



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**  
**FAKULTA DOPRAVNÍ**

Bc. Martin Morávek

Návrh sériového hybridního pohonu pro taktické vozidlo

Diplomová práce

**2018**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

děkan

Konviktská 20, 110 00 Praha 1



**K616.....Ústav dopravních prostředků**

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

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

**Bc. Martin Morávek**

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

**N 3710 – DS – Dopravní systémy a technika**

Název tématu (česky): **Návrh sériového hybridního pohonu pro taktické vozidlo**

Název tématu (anglicky): Powertrain design for series hybrid tactical vehicle

### **Zásady pro vypracování**

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

- Uvedte přehled stávajících řešení a použitelných technologií a komponent v oblasti hybridních pohonů vozidel
- Vyberte vhodné komponenty pro sériový hybrid (elektromotor, generátor, motor, měnič, baterie atd.)
- Sestavte matematický model navrženého pohonného ústrojí ve vhodném SW (např. GT-SUITE, MATLAB, Simulink)
- Zvolte vhodný jízdní cyklus pro ověření efektivity navrženého pohonu
- Vyhodnoťte výsledky simulace a případně proveďte optimalizaci návrhu
- Navrhněte rámcově následující konstrukční řešení
  - - implementace elektromotorů do náprav vozidla
  - - umístění měničů a baterií



- Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího práce
- Rozsah průvodní zprávy: minimálně 55 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)
- Seznam odborné literatury: Vlk, F.: Dynamika motorových vozidel 2. vyd. Brno. 2003. 432 s. ISBN 80-239-0024-2.  
First, J.: Energetická analýza pozemní dopravy  
Vlk, F.: Alternativní pohony motorových vozidel. 1. vyd. Brno. 2004. 234s. ISBN 80-239-1602-5

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Petr Blažek**  
**Ing. Josef Mík, Ph.D.**

Datum zadání diplomové práce:

**1. června 2017**

(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajícího ze standardní doby studia)

Datum odevzdání diplomové práce:

**30. listopadu 2018**

- a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývající ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia  
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývající z doporučeného časového plánu studia

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



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.  
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání diplomové práce.

Bc. Martin Morávek  
jméno a podpis studenta

V Praze dne .....5. června 2018

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této diplomové práce. Zvláště pak děkuji panu Ing. Josefu Míkovi Ph.D. za poskytnuté konzultace k této diplomové práci a za rady, které mi poskytoval po celou dobu mého studia. Dále bych velmi rád poděkovat panu Ing. Petru Blažkovi ze společnosti MBtech Bohemia s.r.o. za odborné vedení této práce a umožnění přístupu k mnoha důležitým informacím a možnostem. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat své rodině a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu dosavadního studia.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

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

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

V Praze dne: 30. listopadu 2018

.....

podpis

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

## Návrh sériového hybridního pohonu pro taktické vozidlo

Diplomová práce

Listopad 2018

Bc. Martin Morávek

### **Abstrakt**

Předmětem této diplomové práce je implementace sériového hybridního pohonu do vojenského taktického vozidla. V teoretické části práce je uveden a popsán přehled možných pohonů vozidel a jejich komponent. Následuje stručný úvod do problematiky vojenských vozidel a jejich požadavků. Na základě uvedených poznatků je zvolen právě sériový hybridní pohon, který u vojenských vozidel nabízí značný potenciál ke zlepšení. V souladu se stanovenými jízdními požadavky je poté navržen samotný pohon vozidla. Pro ověření zástavbových poměrů je vytvořen zjednodušený CAD model vozidla s umístěnými klíčovými komponenty sériového hybridního pohonu. Pro ověření efektivity navrženého pohonu byla provedena počítačová simulace jízdy ve vytvořeném jízdním cyklu.

### **Klíčová slova**

Pohon, sériový hybrid, vojenské vozidlo, jízdní cyklus

### **Abstract**

This master thesis aims to design a series hybrid powertrain for military tactical vehicle. In research section it contains an overview and description of different powertrain possibilities and its components, followed by brief introduction to military vehicles and their requirements. Based on these findings is a series hybrid powertrain is selected, which in military vehicles offers significant potential for improvement. Furthermore, powertrain design is made in order to meet specific parameters. The simplified CAD model of the vehicle with main components of that specific powertrain was made, in order to confirm space requirements. To verify the efficiency of the developed powertrain a simulation in particular drive cycle was conducted.

### **Keywords**

Powertrain, serial hybrid, military vehicle, driving cycle

# Obsah

<b>1. Seznam použitých zkratk</b> .....	<b>6</b>
<b>2. Seznam použitých veličin a symbolů</b> .....	<b>7</b>
<b>3. Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>4. Pohony</b> .....	<b>10</b>
<b>4.1. Hybridní pohon</b> .....	<b>10</b>
<b>4.2. Konvenční pohon</b> .....	<b>12</b>
4.2.1. Alternativní paliva.....	14
<b>4.3. Elektrický pohon</b> .....	<b>15</b>
4.3.1. Externí zdroj elektrické energie .....	17
4.3.2. Palivové články .....	18
4.3.3. Akumulátory .....	18
<b>5. Dělení hybridních pohonů</b> .....	<b>19</b>
<b>5.1. Dělení dle stupně hybridizace</b> .....	<b>19</b>
5.1.1. Micro hybrid.....	19
5.1.2. Mild hybrid .....	20
5.1.3. Full hybrid.....	21
5.1.4. Plug-in hybrid .....	21
<b>5.2. Dělení dle uspořádání hnacího řetězce</b> .....	<b>21</b>
5.2.1. Sériový hybrid .....	22
5.2.2. Paralelní hybrid .....	23
5.2.3. Kombinované zapojení .....	24
5.2.4. Adhezní vazba .....	25
<b>6. Vojenská vozidla</b> .....	<b>26</b>
<b>6.1. Dělení vojenských vozidel</b> .....	<b>26</b>
<b>6.2. Charakteristické vozidlo</b> .....	<b>27</b>
<b>6.3. Hybridizace vojenských vozidel</b> .....	<b>29</b>
6.3.1. Výběr ideálního pohonu .....	31
6.3.2. Koncept sériového hybridního pohonu .....	34
<b>7. Dimenzování a výběr komponent</b> .....	<b>37</b>
<b>7.1. Elektromotory a převodovka</b> .....	<b>37</b>
7.1.1. Jízdní odpory.....	38
7.1.2. Výkon a točivý moment motoru .....	41
7.1.3. Výpočet parametrů motoru .....	41
7.1.4. Převodové poměry.....	45
7.1.5. Varianta I – jednostupňová převodovka .....	46
7.1.6. Varianta II – dvoustupňová převodovka .....	48
7.1.7. Volba převodovky a převodových poměrů .....	51
7.1.8. Měníče a ovladače .....	53
<b>7.2. Generátor el. energie</b> .....	<b>53</b>
<b>7.3. Spalovací motor</b> .....	<b>54</b>
<b>7.4. Akumulátory</b> .....	<b>57</b>
<b>8. Navržený pohon</b> .....	<b>61</b>
<b>8.1. Blokové schéma navrženého pohonu</b> .....	<b>61</b>
<b>8.2. Implementace jednotlivých komponent</b> .....	<b>61</b>
<b>8.3. Hmotnostní analýza</b> .....	<b>63</b>
<b>8.4. Dynamika navrženého pohonu</b> .....	<b>65</b>

<b>9. Simulace</b> .....	<b>67</b>
<b>9.1. Jízdní cyklus</b> .....	<b>67</b>
9.1.1. Teorie jízdního cyklu.....	68
9.1.2. Testování vojenských vozidel.....	68
9.1.3. Vhodné jízdní cykly.....	70
9.1.4. Sestavení jízdního cyklu.....	72
<b>9.2. Matematický model vozidla</b> .....	<b>73</b>
9.2.1. Hybridní model vozidla .....	74
9.2.2. Porovnávací model s konvenčním pohonem .....	76
<b>9.3. Výsledky simulace</b> .....	<b>79</b>
<b>10. Závěr</b> .....	<b>81</b>
<b>11. Použité zdroje</b> .....	<b>84</b>
11.1. Literatura .....	84
11.2. Internetové zdroje.....	84
<b>12. Seznam obrázků</b> .....	<b>91</b>
<b>13. Seznam tabulek</b> .....	<b>93</b>
<b>14. Seznam příloh</b> .....	<b>94</b>

# 1. Seznam použitých zkratek

AC	Alternating current	Střídavý proud
Batt	Batteries	Baterie
CNG	Compressed Natural Gas	Stlačený zemní plyn
CAD	Computer Aided Design	Projektování s podporou počítače
CAE	Computer Aided Engineering	Počítačová podpora inženýrských analýz a výpočtů
ČR		Česká republika
DC	Direct current	Stejnoseměrný proud
EM	Electric Motor	Elektromotor
HMMWV	High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle	Vysoce mobilní víceúčelové kolové vozidlo
ICE	Internal Combustion Engine	Motor s vnitřním spalováním
LPG	Liquefies Petroleum Gas	Zkapalněný ropný plyn
NEDC	New European Driving cycle	Nový evropský měřicí cyklus
SOC	State Of Charge	Stav nabití (akumulátorů)
TARDEC	Tank Automotive Research Develop and Engineering Center	Středisko pro výzkum a vývoj bojových vozidel
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicle Test Cycle	Celosvětový měřicí cyklus



## 2. Seznam použitých veličin a symbolů

Označení	Význam	Jednotka
a	Zrychlení vozidla	$\text{m.s}^{-2}$
$c_x$	Součinitel odporu vzduchu	-
e	Excentricita	m
f	Součinitel valivého odporu	-
g	Tíhové zrychlení	N
G	Tíha vozidla	N
$i_{\text{celkem\_max}}$	Maximální hodnota celkového převodového poměru	-
$i_1$	Hodnota prvního převodového poměru	-
$i_{1\_\text{celkem\_min}}$	Minimální hodnota prvního celkového převodového poměru	-
$i_2$	Hodnota druhého převodového poměru	-
$i_{2\_\text{celkem\_max}}$	Maximální hodnota druhého celkového převodového poměru	-
$i_{c1}$	Hodnota celkového prvního převodového poměru	-
$i_{c2}$	Hodnota celkového druhého převodového poměru	-
$i_k$	Hodnota kolové redukce	-
$i_{\text{max}}$	Celkový maximální převodový poměr	-
$i_0$	Stálý převod	-
m	Hmotnost vozidla	kg
$M_{1\_kolo}$	Potřebný točivý moment vztažený na jedno kolo	N.m
$M_{\text{celkem}}$	Potřebný točivý moment na překonání celkového jízdního odporu	N.m
$M_{\text{em\_min}}$	Minimální hodnota točivého momentu elektromotoru	N.m
$O_d$	Dynamický obvod kol	m
$P_{1\_kolo}$	Potřebný výkon vztažený na jedno kolo	W, kW
$P_a$	Příkon agregátů	W, kW
$P_{\text{celkem}}$	Potřebný výkon na překonání celkového jízdního odporu	W, kW
$P_{\text{gen}}$	Výkon generátoru	W, kW
$P_{\text{ICE}}$	Výkon spalovacího motoru	W, kW
R	Celkový jízdní odpor	N
r	Poloměr kol (statický)	m
$R_A$	Aerodynamický odpor	N
$R_a$	Odpor zrychlení	N
$R_{a=1,0\text{m.s}^{-2}}$	Celkový jízdní odpor při zrychlení $1 \text{ m/s}^2$	N
$R_\alpha$	Odpor stoupání	N
$R_{\alpha=70\%,v=8\text{km/h}}$	Celkový odpor při jízdě v 70 % stoupání rychlostí 8 km/h	N
$r_d$	Dynamický poloměr kola	m
$r_k$	Poloměr rotujících částí	m
$R_r$	Odpor valení	N
$R_{v\text{max}}$	Celkový odpor při jízdě maximální rychlostí	N
$S_x$	Čelní plocha vozidla	$\text{m}^2$
v	Rychlost vozidla, rychlost proudícího vzduchu	$\text{m.s}^{-1}$ , km/h
$v_{\text{max}}$	Maximální rychlost vozidla	$\text{m.s}^{-1}$ , km/h
$\alpha$	Úhel podélného sklonu vozovky	rad, %
$\delta$	Rotační koeficient setrvačnost	-
$\varepsilon$	Úhlové zrychlení rotujících částí	$\text{rad.s}^{-2}$
$\eta$	Účinnost, Odpor vnitřního tření	-
$\rho$	Hustota	$\text{kg.m}^{-3}$
$\Phi_{\text{em}}$	Otáčky elektromotoru při maximální rychlosti vozidla	ot./s
$\Phi_{\text{kol}}$	Otáčky kol při maximální rychlosti vozidla	ot./s

### 3. Úvod

Vojenské technologie historicky vždy patřily k oblasti vysokých mocenských zájmů, do kterých se investovaly značné prostředky tak, aby tyto technologie byly co nejučinnější a nejmodernější. A právě poslední dvě zmíněná adjektiva, tedy moderní a účinné se často spojují i s hybridním pohonem vozidel. U obou by bylo možné dlouze polemizovat, do jaké míry jde o pravdivé tvrzení, zvláště však když první vozidlo s hybridním pohonem bylo vynalezeno Ferdinandem Porsche už roku 1898. Druhé tvrzení, tedy problematika účinnosti hybridního pohonu, bude rozebrána později v této diplomové práci. Zřejmé však je, že v dnešní době zažívá hybridní pohon značný rozmach. [4]

Důvod tohoto rozmachu v současnosti, když po celá desetiletí této oblasti dominoval konvenční pohon se spalovacím motorem, můžeme hledat zejména v prosazování ekologických způsobů dopravy a snížení závislosti na fosilních palivech. Právě fosilní paliva jakožto největší zdroj světové spotřeby energie jsou zároveň i největším zdrojem skleníkových plynů a navíc už při jejich samotné těžbě vznikají další sociální a environmentální problémy. Je více než zřejmé, že světové zásoby fosilních paliv jsou omezené. Vzhledem k tomu že se zároveň jedná o neobnovitelný zdroj energie, je nezbytné hledat alternativní zdroje energie a s tím související další odlišné způsoby pohonů dopravních prostředků.

Do jisté míry platí, že ekologie souvisí se spotřebou paliva. V kontextu hybridních osobních automobilů či čistě elektrických automobilů se pak často mluví, v porovnání s klasickým pohonem, o nižší či nulové spotřebě paliva a tím souvisejících emisích. Na první pohled by se tedy mohlo zdát, že hybridní, případně pak elektrická vozidla se automaticky rovnají ekologickým vozidlům. V určitých případech tomu lze opravdu tak může být, je však důležité brát v potaz zdroj energie a další aspekty, jako je například likvidace akumulátorů.

Nižší spotřeba paliva však není jedinou kladnou vlastností hybridních pohonů a proto se s nimi stále více setkáváme i mimo oblast osobních dopravních vozidel. Hybridní pohon totiž nabízí i další výhody, které našly své uplatnění například v motor sportu, kde primárně zlepšují dynamiku vozidel. Hybridní pohony se začínají využívat například i u autobusů městské hromadné dopravy ve světových metropolích jako je New York či Londýn. Využití jej lze pak i u tramvají či trolejbusů. Takové řešení se uplatnilo například ve francouzském Nice, kde památkáři neumožnili výstavbu troleje v historické části města. [5]

Očividně tedy hybridní pohon nabízí celou řadu výhod, které více či méně dokážou pokrýt specifické potřeby rozmanitého technického odvětví, jako jsou právě dopravní prostředky. V této diplomové práci, budou hledány specifické vlastnosti hybridního pohonu tak, aby bylo vhodné jej využít k vojenským účelům. Mezi klíčové vlastnosti, které by takovéto řešení mohlo nabídnout, patří například tichá jízda bez termální stopy, zvýšená bezpečnost posádky, nižší provozní a servisní náklady, či zlepšené jízdní vlastnosti v těžkém terénu. Po výběru ideálního

typu pohonu, budou dimenzovány a vhodně vybrány jednotlivé komponenty tak, aby navržený pohon splňoval předem určené jízdní požadavky. Navržený pohon bude posléze pomocí softwaru nasimulován. Výsledky této diplomové práce by měly vést k možnosti učinit závěr, zda je navržený typ pohonu pro daný typ vozidla vhodný a zda, či do jaké míry přináší předpokládané benefity.

## 4. Pohony

Pohon dopravního prostředku lze definovat jako soubor hlavních komponent, které se podílejí na přeměně různých forem energií na energii kinetickou, čímž následně dochází k vzniku mechanické práce, která je přenášena do prostředí, ve kterém se daný dopravní prostředek provozuje. Právě interakcí mezi dopravním prostředkem a jeho okolím dochází k jeho následnému pohybu. Pokud výše uvedenou obecnou definici aplikujeme na moderní vozidla, zjistíme, že mezi takové komponenty, které se podílejí na pohonu vozidla patří především motor, jakožto zdroj kinetické energie a dále pak součásti, které mají za úkol samostatný přenos kinetické energie od motoru na kola vozidla. Mezi tyto součásti patří zejména převodové ústrojí, hnací hřídele či diferenciál.

Často se setkáváme se ztotožněním pojmů pohon a motor (někdy dokonce i palivo) s tím, že další komponenty přenášející rotačního pohyb od motoru na kola vozidla jsou shledávány jako logicky navazující řetězec jednotlivých prvků, které lze různě uspořádat. Rozdělení pohonů tedy nemá žádnou pevnou strukturu ani specifika, někde se můžeme setkat s dělením pohonů až v rozdílech v principu fungování celého systému, například spalovací motor a elektromotor. Jinde můžeme najít dělení pohonů už na základě použitého paliva, pak lze za alternativní pohon označit i například pohon na LPG, i když princip vzniku mechanické práce u tohoto systému je v podstatě shodný s konvenčním pohonem při spalování benzínu. V této práci budeme pohony rozdělovat na základě toho, jaký je zdroj a proces přeměny energií, které následně pohánějí vozidlo. Aby zde uvedený přehled byl stručný a výstižný, budou uvedeny nejběžnější varianty pohonů, případně pak typický sled hnacích prvků, které se v se u daného typu pohonu nejčastěji používají. Pro každý druh pohonu si uvedeme na jakém principu daný systém pracuje a z toho vyvodíme jeho výhody a nevýhody.

### 4.1. Hybridní pohon

Slovo hybrid pochází z latinského slova *hybrida*, což lze volně přeložit jako „kříženec“. Tento výraz, původně vzat z biologie, dodnes v tomto oboru označuje potomka dvou velice odlišných zástupců. Termín se v dnešní době používá již napříč celou řadou oborů, avšak jeho význam zůstává ve své podstatě stejný. Jinak tomu není u pohonu vozidel, kdy termín hybrid označuje vozidlo, které kombinuje dva odlišné typy pohonu. [6]

Na důvod kombinace dvou odlišných typů pohonu se můžeme dívat ze dvou různých stran. Můžeme tvrdit, že se jedná pouze o jakýsi mezistupeň mezi jednotlivými pohony, tedy mezi konvenčním pohonem a čistě elektrickým pohonem, se snahou docílit čistě elektrické mobility, která je nicméně v současné době značně omezena svými parametry, zejména pak omezeným dojezdem, dobou nezbytnou k nabití baterií a pořizovací cenou. Nebo se můžeme na hybridní pohon dívat jako na ucelenou kombinaci, která dohromady funguje lépe než její

jednotlivé části, a to zejména tím, že se využívá výhod obou typů pohonů, a naopak nevýhody se vzájemně částečně potlačují.

Druhý zde uvedený úhel pohledu se v podstatě shoduje se slovy bývalého ředitele Toyoty pro oblast Severní Ameriky, který při uvedení modelu Toyoty Prius prohlásil, že všechna auta budou časem hybridní, ať už bude kombinace pohonů jakákoli. Naopak výrobce sportovních automobilů Horacio Pagani se nechal slyšet, že hybridní vozidla mají pro něj jednu zásadní nevýhodu, a to takovou, že při jízdě v čistě elektrickém režimu bývá dojezd u hybridních automobilů, pokud touto funkcí vůbec disponují, značně omezen. Při další jízdě s již vybitými akumulátory je tedy nutné ve vozidle vézt několik stovek kilogramů baterií, které v danou chvíli představují v podstatě zbytečnou zátěž, to má samozřejmě značně negativní vliv jak na samotné jízdni vlastnosti vozidla, tak například i na spotřebu spalovacího motoru, který právě v případě vybitých baterií obstarává pohon vozidla. Výrazně negativní názor na hybridní či elektrický pohon pak měl i šéf Maserati Harald Western, který kritizoval zejména všeobecný nátlak na snižování emisí, respektive zvýhodňování alternativních pohonů, kdy podle něj chyběly jasné důkazy o jejich ekologičnosti. Nutno podotknout, že podle nynějších informací uvede i tato automobilka na trh vozila s hybridním pohonem nejspíše již příští rok. Je tedy zjevné, že požadavky trhu se mění a inovace technologií dovolují dále posouvat nové způsoby pohonů a měnit zažitá předsudky. [7] [8] [9] [10]

Z výše uvedeného můžeme dospět k názoru, že ani hybridní, ale ani elektrický pohon není zdaleka bezchybným řešením, a že i osobnosti na vysokých pozicích v automobilovém průmyslu se na jednotném názoru neshodnou. Je však důležité si uvědomit, že rozdílné typy pohonů mají rozdílné vlastnosti a tím mohou pokrýt specifické potřeby různých skupin řidičů. Mezi kritéria pro výběr vhodného pohonu pak patří například typická délka trasy uživatele, oblast provozování vozidla, způsob využití, zázemí uživatele, a samozřejmě finanční možnosti. Dalším klíčovým faktorem v oblasti pohonů je stále probíhající vývoj. Zde si můžeme připomenout přirovnání již zmíněného Horacia Pagani o vývoji hybridních technologiích k vývoji mobilních telefonů, které byly ještě před pár desítkami let oproti těm dnešním zcela k nepoznání. Můžeme tedy jen hádat, jaké nové technologické pokroky nám vývoj přinese. [11]

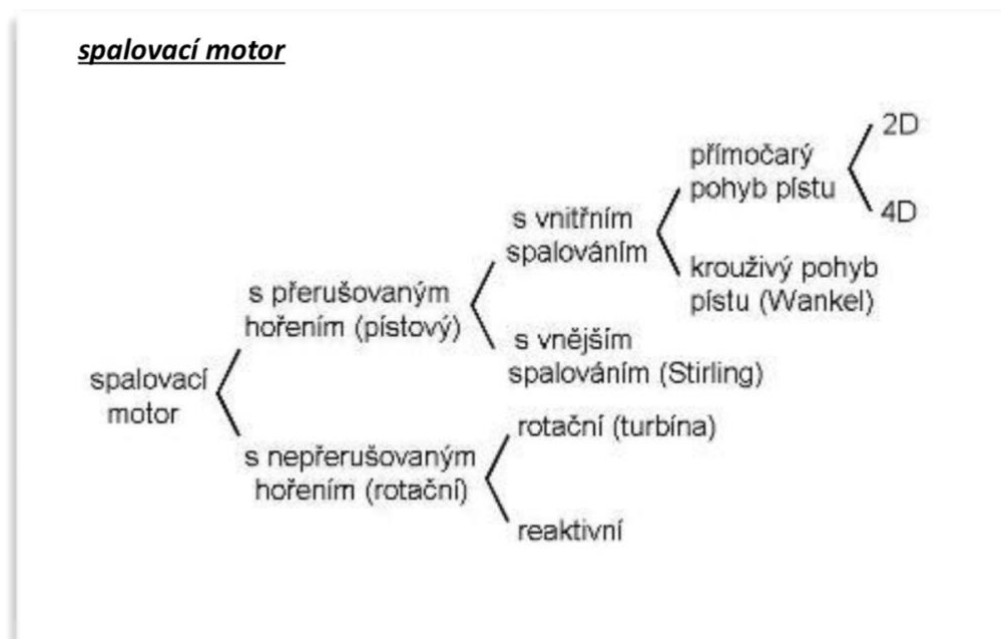
V této diplomové práci má být navržen hybridní pohon tak, aby splňoval předem určené a specifické parametry související zejména s vojenským využitím. Tím se tedy do značné míry eliminuje problematika zahrnující heterogenní požadavky vlastností a parametrů koncového uživatele, jak již bylo zmíněno výše.

Jelikož se hybridní pohon nejčastěji skládá z kombinace konvenčního a elektrického pohonu, v následující části této diplomové práce si tyto typy pohonů detailněji rozebereme. Samotný technický popis hybridního pohonu se značně liší na základě zvoleného řešení, proto budou jednotlivé varianty hybridních pohonů popsány podrobněji v dalších kapitolách.

## 4.2. Konvenční pohon

Konvenčním pohonem se obecně rozumí využití spalovacího motoru, jenž spalováním paliva přeměňuje energii obsaženou v palivu na mechanickou práci. Na obrázku č. 1 můžeme vidět obecné rozdělení spalovacích motorů, přičemž v osobní dopravě se v průběhu let nejvíce rozšířil spalovací motor pístový s vnitřním spalováním a lineárním pohybem pístu.

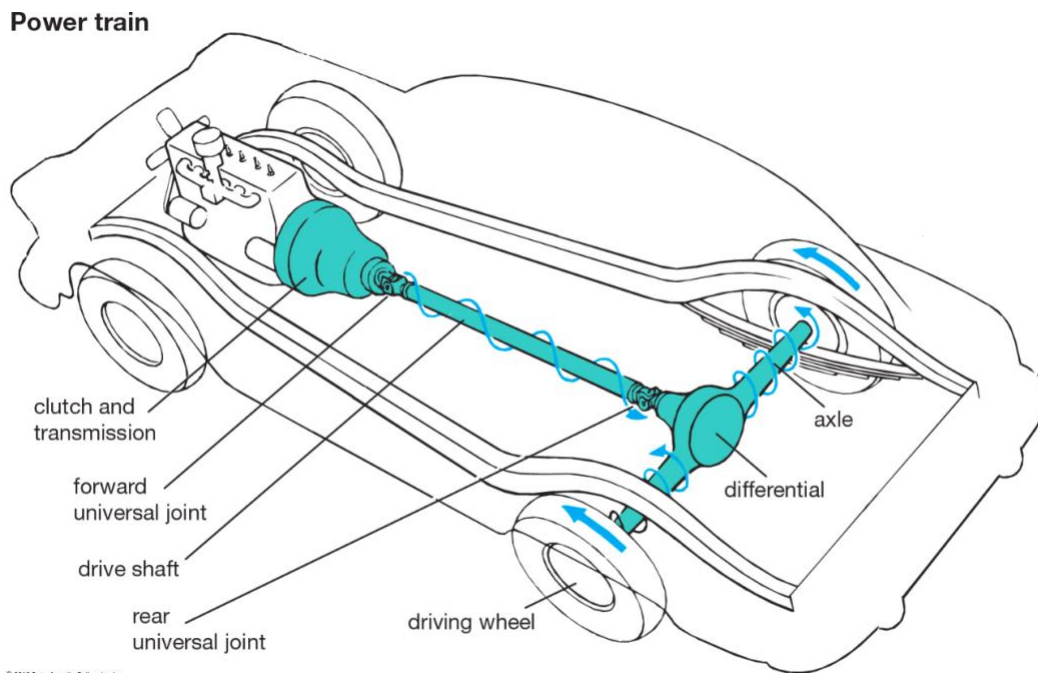
Japonská automobilka Mazda poměrně dlouhou dobu vyráběla motor s krouživým pohybem pístu (tzv. Wankelův motor), avšak spolu s koncem sportovního modelu vozidla RX-8 jej v roce 2012 přestala vyrábět. Dle nejnovějších informací je potvrzena opětovná výroba a nasazení v budoucím hybridním modelu automobilky Mazda. Mělo by se jednat o sériový hybridní vůz, kdy Wankelův motor bude sloužit jako tzv. *range extender* (prodlužovač dojezdu), jeho velkou výhodou má být zejména tichý chod v kabině vozidla při jeho provozu, což je vlastnost, která je u elektrických, či potažmo hybridních vozidel velmi žádaná. [12]



Obrázek 1: Rozdělení spalovacích motorů [2]

Obecně se spalovací motory s přímočarým pohybem pístů rozdělují na vznětové a zážehové, přičemž se liší zejména použitím odlišného paliva a způsobem jeho vznícení. Oba typy pracují na podobném principu, který je nám znám již od druhé poloviny 19. století, kdy roku 1860 sestavil první motor, tak jak ho známe, Belgičan Lenoir. Tři roky poté vylepšil tento systém Angličan Nikolaus Otto. Po něm je pojmenován také Ottův cyklus, který dnes používá velká většina pístových motorů s vnitřním spalováním. Další velmi známý cyklus, který se často používá za účelem úspory paliva je pak Aktinsonův cyklus, který vynalezl v roce 1882 James Aktinson.

Moderní vozidla využívají čtyřdobého spalovacího motoru, který se skládá ze čtyř pracovních fází: sání, komprese, výbuch a výfuk. Existuje i dvoudobý spalovací motor, který se využívá zejména u lehčích a méně výkonných motorů. Jejich následné využití můžeme najít u malých motocyklů nebo například u zahradních strojů. U dvoudobých, neboli dvoutaktních motorů jsou první dvě fáze - sání a komprese sloučeny, a zbylé dvě fáze - výbuch a výfuk taktéž. Přívod paliva a odvod spodin jsou řešeny vzhledem k průběhu fází dvoudobého motoru jinak než u čtyřdobého. Kvůli malému rozšíření a omezenému využití dvoutaktních motorů však v této diplomové práci nebudou nadále rozebírány. U pístových spalovacích motorů dochází po výbuchu v pracovní komoře k pohybu pístu směrem dolů, čímž dochází k pohybu klikové hřídele, které transformuje lineární pohyb pístu na pohyb rotační. U zážehových spalovacích motorů je pracovní směs tvořena nejčastěji směsí benzínu a vzduchu. Tato směs je po nasátí zapálena elektrickou jiskrou, která je vygenerována pomocí zapalovací svíčky. Naproti tomu u vznětových motorů dochází k samovolnému vznícení vstříknutého paliva, kterým bývá motorová nafta, pouze na základě vysokého tlaku a teploty. Rotační pohyb je pak dále z klikové hřídele dále přenášen přes převodovku a hřídele až na hnací kola. Grafické znázornění přenosu pohybu mezi převodovkou a koly vozidla můžeme vidět na obrázku č 2. [2] [3] [13]



Obrázek 2: Grafické znázornění přenosu rotačního pohybu mezi převodovkou a zadními koly vozidla [14]

### 4.2.1. Alternativní paliva

Spalovací motory však dokáží s většími či menšími úpravami spalovat i jiné než konvenční palivo, za které je považován benzín a motorová nafta. Nezřídka se tato varianta s využitím odlišného paliva označuje za alternativní pohon, ale jelikož se samotný princip přeměny energie obsažené v palivu na energii kinetickou nemění, jsou tyto varianty uvedeny níže v kapitole konvenčního pohonu. Řadí se mezi ně zejména:

- LPG (zkapalněné ropné rafinerské plyny)
- CNG (stlačený zemní plyn) a LNG (zkapalněný zemní plyn)
- Paliva s využitím alkoholů (etanol a metanol)
- Vodík

[3]

#### LPG

Jedná se o směs propanu a butanu (dříve často i takto označovaný), který buď neobsahuje žádné, nebo jen velmi malé množství škodlivých látek, jako jsou olovo, uhlovodíky a síra. LPG vzniká jako vedlejší produkt při těžbě ropy nebo zemního plynu. Výhodou tohoto paliva je bezesporu jeho ekologičnost, dále nízký vliv na jízdní vlastnosti vozidla ve srovnání s benzínem, nižší hluk a hladší chod motoru ale i bezpečnost daná vyšší zápalnou teplotou ve srovnání s benzínem. Cena samotného paliva je zhruba poloviční oproti ceně benzínu, avšak při spalování LPG je jeho spotřeba vyšší o cca 20 %. Mezi nevýhody patří omezený vjezd do obtížně vyvětrávaných prostor a to z důvodu hustoty LPG, která je větší než u vzduchu. Tím je způsobeno, při jeho případném úniku z palivové nádrže, jeho usazování u země a tím spojená bezpečnostní rizika. Mezi další nevýhody patří redukce zavazadlového, či kabinového prostoru z důvodu umístění sekundární palivové nádrže a vyšší náklady na přestavbu na takovýto pohon. Problematická je pak i dostupnost paliva, kdy v současné době je sice síť čerpacích stanic relativně hustá, nicméně běžným palivům se rovnat nemůže. Otázkou pak také zůstává dojezd, který se většinou pohybuje kolem 250 km při jízdě čistě na LPG, což je ve srovnání s konvenčním palivem poměrně málo. [3] [16]

#### CNG a LNG

Zemní plyn je tvořen převážně metanem, který je oproti LPG lehčí než vzduch. Jeho zkapalněnou variantu pak nazýváme LNG. Výhody a případné nevýhody jsou pak více či méně totožné s palivem LPG. Automobilky již reagují na vzrůstající poptávku po vozidlech na CNG i LPG a začínají nabízet vozidla s tímto pohonem již přímo z výroby. Tím se do značné míry eliminují již výše popsané nedostatky zejména ohledně umístění nádrže. Nepatrně horší



zůstává pak dynamika vozidla. Ekonomická výhodnost tohoto pohonu také nemusí být trvalá, čím více se pohon na CNG začíná rozšiřovat, tím více je toto palivo zatíženo daněmi. [3] [16]

#### Biopaliva a alkoholy

Zpracováním biomasy vzniká organickou fermentací a následnou destilací i vysokoprocenní alkohol. Dle odhadů může být takto pokryto až 20 % spotřebované energie v ČR. Alkohol je ekologické a vysoce hodnotné palivo pro spalovací motory. Své uplatnění najde biomasa i v případě vznětových motorů, kdy se různými chemickými a technologickými procesy z olejnatých semen (řepka, slunečnice, len) získává metylester olej, jenž má podobné vlastnosti a výhřevnost jako motorová nafta. Často pak dochází ke mísení klasické motorové nafty a metylesteru řepkového oleje, čímž vzniká tzv. bionafta. Využívání bionafty se sebou nese pro koncové uživatele i možná rizika, jako například problémy s dlouhodobou odolností plastových a pryžových dílů, či problémy s ucpáním palivového filtru, který může vzniknout při dlouhodobém používání bionafty a následnému použití klasické nafty. [3]

#### Vodík

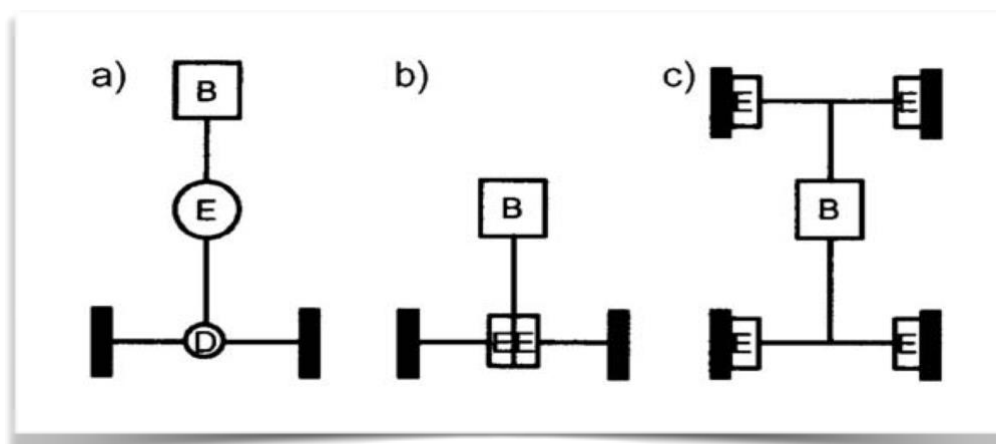
Vodík se v případě pohonu vozidel dá využít ve dvou variantách, přičemž z důvodu výrazně odlišného principu je druhá varianta popsána dále v kapitole hybridních pohonů. První variantou je spalování samotného vodíku přímo uvnitř válce. S tímto řešením experimentovala kolem roku 2006 automobilka BMW, která upravila šestilitrový benzínový motor V12 z řady 7 tak, že dokázal spalovat vodík ale i benzín nikoliv však souběžně. Takto řešené spalování vodíku je v podstatě bez emisí, respektive jediným odpadním produktem je vodní pára. K úspěšnému rozmachu vodíkového pohonu je nezbytné vyřešit problematiku, kterou se sebou vodík přináší. Jedná se zejména o problémy s jeho uskladněním v kapalné formě, samotné velké množství spotřebovaného vodíku, jeho výroba, prakticky nulová síť čerpacích stanic, hmotnost takového pohonu, problémy s hořením vodíku a v neposlední řadě i cena konečného produktu. [3] [17]

### 4.3. Elektrický pohon

Za elektrický pohon můžeme označit takové řešení, které využívá k pohybu dopravního prostředku energii elektrickou. Samotnou přeměnu elektrické energie na energii kinetickou zajišťují elektromotory. I přesto že elektrický pohon byl již od počátků rozvoje automobilismu silným konkurentem konvenčního pohonu, výraznější rozkvět zažívá až nyní. Důvody pro jeho opětovné využití jsou zejména ekologické ale také ekonomické. Je pravdou že elektromobily lokálně neznečišťují prostředí a že jejich provoz je oproti konvenčnímu pohonu velmi levný, nicméně každá strana má dvě mince. Otázku životního prostředí je nutné zkoumat ze všech

úhlů pohledu, tedy například i zdroje elektrické energie a její uskladnění. Ekonomika provozu také může být pomíjivá, přece jen daňová zátěž konvenčního paliva tvoří nemalou část státního rozpočtu, můžeme se tedy pouze domnívat, jaké dodatečné náklady spojené s provozem elektromobilů by se při jejich masovém rozšíření objevily.

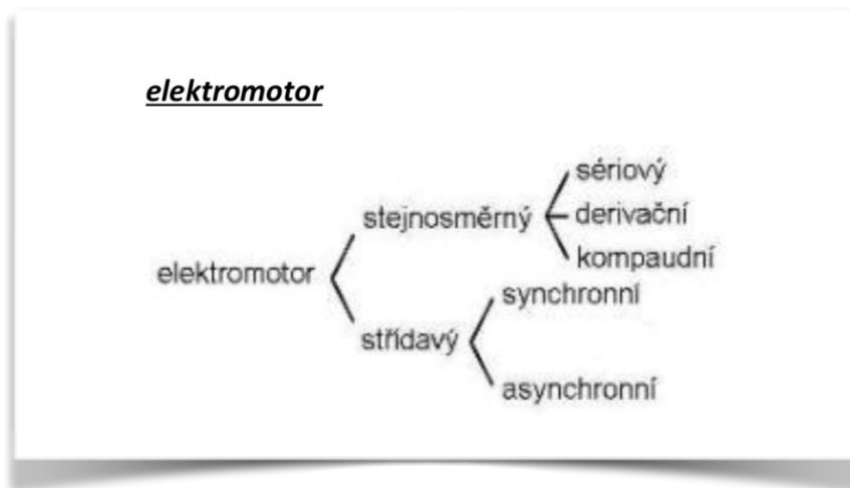
Elektrický pohon je stále velmi málo rozšířený a to v podstatě napříč celým spektrem dopravních prostředků. Neexistuje zde jednotná konstrukční linie elektromobilů, automobilky stále hledají nové a alternativní řešení elektrického pohonu respektive jeho uspořádání. Ponecháme-li nyní zdroj elektrické energie stranou, můžeme si uvést několik příkladů typických pro uspořádání hnacího ústrojí elektromobilů. Je nutno podotknout, že variant a kombinací hnacího ústrojí je v podstatě nespočet, uvedeny zde budou pouze typické konstrukční řešení. Jak můžeme vidět na obrázku č. 3, elektrický pohon můžeme dělit i dle uspořádání mezi elektromotorem a hnanými koly případně pak prvky mezi nimi.



Obrázek 3: Schéma uspořádání hnacího ústrojí elektromobilů [3]

Na obrázku č. 3 a) je znázorněn pohon jedné nápravy elektromotorem (E) s využitím diferenciálu (D). Jedná se v podstatě o nahrazení spalovacího motoru a převodovky u klasického pohonu elektromotorem. U druhého schématu b) byly místo diferenciálu použity na ose dva elektromotory. Takové řešení se nazývá tandemové a umožňuje s hnacího traktu vynechat diferenciál. Poslední schéma c) označuje umístění elektromotorů přímo na náboje kol, takto lze pohánět jednotlivá kola nezávisle na sobě. Různá řešení se dají různě kombinovat dle požadovaných vlastností. Ze schématu je však patrné, že v pohonu lze vynechat některé složité komponenty, takové řešení sebou však nese další úskalí. [3]

Podobná situace jako u hnacího ústrojí je i u použití typů elektromotorů. Stále se hledá optimální typ elektromotoru. Elektromotor je zařízení měnící elektrickou energii na energii kinetickou. Je schopný provádět i opačnou činnost, měnit kinetickou energii na elektrickou, tento proces se nazývá rekuperace a využívá se pro zachycení jinak zmařené energie. Na obrázku č. 4 můžeme vidět rozdělení elektromotorů. [2]



Obrázek 4: Rozdělení elektromotorů [2]

Elektrický pohon pak můžeme rozdělit i podle zdroje elektrické energie, která následně elektromotory pohání. U silničních vozidel nalezneme následující konstrukční řešení:

- Elektricky napájené silniční vozidlo (externí zdroj elektrické energie, například trolejbus)
- Výroba elektrické energie pomocí palivových článků
- Uložení elektrické energie v bateriích (akumulátorech)
- Generování elektrické energie pomocí spalovacího motoru (tato koncepce se častěji označuje jako sériový hybridní pohon, proto bude v této diplomové práci uveden v kapitole hybridních pohonů)

[2]

#### 4.3.1. Externí zdroj elektrické energie

První zmiňované řešení v podstatě využívá pouze nepřetržitý externí zdroj energie, což výrazně omezuje operativnost daného dopravního prostředku. Vhodné je ale například ve městech použitím v hromadné městské dopravě, kde mají vozidla dlouhodobě definované trasy, a to buď jako silniční vozidlo (trolejbus) nebo i jako kolejové vozidlo (tramvaj, vlak). Podstatně lepší využití je pak s využitím hybridním pohonu, tedy s použitím druhé pohonné jednotky, která by byla aktivní pouze při krátkodobé absenci vnějšího zdroje energie. Další možností je pak využití velkokapacitních baterií, které by byly během jízdy nabity a v místech bez externího zdroje by z nich vozidlo čerpalo elektrickou energii. V zahraničí se již testuje využívání trolejí pro dálniční jízdu zejména kamionů. Další možné řešení podobného principu je zabudování indukčního dobíjení přímo do vozovky. Obě varianty jsou však extrémně náročné na infrastrukturu. [18] [19]

### 4.3.2. Palivové články

Další variantou využití vodíku v dopravě, krom jeho přímého spalování ve spalovacím motoru, je pak přeměna energie obsažené ve vodíku na energii elektrickou na základě elektrochemických procesů probíhajících v palivových článkách. Tento systém ve své podstatě funguje jako generátor elektrického proudu, který následně pomocí elektromotorů pohání dané vozidlo. Celý systém se často kombinuje i s bateriemi, kam je energie ukládána a následně dle potřeb čerpána elektromotorem. Tento systém dosahuje velmi vysoké účinnosti teoreticky až 90 %, při použití palivových článků v reálných podmínkách však účinnost klesá na hodnotu kolem 50 %. Výhodou oproti čistě elektrickému vozidlu, kde je energie uskladněna v bateriích, je značná úspora hmotnosti. Při porovnání hmotnosti elektrického Volkswagenu e-Golfu s Hodnou Clarie, jež je poháněna palivovými články, zjistíme, že při srovnatelném výkonu je čistě elektrický pohon s bateriemi oproti vodíkovým článkům šestinásobně těžší. Nevýhody tohoto systému pak plynou ze samotného paliva a jsou popsány výše v kapitole alternativní paliva konvenčního pohonu. [3] [15]

### 4.3.3. Akumulátory

Závěrem kapitoly o elektrickém pohonu se dostáváme k dnes nejčastěji využívanému elektrickému pohonu v osobní silniční dopravě a tím je využití elektrické energie uskladněné v akumulátorech. Akumulátory jsou zařízení sloužící k opakovanému uschování elektrické energie. Mezi jejich hlavní parametry patří jejich kapacita, hmotnost, cena, samo vybíjecí vlastnosti, rychlost dobíjení, počet možných dobíjecích cyklů, rozměry a energetická hustota (též nazývaná měrná kapacita). Energetická hustota, jak již výraz napovídá, udává vztah mezi množstvím energie a hmotností, její jednotkou je Wh/kg. Pro srovnání si uveďme příklad energetické hustoty benzínu, která činí 11 kWh/kg a olověného akumulátoru s energetickou hustotou 40 kWh/kg. Je tedy zřejmé, že ani přes vysokou účinnost elektrického pohonu nemohou nynější parametry akumulátorů plně konkurovat konvenčnímu pohonu. Do jejich vývoje se však v posledních letech investovaly značné finanční prostředky a je tedy otázkou, jaké parametry akumulátory nabídnou v horizontu dalších pár let. Teoreticky jsou to právě akumulátory, konkrétně jejich cena, omezený dojezd a délka jejich nabíjení, které brání v masivním rozšíření elektromobilů. Z druhého úhlu pohledu je stále nutné vyřešit mimo jiné také zdroje elektrické energie, ekologickou likvidaci akumulátorů a užití poměrně vzácných materiálů, které se při jejich výrobě spotřebovávají. [20] [21]

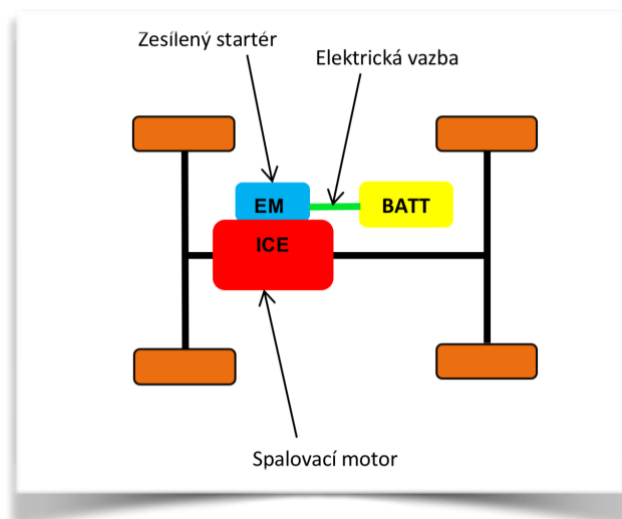
## 5. Dělení hybridních pohonů

V současné době existují spousty možností, jak zkombinovat dva odlišné typy pohonů a vytvořit tím pohon hybridní. V této kapitole si uvedeme a popíšeme nejběžnější konstrukční řešení, přičemž se zaměříme zejména na automobilovou dopravu a kombinaci elektromotoru s motorem spalovacím. Nejprve si však zavedeme dva základní parametry pro rozdělení hybridního pohonu, dle kterých budeme dále hybridní pohon klasifikovat. Prvním z těchto parametrů je tzv. stupeň hybridizace, který vyjadřuje, jak velkým zdrojem energie z výše zmiňovaných dvou se podílí na pohonu vozidla. Při takovémto dělení se jedná v podstatě o pomyslnou stupnici, kde na jedné straně je vozidlo s konvenčním pohonem a na straně druhé čistý elektromobil. Druhým parametrem je pak uspořádání obou pohonných jednotek, jedná se tedy zejména o jejich vzájemná provázání a přenos výkonu.

### 5.1. Dělení dle stupně hybridizace

#### 5.1.1. Micro hybrid

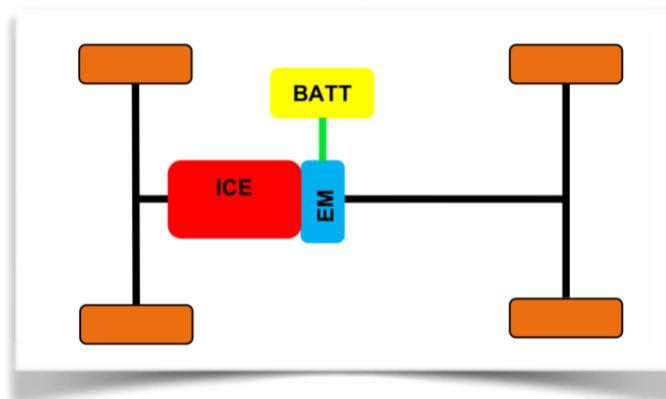
V principu se ještě nejedná o hybridní pohon, nicméně jde o první krok k hybridnímu pohonu. Jedná se o pokročilý systém úspory paliva, který využívá posílené elektroinstalace. Konkrétně jde o tzv. stop-start systém, jehož úkolem je automaticky vypínat spalovací motor, pokud samotný motor není nezbytný k pohybu vozidla, přičemž většina dalších elektronických palubních přístrojů a zařízení by měla zůstat nadále v provozu. K takovým scénářům dochází pravidelně v dopravních kongescích, kdy vozidlo stojí poměrně dlouhou dobu bez pohybu a chod spalovacího motoru tedy není nutný. V některých specifických případech se spalovací motor automaticky vypíná i za jízdy. Tento systém se u osobních vozidel rozšířil i vzhledem k přísným emisním normám, které musí moderní automobily plnit. Pilířem pro měření emisí a normované spotřeby byl donedávna jízdní cyklus NEDC, ve kterém se při simulaci městského provozu nepohybovalo až 25 % času z celého jízdního cyklu. Toho při vývoji využili automobiloví výrobci a s použitím stop-start systému se, alespoň dle jízdního cyklu NEDC, dala výrazně snížit spotřeba paliva. Nutno podotknout, že tento jízdní cyklus plně nerefletoval reálný provoz a nyní se již zavádí měření dle metodiky jízdního cyklu WLTC, který by měl více odpovídat realitě. Stop-start systém se setkal i s vlnou kritiky, která se nejčastěji opírala o nízkou efektivitu v reálném provozu, diskomfort při neustálém zapínání a vypínání motoru, ale například i otázku životnosti a opotřebení některých namáhaných komponent. Výkon startéru bývá mezi 3-5 kW, napětí autobaterie je standardních 12 V a úspora dosahuje až 5-10 % v závislosti na charakteru jízdy. Schéma pohonu nalezneme na obrázku č. 5. [21] [23] [32]



Obrázek 5: Schéma pohonu - micro hybrid [21]

### 5.1.2. Mild hybrid

Mild hybridům se také často nazývá asistované hybridy a to je zároveň výraz, který tento pohonný systém vystihuje. Ve vozidle je použit silnější elektromotor, který ve specifických situacích asistuje spalovacímu motoru, ale není schopný zajišťovat pohon vozidla samostatně. Mezi výše zmíněné situace, kdy elektromotor vypomáhá spalovacímu motoru, patří například rozjíždění či prudké zrychlování. Použitím elektromotoru v těchto situacích lze dosáhnout lepší dynamiky ale i nižší spotřeby paliva a to až o 30 %. Schéma pohonu můžeme vidět na obrázku č. 6. Napětí v elektrické soustavě je v rozmezí 36-200 V a výkon samotného elektromotoru se pohybuje mezi 7 až 20 kW. Elektromotor lze při brzdění využít jako generátor elektrického proudu, který se dále ukládá do baterií vozidla. Dochází tedy k přeměně kinetické energie v energii elektrickou, která by jinak byla přeměněna na energii tepelnou a nevyužita. Výše popsaný systém zachycování energie se nazývá rekuperace energie. [21] [22]



Obrázek 6: Schéma pohonu - mild hybrid [21]

### 5.1.3. Full hybrid

Tento druh pohonu je nadstavbou naposledy zmíněného mild hybridního pohonu, ale mimo jiné umožňuje jízdu buď čistě na elektřinu, nebo jízdu pomocí spalovacího motoru, případně pak i kombinaci obou. Aby byl vůz schopný pohybu pouze na elektrickou energii, je vybaven zpravidla akumulátorem o větší kapacitě, jenž se pohybuje kolem 200 - 500 V. Elektromotor, aby samostatně zajistil pohon, je taktéž posílen a to na rozmezí 30 až 50 kW. Toto řešení má největší dopad na snížení spotřeby paliva, bohužel spolu s kapacitou baterií často roste i váha a cena celého vozidla. [21] [22]

### 5.1.4. Plug-in hybrid

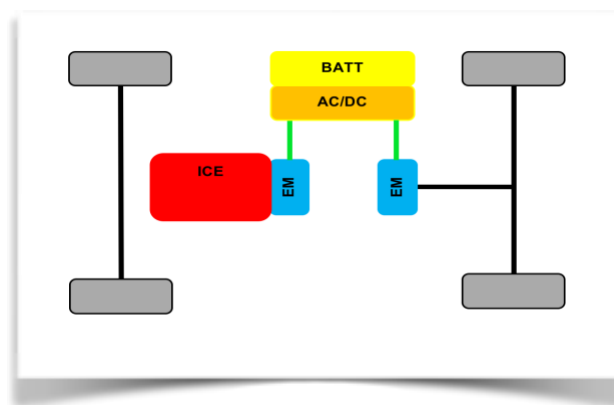
Všechny výše zmíněné varianty měly jedno společné, zdrojem elektrické energie pro akumulátor potažmo elektromotor byl pouze spalovací motor. Plug-in hybrid nabízí možnost nabití baterií z elektrické sítě. Ty je možné nabíjet z veřejné sítě nebo pomocí tzv. rychlonabíječek, které se s rozmachem elektromobilů začínají více a více budovat zejména v okolí nákupních center ale i na dalších atraktivních místech. Baterie vozidla má většinou opět větší kapacitu, tak aby umožnila delší dojezd na elektrickou energii. Některá vozidla vybavena tímto systémem umožňují manuálně přepínat mezi čistě elektrickým a klasickým pohonem, předem nabité baterie je pak v podstatě možné využít dvěma způsoby na základě toho, kde a jak se vozidlo bude provozovat. První z nich je zpočátku jízda pouze na elektřinu a po vyčerpání elektrické energie se vozidlo začne provozovat v klasickém full hybrid módu. Druhým je pak například využití spalovacího motoru při rychlé jízdě po dálnici a šetření elektrické energie do města, kde jsou podmínky provozu pro takovýto pohon výhodnější. Při běžném provozování takového vozidla ve městě je velkou výhodou absolvování většiny cest po městě v elektrickém režimu a v případě delší cesty možnost využívat spalovací motor, čímž není celkový dojezd vozidla závislý na akumulátorech. Problémem při využití ve městě může být samotné nabíjení vozidla, které je v domácích podmínkách poměrně zdlouhavé a je nutné mít odpovídající zázemí. [21] [22]

## 5.2. Dělení dle uspořádání hnacího řetězce

Existuje mnoho způsobů jak spolu spojit elektrický a spalovací motor, ale v zásadě rozlišujeme hybridní pohon s paralelním a se sériovým zapojením, ostatní možnosti lze označit za kombinaci dvou výše zmíněných. Oba systémy mají rozdílné vlastnosti a z nich pramenící výhody a nevýhody.

### 5.2.1. Sériový hybrid

Principem sériového hybridu je, že spalovací motor pohání především generátor elektrického proudu, vygenerovaná elektrická energie je buď uložena do baterií, nebo je přímo spotřebována elektromotory, pomocí kterých jsou následně roztáčena kola vozidla. Jde tedy v podstatě o elektromobil, který si za účelem prodloužení dojezdu, dokáže pomocí spalovacího motoru vyrobit elektrickou energii. Toto řešení je v železniční dopravě známé již desítky let v podobě diesel-elektrických lokomotiv. Schéma tohoto pohonu můžeme vidět na obrázku č. 7. Ze systému lze vynechat akumulátory, toto řešení není však příliš běžné, neboť se tím přichází o velkou část výhod, které tento typ pohonu jinak nabízí. Myšlena je zejména jízda čistě na elektřinu, či pokrytí výkonových špiček elektromotorů, na druhou stranu bez baterií je tento pohon výrazně lehčí a levnější. Právě velikost, respektive kapacita akumulátorů je klíčovým faktorem pro požadovaný dojezd v čistě elektrickém režimu. Výhodou sériového hybridu je absence klasické převodovky, ať už vícestupňové, hybridní či převodovky s plynulou změnou převodu. V případě že, jsou kola poháněná přímo elektromotorem, využívá se většinou pouze redukční převodovka a kolová redukce, ale ani takové řešení není vždy dostačující a vždy záleží na konkrétních požadovaných parametrech daného vozidla. Mezi další výhody patří možnost provozovat spalovací motor v ideálních otáčkách, při kterých bude pracovat efektivně a s nízkým opotřebením. Další z výhod je pak absence mechanického spojení mezi spalovacím motorem a elektromotorem, lze tak použít i složitější zástavbu a rozložení elektromotorů. Dojezd takového vozidla se v podstatě rovná „neomezenému“ dojezdu vozidla s konvenčním pohonem, samotná spotřeba paliva je pak otázkou a odvíjí se od konkrétního konstrukčního řešení a charakteru jízdy. Mezi nevýhody patří nárůst hmotnosti, vícenásobná přeměna energií a vyšší cena ve srovnání s vozidlem s konvenčním pohonem. Zároveň je nutné použití minimálně dvou elektromotorů, přičemž jeden roztáčí kola vozidla a druhý generuje elektrickou energii. Toto řešení se jeví jako nejlepší v městském provozu, naopak pro cestování na dlouhé vzdálenosti ve vysoké rychlosti není příliš vhodné. [3] [21] [22]

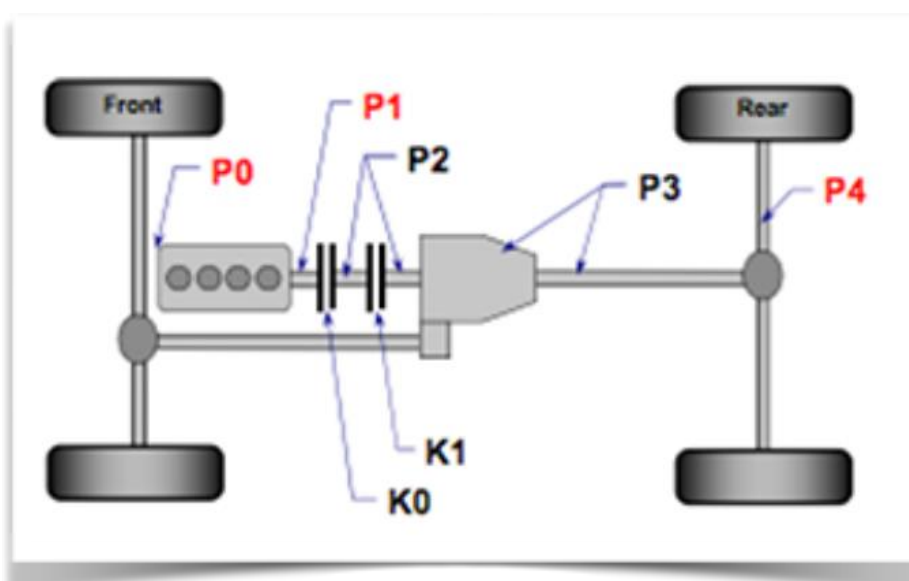


Obrázek 7: Schéma pohonu - sériový hybrid [21]



### 5.2.2. Paralelní hybrid

V případě paralelního hybridu nejsou oba motory zapojeny za sebou jako v případě sériového zapojení ale vedle sebe. Pro pohon je tak využít buď motor spalovací nebo elektrický, případně pak kombinace obou. Tento typ pohonu v podstatě vznikne přidáním elektromotoru do klasického pohonného ústrojí. Klíčovou roli pro vlastnosti takového pohonu hraje umístění elektromotoru v rámci hnacího řetězce. Právě podle polohy elektromotoru se jednotlivá konstrukční řešení rozdělují. Schéma pohonu i s varianty umístění elektromotoru můžeme vidět na obrázku č. 8, kde písmeno P označuje pozici elektromotoru a písmeno K je označení pro spojku.



Obrázek 8: Schéma pohonu - paralelní hybrid [24]

- P0

Elektromotor je umístěn před samotným motorem, kde plní funkci startéru. V provozu je pouze se spalovacím motorem, pomocí kterého je spřažen řemenovým převodem. Výhodou jsou malé zástavbové převodovky a nulové změny na motorové a převodové skříní. Nevýhodou jsou pak velmi omezené funkce elektromotoru.

- P1

V případě této varianty je elektromotor umístěn hned na výstupu spalovacího motoru ještě před převodovkou ve spojkové skříní. Lze jej využít jako náhrada startéru ale i jako generátor elektrické energie při její rekuperaci. Elektromotor pracuje pouze společně se spalovacím motorem a dokáže mu přidat výkon, jízdu čistě na elektřinu však neumožňuje.

- P2

Jedná se o obdobné řešení jako u varianty P1 s tím rozdílem, že je mezi spalovací motor a elektromotor umístěna další spojka. Toto řešení již umožňuje jízdu čistě na elektřinu. Elektromotor se však již nepoužívá jako startér a je nutný větší zásah do převodovky.

- P3

Elektromotor je umístěn na výstupu z převodovky před diferenciálem. Je tedy umožněna jízda čistě na elektřinu bez spalovacího motoru. Ostatní vlastnosti této verze jsou obdobné s předchozími.

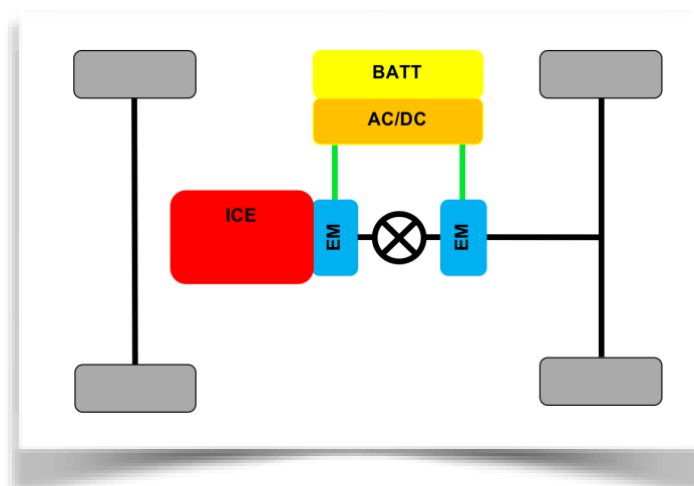
- P4

U poslední zde zmíněné varianty je buď elektromotor umístěn na ose nebo přímo v kole vozidla. Umístění elektromotorů do kol vozidla umožňuje vektorování točivého momentu (torque vectoring), což znamená, že se jednotlivá hnaná kola mohou otáčet různou rychlostí. To má velmi pozitivní vliv na jízdní vlastnosti vozidel zejména v zatáčkách, své uplatnění však najde i při jízdě terénem, nebo obecně všude tam kde je potřebná zvýšená manévrovatelnost.

[3] [21] [22] [24]

### 5.2.3. Kombinované zapojení

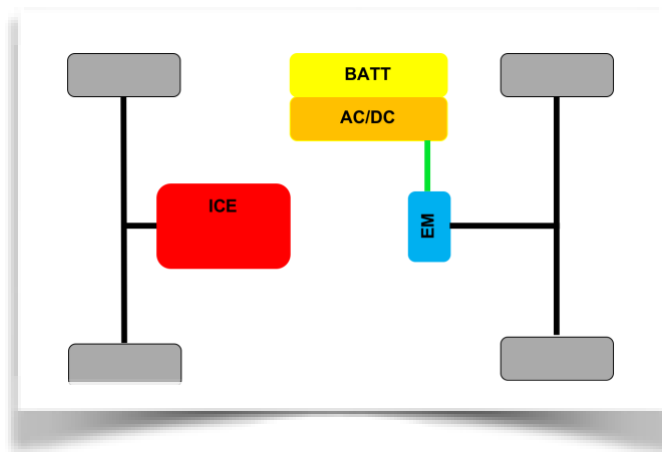
Kombinací výše popsaného sériového a paralelního zapojení získáme pohon, který dokáže plnohodnotně pracovat v obou režimech. Jedná se však o technicky komplikované a finančně nákladné řešení. Tento pohon se skládá ze spalovacího motoru a dvou elektromotorů, přičemž jeden slouží jako generátor elektrického proudu a druhý přímo pohání kola vozidla. K propojení výše uvedených prvků slouží tzv. dělič výkonu, kterým bývá nejčastěji planetová převodovka, tím umožňuje optimalizovat otáčky a výkony jednotlivých motorů. Dělič výkonu může být i elektrický. Schéma kombinovaného zapojení můžeme vidět na obrázku č. 9. [3] [21] [22]



Obrázek 9: Schéma pohonu - kombinované zapojení [21]

#### 5.2.4. Adhezní vazba

Poslední zde zmíněnou možností je dva odlišné pohonné systémy vůbec spolu fyzicky nepropojovat a nechat jednotlivé systémy pracovat samostatně. Při tomto provedení dochází k pomyslnému spojení až skrz vozovku. V anglickém jazyce se proto tato vazba označuje *through the road*. Ze schématu pohonu na obrázku č. 10 je patrné, že jednotlivé zdroje energie pohání samostatně každý jednu nápravu. Výhodou tedy je že se jedná o jednoduché konstrukční řešení pro pohon všech kol. Problémem však může být součinnost obou motorů v případech, kdy jsou oba zároveň v provozu. [21]



Obrázek 10: Schéma pohonu - adhezní vazba [21]

## 6. Vojenská vozidla

Pod pojmem vojenská vozidla si obecně můžeme představit všechny dopravní prostředky, které jsou v provozu využívány za vojenskými účely. Může se jednat o lehce upravená osobní či jednostopá vozidla, která se povětšinu času provozují v podobných podmínkách jako jejich civilní verze nebo se může jednat o speciálně vyvinutá, několik desítky tun vážící, bojová vozidla osazená nejmodernějšími zbraňovými a komunikačními systémy, balistickou ochranou a schopností operovat i v tom nejnáročnějším terénu.

Vzhledem k diametrálně rozdílnému zaměření různých vojenských vozidel se kladou rozdílné požadavky na jejich vlastnosti, obecně však můžeme požadované vlastnosti dělit na bojové a dopravně technické. Mezi požadavky na bojové vlastnosti patří například: palebná síla, ochrana posádky a pohyblivost. K dopravně technickým požadavkům můžeme přiřadit například spolehlivost, životnost, snadnou údržbu, provozní kompatibilitu s ostatními aliančními prostředky, užité vlastnosti, hospodárny a bezpečný provoz. [25]

Některé, zejména pak ekonomické požadavky jsou totožné jak u vozidel vojenských tak i u vozidel civilních, ostatní požadavky se však značně rozcházejí. U civilních, potažmo osobních vozidel je dbáno mimo jiné na jízdní vlastnosti, komfort, ergonomii i vizuální a celkový dojem z vozidla. U vojenských vozidel se naopak dbá na prostupnost terénem, možnosti osazení výzbrojí či využití speciálních elektronických zařízení pro taktické účely. U obou typů se pak shodně lpí na vysoké bezpečnosti. Konstrukce osobních vozidel je v tomto ohledu zaměřena na pasivní bezpečnost vozidel, která má za úkol pohltit co nejvíce kinetické energie při nárazu a zároveň zachovat dostatečný prostor pro přežití určený pro posádku vozidla. V případě vojenských vozidel je z hlediska zvýšené bezpečnosti nezbytná také balistická ochrana, která ochrání posádku vozidla i před případnou explozí, balistickým nárazem či jiným nepřátelským útokem.

### 6.1. Dělení vojenských vozidel

Ministerstvo obrany ČR kategorizuje vojenská vozidla dle vyhlášky č. 274/1999 Sb., následovně:

- Bojová vozidla:

- pásový bojový prostředek (VBV - PBP)
- pásový speciální prostředek (VBV - PSP)
- kolový bojový prostředek (VBV - KBP)
- kolový speciální prostředek (VBV - KSP)

- Zabezpečovací vozidla:

- Kategorie VL - vozidla s maximálně čtyřmi koly
- Kategorie VM - určená pro přepravu osob, nejméně tři kola
- Kategorie VN - určená pro přepravu nákladů, nejméně čtyři kola
- Kategorie VT - traktory
- Kategorie VO - přípojná vozidla

- Vojenská zvláštní vozidla:

- kolový záchranářský prostředek (VZV - KZP)
- pásový záchranářský prostředek (VZV - PZP)
- speciální prostředek (VZV - SP )

[25]

Vyjma rozdělení vojenských vozidel dle směrnic, které je pro případ této diplomové práce ne úplně vhodné, existují i další způsoby, podle kterých lze vojenská vozidla dělit. Výstižné kritérium, které zásadně rozděluje vojenskou techniku, je účel jeho využití. Dle něj můžeme vojenská vozidla rozdělit na administrativní, taktická a bojová. Administrativní vozidla nejsou většinou přímo vyvíjena pro vojenské účely, jedná se spíše o přestavbu civilních verzí. Ani přestavba z civilního na vojenské využití nebývá složitá, většinou se jedná pouze o instalaci radiového komunikačního zařízení a vizuální změnu vozidla, která zahrnuje specifické barevné provedení karoserie a označení vozidla. Oproti tomu taktická vozidla už jsou přímo vyvíjena k vojenským účelům, avšak jejich konkrétní specifikace se může lišit. Možností jak taktické vozidla využít je nespočet, jednat se může například i o zdravotnická, zásobovací či telekomunikační vozidla. Jelikož však tento typ vozidel operuje i přímo na bojištích, tak společnou vlastností zůstává vysoká prostupnost terénem a zvýšená ochrana posádky. Poslední kategorií jsou pak vozidla bojová, určená přímo k boji s nepřítelem. Prioritou těchto vozidel je jejich palebná síla a balistická ochrana. [26]

## 6.2. Charakteristické vozidlo

Ze tří odlišných kategorií vojenských vozidel, zmíněných v předešlé kapitole se jako nejlepší pro návrh hybridního pohonu, který je cílem této diplomové práce, jeví kategorie taktických vozidel. Právě v této kategorii se nachází značný potenciál a prostor pro zlepšení, který může právě alternativní pohon přinést. Samotná úvaha a předpokládané benefity alternativního pohonu u taktických vozidel jsou uvedeny samostatně v následující kapitole. Cílem této diplomové práce je návrh pohonu, nikoliv však celého taktického vozidla. Pro náš návrh si tedy zvolíme charakteristické taktické vozidlo, do kterého budeme hybridní pohon dále navrhovat.

Zvolené vozidlo, respektive jeho parametry, budou nadále klíčové pro zhodnocení a porovnání obou pohonů, tedy stávající konvenčního a navrženého pohonu. Níže uvedené parametry nezbytné pro návrh našeho vozidla, jsou založeny na reálných hodnotách, které dosahují již dnes vyráběná vozidla. V tabulce č. 1 je uveden přehled stávajících jízdních parametrů, kterým se navrhovaný alternativní pohon má vyrovnat či je překonat. Na obrázku č. 11 je pak znázorněn příklad charakteristického taktického vozidla.

Tabulka 1: Jízdní parametry charakteristického vozidla

Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon	240	kW
Točivý moment	1300	Nm
Maximální rychlost	110	km/h
Stoupavost	70	°
Rychlost v 70 % stoupání	8	km/h
Dojezd	800	km
Hmotnost	12 000	kg
Pneumatiky	14R20	-

[27] [28] [29] [35]



Obrázek 11: Příklad charakteristického vozidla [30]

### 6.3. Hybridizace vojenských vozidel

V historii dopravy se nacházejí dva zlomy, které měly zásadní vliv na další vývoj dopravy. Prvním z nich je vynález kola, který tehdy umožnil mimo jiné vytvoření koňského spřežení a vylepšil tak stávající využití. Druhým z nich je pak vynález motoru, díky kterému dostala doprava zcela nový rozměr. Zpočátku však jízda s motorovými vozidly nedosahovala takových kvalit jako jízda na koni. Roku 1912 koupila americká armáda první čtyři vozidla se spalovacím motorem, od té doby se tento typ pohonu stal u vojenských vozidel dominantní. Hlavní podíl na tom nese obecně rozkvět automobilismu i mnoho válečných konfliktů, které se odehrály v minulém století. [2] [26]

Jak nové technologie, konkrétně pak alternativní pohony, expandují u osobních vozidel, je vhodné se zamyslet, zda by své uplatnění nenašly i u vozidel vojenských. Elektrický propulzní systém totiž nabízí výhody, které ten konvenční jen stěží překonává. V kontextu osobních vozidel s elektrickým, případně hybridním pohonem se často hovoří hlavně o nízkých emisích a ekologickém provozu, to však nejsou zdaleka všechny výhody, které tyto systémy nabízejí. Odpověď na otázku proč vůbec hledat alternativní pohon vojenských taktických vozidel, nalezneme ve stále se stupňujících nárocích na vlastnosti těchto vozidel. V tabulce č. 2 je uvedeno několik vybraných parametrů, které poukazují na výhody, který elektrický pohon může přinést.

Tabulka 2: Přehled vlastností elektrického a konvenčního pohonu s ohledem na vojenské využití

Výhody	Nevýhody
<b>Čistě elektrický pohon</b>	
Jízdní vlastnosti Bezhlučný jízda Jízda bez termální stopy Nulová spotřeba paliva Zdroj elektrické energie pro externí zařízení	Omezený dojezd Nutnost zázemí (pro dobíjení) Cena Hmotnost
<b>Konvenční pohon</b>	
Neomezený dojezd Operativnost Hmotnost Cena	Náročná údržba Hluk Teplo Dostupnost pohonných hmot Zranitelný pohon

Z tabulky č. 2 je tedy patrné, že elektrický pohon oproti konvenčnímu pohonu nabízí spoustu zajímavých vlastností. Vyzdvihnout můžeme například hladinu hluku, která bude v porovnání s konvenčním pohonem znatelně nižší, samotný hluk při jízdě však bude i nadále vznikat odvalováním pneumatik a překonáváním odporu vzduchu, avšak jeho hladina bude výrazně nižší. Další zajímavou vlastností je nízká zbytková teplota. I přesto, že samotné elektromotory produkují teplo, při srovnání se spalovacím motorem se jedná pouze o zlomek energie, který lze na rozdíl od teplých výfukových plynů spalovacího motoru poměrně snadno odstínit. Tato vlastnost nabízí určitou taktickou výhodu vůči termovizním přístrojům, i když otázkou zůstává, s jakou citlivostí tyto vojenské technologie pracují. Problematiku spotřeby paliva v tomto návrhu nebude zohledněna pouze z hlediska ekologického. Snížená či dokonce nulová spotřeba klasických pohonných hmot může být značnou ekonomickou a logistickou výhodou. Cena paliva na bojišti je vzhledem k nutné přepravě a skladování této suroviny výrazně vyšší. Pro příklad uveďme, že pro U. S. Army stoupne cena za jeden litr benzínu v Afghánistánu na 100 \$. Za zmínku stojí že palivo samotné, ať už jeho doprava či uskladnění, může být snadným cílem nepřátelských sil. [31]

Další přednost vychází z již zmíněného popisu samotných elektrických vozidel a je jím jednodušší a méně náročná údržba. U elektromobilů není zapotřebí měnit provozní kapaliny a dochází k menšímu opotřebení komponent vozidla, jako je například brzdové obložení či spojka. Poslední zde zmíněnou výhodou je zejména akumulátor jakožto zdroj energie, která může být vzhledem ke své kapacitě využita například pro dlouhodobé napájení externích speciálních zařízení. Problematické však je nutnost vhodného zázemí, kde by bylo možné bezpečně baterie dobít. Zásadní a nepřekonatelnou překážkou zůstává značně omezený dojezd vozidla a dlouhá doba potřebná právě k jeho nabití. Tato nevýhoda se pomalu a stěží zvládá překonávat u osobních vozidel, ale u vojenských vozidel jsou však nároky na provoz diametrálně odlišné a případná neschopnost pohybu vozidla z důvodu vybité baterie by mohla mít i fatální následky. Vhodným řešením je tak využití hybridního pohonu, jakožto kombinace elektrického a konvenčního pohonu. Ten do jisté míry využívá výhody a eliminuje nevýhody obou pohonů. Zejména tedy problematický dojezd elektromobilů není u hybridních vozidel překážkou. Vzhledem k možnosti spalovat klasické palivo lze uvažovat, že při vhodném návrhu takového pohonu se dojezd hybridního vozidla může rovnat dojezdu vozidla s klasickým pohonem. Přičemž výše zmíněné výhody elektrického propulzního systému mohou být při vhodném konstrukčním návrhu i u hybridního pohonu. Diskutabilní je otázka údržby vozidla a jeho komponent. Přeci jenom je nutné udržovat hned dva pohonné systémy. Stejně tak je otázka hmotnosti celého vozidla. Využití dvou pohonů ve vozidle je spojeno s nárůstem hmotnosti, nicméně oba systémy nemusí být natolik dimenzované, jako kdyby pracovali samostatně. Nevýhodou zcela jistě bude cena výsledného vozidla, která vzhledem k nákladným prvkům hybridních vozidel a nákladům celého vývoje bude vyšší.



### 6.3.1. Výběr ideálního pohonu

Jak bylo uvedeno v první části této diplomové práce, druhů a kombinací pohonů je nespočet a některé typy mohou odlišně plnit zde předpokládané taktické vlastnosti. Pro výběr ideálního pohonu vojenského taktického vozidla jsou v tabulce č. 3 uvedeny parametry, které od sebe jednotlivé pohony rozdělují a které zároveň můžeme sledovat jako vhodné vlastnosti z hlediska vojenských potřeb.

Pro vyhodnocení tabulky je zavedena jednoduchá klasifikační logika. Jednotlivé parametry jsou ohodnoceny kvalitativně matematickými symboly, které se stupňují popořadě od nejlepšího (++) , přes neutrální hodnotu (0) až po nejhorší možný výsledek (- -). Klasifikace tabulky je založena pouze na odborném odhadu, zakládající se na informacích, které jsou shromážděny v dosavadní části této diplomové práce, pro přesné kvantitativní ohodnocení parametrů by byl nutný delší výzkum a jejich následný výpočet.

Tabulka 3: Kvalitativní ohodnocení parametrů rozdílných pohonů s ohledem na vojenské využití

	Dojezd	Servisní náklady	Prostupnost terénem	Spotřeba paliva	Jízda čistě na elektřinu	Operativnost	Hmotnost	Ochrana podvozku	Nezávislý pohon kol	Výsledek
Konvenční pohon	++	0	0	-	0	+	0	-	0	1+
Sériový hybrid	+	+	++	+	++	+	-	+	+	<b>9+</b>
Paralelní hybrid	P0, P1	+	+	+	0	+	0	-	0	4+
	P2	+	+	+	+	+	-	-	0	4+
	P3, P4	+	+	++	+	++	+	-	+	7+
Elektrický pohon	--	++	++	++	++	--	-	+	+	5+

#### - Dojezd

Jak již bylo zmíněno výše, dojezd u hybridních vozidel se dá přirovnat k „neomezenému“ dojezdu vozidla s konvenčním pohonem. Přesný číselný údaj však vychází z konkrétního řešení daného vozidla. U elektromobilů je obecně hodnota dojezdu dvou až trojnásobně nižší.

#### - Prostupnost terénem

Nelze tvrdit že je prostupnost terénem u vozidel s konvenčním pohonem nikterak špatná, ale využití elektromotorů může tuto klíčovou vlastnost posunout ještě dále. U paralelních hybridů P1 a P2 se jedná o zlepšení v rámci krátkodobého zvýšení výkonu za použití elektromotoru. U další varianty však již umožňují jízdu čistě na elektřinu, takové řešení například s umístěním elektromotorů do nábojů kol, umožňuje torque vectoring. Lze tedy dosáhnout stavu, kdy se budou jednotlivá kola otáčet nezávisle na sobě a nejen nezávislou rychlostí ale například i směrem.

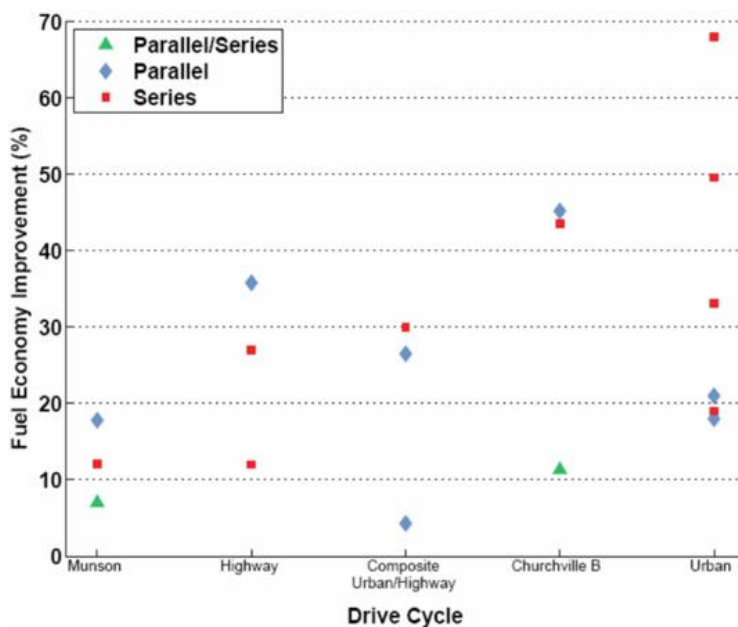
Další výhodou je možnost variabilního uložení akumulátorů ve vozidle. Při vhodném návrhu tak může být docíleno optimálního rozložení hmotnosti na jednotlivé nápravy, stejně tak lze optimalizovat polohu těžiště, což v praxi znamená lepší jízdní vlastnosti, ale zejména pak i možnost zdolávání větších sklonů.

#### - Operativnost

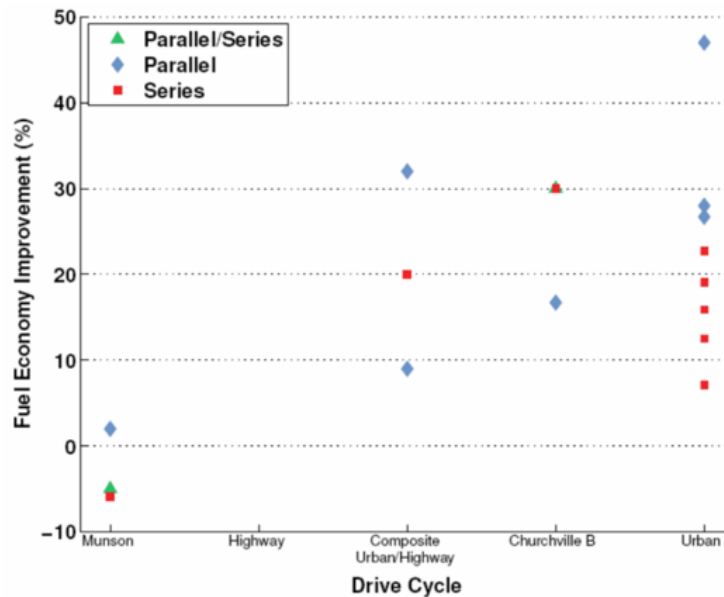
Operativnost vozidla vyjadřuje podíl času, kdy je dané vozidlo možné provozovat. U čistě elektrického vozidla je tato vlastnost problematická, protože vyžaduje zdlouhavé nabíjení a následně pouze omezený dojezd. Vozidla s konvenčním pohonem lze, až na specifické situace jako je údržba a porucha vozidla, provozovat téměř nepřetržitě.

#### - Spotřeba paliva

Problematika spotřeby paliva byla již zmíněna výše. Samotná úspora paliva u hybridních pohonů je závislá na více faktorech, přičemž mezi nejdůležitější patří způsob provozování daného vozidla. Na obrázcích č. 12 a č. 13 je znázorněno porovnání úspor paliva sériového paralelního hybridního pohonu v závislosti na měřicím cyklu, který v podstatě simuluje různé podmínky provozu. Podrobnosti ohledně jízdních cyklů vojenských vozidel budou uvedeny dále v této diplomové práci.



Obrázek 12: Úspora paliva u jednotlivých hybridních pohonů vozidla HMMWW při odlišných jízdních cyklech. [31]



Obrázek 13: Úspora paliva u jednotlivých hybridních pohonů těžkého vozidla (cca 12 t) při odlišných jízdních cyklech. [31]

- Jízda čistě na elektřinu

Jízda čistě na elektřinu umožňuje značné taktické výhody, které jsou konkrétně popsány výše v této diplomové práci. Čistě elektrická jízda je možná u paralelních hybridů P2 a výše, přičemž samotná varianta P2 umožňuje takovou jízdu teoreticky pouze na vybrané převodové stupně.

- Hmotnost

Narůstající hmotnost vozidla negativně ovlivňuje jeho jízdí vlastnosti. V případě vojenských vozidel je důležité nezapomínat i na častý transport samotných vozidel, který ne vždy probíhá po vlastní ose.

- Ochrana podvozku

Vyšší bezpečnosti lze dosáhnout odstraněním některých klíčových komponent konvenčního pohonu (hřídele, převodovka, diferenciál atd.). Jednak nebudou tyto prvky při případné explozi figurovat jako šrapnely a zároveň, podvozek tak bude homogenní a lze jej navrhnout i tak, aby případnou explozi částečně odstínil.

- Nezávislý pohon kol (manévrovatelnost, bezpečnost)

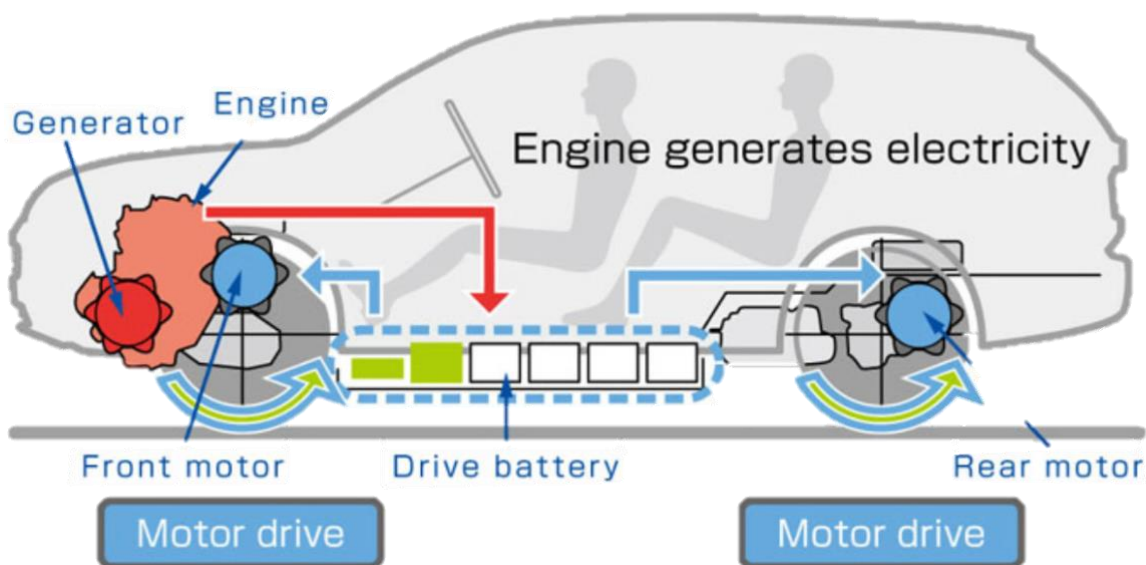
Zlepšená manévrovatelnost již byla zmíněna v souvislosti s prostupností terénem. Další výhodou nezávislého pohonu kol je pak vyšší bezpečnost a spolehlivost. Jedná se například o situaci kdy je pouze jedna náprava nefunkční nebo zničená v boji. U vozidel se závislým

pohonem kol (ať již na ostatních kolech či motoru) by taková situace znamenala neumožnění další jízdy. Nezávislý pohon kol tak umožňuje pohyb vozidla nezávisle na dalších nápravách či motoru.

### 6.3.2. Koncept sériového hybridního pohonu

Dle souhrnu informací uvedených v předešlé kapitole a jejich následnému vyhodnocení, se jako nejlepší pohon pro naše charakteristické vozidlo jeví sériový hybrid, kde generátorem elektrické energie bude menší diesellový motor, který bude pracovat v optimálním režimu. Alternativou, která by částečně měla podobné výhody, je pohon na palivové články, který v principu funguje obdobně. Toto řešení je výrazně ekologičtější, nicméně vhodné spíše do městského provozu nežli pro vojenského využití. Logistika a uskladnění vodíku je mnohem náročnější ve srovnání s naftou, nehledě na fakt, že by vodík musel být uskladněn ve vozidle pod velkým tlakem, což je při vojenském využití přeci jen velmi rizikové.

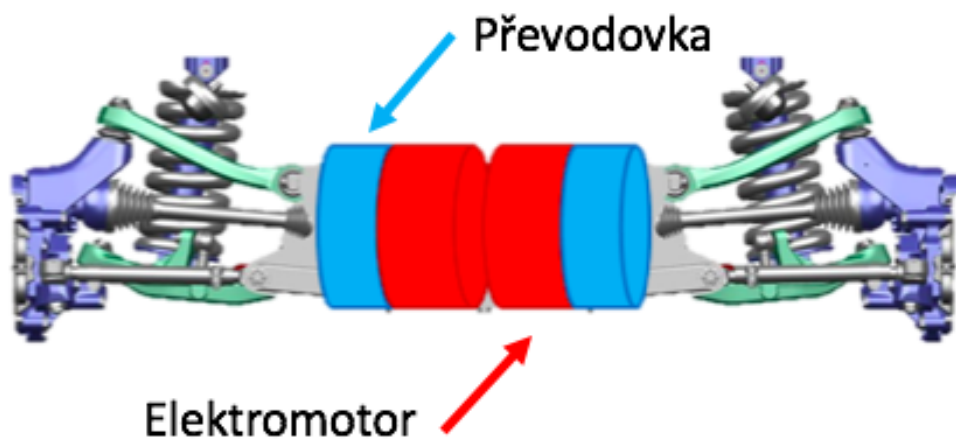
V případě tohoto návrhu bude každé kolo poháněno jedním elektromotorem. Uložení samotných elektromotorů bude závislé na jejich potřebných rozměrech. Potřeba a využití převodovky vyplyne v průběhu návrhu. Schéma sériového pohonu je znázorněno na obrázku č. 14, na obrázku č. 15 je pak schematicky znázorněno umístění elektromotorů a převodovky do náprav vozidla.



Obrázek 14: Schéma navrženého pohonu [39]

Mezi očekávané výhody nadcházejícího návrhu patří především:

- Absence hluku spalovacího motoru
- Baterie (i generátor) mohou sloužit pro dlouhodobé napájení vojenských technologií
- Pohyb bez termální stopy
- Zlepšení ochrany posádky
  - Absence některých hnacích prvků
  - Homogenita podvozku
  - Nezávislý pohon náprav
- Redukce spotřeby paliva
- Spalovací motor v optimálním režimu - menší opotřebení, spotřeba paliva, údržba, životnost
- Absence vícestupňové převodovky - redukce a lepší rozložení váhy
- S využitím spalovacího motoru dostatečný dojezd
- Brodění a jízda ve větším sklonu (oboje při vypnutém spalovacím motoru)
- Nižší těžiště (vlivem uložení baterií)
- Torque vectoring



Obrázek 15: Schématické umístění elektromotorů a převodovek do náprav vozidla

[40, upraveno]

Spolu s očekávanými výhodami nese tento návrh i řadu výzev. Některé problematické aspekty budou v tomto návrhu uvažovat, jiné však již z důvodu obsáhlosti tématu nebudou předmětem této diplomové práce. Jmenovitě se tato diplomová práce nebude hlouběji věnovat problematice:

- Hydroizolace při brodění
- Tepelného odstínění elektromotorů
- Elektromagnetické kompatibility
- Řešení parkovací brzdy
- Vlivu extrémních teplot na akumulátory
- Konstruktivního řešení podlahové části karoserie v rámci zvýšení bezpečnosti
- Konstruktivního řešení napájení dalších zařízení (klimatizace, posilovače atd.)

Tento návrh se tedy nadále soustředí na pohon vozidla, tak aby se vyrovnal parametrům charakteristického vozidla s konvenčním pohonem, uvedených výše v tabulce č.1. Mimo samotné jízdní parametry bude snaha o zjištění efektivity navrženého pohonu pomocí počítačové simulace. Důležitým aspektem zůstává i reálná proveditelnost pohonu, tudíž budou vybírány takové komponenty, které na trhu existují a které plní požadavky na dané konstrukční řešení. V neposlední řadě bude přihlédnuto k finanční stránce celého návrhu.

## 7. Dimenzování a výběr komponent

V předchozí kapitole byl představen charakteristický vůz s příslušnými jízdními parametry, které jsou klíčové pro nadcházející návrh sériového hybridního pohonu daného vozidla. Tato kapitola je zaměřena na výběr hlavních prvků sériového hybridu, které se přímo podílí na pohonu vozidla. Při jejich dimenzování a výběru se bude postupovat v hnacím řetězci směrem od kol vozidla, přes elektromotory až po spalovací motor a baterii. Na základě požadovaných jízdních vlastností zde budou vyčísleny technické parametry jednotlivých komponent nezbytných pro pohon vozidla. Bohužel nejsou k dispozici veškeré údaje, které se ve výpočtech vyskytují, tudíž některé hodnoty uvedené ve výpočtech tedy nejsou exaktní, nýbrž jsou odborně odhadnuté na základě dostupných informací. Následovat bude výběr konkrétních produktů, které by měly splňovat vyčíslené technické parametry. Při jejich výběru bude kladen důraz na klíčové vlastnosti jednotlivých komponent sériového hybridního pohonu, jako je například hmotnost, rozměry, výkon a efektivita. Cílem tedy není pouze zvolit nějaké produkty, ale výběr provést tak, aby výsledek jako celek zaručil požadované jízdní parametry. Zhodnocení celého pohonu zejména pak konkrétně jeho efektivitu ve srovnání s konvenčním pohonem, bude následně dosaženo počítačovou simulací.

Nutno zmínit, že v případě reálného vývoje hybridního pohonu a výběru dílčích komponent, by byl nejspíše k dispozici jejich větší výběr. Bohužel ne všichni výrobci veřejně na svých webových stránkách uvádí podrobné technické informace. Jako příklad si uveďme elektromotory, kdy se nejčastěji uvádí pouze základní informace o daném produktu jako je nejvyšší výkon a točivý moment, případně pak i účinnost při nejvyšším zatížení. Naopak často chybí podrobné informace jako je charakteristika motoru, hmotnost, rozměry, účinnosti v různých otáčkách elektromotoru. Obdobná situace nastává i u ostatních prvků sériového hybridu. Detailní technické parametry jsou však velmi důležité jakožto podklady pro komplexní návrh pohonu. Obvykle se také nabízí možnost si u specializovaných společností nechat elektromotor a další díly přímo vyvinout dle specifických požadavků, či již existující produkty upravit. Výběr vhodných komponent bude tedy do jisté míry limitován z výše uvedených důvodů.

### 7.1. Elektromotory a převodovka

Elektromotory jsou klíčovým a zároveň jediným prvkem, který u sériového hybridního pohonu zajišťuje samotný pohyb vozidla. Jak bude uvedeno dále v této kapitole, je nutné si uvědomit, jak velké síly působí při pohybu vozidla, zvláště když se jedná o vozidlo vojenské, které má vysokou hmotnost a velké rozměry, ale zároveň jsou na něj kladeny přísné požadavky z hlediska jízdní dynamiky. Spolu se samotnými elektromotory bude tedy nezbytné pro tento návrh využít i převodovky, které umožní využití řádově slabších elektromotorů. Jednoduché

schéma takového zapojení již bylo uvedeno na obrázku č. 15. Pro výpočet parametrů elektromotorů a převodovek je nejprve nutné znát, hodnoty jízdních odporů, jenž budou muset být při různých jízdních režimech překonány.

### 7.1.1. Jízdní odpory

Jízdní odpory jsou síly, které působí proti pohybu vozidla, na jejich překonání je využita síla motoru. Následně si jednotlivé odpory rozebereme a uvedeme zde základní vztahy pro jejich výpočet. Jelikož neznáme exaktně všechny potřebné hodnoty nezbytné k výpočtu, některé z nich tak musely být odhadnuty. Výpočet samotný tak bude pouze přibližný. Rozeznáváme pět následujících odporů:

- Odpor vzduchu (aerodynamický odpor) –  $R_A$
- Odpor proti zrychlení -  $R_a$
- Odpor stoupání -  $R_\alpha$
- Odpor valení –  $R_R$
- Odpor vnitřního tření (účinnost mechanismů) -  $\eta$

Pro celkový odpor vozidla, který musí motor překonat, platí:

$$R = \frac{R_A + R_a + R_\alpha + R_R}{\eta} \quad [\text{N}]$$

[1] [2] [36]

Aerodynamický odpor:

Vzniká obtokem vzduchu kolem karoserie vozidla a vířením rotujících částí. Aerodynamický odpor má jako jediný z odporů kvadratickou závislost na rychlosti vozidla. Je dán rychlostí vozidla i rychlostí proudění větru kolem něj. Tento odpor může být v našem návrhu klíčový v souvislosti s maximální rychlostí vozidla. Určuje se vztahem:

$$R_A = \frac{1}{2} \rho c_x S_x v^2 \quad [\text{N}]$$

Kde:

$R_A$  – aerodynamický odpor [N]

$\rho$  – hustota vzduchu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$c_x$  – součinitel odporu vzduchu [-]

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

$v$  – rychlost proudícího vzduchu [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

[1] [2] [36]



Odpor zrychlení:

Jedná se o síly, které působí na vozidlo při jeho zrychlení. Při konstantní rychlosti je tento odpor nulový. Pro odpor zrychlení lze použít následující vztah:

$$R_a = \left( m + \sum_i \frac{J_{Ki}}{r_{di} r_{Ki}} \right) a = R_{Zp} + R_{Zr} \quad [\text{N}]$$

Kde:

$R_a$  – odpor zrychlení [N]

$R_{Zp}$  – odpor zrychlení vozidla [N]

$R_{Zr}$  – odpor zrychlení rotujících částí vozidla [N]

$m$  – hmotnost vozidla [kg]

$J_k$  – moment setrvačnosti rotujících částí [kg.m<sup>2</sup>]

$r_d$  – dynamický poloměr kol [m]

$r_k$  – poloměr rotujících částí [m]

Pro výpočet  $R_{Zr}$  a  $R_{Zp}$  pak platí:

$$R_{Zr} = \sum \frac{J_{Ki}}{r_{di} r_{Ki}} \varepsilon \quad [\text{N}]$$

$$R_{Zp} = m a \quad [\text{N}]$$

Kde:

$\varepsilon$  – úhlové zrychlení rotujících částí [rad.s<sup>-2</sup>]

$a$  - zrychlení vozidla [m.s<sup>-2</sup>]

Z důvodu neznalosti většiny hodnot zde výše uvedených, bude při výpočtech použit následný zjednodušený vztah:

$$R_a = m a \delta \quad [\text{N}]$$

kde:

$\delta$  - rotační koeficient setrvačnosti <1,08;1,1> [-]

[1] [2] [36] [37]

Odpor stoupání:

Vzniká při jízdě v podélném sklonu vozovky. Při jízdě z kopce nabývá záporných hodnot, při jízdě po rovině je nulový. V našem případě jej musíme zohlednit kvůli vysokým požadavkům na stoupavost vozidla. Velikost odporu stoupání je dána pouze tíhou vozidla a úhlem stoupání dle vztahu:

$$R_\alpha = \pm mg \sin \alpha \quad [\text{N}]$$

Kde:

$R_\alpha$  – odpor stoupání [N]

$m$  – hmotnost vozidla [kg]

$g$  – tíhové zrychlení [N]

$\alpha$  – úhel podélného sklonu vozovky [rad]

[1] [2] [36]

Odpor valení:

Vzniká deformací pneumatiky ale i dráhy, po které se pneumatika odvaluje. Při deformaci je svislá reakce  $Z_k$  posunuta o rameno  $e$  v totožném směru jako je směr jízdy. Tím vzniká moment síly působící proti otáčení kola. Spolu s valivým odporem je nutné si definovat i součinitel valivého odporu, bezrozměrnou veličinu, která udává vztah mezi dynamickým poloměrem kola a posunutím svislé reakce kola. Hodnota samotná je závislá na mnoha faktorech jako je například teplota, rychlost a tlak, ale hlavně se odvíjí od druhu povrchu dráhy. V literatuře a odborných textech se často setkáváme s jeho konstantním vyčíslením pouze na základě vlastností dvou kontaktních povrchů. Existují ale i vztahy které zohledňují například tlak v pneumatice či rychlost vozidla. Při výpočtech odporu vozidla byla použita poslední zde uvedená formulace, která zohledňuje právě rychlost vozidla.

$$R_{fk} = Z_k \frac{e}{r_d} = Z_k f_k \quad [\text{N}]$$

$$f_k = \frac{e}{r_d} \quad , \text{nebo} \quad f_k = 0,01 \frac{v}{147} \quad , \text{nebo} \quad f_k = 0,01 + (0,0001)v \quad [-]$$

Celkový odpor valení je pak dán součtem valivých odporů jednotlivých kol.

$$R_R = f \sum Z_{ki} = f G \cos \alpha \quad [\text{N}]$$

Kde:

$R_R$  – odpor valení [N]

$e$  – excentricita, posunutí svislé reakce kola [m]

$r_d$  – dynamický poloměr kola [m]

$v$  – rychlost vozidla [km/h]

$f$  – součinitel valivého odporu [ - ]

$G$  – tíha vozidla [N]

$\alpha$  – úhel podélného sklonu vozovky [rad]

[1] [2] [36] [33]

Odpor vnitřního tření:

Jedná se o účinnost mechanismů při přeměně forem energie či pohybu. Lze jej definovat jako poměr veličiny na vstupu a výstupu. Nabírá hodnot v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . V případě dimenzování prvků v této kapitole se jedná o ztráty vzniklé přenosem sil mezi motorem a kolem vozidla, zejména v převodovce. Pro tento návrh byla tato hodnota shodně stanovena na 95 %. Je však zřejmé že se jedná o výrazné zjednodušení.

[1] [2] [36] [38]

### 7.1.2. Výkon a točivý moment motoru

Jak již bylo zmíněno výše, při pohybu vozidla musí být překonány jízdní odpory motorem či v tomto případě motory vozidla. U motorů rozlišujeme dva základní parametry. Zde budou uvedeny vztahy mezi jízdními odpory a parametry motoru.

Výkon:

$$P = Rv \quad [W]$$

Kde:

R – celkové jízdní odpory [N]

v – rychlost vozidla [ $m \cdot s^{-1}$ ]

Točivý moment:

$$M = Rr \quad [N \cdot m]$$

Kde:

R – celkové jízdní odpory [N]

r – poloměr kola [m]

[1] [38]

### 7.1.3. Výpočet parametrů motoru

V této kapitole budou vyčísleny jízdní odpory při rozdílných jízdních režimech, které se vztahují k jízdním požadavkům vozidla. Prvním z nich je jízda maximální rychlostí, druhým je jízda v podélném sklonu požadovanou rychlostí a posledním z nich je pružné zrychlení. První dva jízdní požadavky by mělo být vozidlo schopné plnit dlouhodobě. Naopak u posledního z nich se jedná o krátkodobě trvající stav, u kterého může být využit tzv. *peak* motoru. Jedná se o krátkodobě zvýšení výkonu a točivého momentu elektromotoru. Nejprve budou vyčísleny jízdní odpory včetně ztrát vzniklých přenosem sil, následovat bude výpočet minimálních výkonů a točivých momentů pro jednotlivé jízdní režimy. Při výpočtech nejsou započteny ztráty vzniklé přenosem trakce mezi kolem a vozovkou. Hodnoty, jenž figurují v následujících výpočtech jsou uvedeny v tabulce č. 4. Výsledky požadovaných parametrů motoru pro jednotlivé jízdní režimy jsou uvedeny přehledně v závěru této kapitoly v tabulce č. 5.

Tabulka 4: Konstanty a parametry vozidla použité ve výpočtech

	Označení	Hodnota	Jednotka
<b>Konstantní hodnoty</b>			
Tíhové zrychlení	g	9,81	m.s <sup>-2</sup>
Hustota vzduchu	ρ	1,25	kg.m <sup>-3</sup>
<b>Parametry vozidla</b>			
Součinitel odporu vzduchu	c <sub>x</sub>	0,6	-
Čelní plocha vozidla	S <sub>x</sub>	4,7	m <sup>2</sup>
Hmotnost vozidla *	m	12 000	Kg
Rotační koeficient setrvačnosti	δ	1,08	-
Účinnost	η	95	%
Poloměr kol	r	0,55	m

\* údaj je pouze orientační, vychází z hmotnosti vozidla s konvenčním pohonem. Přesnou hmotnost v této části návrhu nelze přesně určit, jelikož nejsou známy dílčí hmotnosti jednotlivých komponent. Samotné ověření odhadu bude stručně rozebráno dále v této diplomové práci.

[33] [34] [35] [37] [38] [41]

Jízda maximální rychlostí:

Požadovaná maximální rychlost byla stanovena na 110 km/h (30,56 m.s<sup>-2</sup>). V tomto jízdním režimu uvažujeme bezvětří a jízdu po rovině a asfaltu. Jelikož se jedná o pohyb konstantní rychlostí, tak zrychlení i jeho odpor budou nulové, stejně tak bude nulový i odpor stoupání. Nejvyšší vliv tedy bude mít tedy aerodynamický a valivý odpor.

Celkový odpor při započtení ztrát v převodovce bude:

$$R_{vmax} = \frac{R_A + R_a + R_\alpha + R_R}{\eta} \quad [\text{N}]$$

kde:

$$R_A = \frac{1}{2} \rho c_x S_x v^2 = 0,5 * 1,25 * 0,6 * 4,7 * 30,56^2 = 1\,645,54 \text{ N}$$

$$R_a = 0 \text{ N}$$

$$R_\alpha = 0 \text{ N}$$

$$R_R = f G = (0,01 + 0,0001 * v) mg = (0,01 + 0,0001 * 110) * 12000 * 9,81 = 2\,472,12 \text{ N}$$

$$\eta = 95 \%$$

$$R_{vmax} = \frac{1645,54 + 2472,13}{0,95} = 4334,43 \text{ N}$$

Celkový potřebný výkon na překonání odporu  $R_{vmax}$  při maximální rychlosti je dán vztahem:

$$P_{celkem} = R_{vmax}v = 4334,43 * 30,56 = 132\,458,62 \text{ W}$$

Potřebný točivý moment při maximální rychlosti je dán vztahem:

$$M_{celkem} = Rr = 4334,43 * 0,55 = 2\,383,94 \text{ Nm}$$

Výše vypočtené hodnoty výkonu a momentu jsou vztahené na celé vozidlo, v případě tohoto návrhu bude však vozidlo poháněno celkem čtyřmi elektromotory, ty budou umístěny ke každému kolu zvlášť. Vydělením vypočteného požadovaného celkového výkonu a točivého momentu počtem hnacích kol, dostaneme minimální požadovaný výkon na jedno kolo:

$$P_{1_kolo} = P_{celkem} / 4 = 132\,458,62 / 4 = 33\,114,66 \text{ W}$$

$$M_{1_kolo} = M_{celkem} / 4 = 2\,383,94 / 4 = 595,98 \text{ Nm}$$

Jízda ve stoupání:

Nezbytným požadavkem pro taktická vojenská vozidla je jízda ve stoupání, pro tento návrh byl zvolen požadavek na jízdu 8 km/h ( $2,22 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ) ve stoupání  $\alpha = 70\%$  ( $0,61 \text{ rad}$ ). Je uvažována jízda konstantní rychlostí po asfaltu za bezvětří a bez prokluzu kol. Odpor zrychlení bude tedy nulový. Klíčový bude odpor stoupání a valivý odpor.

Celkový odpor motoru při započtení ztrát v převodovce bude:

$$R_{\alpha=70\%,v=8 \text{ km/h}} = \frac{R_A + R_{\alpha} + R_{\alpha} + R_R}{\eta} \quad [\text{N}]$$

kde:

$$R_A = \frac{1}{2} \rho c_x S_x v^2 = 0,5 * 1,25 * 0,6 * 4,7 * 2,22^2 = 8,70 \text{ N}$$

$$R_{\alpha} = 0 \text{ N}$$

$$R_{\alpha} = \pm mg \sin \alpha = +12\,000 * 9,81 * 0,573447 = 67506,25 \text{ N}$$

$$R_R = f G \cos(\alpha) = (0,01 + 0,001 * v) * m * g * \cos(\alpha) =$$

$$= (0,01 + 0,001 * 8) * 12000 * 9,81 * 0,819242 = 2025,27 \text{ N}$$

$$\eta = 95\%$$

$$R_{\alpha=70\%,v=8 \text{ km/h}} = \frac{8,70 + 67506,25 + 2025,27}{0,95} = 73\,200,23 \text{ N}$$

Celkový potřebný výkon na všech kolech pro překonání odporu  $R_{\alpha=70\%,v=8\text{km/h}}$  při dané rychlosti je dán vztahem:

$$P_{celkem} = R_{\alpha=70\%,v=8\text{ km/h}} v = 73\,200,23 * 2,22 = 162\,504\text{ W}$$

Potřebný točivý moment při maximální rychlosti je dán vztahem:

$$M_{celkem} = R_{\alpha=70\%,v=8\text{ km/h}} r = 73\,200,23 * 0,55 = 40\,260,13\text{ Nm}$$

Výše vypočtené hodnoty výkonu a momentu jsou opět vztažené na celé vozidlo, vydělením vypočteného požadovaného celkového výkonu a točivého momentu počtem hnacích kol, dostaneme minimální požadovaný výkon na jedno kolo:

$$P_{1_kolo} = P_{celkem} / 4 = 162\,504 / 4 = 40\,626\text{ W}$$

$$M_{1_kolo} = M_{celkem} / 4 = 40\,260,13 / 4 = 10\,065,03\text{ Nm}$$

Akcelerace:

Posledním požadavkem pro tento návrh byl zvolen požadavek na pružné zrychlení vozidla. Samotné pružné zrychlení vozidla by mělo také zajistit schopnost vozidla akcelerovat z nulové rychlosti. Při rozjezdu vozidla však do výpočtu vstupuje celá řada proměnných. Jedná se například o povrch na kterém vozidlo zrychluje, respektive o součinitele adheze mezi ním a pneumatikou vozidla. Dále by bylo nutné zvážit využití akumulátorů jakožto zdroji dodatečné energie pro zrychlení. V neposlední řadě je pak důležité si uvědomit že takové zrychlení vozidla není lineární a není ani vhodné jej lineárně aproximovat. Pro tento návrh je stanoven požadavek na pružné zrychlení vozidla o velikosti  $a = 1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  při rychlosti 30 km/h. Ve výpočtu je uveden značně zjednodušený vztah.

Celkový jízdní odpor při započtení ztrát v převodovce bude:

$$R_{a=1,0\text{m}\cdot\text{s}^{-2}} = \frac{R_A + R_a + R_{\alpha} + R_R}{\eta} \quad [\text{N}]$$

kde:

$$R_A = \frac{1}{2} \rho c_x S_x v^2 = 0,5 * 1,25 * 0,6 * 4,7 * (8,33)^2 = 122,30\text{ N}$$

$$R_a = ma\delta = 12\,000 * 1,0 * 1,08 = 12\,960\text{ N}$$

$$R_{\alpha} = 0\text{ N}$$

$$R_R = f G = (0,01 + 0,0001 * v)mg = (0,01 + 0,0001 * 30) * 12000 * 9,81 = 1530,36\text{ N}$$

$$\eta = 95\%$$

$$R_{a=1 \text{ m.s}^{-2}} = \frac{122,30 + 12\,960 + 1530,36}{0,95} = 15\,381,75 \text{ N}$$

Celkový potřebný výkon na kolech pro překonání odporu  $R_{a=1 \text{ m.s}^{-2}}$  je dán vztahem:

$$P_{celkem} = R_{a=1 \text{ m.s}^{-2}} v = 15\,381,75 * 8,33 = 128\,129,96 \text{ W}$$

Potřebný točivý moment na kolech o daném poloměru při maximální rychlosti je dán vztahem:

$$M_{celkem} = R_{a=1 \text{ m.s}^{-2}} r = 15\,381,75 * 0,55 = 8\,459,96 \text{ Nm}$$

Vztažením na jedno kolo dostáváme:

$$P_{1_kolo} = P_{celkem} / 4 = 128\,129,96 / 4 = 32\,032,49 \text{ W}$$

$$M_{1_kolo} = M_{celkem} / 4 = 8\,459,96 / 4 = 2\,114,99 \text{ Nm}$$

Tabulka 5: Přehled požadovaných parametrů pro různé jízdní režimy

Jízdní parametry	Rychlost [km/h]	Zrychlení [m.s <sup>-2</sup> ]	Příčný sklon [%]	P na jednom kole [kW]	M na jednom kole [N.m]
Maximální rychlost	110	0	0	33,12	595
Stoupavost	8	0	70	40,63	10 066
Akcelerace	30	1	0	32,03	2 115

#### 7.1.4. Převodové poměry

Výpočet celkového převodového poměru nabídne rámcový přehled o požadovaných parametrech elektromotoru. Vyjádření celkového převodového poměru pak umožní hledat takový elektromotor, který má hodnotu točivého momentu rovnou či vyšší, než je požadovaná hodnota točivého momentu na kole, dělená právě celkovým převodovým poměrem. Celkový převodový poměr však nesouvisí pouze s točivým momentem. Důležitou roli může hrát i u maximální dosažitelné rychlosti vozidla. Každý elektromotor má svoje vlastní maximální otáčky na které je konstruován a právě ty se musí rovnat, nebo být vyšší než je násobek celkového převodového poměru počtem otáček kol při maximální rychlosti. Jinými slovy platí, že při maximální rychlosti vozidla nesmí být při daném celkovém převodovém poměru vyšší otáčky elektromotoru než jsou otáčky kola.

Platí následující vztahy:

$$i_{max} = \frac{\varphi_{em}}{\varphi_{kol}} \quad [-]$$

kde:

$i_{max}$  – maximální celkový převodový poměr [ - ]

$\varphi_{em}$  - otáčky elektromotoru při maximální rychlosti vozidla [ot./s]

$\varphi_{kol}$  – otáčky kol při maximální rychlosti vozidla [ot./s]

$$\varphi_{kol} = \frac{v_{max}}{o_d} \quad [ot./s]$$

$v_{max}$  – maximální rychlost [m.s<sup>-1</sup>]

$o_d$  – dynamický obvod kola [m]

$$o_d = 2 \pi r_d \quad [m] \quad r_d = 0,975 r \quad [m]$$

$r_d$  – dynamický poloměr kola [m]

$r$  – statický poloměr kola [m]

[1] [2]

### 7.1.5. Varianta I – jednostupňová převodovka

V první variantě je uveden nejjednodušší způsob, jak postupovat při výběru převodovky a elektromotoru. Cílem je najít takový elektromotor, u něhož by byla použita pouze jednostupňová převodovka a kolová redukce. Celkový převodový poměr v tomto případě je dán součinem hodnot kolové redukce a jediného převodového stupně.

Při pohledu do katalogu produktů společnosti Borg Warner, jenž patří mezi největší dodavatele pohonných jednotek pro různé dopravní stroje, zjistíme, že pro dosažení námi požadovaných více než 10 000 Nm, je zapotřebí vybírat mezi dvěma nejsilnějšími elektromotory, které se v jejich nabídce vyskytují. Dle výkonové charakteristiky motoru mají shodnou hodnotu maximálních otáček motoru, která po odečtení z částečné charakteristiky motoru činí 5250 ot./min. Vystává však otázka, jak výrobce interpretuje udávaný počet maximálních otáček elektromotoru. Obecně lze usuzovat, že vzhledem k životnosti elektromotoru jej není vhodné dlouhodobě provozovat v jeho maximálních otáčkách. Existuje však možnost, že výrobce uvádí podhodnocenou hodnotu oproti skutečně maximálním otáčkám elektromotoru. Dle obrázku č. 18, který graficky znázorňuje účinnost elektromotoru v závislosti na otáčkách motoru a kroutícím momentu, je použitelná maximální hodnota otáček motoru kolem 4000 ot./min. Ve



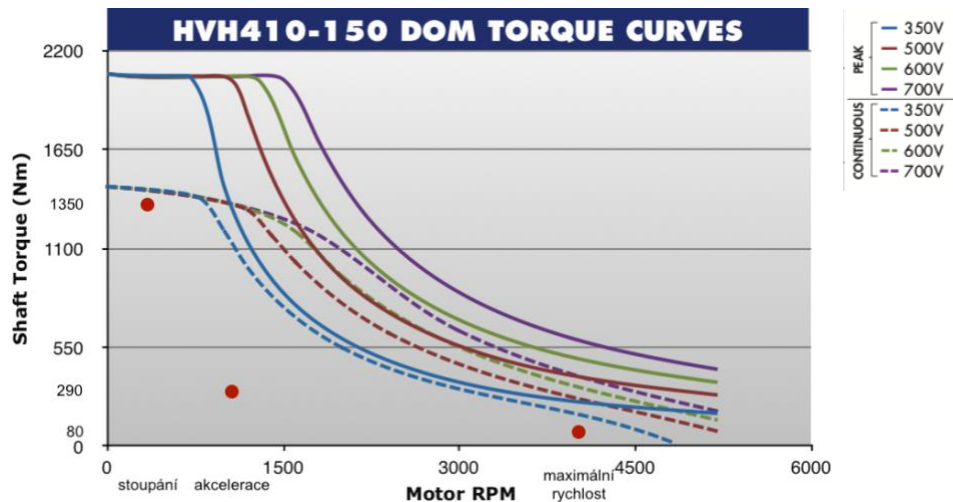
vyšších otáčkách už motor pracuje velmi neefektivně což by mimo jiné znamenalo značné problémy s chlazením motoru. Po aplikování vztahů z minulé kapitoly dostáváme hodnotu maximálního celkového převodového poměru:

$$i_{celkem\_max} = \frac{\varphi_{em}}{\varphi_{kol}} = \frac{\varphi_{em}}{\frac{v_{max}}{O_d}} = \frac{66,67}{\frac{30,56}{2 * \pi * 0,975 * 0,55}} = 7,3 [-]$$

Pro minimální hodnotu točivého momentu vybraného elektromotoru pak platí vztah:

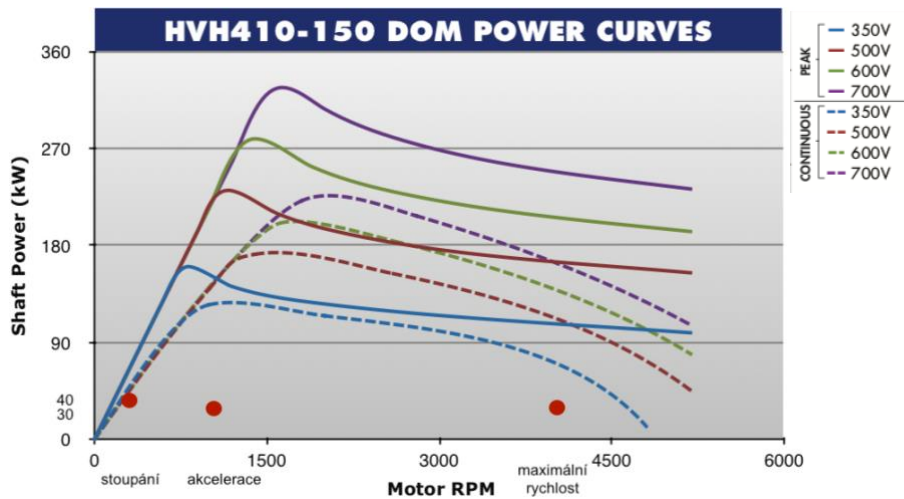
$$M_{em\_min} \geq \frac{M_{1\_kolo}}{i} = \frac{10\,066}{7,3} = 1379 \text{ Nm}$$

Tento výpočet nám výběr zúžil na jediný produkt s označením HVH410-150, který plní dané požadavky. Částečnou charakteristiku motoru se zanesenými potřebnými hodnotami výkonu a točivého momentu z tabulky č. 5 při výše vypočteném převodovém poměru můžeme vidět na obrázcích č. 16 a 17. Pro ilustraci a jednoduché znázornění byly přepočteny otáčky elektromotoru při daných jízdních režimech na rychlost vozidla při stanoveném převodovém poměru. Tyto hodnoty byly následně do obrázků zaneseny.



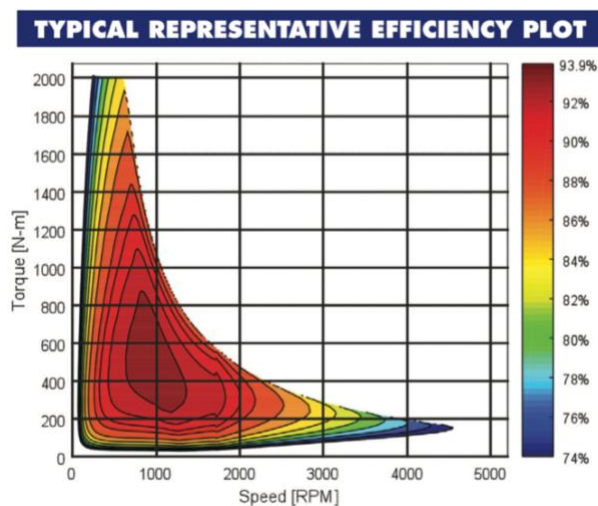
Obrázek 16: Průběh točivého momentu motoru HVH410-150 DOM

se zanesenými hodnotami v jednotlivých jízdních režimech při převodovém poměru  $i_c = 7,3$   
[41, upraveno]



Obrázek 17: Průběh výkonu motoru HVH410-150 DOM

se zanesenými hodnotami v jednotlivých jízdních režimech při převodovém poměru  $i_c = 7,3$   
[41, upraveno]



Obrázek 18: Účinnost motoru HVH 410-150 DOM [41]

### 7.1.6. Varianta II – dvoustupňová převodovka

Jak vyplývá z předchozí kapitoly, pro výběr vhodného elektromotoru je limitující jeho charakteristika výkonu, točivého momentu a převodového poměru. Druhým řešením které se nabízí, je využití dvoustupňové převodovky. V současné době se drtivá většina produkčních vozidel s elektrickým pohonem dodává s jednostupňovou převodovkou. Ve srovnání s vozidly se spalovacím motorem je to umožněno zejména kvůli odlišné charakteristice elektromotoru, konkrétně pak kvůli vysoké hodnotě točivého momentu prakticky od nulových otáček, širšímu spektru pracovních otáček a celkovému rozsahu otáček elektromotoru. Do budoucna se však uvažuje se zavedením více stupňových převodovek i pro elektromobily. Jejich výhody by se

měly opírat zejména o vyšší efektivitu v provozu a možné zlepšení jízdní dynamiky. Mezi nevýhody patří složitější konstrukční řešení, vyšší hmotnost a nepochybně i vyšší cena. [42]

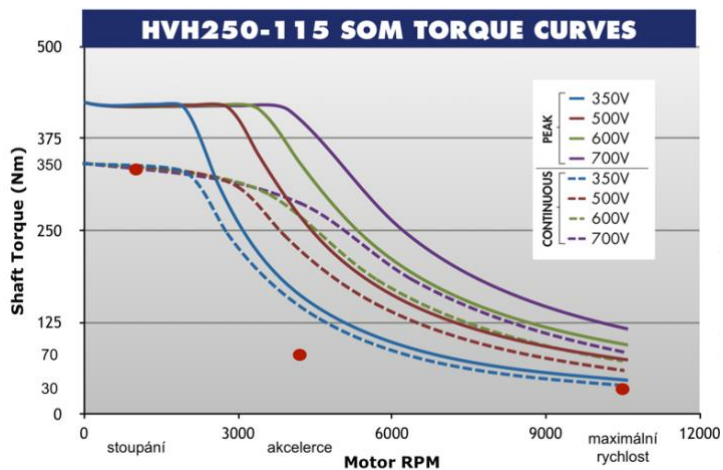
Při využití slabších elektromotorů opět z produktové řady společnosti Borg Warner zjistíme, že hodnoty točivého momentu se pohybují okolo 350 Nm a maximální otáčky motoru jsou pak výrazně vyšší než v případě předchozí varianty, ty nyní dosahují hodnot kolem 10500 ot./min. Po dosazení nových parametrů do vztahů pro celkový druhý maximální převodový poměr získáváme:

$$i_{2\_celkem\_max} = \frac{\varphi_{em}}{\varphi_{kol}} = \frac{\varphi_{em}}{\frac{v_{max}}{o_d}} = \frac{175}{\frac{30,56}{2 * \pi * 0,975 * 0,55}} = 19,3 [-]$$

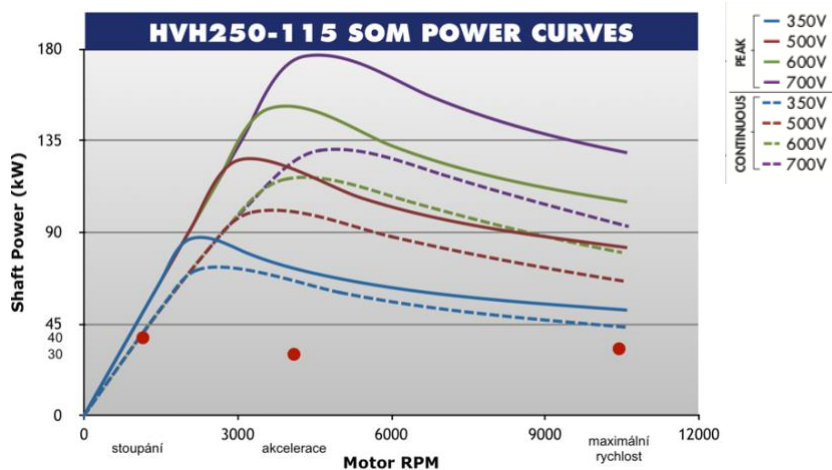
Jelikož první a druhý převodový poměr bude nabývat rozdílných hodnot, vypočteme minimální hodnotu celkového převodového poměru na první stupeň tak, aby byla splněna podmínka minimálního točivého momentu:

$$i_{1\_celkem\_min} \geq \frac{M_{1\_kolo}}{M_{em}} = \frac{10\,066}{350} = 28,76 [-]$$

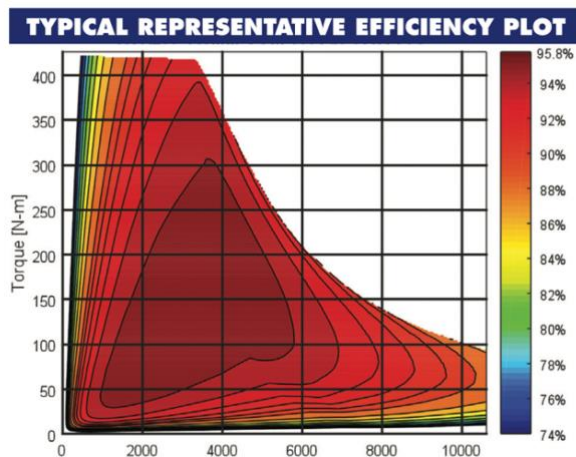
Výpočtem byly získány dvě limitní hodnoty celkových převodových stupňů. Výběr konkrétních převodových stupňů bude rozebrán dále v samostatné kapitole. Na obrázcích č. 19 a 20 nalezneme částečnou charakteristiku motoru HVH250-115 SOM se zanesenými limitními hodnotami výkonu a točivého momentu z tabulky č. 5. V nízkých rychlostech je uvažován první minimální převodový stupeň, ve vysokých rychlostech pak druhý maximální převodový stupeň. Jelikož tento motor váží pouhých 57,2 kg, tak jeho použití oproti první variantě přinese značnou úsporu hmotnosti a to i při započtení větší a komplikovanější převodovky. Zároveň jak můžeme vidět na obrázku č. 21, charakteristika účinnosti tohoto motoru je ve srovnání s elektromotorem předchozím odlišná, zejména pak oblast s vysokou účinností je výrazně větší.



Obrázek 19: Průběh točivého momentu motoru HVH250-115 SOM se zanesenými hodnotami v jednotlivých jízdních režimech při převodovém poměru  $i_{1c} = 28,8$  a  $i_{2c} = 19,3$  [41, upraveno]



Obrázek 20: Průběh výkonu motoru HVH250-115 SOM se zanesenými hodnotami v jednotlivých jízdních režimech při převodovém poměru  $i_{1c} = 28,8$  a  $i_{2c} = 19,3$  [41, upraveno]



Obrázek 21: Účinnost motoru HVH250-115 SOM [41]

Z obrázků č. 19 a 20 je patrné, že se opravdu jedná o limitní hodnoty. Stejně jako v předchozí variantě tak ani v této variantě není zcela zřejmé, jak výrobce konkrétně interpretuje hodnotu maximálních otáček elektromotoru. Vhodné by nicméně bylo využít menší hodnotu celkového druhého převodového stupně. Tím by se jednak zvýšila maximální rychlost, ale zejména by se při jízdě v rychlostech nad 100 km/h zvýšila účinnost elektromotoru.

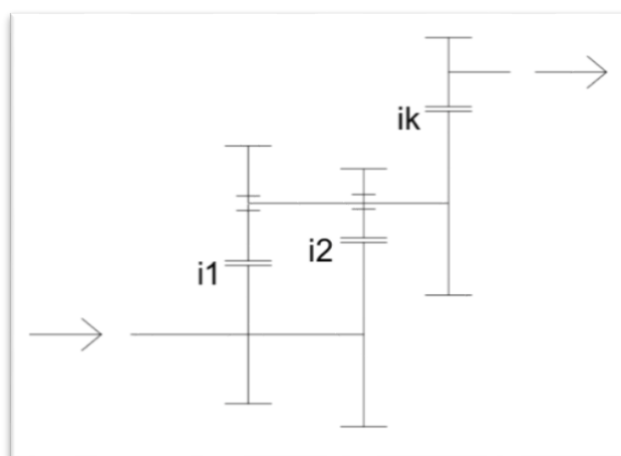
### 7.1.7. Volba převodovky a převodových poměrů

V předchozích dvou kapitolách byly uvedeny a popsány dva odlišné přístupy k potřebnému převodu sil. Jednalo se zejména o vymezení limitních hodnot pro jednotlivé varianty, které nicméně podaly celkem jasný přehled o výhodách či nevýhodách příslušných variant.

V této kapitole bude na základě uvedených vlastností vybrána vhodnější varianta. Následovat bude návrh optimálních hodnot převodových poměrů.

Hlavní popis vlastností obou variant zde byl již popsán, připomeňme tedy, že první varianta zahrnovala silný, nízko otáčkový elektromotor, který umožňoval přenos sil pomocí jednostupňové převodovky. Nevýhodou této varianty je vysoká hmotnost elektromotoru, jeho rozměry, nízká efektivita a problémy s tím spojené.

Naproti tomu druhá varianta poskytuje s přehledem požadované jízdní parametry současně při mnohem nižší hmotnosti. Zároveň se zde díky dvourychlostní převodovce nachází značně vyšší potenciál pro lepší účinnost v provozu. Převodovka u druhé varianty je sice konstrukčně složitější, těžší a dražší, nicméně při celkovém srovnání s variantou první se stále jedná o lepší volbu, proto bude do tohoto návrhu implementována právě ona. Schéma možného uspořádání takové převodovky je znázorněno na obrázku č. 22.



Obrázek 22: Schéma převodového ústrojí [autor]

Vzhledem k vysoké hodnotě prvního celkového převodové stupně se z konstrukčního hlediska jeví vhodné pro celkový převod využít kombinaci více převodů, konkrétně tedy příslušného převodového stupně, stálého převodu a kolové redukce. Zvolené hodnoty jednotlivých převodových poměrů nalezneme v tabulce č. 6. Při volbě hodnot jednotlivých převodových poměrů byl brán ohled zejména na splnění požadovaných jízdních parametrů a dále i na efektivitu provozu. Celkový první převodový stupeň vycházel z výpočtů uvedených v předchozí kapitole. Kvůli jeho již tak vysoké hodnotě by bylo zbytečné se jej snažit navýšit. Celkový druhý převodový stupeň byl zvolen zejména z hlediska požadavků na vysokou rychlost vozidla a s tím spojené vysoké otáčky elektromotoru, potřebný moment sil a to obojí pak v rámci co nejvyšší efektivity.

Tabulka 6: Orientační návrh převodových stupňů

Převodový stupeň	Hodnota převodu	Celkový převod
Kolová redukce	$i_k = 4$	-
Stálý převod	$i_0 = 2,25$	
1. převodový stupeň	$i_1 = 3,22$	$i_{c1} = 29$
2. převodový stupeň	$i_2 = 1$	$i_{c2} = 9$

[40]

Společně s volbou převodových stupňů je vhodné zmínit i strategii řazení, která má zásadní vliv na efektivitu v provozu. Ideální moment řazení by pak byl určen tak, aby trakční elektromotory byly provozovány v pásmu otáček s co možná nejvyšší účinností. Určení komplexní strategie řazení je velmi náročná činnost, která zahrnuje náročné výpočty pro nejrůznější jízdní požadavky. Takto rozsáhlý návrh není předmětem této diplomové práce, proto byl zvolen zjednodušený výpočet, vycházející opět z výpočtu jízdních odporů.

Prvotní a logickou úvahou bylo využívat první převodový stupeň v nízkých rychlostech a druhý převodový stupeň v rychlostech vyšších, avšak po elementárních výpočtech bylo zřejmé, že hodnota prvního převodového stupně je pro jízdu po rovině nízkou rychlosti v podstatě zbytečná. Trakční motor by tímto v nízkých rychlostech pracoval v obdobné oblasti účinnosti jako při jízdě na druhý převodový stupeň. Připomeňme si však, že hodnota prvního převodového stupně nemůže být vzhledem k jízdním požadavkům nižší. Nabízí se tedy možnost provozovat v nenáročných podmínkách vozidlo pouze na druhý převodový stupeň a první převodový stupeň pak využívat zejména v terénu v podstatě jako redukční převod. Takové řešení by mělo mít zanedbatelný vliv na spotřebu energie či paliva. Nicméně snížení frekvence řazení při jízdě by mělo mít pozitivní dopad na životnost jak převodovky tak i trakčních elektromotorů.

Přehled jízdních vlastností, zejména pak vztahy mezi různými rychlostmi, stoupáním a převodovými poměry jsou uvedeny dále v této diplomové práci v kapitole 8.4 Dynamika navrženého pohonu.

### 7.1.8. Měníče a ovladače

Pro řízení elektromotoru se využívají speciální ovladače, v angličtině také nazývány *controllers*. Toto zařízení, které je ve své podstatě obdobou řídicí jednotky spalovacího motoru, může v některých případech sloužit i jako měnič napětí, ale zastane i roli frekvenčního měniče. V případě, že má být v návrhu vozidlo schopné pohybovat každým kolem jinou rychlostí, či dokonce i směrem, je nutné použít ke každému elektromotoru vlastní zařízení. Nedílnou funkci plní i v případě kompatibility elektromotorů a baterií, jelikož elektromotory pracují na střídavém proudu ale akumulátory na proudu stejnosměrném. Svoje řešení nabízí i firma Borg Warner pod názvem SECVON. Hmotnost ani zástavbové poměry nejsou u tohoto typu produktů nijak zásadní a proto nebudou dále podrobně řešeny. U těchto typů produktu je naopak nutné zvážit maximální přípustný výkon a to jak dlouhodobý tak i krátkodobý, dále pak rozsah použitelného napětí, výstupní proud, potřeby a možnosti chlazení a účinnost. [41]

## 7.2. Generátor el. energie

Generátor elektrické energie je nezbytnou součástí sériového hybridního pohonu, jedná se o elektromotor který generuje elektrickou energii, která je následně spotřebovávaná jednotlivými trakčními elektromotory či je ukládána do akumulátorů. Samotný elektromotor-generátor je poháněn spalovacím motorem, jehož specifikata a výběr bude popsán v nadcházející kapitole. V případě návrhu pohonu vojenského vozidla musí být generátor schopný dlouhodobě generovat takové množství elektrické energie, které je nezbytné pro nejhorsí a nejnáročnější scénář, který může nastat. Jde o situaci kdy jsou baterie zcela vybité a nastane požadavek na dlouhodobý maximální výkon, jenž plyne z jízdních parametrů vozidla uvedených v tabulce č. 5. Zároveň je na tomto místě vhodné zvážit otázku zásobování palubních a jízdních systémů energií. U osobních vozidel slouží motor mimo jiné i právě k pohonu dalších agregátů, jako je například klimatizace nebo posilovač řízení. Napájení těchto systémů je u vozidel s konvenčním pohonem nejčastěji řešeno buď elektricky, hydraulicky, nebo případně pak kombinací obou. V této části diplomové práce je však pouze nutné si uvědomit, že i při nejnáročnějším jízdním režimu je nutné vygenerovat takovou hodnotu výkonu, která pokryje požadavky na výkon trakčních motorů a zároveň umožní chod dalších přístrojů, včetně telekomunikačních, obranných a dalších speciálních vojenských systémů, které se ve vozidle nachází. V případě tohoto návrhu byla tato hodnota příkonu stanovena na 30 kW. Zápis pro minimální hodnotu výkonu vhodného generátoru může být po započtení ztrát zjednodušeně popsán jako:

[43] [44]

$$P_{gen} \geq \frac{\sum P_{1,kolo,max}}{\eta_{em}} + P_a \quad [\text{kW}]$$

kde:

$P_{gen}$  – Výkon generátoru [kW]

$P_{1,kolo,max}$  – Maximální potřebný výkon jednoho elektromotoru [kW]

$\eta_{em}$  – Účinnost elektromotorů (vyčtena z obrázku č. 21) [-]

$P_a$  – Příkon agregátů [kW]

Po dosažení hodnot z tabulky č. 5 dostáváme:

$$P_{gen} \geq \frac{40,63 + 40,63 + 40,63 + 40,63}{0,90} + 30 = \frac{162,52}{0,9} + 30 \cong 210 \text{ kW}$$

Takto vysoký výkon je dostupný zpravidla při vyšším napětí. Mezi produkty splňující takové parametry patří elektromotor HVH410-115 společnosti Borg Warner, jenž byl v této diplomové práci již uveden jako jedna z možností trakčních motorů. Vzhledem k úzkému spektru otáček s přijatelnou účinností nebyl tento motor vhodný k samotnému pohonu vozidla, avšak v provozním režimu generátoru elektrického proudu to již není závažnou překážkou. Jak bylo uvedeno v kapitole: *Varianta I – jednostupňová převodovka*, daný elektromotor dosahuje výkonu zhruba 210 kW při napětí 600 V, či 240 kW při napětí 700 V. V otáčkách odpovídající nejvyššímu výkonu pak dosahuje účinnosti kolem 90 %. Obecně však lze předpokládat, že ve velké většině případů nebude vozidlo provozováno při extrémně náročných jízdních podmínkách. Z toho důvodu jsou sice jednotlivé komponenty na takové případy dimenzovány, avšak obecně se dá předpokládat že vozidlo nebude často či dlouhodobě provozováno při více než 3/4 svého maximálního výkonu. Právě při dlouhodobém provozu by měl být generátor co možná nejefektivnější. Vybraný elektromotor pracuje při daném zatížení při své nejvyšší účinnosti, která činí 94 %.

### 7.3. Spalovací motor

V této kapitole se dostáváme až k samotnému zdroji kinetické energie, která je dále využita v různých formách ve všech výše uvedených komponentech výše. Jedná se o motor s vnitřním spalováním, jež má u sériového hybridního pohonu za úkol dodávat rotační pohyb generátoru uvedenému v předchozí kapitole. Vzhledem k vysoké účinnosti se jeví jako nejlepší řešení využití vznětového motoru. Obdobně jako u generátoru platí následující vztahy:

$$P_{ICE} \geq \frac{P_{gen}}{\eta} \quad [\text{kW}]$$



kde:

$P_{ICE}$  – Potřebný výkon spalovacího motoru [kW]

$P_{gen}$  – Potřebný výkon generátoru [kW]

$\eta$  – Účinnost (vyčtena z obrázku č. 18) [-]

Po dosazení dostáváme:

$$P_{ICE} \geq \frac{210}{0,94} \cong 230 \text{ kW}$$

Obdobně jako v předchozí kapitole při výběru vhodného generátoru, i zde je výběr limitován požadavkem na maximální výkon. Avšak nejlepší účinnosti by mělo být dosaženo již při nižším výkonu kolem 190 kW. Vybrané komerční produkty, které splňují požadované parametry jsou uvedeny v tabulce č. 7.

Tabulka 7: Přehled vybraných spalovacích motorů s jejich parametry

Výrobce	Model	P [kW]	RPM [ot./min]	MSP [g/kWh]	Hmotnost [kg]
MTU	6R 106 TD21	240	2100	210	555
	6R 1000/OM 936	230	2200	205	668
Mercedes-Benz	OM 926 LA	240	2200	?	530
Cummins	ISC 8.3 330	246	2200	?	744
	ISB <sup>e</sup>	264	2500	?	485
Perkins	1206 F-E70TTAG4	239	1800	210	1087
HINO	P11	257	1850	?	1150
Paccar	P-X7	242	2300	?	523

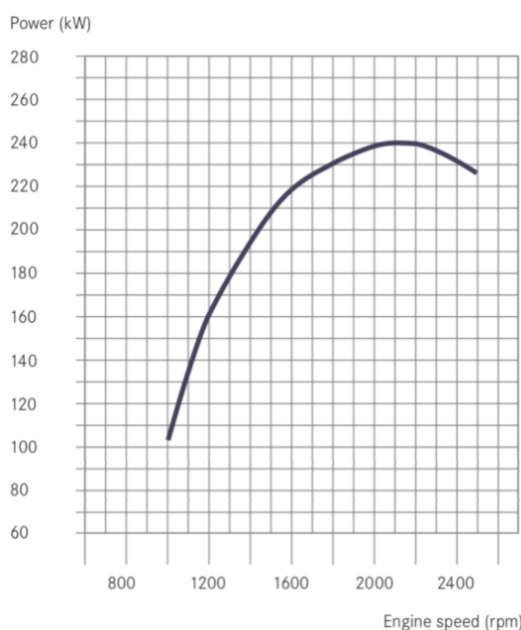
– nezjištěné hodnoty byly označeny symbolem otazníku

– hmotnost měla být uvedena jako tzv. suchá, tedy bez provozních kapalin. Ne vždy se však podařilo tento údaj ověřit. Udávané vysoké hmotnosti mohou být včetně příslušenství a provozních kapalin

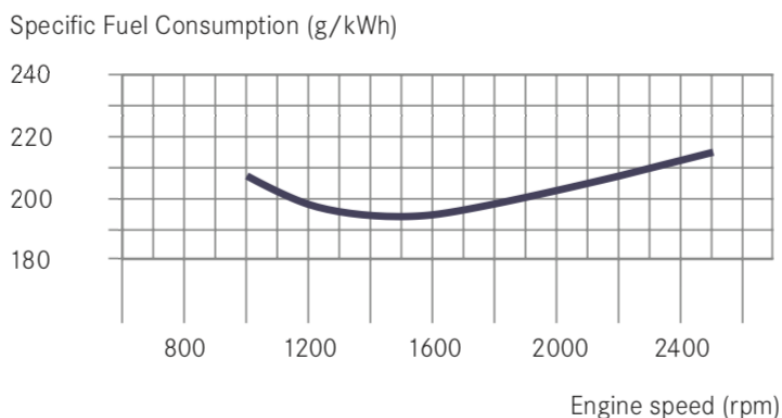
[45] [46] [47] [48] [49]

Z výše uvedené tabulky je patrné, že se na trhu nachází více spalovacích motorů, které by mohly být v rámci navrhovaného pohonu použity. Samotná tabulka slouží především k porovnání základních parametrů spalovacích motorů, bohužel však podobně jako v případě elektromotorů, nejsou všechny potřebné údaje veřejně k dispozici, jedná se tedy pouze o rámcové porovnání jednotlivých spalovacích motorů. Krom výše uvedených motorů, které jsou nejčastěji určeny pro nákladní vozidla a zemědělské stroje, by bylo možné využít i motory určené pro osobní vozidla. V současné době již existují (zpravidla vícekrát přeplňované) vznětové motory, které dosahují požadovaného výkonu, avšak ani jejich podrobné technické

parametry nejsou veřejně k dispozici. Ideální řešení při reálném vývoji takového pohonu, by bylo nechat takový motor vyvinout, či s přihlédnutím na finanční stránku vývoje spíše ponechat již existující produkt upravit tak, aby byl schopný podat dostatečný výkon, ale zároveň dlouhodobě pracovat v optimálním režimu vzhledem k jeho opotřebení a spotřebě paliva. To vše ideálně za co nejnižší hmotnosti a přijatelných rozměrů. Pro navrhovaný pohon v rámci této diplomové práce byl vybrán prvně uvedený motor z tabulky č. 7, tedy spalovací motor od společnosti MTU s označením 6R 106 TD21. Motor byl vybrán i z důvodu dostupnosti širších technických parametrů, což je pro požadavky této diplomové práce přínosné. Průběh výkonu v závislosti na otáčkách motoru MTU 6R 106 TD21 je vyobrazen na obrázku č. 23, na obrázku č. 24 je pak znázorněna měrná spotřeba paliva motoru.



Obrázek 23: Vnější výkonová charakteristika motoru MTU 6R 106 TD21 [45]



Obrázek 24: Měrná spotřeba paliva motoru MTU 6R 106 TD21 [45]

Přenos točivého momentu mezi spalovacím motorem a generátorem elektrické energie je možné provést z principu dvěma způsoby. Prvním z nich je jejich přímé spojené, otáčky spalovacího motoru a moment síly by tedy byly stejné jako u generátoru elektrické energie. Jedná se o konstrukčně jednodušší řešení, u kterého je však nutné zvážit vzájemnou efektivitu obou motorů. Pro dosažení co nejvyšší efektivity v provozu, je zapotřebí provozovat spalovací motor v oblastech s jeho nejnižší spotřebou paliva. U elektromotoru-generátoru pak platí obdobné, tedy ideálně jej provozovat v oblasti s co nejvyšší účinností. Druhým řešením, u kterého je za určitých předpokladů snazší dosáhnout efektivního provozu obou motorů je jejich spojení skrz redukční převodovku. V takovém případě je možné měnit počet výstupních otáček a velikost momentu sil ze spalovacího motoru tak, aby následně oba motory současně pracovaly co možná nejefektivněji. Jedná se však o složitější řešení, zejména z hlediska zástavbových poměrů, mechanických ztrát a nárůstu hmotnosti. Mimo jiné by bylo nutné vyřešit i například otázku torzních kmitů respektive jejich tlumení, které vznikají při chodu spalovacího motoru a které by mohly mít zásadní vliv na životnost generátoru elektrické energie.

Pro stanovení hodnoty vhodného převodového poměru redukční převodovky a rozhodnutí zda jej vůbec využít či nikoliv je nutné znát úplnou charakteristiku spalovacího motoru a podrobnější požadavky na potřebný výkon při jízdě. Tím by následně bylo možné přizpůsobit chod spalovací motor tak, aby dlouhodobě pracoval v oblasti s co nejnižší spotřebou paliva. Z dostupných vnějších charakteristik motorů je možné tento převodový poměr určit pro nejvyšší zatížení, kterému právě vnější charakteristika odpovídá. Plné zatížení však samozřejmě neodpovídá efektivnímu provozu. Prozatím tedy nebude brána redukční převodovka v potaz.

## 7.4. Akumulátory

Důležitým aspektem pro výběr vhodných akumulátorů je především charakteristika provozu daného vozidla a s tím spojené jízdní požadavky. Dle toho se odvíjí pravděpodobně nejdůležitější parametr akumulátorů, kterým je jejich kapacita. Mezi další technické parametry, které je nutné zvážit je celková kompatibilita s elektromotory a měniči. Obdobně jako u měničů je to především maximální proud, napětí, výkon a související elektrotechnické parametry. Nedílnou součástí při výběru vhodných akumulátorů, je i zvážení logiky jejich dobíjení, respektive čerpání elektrické energie v nich uložené. Existuje celá řada způsobů, jak lze řídit generování, ukládání a spotřebu elektrické energie u sériového hybridního vozidla. V případě vojenského vozidla, je však nezbytné brát v úvahu, že musí být vozidlo stále akceschopné a to i nezávisle na stavu akumulátorů. Na tyto případy byly v předešlých kapitolách jednotlivé prvky hybridního pohonu také dimenzovány.

Akumulátory by tedy měly umožnit následující:

- napájení palubních přístrojů (bez chodu spalovacího motoru)
- vyrovnávat výkonové špičky tak, aby při jízdě spalovací motor pracoval v ideálních otáčkách
- v případě požadavků na vysoký výkon jej poskytnou společně se spalovacím motorem
- při jízdě dobít akumulátory na pozdější čistě elektrický provoz
- umožnit jízdu pouze na elektřinu v taktickém režimu

Mezi další vlastnosti akumulátorů, které je vhodné zvážit patří:

- Modularita akumulátorů

Vlastnost díky níž je možné zajistit částečnou variabilitu provozních parametrů, zejména pak dojezd v čistě elektrickém režimu, či dobu napájení externích vojenských technologií. Při otázce zvýšení dojezdu vozidla je však nutné mít na paměti s tím spojený nárůst hmotnosti akumulátorů a jejich rozměrů.

- Bezpečnost

Při provozu je nutné neustále monitorovat nejrůznější parametry akumulátorů, mezi ty základní patří napětí, proud, ale i aktuální stav nabití akumulátorů, to i z důvodu jejich nežádoucího přebití. V rámci bezpečnosti je výhodou umístit samotné baterie dále od posádky vozidla do vhodně větraných prostor. Tím se eliminují rizika spojená s případným vznikem nebezpečných plynů či při vznícení akumulátorů. Konkrétně u vojenského vozidla vzrůstá riziko poškození baterií na bojišti. Je tedy nutné brát zvláštní ohled na jejich umístění, ochranu a mimo další také i na hydroizolaci.

- Provozní teplota

Z dostupných zdrojů plyne, že baterie je možné více či méně bezproblémově využívat i při poměrně velkém rozpětí teplot od - 18 °C až po 60 °C. Při již realizovaném testování byl požadovaný vysoký výkon akumulátorů pouze po krátkou dobu, která činila průměrně kolem 30 s, z tohoto důvodu baterie nedosahovaly dlouhodobě maximálních výkonů a tak nebylo nutné baterie nikterak chladit. Nicméně chladicí systém baterií by měl být přítomen, ať už pro režim dlouhodobého vysokého výkonu či z důvodů provozu vozidla v oblastech, kde teploty na slunci dosahují vysokých teplot.

[44]

Z již provedených měření v oblasti testování vozidel s elektrickým pohonem plyne, že jako vhodné se jeví využití Li-Ion baterií. Na trhu aktuálně existují produkty, které jsou vyvinuty a přímo určeny k vojenskému použití. Alespoň částečně tak výrobce řeší problematiku popsanou výše, konkrétně například modularitu, provoz ve vysokém teplotním rozpětí či tzv. stupeň krytí, který definuje odolnost elektrických zařízení proti vniknutí cizích předmětů či kapalin. Na obrázku č. 25 je znázorněn příklad modulárních akumulátorů společnosti Kokam, který se v tomto případě skládá celkem ze sedmi jednotek. [44] [51] [52]



Obrázek 25: Modulární akumulátory společnosti Kokam [52]

V tabulce č. 8 jsou uvedeny orientační vztahy mezi různými kapacitami baterií, které odpovídají příslušnému počtu modulárních *packů* baterií, a teoretickým dojezdem vozidla v předpokládaném taktickém režimu. Výpočty vychází z jízdních odporů, parametrů jednotlivých komponent a dynamiky vozidla. Při výpočtech byla uvažována jízda konstantní rychlostí bez převýšení a s přiměřenou spotřebou výkonu ostatních palubních přístrojů.

Zvolení požadované kapacity baterií je závislé zejména na požadovaném dojezdu v čistě elektrickém režimu, případně pak i na požadavcích vztažených k dlouhodobému napájení vojenských technologií.

Pro tento návrh se zejména z důvodu potřebného dojezdu, nárůstu hmotnosti a zástavbových poměrů jeví jako vhodné využití dvou akumulátorových jednotek, přičemž celková kapacita by tak dosáhla téměř 23 kWh. V simulaci, která je popsána níže, bylo počítáno s článkem o kapacitě 3 Ah, nominálním napětím 3,6 V a maximálním proudem 20 A. Pro potřebný nominální proud celého packu je nutné sériové zapojení celkem 194 článků, tím samotný výkon baterií dosáhne dostatečných 165 kW. Pro dosažení požadované kapacity je pak nezbytné paralelní zapojení 12ti článků.

Tabulka 8: Teoretický dojezd vozidla při různých kapacitách akumulátorů

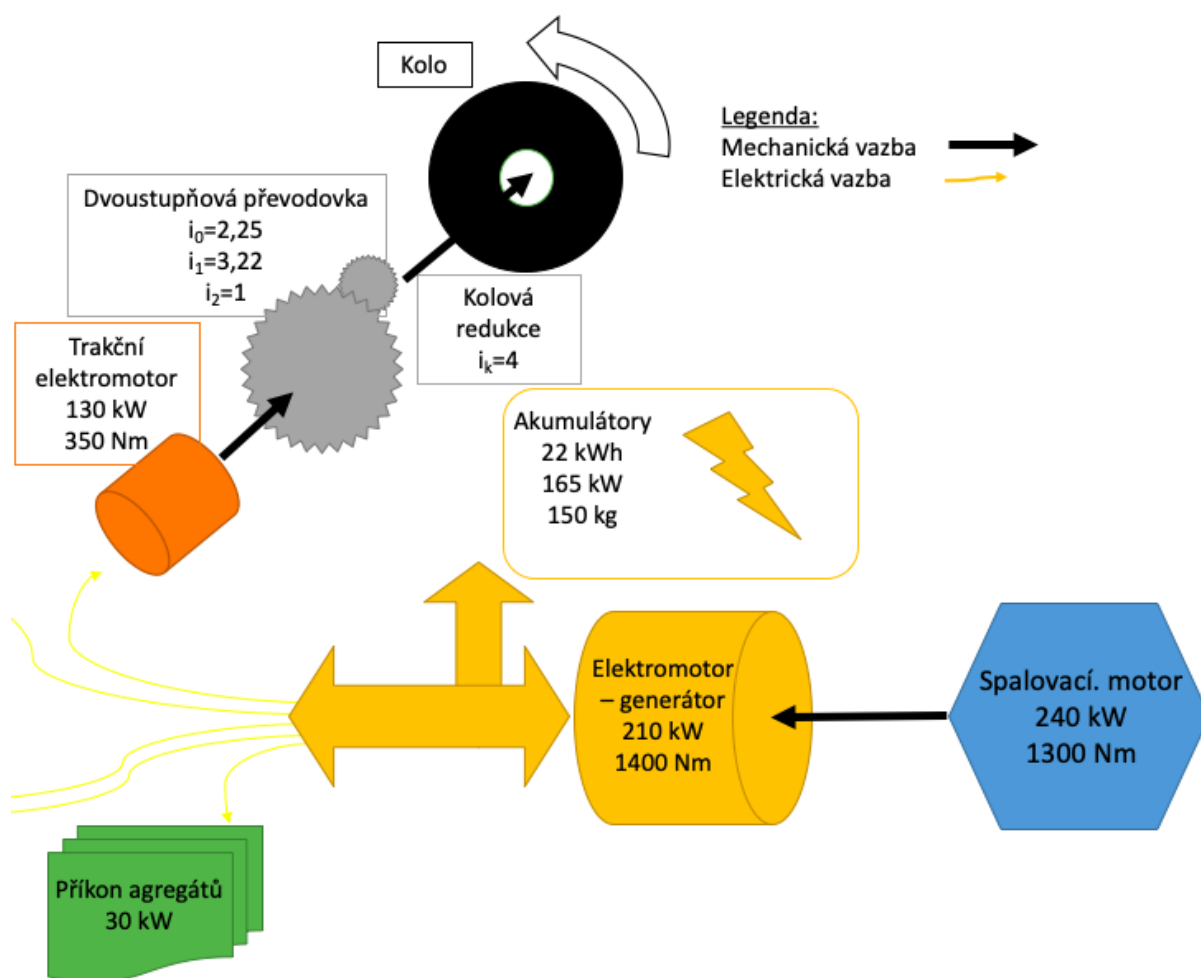
Kokam 114E	Kapacita [kW/h]	Hmotnost [kg]	Rozměry* [mm]		Teoretický dojezd		
					v = 40 km/h		
					[km]	[min]	
1 pack	11,4	73,5	753	303	282	10	15
2 pack	22,8	147		606		20	30
3 pack	34,2	220,5		909		30	45
4 pack	45,6	294		1212		40	60

\* při uspořádání jednotek tak jak je uvedeno na obrázku č. 25.

## 8. Navržený pohon

### 8.1. Blokové schéma navrženého pohonu

Pro ilustraci a pro lepší představu zapojení jednotlivých komponent sériového hybridního pohonu je na obrázku č. 26 uvedeno blokové schéma navrženého pohonu, společně s nejdůležitějšími parametry jednotlivých komponent. Schéma je vztaženo pouze k jedinému kolu, nicméně je naznačeno, že stejně je vyřešen i pohon zbylých kol.



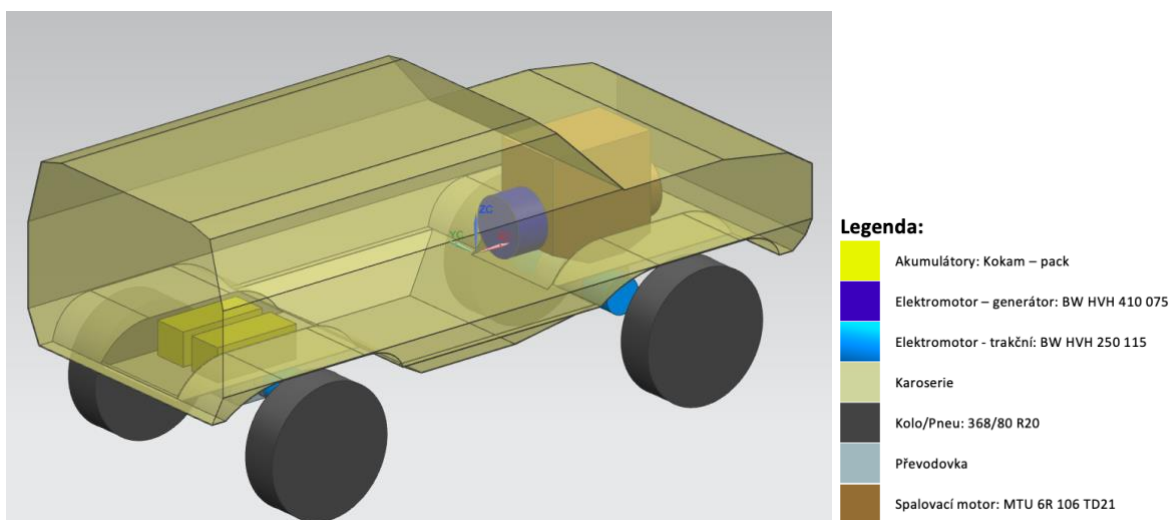
Obrázek 26: Blokové schéma navrženého pohonu

### 8.2. Implementace jednotlivých komponent

Pro ověření zástavbových poměrů a názornou ilustraci navrženého sériového hybridního pohonu byl vytvořen CAD model vojenského taktického vozidla, do něhož byly jednotlivé komponenty umístěny. Dva význačné pohledy modelu vozidla společně s umístěnými

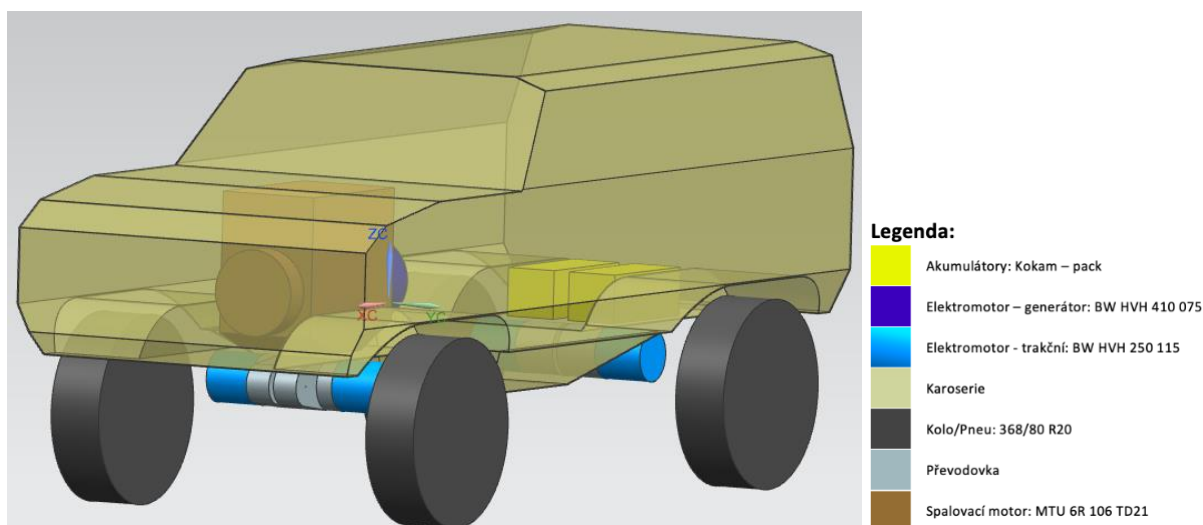
komponenty jsou vyobrazeny na obrázcích č. 27 a č. 28. Model slouží zároveň i pro získání základní představy ohledně rozměrů jednotlivých komponent, respektive jejich poměr vztažený k rozměrům celého vozidla. Z obrázků umístěných níže plyne, že není závažný problém vyznačené komponenty do stávajícího vozidla umístit. U navrženého pohonu může spalovací motor zůstat na identickém místě jako u konvenční verze. Generátor elektrické energie je pak oproti převodovce, kterou elektromotor pozičně nahradil, výrazně menších rozměrů, tudíž ani v tomto případě by umístění nemělo být problematické. Akumulátory byly umístěny do modelu z důvodu optimálního rozložení váhy, nicméně vzhledem k jejich rozměrům by nebyl problém je umístit i odlišně.

Umístění převodovek a elektromotorů je v této fázi opravdu pouze rámcové. Pro podrobnější návrh umístění je nezbytné znát detailní konstrukční řešení náprav, následně i typ a rozměry použitých převodovek. Jedním z mnoha řešení, je uložení elektromotorů a části převodovky se vstupní hřídelí mimo nápravu vozidla. Přičemž výstup z převodovky by se nacházel v prostoru, kde je v konvenčním pohonu umístěn diferenciál. Takové řešení je znázorněno na obrázku č. 28. Další možností je například asymetrické uložení elektromotoru a převodovky. V této části návrhu je pouze nutné si uvědomit že takto umístit elektromotory a převodovky lze. Následně by bylo nutné vyřešit samotné uchycení elektromotorů a převodovek, jejich ochranu před poškozením v terénu, hydroizolaci či například chlazení. Samotný rotační pohyb mezi převodovkou a kolem zajišťují hřídele s homokinetickým kloubem. Vzhledem k jízdním požadavkům v těžkém terénu, kde se počítá s velkým vychýlením kol ve směru osy z, je vhodné aby tyto hřídele byly co nejdelší, což odpovídá jejich uchycení co nejvíce ke středu. Kabeláž, hřídele ani měniče nebyly vzhledem ke svým nepodstatným rozměrům do modelu umístěny. Celý model se nachází ve formátu *.stp* v příloze č. 1.



Obrázek 27: Umístění jednotlivých komponent - tříčtvrteční pohled zezadu [autor]





Obrázek 28: Umístění jednotlivých komponent - tříčtvrteční pohled [autor]

Tabulka 9: Rozměry jednotlivých komponent znázorněných v modelu

Prvek v modelu	Rozměry (x, y, z) [mm]		
Karoserie	5650	2300	1850
Kolo	1100	315	1100
Spalovací motor	1087	600	918
Elektromotor- generátor	277	490	490
Trakční motor	300	300	300
Převodovka	538	250	300
Akumulátory	753	303	282

[29] [41] [45] [52] [58]

### 8.3. Hmotnostní analýza

V teoretické části této diplomové práce bylo uvedeno, že hmotnost hybridních vozidel je vzhledem k bateriím obecně problém. Na druhou stranu sériový hybridní pohon umožňuje oproti konvenčnímu pohonu některé komponenty zcela vynechat či využít jejich menší a lehčí alternativy. V této části návrhu, kdy již jsou známy dílčí komponenty včetně jejich hmotností, lze vypočítat výslednou změnu hmotnosti, kterou navržený hybridní pohon přináší. V tabulce č. 9 je uveden přehled a hmotnost jednotlivých komponent u obou druhů pohonů.

Tabulka 10: Přehled hmotností jednotlivých komponent

Původní (konvenční) pohon		Navržený (hybridní) pohon	
Komponent (počet)	Úspora hmotnosti [kg]	Komponent (počet)	Nárůst hmotnosti [kg]
Šesti stupňová převodovka	275	Trakční elektromotory (4x)	230
Diferenciál (2x)	60	Elektromotor-generátor	140
Hřídele	100	Dvoustupňová převodovka (4x)	160
Svod/mezinápravový diferenciál	75	Baterie (2 pack)	150
		Controller, měniče	55
		Kabeláž	45
<b>Celkem</b>	<b>- 510</b>		<b>+ 780</b>

[40] [41] [52] [53] [54] [55] [56] [57]

Mezi výhody sériového hybridního pohonu uvedené v teoretické části této diplomové práce bylo i využití menšího spalovacího motoru, který by pracoval v ideálních otáčkách. Druhá část tohoto předpokladu, tedy provoz v účinnějším režimu, je i nadále v rámci tohoto návrhu uvažován. Avšak možnost využití lehčího a menšího motoru se s nároky na výkon motoru téměř vytratila. Jak již bylo zmíněno při výběru vhodných komponent, existují nejspíše i jiné a lepší alternativy, které by taktéž splňovaly požadované technické parametry, avšak z důvodů absence veřejně dostupných podrobných technických informací nejsou vhodné pro potřeby této diplomové práce. Myšlenka lehčího a menšího spalovacího motoru se opírala zejména o menší potřebu výkonu, který by mohl být v případě jeho zvýšené potřeby dodáván akumulátory. Takové řešení je snad i vhodné pro potřeby osobních automobilů, avšak pro vojenské využití se nejeví jako nejvhodnější. Nestacionární hodnota výsledného výkonu a s tím spojené jízdní parametry by přinesly další proměnou veličinu do již tak složitých strategických operací jakýmž vojenské taktické mise jsou. Je tedy více než zřejmé, že pokud má být vozidlo schopné dosáhnout požadovaných jízdních výkonu kdykoliv, musí být spalovací motor dimenzován nehledě na možnost využití akumulátorů. Jeho maximální výkon by tedy měl být obdobný jako u verze s konvenčním pohonem. Avšak i tak lze uvažovat, že je možné dosáhnout jisté úspory hmotnosti či prostorového uspořádání, z důvodů mírných odlišností v konstrukci motoru, jenž by převážně fungoval v úzkém spektru ideálních otáček jako generátor elektrického proudu.

U dalších komponent uvedených v tabulce č. 9 byla snaha o dohledání produktů na trhu, které mají obdobné technické parametry. Ne vždy to však bylo možné a tak byly některé hodnoty odborně odhadnuty. Další oblastí s vysokým potenciálem k úspoře hmotnosti je pak ochrana podvozku. Vynecháním některých prvků konvenčního pohonu, například převodovky, diferenciálů a hřídelí, by bylo možné vytvořit homogenní tvar ochrany podvozku, který by umožnil menší prostorové i hmotnostní nároky. Pro vyčíslení úspory hmotnosti by však musel být zhotoven nový konstrukční návrh ochrany podvozku včetně samostatných výpočtů. To však není předmětem této diplomové práce, tudíž nebude úspora hmotnosti v tomto směru brána v potaz.

Celkově tedy s navrženým hybridním pohonem vzrostla hmotnost vozidla přibližně o 270 kg a to i přes skutečnost, že do vozidla byly implementovány akumulátory s poměrně nízkou kapacitou. Nárůst hmotnosti je bezpochyby značný, avšak s přihlédnutím na celkovou hmotnost daného vozidla se jedná o přijatelnou hodnotu, která by v případě reálného vývoje mohla být ještě optimalizována a právě z důvodů vypsanych výše.

## 8.4. Dynamika navrženého pohonu

Ve výpočtech uvedených v předchozích kapitolách bylo často počítáno s odhadnutými či neúplnými veličinami. V této části návrhu, kdy už jsou však jednotlivé komponenty vybrány, lze přesněji vypočítat dynamické vlastnosti vozidla. Tato kapitola zároveň volně navazuje na kapitolu 7.1.7 - Volba převodovky a převodových poměrů. V tabulce č. 10 nalezneme teoretické jízdní vlastnosti, které je vozidlo schopné plnit dlouhodobě, tedy bez využití baterií a bez krátkodobě zvýšených parametrů elektromotorů tzv. peaků. Tabulka udává vztahy mezi různým podélným stoupáním vozovky a rychlostí vozidla při daném převodovém stupni. Tabulka vyjadřuje zejména maximální možnou dynamiku vozidla, která je dána nejvyšší rychlostí vozidla při daném stoupání vozovky, nezohledňuje efektivitu v provozu, čili není určena jako podklad ke tvorbě strategie řazení při jízdě.

Tabulka 11: Teoretické dlouhodobé jízdní vlastnosti vozidla

Převodový stupeň	Stoupání [%]	Rychlost [km/h]
1	0	70
	10	55
	20	30
	30	20
	50	15
	70	10
2	0	130
	5	80
	10	50
	15	40

Z tabulky jasně vyplývá, že s přehledem byly splněny požadované jízdní parametry a některé dokonce i překonány. V tabulce č. 11 se pak nachází obdobné vztahy, tentokrát však vztažené na krátkodobé požadavky. Při výpočtu tedy již byl brán v potaz i výkon akumulátorů a současně i peak motorů, který může trvat až 60 s.

Tabulka 12: Teoretické krátkodobé jízdní vlastnosti vozidla

Převodový stupeň	Stoupání [%]	Rychlost [km/h]
1	50	25
	70	20
	90	15
2	0	> 140
	5	> 110
	10	80
	15	50

## 9. Simulace

Úvodem této kapitoly bych rád poděkoval panu inženýru Jiřímu Černému ze společnosti MBtech Bohemia s.r.o., oddělení e-drive, který mi byl při sestrojování modelu i při průběhu simulací velmi nápomocný. Jeho rad a ochoty si vážím.

Poslední kapitola této diplomové práce je zaměřena na ověření efektivity navrženého pohonu. V předchozích kapitolách bylo uvedeno mnoho vlastností, kterých by sériový hybridní pohon u taktického vojenského vozidla teoreticky mohl dosáhnout. Pro připomenutí se jedná například o zlepšené jízdní vlastnosti, jízdu se sníženou hladinou akustického tlaku a s minimální termální stopou, jednodušší údržbu, zvýšenou bezpečnost a ekonomičtější provoz. Pro ověření předpokládaných vlastností vozidla v rané fázi jeho vývoje, což lze přirovnat k této diplomové práci, je vhodné využít počítačových simulací, které se obecně využívají k napodobení reálných procesů. V dnešním světě by za pomoci nejmodernější výpočetní techniky a vhodného softwaru bylo možné nasimulovat snad všechny dílčí aspekty navrženého hybridního pohonu. To by však bylo extrémně náročné a neodpovídající rozsahu diplomové práce. Pro potřeby praktické části této diplomové práce byla provedena simulace navrženého pohonu, zaměřena zejména na ověření efektivity v provozu. Právě efektivita v provozu je oproti ostatním předpokládaným vlastnostem poměrně obtížně odhadnutelná.

Pro vyhodnocení dopadu na spotřebu paliva vlivem navrženého hybridního pohonu se jako vhodné jeví jej přímo porovnat s původním konvenčním pohonem. Z toho důvodu byly sestaveny celkem dva matematické modely vozidel, přičemž každý reprezentoval jeden ze dvou výše uvedených pohonů. Následně byl zvolen porovnávací jízdní cyklus, který vhodně reprezentuje provoz vojenského taktického vozidla.

Simulace byla provedena v softwaru s názvem GT-SUITE od společnosti Gamma Technologies. Jedná se o CAE simulační nástroj, který obsahuje rozsáhlou sadu šablon, jenž umožňuje simulovat nejrůznější fyzikální procesy, mezi které patří především hydromechanika tekutin, termodynamika, mechanika, elektřina či magnetismus. Své uplatnění tento software nachází zejména ve strojírenském a automobilovém průmyslu. [59]

### 9.1. Jízdní cyklus

Obecně lze jízdní cyklus definovat jako rychlost vozidla v závislosti na čase, přičemž konkrétní průběh křivky je dán specifickým prostředím, stylem jízdy a typem vozidla, jenž daný jízdní cyklus reprezentuje. Jízdní cykly se využívají zejména při simulacích jízdy vozidla, kdy je nutné dosáhnout při různých měřeních identických podmínek. To je nezbytné zejména pro stanovení spotřeby paliva či při měření emisí. Z důvodu rozmanitosti dopravní techniky a jejího využití v minulosti již vzniklo, a stále se vyvíjí, velké množství odlišných jízdních cyklů, které mají za úkol reprezentovat odlišná prostředí, ve kterých jsou různá vozidla provozována. Všeobecně

panuje snaha o co možná nejlepší reprezentaci reálného provozu, to je však vzhledem k různorodosti chování řidičů, prostředí a dalším specifickým podmínkám velmi obtížně dosažitelné. Právě na problematiku jízdních cyklů vojenských vozidel a zvolení konkrétního cyklu je tato kapitola zaměřena.

### 9.1.1. Teorie jízdního cyklu

Jak již bylo zmíněno v úvodu předešlé kapitoly, jízdní cyklus vyjadřuje rychlost vozidla v čase. To však není jediné vyjádření, se kterým se lze setkat. Základními matematickými operacemi je možné vyjádřit jízdní cyklus i za pomoci zrychlení či dráhy a času. Není výjimkou, že jízdní cykly simulující provoz vozidla v terénu či při vysokém převýšení jsou uváděny také jako vztah podélného sklonu vozovky a dráhy.

Mezi hlavní parametry popisující jízdu vozidla v závislosti na čase patří:

- Průměrná rychlost
- Počet zastavení (vztažen na jednotku délky)
- Charakteristické zrychlení
- Aerodynamická rychlost
- Kinetická intenzita

Výše uvedené parametry lze definovat i pomocí matematických vzorců, to však není pro potřeby této diplomové práce nezbytné. Je ale vhodné uvést základní popis některých méně známých parametrů. Charakteristické zrychlení například zahrnuje jak samotnou akceleraci vozidla při jízdě po rovině, tak počítá i s dynamikou při podélném stoupání vozidla. Kinetická intenzita pak alespoň, dle dostupné literatury, nejlépe charakterizuje konkrétní jízdní cyklus. Je definována jako podíl charakteristické akcelerace a aerodynamické rychlosti. Zohledňuje tedy poměrně velké množství proměnných. A to jak veličin vztažených k jízdě samotné jako je rychlost a zrychlení, tak i veličin které jsou definovány okolním prostředím, ve kterém je vozidlo provozováno. Kinetická intenzita se dá považovat za charakteristickou veličinu jízdního cyklu, díky níž je možné jednotlivé jízdní cykly porovnat. Společně ve vztahu s průměrnou rychlostí pak mají nejvyšší vypovídající hodnotu. [31] [60]

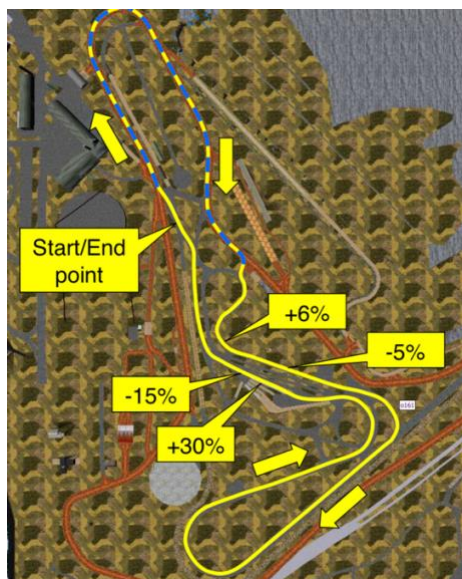
### 9.1.2. Testování vojenských vozidel

U vojenských vozidel je oproti osobním vozidlům situace s jízdními cykly výrazně odlišná. Neexistuje totiž žádný standardizovaný veřejně dostupný jízdní cyklus, který by byl všeobecně používán pro potřeby vojenské techniky. To může být důsledkem toho, že spotřeba paliva a problematika emisí není u vojenských vozidel prioritou. Pravdou však zůstává, že v posledních deseti letech značně vzrostl zájem o hybridní technologie i v této oblasti a je na ni kladen mnohem větší důraz. Svoji podstatnou roli hraje i diverzita vojenských vozidel,

respektive různorodost nároků na jejich provoz a využití. U vojenských vozidel z hlediska jízdních parametrů nejčastěji se posuzuje maximální rychlost, nejvyšší možné stoupání a dojezd vozidla. Na tyto parametry jsou tak vozidla testována.

Společnost TARDEC specializující se na vývoj vozidel pro armádu Spojených států, pak dle dostupných informací, využívá pro ověření jízdních vlastností a schopností vozidel zejména následující čtyři tratě:

- Perryman Paved
- Harford Loop
- Munson Standard Fuel Course
- Churchville B Course



Obrázek 29: Znárodnění tratě - Munson Standard Fuel Course [62]

Jedná se o uzavřené tratě, které se liší svým profilem, délkou, povrchem a v neposlední řadě i dalšími požadovanými podmínkami vztahované na jízdu samotnou, jako je například počet zastavení a jejich délka, nejvyšší podélný a příčný sklon vozovky či požadovaná rychlost v jednotlivých úsecích. Znárodnění tratě s názvem Munson Standard Fuel Course je na obrázku č. 29. Podobné testovací okruhy však nejsou výsadou pouze americké armády, podobný koncept mají i jiná vývojová centra. Nelze tak hovořit přímo o jízdních cyklech ale spíše o testovacích tratích, které mají ověřit konkrétní požadované vlastnosti vozidel zejména pak průchodnost terénem. Příklad části testovací trati je uveden na obrázku č. 30. Unifikovaný nástroj na měření spotřeby paliva případně pak i emisí však chybí.



Obrázek 30: Příklad testování jízdních vlastností vojenských vozidel [63]

### 9.1.3. Vhodné jízdní cykly

Pro ověření efektivity provozu vojenského taktického vozidla je nezbytné využít takový jízdní cyklus, který bude co nejlépe reflektovat typický provoz daného vozidla. Je však otázka, zda při tak rozmanitém využití jakým vojenská taktická vozidla jsou, vůbec existuje nějaký typický provoz vozidla. V této diplomové práci tak budou uvažovány celkem tři význačné scénáře odpovídající použití vojenského taktického vozidla. Pro dané jízdní režimy se jako vhodné jeví přiřazení již existujících jízdních cyklů, které budou jednotlivé režimy reprezentovat. Vzhledem k vysoké hmotnosti vozidla, do kterého byl navržený pohon implementován, není užití jízdních cyklů určených pro osobní vozidla vhodné. Naopak lepší variantou mohou být jízdní cykly určené pro nákladní vozidla případně pak i pro autobusy. Níže jsou uvedeny a popsány zvolené jízdní cykly a jejich teoretická analogie s vojenským provozem.

Pro simulaci provozu vojenského taktického vozidla byla zvolena část jízdního cyklu HHDDT (Heavy Heavy-Duty Diesel Truck) jenž vznikl ve spolupráci *California Air Resources Board* a *West Virginia University*. Cyklus byl vyvinut na základě získaných provozních parametrů motoru při zkušební jízdě na válcovém dynamometru. Jako druhý vhodný cyklus byl zvolen New York Bus Cycle určený pro simulaci městského prostředí.

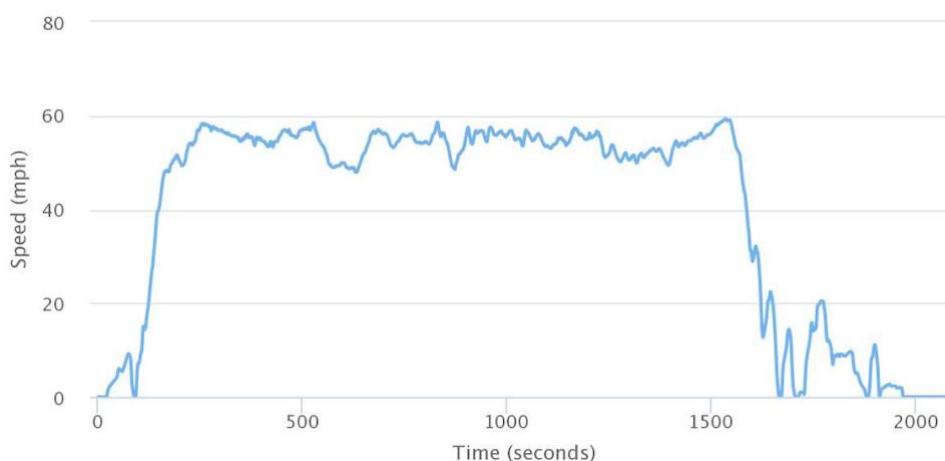
Celý jízdní cyklus HHDDT je sestaven ze čtyř částí: *idle*, *creep*, *transient* a *cruise*. První a druhá část cyklu (*idle* a *creep*) simulují převážně stání a akceleraci, což by šlo nejspíše porovnat k pozvolnému vyjetí z garáží či obdobného stanoviště. Rychlost zde nepřesahuje 15 km/h a celý tento mikrocyklus trvá pouze 263 s. Pro simulaci provozu vojenského vozidla není tento mikrocyklus podstatný.



### HHDDT – Cruise segment

Tento mikrocyklus má za cíl simulovat zejména jízdu nákladních vozidel po dálnici. V části cyklu, jenž představuje samotnou jízdu konstantní rychlostí, osciluje rychlost kolem 85 km/h, průměrně však rychlost po započtení rozjezdu i zpomalení vozidla dosahuje 65 km/h. Tento mikrocyklus trvá celkem 2083 s (téměř 35 min), přičemž vozidlo ujede 37 km a během cyklu celkem 6 krát zastaví. Hodnota kinetické intenzity tohoto cyklu je  $0,12 \text{ mil}^{-1}$ . Mikrocyklus je vyobrazen na obrázku č. 31.

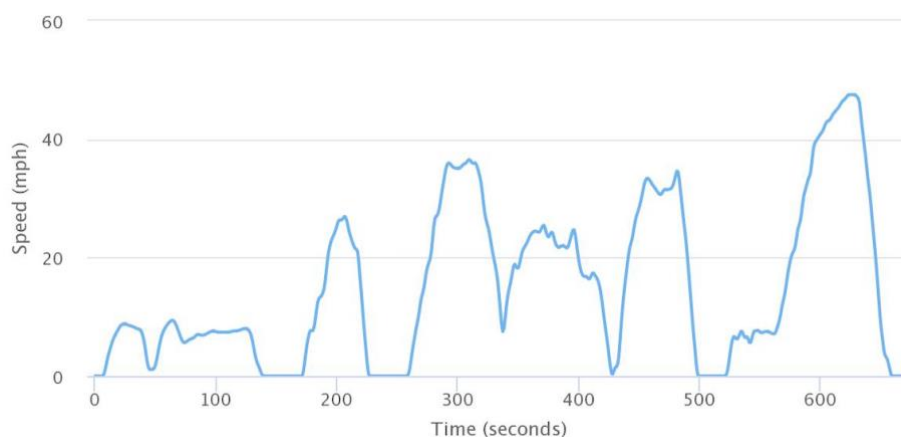
V případě simulace provozu vojenského taktického vozidla může tento cyklus reprezentovat dálniční přesuny, jízdu v konvoji vozidel vysokou rychlostí a podobné případy. Průměrná i maximální rychlost v jízdním cyklus je sice nižší než maximální konstrukční rychlost vozidla s navrženým hybridním pohonem, avšak je nutné si uvědomit, že jízda maximální rychlostí bude pravděpodobně využita zřídka.



Obrázek 31: Jízdní cyklus HHDDT - Cruise segment [66]

### HHDD – Transient Segment

Tato část cyklu simuluje zejména příměstskou jízdu. Mikrocyklus trvá celkem 668 s (více jak 11 min) a vozidlo v něm ujede více jak 4,5 km. Průměrná jízdní rychlost je téměř 30 km/h, nicméně je nutné zdůraznit, že vozidlo se celkem 4 krát zastaví a poměrně dlouhou dobu stojí. Hodnota kinetické intenzity je  $1,38 \text{ mil}^{-1}$ . Tento mikrocyklus, vyobrazený na obrázku č. 32 může v případě vojenského využití představovat jízdu městem či lehkým terénem.

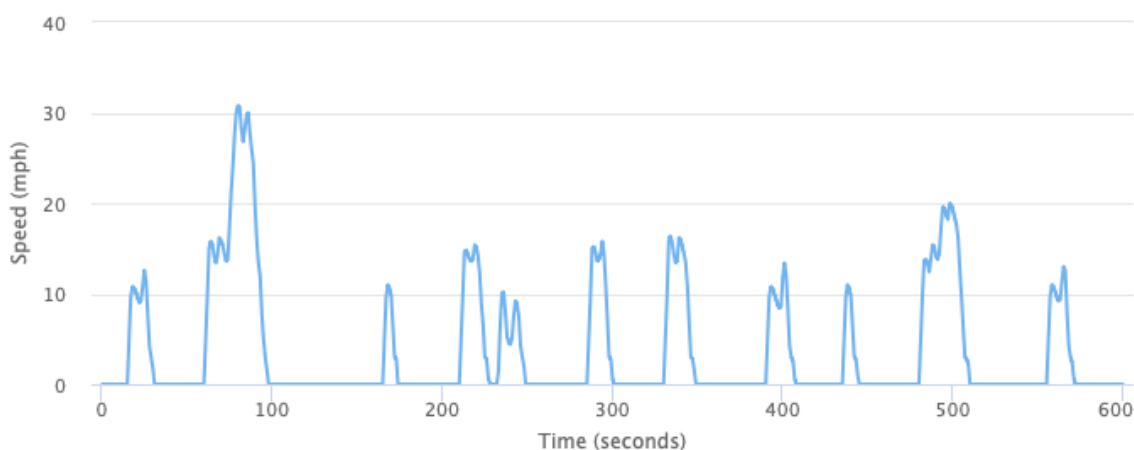


Obrázek 32: Jízdní cyklus HHDDT – Transient segment [66]

### New York Bus Cycle

Tento cyklus, určený pro těžká nákladní vozidla, byl vyvinut agenturou EPA (*Environmental Protection Agency*, přičemž měl za cíl simulovat ty nejtěžší autobusové městské podmínky, které roku 1980 panovaly v městském obvodu Manhattan. Tam pro něj zároveň byly nashromážděny podklady. Cyklus simuluje prudké zrychlení a následné zpomalení, mezi kterými vozidlo poměrně dlouhou dobu nehybně stojí na místě.

Cyklus trvá celkem 600 s (10 min), přičemž vozidlo ujede necelý 1 km. S kinetickou intenzitou 11,07 mil<sup>-1</sup> může u vojenského vozidla simulovat jízdu těžkým terénem. Jízdní cyklus New Yorku Bus Cycle je znázorněn na obrázku č. 33.



Obrázek 33: Jízdní cyklus New York Bus Cycle [66]

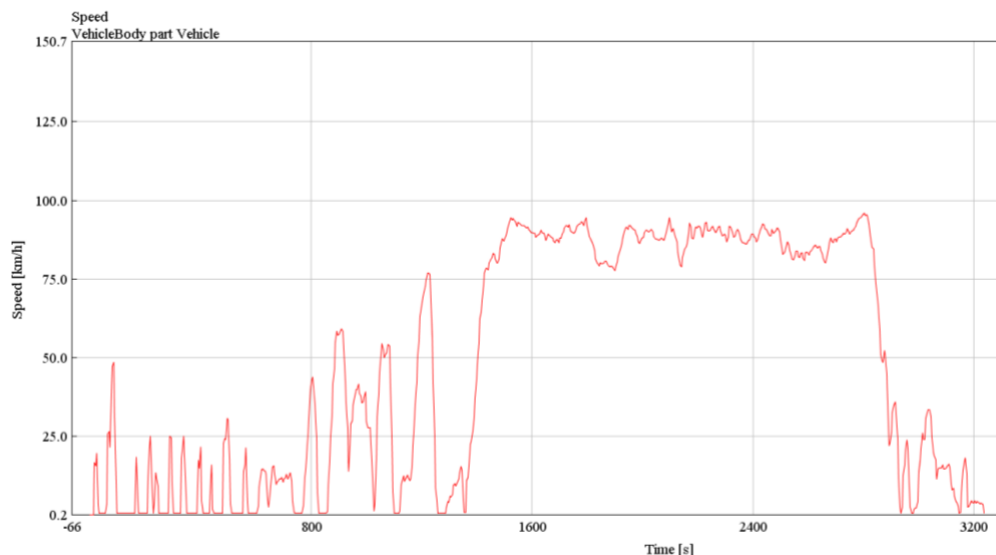
### 9.1.4. Sestavení jízdního cyklu

Jelikož ani jeden z výše uvedených jízdních cyklů nedokáže samostatně plně reflektovat provoz vojenského vozidla, byl pro porovnání vytvořen nový jízdní cyklus. Porovnávací cyklus vznikl spojením jízdních cyklů uvedených v předešlé kapitole.

Dalším důvodem pro vytvoření nového jízdního cyklu byla jeho vypovídající hodnota. Obecně je problematické měřit spotřebu paliva u hybridních vozidel. Jednak je nutné zvážit, zda mají hybridní vozidla podstoupit měřicí cyklus s plně nabitými akumulátory či nikoliv. Druhým problémem je pak délka jízdního cyklu. Některá hybridní vozidla s vyšší kapacitou akumulátorů zvládnou ujet podstatnou část měřicího cyklu pouze na elektrickou energii čerpanou z akumulátorů. Tímto způsobem je naměřená spotřeba paliva zobrazena a v reálných podmínkách, zejména při delších cestách, takřka nedosažitelná.

Primárně z těchto dvou důvodů byl vytvořen nový porovnávací jízdní cyklus pro vojenská vozidla vyobrazený na obrázku č. 34. Je však zřejmé, že je založen pouze na předpokládaném provozu vojenských vozidel, přičemž ten reálný se může i výrazně lišit.

Celý vytvořený jízdní cyklus má délku 43 km, trvá 3236 s (54 min), průměrná rychlost dosahuje 48 km/h a maximální rychlost je 96 km/h.



Obrázek 34: Vytvořený porovnávací cyklus pro vojenské taktické vozidlo [autor]

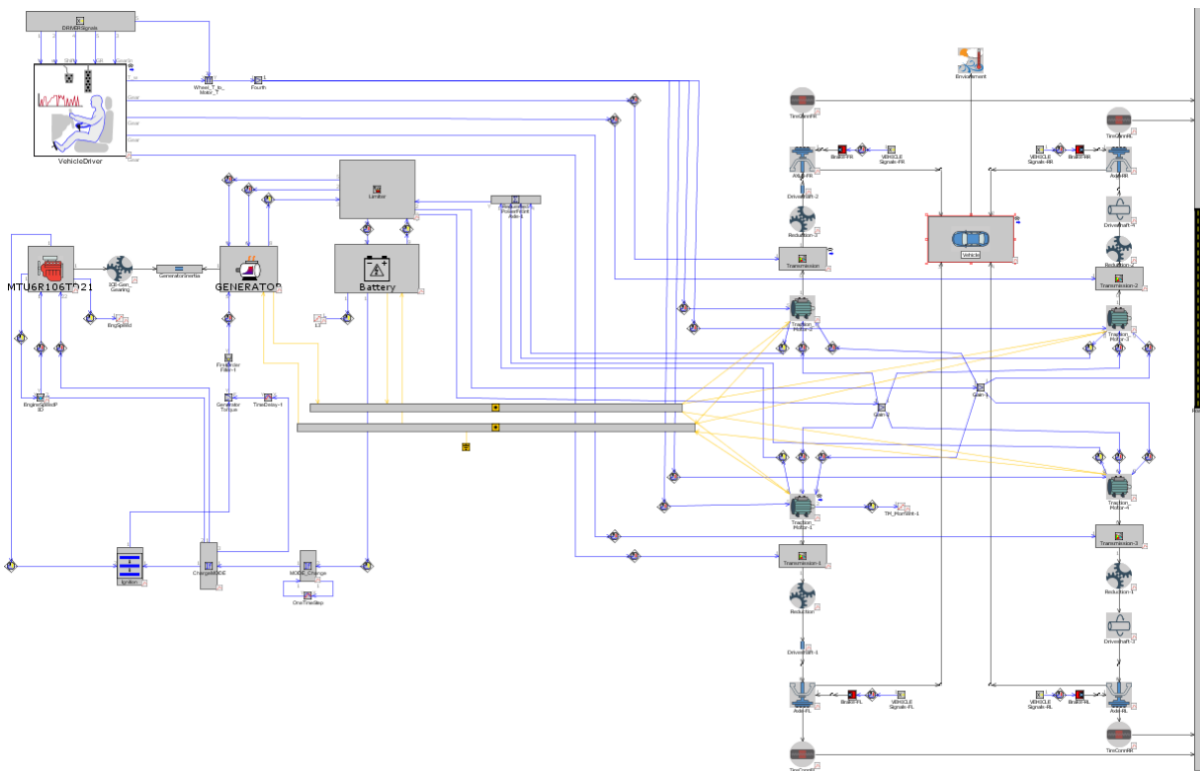
## 9.2. Matematický model vozidla

Pro zjištění efektivity navrženého hybridního pohonu, byly v softwaru GT-SUITE sestaveny celkem dva matematické modely, přičemž jeden model reprezentoval navržený sériový hybridní pohon a druhý model pak stávající konvenční pohon.

Oba modely vozidel pak byly simulovány ve stejném jízdním cyklu, jehož tvorbě a popisu je věnována předešlá kapitola. Simulace modelu vozidla s navrženým hybridním pohonem byla v rámci optimalizace provedena vícekrát za rozdílných počátečních podmínek a zároveň i v různých jízdních cyklech.

## 9.2.1. Hybridní model vozidla

Sestavený matematický model taktického vozidla s navrženým sériovým hybridním pohonem je uveden na obrázku č. 35. Model, jak je patrné, se skládá z jednotlivých prvků, které jsou vybrány z knihovny a které jsou mezi sebou propojeny vazbami. Prakticky všechny prvky lze blíže specifikovat a nastavit. V levé horní části modelu se nachází prvek řidiče, jenž přímo ovládá trakční motory i převodovky a zároveň dostává zpětně informace o jízdě vozidla. Pod ním se nachází spalovací motor. Údaje potřebné k nastavení tohoto bloku byly vypočteny z částečné vnější charakteristiky daného motoru. Data potřebná k určení spotřeby paliva použitého motoru však nebyla k dispozici, tudíž byly použity údaje z obdobného motoru. Jelikož cílem této simulace je zejména porovnání dvou vozidel s odlišným pohonným ústrojím, u kterých je však spalovací motor totožný, není závažnější problém tento postup aplikovat. Je však nutné brát v potaz fakt, že výsledný rozdíl v naměřené spotřebě paliva nelze uvést jako absolutní údaj, ale pro správnou interpretaci výsledků je nezbytné jej přepočítat na hodnotu relativní.

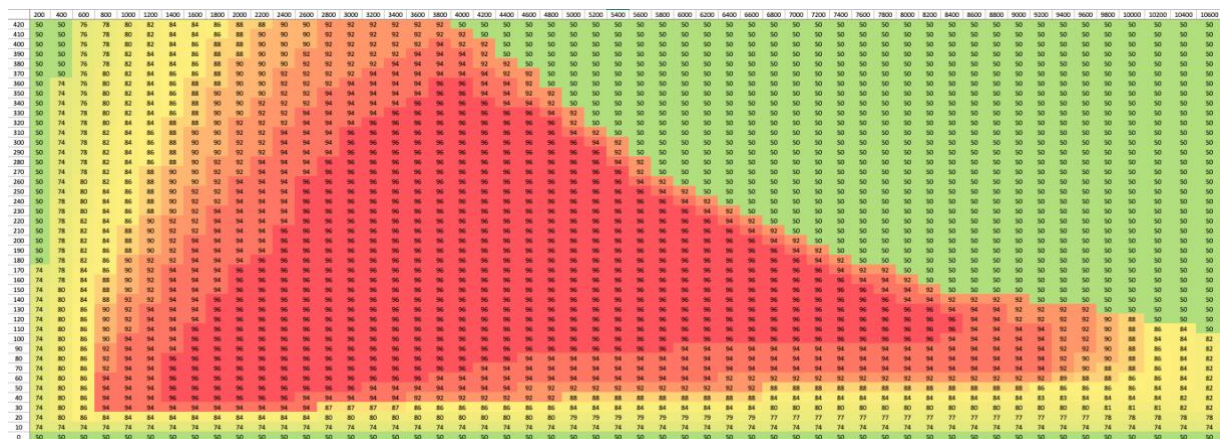


Obrázek 35: Matematický model vozidla s navrženým sériovým hybridním pohonem [autor]

Pro nastavení elektromotorů v modelu byly nezbytné zejména jejich momentové charakteristiky a mapy účinností. Příklad vytvořené částečné mapy účinnosti elektromotoru je vyobrazen na obrázku č. 36. Matice vytvořená v softwaru Microsoft Excel vizuálně zobrazuje rozdílné oblasti účinnosti při různých otáčkách elektromotoru, vyznačených na vodorovné ose,

a momentu sil, vyznačeném na ose svislé. Červená barva vyznačuje oblast s nejvyšší účinností motoru naopak žlutá pak s účinností nízkou. Zelená barva zobrazuje prostor, který pro chod motoru definován. Pro správnou funkci simulačního softwaru zde však nebyla zadána nulová hodnota.

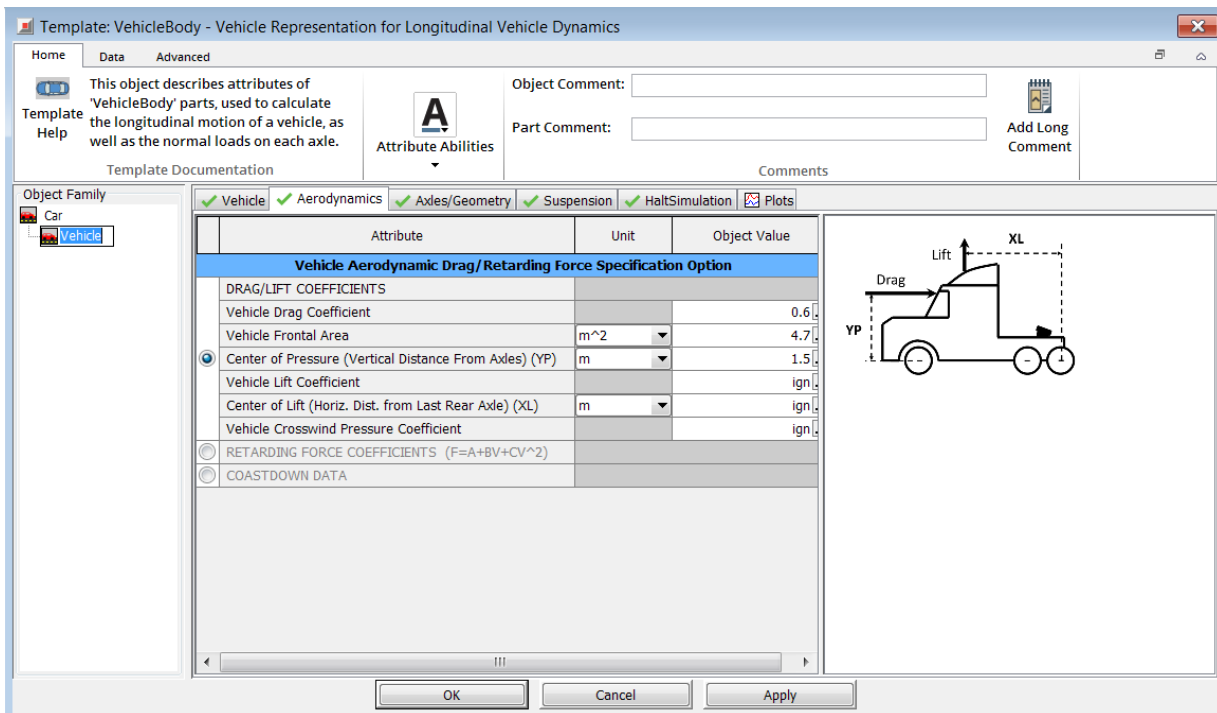
V rámci co nejvyšší efektivity hybridního sériového vozidla je důležité vhodně nastavit logiku dobíjení akumulátorů a obecně pak spolupráci mezi nimi, generátorem elektrické energie a spalovacím motorem. V případě tohoto modelu byla zvolena následující strategie. Pro chod spalovacího motoru byly nastaveny celkem tři pracovní body. V závislosti na aktuálním stavu nabití akumulátorů, pak spalovací motor pracoval v jednom z těchto tří bodů, či v případě vysokého nabití akumulátorů nebyl v provozu vůbec. Jedná se o funkční řešení, které by však mohlo být za jistých okolností sofistikovanější a tím by celý pohon mohl pravděpodobně pracovat i efektivněji.



Obrázek 36: Příklad částečné mapy účinnosti elektromotoru [autor]

Na pravé straně vyobrazeného modelu, se nachází blok znázorňující vozidlo samotné. Ten zahrnuje především nastavení vnějších parametrů vozidla, jako je například váha a aerodynamika vozidla. Nastavení hodnot tohoto prvku vychází zejména z tabulky č. 4, příklad nastavení aerodynamiky vozidla je znázorněn na obrázku č. 37.

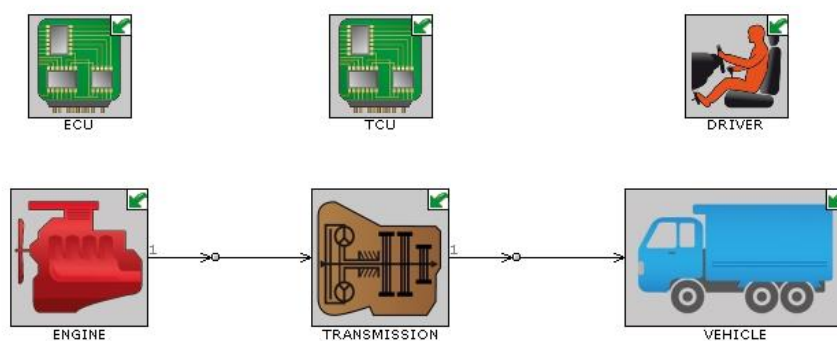
Další významné prvky vztahující se k pohonu vozidla, zejména nastavené hodnoty převodovek a kolových redukcích vychází z tabulky č. 6, která uvádí zvolené hodnoty jednotlivých převodových stupňů.



Obrázek 37: Příklad nastavení aerodynamiky vozidla [autor]

### 9.2.2. Porovnávací model s konvenčním pohonem

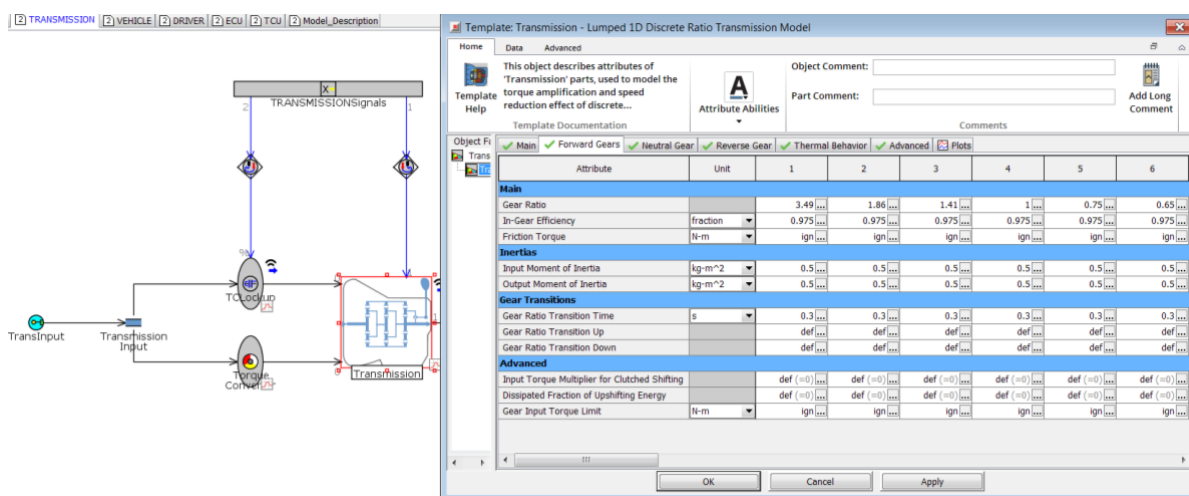
Základem pro tvorbu porovnávacího modelu s konvenčním pohonem byla již existující předloha vozidla z knihovny softwaru GT-SUITE. Základní rozložení této předlohy, respektive celá sestava modelu je uvedena na obrázku č. 38. Celý model byl samozřejmě přenastaven tak, aby odpovídal parametrům vozidla.



Obrázek 38: Matematický model taktického vozidla s konvenčním pohonem – celá sestava [autor]

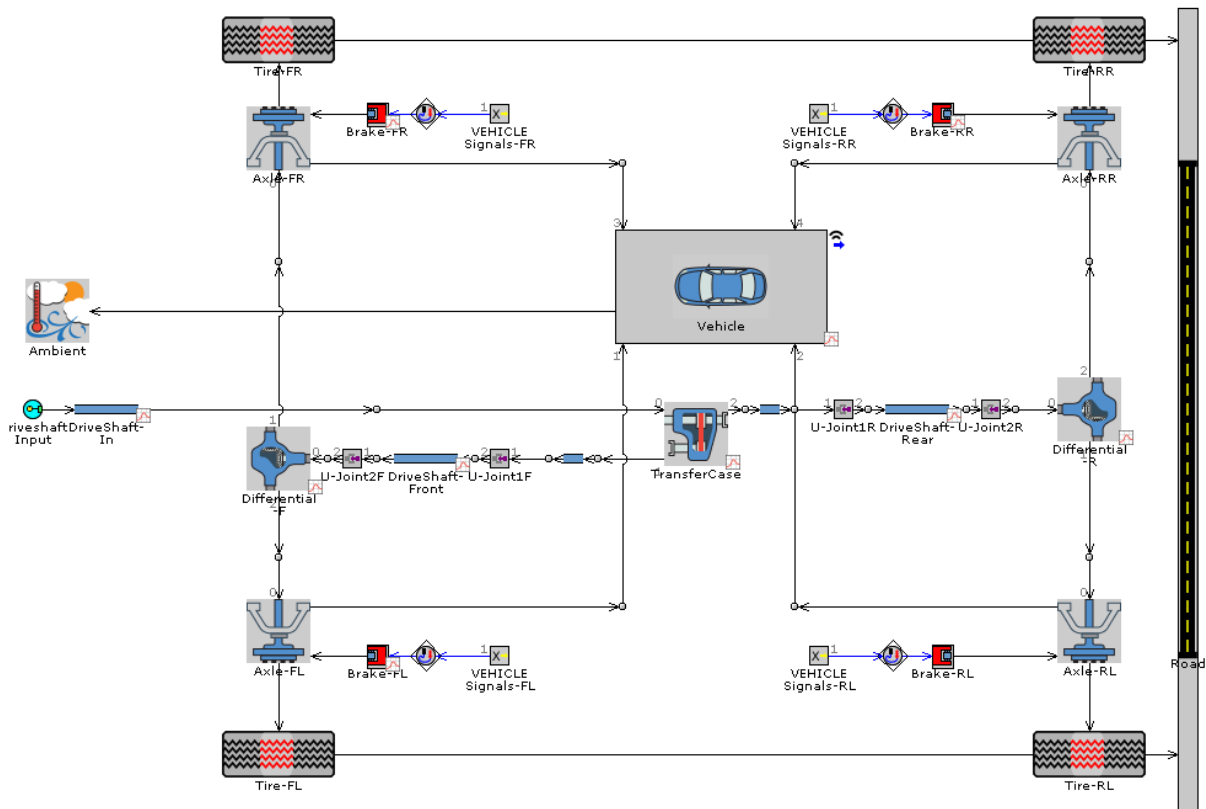
Celá sestava se skládá z celkem pěti bloků. Bloky vyobrazené v horním řádku slouží spíše k logice řízení a k ovládání jednotlivých mechanických prvků. ECU (Engine Control Unit) a TCU (Transmission Control Unit) ovládají motor, respektive převodovku. Blok TCU například umožňuje nastavit momenty přeřazení jednotlivých stupňů. Logika řazení jednotlivých stupňů byla vytvořena ze zjednodušeného pilového diagramu. Ten byl vytvořen na základě znalosti jednotlivých převodových poměrů a vnější charakteristiky motoru.

Prvek motoru byl nastaven zcela totožně jako u hybridní verze. Nastavení převodovky, zejména jednotlivých převodových poměrů a jejich účinností, je znázorněno na obrázku č. 39.



Obrázek 39: Příklad nastavení vícešupňové převodovky [autor]

Posledním uvedeným prvkem je podsestava, jenž zahrnuje zejména zbytek pohonu a karoserii vozidla. Model podsestavy je znázorněn na obrázku č. 40. Samotný blok vozidla, byl až na odlišnou hmotnost nastaven totožně s hybridním modelem. Přenos sil z převodovky je řešen hřídelemi, mezinápravovými a nápravovými diferenciály. Příklad nastavení diferenciálu je uveden na obrázku č. 41. Jak je vidět z přiložených obrázků, nastavení jednotlivých prvků je poměrně intuitivní. Některé hodnoty, mezi které patří například momenty setrvačnosti rotujících částí, musely být odborně odhadnuty. Avšak podstatnou část potřebných hodnot se podařilo dohledat.



Obrázek 40: Matematický model taktického vozidla s konvenčním pohonem – podsestava podvozku [autor]

Template: Differential - Conventional Vehicle Open Differential

Home Data Advanced

This model represents a locked differential where the speeds of both half axles connected to it rotate at the same speed and aren't allowed to...

Attribute Abilities

Object Comment:

Part Comment:

Add Long Comment

Comments

Object Family

- Differential
  - Differential-F
  - Differential-R

Attribute	Unit	Object Value
Input (Driveline Side) Inertia	kg·m <sup>2</sup>	0.0
Output (Axle Side) Inertia	kg·m <sup>2</sup>	0.0
Final Drive Ratio		4
Efficiency	fraction	def (

Click to Rename  
Ctrl+Click to Multi-select

50% of Output Inertia

25% of Output Inertia

Input Inertia

OK Cancel Apply

Obrázek 41: Příklad nastavení diferenciálu [autor]



### 9.3. Výsledky simulace

Po sestavení matematických modelů obou vozidel, jejich následné optimalizaci a vytvoření vhodného porovnávacího jízdního cyklu bylo možné provést závěrečnou simulaci, která je podkladem pro zhodnocení efektivity navrženého hybridního pohonu. Verze s hybridním pohonem byla simulována vícekrát a to při různých počátečních podmínkách, které zahrnovaly zejména odlišnou kapacitu akumulátorů či stav jejich nabití. Primární simulace zahrnovala plně nabité akumulátory o kapacitě necelých 23 kWh. Jak již bylo uvedeno výše, úsporu ve spotřebě paliva je vzhledem k použitým údajům měrné spotřeby paliva v nastavení parametrů motoru vhodné přepočítat na relativní hodnotu. Avšak ani získané absolutní hodnoty nejsou vzhledem k použitým údajům v nastavení motoru vozidla zcela nereálná.

Jak je uvedeno v tabulce č. 13, která zachycuje autentické vyobrazení výsledků u navrženého hybridního pohonu, průměrná spotřeba paliva dosáhla hodnoty 16,5 l/100km.

V tabulce č. 14 je následně obdobně zachycena výsledná spotřeba paliva původního, tedy konvenčního pohonu, která činí 21,4 l/100km.

Tabulka 13: Výsledná průměrná spotřeba paliva – navržený hybridní pohon

Vehicle Fuel Economy- VehicleBody part : Vehicle

Average Fuel Consumption [g/km]	138.7
Average Fuel Consumption [g/mi]	223.2
Average Gas Mileage [L/100km]	16.5
Average Gas Mileage [km/L]	6.1
Average Gas Mileage [mpg]	14.2

Tabulka 14: Výsledná průměrná spotřeba paliva – původní konvenční pohon

Vehicle Fuel Economy- VehicleBody part : Vehicle

Average Fuel Consumption [g/km]	180.0
Average Fuel Consumption [g/mi]	289.7
Average Gas Mileage [L/100km]	21.4
Average Gas Mileage [km/L]	4.7
Average Gas Mileage [mpg]	11.0

Z výsledků tedy plyne, že navržením sériového hybridního pohonu při daném jízdním cyklu za uvedených počátečních podmínek došlo k 22,9 % úspoře paliva.

Úspora paliva se však, jak vyplývá z následujících řádků, nejeví jako ideální a jednoznačný ukazatel efektivity pohonu. Samotná úspora paliva totiž nezohledňuje stav akumulátorů na začátku ani na konci jízdního cyklu. Simulací hybridního pohonu s na počátku téměř vybitými akumulátory stejné kapacity jako při první simulaci, bylo dosaženo dokonce mírného zhoršení ve srovnání s původním pohonem, spotřeba paliva v tomto případě činila 22,1 l/100km. Avšak je nutné dodat, že akumulátory na konci jízdního cyklu byly naopak téměř plně nabité.

U poslední simulace hybridního pohonu, byly použity plně nabitě akumulátory dvojnásobné kapacity oproti prvotní simulaci. Vozidlo tedy zvládlo ujet větší část cyklu čistě na energii uloženou v akumulátorech. Výsledná průměrná spotřeba paliva, vyobrazená v tabulce č.16, činila dokonce velmi příznivých 14,4 l/100km. Výsledná hodnota SOC (State Of Charge), která udává nabití akumulátorů, byla u první a poslední simulace téměř shodná a dosahovala kolem 70 %.

Z výsledků však jednoznačně plyne, že navržený hybridní pohon pracuje efektivněji.

## 10. Závěr

Cílem této diplomové práce byl návrh sériového hybridního pohonu pro vojenské taktické vozidlo, který měl splňovat předem stanovené jízdní požadavky a který by zároveň ideálně pracoval efektivněji v porovnání s konvenčním pohonem.

V první části této diplomové práce jsou uvedeny rozdílné možnosti pohonů vozidel. U jednotlivých druhů jsou uvedeny jejich nejruznější varianty, dále je zde rozebrán princip, na kterém fungují a popis základních komponent nezbytných pro daný druh pohonu. Následoval výčet jejich vlastností, výhod a nevýhod. Podstatná část byla věnována podrobnému popisu hybridního pohonného ústrojí.

Teoretická část pokračovala stručným úvodem do problematiky vojenských vozidel. Z této kapitoly vyplynulo, že na vojenská vozidla jsou kladeny nejruznější nároky, vztahující se zejména k požadovaným účelům daného typu vozidla. Konkrétně u taktických vozidel, do kterého měl být hybridní pohon implementován, se kladou zvýšené nároky na jízdní schopnosti v terénu, dále na dynamiku vozidla a vysokou bezpečnost.

Po seznámení se s vlastnostmi jednotlivých typů pohonu a stanovení požadavků a parametrů vojenského taktického vozidla byl zvolen sériový hybridní pohon jako alternativa, která má potenciál posunout vlastnosti taktických vozidel co nejdále.

Diplomová práce pokračovala praktickou částí, v níž bylo zprvu nutné vhodně dimenzovat a následně vybrat vhodné komponenty sériového hybridního pohonu. Při výběru se postupovalo v hnacím traktu směrem od kol vozidla až k samotnému zdroji elektrické energie. Základním pilířem pro dimenzování jednotlivých komponent byl výpočet jízdních odporů při požadovaných jízdních parametrech vozidla. Tyto výpočty byly provedeny v softwaru Microsoft Excel. Jednotlivé komponenty byly dimenzovány na nejhorší možný scénář, který může nastat, tím je v kontextu hybridních vozidel situace, kdy jsou akumulátory vybité a nastane požadavek na dlouhodobý a vysoký jízdní výkon. Tím je zaručeno, že vozidlo je schopné dosáhnout jízdních požadavků kdykoliv. Zároveň při nabitých akumulátorech či v případě krátkodobých jízdních výkonů je možné požadované jízdní vlastnosti i výrazně překonat. Tato praktická část diplomové práce byla zejména vhodná pro porozumění ale i zpochybnění některých předpokládaných vlastností sériového hybridního pohonu. Jmenovat lze konkrétně ztráty vzniklé při několikanásobné přeměně energie, využití dvoustupňové převodovky či například zachování totožného spalovacího motoru. Některá rozhodnutí v návrhu se tedy rozcházejí s teoretickými vlastnostmi sériového hybridního pohonu, nicméně to je dáno především vysokými nároky na jízdní vlastnosti vozidla. Výsledná dynamika vozidla je v této třídě vozidel bezkonkurenční. Nižší požadavky by nejspíše umožňovali zvýšení efektivity, snížení finanční náročnosti finálního produktu a jednodušší konstrukční řešení. V návrhu byly použity akumulátory s kapacitou necelých 23 kWh. Ideální kapacita se však odvíjí zejména od

požadované vzdálenosti, které je vozidlo schopné ujet čistě na elektřinu bez chodu spalovacího motoru. Pro ověření zástavbových poměrů, byl v softwaru NX vytvořen zjednodušený model vojenského taktického vozidla, do kterého byly jednotlivé komponenty umístěny. Zvolené komponenty nejsou, v poměru k samotnému vozidlu nikterak rozměrné, tudíž umístění většiny z nich by nemělo být problematické. Výjimku představuje umístění elektromotorů a převodovek, jejichž umístění nelze jednoznačně určit. Nabízí se možnost umístění elektromotorů a části převodovky s vstupní hřídelí mimo nápravu vozidla, přičemž část převodovky se výstupní hřídelí by se nacházela v prostoru stávajícího nápravového diferenciálu. Konkrétní řešení se však odvíjí od použitých náprav a zvolené převodovky.

V poslední části této diplomové práce byly v softwaru GT- SUITE vytvořeny dva matematické modely vozidel. První z nich reprezentoval navržený hybridní pohon a druhý pak pohon původní konvenční. Následně byl vytvořen ze tří odlišných jízdních cyklů, určených pro nákladní vozidla a autobusy, porovnávací jízdní cyklus pro vojenská taktická vozidla. Tvorba jízdního cyklu a většiny podkladů pro nastavení modelu probíhala v programu Microsoft Excel. Z výsledků simulace vyplývá, že navržený hybridní pohon dokáže pracovat efektivněji oproti konvenční variantě. Pro úplnou kvantifikaci zlepšení efektivity však zdá se, nestačí samotná hodnota průměrné spotřeby paliva. Ta totiž nikterak nezahrnuje počáteční ani terminální stav nabití akumulátorů. Důkladná analýza výsledků, tedy hodnot spotřebovaného paliva i dobití akumulátorů naznačuje, že navržený hybridní pohon je schopen pracovat o 15 % efektivněji oproti původní konvenční verzi.

Dosažené výsledky v podstatě odpovídají i výsledkům z již realizovaných měření, uvedených v kapitole 6.1.3. Výběr ideálního pohonu. I přes dosažení požadovaných výsledků se v průběhu této diplomové práce vyskytla celá řada dílčích problémů a otázek. Jelikož tato práce může sloužit i jako metodický postup při vývoji konkrétního pohonného ústrojí pro specifická vozidla, bylo by vhodné tyto otázky vyřešit a získat tím ucelený postup při obdobném návrhu. Prostor ke zlepšení se bezpochyby nachází v konkretizaci jízdních požadavků a parametrů vozidla. Mimo požadavků na extrémní jízdní výkony, ke kterým nebude za provozu docházet tak často, je vhodné definovat i běžný způsob užívání vozidla, dle kterého by bylo možné pohon optimalizovat. Na základě těchto podkladů by mohl být vytvořen jednotný jízdní cyklus, na základě kterého by bylo mimo jiné možné určit spotřebu paliva.

Krom efektivity navrženého pohonu by bylo vhodné simulovat či jinak otestovat i další očekávané vlastnosti. Mezi ně patří zejména jízdní vlastnosti v těžkém terénu, zvýšení bezpečnosti, snížení hluku a termální stopy či opotřebení jednotlivých komponent. V neposlední řadě je nutné zvážit otázku finanční náročnosti tohoto vývoje. Dále by bylo vhodné sjednotit metodiku měření efektivity hybridních vozidel. Jako alternativa ke spotřebě paliva se jeví měření energetické bilance. Taková metodika by zohledňovala množství spotřebovaného paliva a stav akumulátorů na začátku i na konci jízdy. Bylo by tedy možné

přesněji definovat jaký pohon pracuje efektivněji. Výsledky této práce dokazují, že jednotlivé formy pohonů mají své specifické vlastnosti, které mohou být využity v nejrůznějších odvětvích dopravní techniky.

Konkrétně u vojenských taktických vozidel dává sériový hybridní pohon smysl a nabízí vlastnosti, které konvenční pohon jen stěží překoná. Spolu s vyřešením problematických bodů uvedených výše je vhodné ve vývoji nadále pokračovat.

## 11. Použité zdroje

### 11.1. Literatura

- [1] Vlček, F.: Dynamika motorových vozidel 2. vyd. Brno. 2003. 432 s. ISBN 80-239-00242.
- [2] First, J.: Energetická analýza pozemní dopravy
- [3] Vlček, F.: Alternativní pohony motorových vozidel. 1. vyd. Brno. 2004. 234 s. ISBN 80-239-1602-5
- [36] Morávek, Martin. Vliv zklidňovacích prvků na spotřebu paliva a emise. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta dopravní.

### 11.2. Internetové zdroje

- [4] HORČÍK, Jan. Historie hybridních aut, 1. díl. hybrid.cz [online]. Praha: Chamanne, 2009 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/clanky/historie-hybridnich-aut-1-dil>
- [5] KUNZ, Daniel. Autosympo 2013: Rozmach hybridních systémů v dopravě a motorsportu. hybrid.cz [online]. Praha: Chamanne, 2009 [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/autosympo-2013-rozmach-hybridnich-systemu-v-doprave-motosportu>
- [6] HARPER, Douglas. Word Origin and History for hybrid. Online Etymology Dictionary [online]. 0010n. 1. [cit. 2018-07-08]. Dostupné z: <http://www.dictionary.com/browse/hybrid>
- [7] GANZ, Andrew. Toyota: "Everything will be hybrid". Left lane [online]. Jumpstart Automotive Group, 2007 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://www.leftlanenews.com/toyota-everything-will-be-hybrid.html>
- [8] PROKOPEC, Petr. Šéf automobilky popsal, proč jsou hybridy nesmysl. Jako jeden z mála žádný nepostaví. Autoforum [online]. Praha: MotorCom, 2018, 30.05.2018 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/zajimavosti/sef-automobilky-popsal-proc-jsou-hybridy-nesmysl-jako-jeden-z-mala-nic-takoveho-nepostavi/>
- [9] MILER, Petr. Šéf Maserati: elektromobily jsou nesmysl, hybridy se vyrábí jen pro regulace. Autoforum [online]. Praha: MotorCom, 2013, 21.04.2018 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/zajimavosti/sef-maserati-elektromobily-jsou-nesmysl-hybridy-se-vyrabi-jen-pro-regulace/>

- [10] FLOREA, Ciprian. Maserati is going hybrid in 2019. TopSpeed [online]. Top Speed, 2017, 02.08.2017 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://www.topspeed.com/cars/car-news/maserati-is-going-hybrid-in-2019-ar177176.html>
- [11] LEE, Kristen. Why Pagani Doesn't Do Hybrids. Road and Track [online]. Ann Arbor: Road & Track Magazine, 2017, 13.11.2015 [cit. 2018-07-12]. Dostupné z: <https://www.roadandtrack.com/car-culture/news/a27341/why-pagani-doesnt-do-hybrids/>
- [12] BUREŠ, David. Mazda do výroby vrátí Wankel. Auto [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, 2018, 04.03.2018 [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/mazda-vyroby-vrati-wankel-119790>
- [13] BEDNÁŘ, Marek. Jak fungují motory: klíčové součásti a jejich funkce. Autoforum [online]. Praha: MotorCom, 2018, 03.05.2018 [cit. 2018-07-14]. Dostupné z: <http://www.autoforum.cz/technika/jak-funguji-motory-klicove-soucasti-a-jejich-funkce/>
- [14] Power Train. Britannica [online]. [cit. 2018-07-20]. Dostupné z: <https://kids.britannica.com/students/article/automobile/273028/197022-toc>
- [15] FREI, Martin. Vodíkový pohon automobilů: Nechceme lithium, chceme vodík. [auto.cz](http://www.auto.cz) [online]. Praha: Czech NEWS CENTER, 2018 [cit. 2018-07-23]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/vodikovy-pohon-automobilu-nehceme-lithium-chceme-vodik-121182>
- [16] Základní informace o LPG a o jízdě na zkapalněný plyn. Šlápni na plyn [online]. abcRedakce [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: <https://lpg-cng.ochranamotoru.cz/auta-jizda-slapni-na-plyn-ropny-lpg-propan-butan.htm>
- [17] BMW's hydrogen car: Beauty or beast? BBC News [online]. 2006, 17.11.2016 [cit. 2018-07-24]. Dostupné z: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/6154212.stm>
- [18] Siemens electrifies trucks with trolley technology. CNET [online]. 2012, 8.5.2012 [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <https://www.cnet.com/roadshow/news/siemens-electrifies-trucks-with-trolley-technology/>
- [19] Elektrická smart dálnice FCC [online]. FCC [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <http://www.fccps.cz/elektricka-smart-dalnice>

- [20] DUSIL, Tomáš. Baterie hybridů vs. elektromobilů: Liší se víc, než byste čekali. *Auto.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, 2016 [cit. 2018-07-26]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/baterie-hybridu-vs-elektromobilu-lisi-vic-nez-byste-cekali-99402>
- [21] MBtech Group , [online, prezentace] *Alternative\_drive\_alternativni\_pohony*, 2016
- [22] DUSIL, Tomáš. Není hybrid jako hybrid. Čím se jednotlivé systémy liší?. *Auto.cz* [online]. CZECH NEWS CENTER, 2016, 15.11. 2016 [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/neni-hybrid-cim-jednotlive-systemy-lisi-100314>
- [23] FROM NEDC TO WLTP: WHAT WILL CHANGE?. *WLTP facts* [online]. ACEA [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <http://wltpfacts.eu/from-nedc-to-wltp-change/>
- [24] CHABOT, Bob. Shifting Gears. *Motor magazine* [online]. Detroit: Hearst Business Media [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: [http://newsletter.motor.com/2017/20170516/!ID\\_ShiftingGears\\_EVTs.html](http://newsletter.motor.com/2017/20170516/!ID_ShiftingGears_EVTs.html)
- [25] Řízení služeb provozu vojenské techniky a materiálu: T1 Druhy a kategorie vojenských vozidel, evidence vozidel ozbrojených sil [online]. [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: [https://moodle.unob.cz/pluginfile.php/40150/mod\\_resource/content/1/T1%20Mareš%20prezentace%20ř%C3%ADzen%C3%AD%20služeb%20provozu.pdf](https://moodle.unob.cz/pluginfile.php/40150/mod_resource/content/1/T1%20Mareš%20prezentace%20ř%C3%ADzen%C3%AD%20služeb%20provozu.pdf)
- [26] Describe Classifications of Military Vehicles [online]. [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: <http://armyintelligence.tpub.com/IS0902/Describe-Classifications-Of-Military-Vehicles-13.htm>
- [27] Ministerstvo obrany a Armáda České republiky: Technika a výzbroj [online]. [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: <http://www.acr.army.cz>
- [28] High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle (HMMWV) [online]. [cit. 2018-09-01]. Dostupné z: <https://www.military.com/equipment/high-mobility-multipurpose-wheeled-vehicle-hmmwv>
- [29] Projekt Gerlach: OBRNĚNÉ TAKTICKÉ VOZIDLO 4X4 [online]. Brno, 2017 [cit. 2018-08-09]. Dostupné z: <https://www.zetorengineering.com/kopie-projekt-gerlach>
- [30] KMW [online]. [cit. 2018-09-15]. Dostupné z: <https://www.kmweg.com/>



- [31] KRAMER, Denise M. a Gordon G. PARKER. Current state of military hybrid vehicle development. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles* [online]. 2011, 3(4) [cit. 2018-08-31]. DOI: 10.1504/IJEHV.2011.044373. ISSN 1751-4088. Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=44373>
- [32] WLTP vs. NEDC. Volvo cars [online]. [cit. 2018-08-31]. Dostupné z: <https://www.volvocars.com/cz/pro-uzivatele/nove-emisni-testy-pro-eu/wltp-vs-nedc>
- [33] LEE, DeSeongjun a Jonghoon KIM. Implementation methodology of powertrain for series-hybrid military vehicles applications equipped with hybrid energy storage. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles* [online]. 2017, 25.01.2017 [cit. 2018-08-31]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216317649>
- [34] BUGÁR, Martin, Vladimír STAŇÁK a Viktor FERENČEY. HYBRID POWERTRAIN CONCEPTUAL DESIGN FOR UNMANNED GROUND VEHICLE [online]. 2011 [cit. 2018-08-31]. Dostupné z: [http://www.aos.sk/casopisy/science/dokumenty/archiv/2011\\_1/cl2.pdf](http://www.aos.sk/casopisy/science/dokumenty/archiv/2011_1/cl2.pdf)
- [35] LMV [online]. [cit. 2018-09-06]. Dostupné z: [http://www.militarysystems-tech.com/files/militarysystems/supplier\\_docs/lveco%20LMV-Light%20Multirole%20Military%20Vehicle.pdf](http://www.militarysystems-tech.com/files/militarysystems/supplier_docs/lveco%20LMV-Light%20Multirole%20Military%20Vehicle.pdf)
- [37] Bekheira Tabbache, Abdelaziz Kheloui, Mohamed Benbouzid. Design and Control of the Induction Motor Propulsion of an Electric Vehicle. *IEEE VPPC 2010*, Sep 2010, Lille, France. pp.1-6, 2010. <hal-00578426> [cit. 2018-09-09]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/224224164/download>
- [38] GEBREHIWOT, Mulugeta a Alex VAN DEN BOSSCHE. *Range Extenders for Electric Vehicles* [online]. Ghent, Belgium, 2015 [cit. 2018-09-09]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/282506870>. Paper. Ghent University
- [39] Outlander PHEV. BAY CITY MITSUBISHI [online]. [cit. 2018-09-15]. Dostupné z: <https://www.baycitymitsubishi.co.nz/NEW+VEHICLES/Outlander/Outlander+PHEV.html>
- [40] Hnací trakty: Nezávislé zavěšené nápravy [online]. [cit. 2018-09-15]. Dostupné z: <http://www.ads-cz.com/>
- [41] BorgWarner: Hybrid [online]. [cit. 2018-09-19]. Dostupné z: <https://www.borgwarner.com/technologies/hybrid>
- [42] DUSIL, Tomáš. Elektromobily: Proč se obejdou bez vícestupňové převodovky?. *Auto.cz* [online]. Praha: Czech NEWS CENTER, 2017, 18.08.2017 [cit. 2018-09-28]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/elektromobily-proc-se-obejdou-bez-vicestupnove-prevodovky-109262>

- [43] DUSIL, Tomáš. Posilovače řízení: Jak vlastně fungují? A čím se liší jednotlivé typy?. Auto.cz [online]. CZECH NEWS CENTER, 2017, 07.02.2017 [cit. 2018-10-01]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/posilovace-rizeni-jak-vlastne-funguji-a-cim-se-lisi-jednotlive-typy-103186>
- [44] NEDERHOED, R. a Dr. G. WALKER. Development and Testing of Series Hybrid Drive Vehicles for Military Application[online]. 2009 [cit. 2018-10-01]. Dostupné z: <http://ecst.ecsdl.org/content/16/16/1.full.pdf>. ECS Transactions. General Dynamics Land Systems.
- [45] MTU: Land defense [online]. [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: [https://mtu-online-shop.com/print/3231741\\_MTU\\_Def\\_spec\\_6R106TD21.pdf](https://mtu-online-shop.com/print/3231741_MTU_Def_spec_6R106TD21.pdf)
- [46] Mercedes-Benz: Bus Classic Engines [online]. [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.com/en/mercedes-benz/vehicles/aggregates/powertrain-bus-classic-engines/>
- [47] Cummins: For Truck Application [online]. [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <http://www.cummins.cz/pdf/motory/m/ISC8.3.pdf>
- [48] Perkins: 1200 Series [online]. [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10378884>
- [49] HINO: P11 Diesel Engine [online]. [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: [http://www.hino-global.com/products/diesel\\_engines/Engine\\_P11.html](http://www.hino-global.com/products/diesel_engines/Engine_P11.html)
- [50] Paccar PX-7 [online]. [cit. 2018-10-13]. Dostupné z: [https://www.kenworth.com/media/39989/2013\\_px7\\_spec\\_sheet\\_112912.pdf](https://www.kenworth.com/media/39989/2013_px7_spec_sheet_112912.pdf)
- [51] ČSN EN 60529. STUPNĚ OCHRANY KRYTEM: KRYTÍ - IP KÓD. Praha: Technická normalizační komise: TNK č. 22 Elektrotechnické předpisy, 1991. Dostupné také z: [http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html\\_nahledy/33/32715/32715\\_nahled.htm](http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/33/32715/32715_nahled.htm)
- [52] Kokakam: Energy Storage Solutions [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://kokam.com/>
- [53] Allison Transmissions: Ratings and Specifications [online]. [cit. 2018-10-21]. Dostupné z: [https://www.allisontransmission.com/docs/default-source/marketing-materials/sa7765en-d-lr3.pdf?sfvrsn=aef13d1d\\_18](https://www.allisontransmission.com/docs/default-source/marketing-materials/sa7765en-d-lr3.pdf?sfvrsn=aef13d1d_18)
- [54] Dana Driveshafts: Lightweight, Reliable and Durable [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://www.dana.com/commercial-vehicles/products/driveline/driveshafts-searchRootId=>
- [55] AxleTech: Transfer Cases [online]. 2018 [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <https://www.axletech.com/en/products/transfer-cases>

- [56] EV West: Electric Vehicle Parts, Components [online]. [cit. 2018-10-28]. Dostupné z: <http://evwest.com/>
- [57] Autozone: Drivetrain - differential [online]. [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: <https://www.autozone.com/drivetrain/differential>
- [58] FAID, Saphir. A Highly Efficient Two Speed Transmission for Electric Vehicles. *EVS28* [online]. Korea: 2015, 03.06.2015 [cit. 2018-10-29]. Dostupné z: [http://www.evs28.org/event\\_file/event\\_file/1/pfile/EVS28\\_Saphir\\_Faid.pdf](http://www.evs28.org/event_file/event_file/1/pfile/EVS28_Saphir_Faid.pdf)
- [59] Gamma Technologies: About Us [online]. [cit. 2018-11-01]. Dostupné z: <https://www.gtisoft.com/about-gt/>
- [60] SEBECK Katherine PhD, Jeremy MANGE PhD, Jamie MACLENNAN a Denise RIZZO PhD. Characterization of army ground vehicle drive cycles [online]. Michigan: U.S. Army Tank Automotive Research and Development Center, 2017, 9 s. [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/319321076\\_CHARACTERIZATION\\_OF\\_A\\_RMY\\_GROUND\\_VEHICLE\\_DRIVE\\_CYCLES](https://www.researchgate.net/publication/319321076_CHARACTERIZATION_OF_A_RMY_GROUND_VEHICLE_DRIVE_CYCLES)  
Conference paper. System Engineering - Analytics.
- [61] GALGAMUWA, Uditha, Loshka PERERA a Saman BANDARA. Developing a General Methodology for Driving Cycle Construction: Comparasion of Various Established Driving Cycles in the World to Propose a General Approach[online]. Moratuwa, Sri Lanka, 2015 [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <http://www.scirp.org/journal/jtts>  
<http://dx.doi.org/10.4236/jtts.2015.54018>  
Transportation Engineering Division, Department of Civil Engineering, University of Moratuwa.
- [62] BRUDNAK, Mark, Mike POZOLO, Matthew MCGOUGH, Todd MORTSFIELD, Andrey SHVARTSMAN a Richard ROMANO. Motion Base Simulation of a Hybrid-Electric HMMWV for Fuel Economy Measurement. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*[online]. 2008, 1(1), 41-53 [cit. 2018-11-06]. DOI: 10.4271/2008-01-0775. ISSN 1946-3928. Dostupné z: <http://papers.sae.org/2008-01-0775/>
- [63] Millbrook: Defence and Military Vehicle Testing [online]. 2018 [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <http://www.millbrook.co.uk/sectors/defence/>

- [64] Development of the Light Load UDDS and CARB Heavy Heavy-Duty Diesel Truck Engine Dynamometer Test Cycles. California Air Resources Board [online]. State of California [cit. 2018-11-10]. Dostupné z: <https://arb.ca.gov/fuels/diesel/altdiesel/101408testcycleCECERT.pdf>
- [65] BARLOW, T J, S LATHAM, I S MCCRAE a P G BOULTER. A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions [online]. Version 3. Bracknell: IHS, 2009 [cit. 2018-11-11]. ISBN 978-1-84608-816-2. Dostupné z: [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/4247/ppr-354.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/4247/ppr-354.pdf)
- [66] National Renewable Energy Laboratory: Drive Cycle Analysis Tool [online]. [cit. 2018-11-11]. Dostupné z: <https://www.nrel.gov/transportation/drive-cycle-tool/>

## 12. Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení spalovacích motorů [2] .....	12
Obrázek 2: Grafické znázornění přenosu rotačního pohybu mezi převodovkou a zadními koly vozidla [14] .....	13
Obrázek 3: Schéma uspořádání hnacího ústrojí elektromobilů [3] .....	16
Obrázek 4: Rozdělení elektromotorů [2] .....	17
Obrázek 5: Schéma pohonu - micro hybrid [21] .....	20
Obrázek 6: Schéma pohonu - mild hybrid [21] .....	20
Obrázek 7: Schéma pohonu - sériový hybrid [21].....	22
Obrázek 8: Schéma pohonu - paralelní hybrid [24] .....	23
Obrázek 9: Schéma pohonu - kombinované zapojení [21] .....	24
Obrázek 10: Schéma pohonu - adhezni vazba [21] .....	25
Obrázek 11: Příklad charakteristického vozidla [30].....	28
Obrázek 12: Úspora paliva u jednotlivých hybridních pohonů vozidla HMMWW při odlišných jízdních cyklech. [31].....	32
Obrázek 13: Úspora paliva u jednotlivých hybridních pohonů těžkého vozidla (cca 12 t) při odlišných jízdních cyklech. [31] .....	33
Obrázek 14: Schéma navrženého pohonu [39] .....	34
Obrázek 15: Schématické umístění elektromotorů a převodovek do náprav vozidla .....	35
Obrázek 16: Průběh točivého momentu motoru HVH410-150 DOM .....	47
Obrázek 17: Průběh výkonu motoru HVH410-150 DOM.....	48
Obrázek 18: Účinnost motoru HVH 410-150 DOM [41].....	48
Obrázek 19: Průběh točivého momentu motoru HVH250-115 SOM .....	50
Obrázek 20: Průběh výkonu motoru HVH250-115 SOM.....	50
Obrázek 21: Účinnost motoru HVH250-115 SOM [41].....	50
Obrázek 22: Schéma převodového ústrojí [autor] .....	51
Obrázek 23: Vnější výkonová charakteristika motoru MTU 6R 106 TD21 [45].....	56
Obrázek 24: Měrná spotřeba paliva motoru MTU 6R 106 TD21 [45].....	56
Obrázek 25: Modulární akumulátory společnosti Kokam [52] .....	59
Obrázek 26: Blokové schéma navrženého pohonu .....	61
Obrázek 27: Umístění jednotlivých komponent - tříčtvrteční pohled zezadu [autor].....	62
Obrázek 28: Umístění jednotlivých komponent - tříčtvrteční pohled [autor] .....	63
Obrázek 29: Znázornění tratě - Munson Standard Fuel Course [62] .....	69
Obrázek 30: Příklad testování jízdních vlastností vojenských vozidel [63] .....	70
Obrázek 31: Jízdní cyklus HHDDT - Cruise segment [66] .....	71

Obrázek 32: Jízdní cyklus HHDDT – Transient segment [66] .....	72
Obrázek 33: Jízdní cyklus New York Bus Cycle [66] .....	72
Obrázek 34: Vytvořený porovnávací cyklus pro vojenské taktické vozidlo [autor] .....	73
Obrázek 35: Matematický model vozidla s navrženým sériovým hybridním pohonem [autor] .....	74
Obrázek 36: Příklad částečné mapy účinnosti elektromotoru [autor] .....	75
Obrázek 37: Příklad nastavení aerodynamiky vozidla [autor] .....	76
Obrázek 38: Matematický model taktického vozidla s konvenčním pohonem – celá sestava [autor] .....	76
Obrázek 39: Příklad nastavení víceúrovňové převodovky [autor] .....	77
Obrázek 40: Matematický model taktického vozidla s konvenčním pohonem – podsestava podvozku [autor] .....	78
Obrázek 41: Příklad nastavení diferenciálu [autor] .....	78

## 13. Seznam tabulek

Tabulka 1: Jízdní parametry charakteristického vozidla.....	28
Tabulka 2: Přehled vlastností elektrického a konvenčního pohonu s ohledem na vojenské využití .....	29
Tabulka 3: Kvalitativní ohodnocení parametrů rozdílných pohonů s ohledem na vojenské využití .....	31
Tabulka 4: Konstanty a parametry vozidla použité ve výpočtech.....	42
Tabulka 5: Přehled požadovaných parametrů pro různé jízdní režimy .....	45
Tabulka 6: Orientační návrh převodových stupňů .....	52
Tabulka 7: Přehled vybraných spalovacích motorů s jejich parametry .....	55
Tabulka 8: Teoretický dojezd vozidla při různých kapacitách akumulátorů .....	60
Tabulka 9: Rozměry jednotlivých komponent znázorněných v modelu .....	63
Tabulka 10: Přehled hmotností jednotlivých komponent .....	64
Tabulka 11: Teoretické dlouhodobé jízdní vlastnosti vozidla .....	66
Tabulka 12: Teoretické krátkodobé jízdní vlastnosti vozidla .....	66
Tabulka 13: Výsledná průměrná spotřeba paliva – navržený hybridní pohon .....	79
Tabulka 14: Výsledná průměrná spotřeba paliva – původní konvenční pohon .....	79

## 14. Seznam příloh

Příloha č. 1 – Model rámcového umístění komponent

- *Navrh\_umistení\_komponent.stp*
- Zjednodušený CAD model vojenského taktického vozidla
- Umístění jednotlivých komponent
- Formát .stp