpokládaného městského stylu jízdy (zastavování, zpomalování), je uložená energie využita při následném rozjezdu a to prostřednictvím přenosu krouticího momentu zpět na kola automobilu.

Hlavním faktorem pro zvážení úspěšnosti systému je posouzení schopnosti akumulovat dostatečné množství energie v závislosti na provozních podmínkách. Celková velikost uložené energie je určena pouze velikostí úhlové rychlosti točících se komponent setrvačnickového systému. Do děje se samozřejmě promítne i hmotnost a rozložení hmoty samotných setrvačnicků (vliv momentu setrvačnosti těles), tyto parametry ale pochopitelně během provozu zůstávají konstantní.



Obrázek 4—1: Návrh podpůrného setrvačnickového systému

4.2 PROVOZNÍ REŽIMY SETRVAČNÍKOVÉHO POHONU

4.2.1 Brzdění – rekuperace energie

Režim rekuperace kinetické energie (regenerativní brzdění) bude aktivován přímo řidičem a to prostřednictvím sešlápnutí brzdového pedálu.

Pokud v provozu nastane splnění určitých podmínek (viz. kapitola *Řídící elektronika*), setrvačnickové spojky začnou zabírat, čímž bude docházet k vyrovnávání (synchronizaci) otáček hlavního hřídele vozidla s hřídelem pohonu setrvačnicků. Postupným zvyšováním otáček setrvačnicků se dosáhne akumulace energie. V návrhu je počáteční dráha brzdového pedálu vyhrazena pro řízení intenzity rekuperace energie. V závislosti na velikosti síly, kterou řidič působí na pedál, se zvyšuje i rychlost otáčení setrvačnicků (a zároveň i míra zpomalení vozidla). V případě potřeby razantnějšího brzdění samozřejmě zůstane funkce konvenčních brzd zachována.



Obrázek 4—2: Manuální ovládání aktivace ukládání energie

Pokud se uloží maximální možné množství kinetické energie (vysvětleno dále), tak dojde k rozepnutí setrvačnickových spojek, aby nedocházelo k neúčelnému využívání akumulované energie a mohlo tak dojít k zastavení vozidla.

Za všech okolností bude mít řidič dle svého uvážení možnost celý podpůrný setrvačnickový systém deaktivovat prostřednictvím ovládacího prvku na palubní desce.

POZN.: Kvůli exponenciální závislosti kinetické energie na rychlosti je výhodné akumulovat energii při vyšších rychlostech vozidla. Nicméně z hlediska použití systému, jediné omezení během rekuperace spočívá v maximální obvodové rychlosti otáčení setrvačnicků, a to z důvodu pevnosti použitého materiálu.

Režimy brzdění

V rekuperačním režimu mohou nastat 3 základní situace vystihující různou úroveň uložené energie:

- V setrvačnicích není akumulována žádná energie, regenerativním brzděním se začnou roztáčet z původních nulových otáček. Rychlost otáčení hlavního hřídele je v porovnání s hřídelem pohonu setrvačnicků podstatně vyšší $\rightarrow \omega_1 \gg \omega_2$ (viz. schéma).
- V setrvačnicích je uložena určitá energie (točí se), ale díky potřebě zpomalování z vyšší momentální rychlosti, je možné tuto energii ještě navýšit. Platí zde podmínka $\omega_1 > \omega_2$.
- V setrvačnicích je naakumulováno množství energie, ale kvůli zpomalování z nízké rychlosti již není možné jim přidat další energii (nedojde k sepnutí spojek) a ke zpomalení vozidla se výhradně použijí brzdy. V tomto případě platí podmínka $\omega_2 > \omega_1$.

4.2.2 Rozjezd – využití akumulované energie

Na rozdíl od systému, který je použit v prototypu vozu Volvo, se nesnažím o využívání získané energie pro akceleraci vozidla z určité ustálené rychlosti a tím i o dočasné zvýšení jeho výkonu. Mojí prioritou je především docílení toho, aby co možná nejvíce rozjezdů bylo provedeno akumulovanou energií.

Při sešlápnutí plynového pedálu nejprve dojde k načtení otáček hřídelů setrvačnicků a s využitím znalosti jejich hmotnosti získáme množství uložené energie. Na základě velikosti této energie bude rozjezd zahájen buď pouze prostřednictvím setrvačnicků (\rightarrow sepnutí setrv. spojek) nebo v případě jejího nedostatku dojde k nastartování spalovacího motoru.

Obdobně jako v případě zpomalování, i velikost zrychlení vozidla bude možné regulovat a to mírou sešlápnutí plynového pedálu. Nicméně nejvyšší přenášený moment na kola je omezen tak, aby nemohlo dojít k prokluzu pneumatik.

Setrvačníky budou využívány pouze pro urychlení vozidla z nulové rychlosti až do okamžiku vyčerpání uložené energie, pak dojde k nastartování motoru. Roztočení motoru bude provedeno automaticky, obvyklým způsobem (elektrickým startérem).

Nutnou podmínkou při rozjezdech uskutečněných energií setrvačnicků je zajištění funkčnosti všech důležitých systémů (agregátů) vozidla, jinak poháněných od spalovacího motoru. To je možné realizovat převodem přímo od setrvačnicků, nicméně zvětší se tím celkový odpor setrvačnickové soustavy M_{os} , což znamená i menší množství energie pro vlastní rozjezd.

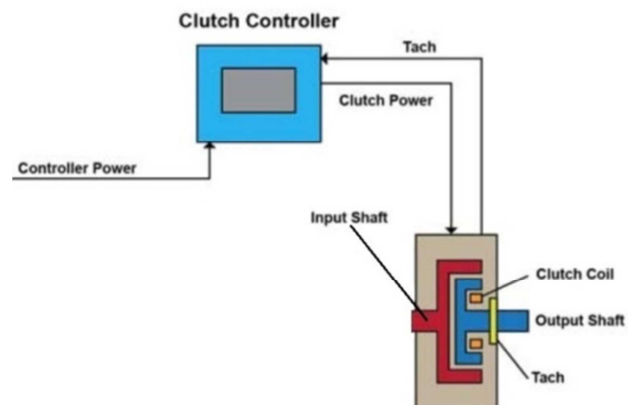
4.3 TECHNICKÝ POPIS JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT POHONU

4.3.1 Setrvačnickové spojky

Důležitým prvkem systému jsou setrvačnickové spojky. V režimu rekuperace zajišťují přenos kroutícího momentu od hlavního hřídele k setrvačnickům a při rozjezdu jej přenášejí zpět na kola vozidla.

Provedení spojek

Z důvodu předpokládané vysoké četnosti rekuperace během městského provozu by k tomuto účelu nebylo vhodné použít třecí spojky. Vlivem vyrovnávání otáček po delší dobu totiž dochází na činných plochách (lamelách) k vysokému tření a teplotám, z čehož vyplývá i jejich rychlé opotřebení. Proto jsem spojky navrhl jako elektromagnetické - indukční. Kroutící moment mezi jednotlivými hřídeli je přenášen působením magnetického pole. Čím vyšší je proud přivedený do spojkové cívky, tím vyšší je intenzita magnetického pole a z toho plynoucí i velikost přenášeného momentu. Velkou výhodou tohoto typu spojek je, že pro přenos momentu nepoužívají mechanický styk hnané a hnací části spojky, čímž se podstatně zvyšuje životnost a odpadá běžná údržba. Vzhledem ke vzduchové mezeře mezi jednotlivými hřídeli, dochází pouze k opotřebení ložisek a kartáčů.



Obrázek 4—3: Elektromagnetická indukční spojka [112]

4.3.2 Setrvačnickové převodovky

Kvůli navýšení otáček rotujících setrvačníků a tím i efektivnosti systému je použita převodovka s fixně navrženým převodem pro zachování jednoduchosti pohonu ($i_{set.} = 10$). Vzhledem k tomu, že v rekuperačním režimu dochází k desetinásobnému urychlování setrvačníků, významně se tím zvýší tzv. redukovaný moment setrvačnosti setrvačnickového systému. Ten je směrodatným parametrem pro stanovení velikosti akumulované energie v setrvačnicích.

4.3.3 Setrvačnick

Hlavní akumulátor energie je samotný rotující válec, nicméně aby došlo k jeho efektivnímu využití, je zapotřebí se při konstrukci zamyslet i nad jeho detailním provedením. Jak již bylo zmíněno, určující parametr množství uložené energie je rychlost jeho otáčení a dále pak hmotnost resp. rozložení hmotnosti. Z fyzikálního principu je totiž kvůli průběhu momentu setrvačnosti výhodné hmotu uložit co nejdále od pevné osy otáčení, ale omezujícím parametrem jsou prostorové možnosti vozidla a dále zachování pevnosti setrvačnicku.

Z hlediska bezpečnosti je prospěšné setrvačnick konstruovat jako monolitický z vysokopevnostních materiálů zaručujících jeho strukturální trvanlivost i při vysokých zatíženích. To je ale právě v rozporu s efektivním rozložením hmotnosti. Společnost Volvo využítá pro svůj prototyp uhlíková vlákna, která jsou další alternativou pro takto namáhané díly. Za zmínku stojí i provedení ve formě stočeného drátu, který se v případě nárazu rozmotá a nenapáchá velké škody. K zamyšlení je i možnost využití homogenní sypké hmoty o vysoké hustotě (např. písku) jako náplně rotujícího válce. Naakumulovaná energie by v případě nárazu nebyla koncentrována do jednoho tělesa, a díky rozptýlení látky po větším prostoru by došlo k postupné disipaci energie.

Rychlost rotace v řádu několika desítek tisíc otáček za minutu je ovlivňována odpory. Hlavním je odpor vzduchu, který by bránil dosažení těchto hodnot a pak i uchování energie po delší dobu. Řešením je tedy rotace setrvačnicku ve vakuu, což sebou ale nese nutnost dalšího konstrukčního řešení v podobě zajištění hermetičnosti obalu a účinného systému udržování vakua.

Dalším odporem působící proti rotaci je tření v ose otáčení setrvačníku. To lze řešit prostřednictvím použití magnetických ložisek. Magnetické pole umožní bezkontaktní uložení rotoru a zároveň se stabilizuje jeho radiální poloha.

Hřídel pohonu setrvačníku je opatřena snímačem otáček, který se znalostí momentů setrvačnosti všech rotujících částí poskytuje informaci o aktuálním množství uložené energie.

4.3.4 Řídící elektronika

Hlavním prvkem zajišťující správnou funkci celého systému v jednotlivých režimech je řídicí elektronika. Princip činnosti spočívá v neustálém vyhodnocování vstupních signálů v závislosti na provozním režimu a následném ovládní setrvačnickových spojek. Mezi základní dva provozní režimy podpůrného setrvačnickového pohonu patří:

- *Rekuperace energie (brzdění)*
- *Rozjezd vozidla*

Z hlediska množství splněných podmínek nutných k aktivaci systému je náročnější rekuperační režim. K zahájení rekuperace kinetické energie (roztáčení setrvačnicků) musí předcházet ověření následujících stavů:

- *Rychlost vozidla*
Maximální rychlost vozidla, při které je možné rekuperaci začít, musí být stanovena v závislosti na použitém materiálu setrvačníku. Vlivem brzdění z vyšších rychlostí by totiž mohlo dojít k překročení přípustných otáček a tím i k porušení jeho pevnosti. Dolní hranice rychlosti pro aktivaci rekuperace není limitována (závisí jen na velikosti již uložené energie).
- *Poloha plynového pedálu*
Systém rekuperace je aktivní pouze při nesešlápnutém plynovém pedálu.
- *Otáčky hřídelů ω_1 a ω_2*
Pokud při rekuperaci nastane situace, kdy se otáčky těchto hřídelů synchronizují, tak musí neprodleně dojít k rozepnutí spojek (přerušeni dodávky proudu do cívky setrvačnickové spojky). V opačném případě by došlo k neúčelnému

využívání již naakumulované energie a k zabránění zpomalování vozidla. Jestliže jsou otáčky hřídele ω_2 před rekuperací vyšší než u hřídele ω_1 tak k sepnutí spojky ani nedojde a zpomalení je opět provedeno pomocí brzd.

- Přepínač pro aktivaci rekuperace

K zahájení rekuperace je nutné ověření sepnuté polohy manuálního přepínače v kabině vozidla.

- Tlak v brzdovém okruhu

Pokud je systém aktivován, tak se velikost magnetického pole ve spojkách a tím i velikost kroutícího momentu přenášeného na setrvačníky odvíjí právě od výše tlaku v brzdovém potrubí. Jedná se tedy o proporcionální ovládání – velikost síly působící na brzdový pedál přímo odpovídá velikosti úhlového zrychlení setrvačnicků.

4.4 Energetický výpočet

Celý princip činnosti systému je založen na vzájemném vyrovnávání otáček hřídelů v místě setrvačnickových spojky. Cílem tohoto výpočtu je stanovení doby T potřebné k vyrovnání (synchronizaci) otáček hlavního hřídele ω_1 s otáčkami hřídele pohonu setrvačnicku ω_2 při různé rychlosti vozidla před brzděním. Zároveň tato doba signalizuje i okamžik kdy se spojky musí rozepnout. Z tohoto základního údaje jsme dále schopni určit množství předané energie do setrvačnicků i velikost zpomalovacích účinků na vozidlo. Následně je pak v režimu rozjezdu možné stanovit maximální rychlost vozidla vyvolanou pouze energií setrvačnicků.

Pro účely výpočtů budou uvažovány tyto vstupní podmínky:

- *Vozidlo pohybující se po rovině*
- *Dynamický poloměr kol vozidla $r_k = 25 \text{ cm}$*
- *Počáteční nulové otáčky setrvačnicků při začátku rekuperace ($\omega_{2b} = 0$)*
- *Setrvačníky válcového tvaru o průměru 150 mm*
- *Zanedbání odporů setrvačnickového celku ($M_{oS} = 0$)*
- *Zanedbání vozidlových odporů ($M_{oV} = 0$)*

- Nesešlápnutý plynový pedál
- Vyřazený rychl. stupeň při rekuperaci (eliminace vlivu brzdění kompresí motoru)
- Poloha přepínače pro aktivaci rekuperace v režimu „spuštěno“
- Převodový poměr v setrvačnickových převodovkách $i_{set.} = 10$ (-> otáčky samotných setrvačnicků ω_3 jsou vždy desetinásobné v porovnání s ω_2 , resp. s ω_{sb} či ω_{sr} .)
- Převodový poměr diferenciálu vozidla $i_{dif.} = 4$
- Převodový poměr v kuželovém soukolí $i_{ks} = 1$

4.4.1 Stanovení otáček hlavního hřídele (rekuperační režim)

Prvním krokem při výpočtu celkového množství energie je zjištění úhlové rychlosti hlavního hřídele ω_{1b} (popř. jeho otáček) před začátkem rekuperace. Otáčky tohoto hřídele, který v mém návrhu setrvačnický pohání, jsou přímo úměrné rychlosti vozidla.

Nejdříve určíme úhlovou rychlost samotných kol při počáteční rychlosti pohybu vozidla:

$$v_{0b} = \omega_{k0b} \cdot r_k \rightarrow \omega_{k0b} = \frac{v_{0b}}{r_k}$$

POZN.: Obvodová rychlost kol odpovídá rychlosti pohybu vozidla.

Vynásobením úhlové rychlosti kol ω_{k0b} převodovým poměrem diferenciálu $i_{dif.}$ získáme počáteční úhlovou rychlost hlavního hřídele ω_{1b} .

$$\omega_{1b} = \omega_{k0b} \cdot i_{dif.}$$

POZN.: Pro zjednodušení použijeme převodový poměr diferenciálu $i_{dif.} = 4$ (okolo této hodnoty se pohybují převodové poměry diferenciálů osobních vozidel).

4.4.2 Stanovení redukováných momentů setrvačnosti

Nyní spočítáme tzv. redukované momenty setrvačnosti dílčích soustav, mezi kterými dochází k vzájemnému předávání kinetické energie.

Jednu stranu soustavy představuje energie vozidla včetně jeho kol a na straně druhé je pak kinetická energie ozubených kol setrvačnickové převodovky a samotného setrvačnicku. Redukce je provedena k místu spínání setrvačnickové spojky, která celou soustavu rozděluje.

Podstatou je zjednodušení každé strany soustavy pouze na jedno (redukční) těleso, kterému odpovídá moment setrvačnosti všech hybných mechanismů skutečné soustavy (s uvážením převodových poměrů mezi jednotlivými součástmi). Kinetická energie tohoto tělesa musí být stejná jako kinetická energie skutečné soustavy těles.

POZN.: Pro zjednodušení nebudou do následujících výpočtů zahrnuty momenty setrvačnosti rotačních částí spalovacího motoru a převodovky. Tyto části by na soustavu měly pouze malý vliv a to z důvodu, že v okamžiku aktivace rekuperace energie (tedy při brzdění s vyřazeným převodovým stupněm) má motor a s ním spojené části nízké otáčky a tedy i zanedbatelnou kinetickou energii.

Redukovaný moment setrvačnosti soustavy vozidlo + kola – J_V

Ze zákona zachování energie vychází tvrzení, že celková kinetická energie vozidla odpovídá součtu kinetické energie posuvného (samotné vozidlo) a rotačního (kola vozidla) pohybu.

Je tedy možné vyjádřit celkovou kinetickou energii pohybujícího se tělesa (kombinovaným způsobem) pouze prostřednictvím redukovaného momentu setrvačnosti J_V :

$$E_{K\ celk.} = E_{K\ voz.} + E_{K\ kol}$$

$$\frac{1}{2}J_V \cdot \omega_1^2 = \frac{1}{2}m_{voz.} \cdot v^2 + \frac{1}{2} \sum J_k \cdot \omega_k^2$$

Dopřednou rychlost vozidla vyjádříme součinem úhlové rychlosti kola s jeho poloměrem:

$$v = \omega_k \cdot r_k$$

Po dosazení do předchozího vztahu a následné úpravě:

$$\frac{1}{2}J_V \cdot \omega_1^2 = \frac{1}{2}m_{voz.} \cdot \omega_k^2 \cdot r_k^2 + \frac{1}{2} \sum J_k \cdot \omega_k^2$$

$$\rightarrow J_V = \frac{m_{voz.} \cdot \omega_k^2 \cdot r_k^2 + \sum J_k \cdot \omega_k^2}{\omega_1^2}$$

$$J_V = \frac{\omega_k^2 (m_{voz.} \cdot r_k^2 + \sum J_k)}{\omega_1^2}$$

Dále je důležité zohlednit převodový poměr mezi kolem a místem synchronizace (tedy setrvačnickovou spojkou). Vzhledem k tomu, že kuželové soukolí má převodový poměr $i_{ks} = 1$, tak úhlová rychlost v místě synchronizace odpovídá úhlové rychlosti hlavního hřídele. Jediným převodem v této soustavě tak zůstává diferenciál s převodovým poměrem i_{dif} .

$$i_{dif.} = \frac{\omega_k}{\omega_1} = \frac{1}{4}$$

POZN.: Úhlová rychlost hlavního hřídele ω_1 je 4x vyšší než úhlová rychlost kol ω_k .

Redukovaný moment setrvačnosti této dílčí soustavy je poté dán vztahem:

$$J_V = (m_{voz.} \cdot r_k^2 + \sum J_k) \cdot i_{dif.}^2$$

Redukovaný moment setrvačnosti soustavy setrvačnick + setrvačnickový převod – J_S

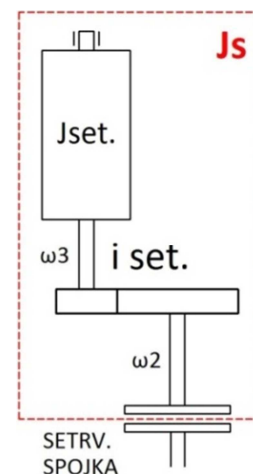
Jedná se o součet setrvačných účinků veškerých komponentů od místa synchronizace (setrvačnickové spojky) až po setrvačnick (viz schéma). Samotný setrvačnick uvažujeme jako tuhé těleso s daným momentem setrvačnosti $J_{set.}$. Vzhledem k přítomnosti setrvačnickové převodovky před setrvačnickem je nutné započítat i její převodový poměr $i_{set.}$, který významně redukováný moment setrvačnosti této strany soustavy ovlivňuje. Pro zjednodušení zanedbáme jednotlivá převodová soukolí v převodovce a budeme brát v úvahu pouze vliv samotného setrvačnicku (majoritní hmotnost) a celkového převodového poměru převodovky.

Za předpokladu, že $\omega_3 > \omega_2$ (viz. schéma):

$$\frac{1}{2} J_{set.} \cdot \omega_3^2 = \frac{1}{2} J_S \cdot \omega_2^2 \quad \rightarrow \quad J_S = \frac{J_{set.} \cdot \omega_3^2}{\omega_2^2}$$

$$i_{set.} = \frac{\omega_3}{\omega_2} \quad \rightarrow \quad J_S = J_{set.} \cdot i_{set.}^2$$

$$J_{set.} = \frac{1}{2} m \cdot r^2 \quad (\text{vztah pro plný válec})$$



Obrázek 4—4: Setrvačnicková soustava

Redukovaný moment setrvačnosti této dílčí soustavy (s uvažováním, že použijeme dva setrvačnicku) je poté dán vztahem:

$$J_S = 2 \cdot J_{set.} \cdot i_{set.}^2$$

4.4.3 Stanovení celkového synchronizačního momentu

Dalším důležitým faktorem je synchronizační moment M_s . Velikost synchronizačního momentu ovlivňuje synchronizační dobu hřídelů T a tím i velikost možného zpomalení resp. zrychlení vozidla. Zároveň v případě těžšího vozidla je nutné k dosažení stejné hodnoty zpomalení/zrychlení použít vyšší synchronizační moment. Je to tedy důležitý parametr při návrhu setrvačnickové spojky.

Pokud by situace v provozu vyžadovala intenzivnější brzdění odpovídající synchronizačnímu momentu, který již není spojka schopna přenést do setrvačnickové soustavy, zpomalení proběhne pomocí brzd.

V případě rozjezdu bude maximální výše synchronizačního momentu přenášeného na kola omezena tak, aby nemohlo dojít k prokluzu pneumatik a tím i maření uložené energie.

POZN.: Velikostí M_s je míněna velikost synchronizačního momentu v obou setrvačnickových spojkách dohromady. Požadavek na jednu spojku je tedy oproti M_s poloviční.

4.4.4 Stanovení doby synchronizace hřídelů

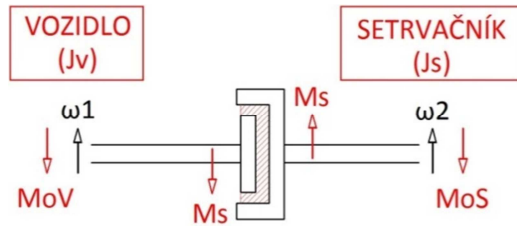
Stanovení doby T potřebné k úplnému vyrovnání otáček mezi hřídeli je stěžejní záležitostí pro další úvahy a rozbor.

Je důležité rozlišovat dva případy:

- *Stanovení doby synchronizace při regenerativním brzdění (rekuperaci)*
- *Stanovení doby synchronizace při rozjezdu*

Stanovení doby synchronizace při regenerativním brzdění (urychlování setrvačnicků)

Podstatou rekuperačního režimu je působením synchronizačního momentu M_{sb} snížit původní rychlost otáčení hlavního hřídele ω_{1b} a tím zároveň navýšit původní nulovou rychlost otáčení hřídele pohonu setrvačnicku ω_{2b} . Výsledná rychlost hřídelů po úplném vyrovnání otáček se nazývá synchronizovaná úhlová rychlost ω_{sb} .



Obrázek 4—5: Znázornění veličin při regenerativním brzdění

Vycházíme z následujícího předpokladu:

Změna energie $\left(J \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \right) = \text{energie předaná } (M_{sb}) - \text{ztráty } (M_o)$

VOZIDLO

$$J_V \cdot \frac{\Delta\omega_1}{\Delta t} = -M_{sb} - M_{oV}$$

$$\frac{\Delta\omega_1}{\Delta t} = \frac{-M_{sb} - M_{oV}}{J_V}$$

$$\int_{\omega_{1b}}^{\omega_{sb}} \Delta\omega_1 = \frac{-M_{sb} - M_{oV}}{J_V} \cdot \int_0^{T_b} \Delta t$$

$$\omega_{sb} - \omega_{1b} = \frac{-M_{sb} - M_{oV}}{J_V} \cdot T_b$$

$$\omega_{sb} = \omega_{1b} - \frac{M_{sb} + M_{oV}}{J_V} \cdot T_b$$

SETRVAČNÍK

$$J_S \cdot \frac{\Delta\omega_2}{\Delta t} = M_{sb} - M_{oS}$$

$$\frac{\Delta\omega_2}{\Delta t} = \frac{M_{sb} - M_{oS}}{J_S}$$

$$\int_{\omega_{2b}}^{\omega_{sb}} \Delta\omega_2 = \frac{M_{sb} - M_{oS}}{J_S} \cdot \int_0^{T_b} \Delta t$$

$$\omega_{sb} - \omega_{2b} = \frac{M_{sb} - M_{oS}}{J_S} \cdot T_b$$

$$\omega_{sb} = \omega_{2b} + \frac{M_{sb} - M_{oS}}{J_S} \cdot T_b$$

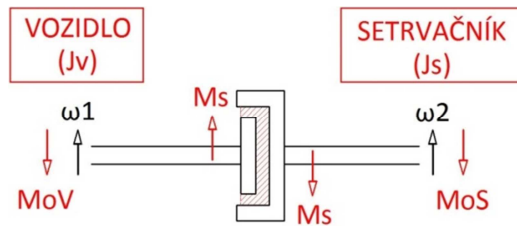
$$\omega_{1b} - \frac{M_{sb} + M_{oV}}{J_V} \cdot T_b = \omega_{2b} + \frac{M_{sb} - M_{oS}}{J_S} \cdot T_b$$

$$\omega_{1b} - \omega_{2b} = \left(\frac{M_{sb} - M_{oS}}{J_S} + \frac{M_{sb} + M_{oS}}{J_V} \right) \cdot T_b$$

$$T_b = \frac{\omega_{1b} - \omega_{2b}}{\frac{M_{sb} - M_{oS}}{J_S} + \frac{M_{sb} + M_{oS}}{J_V}} \quad [67]$$

Stanovení doby synchronizace při rozjezdu (urychlování vozidla)

Podstatou rozjezdu je působením synchronizačního momentu M_{sr} zvýšit původní nulovou rychlost otáčení hlavního hřídele ω_{1r} (uvažujeme, že vozidlo stojí) a tím vozidlo uvést do pohybu. Výsledná rychlost hřídelů po úplném vyrovnání otáček se nazývá synchronizovaná úhlová rychlost ω_{sr} .



Obrázek 4—6: Znázornění veličin při rozjezdu vozidla

Vycházíme z následujícího předpokladu:

Změna energie $\left(J \cdot \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \right) = \text{energie předaná } (M_{sr}) - \text{ztráty } (M_o)$

VOZIDLO

$$J_V \cdot \frac{\Delta\omega_1}{\Delta t} = M_{sr} - M_{oV}$$

$$\frac{\Delta\omega_1}{\Delta t} = \frac{M_{sr} - M_{oV}}{J_V}$$

$$\int_{\omega_{1r}}^{\omega_{sr}} \Delta\omega_1 = \frac{M_{sr} - M_{oV}}{J_V} \cdot \int_0^{T_r} \Delta t$$

$$\omega_{sr} - \omega_{1r} = \frac{M_{sr} - M_{oV}}{J_V} \cdot T_r$$

$$\omega_{sr} = \omega_{1r} + \frac{M_{sr} - M_{oV}}{J_V} \cdot T_r$$

SETRVAČNÍK

$$J_S \cdot \frac{\Delta\omega_2}{\Delta t} = -M_{sr} - M_{oS}$$

$$\frac{\Delta\omega_2}{\Delta t} = \frac{-M_{sr} - M_{oS}}{J_S}$$

$$\int_{\omega_{2r}}^{\omega_{sr}} \Delta\omega_2 = \frac{-M_{sr} - M_{oS}}{J_S} \cdot \int_0^{T_r} \Delta t$$

$$\omega_{sr} - \omega_{2r} = \frac{-M_{sr} - M_{oS}}{J_S} \cdot T_r$$

$$\omega_{sr} = \omega_{2r} - \frac{M_{sr} + M_{oS}}{J_S} \cdot T_r$$

$$\omega_{1r} + \frac{M_{sr} - M_{oV}}{J_V} \cdot T_r = \omega_{2r} - \frac{M_{sr} + M_{oS}}{J_S} \cdot T_r$$

$$\omega_{1r} - \omega_{2r} = \left(-\frac{M_{sr} - M_{oS}}{J_S} - \frac{M_{sr} - M_{oS}}{J_V} \right) \cdot T_r$$

$$T_r = \frac{\omega_{1r} - \omega_{2r}}{-\frac{M_{sr} + M_{oS}}{J_S} - \frac{M_{sr} - M_{oV}}{J_V}} \quad [67]$$

4.4.5 Stanovení synchronizované úhlové rychlosti hřídelů

Zpětným dosazením hodnoty doby synchronizace T do vztahů:

$$\omega_{sb} = \omega_{1b} - \frac{M_{sb} + M_{oV}}{J_V} \cdot T_b \quad \text{popř.} \quad \omega_{sb} = \omega_{2b} + \frac{M_{sb} - M_{oS}}{J_S} \cdot T_b \quad \text{pro rekup. režim}$$

Resp. do vztahů:

$$\omega_{sr} = \omega_{1r} + \frac{M_{sr} - M_{oV}}{J_V} \cdot T_r \quad \text{popř.} \quad \omega_{sr} = \omega_{2r} - \frac{M_{sr} + M_{oS}}{J_S} \cdot T_r \quad \text{pro režim rozjezdu}$$

získáme velikost synchronizované úhlové rychlosti hřídelů, při jejímž dosažení v rekuperačním režimu musí neprodleně dojít k rozepnutí setrvačnickových spojek. Vyrovnání úhlových rychlostí hřídelů v režimu rozjezdu odpovídá předání veškeré energie uchované v setrvačnicích vozidlu. Pro další zrychlování je nutné nastartování motoru, v opačném případě by vozidlo vlivem svých jízdních odporů po čase zastavilo.

4.4.6 Stanovení rychlosti vozidla po synchronizaci otáček hřídelů

Rychlost vozidla po ukončení regenerativního brzdění (předání veškeré možné energie setrvačnickům)

$$v_{sb} = \omega_{ksb} \cdot r_k$$

Kde

$$\omega_{ksb} = \frac{\omega_{sb}}{i_{dif.}} \quad (i_{dif.} \sim 4)$$

Rychlost vozidla po rozjezdu (vyčerpání veškeré energie setrvačnicků)

$$v_{sr} = \omega_{ksr} \cdot r_k$$

Kde

$$\omega_{ksr} = \frac{\omega_{sr}}{i_{dif.}} \quad (i_{dif.} \sim 4)$$

4.4.7 Stanovení zpomalení/zrychlení vozidla

Zpomalení vozidla při rekuperaci

Poměr mezi rozdílem rychlostí (počáteční v_{0b} a konečné synchronizační v_{sb}) a dobou potřebnou pro synchronizaci hřídelů T_b získáme výsledné zpomalení vozidla vlivem rekuperace (roztáčením setrvačnickové soustavy):

$$a_b = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{0b} - v_{sb}}{T_b}$$

Zrychlení vozidla při rozjezdu

Poměr mezi rozdílem rychlostí (konečné synchronizační v_{sr} a počáteční v_{0r}) a dobou potřebnou pro synchronizaci hřídelů T_r získáme výsledné zrychlení vozidla působením energie setrvačnicků:

$$a_r = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{sr} - v_{0r}}{T_r}$$

4.4.8 Stanovení množství kinetické energie

Energie uložená v setrvačnicích (režim brzdění)

Ze znalosti redukovaného momentu setrvačnosti setrv. soustavy J_S a z velikosti synchronizované úhlové rychlosti hřídelů ω_{sb} , zjistíme velikost kinetické energie v soustavě rotujících setrvačnicků:

$$E_{kS} = \frac{1}{2} \cdot J_S \cdot \omega_{sb}^2$$

Energie vozidla urychleného setrvačnický (režim rozjezdu)

Ze znalosti redukovaného momentu setrvačnosti vozidla J_V a z velikosti synchronizované úhlové rychlosti hřídelů ω_{sr} , zjistíme velikost kinetické energie vozidla urychleného veškerou energií setrvačnicků:

$$E_{kV} = \frac{1}{2} \cdot J_V \cdot \omega_{sr}^2$$

4.5 PREZENTACE VÝSLEDKŮ VÝPOČTŮ

Cílem bylo demonstrovat schopnost ukládání kinetické energie do setrvačnickové soustavy a efektivitu následného využití této energie při rozjezdech vozidla. V přehledech níže uvádím veškeré provedené výpočty v závislosti na vybraných hodnotách synchronizačního momentu M_s (50 N/m a 100 N/m). Jako výchozí parametry jsem použil zvolenou hmotnost setrvačnicků a vozidla. Ostatní vstupní podmínky jsou totožné s těmi, které jsou uvedeny na začátku kapitoly 4.4.

4.5.1 Rekuperační režim

V rekuperačním režimu jsem postupnými kroky určil rychlost vozidla po synchronizaci otáček hřídelů v_{sb} a velikost kinetické energie E_{ks} , kterou je možné do setrvačnicků uložit při různé počáteční rychlosti vozidla v_{ob} .

1) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 1\ 200\ kg$; hmotnost setrvačnicků $m_{set.} = 4\ kg$

v_{ob} [km/h]	ω_{1b} [s ⁻¹]	M_{sb} [N/m]		T_b [s]		ω_{sb} [s ⁻¹]	v_{sb} [km/h]	a_b [m.s ⁻²]		E_{ks} [kJ]
120	533,33	50	100	16,42	8,21	364,99	82,12	0,64	1,28	149,87
100	444,44	50	100	13,69	6,84	304,16	68,43	0,64	1,28	104,07
80	355,56	50	100	10,95	5,47	243,32	54,75	0,64	1,28	66,61
70	311,11	50	100	9,58	4,79	212,91	47,90	0,64	1,28	51,00
60	266,67	50	100	8,21	4,11	182,49	41,06	0,64	1,28	37,47
50	222,22	50	100	6,84	3,42	152,08	34,22	0,64	1,28	26,02
45	200,00	50	100	6,16	3,08	136,87	30,80	0,64	1,28	21,08
40	177,78	50	100	5,47	2,74	121,66	27,37	0,64	1,28	16,65
35	155,56	50	100	4,79	2,40	106,45	23,95	0,64	1,28	12,75
30	133,33	50	100	4,11	2,05	91,25	20,53	0,64	1,28	9,37
25	111,11	50	100	3,42	1,71	76,04	17,11	0,64	1,28	6,50
20	88,89	50	100	2,74	1,37	60,83	13,69	0,64	1,28	4,16
15	66,67	50	100	2,05	1,03	45,62	10,27	0,64	1,28	2,34
10	44,44	50	100	1,37	0,68	30,42	6,84	0,64	1,28	1,04
5	22,22	50	100	0,68	0,34	15,21	3,42	0,64	1,28	0,26

2) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 1\ 200\ kg$; hmotnost setrvačníku $m_{set.} = 7\ kg$

v_{0b} [km/h]	ω_{1b} [s ⁻¹]	M_{sb} [N/m]		T_b [s]		ω_{sb} [s ⁻¹]	v_{sb} [km/h]	a_b [m.s ⁻²]		E_{ks} [kJ]
120	533,33	50	100	23,24	11,62	295,12	66,40	0,64	1,28	171,47
100	444,44	50	100	19,37	9,68	245,93	55,33	0,64	1,28	119,08
80	355,56	50	100	15,49	7,75	196,75	44,27	0,64	1,28	76,21
70	311,11	50	100	13,56	6,78	172,15	38,73	0,64	1,28	58,35
60	266,67	50	100	11,62	5,81	147,56	33,20	0,64	1,28	42,87
50	222,22	50	100	9,68	4,84	122,97	27,67	0,64	1,28	29,77
45	200,00	50	100	8,72	4,36	110,67	24,90	0,64	1,28	24,11
40	177,78	50	100	7,75	3,87	98,37	22,13	0,64	1,28	19,05
35	155,56	50	100	6,78	3,39	86,08	19,37	0,64	1,28	14,59
30	133,33	50	100	5,81	2,91	73,78	16,60	0,64	1,28	10,72
25	111,11	50	100	4,84	2,42	61,48	13,83	0,64	1,28	7,44
20	88,89	50	100	3,87	1,94	49,19	11,07	0,64	1,28	4,76
15	66,67	50	100	2,91	1,45	36,89	8,30	0,64	1,28	2,68
10	44,44	50	100	1,94	0,97	24,59	5,53	0,64	1,28	1,19
5	22,22	50	100	0,97	0,48	12,30	2,77	0,64	1,28	0,30

3) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 900\ kg$; hmotnost setrvačníku $m_{set.} = 4\ kg$

v_{0b} [km/h]	ω_{1b} [s ⁻¹]	M_{sb} [N/m]		T_b [s]		ω_{sb} [s ⁻¹]	v_{sb} [km/h]	a_b [m.s ⁻²]		E_{ks} [kJ]
120	533,33	50	100	14,93	7,47	331,86	74,67	0,84	1,69	123,90
100	444,44	50	100	12,44	6,22	276,55	62,22	0,84	1,69	86,04
80	355,56	50	100	9,96	4,98	221,24	49,78	0,84	1,69	55,07
70	311,11	50	100	8,71	4,36	193,59	43,56	0,84	1,69	42,16
60	266,67	50	100	7,47	3,73	165,93	37,33	0,84	1,69	30,98
50	222,22	50	100	6,22	3,11	138,28	31,11	0,84	1,69	21,51
45	200,00	50	100	5,60	2,80	124,45	28,00	0,84	1,69	17,42
40	177,78	50	100	4,98	2,49	110,62	24,89	0,84	1,69	13,77
35	155,56	50	100	4,36	2,18	96,79	21,78	0,84	1,69	10,54
30	133,33	50	100	3,73	1,87	82,97	18,67	0,84	1,69	7,74
25	111,11	50	100	3,11	1,56	69,14	15,56	0,84	1,69	5,38
20	88,89	50	100	2,49	1,24	55,31	12,44	0,84	1,69	3,44
15	66,67	50	100	1,87	0,93	41,48	9,33	0,84	1,69	1,94
10	44,44	50	100	1,24	0,62	27,66	6,22	0,84	1,69	0,86
5	22,22	50	100	0,62	0,31	13,83	3,11	0,84	1,69	0,22

4) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 900 \text{ kg}$; hmotnost setrvačníku $m_{set.} = 7 \text{ kg}$

v_{0b} [km/h]	ω_{1b} [s ⁻¹]	M_{sb} [N/m]		T_b [s]		ω_{sb} [s ⁻¹]	v_{sb} [km/h]	a_b [m.s ⁻²]		E_{ks} [kJ]
120	533,33	50	100	20,36	10,18	258,60	58,18	0,84	1,69	131,66
100	444,44	50	100	16,97	8,49	215,50	48,49	0,84	1,69	91,43
80	355,56	50	100	13,58	6,79	172,40	38,79	0,84	1,69	58,51
70	311,11	50	100	11,88	5,94	150,85	33,94	0,84	1,69	44,80
60	266,67	50	100	10,18	5,09	129,30	29,09	0,84	1,69	32,91
50	222,22	50	100	8,49	4,24	107,75	24,24	0,84	1,69	22,86
45	200,00	50	100	7,64	3,82	96,97	21,82	0,84	1,69	18,51
40	177,78	50	100	6,79	3,39	86,20	19,39	0,84	1,69	14,63
35	155,56	50	100	5,94	2,97	75,42	16,97	0,84	1,69	11,20
30	133,33	50	100	5,09	2,55	64,65	14,55	0,84	1,69	8,23
25	111,11	50	100	4,24	2,12	53,87	12,12	0,84	1,69	5,71
20	88,89	50	100	3,39	1,70	43,10	9,70	0,84	1,69	3,66
15	66,67	50	100	2,55	1,27	32,32	7,27	0,84	1,69	2,06
10	44,44	50	100	1,70	0,85	21,55	4,85	0,84	1,69	0,91
5	22,22	50	100	0,85	0,42	10,77	2,42	0,84	1,69	0,23

4.5.2 Režim rozjezdu

V režimu rozjezdu je podstatou zjistit, zda je vůbec možné akumulovaným množstvím energie vozidlo uvést do pohybu popř. na jakou rychlost ho lze urychlit (při zadaných parametrech).

Rychlost vozidla po synchronizaci otáček hřídelů v_{sr} a velikost energie vozidla urychleného pouze setrvačníky E_{kv} uvádím při různých úhlových rychlostech hřídele pohonu setrvačníků ω_{2r} (resp. při různých otáčkách n_{2r}). Ty jsou následkem předchozí rekuperace z rychlosti v_{0b} . V tomto případě, pokud zanedbáme ztráty, platí $\omega_{2r} = \omega_{sb}$.

1) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 1\ 200\ kg$; hmotnost setrvačníku $m_{set.} = 4\ kg$

v_{ob} [km/h]	ω_{2r} [s ⁻¹]	n_{2r} [min ⁻¹]	M_{sr} [N/m]		T_r [s]		ω_{sr} [s ⁻¹]	v_{sr} [km/h]	a_r [m.s ⁻²]		E_{kv} [kJ]
5	15,21	145,23	50	100	0,47	0,23	4,80	1,08	0,64	1,28	0,06
10	30,42	290,46	50	100	0,94	0,47	9,60	2,16	0,64	1,28	0,22
15	45,62	435,68	50	100	1,41	0,70	14,40	3,24	0,64	1,28	0,51
20	60,83	580,91	50	100	1,87	0,94	19,20	4,32	0,64	1,28	0,90
25	76,04	726,14	50	100	2,34	1,17	24,00	5,40	0,64	1,28	1,41
30	91,25	871,37	50	100	2,81	1,41	28,80	6,48	0,64	1,28	2,02
35	106,45	1016,5	50	100	3,28	1,64	33,60	7,56	0,64	1,28	2,75
40	121,66	1161,8	50	100	3,75	1,87	38,40	8,64	0,64	1,28	3,60
45	136,87	1307,0	50	100	4,22	2,11	43,20	9,72	0,64	1,28	4,55
50	152,08	1452,2	50	100	4,68	2,34	48,00	10,80	0,64	1,28	5,62
60	182,49	1742,7	50	100	5,62	2,81	57,60	12,96	0,64	1,28	8,09
70	212,91	2033,1	50	100	6,56	3,28	67,20	15,12	0,64	1,28	11,02
80	243,32	2323,6	50	100	7,49	3,75	76,81	17,28	0,64	1,28	14,39
100	304,16	2904,5	50	100	9,37	4,68	96,01	21,60	0,64	1,28	22,48
120	364,99	3485,4	50	100	11,24	5,62	115,21	25,92	0,64	1,28	32,37

2) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 1\ 200\ kg$; hmotnost setrvačníku $m_{set.} = 7\ kg$

v_{ob} [km/h]	ω_{2r} [s ⁻¹]	n_{2r} [min ⁻¹]	M_{sr} [N/m]		T_r [s]		ω_{sr} [s ⁻¹]	v_{sr} [km/h]	a_r [m.s ⁻²]		E_{kv} [kJ]
5	12,30	117,43	50	100	0,54	0,27	5,49	1,24	0,64	1,28	0,07
10	24,59	234,86	50	100	1,07	0,54	10,98	2,47	0,64	1,28	0,29
15	36,89	352,28	50	100	1,61	0,80	16,48	3,71	0,64	1,28	0,66
20	49,19	469,71	50	100	2,14	1,07	21,97	4,94	0,64	1,28	1,18
25	61,48	587,14	50	100	2,68	1,34	27,46	6,18	0,64	1,28	1,84
30	73,78	704,57	50	100	3,22	1,61	32,95	7,41	0,64	1,28	2,65
35	86,08	822,00	50	100	3,75	1,88	38,45	8,65	0,64	1,28	3,61
40	98,37	939,42	50	100	4,29	2,14	43,94	9,89	0,64	1,28	4,71
45	110,67	1056,85	50	100	4,82	2,41	49,43	11,12	0,64	1,28	5,96
50	122,97	1174,28	50	100	5,36	2,68	54,92	12,36	0,64	1,28	7,36
60	147,56	1409,14	50	100	6,43	3,22	65,91	14,83	0,64	1,28	10,59
70	172,15	1643,99	50	100	7,50	3,75	76,89	17,30	0,64	1,28	14,42
80	196,75	1878,85	50	100	8,57	4,29	87,88	19,77	0,64	1,28	18,84
100	245,93	2348,56	50	100	10,72	5,36	109,85	24,72	0,64	1,28	29,43
120	295,12	2818,27	50	100	12,86	6,43	131,82	29,66	0,64	1,28	42,38

3) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 900 \text{ kg}$; hmotnost setrvačniku $m_{set.} = 4 \text{ kg}$

v_{0b} [km/h]	ω_{2r} [s ⁻¹]	n_{2r} [min ⁻¹]	M_{sr} [N/m]		T_r [s]		ω_{sr} [s ⁻¹]	v_{sr} [km/h]	a_r [m.s ⁻²]		E_{kv} [kJ]
5	12,30	117,43	50	100	0,39	0,19	5,22	1,18	0,84	1,69	0,05
10	24,59	234,86	50	100	0,77	0,39	10,45	2,35	0,84	1,69	0,20
15	36,89	352,28	50	100	1,16	0,58	15,67	3,53	0,84	1,69	0,46
20	49,19	469,71	50	100	1,55	0,77	20,89	4,70	0,84	1,69	0,81
25	61,48	587,14	50	100	1,94	0,97	26,12	5,88	0,84	1,69	1,26
30	73,78	704,57	50	100	2,32	1,16	31,34	7,05	0,84	1,69	1,82
35	86,08	822,00	50	100	2,71	1,36	36,56	8,23	0,84	1,69	2,48
40	98,37	939,42	50	100	3,10	1,55	41,79	9,40	0,84	1,69	3,24
45	110,67	1056,85	50	100	3,48	1,74	47,01	10,58	0,84	1,69	4,10
50	122,97	1174,28	50	100	3,87	1,94	52,23	11,75	0,84	1,69	5,06
60	147,56	1409,14	50	100	4,65	2,32	62,68	14,10	0,84	1,69	7,28
70	172,15	1643,99	50	100	5,42	2,71	73,13	16,45	0,84	1,69	9,91
80	196,75	1878,85	50	100	6,20	3,10	83,58	18,80	0,84	1,69	12,94
100	245,93	2348,56	50	100	7,74	3,87	104,47	23,51	0,84	1,69	20,22
120	295,12	2818,27	50	100	9,29	4,65	125,36	28,21	0,84	1,69	29,12

4) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 900 \text{ kg}$; hmotnost setrvačniku $m_{set.} = 7 \text{ kg}$

v_{0b} [km/h]	ω_{2r} [s ⁻¹]	n_{2r} [min ⁻¹]	M_{sr} [N/m]		T_r [s]		ω_{sr} [s ⁻¹]	v_{sr} [km/h]	a_r [m.s ⁻²]		E_{kv} [kJ]
5	12,30	117,43	50	100	0,41	0,21	5,55	1,25	0,84	1,69	0,06
10	24,59	234,86	50	100	0,82	0,41	11,10	2,50	0,84	1,69	0,23
15	36,89	352,28	50	100	1,23	0,62	16,65	3,75	0,84	1,69	0,51
20	49,19	469,71	50	100	1,65	0,82	22,20	5,00	0,84	1,69	0,91
25	61,48	587,14	50	100	2,06	1,03	27,75	6,24	0,84	1,69	1,43
30	73,78	704,57	50	100	2,47	1,23	33,30	7,49	0,84	1,69	2,06
35	86,08	822,00	50	100	2,88	1,44	38,85	8,74	0,84	1,69	2,80
40	98,37	939,42	50	100	3,29	1,65	44,40	9,99	0,84	1,69	3,65
45	110,67	1056,8	50	100	3,70	1,85	49,95	11,24	0,84	1,69	4,62
50	122,97	1174,2	50	100	4,11	2,06	55,50	12,49	0,84	1,69	5,71
60	147,56	1409,1	50	100	4,94	2,47	66,61	14,99	0,84	1,69	8,22
70	172,15	1643,9	50	100	5,76	2,88	77,71	17,48	0,84	1,69	11,19
80	196,75	1878,8	50	100	6,58	3,29	88,81	19,98	0,84	1,69	14,62
100	245,93	2348,5	50	100	8,23	4,11	111,01	24,98	0,84	1,69	22,84
120	295,12	2818,2	50	100	9,87	4,94	133,21	29,97	0,84	1,69	32,88

4.6 SOUHRN POZNATKŮ

Z provedených výpočtů lze učinit následující úsudky:

1) Situace bez uvážení odporů M_{oV} a M_{oS} (ideální případ) - veškeré předchozí výpočty

Množství uložitelné energie je ovlivněno:

- Velikostí redukovaných momentů setrvačnosti jednotlivých soustav (J_V, J_S)

*Pokud by se některým způsobem⁵ zvýšila hodnota J_S při zachování J_V , tak velikost uložené energie bude vyšší, ale k její akumulaci je zapotřebí delší doba (-> úplná synchronizace hřídelů nastává při nižších otáčkách). Tato úvaha je však platná pouze do okamžiku kdy se hodnoty redukovaných momentů setrvačnosti vyrovnají. V případě $J_S = J_V$ je možné akumulovat **nejvíce** energie, z čehož plyne i nejvyšší možná rychlost při následném rozjezdu. Pokud bychom však hodnotu J_S dále zvyšovali (tedy $J_S > J_V$), tak by se energie neukládala efektivně -> nižší uložená energie za delší čas, při nižších synchronizačních otáčkách (-> nižší rychlost v_{sb}).*

- Velikostí rychlosti vozidla před začátkem rekuperace (v_{ob})
- Velikostí úhlové rychlosti setrvačnicků před začátkem rekuperace (ω_{2b})

POZN.: Délku doby synchronizace navíc ovlivňuje i velikost synchr. momentu M_S

V případě vozidla o hmotnosti $m_{voz.} = 1\,200\text{ kg}$ je nejefektivnější použít setrvačnický o hmotnosti $m_{set.} = 8,7\text{ kg}$.

V případě vozidla o hmotnosti $m_{voz.} = 900\text{ kg}$ je nejefektivnější použít setrvačnický o hmotnosti $m_{set.} = 6,6\text{ kg}$.

Při těchto hmotnostech setrvačnicků jsou redukované momenty setrvačnosti jednotlivých soustav vozidla totožné (při zachování válcového tvaru setrvačnicků o průměru 150 mm a převodu v setrv. převodovce $i_{set.} = 10$).

⁵ Hmotností setrvačnicků, změnou převodového poměru v setrv. převodovce či změnou poloměru a tvaru setrvačnicku.

2) Situace s uvážením odporů M_{ov} a M_{os} (reálný případ)

Množství uložitelné energie a zároveň délka doby synchronizace hřídelů je ovlivněna:

- Redukovanými momenty setrvačnosti jednotlivých soustav (J_v, J_s)
- Úhlovou rychlostí hl. hřídele (ω_{1b}) -> rychlost vozidla před začátkem rekuperace
- Úhlovou rychlostí hřídele pohonu setrvačnicku před začátkem rekuperace (ω_{2b})
- Synchronizačním momentem setrvačnickové spojky (M_s)
- Odporovými momenty (M_{ov}, M_{os})

I přesto, že jsem pro zjednodušení předchozích výpočtů číselně nezohlednil vozidlové odpory (M_{ov}) a odpory setrvačnickového celku (M_{os}), tak po dosažení jejich náhodných hodnot do vztahů je možné konstatovat:

- o V rekuperačním režimu bude při vyšší hodnotě M_{os} nutná delší doba pro synchronizaci hřídelů T . Zároveň v případě vyšší hodnoty M_{ov} je doba potřebná pro synchronizaci hřídelů T kratší.
- o V režimu rozjezdu bude při vyšších hodnotě M_{ov} nutná delší doba pro synchronizaci hřídelů T . Zároveň v případě vyšší hodnoty M_{os} je doba potřebná pro synchronizaci hřídelů T kratší.

POZN.: Uvedené úvahy platí pro konstantní synchronizační moment M_s .

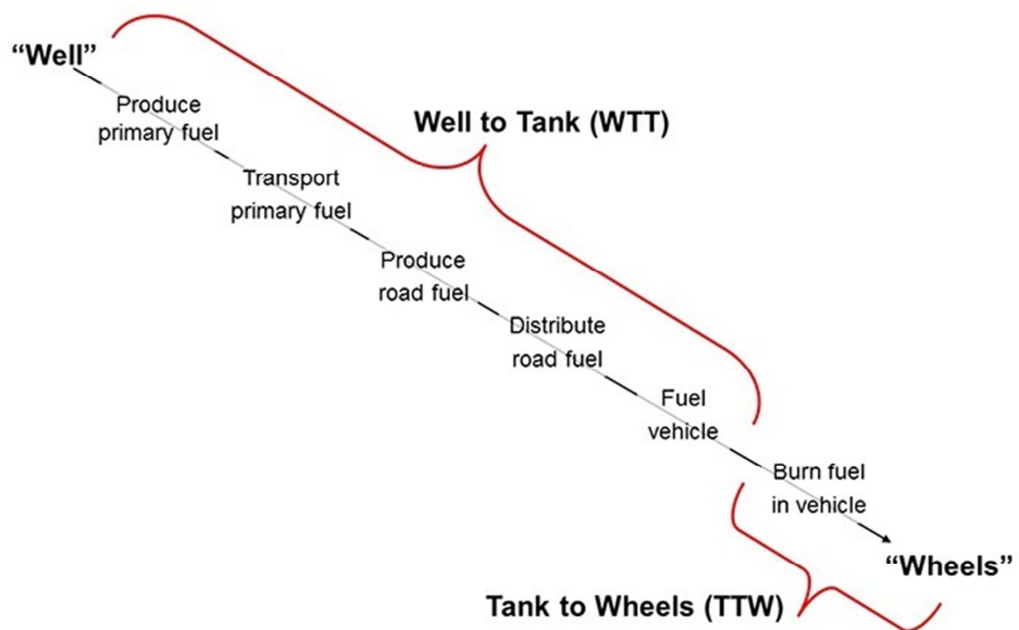
Nejvíce kinetické energie je teoreticky možné uložit za podmínek:

- Vysoká rychlost vozidla, při které rekuperace energie začne (v_{ob})
- Nízké odporové momenty (M_{ov}, M_{os})
- Hodnoty $J_s \leq J_v$ (konkrétní rozdíl závisí na velikosti odporů)
- Vysoký synchronizační moment (M_s)

Při vysokém synchronizačním momentu dochází k synchronizaci otáček hřídelů dříve. Synchronizace a tím i rozepnutí spojek tedy nastává při vyšších otáčkách hřídelů. Vyšší otáčky hřídele pohonu setrvačnicku (a tedy i samotných setrvačnicků) znamenají i vyšší uloženou energii. Nicméně vysoká hodnota M_s sebou nese i velké zpomalení vozidla což může být nepříjemné pro posádku vozidla a může dojít k omezení (ohrožení) ostatních vozidel v dopravním proudu.

5 WELL TO WHEELS ANALÝZA

Well to wheels analýza posuzuje veškeré energetické děje při získávání pohonných látek včetně dějů souvisejících s následným provozem vozidel. Analýza vznikla především na základě požadavků od ekologů a ekonomů konkrétně ke zjištění energetické náročnosti dopravy a jejího dopadu na okolní prostředí. Analýza se dělí na dvě základní kategorie – první z nich je „Well to tank“ (WTT).



Obrázek 5—1: Složky Well to wheels analýzy [113]

Well to tank sleduje veškeré procesy od těžby surovin, jejich zpracování a úpravy, až po konečný výdej paliva (např. u benzínové pumpy). Mezi hlavní oblasti, které WTT analýzu ovlivňují, patří:

- *Bohatost a exkluzivita nalezišť*
- *Technologie dobývání surovin*
- *Technologie následného zpracování*
- *Doprava a distribuce paliva [66]*

K výše uvedeným technickým faktorům je dále nutné počítat i s politickými vlivy, které nezanedbatelně ovlivňují finální cenu paliv.

Obecně udávané hodnoty jsou 12 % ztrát při těžbě a zpracování ropy a dalších přibližně 5 % z původního energetického obsahu při distribuci zpracovaného paliva. Ropná paliva tedy na cestě do nádrže vozidla ztratí přibližně 17 % ze svého původního energetického obsahu. Jinak vyjádřeno – do nádrže vozidla dostaneme přibližně 83 % energie z původního energetického obsahu těžené suroviny. [53]

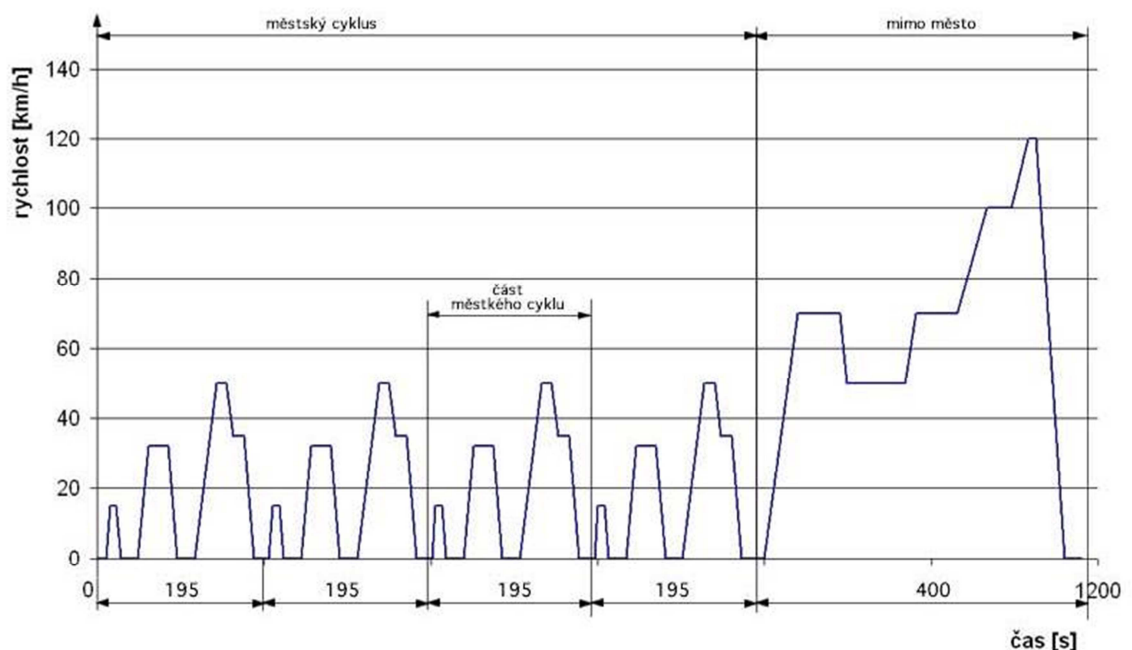
Druhou částí analýzy je tzv. „Tank to wheels“ (TTW) reflektující všechny děje, které ovlivňují průběh jízdy vozidla. Především se jedná o následující záležitosti:

- *Jízdní odpory*
- *Účinnost přeměny energie*
- *Dopravní infrastruktura* [66]

Právě TTW analýza, kterou zohledňuje tzv. NEDC cyklus, je pro posouzení navrženého pohonu stěžejní.

5.1 NEDC CYKLUS

NEDC cyklus slouží jako zavedený standart pro stanovení spotřeby paliva a tím i emisí u nových automobilů již od roku 1999. Skládá se ze dvou odlišných průběhů jízdy. První představuje městský provoz, druhý pak jízdu mimo město.



Obrázek 5—2: NEDC cyklus [114]

Městský cyklus

Městský cyklus začíná provozem motoru na volnoběh po dobu 11 s, následuje akcelerace na rychlost 15 km/h a její udržování po 8 s, pak vozidlo brzdí do zastavení. Následně se rozjede na 32 km/h, kde setrvá 24 s a opět zastaví. Třetí akcelerace je na rychlost 50 km/h a její ustálení po dobu 12 s, poté zpomalí na rychlost 35 km/h, kterou udržuje 13 s a nakonec opět zastaví. Tyto tři různé akcelerace se opakují čtyřikrát. Jedna část městského cyklu měří 195 s. Celková délka městského cyklu činí 13 minut, kdy vozidlo ujede asi 4 km. [66]

Mimoměstský cyklus

Mimoměstský cyklus probíhá akcelerací na 70 km/h, následně vozidlo zpomalí na 50 km/h, poté zrychlí na 70 km/h, 100 km/h a na závěr 10 s jede rychlostí 120 km/h. Poté vozidlo opět zastaví a po dobu 20 s se motor nechá běžet na volnoběh, tímto test definitivně skončí. Celková délka mimoměstského cyklu činí 400 sekund. [66]

Zkušební řidiči provádějící toto testování jsou profesionálně vyškolení tak, aby byla zachována objektivita zkoušky. Lidský faktor a zkušenost totiž hrají důležitou roli. Testovací řidič dokáže jet plynule, příliš nepřidává plyn a přesně ví při jakých otáčkách motoru řadit na jiný převodový stupeň, zatímco někdo méně zkušený může krátkými, ale prudkými akceleracemi citelně ovlivnit spotřebu paliva (-> produkci emisí). Přestože se tito řidiči musí pohybovat podle přesně stanoveného průběhu rychlosti v přesně stanoveném čase, výsledky testování dvou zkušebních řidičů nemusí být vždy totožné.

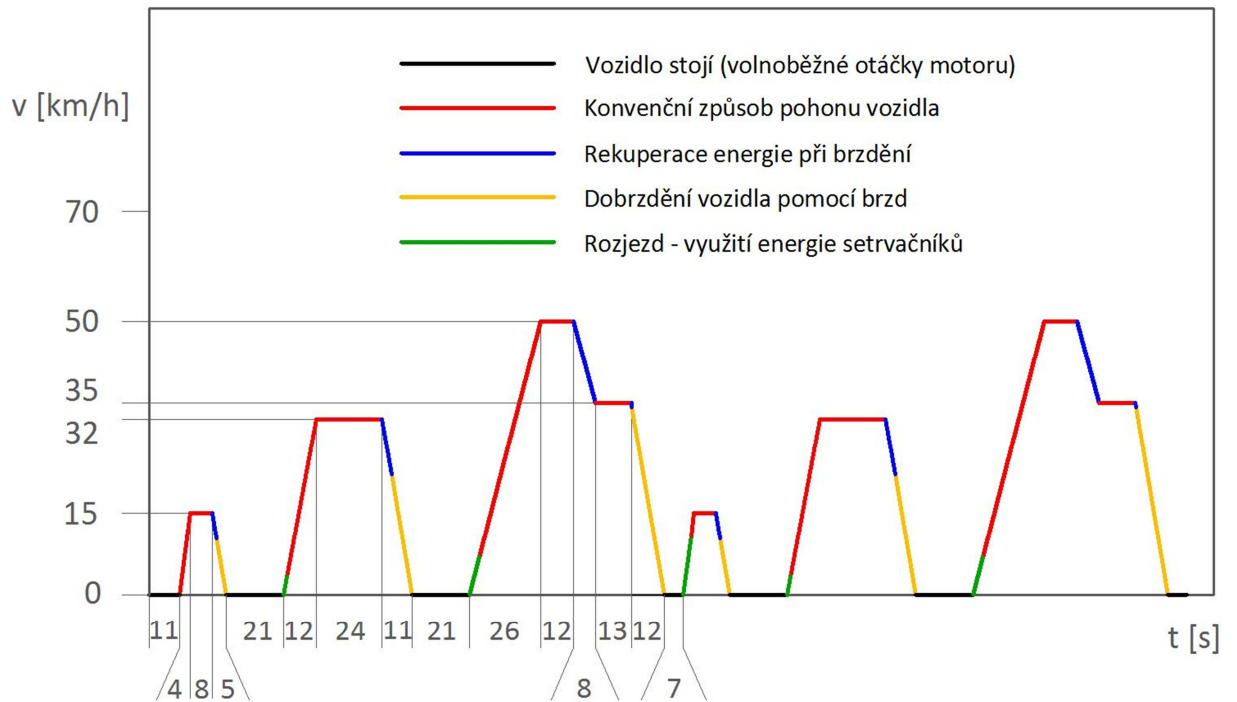
Situace v běžném provozu se od průběhu opakující se ho cyklu NEDC pochopitelně výrazně liší. Během skutečného provozu dochází k mnoha nepravidelným zpomalováním, někdy až k zastavení vozidla vlivem očekávaných i nečekaných překážek (příjezd ke křižovatkám, k přechodu pro chodce, pomalá jízda vlivem dopravního omezení, náhlý vstup chodce do vozovky).

5.2 ANALÝZA NAVRŽENÉHO POHONU

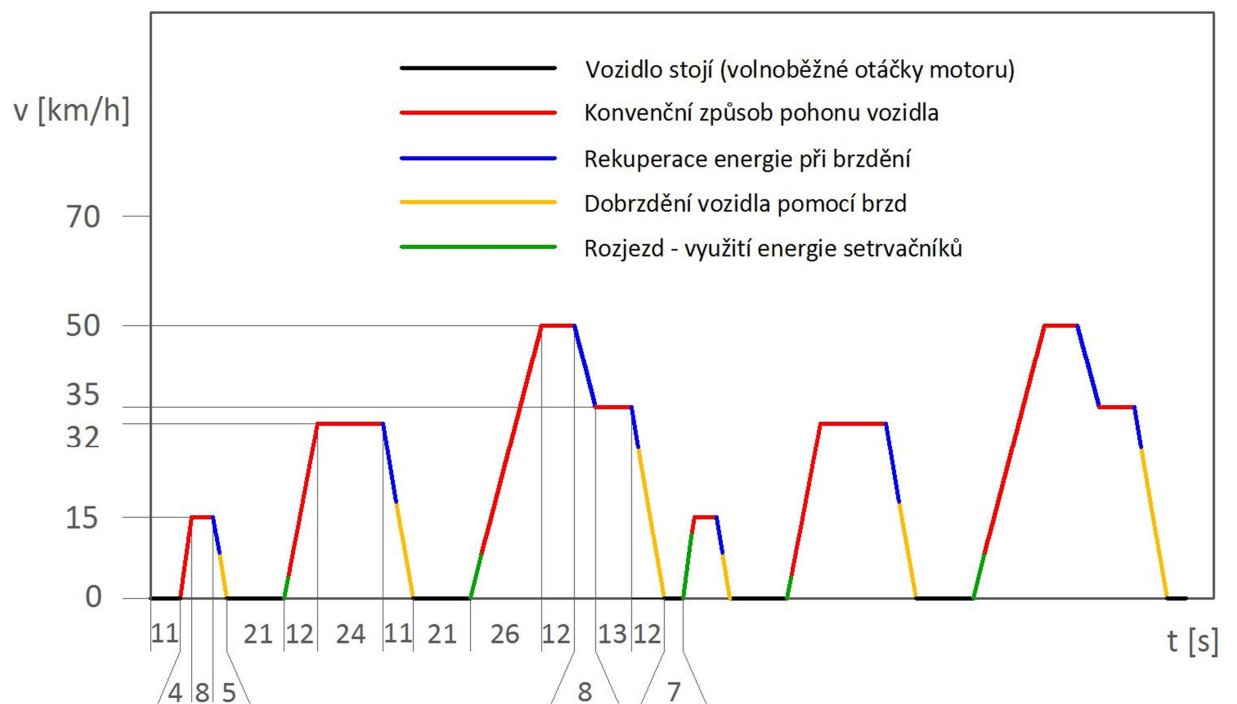
Hodnoty z provedených výpočtů budou nyní aplikovány do NEDC cyklu (dva městské cykly). Účelem analýzy je graficky demonstrovat množství uložené energie a tím i velikost rychlosti vozidla po následném rozjezdu při přesně definovaném průběhu jízdy (rychlost, zrychlení).

Porovnání bude provedeno při různých hmotnostech setrvačnicků a vozidla (vycházíme z výpočtů v předchozí kapitole, tedy bez vlivu odporů). Ostatní podmínky jsou totožné s těmi, které jsou uvedeny na začátku kapitoly 4.4.

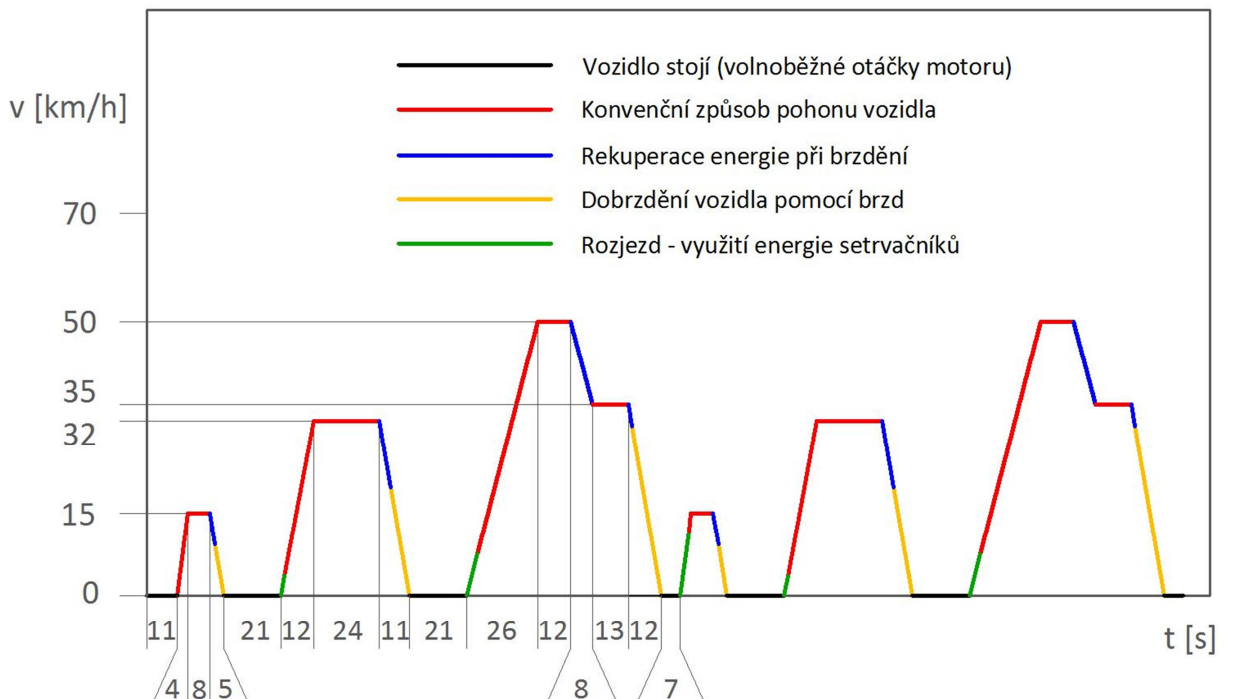
1) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 1\ 200\ kg$; hmotnost setrvačnicku $m_{set.} = 4\ kg$



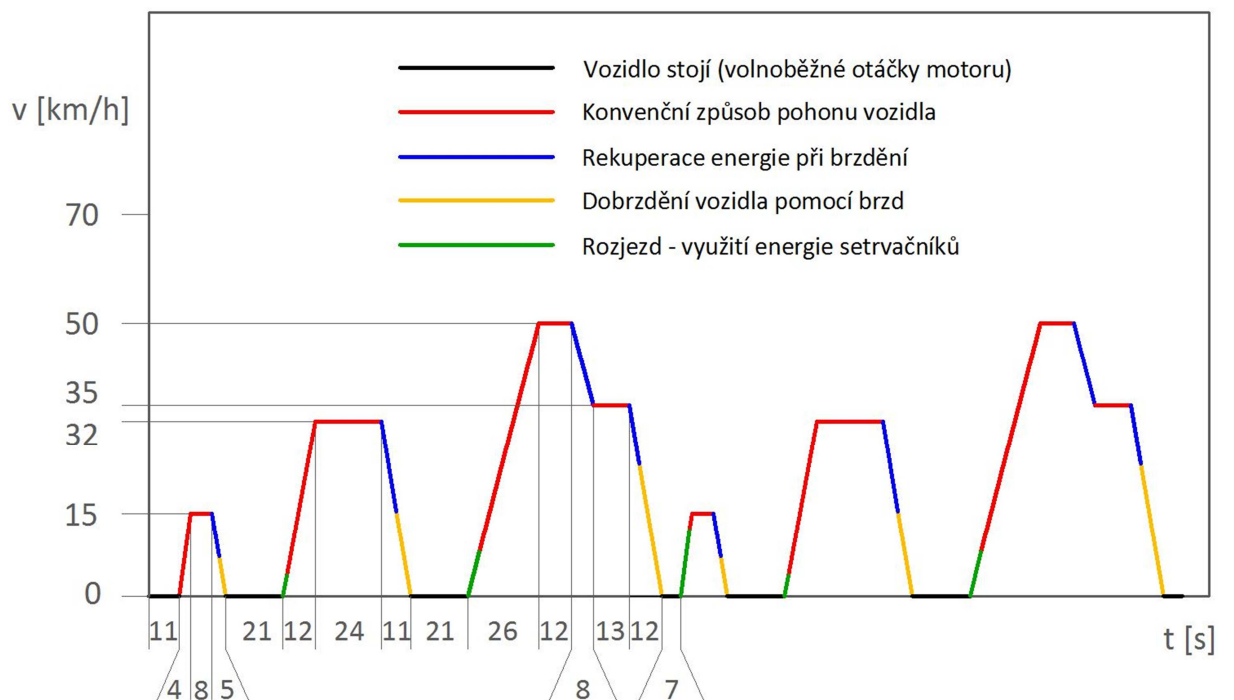
2) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 1\ 200\ kg$; hmotnost setrvačnicku $m_{set.} = 7\ kg$



3) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 900 \text{ kg}$; hmotnost setrvačníku $m_{set.} = 4 \text{ kg}$



4) Parametry: Vozidlo o hmotnosti $m_{voz.} = 900 \text{ kg}$; hmotnost setrvačníku $m_{set.} = 7 \text{ kg}$



Z grafů je patrné, že velikost dosažené rozjezdové rychlosti vozidla (vyznačeno zeleně) po předchozí rekuperaci (vyznačeno modře) je úměrná výši rychlosti při které rekuperace začala, hmotnosti použitých setrvačníků (-> tedy J_S) a hmotnosti samotného vozidla (-> tedy J_V).

6 ZÁVĚR

V předložené práci byly podrobně prezentovány problémy současného trendu individuální dopravy, za které lze z globálního hlediska považovat široký zábor půdy, vysokou produkci exhalací a obecně i klesající zásoby nerostných surovin pro pohon dopravní techniky. Následně jsem uvedl možná řešení vybraných problémů, rozdělených do oblastí technických prostředků vozidel a řízení dopravy.

Všechna vozidla v EU se zážehovým motorem splňující emisní normu EURO 1 a vyšší (tedy od roku výroby 1993) jsou vybavena třícestným řízeným katalyzátorem. Ten poskytuje vysokou účinnost při snižování pro člověka škodlivých látek (oxid uhelnatý, uhlovodíky, oxidy dusíku). V případě osobních vozidel se vznětovým motorem, kde díky odlišnému směšovacímu poměru není možné oxidačním katalyzátorem štěpit oxidy dusíku, se začíná prosazovat systém jejich dodatečného štěpení pomocí selektivní katalytické redukce (SCR).

Zásadním problémem současnosti tak zůstává produkce oxidu uhličitého, kterou je možné omezit pouze snížením spotřeby paliva. Možnou budoucí snahou výrobců automobilů je proto další úprava palivo – regulačního systému vozidla, který zajistí rovnoměrnější plnění válců motoru a tím i vyšší efektivnost hoření směsi. V úvahu přichází i použití rozmanitých druhů alternativních paliv, které jsou pro řidiče zajímavou volbou i z hlediska poskytovaných dotací.

Za tendence blízké budoucnosti lze považovat různá technická řešení a uspořádání hybridních pohonů. Snad každý větší výrobce automobilů má již nyní ve své nabídce i model, který kombinuje více druhů trakcí. Důvodem, proč stále nedochází k hromadné produkci těchto hybridů, je jejich vysoká pořizovací cena, která odráží neustálý vývoj nových technologií a potřebu provádění nezbytných zkoušek k zajištění homologace vozidel.

Z výsledků výpočtů navrženého setrvačnickového systému je patrné, že regenerativní brzdění umožňuje získat množství energie pokrývající požadavky pro následný rozjezd vozidla. Jeho maximální rychlost (po předchozí rekuperaci v městském provozu) je však poměrně nízká - cca 10 km/h. Nicméně mým cílem bylo především zajistit, aby rozjezd byl uskutečněn plně

v kompetenci tohoto systému, což považuji za splněné. Nedostatkem řidičů je totiž často nevhodný způsob rozjezdu s využitím zbytečně vysokých otáček motoru, což přispívá ke zvýšené spotřebě paliva a tím i znečištění životního prostředí.

K zamyšlení pro pozdější využití systému v praxi zůstávají tyto záležitosti:

Je důležité vhodně zvolit hmotnost setrvačnicků (popř. převodový poměr v převodovkách a rozložení hmoty setrvačnicků). Výchozím předpokladem je celková hmotnost vozidla, které má být setrvačnický uvedeno do pohybu při znalosti odporů v oblasti provozovaných rychlostí vozidla. V případě těžšího vozidla je proto nutné parametry setrvačnickové soustavy upravit tak, abychom při rozjezdu dosáhli žádané rychlosti.

Za klíčovou záležitostí systému považuji dostatečné dimenzování setrvačnickových spojek v závislosti na požadované velikosti přenášeného synchronizačního momentu a zajištění jejich spolehlivého ovládní.

Nakonec je třeba se zaměřit na samotnou zástavbu podpůrného pohonu do vozidla. Nutnou podmínkou je zajištění přímého mechanického styku setrvačnickové soustavy s hlavním hřídelem, což pokládám z hlediska stísněného prostoru za limitující. Je proto úkolem pro konstruktéry navrhnout budoucí koncept podvozku s ohledem na tento systém.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Literatura:

- [1] FIRST, Jiří. *Zkoušení automobilů a motocyklů*. S&T CZ s.r.o., Praha, 2008. 348 s. ISBN 978 -80-254-1805-5.
- [2] KAMEŠ, Josef. *Alternativní pohony automobilu*. BEN, Praha, 2004. 232 s. ISBN 80-7300-127-6.
- [3] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. *Automobilová paliva*. Grada Publishing a.s., Praha, 2005. 228 s. ISBN 80-247-0350-5
- [4] MOREY, Bruce. *Future automotive fuels and energy*. SAE International, 2013. ISBN 978-0-7680-7502-1
- [5] VLK, František: *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno 2004. 234 s. ISBN 80-239-1602-5

Internetové zdroje:

- [6] ABS - portál.cz. *Evropská komise, inteligentní dálnice a plovoucí vozidla* [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/doprava/evropska-komise-inteligentni-dalnice-a-plovouci-vozidla
- [7] Vítejte na zemi.cz. *Individuální automobilová doprava*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=individualni_automobilova_doprava&site=doprava
- [8] Vítejte na zemi. *Převravní výkon*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=prepravni_vykon&site=doprava=doprav
- [9] cs.wikipedia.org. *Brownfields*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.cs.wikipedia.org/wiki/Brownfields
- [10] Hybrid.cz. *Parkování CNG aut v garážích stále naráží na problémy*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.hybrid.cz/parkovani-cng-aut-v-garazich-stale-narazi-na-problemy
- [11] cs.wikipedia.org. *Zóny placeného stání*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%B3ny_placen%C3%A9ho_st%C3%A1n%C3%AD_v_Praze
- [12] Komaparking.cz. *Automatické Parkovací Systémy*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.komaparking.cz/
- [13] Nařízení č. 272/2011 Sb. o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.tzb-info.cz/pravni-predpisy/narizeni-c-272-2011-sb-o-ochrane-zdravi-pred-nepriznivymi-ucinky-hluku-a-vibraci
- [14] *Vibrace - informační leták*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.bozpinfo.cz/priloha/vibrace.pdf
- [15] Wikiskripta.eu. *Vibrace a lidský organismus*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.wikiskripta.eu/index.php/Vibrace_a_lidsk%C3%BD_organismus
- [16] *Vibrace - přednáška*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.is.muni.cz/el/1411/podzim2009/VLVL9X66c/um/vibrace.ppt

- [17] Virtuální laboratoř – měření. *Zdroje hluku v dopravních prostředcích se spalovacími motory*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/skripta/vlab/mereni/Ka05-01.htm>
- [18] Lukro.estranky.cz. *Aerodynamika aut*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.lukro.estranky.cz/clanky/aerodynamika-aut.html>
- [19] Tipcars.cz. *Aerodynamika – cesta za nízkou spotřebou*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.tipcars.com/magazin-aerodynamika-cesta-za-nizkou-spotrebou-5548.html>
- [20] Bridgestone.cz. *Legislativa o značení pneumatik*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.bridgestone.cz/osobni-pneumatiky/your-journey/legislativa-o-zna%C4%8Den%C3%AD-pneumatik/
- [21] Oponeo.cz. *Hluk z pneumatik*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.oponeo.cz/clanek/hluk-pneumatik>
- [22] Belgian road research centre. *Noise annoyance by road traffic*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: http://www.brrc.be/brrc/e15/e15_02i1.php#
- [23] Autoforum. *EU schválila emisní limit 95 g CO₂/km*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/zajimavosti/eu-schvalila-emisni-limit-95-g-co2-km-prechodne-obdobi-bude-do-roku-2022/>
- [24] Zavolantem. *Čím jsou emise nebezpečné?*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.zavolantem.cz/clanky/emise-cim-jsou-nebezpecne-prvni-cast>
- [25] Arnika. *Látky znečišťující ovzduší*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://arnika.org/latky-znecistujici-ovzdusi>
- [26] Autolexicon. *Katalyzátor*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/katalyzator/>
- [27] Autolexicon. *Lambda sonda*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/lambda-sonda/>
- [28] Jakopravitauto. *Stechiometrický poměr*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.jakopravitauto.cz/index.php/slovnicek-pojmu/13-stechiometricky-pomer-pomer-vzduch-palivo>
- [29] Elit. *Filtry pevných částic*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.elit.cz/produkty/filtry-pevnych-castic-dpffap.html>
- [30] Tipcars. *Filtry pevných částic jsou casovanou bombou*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.tipcars.com/magazin-filtry-pevnych-castic-jsou-casovanou-bombou-4645.html>
- [31] Autolexicon. *SCR*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/scr-selective-catalytic-reduction/>
- [32] Evýfuk. *Výfuk, částí výfuků a jeho funkce*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.evufuk.cz/co-je-to-vyfuk/>
- [33] Continental. *Contisilent*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: http://www.continental.cz/www/download/pneumatiky_cz_cz/temata/osobni_pneu/leaflet_cz.pdf
- [34] Urbanistické středisko Ostrava, s.r.o. *Snižování hluku z automobilové dopravy*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: http://www1.uso.cz/public/SKV02/DAZP/8_PPT_SNI%C5%BDOV%C3%81N%C3%8D_HLUKU_Z_AUT_DOPRAVY_2.pdf
- [35] Fakulta stavební, ČVUT. *Protihlukové technologie*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://d2051.fsv.cvut.cz/predmety/stpk/protihlukovetechnologie.pdf>

- [36] Dopravníinfo. *PDZ a ZPI*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.dopravniinfo.cz/promenne-dopravni-znacky-a-zarizeni-pro-provozni-informace>
- [37] Rozhlas. *RDS-TMC*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.rozhlas.cz/zelenavlna/rds-tmc/zprava/rdstmc-nase-navigace-vase-pohodova-jizda-199379>
- [38] Dopravníinfo. *Liniové řízení provozu*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.dopravniinfo.cz/liniove-rizeni-provozu
- [39] Správa veřejného statku města Plzně. *Koordinace řízení – zelená vlna*. [online]. [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: www.svsmp.cz/Files/svs/svetelna_signalizace/KoordinaceRizeni-ZelenaVlna.pdf
- [40] Auto.idnes.cz. *Praha chce přesvědčit lidi, aby se o auta podělili*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/carsharing-v-praze-0nr-automoto.aspx?c=A140129_125704_automoto_fdv
- [41] Agrofert.cz. *Na biopaliva stát vyměří daň*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: [41] <http://www.agrofert.cz/?3413/na-biopaliva-stat-vymeri-dan>
- [42] Multimediaexpo.cz. *Bionafta*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.multimediaexpo.cz/mmecz/index.php/Bionafta>
- [43] Seta.cz. *SETADIESEL – směsná motorová nafta*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.seta.cz/velkoobchod-phm>
- [44] Biom.cz. *Kapalná biopaliva – cíle a perspektivy*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kapalna-biopaliva-cile-a-perspektivy>
- [45] Ethanolshop.cz. *Ethanol E85*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.ethanolshop.cz/content/7-o-ethanolu>
- [46] Lpg-cng.ochranamotoru.cz/. *Základní informace o CNG*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://lpg-cng.ochranamotoru.cz/auto-autobus-jizda-na-plyn-palivo-zemni-cng.htm>
- [47] Magicacustic.cz. *Přestavba auta na CNG*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.magicacustic.cz/wordpress/prestavby-lpg-cng-e85/prestavba-auta-na-cng/>
- [48] Cng.cz. *Zkapalněný zemní plyn – LNG*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.cng.cz/cs/alternativni-pohonne-hmoty-126/>
- [49] Pohonnatechnika.cz. *Škola – Motory*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory>
- [50] Battex.info. *Hermetické akumulátory*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.battex.info/?id=4>
- [51] Nazeleno.cz. *Vodíkový pohon*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/vodikovy-pohon.dic>
- [52] Fueleconomy.gov. *How Fuel Cells Work*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: https://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_PEM.shtml
- [53] Hytep.cz. *Účinnost pohonu vozidel*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.hytep.cz/cz/clanky/kategorie-clanku/clanky/431-ucinnost>
- [54] Bmw.cz. *Rekuperace brzdné energie*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: http://www.bmw.cz/cz/cs/insights/technology/efficient_dynamics/phase_2/technologies/brake_energy_regeneration.html

- [55] Autolexicon.net. *KERS*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/kers-kinetic-energy-recovery-system/>
- [56] Photo.proaktiva.eu. *Gyrobús: a great idea takes a spin*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: http://photo.proaktiva.eu/digest/2008_gyrobus.html
- [57] Hybrid.cz. *Setrvačník – KERS*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/setrvacnik-kers-v-automobilech-volvo>
- [58] Toyota.com. *Hybrid prius*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.toyota.com/prius/>
- [59] Nissan.cz. *Nissan LEAF*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.nissan.cz/CZ/cs/vehicle/electric-vehicles/leaf.html>
- [60] Elektrickévozy.cz. *Chevrolet VOLT*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://elektrickevozy.cz/clanky/chevrolet-volt-elektromobil-s-prodlouzenym-dojezdem/>
- [61] Auto.idnes.cz. *Chevrolet VOLT*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/chevrolet-volt-druhe-generace-premiera-d9m-ak-aktual.aspx?c=A150114_110317_ak_aktual_ada
- [62] Teslamotors.com. *Tesla S*. [online]. 23.5.2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.teslamotors.com/models>

Ostatní zdroje

- [63] NEUBERGOVÁ, Kristýna. *Hluk a kvalita ovzduší, 12TEPR [přednáška]*. Praha: ČVUT FD, 12. prosince 2013
- [64] FALTUS, Vladimír. *Informační systémy, 12DTEL [přednáška]*. Praha: ČVUT FD, 24. Října 2013
- [65] KŇÁKAL, Martin. *LŘD na SOKP a D1, 12TEPR [přednáška]*. Praha: ČVUT FD, 11. Prosince 2013
- [66] First, Jiří. *Energetická analýza dopravy*. Soubor přednášek, Praha: ČVUT FD, 2009
- [67] Plomer, Jan. *Diplomová práce*. Odvození výpočtu, Praha: ČVUT FS, 2002

Obrázky

- [68] <http://issar.cenia.cz/issar/page.php?id=1894>
- [69] http://viteitenazemi.cz/cenia/index.php?p=udrzitelna_doprava_ve_mestech&site=doprava
- [70] <http://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/218-pusobeni-zvuku-v-case-ekvivalentni-hladina>
- [71] http://www.khshk.cz/e-learning/kurs2a/kapitola_17_ekvivalentn_hladina_akustickho_tlaku.html
- [72] <http://www.la-ma.cz/?p=652>
- [73] <http://www.bozpinfo.cz/priloha/vibrace.pdf>
- [74] <http://www.autospeed.com/cms/article.html?&A=108676>
- [75] <https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/FIN%20User%20guide%20-%20tyres.pdf>
- [76] <http://www.e-pneumatiky.cz/info/eu-znaceni-pneumatik-dle-evropske-unie-energeticke-stitkovani.html>
- [77] <http://www.utwente.nl/ctw/tm/research/projects/SVW/>

- [78] <http://www.autosap.cz/zakladni-prehledy-a-udaje/slozeni-vozoveho-parku-v-cr/>
- [79] http://www.mechmes.websnadno.cz/pri-teo-204_01_emiseskodlivinvevyfukovychplynech/
- [80] <http://zpravy.aktualne.cz/velikost-prachovych-castic/r~i:photo:323309/r~i:article:675315/>
- [81] <http://copernicus.jika.name/zakladni-informace-a-princip-dpz>
- [82] http://fyzweb.cz/materialy/kacovsky/fotometricke_veliciny.pdf
- [83] <http://www.addisonauto.com/english/services/mechanical-shop/exhaust>
- [84] <http://www.preciousmetals.umicore.com/recyclables/SAC/catalyticconverter/>
- [85] <http://www.lambdasondy.wbs.cz/>
- [86] <http://ppcdefsolutions.com/def/understanding-def/>
- [87] <http://gearheads.org/your-cars-mufflertuned-like-a-fine-instrument/>
- [88] <http://auto.howstuffworks.com/muffler3.htm>
- [89] <http://www.pirelli.com/tyre/cz/cs/news/category/truck-tires/page/2/>
- [90] <http://www.tyrereviews.co.uk/Tyre/Hankook/Ventus-V12-evo2.htm>
- [91] <http://www.yokohamathailand.com/en/Yokohama-ADVANDB.html>
- [92] FALTUS, Vladimír. *Informační systémy, 12DTEL [přednáška]*. Praha: ČVUT FD, 24. Října 2013
- [93] <http://www.techmagazin.cz/novinka/226>
- [94] <http://auto.sme.sk/c/2495917/co-je-to-rds-tmc.html>
- [95] KŇÁKAL, Martin. *LŘD na SOKP a D1, 12TEPR [přednáška]*. Praha: ČVUT FD, 11. Prosince 2013
- [96] KAMEŠ, Josef. *Alternativní pohony automobilu*. BEN, Praha, 2004. 232 s. ISBN 80-7300-127-6.
- [97] http://www.subaru.cz/lpg_technika.html
- [98] <http://www.fedorauto.cz/prestavby-vozidel?id=48&action=detail&oid=3029727&nid=1708>
- [99] <http://www.cng.cz/cs/alternativni-pohonne-hmoty-126/>
- [100] <http://my.teslamotors.com/forum/forums/saleen-tesla-gear-ratio?page=1>
- [101] <http://www.h2shop.cz/index.php?p=pem>
- [102] https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_vehicle_drivetrain
- [103] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Gyrobus#/media/File:Gyrobus aan het opladen.jpg>
- [104] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gyrobus_G3-interior2.jpg
- [105] http://www.motortrend.com/roadtests/sedans/1307_volvo_s60_flywheel_kers_p_rototype_first_drive/
- [106] <http://ecomento.com/2014/03/24/2015-toyota-prius-this-is-what-toexpectvideo/>
- [107] <https://www.flickr.com/photos/toyota-europe/6759334709>
- [108] <http://www.extremetech.com/extreme/136894-will-high-mileage-nissan-leafs-need-costly-battery-replacements-soon>
- [109] <http://www.pluginamerica.org/vehicles/general-motors-chevrolet-volt>
- [110] <http://www.auto.cz/ny-times-kritizuje-kratky-dojezd-tesly-model-s-vyrobce-odmita-72880>
- [111] https://en.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S
- [112] <http://www.dynamatic.com/technology/how-it-works.html>
- [113] <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/updated-jec-well-wheels-study-automotive-fuels-and-powertrains>
- [114] <http://towipage.webzdarma.cz/spotreba.html>