

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: Konstruování strojů a technických zařízení
(N0715A270017)

Studijní specializace: Konstruování vozidel a manipulační techniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Modifikace pohonu nákladního vozidla hybridní architekturou

Autor: **Bc. Martin BUŇATA**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Ladislav NĚMEC, CSc.**

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin BUŇATA**
Osobní číslo: **S19N0121P**
Studijní program: **N0715A270017 Konstruování strojů a technických zařízení**
Studijní obor: **Konstruování vozidel a manipulačních zařízení**
Téma práce: **Modifikace pohonu nákladního vozidla hybridní architekturou**
Zadávající katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Modifikujte stávající pohon nákladního vozidla 8x8 s cílem akcelerace 0-80km/h za 25s. Pro modifikaci využijte hybridní architektury a to hybridní pohon spojující ICE a EM. Navrhněte vhodnou architekturu pohonu, včetně hrubé integrace komponentů do podvozku vozidla. Kompletní architekturu ověřte pomocí matematického simulačního modelu.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání

Osnova diplomové práce:

1. *Rešerše pohonné architektury stávajících nákladních vozidel*
2. *Rešerše hybridních pohonů*
3. *Návrh zvolené architektury*
4. *Ověření pomocí simulačního modelu*

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Doporučená literatura:

[1] VLK, F. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: F. Vlk, 2004. ISBN 80-239-1602-5.

[2] KAMEŠ, J. *Alternativní pohony automobilů*. Praha: BEN – Technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-127-6

Podkladové materiály, výkresy, prospekty, katalogy apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Ladislav Němec, CSc.**
Katedra konstruování strojů

Konzultant diplomové práce: **Jiří Černý**
AKKA Technologies Group

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2021**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské/diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Němcovi za odborné vedení diplomové práce. Velkou pomocí byli cenné rady, věcné připomínky a rychlé reakce při zpracování práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Černému, za odborné konzultace a specializovaný pohled na věc.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Buňata	Jméno Martin
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270017 – Konstruování strojů a technických zařízení	
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Němec, CSc.	Jméno Ladislav
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KKS	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Modifikace pohonu nákladního vozidla hybridní architekturou	

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	52	TEXTOVÁ ČÁST	52	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce se zabývá hybridní technologií pro oblast pohonů nákladních vozidel. Podstatou teoretické části je získání obecného přehledu v této problematice. Na základě získaných poznatků je v praktické části realizován projekční návrh hybridního vozidla 8x8. Návrh je ověřen simulací a integrován do fiktivního vozidla.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Pohon, vozidlo, motor, elektromotor, akumulátor, Li-ion, náprava, převodovka, blok, řídicí jednotka, měnič, proud, napětí, hybrid, výkon, zrychlení</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Buňata	Name Martin	
STUDY PROGRAMME	N0715A270017 – Design engineering of machines and technical devices		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) doc. Ing. Němec, CSc.	Name Ladislav	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Modification of truck drive by hybrid architecture		

FACULTY	Mechanical engineering	DEPARTMENT	KKS	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 a ekvivalentů A4)

TOTALLY	52	TEXT PART	52	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULT AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis deals with hybrid drive technology for trucks. The essence of the theoretical part consists of acquiring sufficient knowledge in this field. Main goal of the practical part is a projection design of a hybrid truck. The design is checked via simulation.
KEY WORDS	Drive, vehicle, engine, emotor, accumulator, Li-ion, axle, transmission, block, ECU, converter, current, voltage, hybrid, power, acceleration

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Strategie řešení	2
3	Koncepce nákladních vozidel.....	3
3.1	Stanovení konstrukčních znaků	3
3.2	Lehké nákladní automobily	3
3.3	Střední a těžké nákladní automobily	4
3.3.1	Kabiny	4
3.3.2	Nadstavby.....	4
3.4	Rozložení pohonu	5
4	Hnací agregát.....	7
4.1	Spalovací motor nákladního vozu	7
4.1.1	PACCAR MX-13	7
4.1.2	Tatra T3x-928.....	8
4.1.3	Cummins X15 Efficiency Series (2020)	8
4.1.4	Renault DXi 11 Euro4.....	9
4.1.5	Shrnutí motorů.....	9
4.2	Hydrodynamický měnič	9
4.3	Převodovky NV	11
4.3.1	ZF EcoSplit	11
4.3.2	ZF Traxon.....	12
4.3.3	Allison 4700 SP.....	13
4.3.4	Zhodnocení převodovek.....	13
5	Hybridní technologie.....	14
5.1	Dělení podle stupně hybridizace.....	14
5.1.1	mHEV.....	14
5.1.2	fHEV	14
5.1.3	pHEV.....	15
5.2	Podle uspořádání.....	15
5.2.1	Paralelním hybrid	15
5.2.2	Sériový hybrid	16
5.2.3	Kombinovaný hybrid.....	16
5.3	Dělení paralelního hybridu	17

5.3.1	P0.....	17
5.3.2	P1.....	17
5.3.3	P2.....	17
5.3.4	P3.....	17
5.3.5	P4.....	17
5.3.6	P5.....	17
5.4	Akumulátory.....	17
5.5	Elektrický motor.....	18
6	Možnosti realizace pohonu 8x8.....	21
7	Závěr rešerše.....	22
8	Projekční návrh platformy.....	23
8.1	Rozložení modulární platformy.....	23
8.2	Vymezení hlavních parametrů vozidla.....	24
8.3	Struktura paralelního hybridu.....	25
8.4	Struktura sériového hybridu.....	27
8.5	Porovnání řešení.....	28
9	Simulační model sériového hybridu s 8 elektromotory.....	30
9.1	Nastavení parametrů modelu.....	30
9.1.1	Spalovací motor.....	30
9.1.2	Motor-generátor.....	32
9.1.3	Elektromotor.....	32
9.1.4	Sestupná převodovka.....	34
9.1.5	Setrvačné charakteristiky a jízdní odpory.....	34
9.1.6	Akumulátor, řídicí strategie dobíjení.....	35
9.1.7	Jízdní cykly.....	35
9.2	Vyhodnocení modelů.....	36
9.2.1	Cyklus NEDC.....	36
9.2.2	Zrychlení vozidla.....	37
9.2.3	Cyklus stoupání.....	37
10	Projekční návrh pohonu vozidla.....	39
10.1	Návrh elektrických komponent.....	39
10.1.1	Blokové schéma obvodu.....	39
10.1.2	Akumulátor elektrické energie.....	40

10.1.3	Generátor.....	41
10.1.4	Elektromotor.....	41
10.2	Návrh mechanických komponent.....	42
10.2.1	Spalovací motor.....	42
10.2.2	Kuželové soukolí.....	42
10.2.3	Sestupné ozubení.....	44
10.3	Implementace pohonného ústrojí na nápravách.....	45
10.4	Elektrická výzbroj vozidla	46
10.5	Implementace ve fiktivním vozidle.....	47
11	Ekonomické zhodnocení	49
12	Závěr.....	52

Přehled použitých zkratk

Rpm / ot/min	-	Otáčky za minutu
L	-	Vzdálenost [m]
tkm	-	Tisíc kilometrů -
Kč	-	Korun českých
ICE	-	Motor s vnitřním spalováním
EM	-	Elektromotor
RSG	-	Generátor poháněný řemenem
Li-ion	-	Lithium iontový akumulátor
μ	-	účinnost [-]
m	-	hmotnost [kg]
F	-	síla [N]
P	-	Výkon [hp] / [W]
M	-	Moment [Nm] / [lb/ft]
p	-	Tlak [Pa]
V	-	Objem [l]
q	-	Teplo [W]
T	-	Teplota [°C]
U	-	Napětí [V]
I	-	Proud [A]
C	-	Kapacita [Wh] / [Ah]
t	-	čas [s]
v	-	rychlost [km/h] / [m/s]
I	-	Setrvačný moment [kg·m ²]
AGR/EGR	-	Systém zpětného vedení spalin
DPF	-	Filtr pevných částic
SCR	-	Selektivní katalytická redukce
TDI	-	Vznětový motor s turbodmychadlem
mHEV	-	Mild-hybrid
fHEV	-	Full-hybrid
pHEV	-	Plug-in-hybrid
NEDC	-	Nový evropský jízdní cyklus

i	-	převodový poměr [-]
S_H	-	Součinitel bezpečnosti v dotyku [-]
S_F	-	Součinitel bezpečnosti v ohybu [-]
S_{Hst}	-	Statická bezpečnost v dotyku [-]
S_{Fst}	-	Statická bezpečnost v ohybu [-]
LCC	-	cena životního cyklu
GPS	-	globální poziční systém

Seznam obrázků

Obrázek 1: Ford Transit [2].....	3
Obrázek 2: rám s motorem Tatra [3].....	4
Obrázek 3:Mercedes Actros [4]	5
Obrázek 4: zdvižená náprava u návěsu [5].....	6
Obrázek 5: Momentová charakteristika motoru MX-13[6]	7
Obrázek 6: motor Tatra [7].....	8
Obrázek 7: Momentová a výkonová charakteristika motoru X15 ES [8]	8
Obrázek 8: schéma hydrodynamického měniče [10]	9
Obrázek 9: Graf násobení momentu. Svislá osa - stupeň násobení. Vodorovná osa - poměr otáček. [11].....	10
Obrázek 10: Graf účinnosti měniče. Svislá osa - účinnost. Vodorovná osa - poměr rychlostí. [11]	10
Obrázek 11: Převodovka ZF EcoSplit [12].....	11
Obrázek 12: příklad pHEV vozidla - Octavia iV [15].....	15
Obrázek 13: Zjednodušené schéma paralelního hybridu	15
Obrázek 14: Zjednodušené schéma sériového hybridu.....	16
Obrázek 15: Integrace kombinovaného hybridu pomocí dvojité spojky [16].....	16
Obrázek 16: Li-ion článek 18650 o 3.7V [18]	18
Obrázek 17: Reprezentace účinnostních polí elektrického motoru svislá osa Torque (z angl. točivého momentu. Vodorovná osa Speed (z angl. otáčky). [19]	19
Obrázek 18: Momentové charakteristiky motoru HVH410-150 v závislosti na napětí. Svislá osa shaft torque(z angl. moment na hřídeli). Vodorovná osa Motor RPM (z angl. otáčky motoru). [19]	19
Obrázek 19: zjednodušené zobrazení motoru typu axial flux [20]	20
Obrázek 20: 8x8 systém Tatra [21]	21
Obrázek 21: projekční návrh modulární platformy.....	23
Obrázek 22: Diagram pro strukturu paralelního hybridu vozidla 8x8	26
Obrázek 23: Diagram struktury sériového hybridu vozidla 8x8	27
Obrázek 24: Model sériového hybridu.....	30
Obrázek 25: Výkonové a momentové mapy 3.0 biTDi. Levý graf Točivý moment [Nm], pravý graf je Výkon [HP] [22]	31
Obrázek 26: Trojrozměrná mapa proudu paliva Engine speed (otáčky motoru); Fuel mass flow (množství paliva); Engine Torque (točivý moment motoru).....	31

Obrázek 27: charakteristika motoru HVH250-090; vodorovná osa otáčky motoru, svislá točivý moment [23]	32
Obrázek 28: graf řízení výkonu a momentů elektromotoru	33
Obrázek 29: Trojrozměrná mapa spotřeby elektrické energie Machien Torque (točivý moment); Machine speed (otáčky); Electric power (elektrický výkon)	33
Obrázek 30: graf NEDC cyklu. Svislá osa - okamžitá rychlost; vodorovná osa – čas	35
Obrázek 31: graf cyklu pro ověření schopnosti stoupat	35
Obrázek 32: Výsledky NEDC sériový hybrid 8EM.....	36
Obrázek 33: graf zrychlení vozidla	37
Obrázek 34: Cyklus stoupání	38
Obrázek 35: zjednodušené blokové schéma elektrického obvodu.....	39
Obrázek 36: Audi CVUB [25]	42
Obrázek 37: Kuželová soukolí	42
Obrázek 38: pohyb pooloos kolem osy pastorku	43
Obrázek 39: Kuželové soukolí navazující na čelní ozubení	45
Obrázek 40: Implementace ústrojí na běžné nápravě.....	46
Obrázek 41: Implementace ve fiktivním vozidle 1	47
Obrázek 42: Implementace ve fiktivním vozidle axonometrický pohled zepředu.....	48

Seznam tabulek

Tabulka 1: výkonová a momentová charakteristika Renault DXi 11 [9].....	9
Tabulka 2: Parametry převodovky EcoSplit [12].....	12
Tabulka 3: Parametry ZF Traxon [13]	12
Tabulka 4: Parametry měniče momentu Allison [14]	13
Tabulka 5: základní parametry navrhovaného vozidla.....	24
Tabulka 6: setrvačnosti a hmoty – Ir- setrvačný moment k ose rotace	25
Tabulka 7: porovnání řešení	28
Tabulka 8: parametry akumulátoru 18650 [24].....	40
Tabulka 9: Parametry bloku akumulátoru	41
Tabulka 10: parametry menšího kuželového soukolí.....	43
Tabulka 11: Parametry většího kuželového soukolí	43
Tabulka 12: Součinitele bezpečnosti pro větší kuželové soukolí sloupec hodnot více vlevo – pastorek, hodnoty napravo - kolo	44
Tabulka 13: parametry čelního soukolí	44
Tabulka 14: Součinitele bezpečnosti pro čelní soukolí sloupec hodnot více vlevo – pastorek, hodnoty napravo - kolo	45
Tabulka 15: LCC konvenčního NV	49
Tabulka 16: LCC hybridní NV.....	50
Tabulka 17: Porovnání LCC	50

Seznam příloh

Příloha 1	-	Technické parametry
-----------	---	---------------------

1 Úvod

Pokud se řekne hybridní pohon, široké veřejnosti se vybaví osobní automobil, nejspíše Toyota Prius. Japonský výrobce byl v tomto odvětví průkopníkem, a to zejména z toho důvodu, že jako první relativně úspěšně dokázal nabídnout fungující koncepci. Právě tento model se vyrábí již od roku 1997. Až během pár posledních měsíců, let, téměř všechna nová vozidla disponují nějakou formou hybridního pohonu. Tento posun trval stejnou dobu v osobní dopravě jako v nákladní dopravě. Nabízí se otázka, proč trvalo tak dlouho, než se tato pohonná architektura rozšířila i mezi jiné výrobce a modely.

První faktor významně ovlivňuje i další, a tím je rozvoj elektroniky, čipů a řídicích systémů. Elektronické řídicí systémy jsou výrazně levnější, než tomu bylo dřív, rychlejší, a kompaktnější. To mělo za důsledek rozšíření řídicích jednotek do každého funkčního uzlu vozidla. Jako příklad může být Octavie první generace, která měla komfortní a řídicí jednotku, jedna zajišťovala spotřebiče jako světla, klimatizace, a druhá se starala výhradně o pohonný agregát a parametry s ním spojené. Dnešní Octavie (modelový rok 2021) má vlastní řídicí čip na téměř každý jednotlivý prvek výbavy. To samozřejmě znamená daleko lepší kontrolu všech parametrů vozidla, ale také jeho okolí. Decentralizace má za následek redukci chybných signálů a lze dosáhnout daleko přesnějšího řízení systémů. Pro pohon, a zejména hybridní je nesmírně důležité sledovat parametry důležité pro provoz spalovacího motoru. Jako drobná frakce výčtu může být teplota, vlhkost a množství nasávaného vzduchu, tlakové spády v okruhu vysokotlakého čerpadla common-rail nebo teplota paliva mezi nádrží, podávacím čerpadlem a filtrem. Korektní zpracování takových parametrů je důležité pro přesné dávkování paliva, objemu přítoku vzduchu a tím dosažení požadovaných výkonových parametrů, podlimitní emise zplodin a příznivé spotřeby paliva. Těchto dat jsou veliké objemy, a rovnice, které je popisují, by zkrátka elektronika nedokázala efektně zpracovat. Právě přesné řízení parametrů spalovacích motorů je jeden z klíčových faktorů pro smysluplnost hybridní architektury. Druhý faktor lze tedy shrnout jako rapidní rozvoj spalovacích motorů. Třetím faktorem je problematika, která je i dnes asi nejvíce limitujícím faktorem čistého elektropohonu a hybridních pohonů. Jsou to akumulátory. Nejrozšířenější typ – Li-ion je na trhu déle než zmíněná Octavie nebo Prius. Podléhají však rychlé zkráze v důsledku kolísání napětí, nabíjecích cyklů a hrozí u nich exploze. Právě pokrok čipů zde opět hraje důležitou roli. Na každém článku sestavy baterie je čip, který hlídá napětí na článku. Informaci předává řídicí jednotce akumulátoru a ten využívá ostatní články tak, aby zamezil ke ztrátě vlastnosti, či zničení článku. Akumulátory se však posunuli ze stavu „nevyužitelné pro osobní automobil“ do stavu „využitelné se značnými omezeními“.

Hybridizace pohonů se jeví jako technologie dneška a blízké budoucnosti. Jeho rozšíření u nákladních vozidel je stejně důležité, jako tomu je u osobních. Pokrok je souběžný, ale i díky medializaci osobních vozidel, se o nákladních tolik nemluví.

To, že je problematika hybridních pohonů velice aktuální, je jeden z hlavních důvodů volby tématu. Dalším je osobní zájem v této oblasti. Zejména v oblasti nákladních vozidel, které se tato práce bude týkat, má hybridní řešení veliký potenciál. Nákladní vozidla jsou většinou konstruována pro specifický druh provozu, který je relativně dobře odhadnutelný. A lze takový pohon naladit tak, aby tomuto provozu vyhovoval bez sebevětších odchylek. Naopak

vozidla pro náročné použití, jako třeba armádní nebo hasičská mohou využít hybridní spojení pro zlepšení dynamických vlastností, kdy je třeba nárazově špiček výkonů.

2 Strategie řešení

Obrovský pokrok v těchto odvětví umožňuje aplikovat hybridní architekturu i v oblastech nákladní dopravy, nebo speciální dopravy. Správná aplikace je zásadní pro smysluplnost řešení.

V úvodu rešerše je důležité porozumět problematice nákladních vozidel jako celku, jejich koncepcí, možnosti užití jednotlivých verzí a konstrukčního řešení. Pro návrh architektury pohonu je nutné znát stavební strukturu takového vozu. Spalovací motory, elektromotory a akumulátory jsou rozměrově velké, a právě zástavbové podmínky mohou být limitujícím faktorem při řešení.

Při seznámením se zástavbovými podmínkami je důležité navrhnout korektní pohon. Spalovací jednotka bude vybrána z dostupných na trhu. Bude pouze modifikována elektrickým systémem, obsahující elektromotor. U spalovacích motorů budou zkoumány zejména momentové charakteristiky a jejich schopnost plnit přísné emisní normy. Z charakteristik spalovacích motorů pramení výběr elektromotoru, který pohon bude modifikovat. Pro další řešení jsou nezbytnými parametry momentové charakteristiky, a pole efektivity. Možnosti spojení do hybridních celků budou zkoumány na nákladních i osobních vozech. V neposlední řadě je nutné ověřit možnosti napájení elektromotoru elektrickou energií.

Z poznatků získaných při rešerši budou sestaveny matematické modely vozidla s pohonem 8x8. Modely budou poskládány do hybridních architektur podle informací získaných během zkoumání této problematiky. Jelikož kombinací existuje velké množství, bude výběr zúžen na architektury, které mají největší potenciál splnit požadavky zadavatele. Z matematických modelů je očekáváno získání dat o schopnosti řešení naplnit základní parametry zadání jako zrychlení. Varianty, které zadání splňují, budou dále porovnány podle dalších důležitých parametrů, jako schopnost stoupat, efektivita pohonu či ekonomická stránka.

Cílem řešení bude hrubá zástavba zvolené architektury do stavební struktury vozidla. Hrubou zástavbou se rozumí projekční vypracování, a zjednodušené vypracování do technické dokumentace. Hlavní komponenty jako elektromotory, návrh akumulátorového zařízení atp. bude v souladu s matematickými modely. Technická dokumentace bude doplněna o parametry vyhovujících komponent, jako právě spalovací motor nebo elektromotor.

Očekávaným zlepšením oproti konvenčnímu pohonu pouze se spalovacím motorem je zlepšení dynamických vlastností, při zachování či snížení spotřeby paliva ve výkonově náročných situacích. Pro klidové přesuny o konstantních rychlostech je očekáváno výrazné zefektivnění systému. U pohonu bude snaha o práci v polích maximálních efektivit.

3 Koncepce nákladních vozidel

3.1 Stanovení konstrukčních znaků

Prvním důležitým krokem řešerše je stanovení důležitých konstrukčních a funkčních uzlů. Tento přístup výrazně zjednoduší a zefektivní následné zjišťování důležitých informací a parametrů u vzorových vozidel. Nákladní vozidla mají některé funkční uzly velmi podobné osobním automobilům, některé uzly jsou však významně odlišné. Důležité je proto znát koncepci nákladních vozidel

Jako nákladní automobil je možné definovat motorové vozidlo s minimálně čtyřmi koly. Vozidlo je dále určené pro dopravu nákladu. Nákladní vozidlo je často opatřeno tažným zařízením, umožňující táhnout přívěs nebo návěs. Tato vozidla spadají typicky do kategorie N1, N2 a N3. [1]

3.2 Lehké nákladní automobily

Pojmem lehký nákladní automobil se rozumí takové vozidlo, jehož užitečná hmotnost nepřesáhne 3,5t bez přívěsu i s přívěsem. Pro lehké nákladní vozidlo rozeznáváme především dva druhy koncepce. Vozidlo typu pick-up a dodávkový automobil. Takto řešené vozidlo má většinou čtyři kola a stačí na něj řidičské oprávnění B1.

Dodávkový automobil může být valník, nejčastěji se však setkáváme se skříňovou stavbou. Zde je kabina oddělena od ložného prostoru pevnou stěnou, kovovou nebo plastovou. U menších vozidel je stěna průhledná pro usnadnění manipulace s vozidlem zejména ve městě a při parkování. Je tak učiněno například mřížováním nebo plexisklem.



Obrázek 1: Ford Transit [2]

Pick-up je velmi podobný osobnímu automobilu. Prostor pro cestující je fixně oddělen od otevřeného nákladního prostoru. Prostor je uzavíratelný plachtou, nebo dedikovaným víkem. Mezi zástupce třídy pick-up pro evropský trh patří Ford Raptor, VW Amarok, nebo například Tesla Cybertruck.

3.3 Střední a těžké nákladní automobily

Pojmem střední nákladní automobil se rozumí takové vozidlo, jehož užitečná hmotnost je minimálně 3,5t, avšak nepřesáhne 10t bez přívěsu i s přívěsem. Jako těžký nákladní automobil se rozumí takové vozidlo, jehož hmotnost je vyšší než 10t, bez přívěsu i s přívěsem. V závislosti na určení mají tyto vozidla i více než čtyři kola. Nosným konstrukčním celkem je rám, zpravidla žebřinový. Dalším celkem je pak kabina. Oddělený prostor pro obsluhu vozidla usazený na žebřinovém rámu. Poslední částí je nástavba. Ta je různá podle využití vozidla a přepravovaného nákladu.



Obrázek 2: rám s motorem Tatra [3]

Na fotce je patrné konstrukční řešení této tříuzlové koncepce. Obrovskou výhodou je modularita řešení, kdy se výrobce může soustředit na vývoji pouze pár podvozků a kombinovat je dle přání zákazníka. Dalším plusem tohoto řešení je servisovatelnost vozidla. Pro lehčí servisní úkony na pohonném ústrojí stačí odklopit kabinu a mechanik má výborný přístup. Pro náročnější servis lze relativně jednoduše vozidlo rozdělit. Jednoduchost a dobrá servisovatelnost je důležitá o to více, že se mnoho vozidel specializuje na terénní a armádní aplikace. V takových podmínkách pak není možné vozidlo, jako například u osobního automobilu, naložit na přívěs a odtáhnout do nejbližšího servisního střediska.

3.3.1 Kabiny

Typ kabiny závisí na použití vozidla, zvoleném motoru a pohonu vozidla. Podle umístění motoru na rámu je významně ovlivněna koncepce kabiny. Pro motor umístěný vpředu, jako na horním obrázku, je kabina kapotová. Tohle řešení je hojně užívané u amerických tahačů. Nejklasičtější umístění motoru je za kabinou, to dovoluje použití trambusové koncepce.

3.3.2 Nadstavby

Nadstaveb pro nákladní automobily existuje celá řada. Jak již bylo zmíněno, samotné provedení stavby je definováno především předpokládaným převáženým nákladem a individuálním přáním jednotlivých zákazníků. Přesto je možné nadstavby rozdělit na pár základních typů.

Klasickým zástupcem je skříňový nákladní automobil. Toto řešení patří k velmi univerzálním. Jedná se o uzavřenou konstrukci, která je přístupná různými otvory a dveřmi. Univerzální skříňové vozidlo může využít firma zabývající se stěhováním nábytku, zahradnická firma, převoz menších strojů a v některých výjimečných případech i pro převoz sypkých materiálů, tady ovšem konstrukce není tolik výhodná jako u vozidla typu sklápěčka.

U sklápěčkové nadstavby je konstrukce otevřená. Umožňuje tedy například dělníkům vylézt na nadstavbu a materiál jednoduše shazovat dle potřeby. Pro vyšší efektivitu jsou tyto vozidla rovněž opatřena sklápěcím mechanismem. Většinou je nadstavba uložena na dvou pantech a sklápění se realizuje hydromotorem. Hydraulická soustava je pak poháněna vedlejším okruhem pohonné jednotky, nebo přímo dedikovaným elektromotorem.

Valníkový nákladní vůz je podobný sklápěčce. Konstrukce je opět otevřená. Samotný valník je ovšem možné z vozu snadno sundat dedikovaným mechanismem. Dost často je takový nákladní vůz doplněn hydraulickou rukou a ta mu s tím pomáhá. Tyto vozy jsou využívány především stavebními a zahradnickými firmami. Umožňují snadnou nakládku i vykládku materiálu (štěrk, písek, posečená tráva). A vůz dokáže převést i samotné stroje (bagry, traktory, ridery).

Posledním základním typem je tahač návěsů. Jedná se o vůz často označovaný jako TIR. Konstrukce vozu je uzpůsobena tahání velkých návěsů. Primární zaměření pro tyto vozy jsou dálniční cesty, kdy se vozí vše možné. Od osobních automobilů, po jídlo do supermarketů. Jedná se v podstatě o vozidlo bez nadstavby. Samotný tahač je na rámu podvozku opatřen tažným zařízením. Kabina tvoří polovinu délky celého stroje, a vzhledem k dílkovému využití je opatřena prostorem pro spaní, ať už pro více střídajících se řidičů, nebo pro jednoho, který zastavil na odpočívadle. Tahače mají obvykle dvě nápravy, ale mohou mít až čtyři.



Obrázek 3: Mercedes Actros [4]

Existují i speciální nadstavby, vytvořené typicky pro jeden účel, například hasičské či armádní vozy, tyto vozy jsou spíše kusovou záležitostí.

3.4 Rozložení pohonu

Základní rozložení pohonu pro nákladní vozidlo je pohon 4x2, tedy 4 kola, z nichž jsou dvě poháněná. Je to nejběžnější architektura, vhodná pro většinu malých až středně velkých nákladních vozidel. Typickým zástupcem této skupiny je třeba již zmiňovaný Ford Transit, nahlédneme-li do nedávné historie, patří do této skupiny třeba typický lehký nákladní vůz Avia A30.

Z důvodu legislativních i konstrukčních se vozy pro větší zátěž opatřují dalšími nápravami. Běžná povolená zatížení pro pneumatické pružiny jsou 8-10t, pro kombinaci pneumatické pružiny a vinuté pružiny je to až 16t. Další nápravy a kola nejen zvyšují komplexnost konstrukce, zvyšují rovněž jízdní odpory. Zajímavým řešením je zdvihatelná náprava, která je zvednutá do doby, než je třeba její činnost pro splnění podmínek maximální přípustné hmotnosti. Toto řešení je používané zejména u třinápravových vozidel 6x2 nebo u návěsů. Zdvihem nápravy se dosáhne snížení jízdních odporů, protože se přestane dotýkat s vozovkou.



Obrázek 4: zdvižená náprava u návěsu [5]

Nejjednodušší konstrukcí pohonné architektury disponují právě vozidla architektury 4x2, popř. 6x2. u těchto koncepcí je poháněná pouze zadní náprava. Z motoru uloženého podélně – osa motoru je kolmá na osu kol (v přímém směru). Z motoru je přes hydrodynamický měnič (HM) přenášén moment do převodovky (P), následně rozvodovky (R) a přes kardanovou hřídel (KH) k diferenciálu (D) poháněné nápravy.

Pokud je zvýšen stupeň pohonu na $nx4$, tedy n – libovolný počet kol a 4 poháněná kola. Zvyšuje se složitost konstrukce, a z toho plynoucí ztráty v jednotlivých uzlech. Rozvodovka zde již pouze nemění převodový poměr, moment, ale rozděluje i moment do dalšího výstupu. Tím může být další kardan a diferenciál. Jednoduchým výpočtem, uvažujeme-li ztráty v každém uzlu 5 % lze zjistit rozdíl v účinnosti pohonu. Pro pohon 4x2 to bylo

$$\mu_{4x2} = (1 - 0,05)^{\text{počet uzlů}} = (1 - 0,05)^{\text{počet}(HM,P,R,KH,D)} = 0,95^5 \cong 77,4 \%$$

$$\mu_{4x4} = (1 - 0,05)^{\text{počet uzlů}} = (1 - 0,05)^{\text{počet}(HM,P,R,KH,KH,D,D)} = 0,95^7 \cong 69,8\%$$

Tento výpočet je spíše ilustrační, nezapočítává ztráty na kolech a nepočítá s podloženými účinnostmi. Nicméně jasně ukazuje, že složitější řešení výrazně snižuje účinnost. Architekturu pohonu je důležité stavět co nejjednodušší. Pohon více náprav je důležitý pro náročné aplikace větší zátěže nebo náročného terénu. U některých řešení lze však přidání poháněné nápravy obejít. Například pro zvýšení adheze – lepší rozložení přenosu momentu lze zvětšením šířky pneumatik. Implicitním řešením je použít pneumatiku větší šířky, lze ale také přidat na danou nápravu pár kol. Vozidlo pak bude mít mnohem větší adhezi, ale odpory a ztráty se zvýší mnohem méně, než když by byla přidána další poháněná náprava.

4 Hnací agregát

V předchozí kapitole byla zjednodušeně definována koncepce nákladních vozidel a základní rozložení pohonu. V této kapitole bude věnována jednotlivým uzlům větší pozornost, a to zejména za účelem stanovení důležitých parametrů pro následný výpočtový model.

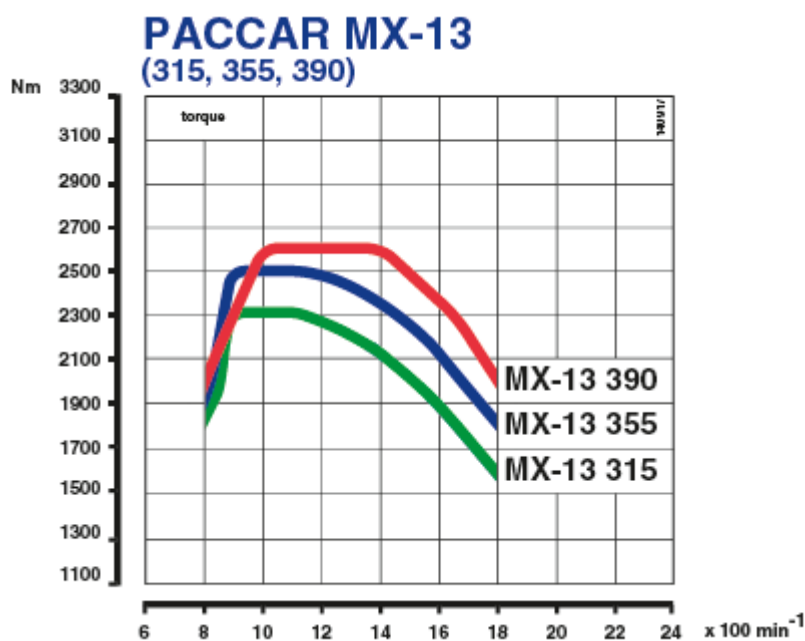
4.1 Spalovací motor nákladního vozu

Spalovací motor je srdcem nezávislého pohonu nákladních vozidel. Typicky se jedná o velkoobjemové vznětové jednotky, které oproti osobním automobilům nedosahují tak vysokých otáček, mají ale velmi vysoký moment.

4.1.1 PACCAR MX-13

Řadový šestiválec o objemu 12,9L PACCAR MX-13 je hojně využívaným motorem pro nákladní vozidla, je možné se s ním setkat ale i v aplikacích jako autobus. Blok a hlava jsou odlitky z litiny označované jako CGI, jedná se o materiál složením někde mezi šedou a tvárnou litinou. Díky tomu blok nešíří zbytečné hluky a vibrace. Kliková hřídel je ocelová, kovaná bez protizávaží. Chlazení je pomocí kapaliny, poháněné plně variabilní vodní pumpou.

Palivovou směs připravuje systém common-rail, který dosahuje tlaku paliva až 250 MPa. Motor je přepřňovaný turbodmychadlem. Mezi zařízení snižující emise patří například EGR (zpětné vedení výfukových plynů), nebo DPF (filtr pevných částic) nebo SCR (selektivní katalytická redukce – také známé jako AdBlue). Splňuje normy Euro 3/5/6 podle aplikace. [6]

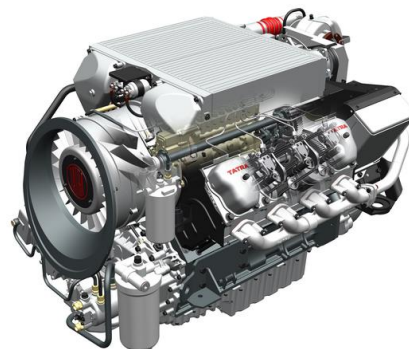


Obrázek 5: Momentová charakteristika motoru MX-13[6]

4.1.2 Tatra T3x-928

Tento motor z Kopřivnické produkce se může zdát konstrukčně zastaralý. Je totiž chlazený vzduchem. Je pro něj mnohem náročnější udržovat stálou teplotu a z toho plynnou i horší emisní výsledky. Osmiválci do V o objemu 12,7L pomáhají emise snižovat systémy EGR, DPF a SCR ve variantě T3D. Varianta T3B plní normu Euro 2; T3C Euro 3 a T3D plní normu Euro 4,5.

Výkonové varianty disponují výkonem 230, 285 a 325kW; resp. 1400-2100 Nm. Výhodou těchto motorů je zejména jednoduchost konstrukce a absence složité řídicí elektroniky. Hodí se tedy do horších podmínek, kde vynikne jejich spolehlivost a jednoduchost. [7]

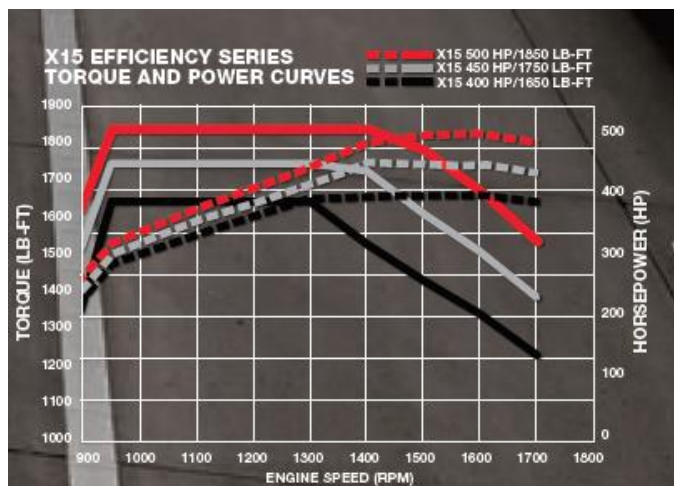


Obrázek 6: motor Tatra [7]

4.1.3 Cummins X15 Efficiency Series (2020)

Motory Cummins jsou rovněž hojně používané, používá je například i tuzemská Tatra. Jelikož je paleta motorů této firmy skutečně pestrá, jako zástupce byl vybrán motor X15 ES, jelikož je pro střední až těžké aplikace, a jedná se o aktuální sérii roku 2020. Výrobce slibuje vysokou efektivitu, nízkou spotřebu, nízké emise a dlouhou životnost i spotřebních komponent.

Výkon a moment motoru jsou skutečně velmi vysoké, jak ukazuje graf níže. Moment je uváděn v jednotkách lb-ft, evropským jednotkám odpovídá 1850 lb/ft – 2500 Nm; 1750 lb/ft – 2370 Nm; 1650 lb/ft – 2240 Nm.[8]



Obrázek 7: Momentová a výkonová charakteristika motoru X15 ES [8]

4.1.4 Renault DXi 11 Euro4

Renault patří mezi další velmi rozšířené výrobce motorů pro nákladní vozidla. Vodou chlazený řadový šestiválec o objemu 10,8 L splňuje emisní normu Euro 4. Jako reprezentant byl vybrán, protože se velmi podobá výše zmíněným pohonům, jak konstrukcí, tak výkonem a momentem.[9]

Tabulka 1: výkonová a momentová charakteristika Renault DXi 11 [9]

Výkon při 1900 rpm	Moment při 1150 rpm
272 kW (370 hp)	1795 Nm
302 kW (410 hp)	1948 Nm
331 kW (450 hp)	2151 Nm

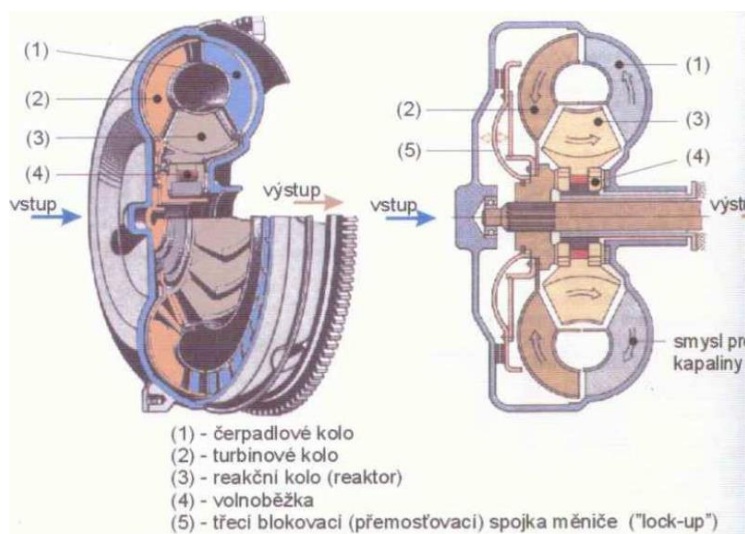
4.1.5 Shrnutí motorů

Byli vybráni čtyři zástupci motorů typických pro český trh. Motory dosahují maximálních výkonových a momentových parametrů mezi 1000-2000 rpm, které bez problému přesahují 2000 Nm. Optimální využití je tedy spektrum přibližně 1000 rpm. Tomu je nutné přizpůsobit zbytek pohonu, zejména převodovku.

Motor pro vlastní studii bude vybrán až v další části práce, prozatímní kandidáti jsou motory od firmy Cummins a druhým kandidátem motory od firmy Paccar, kvůli příznivé efektivitě, evropské produkci a vysokému výkonu. Například motor Tatra je nevhodný, protože jeho řízení je realizováno spíše mechanickou formou. Pro hybridní aplikaci, a z toho plynoucí vysokou efektivitu a nízké emise je vhodné motor řídit přesně.

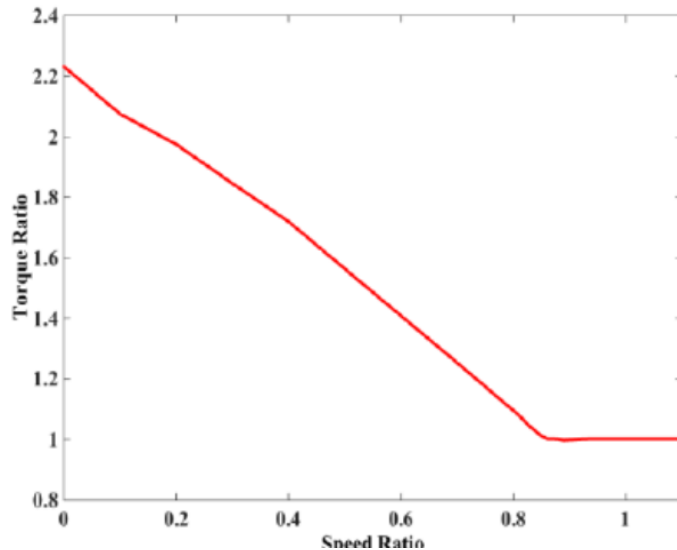
4.2 Hydrodynamický měnič

Hydrodynamický měnič, je zařízení, které umožňuje přenos momentu mezi motorem a převodovkou. Pomáhá vyrovnávat otáčky při akceleraci a brždění a násobí moment. Skládá se ze čtyř hlavních částí.



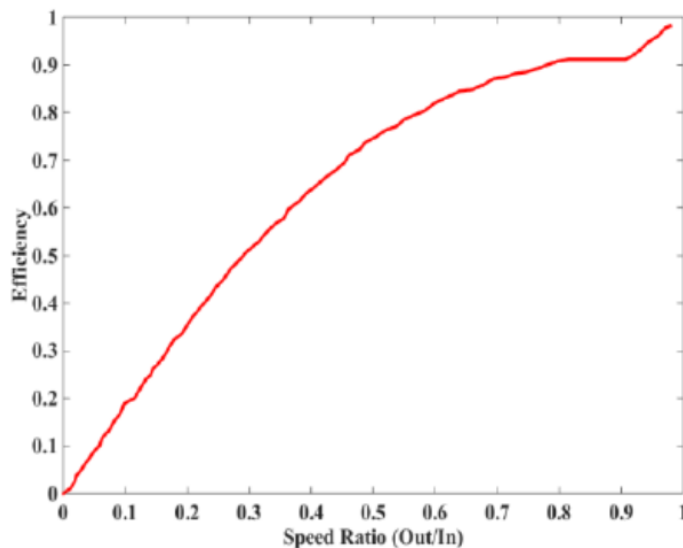
Obrázek 8: schéma hydrodynamického měniče [10]

První částí je čerpadlo, to je pevně spojené s motorem a dává kinetickou energii kapalině. Ta je vytlačována od středu a proudí do druhé části – turbíny. Ta je pevně spojena s převodovkou. Může mít rozdílné otáčky oproti čerpadlu. Kapalina je turbínou hnaná na reaktor uložený na volnoběžce. Ten jednak upravuje směr proudění, ale také zvyšuje tlak. Tlak kapaliny je zvyšován geometrií proudění kapaliny, která závisí na rozdílu otáček. Zvýšení tlaku odpovídá zvýšení momentu.



Obrázek 9: Graf násobení momentu. Svislá osa - stupeň násobení. Vodorovná osa - poměr otáček. [11]

Při dosažení poměru otáček přibližně 0,85 se sepne blokovácí spojka. Ta pevně uzamkne měnič mezi motorem a převodovkou. Nedochází tak ke ztrátám vlivem vnitřního tření kapaliny. Na obou grafech charakteristiky měniče je to patrné náhlou změnou směrnice křivky.



Obrázek 10: Graf účinnosti měniče. Svislá osa - účinnost. Vodorovná osa - poměr rychlostí. [11]

4.3 Převodovky NV

Již z momentových a výkonových charakteristik spalovacích motorů nákladních vozidel, je zřejmé, že převodové uspořádání se liší oproti převodovkám v osobních automobilech. První faktor jsou samozřejmě velikosti samotného točivého momentu, kdy moderní osobní vozidlo s přeplňováním má točivý moment většinou do 350Nm, motor nákladního vozidla má tuto hodnotu bez problému desetinásobnou. Druhým důležitým parametrem je spektrum použitelných otáček pro motor nákladního vozidla. Z křivek je možné odečíst přibližné spektrum mezi 1000 – 1800 ot/min . Zde je opět obrovský rozdíl. Pro vozidlo je tedy použitelné spektrum cca 800 otáček. Převodovka pak musí být navržena na krátko, což implikuje mnohem více převodových stupňů. Na druhou stranu provozní rychlost nákladního vozidla je relativně nízká. Jako maximální rychlost je přibližně 110km/h. Při vhodném zvolení převodových poměrů motor dokáže pracovat v opravdu optimálních otáčkách.

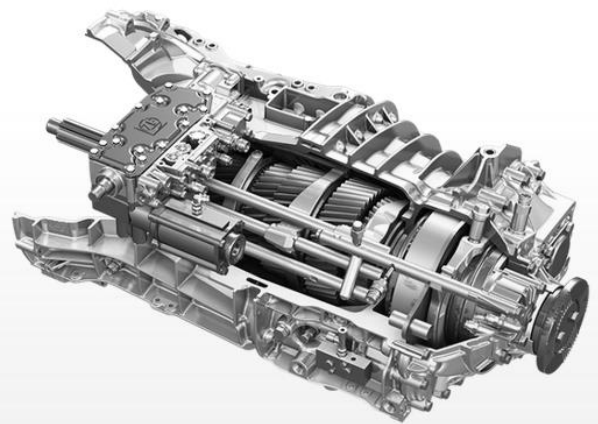
Rozsah stupňů převodovek je velice pestrý, v závislosti na předpokládaném použití vozidla. Terénní či armádní vozy mají často pouze 6-ti stupňovou převodovku, jejich maximální rychlost je také výrazně nižší, například 65km/h. Dálniční křižníky mají klidně 16° převodovky. Ať už málopřevodové či vícepřevodové (zpravidla 8°+), varianty jsou v manuálním či automatickém provedení.

U vícepřevodových skříní je rozložení stupňů řešeno sekvenčním zapojením více převodovek. Například, místo 8 párů ozubených kol, je převodovku možné řešit jako 2° a 4° skříní sekvenčně zapojenou za sebou. Při stejném převodovém rozsahu se tak sníží počet párů ozubených kol, v tomto případě o 2. Toto řešení však přináší nevýhodu v podobě efektivity uzlu, kde sekvenční uspořádání vnáší další efektní člen do rovnice, zmíněného na začátku. Zvláště u horního spektra rozsahu převodů toto řešení převáží složitost, hmotnost a tím pádem i nechtěné setrvačné účinky, kdyby převodovka byla řešena konvenčně.

Zkoumané převodovky budou v rozsahu zejména 1800-2400Nm. Kde se hrubým odhadem bude pohybovat pohonná jednotka.

4.3.1 ZF EcoSplit

Tato manuální převodovka disponuje 16°. Manuální řazení široké škály převodů pomáhá obsluze vozidla pneumaticky systém. Převodovka je plně synchronizovaná a uložena v hliníkové skříní. Díky ní je relativně lehká a hlukové hladiny jsou deklarovány výrobcem jako velmi nízké. K převodovce je možné doobjednat takzvaný „intardér“ tedy zařízení, které maří kinetickou energii v teplou, ale nedochází k opotřebení, protože se nejedná o třecí metodu.



Obrázek 11: Převodovka ZF EcoSplit [12]

Tabulka 2: Parametry převodovky EcoSplit [12]

Model	Vstupní moment [Nm]	Počet stupňů	Převodový rozsah (R – zpětný chod)	Hmotnost bez intardéru [kg]
16 S 1830 TO	1850	16	13.80.-0.84; R 12.92	278
16 S 1930 TD	1900	16	16.41.-1.00; R 15.36	306
16 S 2230 TO	2200	16	13.80.-0.84; R 12.92	306
16 S 2230 TD	2200	16	16.41.-1.00; R 15.36	314
16 S 2330 TD	2350	16	16.41.-1.00; R 15.36	314
16 S 2530 TO	2500	16	13.80.-0.84; R 12.92	314

4.3.2 ZF Traxon

Tato řada převodovek od stejné firmy disponuje automatickým řazením. Je tedy komfortnější a vhodnější pro dynamické účely, tedy například armádní přesuny v náročném terénu a podobné situace. Převodovky Traxon jsou vyráběny ve verzi 12° nebo 16° se dvěma odlišnými zpřevodováními. Jelikož řada obsahuje desítky modelů, budou zde vyčteny pouze některé – předpokládaný výkon pohonné jednotky.

Verze TD disponuje převodovým rozsahem 16.69-1.00; R 15.54/12.03 pro 12°
17.94-1.00; R 17.27/14.14 pro 16°

Verze TO disponuje převodovým rozsahem 12.92-0.72; R 12.03/09.29 pro 12°
14.69-0.82; R 14.14/11.60 pro 16°

Tabulka 3: Parametry ZF Traxon [13]

Model	Vstupní moment [Nm]	Počet stupňů	Hmotnost bez intardéru [kg]
12 TX 1810 TD/TO	1800	12	253
12 TX 2010 TD/TO	2000	12	253
12 TX 2210 TD/TO	2200	12	253
12 TX 2410 TD/TO	2400	12	253
16 TX 1840 TD/TO	1800	16	290
16 TX 2040 TD/TO	2000	16	290
16 TX 2240 TD/TO	2200	16	290
16 TX 2440 TD/TO	2400	16	290

4.3.3 Allison 4700 SP

Tato převodovka je 7^o manuální. Využívají jí například některé armádní modely Tatra. Převodovka je vybavená měničem momentu, s uzamykatelnou spojkou. Výrobce nabízí celkem 5 variant měniče. [14]

Tabulka 4: Parametry měniče momentu Allison [14]

Model	Vstupní moment maximální [Nm]	Maximální násobení
TC-521	2508	2.42
TC-531	2508	2.34
TC-541	2508	1.90
TC-551	2508	1.79
TC-561	2508	1.58

Samotná převodovka je pak odstupňovaná (**I**-7.63; **2**-3.51; **3**-1.91; **4**-1.43; **5**-1.00; **6**-0.74; **7**-0.64; **R**-4.8;). Výrobce doporučuje řazení s prokluzem měniče při 1^o a 2^o. Hmotnost převodovky je 493-555kg, v závislosti na výbavě jako například intardér.

4.3.4 Zhodnocení převodovek

Trh nabízí velmi bohatou řadu převodovek. Jako rozhodující parametr bude důležité určit potřebný výkon a moment motoru. Dalším faktorem bude rozhodnutí mezi manuální a automatickou převodovkou, a jemným či hrubým odstupem převodů. S předstihem lze konstatovat, že bude z výběru vyřazena řada ZF Ecosplit. Tato řada převodovek je vhodná spíše pro aplikace s minimální dynamikou, tedy například tahače určené na dálnici. Manuální převodovka není zdaleka tak vhodná, jako právě automat. Je to z podobného důvodu jako výběr přesně řízeného motoru. Pro hybridní aplikaci je lepší volit automat, který lze přesně řídit na základě vstupů ze spalovacího i elektromotoru, snímaných jízdných odporů, a dalších faktorů.

5 Hybridní technologie

Hybridní pohon je takový pohon, který kombinuje více typů pohonů. V případě vozidel mluvíme nejčastěji o kombinaci spalovacího motoru a elektromotoru. U nákladních vozů je spalovací motor vznětový, viz příklady v předchozí části. Jako elektromotor se často používá synchronní elektromotor. Zkratkou pro vozidlo s hybridním pohonem je xHEV, kde x je nahrazeno předponou podle stupně hybridizace (příklad – MHEV – mild hybrid). HEV je z angličtiny hybrid-electric-vehicle, tedy hybridní elektrické vozidlo.

Dle zadání vozu 8x8, je možné přepokládat využití pro speciální koncepci. Jako příklad je možné uvést aplikaci pro hasičské vozidlo s možností přepravy vody. U hybridního pohonu takového vozidla je očekáváno zlepšení dynamiky pomocí elektromotoru, pro případ dostat se co nejrychleji na špatně dostupné místo. Proto je nutné rozlišovat různé typy hybridu a volit je vhodně dle aplikace.

Pro porozumění hybridních pohonů, je nutné vymezit pojem *rekuperační cyklus*. Tímto cyklem se rozumí proces, při kterém je dodávána elektrická energie do akumulátoru vozidla. Energie vzniká využitím setrvačných účinků hmot vozidla. Nejčastěji alternátor, pracuje v generátorovém režimu, a v případě brzdění či přerušení dodávky paliva – „noha z plynu“ začne přeměňovat generátor kinetickou energii vozidla v elektrickou. Spalovací motor musí být nastaven tak, aby vnitřní odpory a takzvané brzdění motorem bylo co nejmenší. Energie by se pak zbytečně mařila. Dalším klíčovým aspektem je synchronizace s brzdami. Je výhodné, aby rekuperační cyklus pracoval naplno při lehčím brzdění. Tedy aby rekuperační generátor minimalizoval či zcela nahradil třecí brzdění při tomto typu zpomalení. U nouzového brzdění naopak může být nápomocný, protože přidá několik kW k třecím brzdám.

5.1 Dělení podle stupně hybridizace

První stupeň hybridizace je microhybrid. Ten spočívá ve výkonnějším akumulátoru a výkonnějším startéru, umožňuje systém Start-Stop, tedy vypínání motoru při delším stání. Tento stupeň hybridizace pro zadanou aplikaci není významný.

5.1.1 mHEV

Mild-hybrid je druhým stupněm hybridizace. U osobních vozidel se tento systém blíží majoritě nabízených modelů pro modelový rok 2021. U nákladních vozidel je to také velmi častý hybrid. Tento stupeň hybridizace spočívá v integraci elektromotoru, který ovlivňuje dynamiku jízdy. Systém je doplněn o trakční baterii. Ta je nejčastěji Li-ion. Do baterie je dodávána pomocí rekuperačního cyklu. Rekuperace částečně nebo úplně nahrazuje brzdění, podle jízdní situace a stavu baterií. Do mHEV nelze dočerpat elektrickou energii přímo z vnějšího zdroje.

5.1.2 fHEV

je nejvyšší stupeň hybridizace, full hybrid, tedy volně přeloženo jako úplný hybrid. Jedná se opět spíše o evoluci mHEV. Elektrický pohon může být plně využíván určitou dobu jízdy separátně, i na příklad ve vyšších rychlostech. Jako zdroj elektrické energie může být jak akumulátor, tak například spalovací motor pracující jako generátor.

5.1.3 pHEV

Plug-in hybrid, volně přeloženo znamená hybrid do zásuvky. Koncepte pohonu je velmi podobná fHEV, ale je jí možno nabíjet z vnějšího zdroje, například zásuvky. Díky tomu má vozidlo většinou silnější elektromotor a výkonnější akumulátor. Z toho plyne vyšší integrace elektropohonu a delší reálný dojezd.



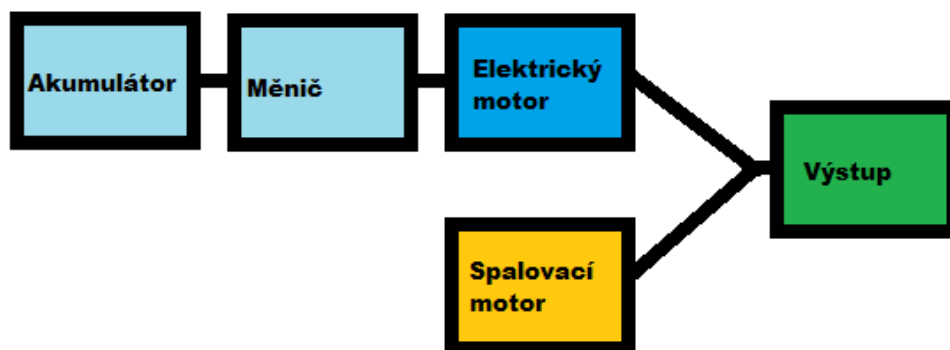
Obrázek 12: příklad pHEV vozidla - Octavia iV [15]

5.2 Podle uspořádání

5.2.1 Paralelním hybrid

Hybridní pohon, kdy k výstupnímu členu pohonu je paralelně připojený elektrický a spalovací pohon. Toto řešení je nejčastějším pojetím hybridního uspořádání ve vozidlech. Elektrický pohon je relativně slabý, a spalovacímu pohonu spíše dopomáhá. Velmi klasická architektura paralelního hybridu, je napojení elektromotoru přímo na klikovou hřídel vozidla. Jelikož je na jedné straně klikové hřídele setrvačnik a spojka a na druhé straně je rozvodový systém či pohon klimatizace a alternátoru, volí se jako elektrický pohon právě modifikovaný alternátor. Elektrický stroj je například označován jako RSG (Riemen-start-generator), z němčiny volně přeložené jako řemenový startovací generátor. Jak je z názvu zřejmé, výkon je přenášen přes řemen, může být i řetěz. Jiným řešením může být elektromotor umístěný v převodovce.

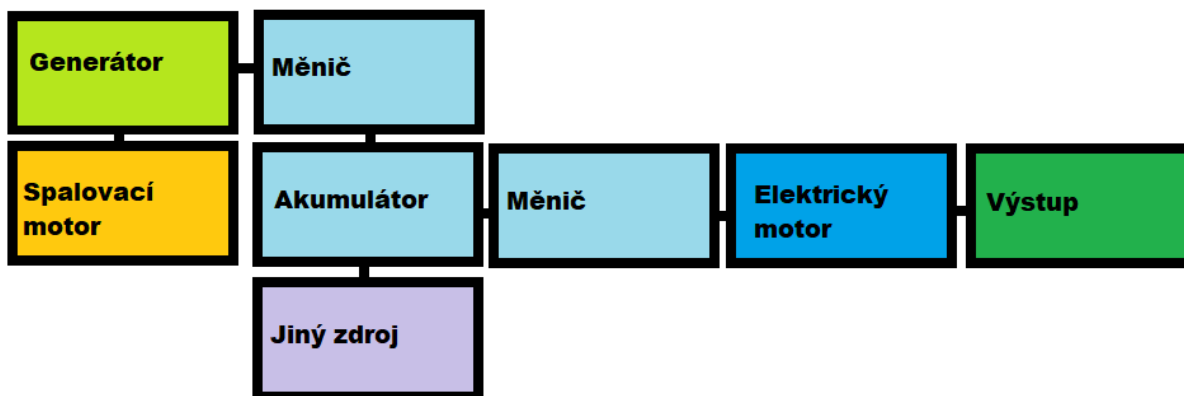
Hlavní nevýhodou paralelního hybridu jsou ztráty plynoucí z konstrukční závislosti jednotlivých uzlů. Například v čistě spalovacím režimu jsou překonávány odpory i elektrického uzlu. Tohle je možné vyřešit vzájemným odpojováním.



Obrázek 13: Zjednodušené schéma paralelního hybridu

5.2.2 Sériový hybrid

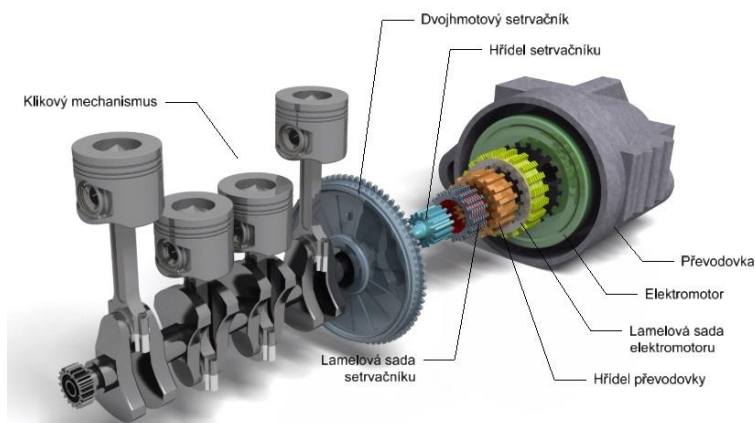
Rozumí se takové vozidlo, které je poháněno čistě elektricky. S nadsázkou je to tedy řešení jako diesel-elektrická lokomotiva. Spalovací motor funguje čistě jako zdroj energie pro generátor. I když energie spalovacího motoru podléhá účinností degradaci, vlivem principu vložených členů se stále jedná o energeticky velmi výhodný koncept. Spalovací motor totiž dokáže pracovat v optimálním účinnostním poli. Jako příklad může fiktivní spalovací agregát pracovat při 1500 rpm, předpokládá se nejlepší poměr výkonu a účinnosti. Toto řešení je vhodné spíše pro vozidla, které se dlouho dobu pohybují za víceméně konstantních okolních podmínek stejnou rychlostí. Typicky dálniční křižníky. Pro nákladní vozidla je to tedy velmi vhodné. Elektrický motor není přímo napojen na generátor. Mohlo by dojít k poškození komponent vlivem výkonových špiček. Pokud zafouká protivítr, tempomat zareaguje přidáním výkonu pro udržení rychlosti, skokově se zvýší odběr z generátoru a mohlo by dojít k poškození. Z tohoto důvodu je nutné vložit kompenzační prvek. Používá se buď kondenzátor, nebo častěji baterie. Akumulátor zároveň umožní vyšší špičkový výkon elektromotoru než je výkon generátoru, spalovacího motoru. Baterii je možné dobíjet jako pHEV nebo jí pomáhat vodíkovým článkem.



Obrázek 14: Zjednodušené schéma sériového hybridu

5.2.3 Kombinovaný hybrid

Jak již název napovídá, kombinovaný hybrid je kombinací důležitých znaků obou typů pohonů. Jedná se v podstatě o paralelní hybrid, který dokáže mechanicky odpojit či připojit elektrický a spalovací pohon. Do pohonu je navíc vnesena spojka. Systém dokáže pracovat



Obrázek 15: Integrace kombinovaného hybridu pomocí dvojité spojky [16]

účinně v konstantních cyklech, nebo naopak v zácpě využívat pouze elektrický pohon. A v případě potřeby pohony spojí a maximálně využije dynamického potenciálu.

5.3 Dělení paralelního hybridu

Dalším existujícím dělením je dělení paralelních hybridů, podle umístění EM v řetězci pohonu. [17]

5.3.1 P0

Elektromotor je napojený ke spalovacímu motoru přes řemen. Jedná se o nejčastější řešení paralelního hybridu.

5.3.2 P1

Elektromotor je přímo napojen na klikovou hřídel. Pozice EM je před spojkou. Dá se říct, že elektromotor nahrazuje setrvačnick.

5.3.3 P2

Architektura P2 spojuje elektromotor a spalovací motor za spojkou. Napojení je na vstupní hřídel převodovky. Elektromotor má otáčky jako ICE a je možné řadit rychlosti.

5.3.4 P3

Architektura P3 zapojuje elektromotor přímo za převodovkou. Nejčastěji na výstupní hřídel pomocí ozubení

5.3.5 P4

Další možností zapojení, je zapojit elektromotor na zadní nápravu s tím, že není nijak spojený s pohonem pomocí spalovacího motoru. ICE pohání čistě přední nápravu a EM pohání čistě zadní nápravu.

5.3.6 P5

Posledním typem zapojení jsou kolomotory. Stator elektromotoru je uložen přímo v těhlici a rotor je součástí kola.

5.4 Akumulátory

Akumulátor je zařízení, které akumuluje – uschovává elektrickou energii. Jeho funkce je napájení elektrických zařízení a kompenzace výkonových špiček. Aktuálně je nejrozšířenějším akumulátorem používaných ve vozidlech typ **Li-ion**.

Li-ion baterie má anodu vyrobenou z uhlíku, katoda je oxid kovu. Lithiová sůl rozpuštěná v organickém rozpouštědle.

Baterie mají optimální jmenovité napětí 3.7V (spopř. 3.6V). Napětí při maximálním nabití je většinou 4.2V. Pro dosažení palubních napětí (12-48V) jsou baterie zapojeny sériově (sčítány napětí) a další vedení jde přes měnič napětí. Pro zvýšení kapacity jsou baterie řazeny paralelně. Palubní systémy většinou pracují na 12V, elektrické motory až při 700V. Napětí se zvyšuje, aby vodiči tekly menší proudy. Baterie jsou skládány do „packů“ a ty do modulů. Zde již konstrukce záleží na jednotlivých výrobcích. Pro 12V „pack“ jsou tedy skládány 3 články sériově a paralelně se připojují další trojice pro zvýšení kapacity. [18]

Životnost baterie je závislá na mnoha faktorech, jako počet nabíjecích cyklů – zde lze uvést průměr okolo 1000. Provozní teplota je také velmi důležitá. Při nižších teplotách klesá napětí, a systém baterii může vyhodnotit jako vybitou, neboť kapacita je měřena právě poklesem napětí. Při vyšších teplotách hrozí exploze. Pro trvalé zatížení akumulátorů je tedy nezbytně nutné udržování její optimální teploty, která je blízko pokojové. Výrobci vozidel to často řeší kapalinovým chladicím okruhem dedikovaným právě pro baterie. Při velkém mrazu mohou být i vyhřívány.



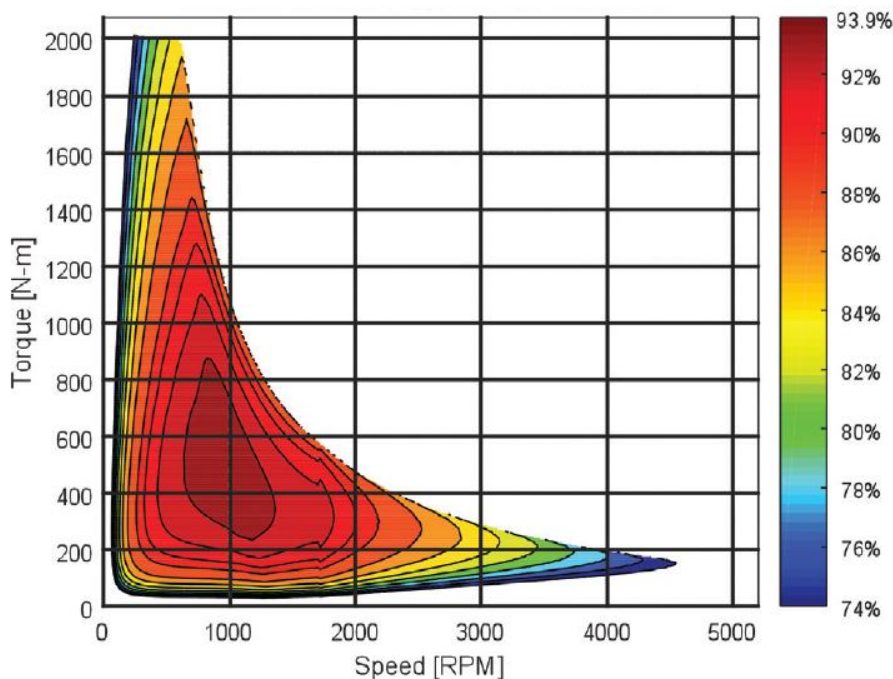
Obrázek 16: Li-ion článek 18650 o 3.7V [18]

5.5 Elektrický motor

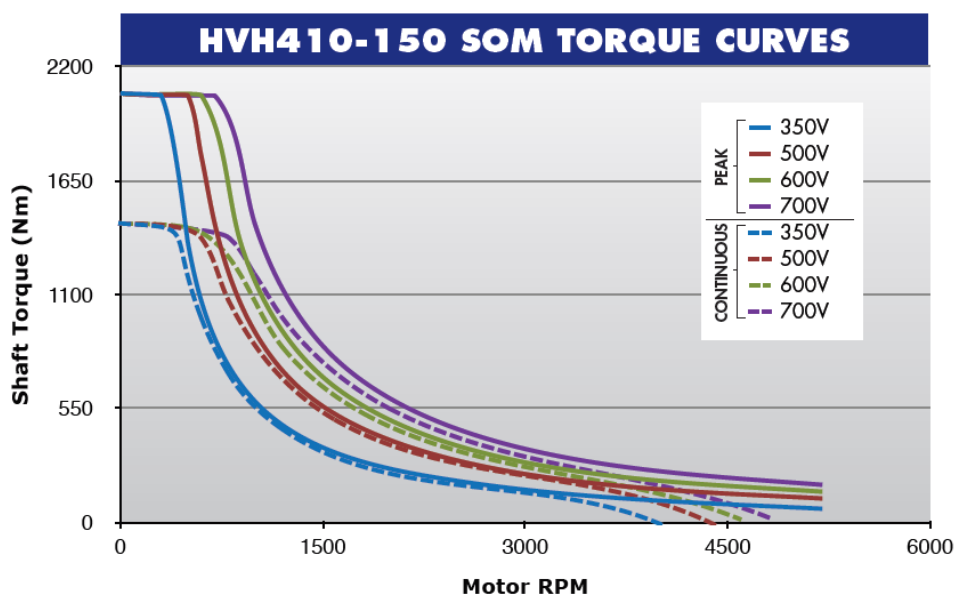
Pro pohon vozidel je důležitá vysoká spolehlivost součástek. Proto se používají zejména asynchronní a synchronní elektrické motory. Jsou to stroje velice jednoduché, prakticky bezúdržbové. Dosahují účinnosti bez problému přes 90%, jak je znázorněno na obrázku 17.

Asynchronní motor je konstrukčně nejjednodušší elektromotor. Pracuje na principu točivého magnetického pole a repulze magnetů. Točivé pole je vytvářeno na cívkách statoru střídavým proudem, který je z principu pootočen o fázi, tedy 120° . Rotor vytváří vlastní magnetické pole pomocí indukce. Pohybující se vodič v magnetickém poli indukuje napětí, to tvoří proud a magnetické pole. Magnetické pole rotoru reaguje na točivé pole statoru. Vlivem zátěže a tření tvoří takzvaný skluz, což je opoždění oproti poli statoru. Právě proto se mu říká asynchronní.

Synchronní motor funguje podobně jako asynchronní. Využívá točivého pole statoru stejně jako předchozí příklad. Rotor však musí sám poskytovat aktivní magnetické pole, nezávislé na poli statoru. To je dosaženo použitím permanentních magnetů nebo elektromagnetu. Permanentní magnety jsou nákladnější, ale bezúdržbové. Elektromagnetické řešení musí mít kartáče, které podléhají opotřebení.



Obrázek 17: Reprezentace účinnostních polí elektrického motoru svislá osa Torque (z angl. točivého momentu. Vodorovná osa Speed (z angl. otáčky). [19]



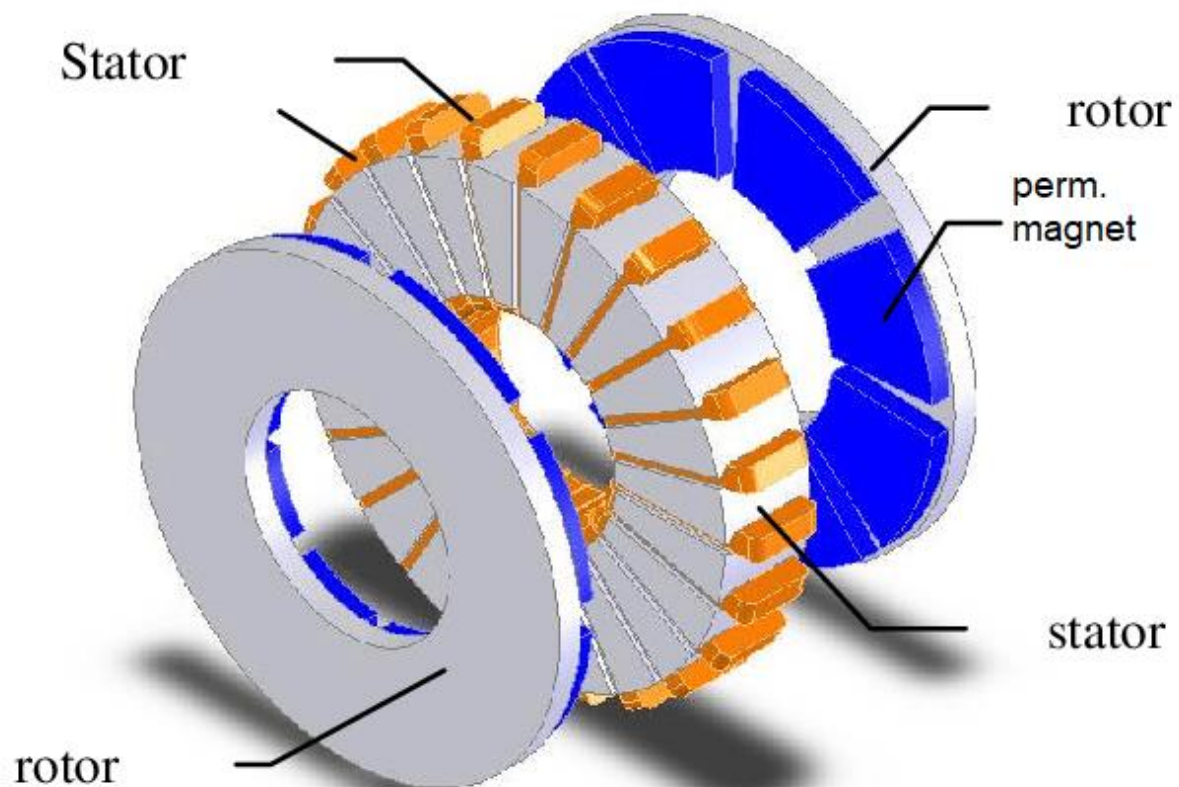
Obrázek 18: Momentové charakteristiky motoru HVH410-150 v závislosti na napětí. Svislá osa shaft torque (z angl. moment na hřídeli). Vodorovná osa Motor RPM (z angl. otáčky motoru). [19]

Při srovnání charakteristiky elektrického motoru a spalovacího motoru je zřejmý rozdíl nástupu maximálního momentu. Spalovací motor jej dosahuje od jistých otáček, z pravidla než se roztočí turbo. Elektrický motor má maximální moment prakticky z klidu. Implikuje to snazší rozjezd a zrychlení. Je však důležité zmínit, že právě při rozjezdu si vozidlo se spalovacím motorem pomáhá setrvačností vnitřních komponent. Rozdíl otáček se vyrovnává spojku, než dojde k synchronizaci. U elektromotru tato výhoda není, než dojde k alespoň nějakému roztočení, může pohon působit letargicky. Rozběh motoru může být uskutečněn i například přes pomocný elektromotor připojený přes spojku. Často však stačí řízení frekvenčním měničem. Pokud by došlo ke spojení momentových křivek spalovacího motoru a elektromotoru, je možné

dosáhnout prakticky ploché momentové křivky od 0 do maxima otáček. To se využívá u paralelních hybridů.

Elektrický motor je třeba také chladit, okruh bývá společný s chladičem akumulátoru, může ale být i separátní. Celkově je elektromotor velice jednoduchý stroj. V podstatě má pouze jednu pohyblivou část – rotor. Složitost zde spočívá v obvodech a řídicích systémech. Která nutno říct není větší než u spalovacích motorů.

Pro hybridní a elektropohony vozidel se nejčastěji používají synchronní motory, a to buď v provedení s permanentními magnety PMSM (z angl. Permanent-Magnet-Synchronous-Motor) nebo motory typu axial flux. Ty jsou specifické štíhlou konstrukcí a vhodností pro hybridní aplikace. Kde je právě štíhlost klíčová, pokud je motor vložený do převodovky, nebo obecně kamkoliv v uzlu pohonu. Jak z názvu axial flux vyplívá, motor je uspořádán axiálně, s nadsázkou jako axiální kuličkové ložisko, podle obrázku 19. [20]



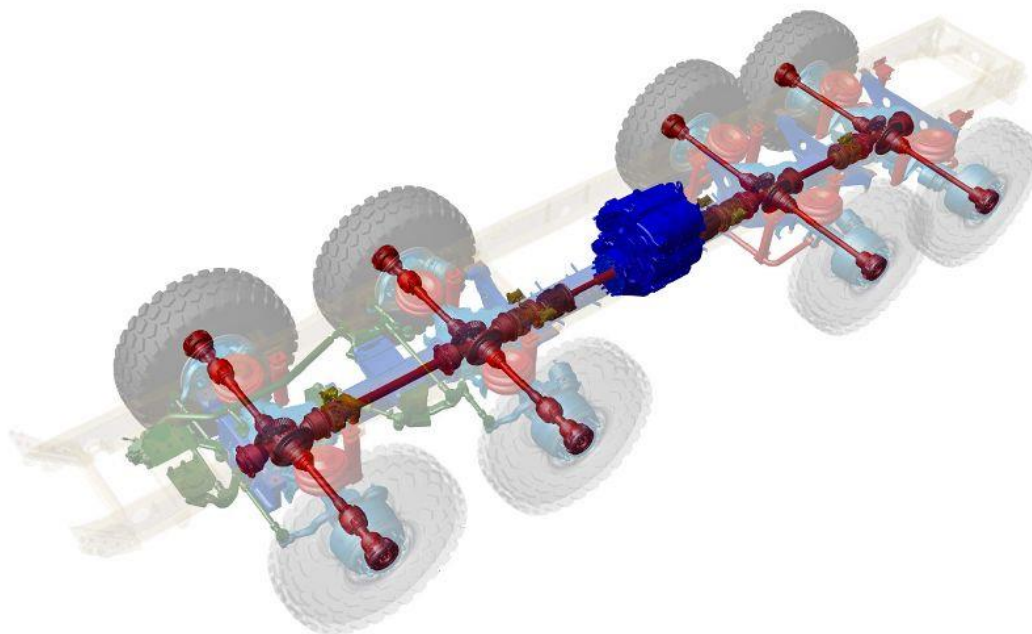
Obrázek 19: zjednodušené zobrazení motoru typu axial flux [20]

Další velkou výhodou je to, že je motor uprostřed dutý. Muže jím procházet hřídel, spojka nebo třeba poloosa. Oranžově jsou na obrázku zobrazeny vinutí statoru. Modře pak permanentní magnety rotorů, které jsou z obou stran.

6 Možnosti realizace pohonu 8x8

Pro maximální využití potenciálu šestnáctikolového vozidla je vhodné pohonné uspořádání 8x8, tedy aby skutečně každé kolo bylo hnané a ideálně řízené. U pohonu 4x4 je systém realizace relativně jednoduchý, za sestupnou převodovkou je rozvodová převodovka, která rozděluje moment na přední a zadní nápravu. Mezi koly na nápravě jsou pak diferenciály. Pro přesné řízení a efektivitu jízdy jsou dnes nápravy, respektive kola řízeny elektronicky, pomocí systémů spojek či zamykatelných diferenciálů.

Klasická koncepce 8x8 je evolucí popsaného systému pro 4x4. Za převodovkou je opět rozvodovka, ta však musí rozvádět na 4 nápravy. Buď má sama v sobě vnořené další rozvodovky, nebo mezi 1,2 a 3,4 nápravou konstruktéři navrhli další dvě rozvodovky. Na nápravách samozřejmě musí být diferenciál. U těžkých strojů určených do náročných podmínek jsou často tyto systémy mechanicky samosvorné, tedy jejich základní princip činnosti řídí uzamykání pro maximum trakce. Dnes s rozvojem výpočetní techniky je samozřejmě možné využívat elektronicky řízené systémy.



Obrázek 20: 8x8 systém Tatra [21]

Obrázek 19 zobrazuje systém 8x8 tatra. Modře je obarvena převodovka v centru. Za ní je rozvodovka se čtyřmi výstupy. Diferenciály na nápravě 2 a 3 jsou duté a prochází jimi hnací hřídele 1 a 4 nápravy. Specialitou tohoto řešení je uložení v centrální nosné rouře, která je sama o sobě nezávislým strukturálním prvkem zavěšeným na rámu vozidla. Tohle řešení je velice robustní, a výrazně se nezměnilo od jejího zrození. Zavěšení kol je nezávislé. Hnací hřídele ke kuželovému převodu poloos jsou sousedé. Jedna je tedy dutá. Celá poloosa se pak otáčí po převodovém kole.

Hybridní technologie umožňuje systém zjednodušit. Díky jednoduchosti elektrických točivých strojů, a relativní kompaktností je možné je rozmístit ve vozidle i na jiná místa, než je většinou uložený spalovací motor.

Prvním řešením je paralelní hybrid. Tam s konstrukčním řešením není příliš na výběr, a největší pravděpodobnost realizace je pouze rozšíření centrálního spalovacího motoru o elektrický motor.

Další zajímavější možností je využití spalovacího motoru jen pro některé nápravy, a další nápravy mohou být hnány jedním či více elektromotory. Největší volnost v tomto řešení přináší sériový hybrid. Za ním bude místo komplikované převodovky pouze generátor. Samozřejmě lze pohon realizovat jedním centrálním elektromotorem. Motory je pak ale možné rozmístit k nápravám nebo na samotné poloosy, či přímo do kol. Odpadne tím mnoho mechanických komponent, a zvýší se teoretická účinnost.

7 Závěr rešerše

Vývoj poslední doby se posunul zejména ve prospěch hybridních technologií. Spalovací motory za posledních pár let ušly obrovský kus cesty k maximalizaci efektivity, zvýšení výkonů a momentů při zachování či dokonce snížení spotřeby paliva a emise škodlivých látek. Stejným dílem jako možnosti výroby, nové technologie nebo zrychlení výpočetní techniky mají ale i empirické poznatky ze zkoušek a provozu. Tyto poznatky, společně s již zmíněným zrychlením výpočetní techniky dokáží přesně řídit, a optimalizovat každý jeden spalovací cyklus motorů. Řízení, které není již pouze reakčním algoritmem, ale chytré systémy predikují akce řidiče strojovým viděním okolí vozidla, zpracováním poslední řady úkonů, nebo využívají GPS polohu a definice terénu v mapě například pro zvýšení výkonu při stoupání.

Možnosti realizace hybridních technologií existuje celá řada, ať už se jedná o paralelní nebo sériový hybrid; úplný, MHEV nebo hybrid do zásuvky, při výběru je důležité zvážit použití. Každé řešení má své výhody i nevýhody, a pro některé aplikace jsou vhodné pouze některé kombinace.

Jako zdroj elektrické energie je hodně skloňován vodíkový článek, ten však byl po konzultaci s odborníky prozatím vyloučen. Dopravná zařízení pro výrobu elektrické energie jsou velká a těžká. Což u velkých vozidel zase tolik nevádí, ale samotné získávání vodíku je energeticky nevýhodné. Je pravděpodobné, že vodíkový článek nahradí ICE jako první právě u nákladních vozidel, prozatím je ale vhodnějším řešením právě ICE v kombinaci s generátorem.

V oblasti akumulátorů pokročil vývoj směrem k zvýšení kapacity. Akumulátorové jednotky mají i v malých aplikacích jako MHEV v osobních vozidlech vlastní klimatizační a topné zařízení, pro maximální zefektivnění činnosti a zachování co nejdelší životnosti. Akumulátory jsou však pořád nejslabší stránkou elektrifikace osobní a nákladní dopravy, nejlepší řešení se i díky tomu jeví právě hybrid.

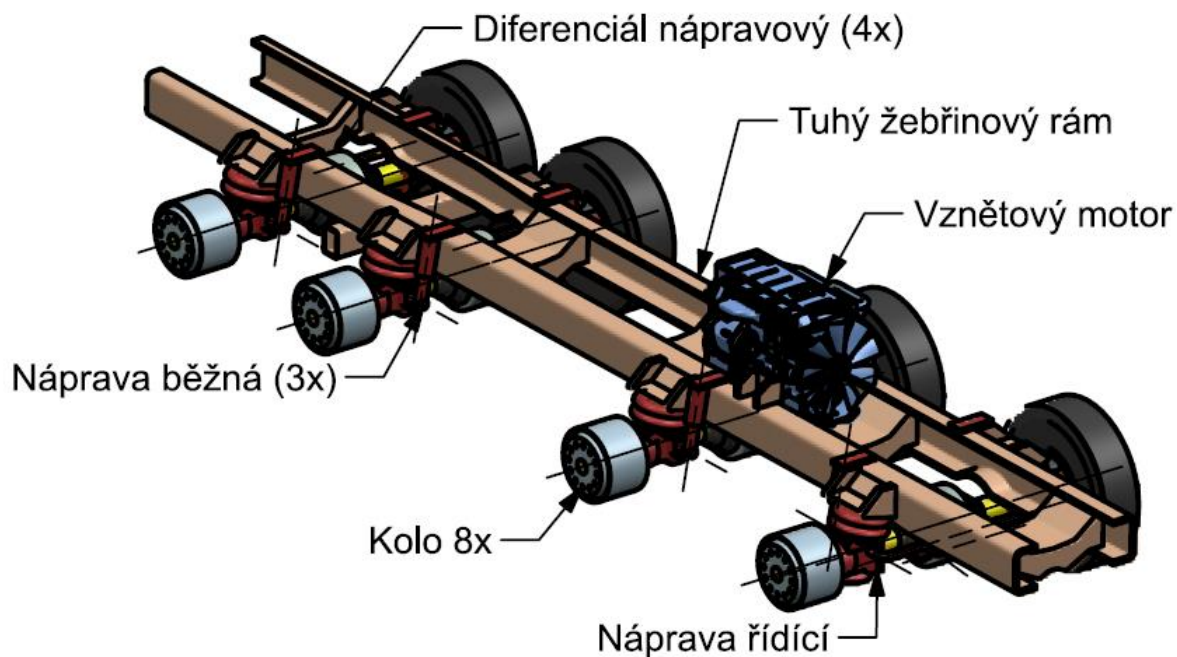
8 Projekční návrh platformy

V této části je možné začít sestavovat vlastní návrh architektury. Prozatím bude návrh proveden na obecné hrubé stavbě. Páteří řešení bude žebřinový rám, na který budou připevněny další prvky zavěšení a pohonu. Rozměry rámu budou rámcově odpovídat jiným 8x8 vozidlům na trhu.

8.1 Rozložení modulární platformy

Základem modulární platformy je již zmíněný žebřinový rám. Jedná se o svarek z plechových výpalků a normovaných profilů. Rám by měl být dostatečně tuhý, vozidlo 8x8 je primárně určeno do speciálních, náročných podmínek. Hnací poloosy vystupují z otočného ústrojí na nápravovém diferenciálu. Samotné poloosy se pootáčejí po ozubení uvnitř mechanismu diferenciálu po kružnici s pomyslným středem v podélné ose diferenciálu. Řídící náprava funguje na podobném principu, s tím rozdílem, že zajišťuje i otáčení kol. Jsou zde tedy vloženy další homokinetické klouby, geometrie je rozdílná a je zde navíc například řídicí tyč.

Mezi první a druhou nápravou je umístěn vznětový agregát. Pro projekční účely byl zvolen obecný model řadového šestiválce, který rozměrově odpovídá motorům ve výkonovém rozsahu 250-400kW. Motor je umístěn na rámu v pružném uložení, tedy šrouby v pryžových pouzdrech. Ty pomáhají mařit vibrace a snižovat tak vibrační zatížení systému, snížit hluky a zvýšit komfort posádky.



Obrázek 21: projekční návrh modulární platformy

8.2 Vymezení hlavních parametrů vozidla

Pro správné sestavení vozidla jak v matematických modelech, tak v následující konstrukci komponent je nutné stanovit základní parametry vozidla, jako rychlost, zrychlení a hmotnosti. Ale také mechanické vlastnosti jednotlivých komponent. Zde jsou důležité zejména setrvačné momenty rotačních součástí pohonu.

Velikost parametru je volena na základě ostatních podobných vozidel na trhu a také podle technických parametrů, které jsou přílohou diplomové práce. Technické parametry jsou zadány v rozmezí, ze kterého je volena konkrétní hodnota pro aplikaci v modelu. Rozmezí vycházejí z poptávek, zkušeností a spolupráce s výrobcem zadavatele práce.

Parametry jsou brány jako nejméně příznivá mez, v tabulce bude doplněno parametrem minimum/maximum/rozmezí. Parametrem *minimum* se rozumí minimální hodnota, které daný parametr musí nabývat. Jako příklad maximální rychlost vozidla, musí být alespoň velká, jako zadaný parametr, může být větší, nemůže být menší. Parametrem *maximum* se rozumí maximální hodnota, která nesmí být přesažena. Jako příklad hmotnost, může být nižší, nemůže být vyšší. Parametrem rozmezí se rozumí doporučená hodnota. Hodnota může být shodná, nižší nebo vyšší, odchylka by však neměla přesahovat 30%.

Tabulka 5: základní parametry navrhovaného vozidla

Základní parametry vozidla				
Parametr	Značka	Hodnota	Jednotka	Upřesnění
Výkon pohonu	P _p	300	kW	rozmezí
Maximální točivý moment pohonu	M _k	2100	Nm	rozmezí
Maximální rychlost	v _{max}	90	km·h ⁻¹	minimum
Čas akcelerace 0-80 km·h ⁻¹	t _{min} ^a	25	s	maximum
Hmotnost prázdného vozu	EVW	24 500	kg	maximum
Hmotnost naloženého vozu	LVW	29 000	Kg	maximum
Stoupání prázdného vozidla	ge _v	40	%	minimum
Dojezd plného vozidla	l _{rmax}	100	Km	minimum

Tabulka 6: setrvačnosti a hmoty – Ir- setrvačný moment k ose rotace

Setrvačné a hmotové parametry pohonného ústrojí (maximum)		
Disk s pneumatikou (kolo)		
hmotnost	130	kg
Ir	35	kg·m ²
Běžná poloosa		
hmotnost	140	kg
Ir	16	kg·m ²
Řídicí poloosa		
hmotnost	150	kg
Ir	25	kg·m ²
Hnací hřídel		
hmotnost	60	kg
Ir	30	kg·m ²

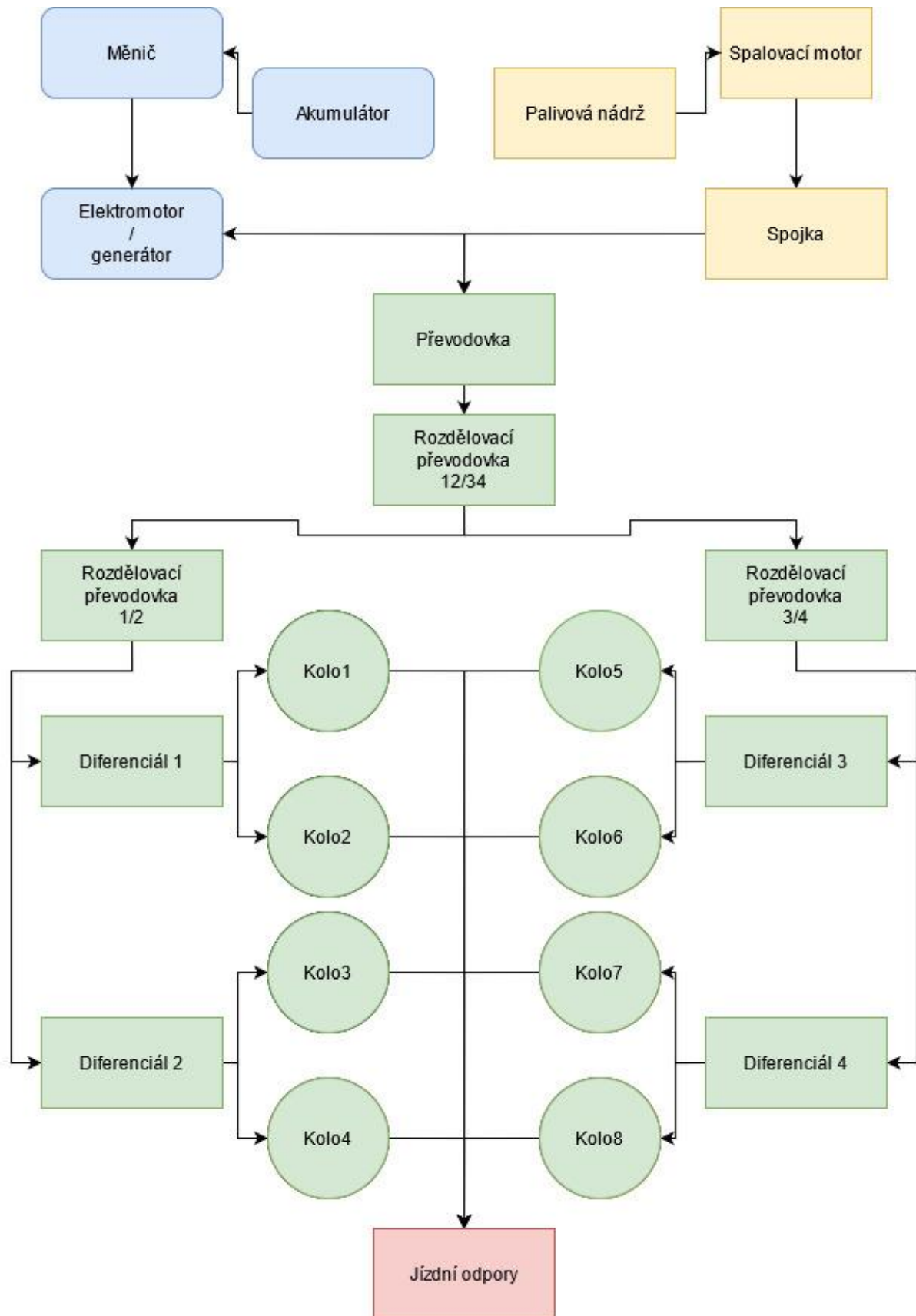
8.3 Struktura paralelního hybridu

Návrh paralelního hybridu je zjednodušeně strukturovaný na následujícím diagramu. V řetězci jsou zahrnuty všechny komponenty významně ovlivňující účinnost, výkon či jiný jízdní parametr vozidla. Elektrické komponenty jsou zjednodušené, bez řídicích systémů.

Jako jádro pohonu je uvažován klasický diesellový spalovací motor. Ten je přes spojku/měnič připojen k převodovce. Za spojkou se připojuje motor/generátor, který je napájen z akumulátoru. Výstup z převodovky má již za úkol rozvést výkon na všech 8 kol. První rozdělovací převodovka dělí výkon mezi přední pár náprav, a zadní pár náprav. To je děleno dále další mezinápravovou rozdělovací převodovkou a diferencíálem.

Kola jsou zatížena jízdními odpory. Ty plynou z hmotnosti vozidla, odporu vzduchu, nebo například sklonu tratě. Mezi prvek jízdního odporu patří i třecí brzda. Od motorů je účinnost mechanického přenosu energie za velice idealizovaných podmínek uvažována jako $0.96^4 = 85\%$. Je tak uvažována účinnost zubových přenosů, čtyři koresponduje s počtem uzlů (převodovka; r.p.12/34; r.p.1/2; diferenciál).

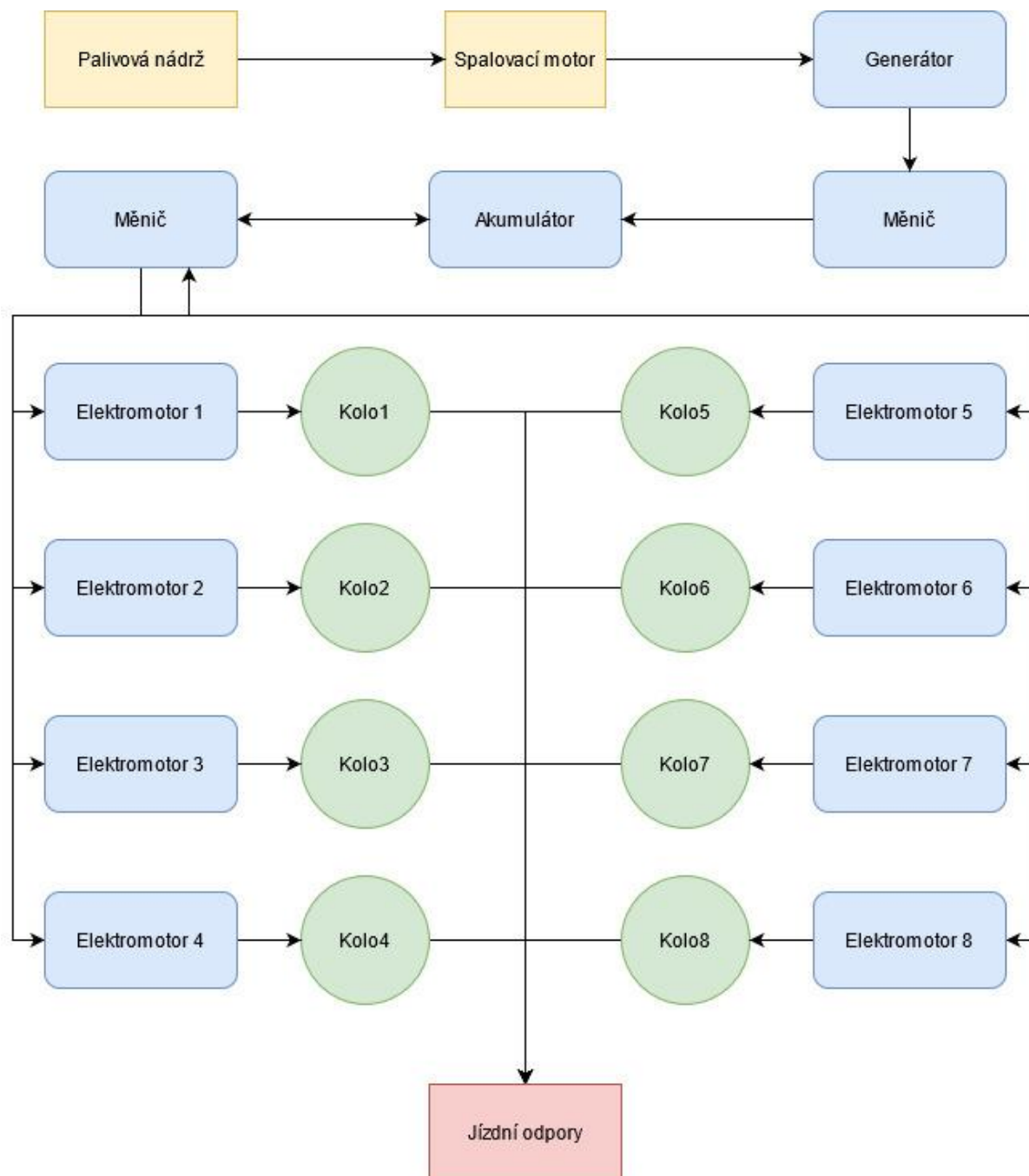
Elektromotor zde může pomáhat pokrývat výkonové špičky například na dálnici, anebo pokrývat jízdu ve městě. Strategie je taková, aby pomohl udržovat spalovací motor v optimálnějších poli zatížení pomocí narekuperované energie při zpomalování.



Obrázek 22: Diagram pro strukturu paralelního hybridu vozidla 8x8

8.4 Struktura sériového hybridu

U této architektury není mechanicky napojený spalovací motor na kola. Slouží zde jako zdroj energie pro generátor, který vyrábí elektřinu. Kooperace generátoru a spalovacího motoru je koncipována tak, aby oba stroje pracovaly v maximálně možných účinnostech. U generátoru se lze bavit až 98%. Práce moderního dieselu za optimálních podmínek může atakovat hranici 40%. Mezi motory pravděpodobně nebude potřebný převod. Očekávané provozní otáčky jsou 1600rpm. Úplně odpadá i řazená převodovka, která je velkým, drahým komponentem.



Obrázek 23: Diagram struktury sériového hybridu vozidla 8x8

Pomocí účinnosti lze i kompenzaci akumulátorem. Zde je strategie taková, nabíjet při nižším zatížení „do zásoby“ tak, aby při potřebě vyššího výkonu nebyl spalovací motor zatěžován mimo optimální pole.

Mechanické ztráty jsou předpokládány minimální. Osm elektromotorů bylo zvoleno právě proto, aby odpadl celý řetězec diferenciálů, hřídelí a rozvodovek. Zde je nutné sestupné zpřevodování a otočení osy kol pomocí kuželového soukolí. Každá dvojice elektromotor-kolo má tedy dva ozubené převody, celková účinnost je předpokládána na $0.98^2=96\%$.

Jak již bylo naznačeno, další alternativou řešení by byla centralizace elektromotorů, ve finále možnost pouze jednoho centrálního. Tyto možnosti byly vyloučeny nejen kvůli složitosti mechanického ústrojí, ale dalším faktorem jsou zástavbové možnosti. Motor, který poskytuje pouze 1/8 výkonu je zásadně menší. Naopak velký centrální motor skýtá problémy případného uložení ve vozidle. Malé motory mohou zaujmout místo diferenciálů, nebo pouzder a hřídelí.

Další možností umístění decentralizovaných motorů je přímo do kol, resp. Mezi náboj a kolo, tak, že kolo je přímo připojené k výstupní hřídeli motoru. U tohoto řešení se absolutně zjednoduší mechanický přenos. Determinující nevýhoda je však zvýšení neodpružené hmotnosti. Zejména u vozidla, které je koncipováno jako 8x8 a předpokládá se náročnější využití i v terénu je to nepřijatelné. Další z toho plynoucí nevýhodou je možné poškození motoru při jízdě v náročnějším terénu. Řešení kolomotoru může však mít uplatnění ve vozidle určeném do města, třeba trolejbus. Kde jsou silnice a jsou víceméně dobře udržované.

8.5 Porovnání řešení

Tabulka 7: porovnání řešení

Kategorie	Sériový hybrid 8EM	Sériový hybrid 1EM	Paralelní hybrid
Mechanická složitost	3	2	1
Mechanické odpory	3	2	1
Mechanická účinnost	3	2	1
Účinnost ICE	2	2	1
Porucha EM	3	0	2
Porucha ICE	2	2	1
Modifikovatelnost	2	2	2
Ztráta výkonu	1	3	3
Přesnost dělení výkonu	2	2	2
Složitost obvodu	1	2	3
Celkem	22	19	17

Tabulka je přibližným odhadem řešení na základě rešerše a konzultace s odborníky. Pro úplné porovnání by byla vhodná například z dlouhodobých testů. Jako startovací můstek pro koncepční návrh však dostačují. Čím více bodů, tím je řešení „lepší“.

Pod pojmem mechanická složitost se rozumí očekávaný počet komponentů, které přímo ovlivňují vlastnosti a případnou spolehlivost vozidla. Například hřídele, zubová spojení, kloubové spoje atd.. Nejlepší hodnocení v této kategorii má vozidlo s 8 elektromotory, protože se předpokládá akorát sestupné zpřevodování a poloosa. Z tohoto vychází i další položka mechanické odpory a mechanická účinnost.

Účinnost ICE se rozumí účinnost spalovacího motoru, a to tak, že se u sériových hybridů počítá se stálým zatížením a tím pádem práce v optimálnější poli. U paralelního hybridu bude motor pokrývat širší spektrum, které ne vždy musí být ideální.

Porucha EM se rozumí schopnost vozidla dojet v případě poruchy nejméně jednoho elektromotoru. Pokud se porouchá elektrický obvod u sériového hybridu s centrálním elektromotorem, vozidlo je nepojízdné. U vozidla s 8 elektromotory se předpokládá schopnost nouzově dojet s nejméně dvěma elektromotory. U paralelního hybridu dojde ke snížení výkonu, ale spalovací motor může pohánět vůz dál.

Porucha ICE, se rozumí porucha spalovacího motoru. Zde to platí naopak. Ale pokud baterie bude mít dostatečnou kapacitu, a elektromotor bude dostatečně silný, může i paralelní hybrid nouzově dojet pouze na elektromotor.

Modifikovatelností se rozumí schopnost aplikace řešení na stávající vozidlo. Zde je to remíza. Všechny řešení teoreticky umožňují menší spalovací motor a tím pádem více místa pro případné elektrokomponenty, a navíc v sektoru nákladních vozidel není až taková nouze o prostor, jako například u osobních automobilů. U sériového hybridu navíc odpadá řazená převodovka, a pro řešení s motorem na poloose dokonce většina hnacích uzlů.

Jako ztráta výkonu se rozumí ztráta výkonu a schopnost jet při prokluzu kola. Zde je na tom nejhůře řešení s elektromotorem na ose, jelikož výkon nemůže být převeden na jiné kolo. A v ten moment vozidlo výkon zkrátka ztratí. Ostatní vozidla to pomocí diferenciálů a rozvodových převodovek dokáží převést na jiná kola.

Přesnost dělení výkonu znamená, jak přesně dokáže dávkovat na jednotlivá kola. Paralelní hybrid je na tom úplně stejně jako sériový s centrálním elektromotorem. Řešení s osmi motory dokáže přesně dávkovat každý elektromotor. Právě při zmíněných nevhodných podmínkách může dojít ke ztrátě potenciálu.

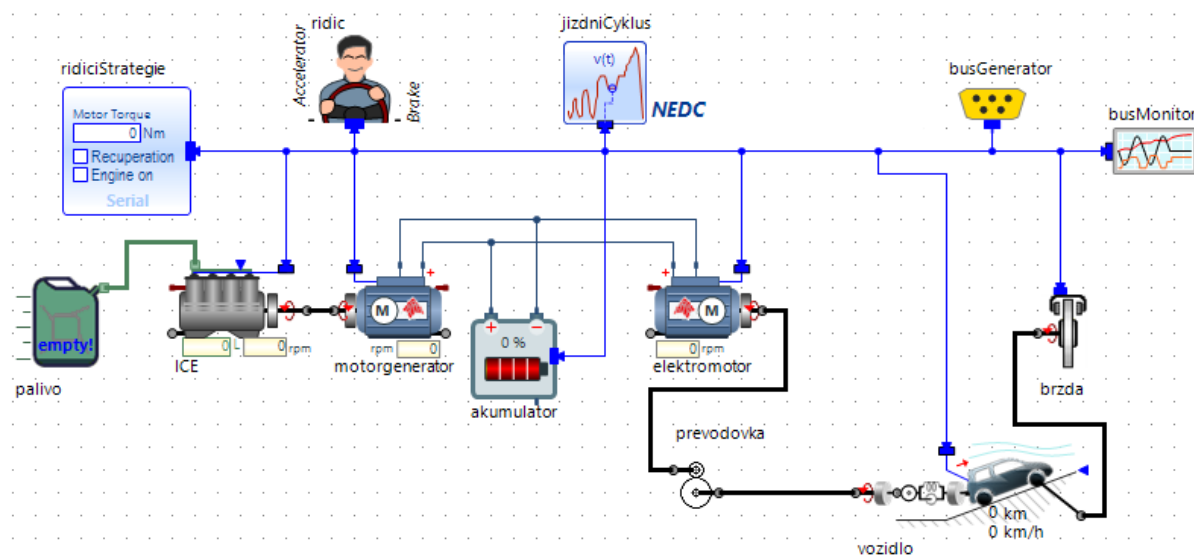
Složitostí obvodu se rozumí složitost celého elektrického uzlu. U osmi elektromotorů se předpokládá složitější řízení, pravděpodobně vlastní řídicí jednotka pro každý motor a mnohem více obvodových prvků obecně.

Na základě zmíněných argumentů tak vychází nejpříznivěji řešení sériového hybridu s 8 elektromotory.

9 Simulační model sériového hybridu s 8 elektromotory

Simulační modely jsou vytvořeny v softwaru SimulationX. Software obsahuje knihovny plné modelů, které je možné modifikovat ke konkrétnímu zadání. Modely jsou tvořeny pomocí bloků, ve kterých se nachází jednotlivé funkce. Mezi bloky patří například vozidlo, motor, nebo řídicí strategie a jízdní cykly. Poskládané simulační bloky tvoří matematický model z funkcí, které řeší například pohybové rovnice.

Na obrázku níže je poskládaný sériový hybrid z jednotlivých bloků. Ty jsou propojeny. Model je poskládaný podle vzoru z knihovny a potřebně modifikován, například sestupnou převodovkou.



Obrázek 24: Model sériového hybridu

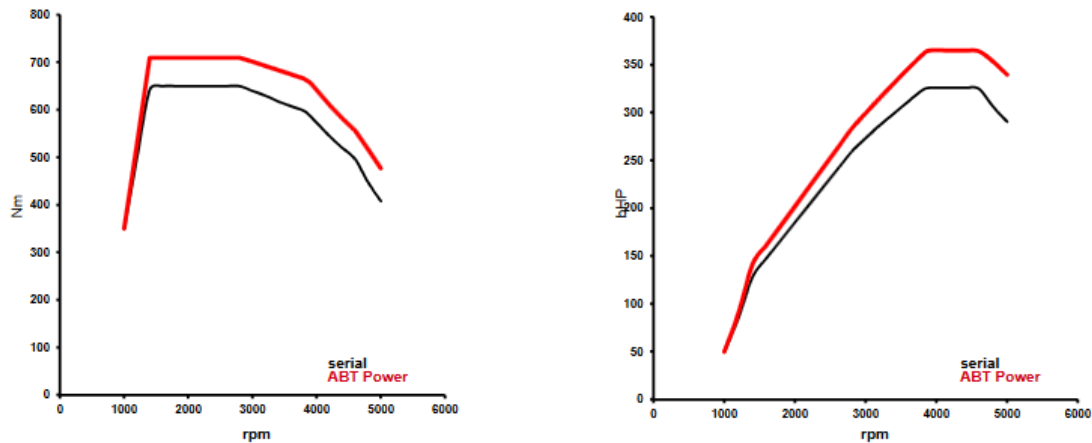
9.1 Nastavení parametrů modelu

Nebudou zde vypsány úplně všechny parametry v modelu dopodrobna. Hlavní zaměření bude na momentové a setrvačné charakteristiky, které přímo ovlivňují požadavky zadání.

9.1.1 Spalovací motor

U sériového hybridu je možné doplnit systém mnohem menším motorem, než jsou velkoobjemové vznětové jednotky, které se běžně používají. Špičky výkonu jsou pokryty krátkodobě baterií i generátorem přímo za spalovacím motorem. Nárazově se počítá s dodávkou elektrického výkonu 450kW. Kde přibližně půlka půjde z motoru. Pro převažující režim během jízdy rovněž stačí přibližně poloviční výkon.

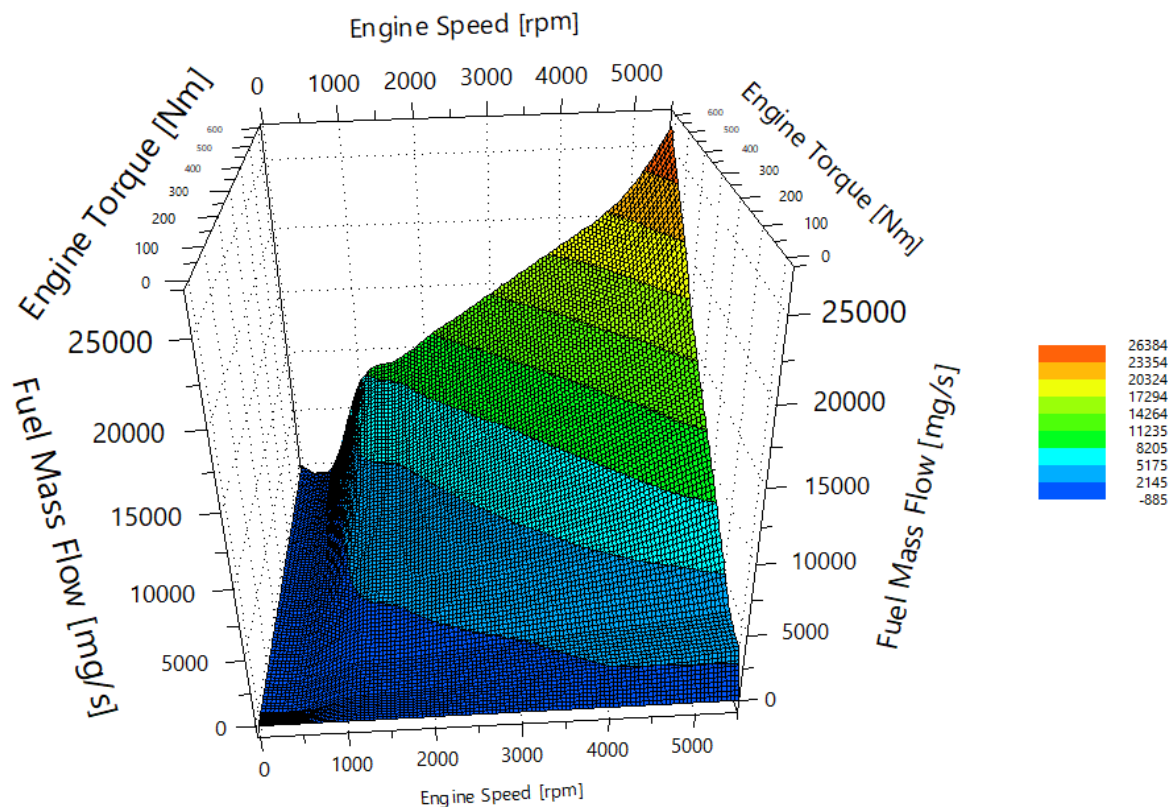
Jako vhodný kandidát byl vybrán motor Audi CVUB. Jedná se o třílitrový vznětový šestiválec, který dosahuje výkonů a momentů podle následujících map. Motor výkonem převyšuje běžné motory nákladních vozidel, objemově je čtvrtinový. Aplikace takto malého motoru by měli příznivě ovlivnit spotřebu a emise.



Fuel type: Diesel
Emission standard: EU 6

Obrázek 25: Výkonové a momentové mapy 3.0 biTDi. Levý graf Točivý moment [Nm], pravý graf je Výkon [HP] [22]

Mapa spotřeby paliva je modifikací modelu knihovny, přibližně zvětšená o objemový násobek motoru. Jedná se pouze o aproximaci. Pro přesné zjištění spotřeby paliva by bylo nutné simulaci doplnit o hodnoty z reálných zkoušek, a to buď přímo z hodnot vstřikovačů, nebo hrubým přepočtem ze spotřeby paliva v různých jízdních cyklech, které jsou často střeženým tajemstvím výrobců.



Obrázek 26: Trojrozměrná mapa proudu paliva Engine speed (otáčky motoru); Fuel mass flow (množství paliva); Engine Torque (točivý moment motoru)

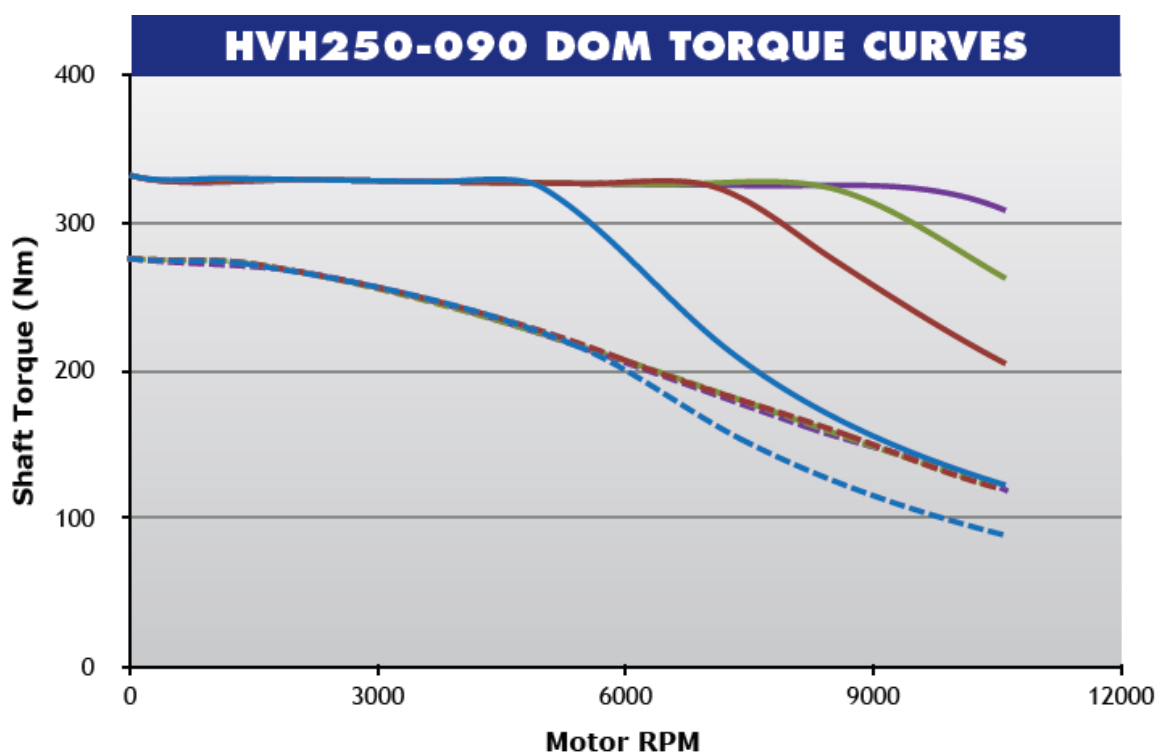
9.1.2 Motor-generátor

Jako motor generátor je volen elektromotor od firmy Borg-Warner HVH 410-150. Jeho momentová a účinností charakteristika je opět zmíněna v rešerši. Energetická charakteristika, kterou model vyžaduje, byla přibližně dopočítána pomocí účinnostního pole a maximálního elektrického výkonu. Maximální proud je 600A a peakové napětí je 700V.

$$P = U \cdot I = 700 \cdot 600 = 420kW$$

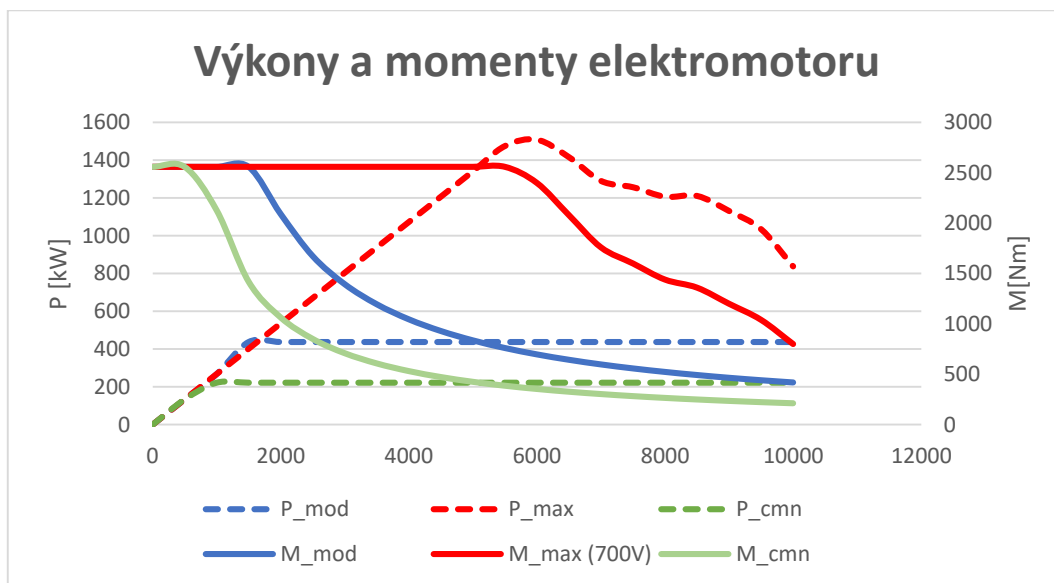
9.1.3 Elektromotor

Jako elektromotor je hledán stroj, který odpovídá přibližně 1/8 generátoru HVH 410. Ve výkonostních a momentových rozmezech generátoru a spalovacího motoru je to minimálně 250Nm. Vyhovujícím elektromotorem je motor od firmy BorgWarner HVH250-090.



Obrázek 27: charakteristika motoru HVH250-090; vodorovná osa otáčky motoru, svislá točivý moment [23]

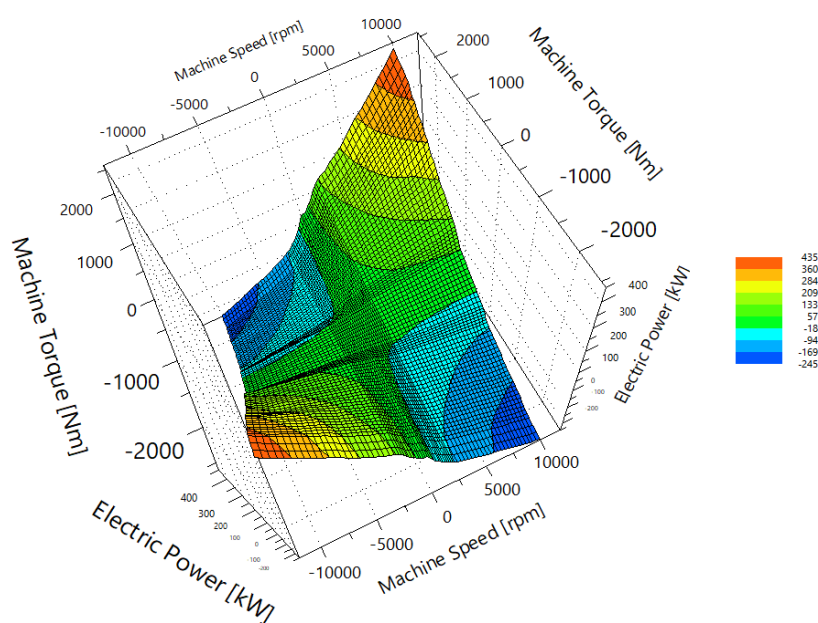
Ten má na rozdíl od většího motoru širší spektrum použitelných otáček. To může být velice příznivé pro maximální rychlost, a teoreticky bude stačit pouze sestupné zpřevodování. Moment motoru je do simulace zadáván jako osminásobek. Špičkově tedy 2560Nm. Energetická spotřeba je uvažována o 10% vyšší než u HVH410. U motoru je potřeba provést analýzu výkonu v kombinaci 8 motorů, a uzpůsobit tomu řízení výkonu a momentu.



Obrázek 28: graf řízení výkonu a momentů elektromotoru

Červené křivky vyobrazují přibližně přenesený výkon elektromotoru dle katalogu výrobce (vynásobený 8x). Výkon elektromotorů má maximum téměř 1600kW při 700V. Takový výkon je pro aplikaci nežádoucí. Po aproximaci ztrát v elektrickém obvodu a samostatném elektromotoru průměrně 12.5% je uvažován maximální dodávaný elektrický výkon 450kW, resp $450 \times 87.5 = 438\text{kW}$ mechanických na výstupu pro špičkové vytížení. Maximální výkon pro běžné vytížení je dopočten z výkonu spalovacího motoru. Který má maximální výkon přibližně 268kW. Pokud se uvažuje průměrná účinnost generátoru 95%, dodávaný výkon je 255kW. Pronásobením ztrát 12.5% je pak teoretický mechanický výkon 223Kw.

Model motoru, pro 223kW bude použit pro test v běžném provozu. Model s 438kW pro zátěžové zkoušky jako zrychlení a stoupání. Požadovaný výkon akumulátoru je uvažován přibližně 200kW (450-268).



Obrázek 29: Trojrozměrná mapa spotřeby elektrické energie Machien Torque (točivý moment); Machine speed (otáčky); Electric power (elektrický výkon)

Mapa spotřeby zhruba odpovídá vypočteným hodnotám, jedná se opět o modifikaci z knihovny. Mapa by měla pokrývat více zátěžových stavů, resp. zahrnuje jak špičku s 438kW tak méně energeticky náročné režimy.

9.1.4 Sestupná převodovka

Pro určení převodového poměru bude vycházeno z požadavku na maximální rychlost. Požadavek je na $v_{max} = 90 \text{ km/h} = 25 \text{ ms}^{-1}$. Maximální uvažované otáčky elektromotoru jako $n_e = 10000 \text{ rpm}$. Poloměr kola s pneumatikou $r = 561 \text{ mm}$. Obvod kola o je pak:

$$o = 2 \cdot \pi \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot 561 = 3525 \text{ mm}$$

Otáčky kola při maximální rychlosti n_{max} :

$$n_{max} = \frac{v_{max}}{n_{max}} = \frac{25000}{3525} = 7.092 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1} = 425.53 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Potřebný převod pak:

$$i = \frac{n_e}{n_{max}} = \frac{10000}{425.53} = 23.5$$

Celkový převodový poměr je volen $i = 23,5$. Maximální rychlosti vyhovuje. Schopnost zrychlení a stoupání bude ověřena simulací.

9.1.5 Setrvačné charakteristiky a jízdní odpory

Části vozidla, které mají důležité setrvačné charakteristiky pro tento výpočet, jsou již zmíněny v úvodu. Další součásti, které v tabulce nejsou, jsou brány z katalogů dodavatelů nebo z knihovny softwaru.

Součet všech setrvačných momentů rotačních elementů k poloosám, k ose otáčení je uvažován

$$I_r = 30 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Součet všech setrvačných momentů poloos k ose otáčení

$$I_p = 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Součet všech setrvačných momentů kol včetně pneumatik

$$I_k = 176 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \text{ poloměr } r = 561 \text{ mm}$$

Jako jízdní odpor pro všechny simulace je uvažován odpor vzduchu dle vzorce

$$F_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot A \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.293 \cdot 0.2 \cdot 5.5 \cdot v^2$$

Kde c_x je koeficient odporu vzduchu, A je čelní plocha fiktivního vozidla, ρ je hustota vzduchu a v je okamžitá rychlost vozidla. Parametry jsou uvažovány přibližně. Pro přesné parametry pro daný vůz by bylo nutné provést zkoušky ve větrném tunelu.

Jako odpor jízdy stoupáním je uvažováno natočení vektoru gravitace oproti podélné ose vozidla. Velikost je pak

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\vartheta) = 29\,000 \cdot 9.81 \cdot \sin(\vartheta)$$

Kde m je hmotnost vozidla, g je gravitační zrychlení a ϑ je úhel stoupání.

9.1.6 Akumulátor, řídicí strategie dobíjení

Akumulátor byl na základě rešerše a modelových zkoušek navržen na 26kWh, což se jeví jako dostačující pro nouzové dojetí, a kompenzátor napěťových špiček.

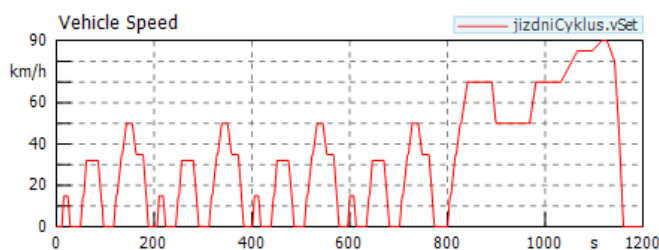
Jako spodní hranice pro začátek dobíjení pomocí ICE je 35% kapacity baterie. Jako horní hranice, tedy vypnutí spalovacího motoru nastane při 85% kapacity baterie.

V celém rozsahu kapacitního spektra je baterie dobíjena rekuperačním brzděním, které částečně nebo úplně nahrazuje třecí brzdu.

Pro NEDC cyklus je na začátku kapacita baterie zvolena na 40% nabití.

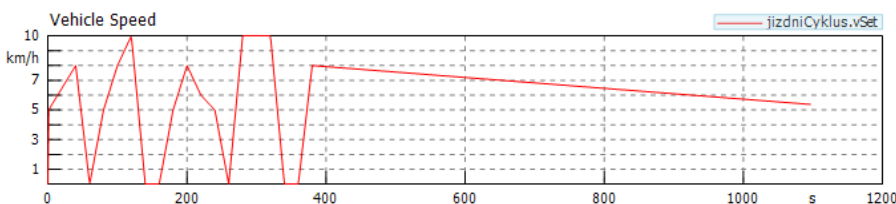
9.1.7 Jízdní cykly

Pro ověření charakteristik vozidla je nutné pro model definovat jízdní cykly. Jízdní cyklus pro ověření schopnosti každodenního provozu, a běžných situací je modifikován NEDC cyklus, který se využívá pro běžné testy vozidel. Byl modifikován do maximální rychlosti 90km/h, která koresponduje s vozidlem. Běžně je maximální rychlost v cyklu 120km/h. Délka cyklu je přibližně 10.5km.



Obrázek 30: graf NEDC cyklu. Svislá osa - okamžitá rychlost; vodorovná osa – čas

V dalším kroku je nutné ověřit schopnost vozidla stoupat. Je proto navržen jízdní cyklus o nízké rychlosti, úhel stoupání se bude inkrementovat podle schopnosti vozidla stoupat. Během cyklu je vozidlo několikrát podrobeno schopnosti rozjet se ve svahu z klidu. Jako maximální rychlost je definováno 10km/h. Cyklus teoreticky ověří schopnost vozidla hned v počátku, neboť se nemusí rozjet vůbec. Cyklus zhruba simuluje kráčení vozidla ve velmi náročném terénu.



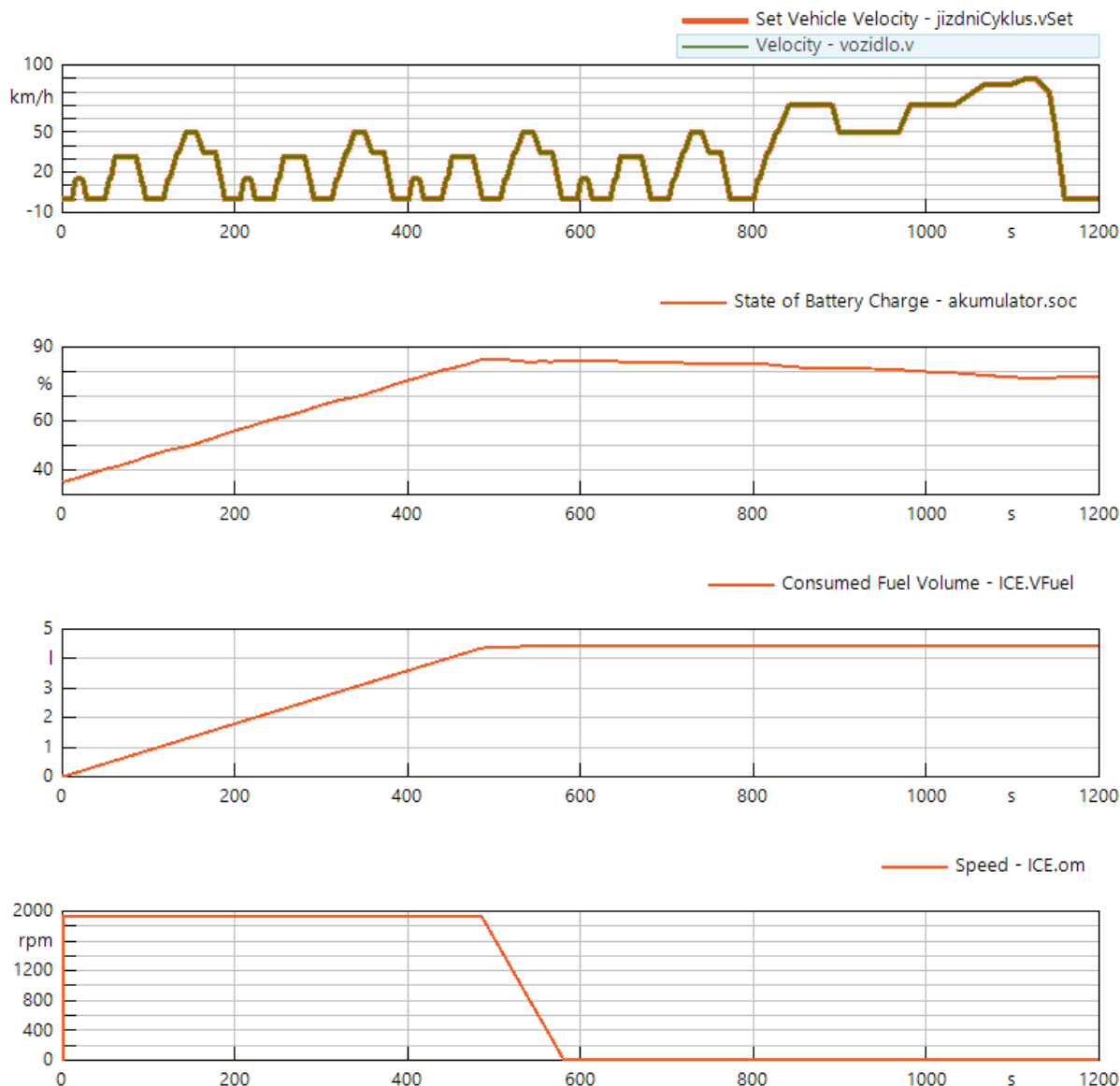
Obrázek 31: graf cyklu pro ověření schopnosti stoupat

Pro ověření zrychlení není třeba definovat složitý cyklus. Stačí cyklus, který vyžaduje maximální rychlost od počátku, a vozidlo jede na maximum svých možností.

Všechny zadávané parametry jsou aproximací pro fiktivní model. Pro přesnější výsledek simulace by bylo nutné provést přesné zkoušky na různých komponentech či celcích. Výčet parametrů je částečný, uvedeny jsou ty, které byly považovány za nejdůležitější.

9.2 Vyhodnocení modelů

9.2.1 Cyklus NEDC



Obrázek 32: Výsledky NEDC sériový hybrid 8EM

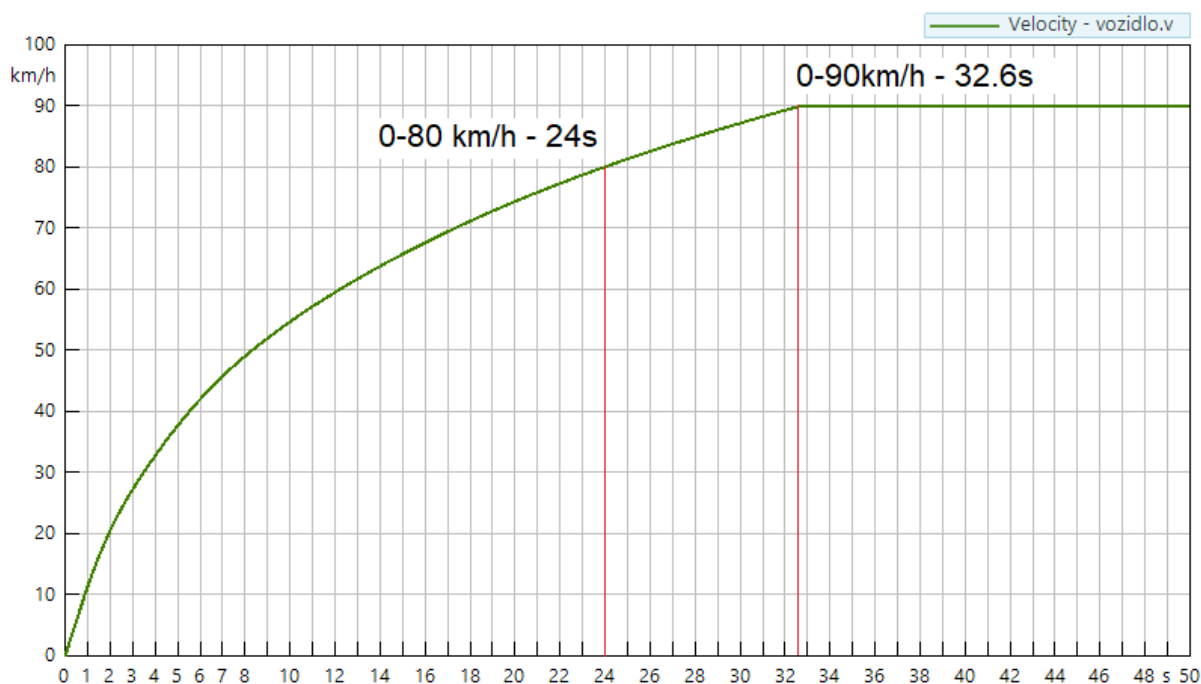
První graf vykresluje závislost rychlosti na čase. Oranžová barva vyznačuje rychlost cyklu, tedy jaká rychlost je po vozidle vyžadována. Zelená barva vyznačuje skutečnou rychlost vozidla. Křivky se bez sebevětších odchylek překrývají. Vozidlo je dynamicky vhodné pro běžný provoz, který má právě tento cyklus simulovat.

Na druhém grafu je vyznačen stav baterie v závislosti na čase. Pro rekapitulaci, vozidlo začínalo na stavu 35%. Hned po startu začalo dobíjení pomocí spalovacího motoru. To probíhalo přibližně do simulačního času 550s. Dobíjení přestalo v momentě, kdy akumulátor dosáhl špičky 85% kapacity. Na celém průběhu grafu je patrné lokální kolísání kapacity, které

přímo koresponduje s tvarem křivky rychlosti. Ve střední části cyklu kapacita klesala jen velmi pomalu, pro malé rychlosti stačilo velmi málo elektrické energie, která se často doplňovala rekuperací. Až při navýšení rychlosti a udržování tempa začala kapacita prudce klesat. Zde je na vině zejména odpor vzduchu, který je předpokládán pro vozidlo nepříznivý.

Třetí křivka zobrazuje odhadovanou spotřebu paliva v litrech. Ta byla spočtena na přibližně 4,1l během cyklu. Poslední křivka sleduje otáčky spalovacího motoru. Simulace zvolila jako optimální otáčky vzhledem k charakteristikám spalovacího motoru a generátoru přibližně 1850rpm. Zde je teoreticky možné zlepšení, neboť jsou otáčky motoru relativně nízké. Pro přesné odladění by však bylo nutné znát přesné energetické mapy obou strojů.

9.2.2 Zrychlení vozidla



Obrázek 33: graf zrychlení vozidla

Graf zobrazuje zrychlení vozidla do maximální rychlosti. Graficky byla přibližně odečtena doba zrychlení na 80km/h – požadavek zadavatele a 90km/h – maximální rychlost. Zrychlení bylo zkušeno na plně zatíženém vozidle, tedy $m=29t$.

$$t_{0-80km/h}^a = 24s$$

$$t_{0-90km/h}^a = 32.5s$$

Vozidlo dynamicky splňuje požadavek zadavatele, který byl 0-80km/h za 25s. Výkon vozidla nebude upravován. Výpočet jej ukázal vyhovujícím a velmi blízko požadavkům. Teoreticky je možné zrychlení zlepšit zvýšením špičkového výkonu, bylo by to však na úkor spotřeby energie.

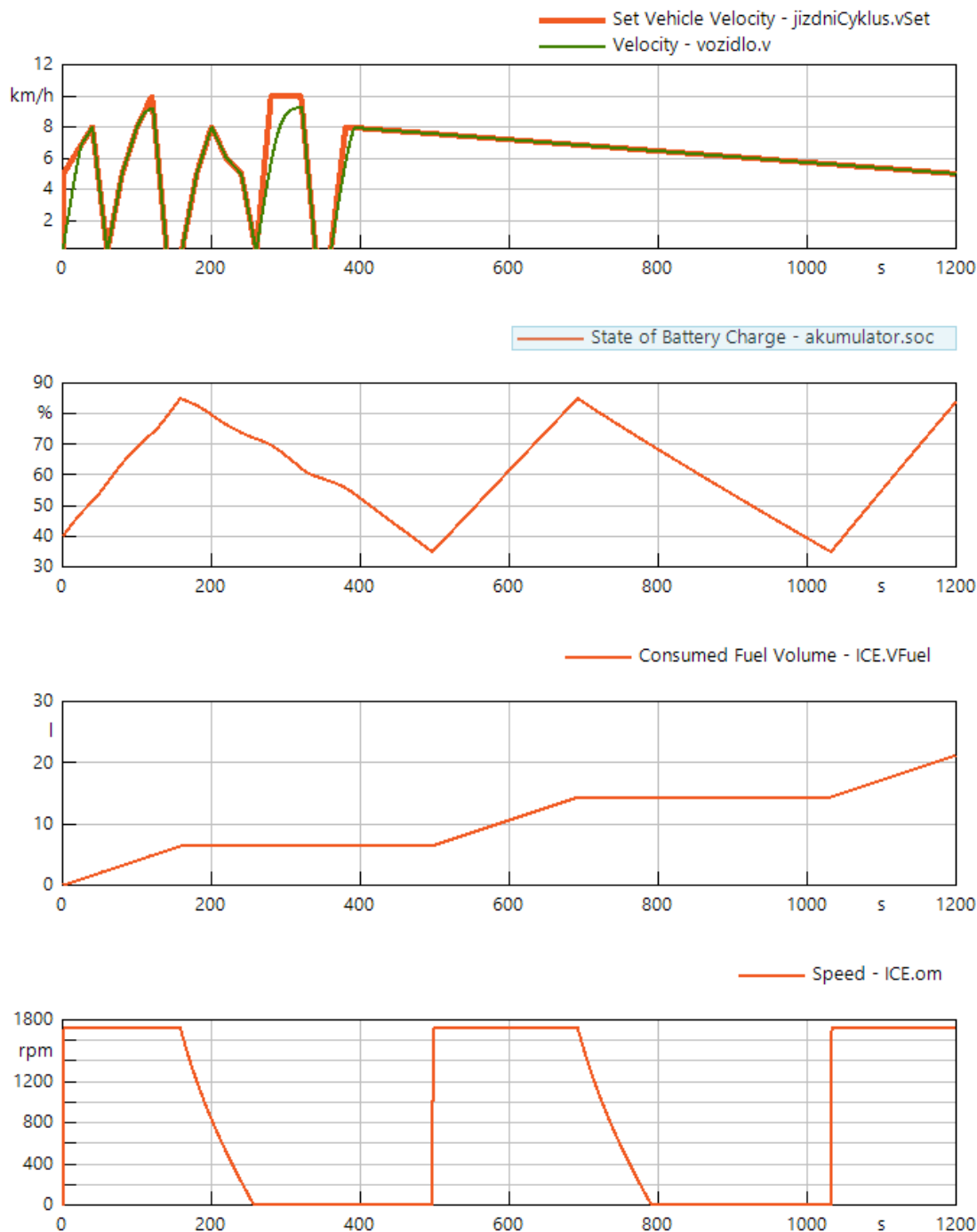
9.2.3 Cyklus stoupání

Cyklus stoupání byl prováděn v režimu špičkového vytížení. Tedy s maximálním výkonem stejně jako cyklus zrychlení. Stoupání bylo postupně inkrementováno od zadané

hodnoty 25° po 0.5° až dokud vůz dokázal alespoň částečně konvergovat. Jako maximum schopností vozidla je vyhodnoceno maximální stoupání prázdného vozidla

$$g_{ev} = 26.5^\circ \cong 50\%$$

I z hlediska stoupání vozidlo vyhovuje. Na následujícím grafu je zobrazen celý cyklus. Křivky odpovídají grafům z cyklu NEDC.



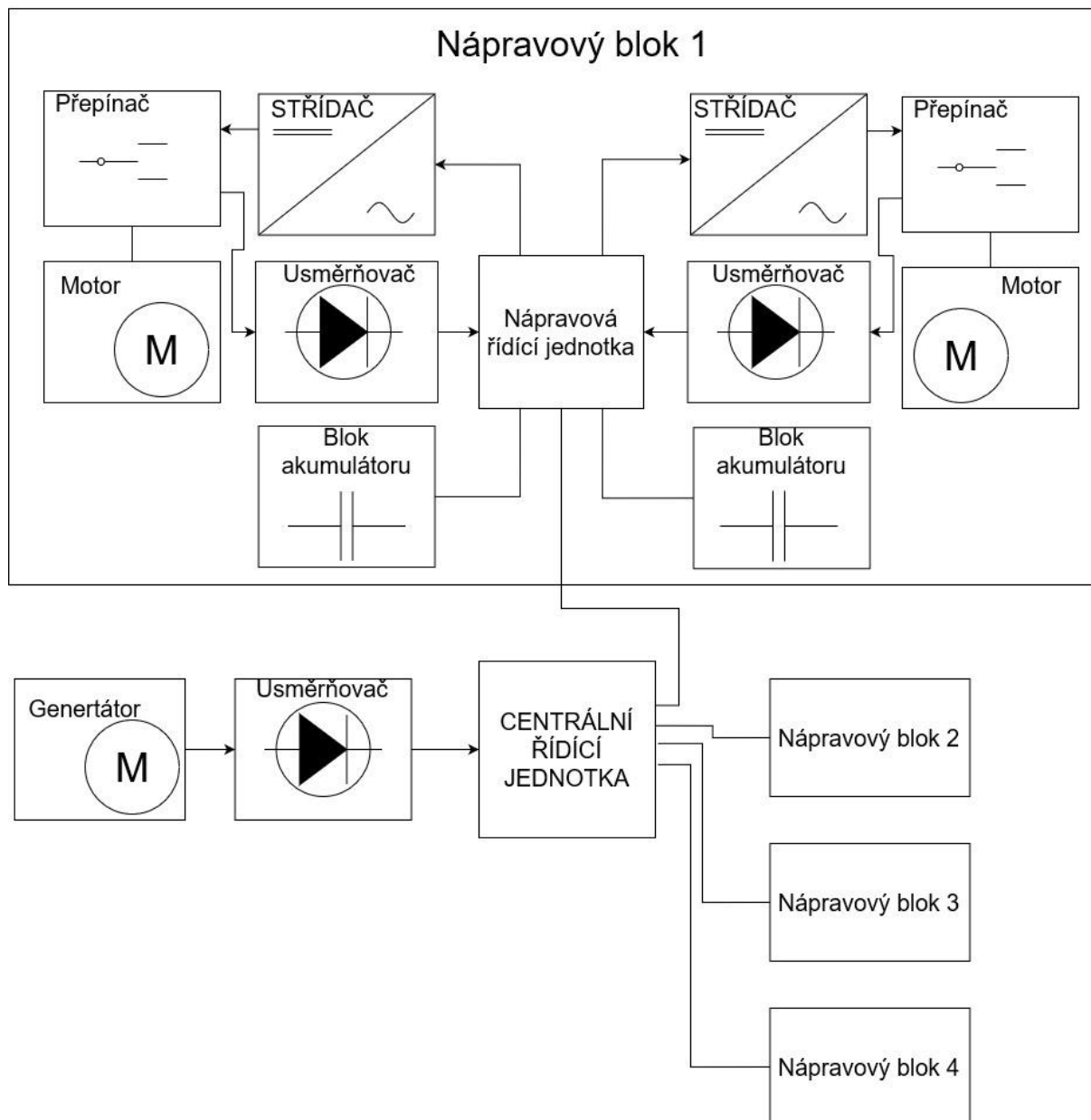
Obrázek 34: Cyklus stoupání

Z grafu rychlosti je zřejmé, že mělo při tomto stoupání problém zrychlovat nad určitou mez. Vozidlo bylo schopné několikrát zastavit a ve stoupání se rozjet.

10 Projektční návrh pohonu vozidla

10.1 Návrh elektrických komponent

10.1.1 Blokové schéma obvodu



Obrázek 35: zjednodušené blokové schéma elektrického obvodu

Blokové schéma bylo navrženo zjednodušeně a slouží k ilustraci elektrického obvodu pohonu vozidla. Z generátoru je střídavý proud usměrněn na stejnosměrný, než vstoupí do řídicí jednotky. Ta jej rozděluje do 4 nápravových bloků. Nápravový blok je podrobně rozkreslen pouze pro jeden příklad, u ostatních jsou součástky a princip stejný.

Nápravový blok má svou řídicí jednotku, pár motorů a akumulátorových bloků. Jelikož motory pracují na střídavý proud je jej třeba změnit, ve střídači. Protože ale motor dokáže i generovat (rekuperovat), je třeba ho pro tento případ usměrnit. Mezi střídačem a usměrňovačem vybírá přepínač.

10.1.2 Akumulátor elektrické energie

Akumulátor bude poskládán z článků baterie Li-ion 18650 od výrobce Samsung.

Tabulka 8: parametry akumulátoru 18650 [24]

Parametry akumulátoru 18650			
Parametr	Značka	Hodnota	jednotka
Jmenovité napětí	U_j	3.7	V
Jmenovitá kapacita	C_j	2600	mAh
Max. vybíjecí proud	I_v	20	A
Délka	L	65	mm
Průměr	d	18	mm
Hmotnost	m	45	g
Cena	-	65	Kč

Akumulátor může být skládán sériově pro navýšení napětí, nebo paralelně pro navýšení kapacity a proudu. Požadované napětí pro pohon je U_p 700V. Maximální napětí článku $U_n=4,2V$.

Počet sériových článků

$$n_s = \frac{U_p}{U_j} = \frac{700}{4.2} = 166.67$$

Počet článků zapojených do série je volen 167.

Pro navýšení kapacity se články řadí paralelně. Kapacity z mAh je nutné převést do Wh, se kterými počítala simulace. Parametr 0.95 počítá s variabilitou provedení článku. Výpočet již počítá s kapacitou bloku sériově řazených článků.

$$C_j^P \approx 0.95 \cdot C_j \cdot U_p = 0.95 \cdot 2.5 \cdot 700 \cong 1663 \text{ Wh}$$

Celková kapacita je požadována $C_c=26kWh$. Protože jsou elektromotory oddělené, je možné rozdělit kapacitu do 8 akumulátorů, které budou rozmístěny po vozidle. Zlepší se distribuce hmotnosti a zmenší kabeláž. Jeden akumulátor má tedy kapacity $26/8=3.25 \text{ kWh}$.

Celkově bude nutné zapojit paralelně článků:

$$n_s = \frac{C_c}{C_j^P} = \frac{3250}{1663} = 1.95$$

Počet paralelně řazených článků je volen 2.

$$2 \cdot 167 = 334 \text{ článků}$$

Maximální vybíjecí proud na bloku akumulátoru:

$$I_m = I_v \cdot 2 = 40 \text{ A}$$

Z jednoho bloku akumulátoru je předpokládáné čerpání výkonu, kde P_A je uvažovaný potřebný výkon akumulátorů:

$$P_b = \frac{1}{8} \cdot P_A = \frac{1}{8} \cdot 200 = 25kW$$

To odpovídá proudu

$$I_r = \frac{P_b}{U_p} = \frac{25000}{700} = 35.72A$$

$I_m \gg I_r$; akumulátor vyhovuje po proudovém ověření

Cena akumulátoru (maloobchodní):

$$334 \cdot 65 = 21\,710 \text{ Kč}$$

Cena zahrnuje přírůstek pro doplňkový materiál, jako pro propojení.

Hmotnost akumulátoru, kde koeficient 1.2 je odhadovaným navýšením hmotnosti od doplňujících zařízení

$$m_c = 1.2 \cdot m \cdot 334 = 1.2 \cdot 45 \cdot 334 = 18 \text{ kg}$$

Tabulka 9: Parametry bloku akumulátoru

Parametry bloku akumulátoru			
Parametr	Značka	Hodnota	jednotka
Napětí	U	700	V
Kapacita	C	3326	Wh
Max. vybíjecí proud	I _v	40	A
Hmotnost	m	18	kg
Cena	-	21 710	Kč

Rozmístění akumulátorů do bloků je výhodné nejen z hlediska rozmístění po vozidle. Ale relativní kompaktnost umožňuje i snadnou údržbu. Pokud by došlo k poškození jednoho z bloků, například jízdou v náročném terénu stačí vyměnit jeden blok, jehož cena je relativně nízká.

10.1.3 Generátor

Jako generátor je vybrán elektrický stroj BorgWarner HVH410-150, který je blíže popsán v předchozích kapitolách.

10.1.4 Elektromotor

Jako elektromotor je vybrán motor BorgWarner HVH250-090. Rovněž je blíže popsán v předchozích kapitolách.

10.2 Návrh mechanických komponent

10.2.1 Spalovací motor

Spalovací motor je vybrán Audi CVUB. Motor je již zmíněn v kapitole simulace. Jedná se o vznětový třílitr z osobního vozidla, přepínaný dvěma turby. Motor je oproti konvenčním spalovacím motorům nákladních vozidel velice kompaktní, a očekává se výrazné zlepšení ekonomiky provozu. Alternativou pro tento motor by mohl být agregát například BMW, nebo Mercedes. Záleželo by na konkrétních sjednaných podmínkách v případě produkce vozidla.

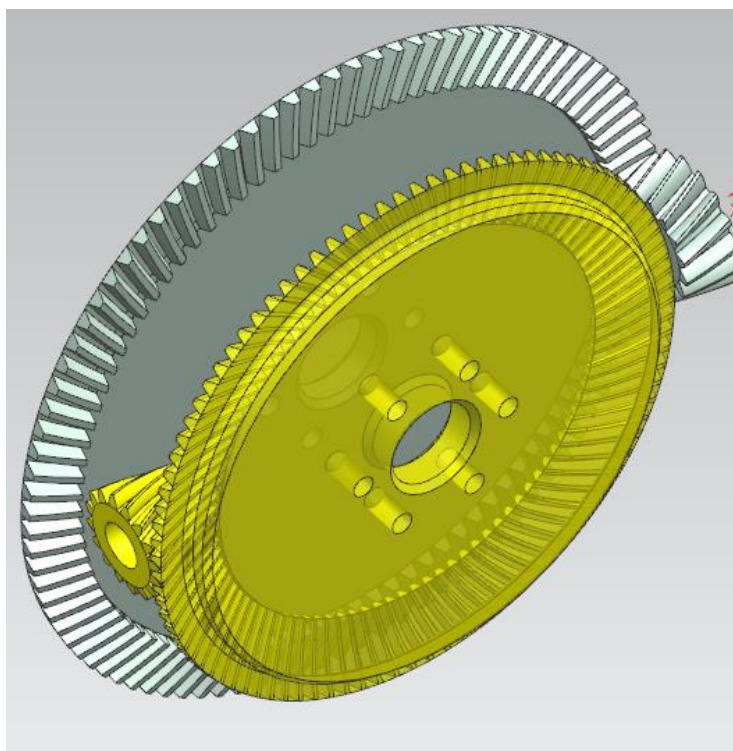


Obrázek 36: Audi CVUB [25]

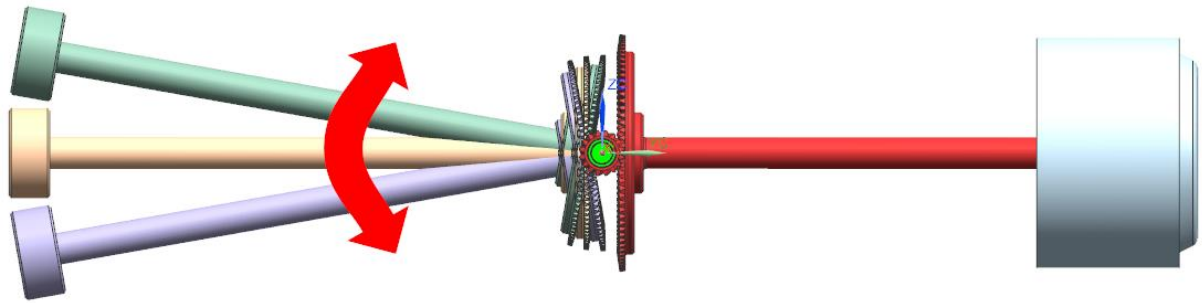
10.2.2 Kuželové soukolí

Elektromotory jsou umístěny na mezinápravových skříních v podélném směru. V konvenčním vozidle v těchto místech stupují do skříní mezinápravové hřídele. Pro pohon kol je potřeba otočit osu otáčení o 90° , bude tak učiněno pomocí kuželového soukolí. Kuželové soukolí plní v této koncepci několik důležitých úkolů. Otáčí osu toku výkonu, zajišťuje sestupný převod a umožňuje nezávislý pohyb kol, resp. poloos se středem otáčení v ose pastorku.

Každá náprava má pár kuželových soukolí, pro pravé a levé kolo. Aby pastorky soukolí mohly zůstat souosé, a tím pádem měli poloosy společnou osu pohybu (otáčení), je třeba jeden pár udělat menší. Je tak dosaženo zvětšením modulu druhého páru, a tím pádem se zvětší rozteční kružnice jak pastorku, tak talířového kola.



Obrázek 37: Kuželová soukolí



Obrázek 38: pohyb pooloos kolem osy pastorku

Kuželová soukolí byla pro projekční účely navržena v systému Inventor 2019 pomocí modulu Deisgn accelerátor – ozubená kola.

Tabulka 10: parametry menšího kuželového soukolí

Menší kuželové soukolí		
Parametr	hodnota	jednotka
Převodový poměr (i_k)	5.938	
Modul	5.5	
Šířka ozubení	70	mm
Počet zubů pastorku	16	
Počet zubů kola	95	
Úhel čelního profilu	20	°
Úhel sklonu	18	°
Úhel os	90	°

Tabulka 11: Parametry většího kuželového soukolí

Větší kuželové soukolí		
Parametr	hodnota	jednotka
Převodový poměr	5.938	
Modul	6.5	
Šířka ozubení	48	mm
Počet zubů pastorku	16	
Počet zubů kola	95	
Úhel čelního profilu	20	°
Úhel sklonu	18	°
Úhel os	90	°

Pro dosažení celkového požadovaného převodového poměru $i=23.5$ je třeba před kuželové soukolí vložit sestupné zpřevodování i_s .

$$i_s = \frac{i}{i_k} = \frac{23.5}{5.398} = 4.35$$

Vstupní moment do soukolí je vynásobení i_s a maximálního momentu elektromotoru $M_m(320Nm)$.

$$M_i = M_m \cdot i_s = 320 \cdot 4.35 = 1357 Nm$$

Pro výpočet byla uvažována vysokojakostní ocel (34CrNiMo6) o mezi únavy v ohybu 750MPa, a mezi únavy v dotyku 1250MPa.

Tabulka 12: Součinitele bezpečnosti pro větší kuželové soukolí sloupec hodnot více vlevo – pastorek, hodnoty napravo - kolo

Součinitel bezpečnosti v dotyku	S_H	1,204 ul	1,251 ul
Součinitel bezpečnosti v ohybu	S_F	2,095 ul	1,444 ul
Statická bezpečnost v dotyku	S_{Hst}	2,669 ul	2,721 ul
Statická bezpečnost v ohybu	S_{Fst}	4,424 ul	2,967 ul
Kontrolní výpočet		Kladný	

Vyexportovaná tabulka z Inventoru ukazuje součinitele bezpečnosti soukolí. Pro oba páry vychází velice podobně, pro uvažovanou ocel, zatížení a základní parametry. Kontrolní výpočet byl proveden pro mezní zatížení vůči životnosti 10 000h. Byť jsou pro obě soukolí, resp. všechna čtyři kola součinitele bezpečnosti v dotyku limitní, takové zatížení bude vyvíjeno v provozu ojedinele. Návrh soukolí pro projekční účely vyhovuje.

10.2.3 Sestupné ozubení

Pro dosažení požadovaného převodového poměru je navrženo sestupné soukolí s čelním ozubením s parametry dle následující tabulky. Materiál je uvažován stejný jako u kuželového soukolí.

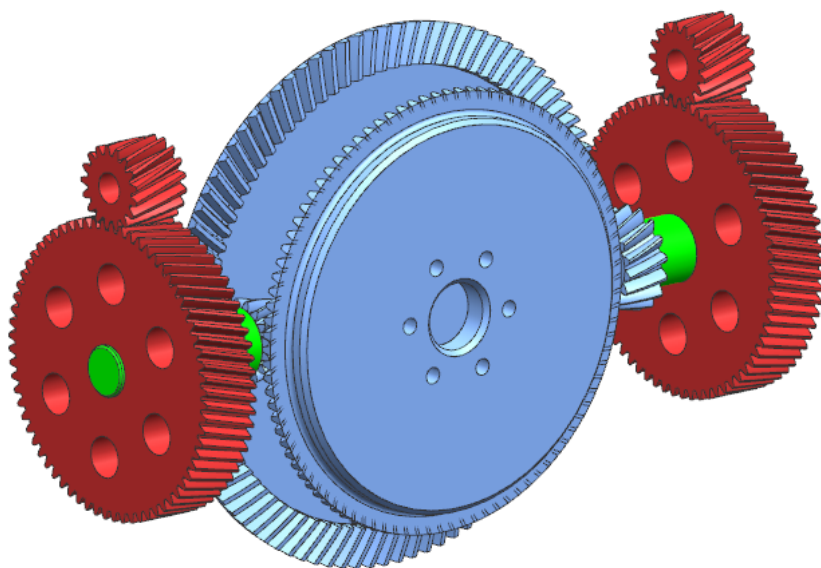
Tabulka 13: parametry čelního soukolí

Větší kuželové soukolí		
Parametr	hodnota	jednotka
Převodový poměr	4.353	
Modul	6.5	
Šířka ozubení	60	mm
Počet zubů pastorku	17	
Počet zubů kola	74	
Úhel čelního profilu	20	°
Úhel sklonu	15	°

Tabulka 14: Součinitele bezpečnosti pro čelní soukolí sloupec hodnot více vlevo – pastorek, hodnoty napravo - kolo

Součinitel bezpečnosti v dotyku	S_H	1,270 ul	1,270 ul
Součinitel bezpečnosti v ohybu	S_F	4,296 ul	4,298 ul
Statická bezpečnost v dotyku	S_{Hst}	2,671 ul	2,671 ul
Statická bezpečnost v ohybu	S_{Fst}	8,762 ul	8,843 ul
Kontrolní výpočet		Kladný	

Pro uvažovaný materiál jsou součinitele bezpečnosti příznivější než u kuželových soukolí. Součinitel v dotyku je opět mezní, ale stále vyhovující. Jelikož jsou kola zatěžována tímto mezním zatížením výjimečně, pro projekční účely vyhovuje.

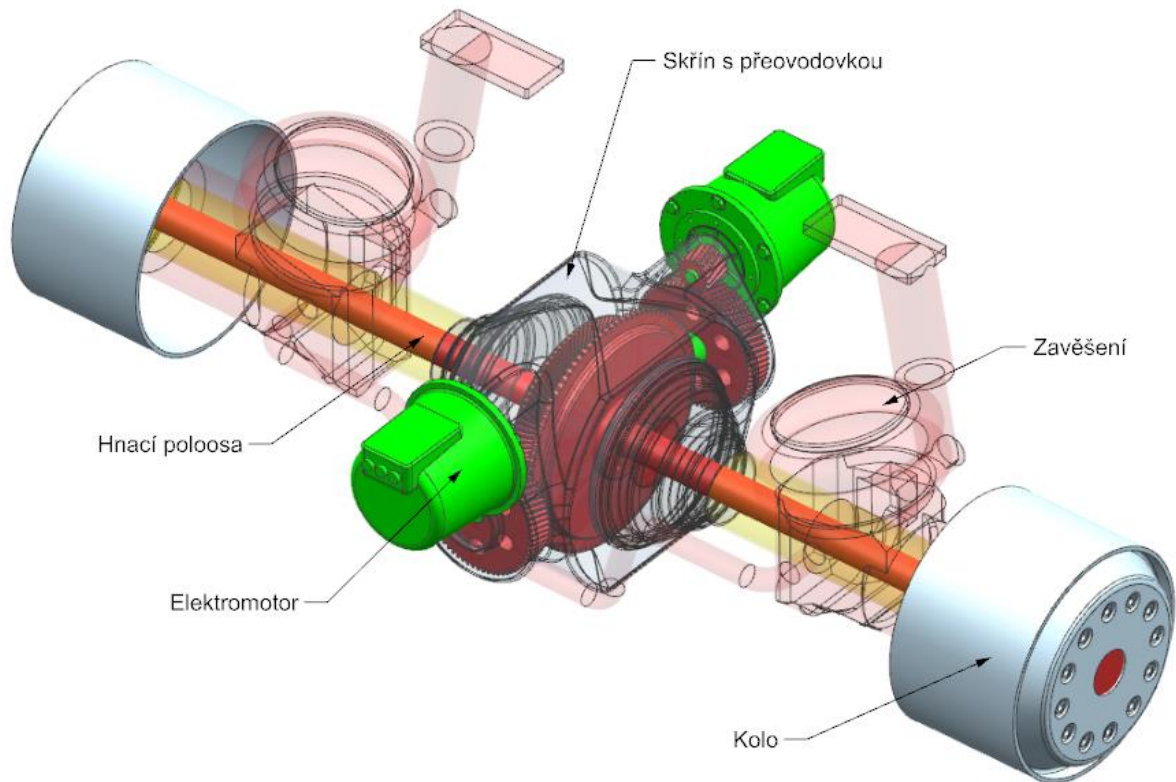


Obrázek 39: Kuželové soukolí navazující na čelní ozubení

10.3 Implementace pohonného ústrojí na nápravách

Jak bylo řečeno v úvodu, motor je připevněn na mezinápravové skříni. V ní jsou uložena soukolí převodovky a ložiska poloosy a mechanismu natáčení. Poloosy jsou vyvedeny přes pryžovou manžetu do ochranných trubek. Manžeta umožňuje kývání poloos a zároveň chrání mechanismus před vnikem prachu a nečistot. Trubky jsou uloženy v těhlicích zavěšení.

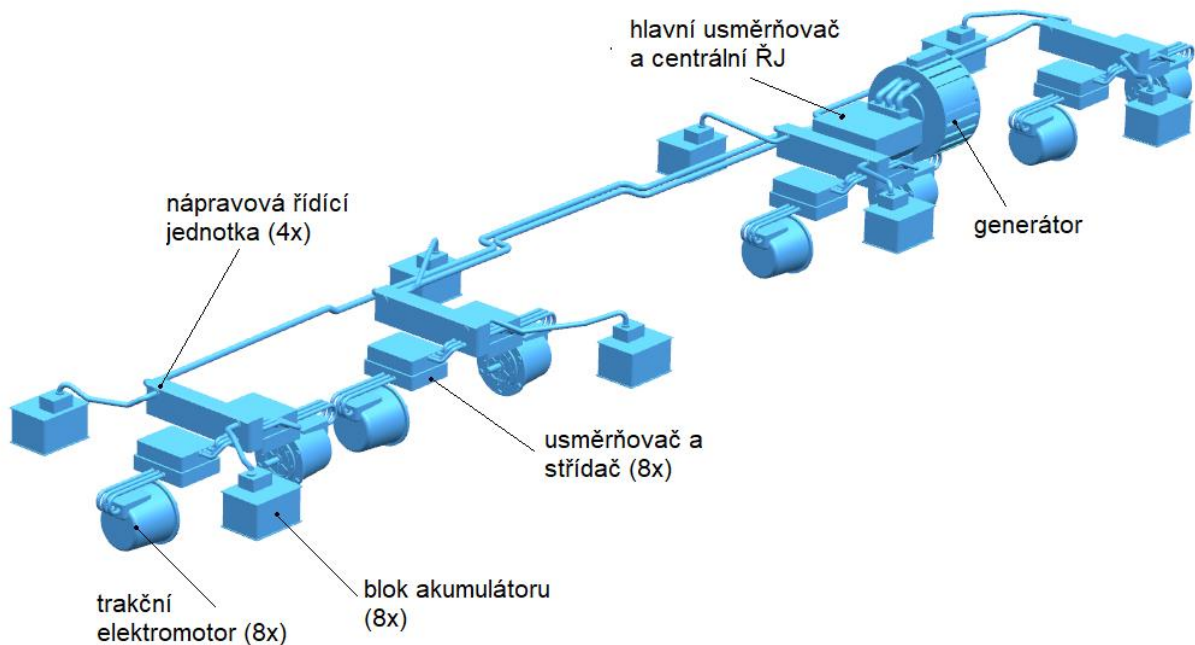
Implementace na řízené nápravě je velmi podobná. Zavěšení umožňuje zatáčení kola a na poloose musí být umístěn homokinetický kloub.



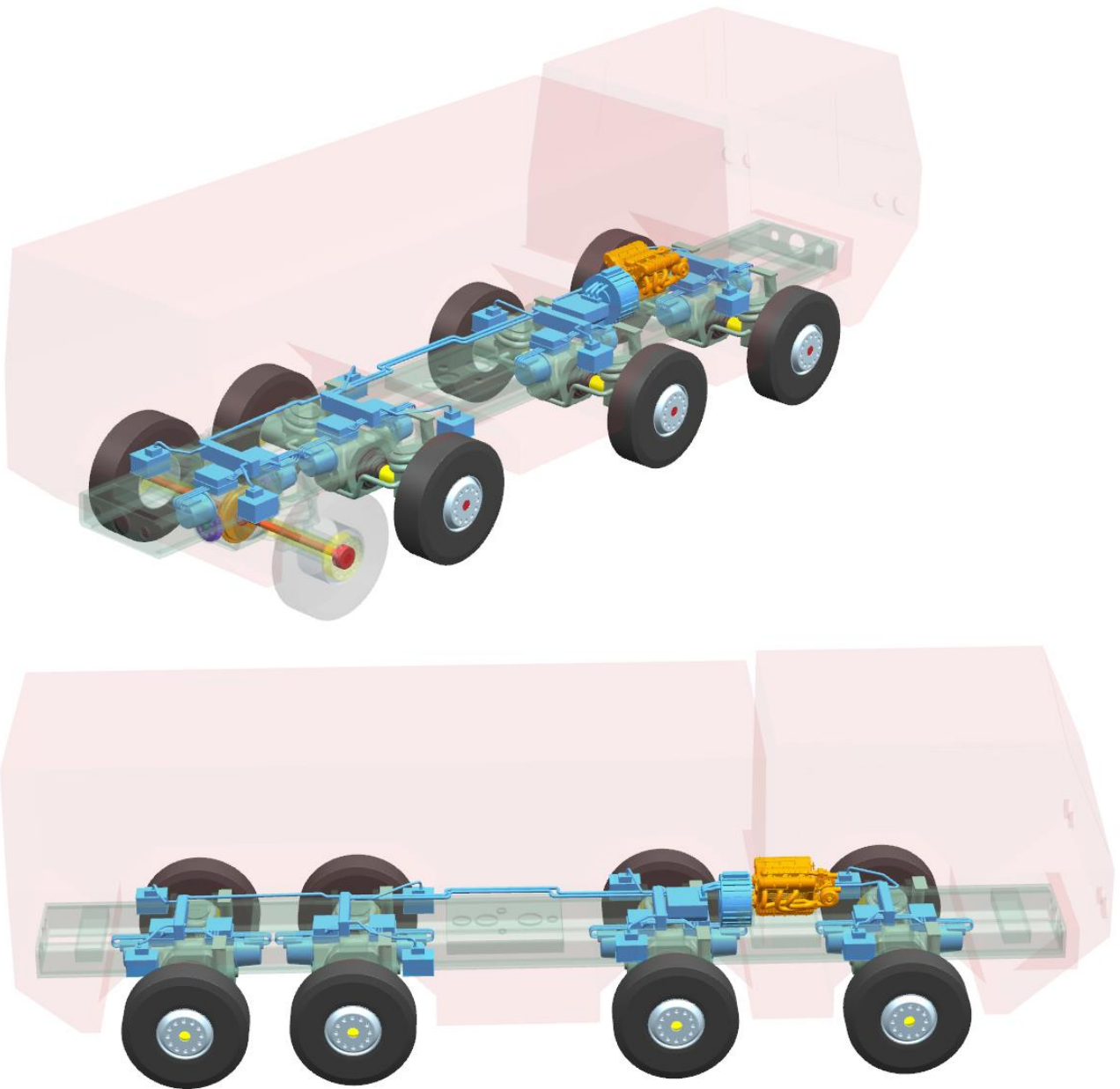
Obrázek 40: Implementace ústrojí na běžné nápravě

10.4 Elektrická výzbroj vozidla

Předposledním krokem je projekční návrh elektrické výzbroje. Elektrické točivé stroje byly přibližně vymodelovány podle technických listů. Bloky baterie odpovídají uspořádání 334 článků do přibližného tvaru kvádru, s přídatkem pro propojení. Výzbroj odpovídá blokovému diagramu z předchozí kapitoly.

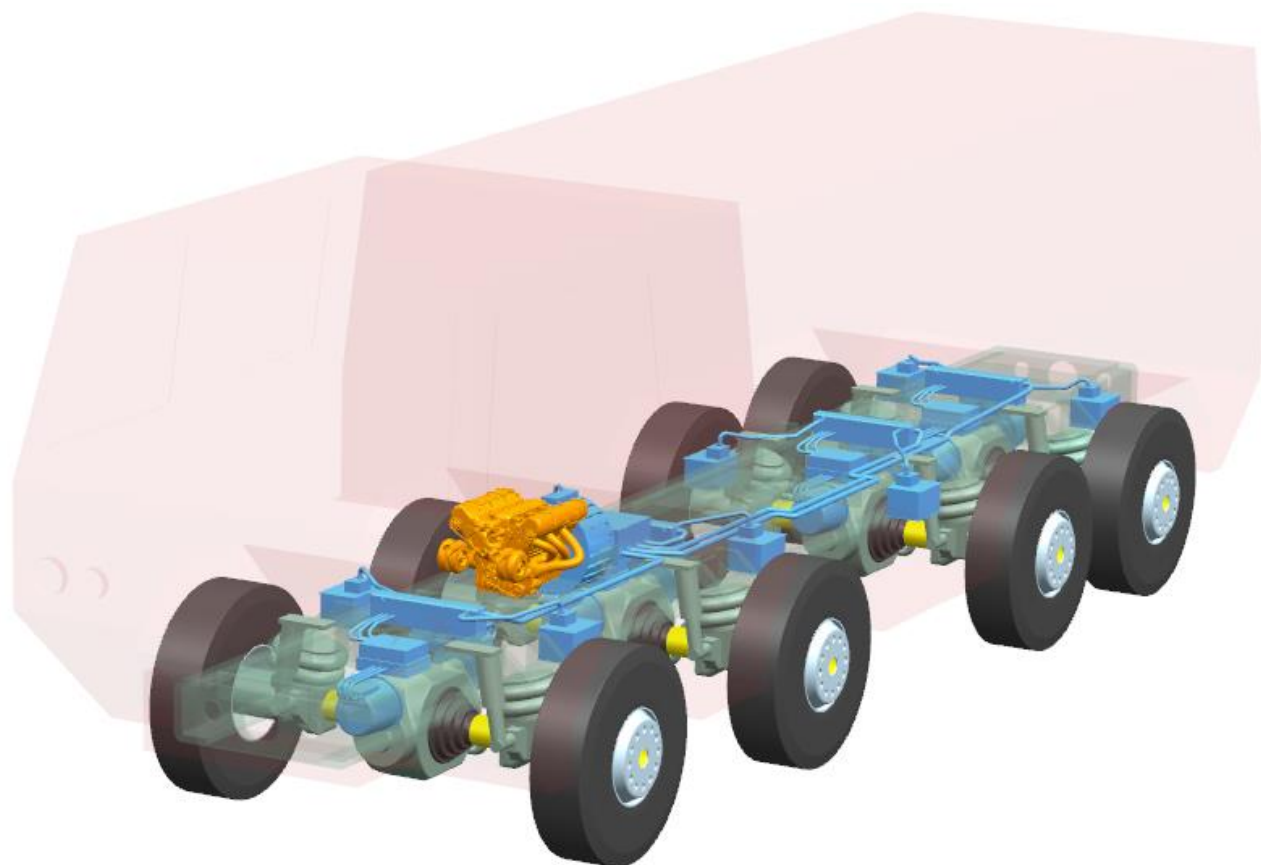


10.5 Implementace ve fiktivním vozidle



Obrázek 41: Implementace ve fiktivním vozidle 1

Kompletní návrh pohonu byl implementován do fiktivního vozidla pro nastínění prostorové náročnosti. Jako model pro spalovací motor byl využit model z online knihovny pro přiblížení rozměrů. [26] Pokud se zástavba porovná s obr. 20 – Tatra 8x8, je zřejmé, že mnoho mechanických komponent nahradily elektrické. Největší prostorová úspora spočívá v nahrazení velkého nákladního motoru, motorem pro osobní automobil. Absence vícestupňové převodovky rovněž přidává prostor.



Obrázek 42: Implementace ve fiktivním vozidle axonometrický pohled zepředu

11 Ekonomické zhodnocení

Základní údaje pro ekonomické zhodnocení vychází z dokumentu technických parametrů, které jsou součástí přílohy. Pro stanovení ceny hybridu, budou od ceny běžného vozidla odečteny ceny hlavních komponent jako převodovka či rozdíl ceny motorů. Naopak budou přičteny ceny zásadních elektrických komponent jako akumulátory, měniče či elektromotory. Cena vedlejších elektrických komponent jako kabely je zanedbána, resp. uvažuje se jako náhrada nákladu na vypadlé mechanické komponenty (diferenciály, rozvodovky, hnací hřídele).

Hodnoceno bylo metodou LCC (life-cycle-cost, z angl. – cena životního cyklu). Tato metoda počítá s náklady během celého cyklu výroby. Pro vozidla tam kromě pořizovací ceny patří náklady na údržbu či náklady na provoz.

Náklady na údržbu jsou pouze hrubý odhad. Hodnoty a intervaly se liší řádově podle modelů a výrobců a případného rozsahu poruchy. Hrubý odhad vychází ze zkušeností s údržbou osobních automobilů.

Tabulka 15: LCC konvenčního NV

Konvenční nákladní vůz 8x8 pro speciální účely				
Životnost [let]	Roční nájezd[km]	Nájezd celkem [km]	Spotřeba paliva [l/100km]	Cena paliva [kč/l]
12	12 000	144 000	65	31
Cena za palivo celkem [Kč]			2 901 600	
Pořizovací cena (základní) [Kč]			10 500 000	
Speciální položky [Kč]				
Žádné		0		
Pořizovací cena [Kč]			10 500 000	
Údržbová práce	interval [km]	náklady [kč]	Četnost celkem (zaokr. Nahoru)	Dílčí LCC [kč]
Olej převodovky	10 000	12 000	15	180 000
Olej motoru	10 000	7 500	15	112 500
Olej diferenciálů	20 000	12 000	8	96 000
Oprava motoru	40 000	20 000	4	480 000
Výměna spojky	60 000	80 000	3	240 000
Běžná závada	7 000	5 500	21	115 500
LCC celkové [kč]				14 625 600

Tabulka 16: LCC hybridní NV

Hybridní nákladní vůz 8x8 pro speciální účely				
Životnost [let]	Roční nájezd[km]	Nájezd celkem [km]	Spotřeba paliva [l/100km]	Cena paliva [kč/l]
12	12 000	144 000	40	31
Cena za palivo celkem [Kč]			1 785 600	
Pořizovací cena (základní) [Kč]			10 500 000	
Speciální položky [Kč]				
Položka	počet	náklady [kč]	Dílčí LCC [kč]	
Spalovací motor (velký)	1	-520000	-520000	
Spalovací motor (malý)	1	350000	350000	
Řazená převodovka	1	-420000	-420000	
Blok akumulátoru	8	21170	169360	
Měnič generátoru	2	240000	480000	
Měniče elektromotorů	2	240000	480000	
Trakční elektromotor	8	100000	800000	
Genrátor	1	640000	640000	
Pořizovací cena [Kč]			12 479 360	
Údržbová práce	interval [km]	náklady [kč]	Četnost celkem (zaokr. Nahoru)	Dílčí LCC [kč]
Olej převodovky	10 000	12 000	15	180 000
Olej motoru	10 000	7 500	15	112 500
Běžná závada	7 000	5 500	22	121 000
LCC celkové [kč]				14 678 460

Tabulka 17: Porovnání LCC

	Porovnání LCC			
	Pořizovací náklady [kč]	Provozní náklady [kč]	Údržba [kč]	Celkové LCC [kč]
Hybridní NV	12 479 360	1 785 600	413 500	14 678 460
Konvenční NV	10 500 000	2 901 600	1 223 500	14 625 600
rozdíl	18,9%	-38,5%	-66,2%	0,4%

Oproti konvenčnímu vozu se celkové náklady LCC liší minimálně. Velké rozdíly jsou v dílčích bodech analýzy. První značný rozdíl je v předpokládané pořizovací ceně vozidla. U hybridního vozidla byla odečtena cena velkého nákladního motoru a byl nahrazen menším osobním. Další odečtovou položkou byla pro hybridní vůz řazená převodovka. Naopak náklady výrazně narostly při započtení hlavních elektrických komponent. Kde nejdražšími položkami jsou elektromotory. Měníče byly uvažovány jako 2 kusy pro generátor i pro elektromotory. Ve skutečnosti bude generátor opatřen jedním velkým a trakční elektromotory 8 menšími. Reálná cena by neměla být příliš odlišná.

Do provozních nákladů byla započtena čistě cena spotřebovaného paliva během uvažovaného životního cyklu. Pro konvenční 8x8 vozidlo byla spotřeba paliva odhadnuta na 65l/100km, podle podobných vozidel na trhu, jako například Tatra 815 8x8 [27]. Pro hybridní vozidlo vychází spotřeba ze simulace v cyklu NEDC. Spotřeba v cyklu $c=4.11L$, cyklus odpovídá přibližně $s=10.5km$. Odhadovaná spotřeba konceptu je pak:

$$s_p = \frac{c}{s} \cdot 100 = \frac{4.11}{10.5} \cdot 100 \cong 40l/100km$$

Zde vynikla jedna z předností hybridního řešení, a to vysoká efektivita, kdy rozdíl v odhadované spotřebě je značný. Předpokládaná úspora nákladů na palivo je u hybridního řešení 38,5%.

Třetím bodem analýzy jsou náklady na údržbu. U této kategorie je předpokládána nejmenší přesnost, přesto odhadem nákladů hlavních údržbových prací opět vyniká jednoduché řešení hybridu. U spalovacího motoru hybridu se počítá s menšími náklady, jelikož pojede více v konstantním a optimalizovaném režimu. Některé prvky údržby jako spojka odpadají úplně. Jako hlavní údržba v hybridu jsou předpokládány výměny provozních náplní ve spalovacím motoru a sestupných převodovkách. Dále je počítáno s běžnými závadami rozsahem od prasklé žárovky po poškození laku. Hlavním předmětem analýzy údržbových nákladů byli zejména uzly vozidla spojené s pohonem.

Celkový odhadovaný rozdíl nákladů je +0,4% u hybridního vozidla. Jedná se o relativně malý rozdíl, který se může v realitě lišit zejména údržbou a způsobem používání vozidla. Vzhledem k tomu, že primárním cílem hybridizace vozidla bylo zlepšení dynamických vlastností, je výsledek velice uspokojivý.

12 Závěr

S blížící se emisní normou Euro7 se stává použití hybridních architektur pohonů nezbytností, pro dosažení přísných emisních norem. Spojení spalovacího motoru a elektromotoru dokáže nabídnout snížení emisí a spotřeby, a dokonce i navýšit výkon pohonu. A právě navýšení výkonu a potenciální zlepšení dynamiky může být atraktivní pro mnoho aplikací. Jednou z těchto aplikací mohou být nákladní vozidla pro speciální využití, kde může být kladen důraz právě na dynamiku. Hybridizace pohonu ale často přichází za cenu komplexnosti. Trochu výjimku tvoří sériový hybrid, zde je ale nutná plnohodnotná elektrická výzbroj.

Především myšlenka zvýšit dynamiku vozidla je atraktivní pro oblast speciálních nákladních vozidel. Mezi taková speciální vozidla lze zařadit například hasičské vozy, nebo armádní vozy. Zde je kromě dynamiky třeba klást důraz vlastnosti v terénu, či spolehlivost.

Na základě těchto požadavků byla navržena hybridní architektura pohonu pro speciální vozidlo 8x8. Jako typ architektury bylo zvoleno řešení sériového hybridu. Zvolen byl na základě předpokládaných vlastností, které předčilo paralelní hybrid. Konkrétní architektura je řešena jedním elektromotorem pro kolo, celkem tedy 8. Zvolené trakční motory jsou vysokootáčkové, odpadla proto nutnost stupňové převodovky, je pouze sestupná. Jako substitut velkého spalovacího motoru byl vybrán vznětový motor z osobního vozidla, který má dostatečný výkon. Zmenšením motoru se předpokládá výrazné snížení emisí i spotřeby. Mechanický uzel pohonu byl výrazně zredukován, a víceméně nahrazen elektrickým obvodem. Celý obvod je maximálně decentralizovaný do 4 nápravových bloků, a ty jsou dále rozděleny do 2 částí. Za centrálním generátorem je tedy teoreticky 8 nezávislých elektrických obvodů, kdy porucha jednoho výrazně neovlivní provozuschopnost vozidla. Navržené řešení umožňuje vozidlu zrychlit z 0-80 km/h za 24s. Na maximální rychlost, které je 90km/h za 32.6s. Největší teoretické stoupání pro kráčivou jízdu je 50%. Schopnosti vozidla ověřily matematické modely vytvořené pomocí simulačního softwaru SimulationX.

V posledním kroku byla provedena analýza provozních nákladů LCC. Která ukázala konkurenceschopnost řešení i na ekonomickém poli. Řešení bylo srovnáno s podobným konvenčním vozidlem. I přes vyšší pořizovací cenu, byly náklady téměř srovnány. Hlavně díky nižším předpokládaným nákladům na údržbu a spotřebu paliva.

Hybridní architektura může být správnou cestou pro zlepšení dynamických vlastností, snížení emisí a ještě k tomu srovnat provozní náklady na úroveň běžného vozu. Důležité je však hledat řešení, které je vhodné pro danou aplikaci. V případě sériového hybridu je možné, že řešení bude často aplikováno i například na dálničních křižnicích nebo i menších nákladních vozidlech.

Seznam použitých zdrojů

- [1] DOPROVODY, VACLAV MRŠTÍK. Legislativa. *Rozměry vozidel* [online], [cit. 18. 2. 2021]. Dostupné z: <http://www.doprovody.eu/index.php/cs/home/legislativa-25149/59-rozmary-vozidel>
- [2] FORD. FORD TRANSIT CUSTOM. *exteriér* [online], [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.ford.cz/uzitkove-vozy/novy-transit-custom/galerie#>
- [3] TATRA. Produktový katalog. *Podvozky* [online], [cit. 20. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.tatra.cz/nakladni-automobily/produktovy-katalog/podvozky/>
- [4] MERCEDES-BENZ. Naše nákladní vozidla. *Nový Actros* [online], [cit. 25. 2. 2021]. Dostupné z: https://www.mercedes-benz-trucks.com/cs_CZ/models/new-actros.html
- [5] MEILLER-KIPPER. Výrobky. *Sklápěcí návěs* [online], [cit. 25. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.meiller.com/cz/vyrobky/sklapeci-naves/>
- [6] DAF COMPONENTS. Products. *Paccar daf engines* [online], [cit. 25. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.dafcomponents.com/en/products/paccar-daf-engines>
- [7] TATRA. Tatra vehicle design. *Tatra engine* [online], [cit. 26. 2. 2021]. Dostupné z: <https://www.tatratrucks.com/why-tatra/tatra-vehicle-design/tatra-engine/>
- [8] CUMMINS. Engines. *X15 EFFICIENCY SERIES 2020* [online], [cit. 6. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.cummins.com/engines/x15-efficiency-series>
- [9] SCRIBD. Documents. *DXi 11 Euro 4* [online], [cit. 6. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/332503672/Renault-DXi-11-Euro-4>
- [10] NĚMEC V. . Výukový list k předmětu *Silniční vozidla: Hydrodynamický měnič točivého momentu*. Ostrava: Střední průmyslová škola, Ostrava – Vítkovice, 2013
- [11] Jiageng Ruan. RESEARCHGATE. *Torque Converter Efficiency* [online], [cit. 10. 3. 2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Torque-Converter-Efficiency_fig1_282996810
- [12] ZF. Products 2019. *Ecosplit* [online], [cit. 10. 3. 2021]. Dostupné z: https://www.zf.com/products/en/trucks/products_29183.html#products_anchor_link_1eb765be-b3d7-3c62-bac9-69d47f9fab66
- [13] ZF. Products. *Traxon* [online], [cit. 17. 3. 2021]. Dostupné z: https://www.zf.com/products/en/trucks/products_29063.html
- [14] ALLISON. Marketing materials. *4700/4800 Series* [online], [cit. 2. 4. 2021]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj-h46J7tDwAhXDGuWKHdOtBhoQFjAAegQIBBAD&url=http%3A%2F%2Fwww.mtu-allison.com.ar%2Fpdf%2FSERIES_4700-4800.pdf&usg=AOvVaw1Uc5YMJJ9QuICW1YKTj9AN
- [15] SEDLÁČEK VOJTĚCH. TECH. *Nejoblíbenější český vůz jako...* [online], [cit. 4. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.czechcrunch.cz/2019/11/nejoblibenejsi-cesky-vuz-i-jako-plug-in-hybrid-skoda-odhalila-ctvrtou-generaci-modelu-octavia/>
- [16] BUŇATA MARTIN. Bakalářská práce: Udržitelná mobilita z pohledu pohonů vozidel. Plzeň: Západočeská univerzita, 2019

- [17] X-ENGINEERING. AUTOMOTIVE ENGINEERING. *MHEV - architectures* [online], [cit. 4. 4. 2021]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/vehicle/hybrid/mild-hybrid-electric-vehicle-mhev-architectures/>
- [18] AVACOM. Válcové. *Nabíjecí průmyslová baterie 18650...* [online], [cit. 8. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.avacom.cz/nabijeci-prumyslova-baterie-18650-samsung-2600mah-3-7v-liion>
- [19] BorgWarner. Electric drive motors. *HVH410-150* [online], [cit. 8. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.borgwarner.com/technologies/electric-drive-motors/hvh-series-electric-motor>
- [20] AYDIN M.. Researchgate. *8-pole 24-slot axial flux PM reference motor* [online], [cit. 15. 4. 2021]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/8-pole-24-slot-axial-flux-PM-reference-motor_fig2_224393995
- [21] TRUCK-FORUM. T-815, 815-2. - [online], [cit. 11. 4. 2021]. Dostupné z: <http://truck-forum.cz/forum/viewtopic.php?f=14&t=7616&start=4935>
- [22] ABT SPORTSLINE. Powersheet. *Audi CVUB* [online], [cit. 12. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.abt-sportslines.com/tuning/products/abt-power/>
- [23] BorgWarner. Electric drive motors. *HVH250-090* [online], [cit. 15. 4. 2021]. Dostupné z: <https://www.borgwarner.com/technologies/electric-drive-motors/hvh-series-electric-motor>
- [24] BATTERYBRO. Products. *Samsung INR18650-25R* [online], [cit. 20. 4. 2021]. Dostupné z: <https://batterybro.com/products/samsung-25r-inr1865025r-2500mah-20a>
- [25] COCHES. Noticias motor. *Audi presenta su nuevo motor V6 TDI,...* [online], [cit. 21. 4. 2021]. Dostupné z: <https://noticias coches.com/noticias-motor/audi-presenta-su-nuevo-motor-v6-tdi-mas-potente-y-eficiente/123083>
- [26] GRABCAD. Library. *V6 Biturbo* [online], [cit. 22. 4. 2021]. Dostupné z: https://grabcad.com/library/v6_biturbo_engine_cgpdesign-1
- [27] TATRATECH. Prospekty. *Tatra 815 VT 26 265 8x8.1R* [online], [cit. 10. 4. 2021]. Dostupné z: <http://ttratech.wz.cz/prospekty/t815/t815vt8x8.html>

Příloha 1 - Technické parametry

Autor dokumentu: konzultant DP – Jiří Černý – AKKA

Diplomová práce: Modifikace pohonu nákladního vozidla hybridní architekturou

Autor diplomové práce: Martin Buňata

Pro hlavní části pohonu uvažujte hodnoty z následujícího rozmezí:

Setrvačné momenty a hmotnosti		
Disk s pneumatikou (kolo)		
hmotnost	125-145	kg
Ir	30-40	kg·m ²
Běžná poloosa		
hmotnost	130-170	kg
Ir	14-20	kg·m ²
Řídicí poloosa		
hmotnost	135-170	kg
Ir	20-30	kg·m ²
Hnací hřídel		
hmotnost	50-80	kg
Ir	20-40	kg·m ²

Pro nakupované komponenty uvažujte ceny v následujícím rozmezí:

Ceny hlavních komponent [kč]	
Nákladní vozidlo 8x8 speciální	8 000 000 – 12 000 000
Elektromotor velký (1800-2600Nm)	600 000 - 800 000
Elektromotor malý (100-500Nm)	80 000 - 140 000
Spalovací motor nákladní 4-6L	200 000
Spalovací motor nákladní 6-10L	350 000
Spalovací motor nákladní 10-14L	520 000
Spalovací motor osobní 1-2.5 L	180 000
Spalovací motor osobní 2.5-4 L	350 000
Převodovka nákladní manuální	250 000
Převodovka nákladní automatická	420 000
Měnič pro ca 150kW	240 000
Článek 18650, včetně příslušenství	65

Uvedené ceny, parametry a jejich rozmezí jsou na základě poptávek, zkušeností a spolupráce s dodavateli. Pro účel diplomové práce vyberte vhodnou hodnotu z rozmezí.