

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2018

**DAVID
ŠTĚPÁN**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štěpán** Jméno: **David** Osobní číslo: **436025**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Hybridní vozidlo s prodlužovacem dojezdu

Název bakalářské práce anglicky:

Hybrid vehicle with a range extender

Pokyny pro vypracování:

1. Uveďte obecní přehled hybridních pohonních ústrojí.
2. Zpracujte rešerši zameřenou na hybridní vozidla se sériovým prodlužovacem dojezdu (Range Extender).
3. Pomocí simulace jízdy vozidla v jízdních cyklech určete vlivy na celkovou energetickou spotřebu vozidla.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Rastislav Toman, ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

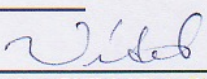
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

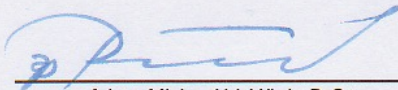
Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Rastislav Toman
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

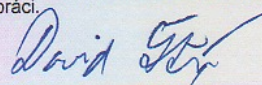

prof. Ing. Michael Valásek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

27. 4. 2018

Datum převzetí zadání



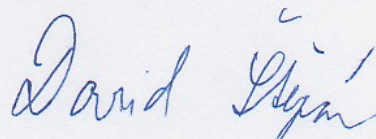
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

V Praze dne 10.7.2018

Podpis

Handwritten signature in blue ink, reading "David Štěpán".

Poděkování

Děkuji panu **Ing. Rastislavu Tomanovi** za perfektní vedení, asistenci při práci, podnětné připomínky, vstřícnost a lidský přístup při tvorbě této práce.

Děkuji též své rodině za podporu a toleranci při studiu.

**HYBRIDNÍ VOZIDLO
S PRODLUŽOVAČEM DOJEZDU**

Anotace

Cílem této bakalářské práce bylo prozkoumat problematiku sériových hybridních vozidel. Rešerše poskytuje přehled hybridních vozidel se zaměřením na sériové hybridy, jejich konstrukci, zaměření a problematiku. V praktické části byl odladěn model vozu BMW i3 v elektrické i hybridní verzi v programu GT-Suite. Model byl parametrizován a byla provedena změna kapacity baterie, instalace dvoustupňové převodovky a úprava spotřeby spalovacího motoru. Byl prozkoumán vliv těchto modifikací a dále stárnutí baterie na spotřebu, dojezd a dynamiku elektrického i hybridního vozu.

Klíčová slova

Hybridní vozidlo, Elektrické vozidlo, Sériový hybrid, Prodlužovač dojezdu, Spotřeba energie, Jízdní cyklus, 2stupňová převodovka, GT-Suite

Abstract

The aim of this bachelor's thesis was to examine the subject of series hybrid vehicles. A theoretical summary of hybrid vehicles was compiled. It then concentrated on series hybrids, focusing on design, purpose and problems. Experimental work consisted of tuning a model of both electric and hybrid BMW i3 in GT-Suite software. The model was parameterized and following changes were executed - battery capacity alternation, two speed transmission installation, range extender parameters modification and battery aging. A set of studies was performed, investigating the influence of those changes on energy consumption, range and drive dynamics.

Key words

Hybrid electric vehicle, Electric vehicle, Series hybrid, Range extender, Energy consumption, Driving cycle, Two-speed transmission, GT-Suite

Obsah

1	Úvod	1
2	Druhy hybridních vozidel	2
3	Klasifikace hybridních elektrických vozidel	3
3.1	Podle uspořádání	4
3.1.1	Paralelní	4
3.1.2	Sériové	5
3.1.3	Kombinované	5
3.2	Podle funkce elektromotoru	6
3.2.1	Mikro hybrid	6
3.2.2	Mild hybrid	6
3.2.3	Full hybrid	6
3.2.4	Plug-in hybrid	6
4	Sériová hybridní elektrická vozidla (S-HEV)	7
4.1	Uspořádání S-HEV	7
4.2	Zaměření S-HEV	9
4.3	Strategie řízení	10
4.3.1	Podle SoC	10
4.3.2	Podle profilu tratě	13
4.4	Technické parametry soustavy	14
4.4.1	Volba výkonu elektromotoru	14
4.4.2	Volba parametrů prodlužovače dojezdu a baterií	15
4.5	Příklady S-HEV	18
4.5.1	Fisker Karma	18
4.5.2	Nissan e-Power	19
4.5.3	LEVC TX	19
4.5.4	Koncepty a experimentální vozidla	20
4.5.5	BMW i3 REx	22
5	Simulace BMW i3 v programu GT-Suite	25
5.1	Tvorba modelu	26
5.1.1	Úpravy zadaného modelu	26
5.2	Kalibrace modelu	28
5.2.1	Jízdní cykly	28
5.2.2	Porovnání spotřeby v jízdních cyklech s modelem	29
5.2.3	Dynamické vlastnosti	30
5.3	Studie	31
5.3.1	Vliv kapacity baterie na dojezd s uvážením hmotnosti baterií	31
5.3.2	Optimalizace 2stupňové převodovky a určení ideálních okamžiků řazení pro spotřebu v jízdních cyklech	32
5.3.3	Vliv 2stupňové převodovky na jízdní dynamiku a spotřebu	33
5.3.4	Vliv stárnutí baterie na dojezd, spotřebu a jízdní dynamiku	34
6	Simulace BMW i3 REx	36
6.1	Kalibrace modelu	36
6.2	Testy a studie	37
6.2.1	Vliv optimalizace spotřeby Range Extenderu na dojezd	37
6.2.2	Vliv zvětšení kapacity nádrže na dojezd	38
6.2.3	Zvětšení kapacity nádrže a optimalizace spotřeby Range Extenderu	39
6.2.4	Vliv stárnutí baterie na spotřebu a dobu běhu Range Extenderu	39
7	Závěr	40

Seznam obrázků	42
Seznam grafů	42
Seznam tabulek.....	42
Seznam literatury	43

Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin

HEV		Hybridní elektrické vozidlo
FCEV		Hybridní vozidlo s palivovými články
P-HEV		Paralelní hybridní vozidlo
SP		Spalovací motor
EM		Elektrický motor
GPS		Globální polohový systém
NVH		Faktor hluku, hrubosti chodu, vibrací
NEDC		Evropský jízdní cyklus
WLTP		Nový globální jízdní cyklus
HWFET		Americký dálniční jízdní cyklus
BEV, EV		Elektrické vozidlo na baterie
REx, Range Extender		Prodlužovač dojezdu
NIL		Národní laboratoř Idaho
S-HEV		Sériové hybridní vozidlo
WM		Elektromotor v kole
CM		Centrálně umístěný elektromotor
u	[-]	Parametr podílu výkonů
P	[kW]	Výkon
η	[%]	Účinnost
TCO	[€/rok]	Celková cena vlastnictví
SoC	[%]	Úroveň nabití
E	[kWh]	Energie
$M, Torque$	[Nm]	Točivý moment motoru
$n, Speed$	[min ⁻¹ , rpm]	Otáčky motoru
m	[kg]	Hmotnost
$v, velocity$	[m.s ⁻¹ , km.h ⁻¹ , mph]	Rychlost
t	[s]	Čas
g	[m.s ⁻²]	Tíhové zrychlení
ρ	[kg.m ⁻³ , g.L ⁻¹]	Hustota
A	[m ³]	Plocha
f_r	[-]	Součinitel valivého odporu

C_D	[-]	Součinitel odporu vzduchu
V	[m ³ , L]	Objem
H	[MJ.kg ⁻¹]	Hustota energie
S	[kWh.100 ⁻¹ .km ⁻¹]	Spotřeba elektrické energie
-	[Ah]	Kapacita baterie
-	[L.100 ⁻¹ km ⁻¹]	Spotřeba paliva
-	[Ω]	Vnitřní odpor
D	[km]	Ujetá vzdálenost, dojezd
m_{pe}	[g.kW ⁻¹ .h ⁻¹]	Měrná spotřeba paliva
i	[-]	Převodový poměr
T	[°C]	Teplota

1 Úvod

Osobní automobil je dopravní prostředek, jenž je schopný přepravit cestující a náklad do vzdálenosti v řádu desítek až stovek kilometrů bez nutnosti neustálého dodávání energie zvenčí. V takovém vozidle tedy musí být uskladněno dostatečné množství energie nutné pro přesun a dále zařízení, které přemění uskladněnou energii v energii mechanickou pro pohon vozidla.

Za dobu existence automobilů zaujala výlučné postavení vozidla se spalovacím motorem, kde je energie pro pohon uskladněna ve formě fosilních paliv. Je tomu tak z mnoha důvodů. Pokud vyloučíme geopolitické zájmy, je to zejména z důvodu spolehlivosti chodu systému v různých podmínkách, velkého dojezdu, možnosti rychlého doplnění pohonných hmot a v neposlední řadě díky relativní cenové dostupnosti pořízení a provozu takových vozidel. Je nutné zmínit, že tuto pozici si spalovací motory vydobily za několik desetiletí provozu, vývoje a vylepšování a velkou měrou se na jejich úspěchu podílí i široká infrastruktura čerpacích stanic a doplňkových služeb.

Mimo spalovacího motoru je pro pohon vozidel vhodný též elektrický motor. Energie pro jeho pohon je skladována v bateriích nebo v palivových článcích. Výhodou jsou nulové emise takového vozidla v místě provozu, možnost získání elektrické energie pro provoz vozu z obnovitelných zdrojů a možnost doplnění energie prakticky v jakémkoliv místě pokrytém elektrickou rozvodnou sítí, na rozdíl od komplikované distribuce fosilních paliv. Ovšem prozatím převažují nevýhody – především nízká energetická hustota zařízení skladujících elektrickou energii, z čehož plyne nedostatečný dojezd takových vozidel a dále potom vyšší složitost a tím pádem i cena skladovacích zařízení (baterie, palivové články) ve srovnání s nádrží na fosilní palivo.

Již od ropných šoků v 70. letech minulého století sílí hlasy žádající menší závislost (zejména individuální) dopravy na fosilních palivech. Zároveň je však potřeba zachovat z uživatelského hlediska všechna výše zmíněná pozitiva, která se pojí se spalovacími motory. Z tohoto pohledu se zdají být dobrým řešením hybridní vozidla. Díky kombinaci spalovacího motoru s jiným, sekundárním druhem pohonu, jsou schopna optimalizovat celkovou spotřebu energie

v režimech, kdy je spalovací motor méně efektivní. Umožňuje tak snížit celkové lokální emise vozidla bez negativních efektů v podobě nedostatečného dojezdu či dlouhého času dobíjení.

V první části této práce budou představena hybridní vozidla a existující koncepce. Rešerše bude dále zaměřena na sériová hybridní vozidla s přehledem příkladů. Praktická část bude probíhat v simulačním programu GT-Suite. Nejprve bude kalibrován model elektromobilu BMW i3 a potom budou navrženy možnosti optimalizace jeho parametrů, zejména spotřeby a dojezdu. V poslední části bude přizpůsoben model sériového hybridu BMW i3 REx a nakonec budou prozkoumány možnosti zlepšení jeho parametrů.

2 Druhy hybridních vozidel

Jako hybridní vozidlo obvykle označujeme takové vozidlo, na jehož pohonu se podílí spalovací motor spolu s jiným zdrojem mechanické práce. Nabízí se různé druhy dělení takovýchto druhů pohonu. Je možné dělit hybridní vozidla například podle zdroje sekundárního pohonu; uspořádání pohonu a jeho funkce; či například podle výkonu či velikosti sekundárního druhu pohonu.

Na úvod budou krátce představeny možné koncepce hybridního pohonu. U automobilů, ale například i autobusů či vlaků se nejčastěji setkáváme s elektromotorem v roli sekundárního pohonu. V takovém vozidle je zpravidla přítomen elektromotor s jeho řídicí technikou a dále úložiště elektrické energie, povětšinou akumulátor. Ostatní zařízení elektrického hybridního vozidla (HEV) se různí podle použití a uspořádání pohonu, čemuž se budeme rozsáhleji věnovat níže.

Dalším možným zdrojem energie pro pohon jsou palivové články. Ty přeměňují chemickou energii přímo na elektrickou, aniž by došlo k intermediární přeměně na teplo. Díky tomu není účinnost této přeměny limitována spodní výhřevností podle Carnotova oběhu jako v případě spalovacího motoru. Palivem může být

v principu jakákoliv oxidovatelná tekutina. Z technického hlediska je k použití nejvhodnější vodík, protože oxidační reakcí z něj vzniká voda, jež nijak nezatěžuje životní prostředí.

O hybridním vozidle s palivovými články hovoříme v takovém případě, kdy jsou články ve vozidle přítomny spolu s jiným zařízením skladujícím elektrickou energii, tj. bateriemi nebo superkapacitory. Je tak možné použít menší palivový článek (který je velmi drahá součástka) a optimalizovat jeho využití – výkonové špičky a propady pokrývat právě pomocí superkapacitoru či baterie.

Hybridní vozidla s palivovými články (FCEV) nejsou předmětem našeho dalšího zkoumání, nicméně se jedná o zajímavou technologii, jež se zajisté dočká budoucího rozvoje. [1]

Existuje několik dalších technologií, které můžou sloužit jako druhotný zdroj energie v hybridním uspořádání. Jejich specifická energie je však malá a proto se v těchto případech bavíme o krátkodobé výpomoci spalovacímu motoru. Na rozdíl od akumulátorů a palivových článků nejsou absolutně vhodné jako primární zdroje energie vozidla. Takovými krátkodobými úložišti energie jsou například setrvačnický, hydraulický akumulátor, pneumatický hybridní systém a další. Tyto technologie jsou zajímavé z hlediska vyrovnání energetické spotřeby v čase, tedy omezení špiček a propadů. To umožňuje zvýšit celkovou efektivitu pohonu, jelikož k největším ztrátám dochází právě při těchto hraničních jevech a také umožňují využití menšího a lehčího primárního zdroje energie. [1]

3 Klasifikace hybridních elektrických vozidel

Technologie hybridních elektrických vozidel je konstrukčně rozmanitá skupina pohonů vozidel. Pro lepší orientaci v problematice můžeme zavést kritéria dělení HEV.

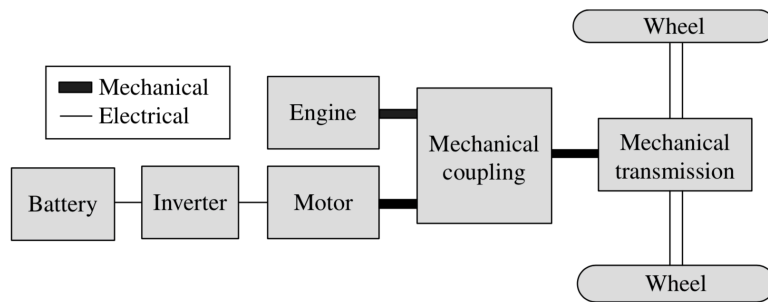
3.1 Podle uspořádání

3.1.1 Paralelní

Paralelní uspořádání pohonu (P-HEV) je takové, kde jsou oba druhy pohonu

nezávisle mechanicky spojeny

s převodovkou, jež pohání kola vozu. Pro



Obrázek 1 - Uspořádání paralelního hybridu [2]. Zleva: Mechanical - mechanický, Electrical - elektrický, Battery - baterie, Inverter - usměrňovač napětí, Motor - trakční elektromotor, Engine - spalovací motor, Mechanical coupling - mechanické spojení, Transmission - převodovka, Wheel - kolo

pohon kol tak může sloužit jak spalovací motor (SP), tak elektrický motor (EM), případně oba v kombinaci. Jedná se v podstatě o stejné uspořádání pohonu jako u klasických spalovacích vozidel s přidáním elektrické větve. Tato koncepce umožňuje různé jízdní situace. Při rozjezdu z místa bude dominantní výkon poskytovaný elektromotorem a spalovací motor může být buď vypnutý, nebo pracovat v nízkých otáčkách. Při jízdě ustálenou vyšší rychlostí bude naopak dominantní spalovací motor. V závislosti na stavu nabití může zároveň spalovací motor vyrábět více výkonu, než je potřeba pro pohyb a elektromotor v roli generátoru pak dobíjí baterii. Naopak při zpomalování může být spalovací motor vypnutý a o deceleraci se může starat elektromotor v roli generátoru. Při potřebě maximálního výkonu je možné dočasně plně využít oba zdroje v kombinaci. Pro lepší představu je možné zavést parametr u , který je podílem mezi výkonem dodávaným baterií P_{bat} a celkovým výkonem k pohonu vozidla P_{celk} . [1,2]

$$u = \frac{P_{bat}}{P_{celk}}$$

Tabulka 1 - Hodnoty parametru u pro P-HEV

Hodnota u	Jízdní situace	Popis
$0 < u < 1$	vysoký výkon	k pohonu kol je využita kombinace EM a SP
$u = 1$	regenerace	SP odpojený, EM v roli generátoru
$u < 0$	dobíjení	SP pohání vůz a zároveň dobíjí akumulátor
$u = 1$	bezemisní provoz	SP odpojený, EM pohání vozidlo
$u = 0$	konvenční provoz	vozidlo pohání pouze SP

3.1.2 Sériové

U sériového uspořádání (S-HEV) je s poháněnými koly mechanicky spjatý pouze elektromotor. Spalovací motor potom slouží výhradně k výrobě elektrické energie přes generátor. Ta může být potom přímo použita v elektromotoru pro pohon vozidla či uložena v akumulátoru. Největší výhodou tohoto uspořádání je možnost plně přizpůsobit spalovací motor roli generátoru. Na spalovací motor tak není kladen požadavek konzistentních vlastností napříč otáčkovým spektrem a při všech variantách zatížení, jak je tomu v případě jeho přímého propojení do poháněcího řetězce. Díky tomu je možné optimalizovat jeho konstrukci pro maximální účinnost. Také je možné minimalizovat jeho rozměry a hmotnost ve srovnání s běžným motorem, jenž musí nabízet širší spektrum využití. [1,2]

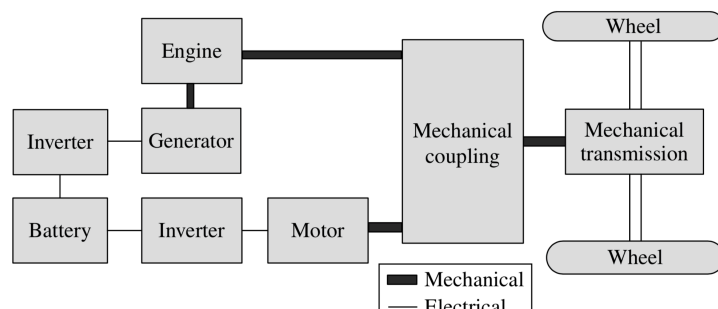
Tabulka 2 - Hodnoty parametru u pro S-HEV

Hodnota u	Jízdní situace	Popis
$0 < u < 1$	vysoký výkon	EM podává vyšší výkon, než SP vyrábí (tento mód se většinou nepoužívá)
$u = 1$	regenerace	SP odpojený, EM v roli generátoru
$u < 0$	dobíjení	SP poskytuje více výkonu, než EM spotřebuje pro jízdu
$u = 1$	bezemisní provoz	SP odpojený, EM pohání vůz (výchozí mód)

3.1.3 Kombinované

Kombinované

uspořádání je spojením paralelního s prvky sériového. Spalovací motor je tak v kontaktu mechanicky s koly vozu a také přes generátor s baterií. Existují dvě



Obrázek 2 - Uspořádání sériovo-paralelního hybrid, Generator - generátor

varianty kombinovaného HEV. První řešení používá dělič výkonu mezi

elektromotorem a spalovacím motorem. Druhé kombinuje dva elektrické stroje, oba připojené ke spalovacímu motoru navzájem spojené elektrickou cestou. [1]

3.2 Podle funkce elektromotoru

Toto dělení je také nazýváno podle stupně hybridizace. Rozlišujeme tím, do jaké míry se na pohonu vozidla podílí elektromotor. Platí, že čím vyšší je stupeň hybridizace, tím markantnější jsou úspory fosilních paliv a zároveň tím těžší a nákladnější je použitá hybridní technika. [1]

3.2.1 Mikro hybrid

Také bývá nazýván *Integrovaný startér-generátor*. Elektromotor se zde nepodílí přímo na pohonu vozidla, ale pouze pro startování spalovacího motoru nebo jako alternátor pro pohon elektrických zařízení. Elektromotor i baterie tak můžou být malých rozměrů, hmotnosti i ceny, ale jejich vliv na celkovou spotřebu paliva není příliš velký.

3.2.2 Mild hybrid

Elektromotor se zde přímo podílí na pohonu vozidla, avšak pouze jako asistence spalovacího motoru. Takové vozidlo není schopno čistě elektrického provozu.

3.2.3 Full hybrid

Full hybrid poskytuje natolik výkonný elektromotor a kapacitní baterii, že v některých jízdních režimech nebo na vyžádání řidiče je schopný jízdy čistě na elektrickou energii. To může být vhodné například v nízkoemisních oblastech měst. Dojezd v elektrickém módu zpravidla dosahuje jednotek kilometrů.

3.2.4 Plug-in hybrid

Plug-in hybrid představuje nejvyšší stupeň hybridizace. Nejčastěji obsahuje akumulátory nejvyšší kapacity z výše uvedených a umožňuje elektrický provoz do vzdálenosti až desítek kilometrů. U PHEV je možné dobíjet akumulátory z elektrické sítě. Teoreticky je tedy možný stálý provoz v elektrickém režimu a spalovací motor využívat pouze při potřebě delších přesunů bez dobíjení baterií. Sériová hybridní vozidla jsou zpravidla plug-in hybridy.

4 Sériová hybridní elektrická vozidla (S-HEV)

Nadále se tato práce bude věnovat sériovým hybridním automobilům. Sériové uspořádání prozatím našlo uplatnění především v provozu na železnici v podobě diesel-elektrických lokomotiv a dále také v městské hromadné dopravě, kdy velké množství provozovaných hybridních autobusů má sériové uspořádání. Cílem této práce je však prozkoumat možnosti uplatnění a optimalizace sériového hybridu v osobních automobilech. V současnosti je většina prodávaných hybridních automobilů paralelního uspořádání. Velkou nevýhodou, kvůli níž zřejmě prozatím nejsou S-HEV velmi rozšířeny, jsou ztráty vlivem násobení účinností. Zatímco u paralelního hybridu je účinnost η_{CP} přenosu energie ze spalovacího motoru na kola

$$\eta_{CP} = \eta_{sp} \cdot \eta_{pú}$$

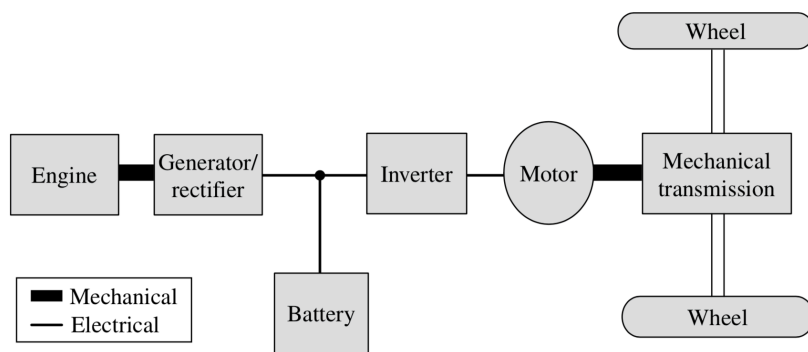
u sériového hybridu vstupují do rovnice další prvky a snižují tak jeho celkovou účinnost η_{CS} na

$$\eta_{CS} = \eta_{sp} \cdot \eta_{gen} \cdot n_{bat} \cdot \eta_{em} \cdot \eta_{pú}$$

kde η_{sp} je účinnost spalovacího motoru, $\eta_{pú}$ převodového ústrojí, η_{gen} generátoru, n_{bat} baterie a η_{em} elektrického motoru. Kromě η_{sp} se však ostatní účinnosti při vhodném konstrukčním návrhu můžou blížit hodnotě 1 a celkově tak při příhodných podmínkách může celková účinnost sériového hybridu předčít paralelní hybrid.

4.1 Uspořádání S-HEV

Schéma níže představuje základní uspořádání sériového hybridu. Spalovací motor je mechanicky spojený s elektrickým generátorem. Tam je mechanická práce přeměněna na elektrickou a střídavé napětí je změněno ve stejnosměrné. Energie může být buď uložena v bateriích, nebo přivedena do trakčního motoru. Ten přemění elektrickou energii zpět na mechanickou. Elektromotor je hřídelí spojen s převodovkou, odkud již jde moment přímo na kola vozidla. [3]

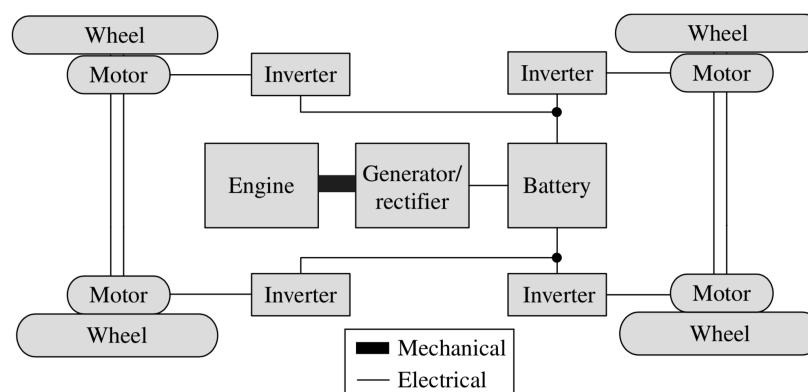


Obrázek 3 - Uspořádání sériového hybridního pohonu [3]

V praxi se setkáváme s různými technickými variantami tohoto uspořádání. Další možností je umístit elektromotory přímo do kol vozu. Díky eliminaci převodovky a stálého převodu je možné výrazně ušetřit hmotnost, prostor a zvýšit účinnost. Toto řešení však zvyšuje neodpruženou hmotnost a je komplikovanější na řízení. Zároveň je toto řešení také v současnosti dražší, avšak s rozvojem technologií a sériové výroby se očekává, že ceny elektromotorů uvnitř kol klesnou.

Výhody oproti paralelnímu uspořádání představuje zejména možnost libovolného umístění spalovacího motoru ve vozidle a používat spalovací motor stále v ideálním pracovním bodě.

Jako hlavní nevýhody tohoto uspořádání je třeba zmínit zvýšenou hmotnost celého systému oproti klasickému vozidlu a také ztráty dané několikanásobnými přeměnami energie. Tyto aspekty je třeba vyvážit nalezením optimálních parametrů všech článků pohonného řetězce.

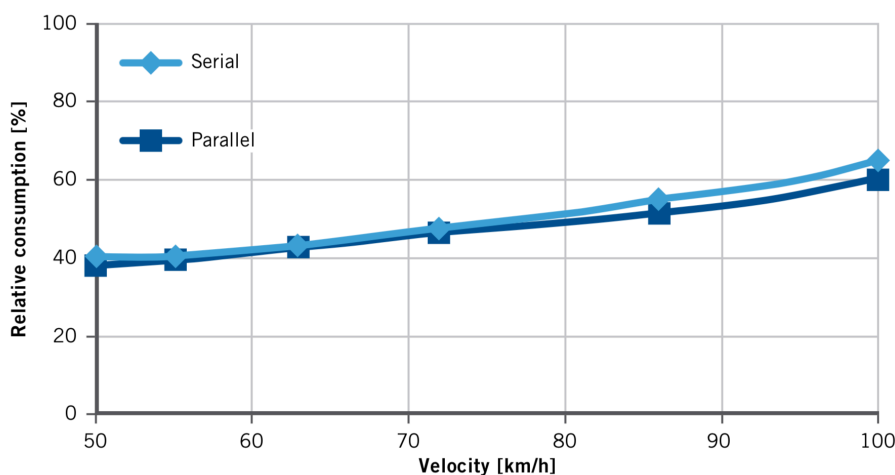


Obrázek 4 - Uspořádání S-HEV s elektromotory v kolech [3]

4.2 Zaměření S-HEV

Většina v současnosti prodávaných HEV jsou paralelního, případně paralelně-sériového uspořádání (včetně průkopníka Toyoty Prius). Jejich pohonný řetězec totiž více vychází z klasických vozidel, nabízí více možností jízdních režimů a je univerzálnější. Kvůli složitějšímu poháněcímu řetězci je ale také výrazně těžší a komplikovanější a tedy dražší. Výrobci tak v poslední době v mnoha případech objevují přednosti sériových hybridů.

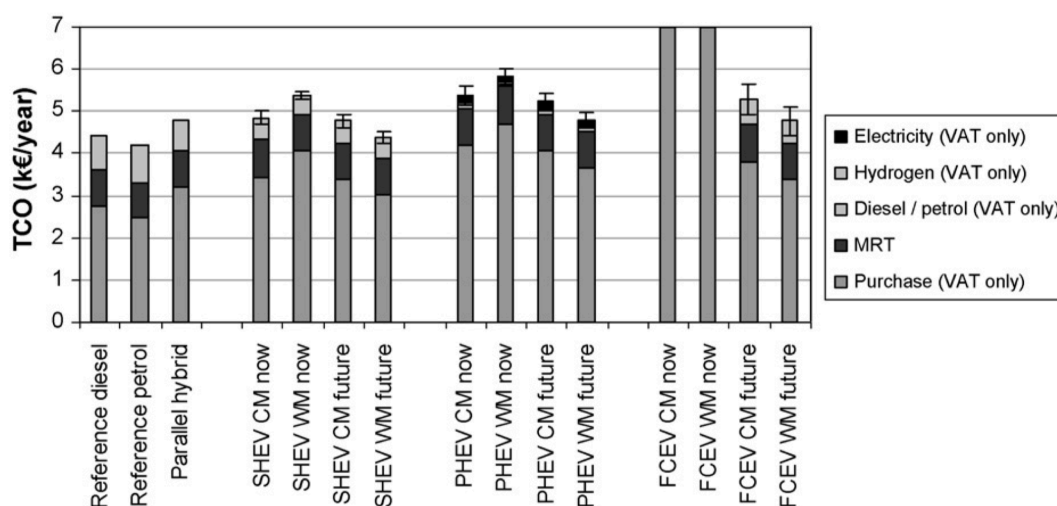
Hybridní automobily obecně vykazují výraznou úsporu oproti klasickým vozům zejména v městském provozu. Při porovnání sériového a paralelního hybridu je celková účinnost těchto uspořádání podobná. O něco výhodnější je sériové uspořádání v nízkých rychlostech díky tomu, že spalovací motor nemusí vůbec pracovat v oblastech, ve kterých není efektivní. Naopak kvůli ztrátám daným postupnými přeměnami energie je méně efektivní ve vyšších rychlostech. [4]



Graf 1- Relativní spotřeba S-HEV a P-HEV v závislosti na rychlosti [5]

Na ekonomické porovnání S-HEV, P-HEV a dále spalovacího pohonu a pohonu palivovými články se zaměřila studie univerzity v Utrechtu. Byla definována celková cena vlastnictví vozu (TCO), jenž zahrnuje pořizovací a provozní náklady při průměrném nájezdu 20 000 km ročně a při životním cyklu 10 let. Bylo zjištěno, že sériový hybrid má nižší TCO, než srovnatelný plug-in paralelní hybrid i než vůz na palivové články. A to jak v současnosti, tak s náhledem do blízké budoucnosti. Paralelní hybrid by byl konkurenceschopný pouze v případě

významného poklesu ceny baterií. Výhodněji, než sériový hybrid stále vychází klasický spalovací pohon, avšak rozdíl se bude v budoucnu zmenšovat. Je také možné, že společenský tlak na pokles emisí zvýhodní ekologická vozidla daňovou či legislativní cestou na úkor spalovacích pohonů. Dále je možné předpovědět, že zatímco v současnosti je technologie elektromotorů v kolech vozu drahá (WM), v budoucnu zlevní a přinese výrazné úspory energie i snížení emisí díky vynechání složitého pohonného řetězce oproti centrálnímu motoru uvnitř karoserie (CM). [6]



Graf 2 - Ekonomické porovnání TCO různých druhů pohonu [6]

4.3 Strategie řízení

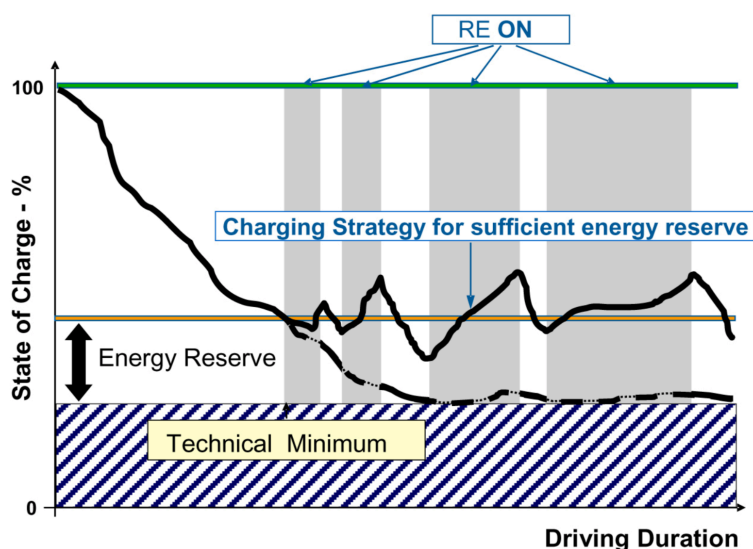
Strategie řízení spočívá v hospodaření s nabízenými druhy energie. Podle zvolené strategie se určí, za jakých podmínek má běžet spalovací motor, v jakých otáčkách, pod jakým zatížením; případně že bude spalovací motor vypnutý a energie k provozu bude v daný okamžik použita z baterií. Tato strategie záleží na proměnných i konstantních faktorech. Konstantní jsou například kapacita baterií nebo výkon, jenž je schopný dodávat spalovací motor.

4.3.1 Podle SoC

Nejpodstatnějším proměnným faktorem pro řízení energie je zbývající množství energie v bateriích; tzn. State of Charge (SoC). SoC můžeme definovat jako podíl zbývající energie v akumulátoru $E_{zbýv}$ [kWh] ku celkové maximální energii plně nabitých akumulátorů E_{max} [kWh].

$$SoC = \frac{E_{zbýv}}{E_{max}} [\%]$$

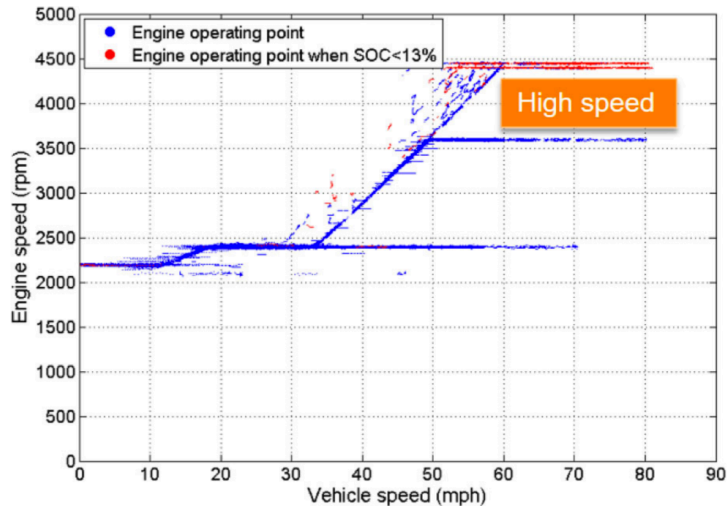
Pro dosažení co nejlepších výsledků v měřících cyklech, tak pro dosažení co nejvyšší provozní efektivity, je vhodné nejprve využívat energii v bateriích (tzn. „Charge-Depleting“ mód) a teprve po dosažení určité limitní hodnoty SoC zapojit prodlužovač dojezdu a přejít tak do tzv. „Charge-Sustaining“ módu. Je však nutné zachovat v bateriích určitou rezervu, aby bylo možné kdykoliv pokrýt požadavek na špičkový výkon, jenž přesahuje maximální výkon spalovacího motoru. Nejjednodušší strategie řízení se tedy řídí čistě SoC – po vybití do dané hladiny (typicky např. 15%) spustí spalovací motor a po dobití do dané vyšší hladiny motor vypne. Tento postup se opakuje. Vhodné je však zapojit do řízení alespoň údaje o rychlosti a spotřebě z předchozích několika minut jízdy. Ty umožňují zapnout REx již dříve v případě dynamické jízdy či naopak udržet déle motor vypnutý například při jízdě z kopce.



Graf 3 - SoC v čase, strategie zapínání spalovacího motoru [4]

4.3.1.1 BMW i3 REx

Řídící technika vozu BMW i3 REx reguluje chod motoru především na základě SoC a také podle aktuální rychlosti vozu a spotřeby energie. Pokud je SoC nad 16%, vůz pracuje v Charge-Depleting režimu a spalovací motor neběží. Zapíná se, když SoC poklesne pod 16% a zároveň se vůz pohybuje rychlostí nad 10 km/h. Pokud poklesne SoC pod 13,5%, motor zůstává zapnutý i při nižší rychlosti. Strategie zná 3 režimy podle hodnoty SoC:

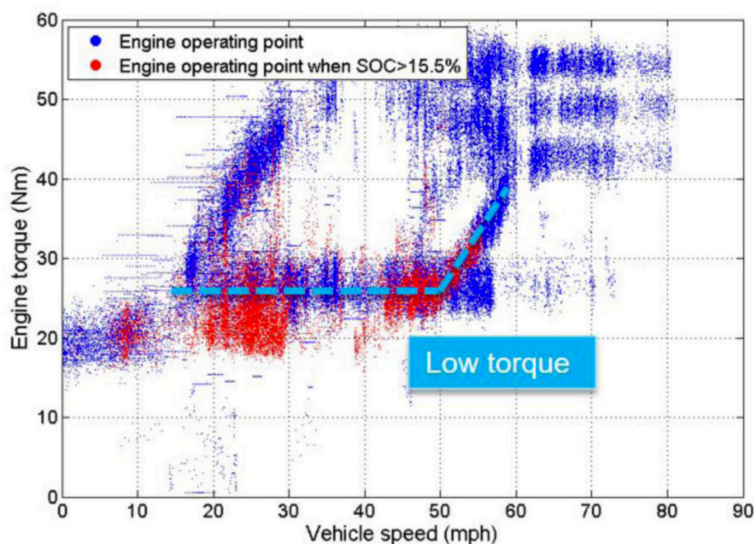


Graf 4 - Operační bod při nízkém SoC. Při vyšším SoC motor pracuje v nižších otáčkách. [7]

- SoC mezi 15,5% a 16% - motor pracuje v režimu středních otáček ($2\,200 \div 3\,600 \text{ min}^{-1}$) a nízkého točivého momentu ($27 \div 40 \text{ Nm}$)
- SoC mezi 13,5% a 15,5% - motor pracuje v režimu středních otáček a vysokého točivého momentu ($30 \div 55 \text{ Nm}$)
- SoC pod 13,5% - motor pracuje ve vysokých otáčkách $4\,500 \text{ min}^{-1}$ a s vysokým točivým momentem ($40 \div 55 \text{ Nm}$).

Prvních 300 sekund po nastartování však pracuje motor v režimu nízkých otáček i točivého momentu. Také po studeném startu zůstane motor v provozu, dokud teplota chladicí kapaliny nedosáhne 85°C bez ohledu na SoC.

Když je zapnuté topení nebo nízká venkovní teplota, provozní bod motoru se automaticky přesouvá do vyšších otáček a oblastí většího točivého momentu. [7]



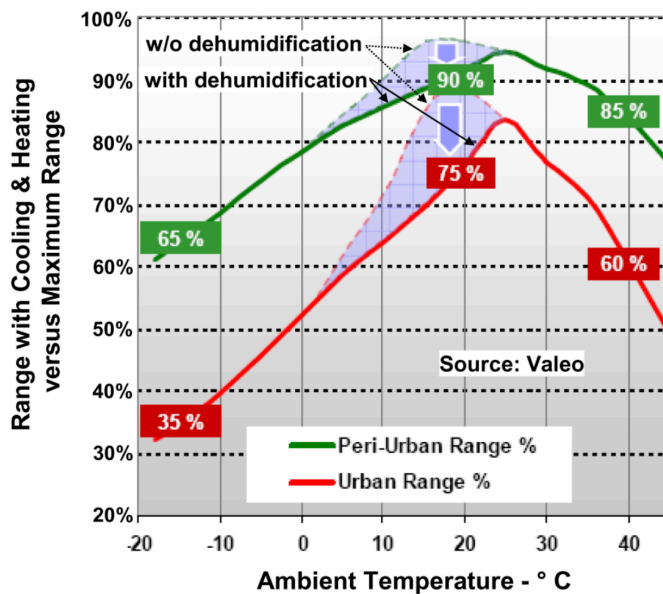
Graf 5 - Operační bod při vysokém SoC. Při nižším SoC motor dodává vyšší točivý moment. [7]

4.3.2 Podle profilu tratě

Dále je možné řídit spotřebu energie podle GPS dat profilu tratě. Pokud řidič zadá cíl cesty do navigačního systému, je možné naplánovat využití prodlužovače dojezdu tak, aby byla energie v bateriích zcela využita a cesta tak proběhla s co nejmenší celkovou spotřebou energie.

Nejsložitější je řízení na základě dat GPS, aniž by byla předem známá trasa. Systém v takovém případě propočítává podle aktuální pozice a podmínek všechny možné trasy a podle toho upravuje řízení hybridního systému. Musí však předpovídat i jízdní styl řidiče a požadavky na topení či klimatizaci. Tyto složité výpočty jsou zcela zásadní ve snaze minimalizovat zapojení spalovacího motoru a velikost baterií.

Mezi další proměnné faktory, jenž je potřeba zohlednit při řízení, se řadí zejména teplota prostředí (a její vliv na baterie a spotřebu energie pro topení a chlazení) a další povětrnostní vlivy, zatížení vozu, řidičův jízdní styl, dopravní informace atp. Graf ukazuje elektrický dojezd vozu v procentech maximální teoretické hodnoty v závislosti na vnější teplotě prostředí. Je vidět, že v městském provozu za nízkých teplot může být dojezd omezen až na 35% maximální hodnoty. [4]



Graf 6 - Dojezd v závislosti na teplotě okolí v městském a mimoměstském provozu [4]

4.4 Technické parametry soustavy

4.4.1 Volba výkonu elektromotoru

Při navrhování součástí platí několik zákonitostí specifických pro sériové hybridy. Výkon elektromotoru musí být zvolen v závislosti na výsledné pohotovostní hmotnosti vozidla a požadovaných dynamických schopnostech vozu. Ze základů dynamicky můžeme odvodit následující rovnici pro určení minimálního výkonu motoru pro požadované zrychlení [8]

$$P_t = \frac{m_v}{2t_f}(v_f^2 - v_i^2) + \frac{2}{3}m_v g f_r v_f + \frac{1}{5}\rho_a C_D A_f v_f^3$$

P_t je požadovaný výkon, m_v je hmotnost vozu, t_f čas potřebný ke zrychlení, v_f konečná rychlost, v_i počáteční rychlost, f_r součinitel valivého odporu od kol, g gravitační konstanta, ρ_a hustota vzduchu, A_f čelní plocha a C_D součinitel odporu vzduchu. Všechny veličiny jsou v jednotkách SI. Z následující Tabulka 3 vyplývá, že výkon potřebný pro zrychlení z 0 na 100 km/h typického vozidla třídy B je přibližně 67,3 kW. Dá se vyzorovat, že pro běžná městská produkční vozidla se maximální výkon pohybuje okolo této hodnoty, běžně 60-80 kW.

Obdobný výpočet je možné použít pro požadované hodnoty pružného zrychlení. Tento výpočet však nezahrnuje další spotřebiče energie, jako topení, stěrače či palubní systémy, které se na požadovaném výkonu těž projeví. Dále je možné určit požadovaný výkon motoru pro udržení konstantní rychlosti ve stoupání. V takovém případě je potřeba překonat valivý odpor, odpor vzduchu a tíhu. Požadovaný výkon se tedy rovná

$$P_v = m_v g \cos \alpha f_r v_p + \frac{1}{2}\rho_a C_D A_f v_p^3 + m_v g \sin \alpha v_p$$

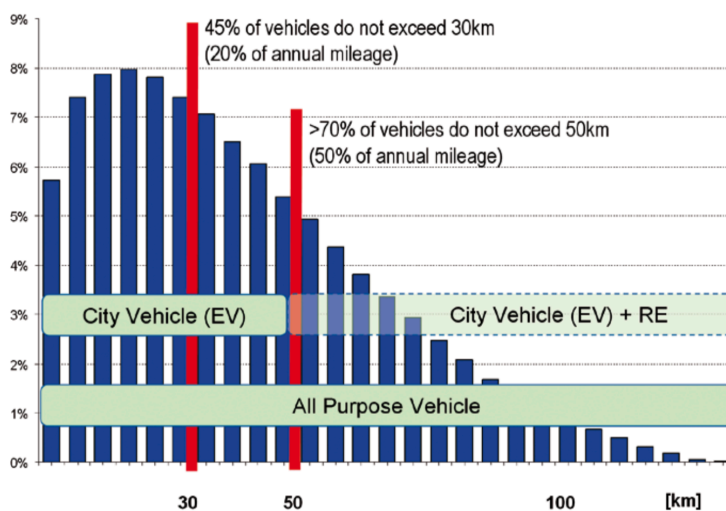
P_v je požadovaný výkon pro udržení konstantní rychlosti 130 km/h ($v_p = 36,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) ve stoupání 4% (tj. $\alpha = 1,8^\circ$). Pro tyto parametry je požadovaný výkon přibližně 49,1 kW. Je tedy patrné, že požadavky na zrychlení jsou větší, než požadavky na udržení dálniční rychlosti.

Tabulka 3 - Parametry pro výpočet minimálního výkonu vozidla

m_v	1 500 kg	g	$9,81 m \cdot s^{-2}$
t_f	10 s	ρ_d	$1,202 kg \cdot m^{-3}$
v_f	$27,8 m \cdot s^{-1}$	A_f	$2,2 m^2$
v_i	$0 m \cdot s^{-1}$	C_D	0,35
f_r	0,02	P_t	67,3 kW
v_p	$36,1 m \cdot s^{-1}$	α	$1,8^\circ$
		P_v	49,1 kW

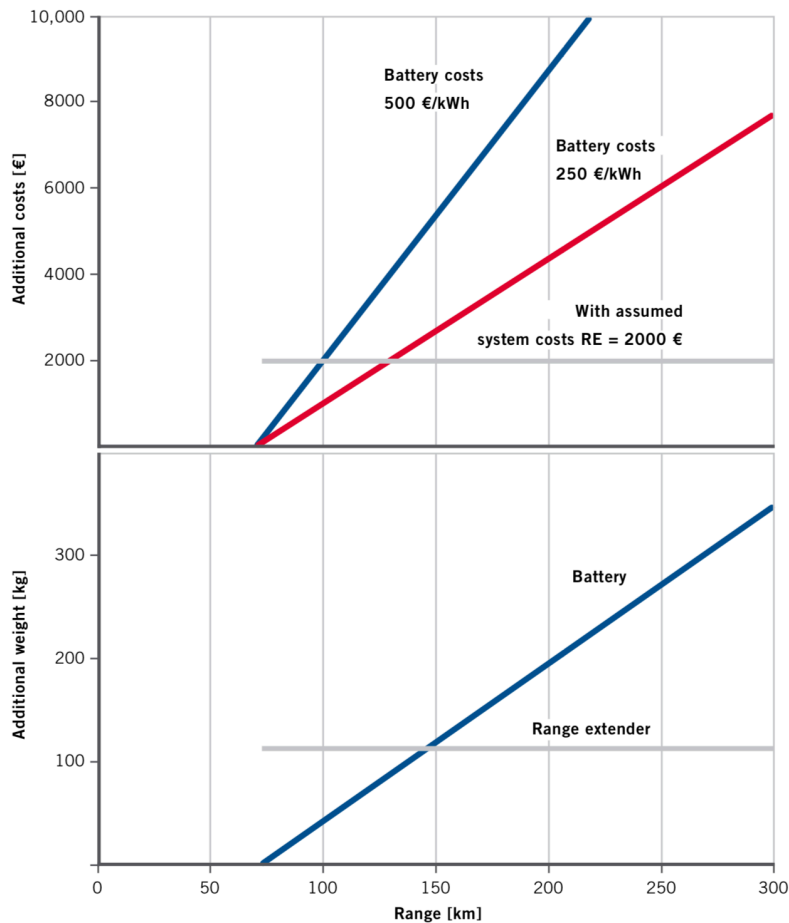
4.4.2 Volba parametrů prodlužovače dojezdu a baterií

Při konstrukci S-HEV je možné zvolit různé strategie koncepce. Je možné různě kombinovat velikost baterií spolu s velikostí (a výkonem) spalovacího motoru tak, abychom dosáhli optimální kombinace ceny, dojezdu a hmotnosti (potažmo spotřeby) pro dané využití. Jelikož se spalovací motor nepodílí přímo na pohonu vozidla, je vhodné použít malý, lehký a levný motor. Nejčastěji se setkáváme s dvou- a tříválcí o zdvihovém objemu do 1000 cm³. Velikost nádrže potom zcela závisí na požadovaném dojezdu. Z grafu vyplývá, že průměrný denní nájezd 70% vozidel nepřesáhne 50 km. Dále je vidět, že asi 85% vozidel najede do 80 km za den. [9]



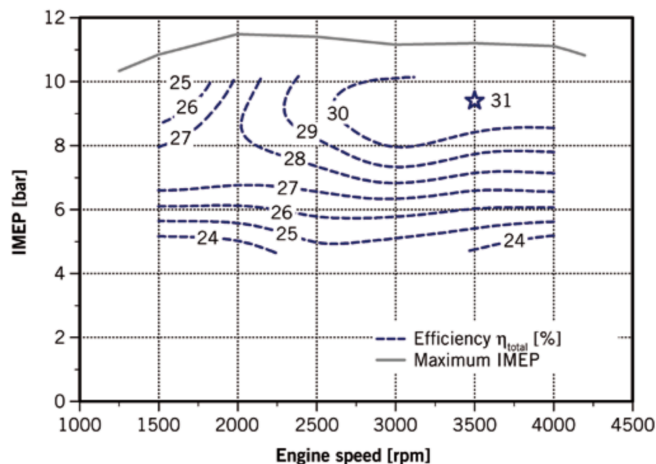
Graf 7 - Průměrná denní ujetá vzdálenost v Německu [9]

Jednou ze strategií tedy může být navrhnout kapacitu baterií tak, aby pouze na elektrickou energii vozidlo bylo schopno urazit tuto průměrnou vzdálenost. Vozidlo tak bude využíváno jako elektromobil a elektrická energie může být doplněna ze sítě. V případě většího denního nájezdu se již uplatní spalovací motor. Na Graf 8 jsou vyobrazeny výrobní náklady v závislosti na dojezdu vozu. Je patrné, že náklady na dojezd ze spalovacího motoru jsou konstantní, zatímco z baterií lineárně rostou s kilometry dojezdu. Proto je výhodný relativně nízký elektrický dojezd (avšak tak, aby pokryl určitou část průměrného denního nájezdu) a další kilometry autonomie dodat pomocí prodlužovače dojezdu. Důležitým aspektem při určování je také souhrnná hmotnost vozu, kde platí obdobná pravidla. Hustota energie fosilních paliv je řádově vyšší, než v bateriích. Pro benzín je přibližně 46 MJ/kg, zatímco pro Li-Ion baterii se pohybuje do 0,9 MJ/kg. [1] Pro zajištění velkého dojezdu je tedy zapotřebí velké kapacity baterie, což s sebou nese vysokou hmotnost a tím pádem i spotřebu paliva. I z tohoto důvodu se tedy vyplatí strategie menších baterií. Výrobci však k této problematice přistupují různě, jak ukazují níže příklady z produkce. [4]



Graf 8 - Dodatečné náklady a dodatečná váha v závislosti na dojezdu [5]

Pro určení režimu, v němž bude spalovací motor pracovat, je nutné určit bod, v němž vykazuje nejlepší možnou účinnost v daných podmínkách. Graf ukazuje průběh účinnosti motoru od firmy Mahle, který je vyvinutý speciálně jako prodlužovač dojezdu. Je vidět, že s nejvyšší účinností tento motor pracuje ve 3500 min^{-1} . Tato hodnota se však různí podle použitého motoru. Vidíme ale také, že oblast, ve které účinnost neklesá pod 30%, je mnohem větší. Je tedy možné při zohlednění dalších aspektů (hlučnost, emise, požadovaný kroutící moment) zvolit jiný operační bod spalovacího motoru.



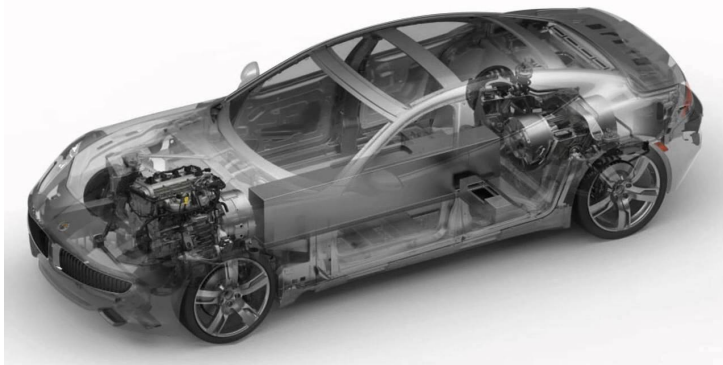
Graf 9 - Účinnost motoru v závislosti na otáčkách [10]

Kromě celkové účinnosti spojení spalovacího motoru s generátorem je dalším důležitým faktorem pro jeho konstrukci tzv. NVH faktor. Ten je souborným označením pro hluk, vibrace a hrubost chodu. U hybridních vozidel je podstatný zejména z důvodu nízké hlučnosti elektrické části pohonné soustavy. Po spuštění a uvedení do vysokých otáček optimálních z hlediska účinnosti by tak spalovací motor mohl být rušivým elementem při provozu. [10]

4.5 Příklady S-HEV

4.5.1 Fisker Karma

Prvním produkčním sériovým hybridem se stal Fisker Karma. Jedná se o luxusní vůz vyšší



Obrázek 5 - Uspořádání pohonu vozu Fisker Karma [13]

třídy, konkurent především elektromobilu Tesla Model S. Byl konstruován s ohledem na jízdní dynamiku, proto je poháněn elektromotorem o výkonu 300 kW a v roli generátoru slouží zážehový čtyřválcový turbodmychadlem přepíňovaný motor o výkonu 200 kW. Výroba probíhala mezi lety 2011-2012, bylo vyrobeno přibližně 2 500 kusů a vůz nebyl komerčně úspěšný. Byl kritizován především pro příliš vysokou hmotnost a kvůli tomu i vysokou spotřebu paliva. Německá TÜV naměřila v Charge-Sustaining módu spotřebu 9,2 L/100 km, což u takto velkého

vozu přibližně odpovídá spotřebě podobně výkonného diesellového motoru. Na českém trhu se prodával za cenu od 3 milionů korun. [11]

4.5.2 Nissan e-Power

Pod značkou e-Power montuje automobilka Nissan svůj sériový hybridní pohon do malých vozů. V Japonsku se jedná o model Note, jenž by měl brzy začít být prodáván i v Evropě. Koncepce Nissanu je velmi odlišná od běžné strategie. e-Power používá pouze malý (a lehký) akumulátor o kapacitě 1,5 kWh, trakční elektromotor o výkonu 80 kW a v sérii benzinový tříválec 1,2 o výkonu 58 kW. Tento pohon je schopný jízdy čistě na elektřinu maximálně na vzdálenost několika stovek metrů. Vozidlo není plug-in hybridem – elektřina je generována výhradně spalovacím motorem. Přesto však podle tvrzení automobilky poskytuje v městském provozu lepší efektivitu, než čistě spalovací verze díky optimálnímu řízení a práci spalovacího motoru pouze v nejefektivnějším bodě. Automobilka dále jako výhody zdůrazňuje plynulost akcelerace a okamžité reakce elektromotoru. Díky malým bateriím bylo také možné udržet nízkou pořizovací cenu ve srovnání s jinými plnohodnotnými hybridními vozy. [12]

4.5.3 LEVC TX

Aktuálně jediným vozidlem licencovaným pro provoz taxislužby v Londýně je LEVC TX. Jedná se o moderního pokračovatele klasických černých londýnských taxi. Původní čistě britská firma LTI je nyní ve vlastnictví čínské Geely a vývoj tohoto vozu tak probíhal v součinnosti s Volvem, jenž patří do téhož koncernu. TX pohání elektromotor o výkonu 110 kW z baterie a prodlužovač dojezdu je tříválcový 1,5 litrový benzinový turbomotor o výkonu 63 kW. Elektrický dojezd se má pohybovat okolo 100 km v reálném provozu a kombinovaný až 600 km. Základní cena se pohybuje v přepočtu okolo 1,7 milionu Kč, což je asi o 100 000 Kč více, než předchozí čistě naftový model. Firma plánuje vyrábět až 20 000 těchto vozů ročně. [13]

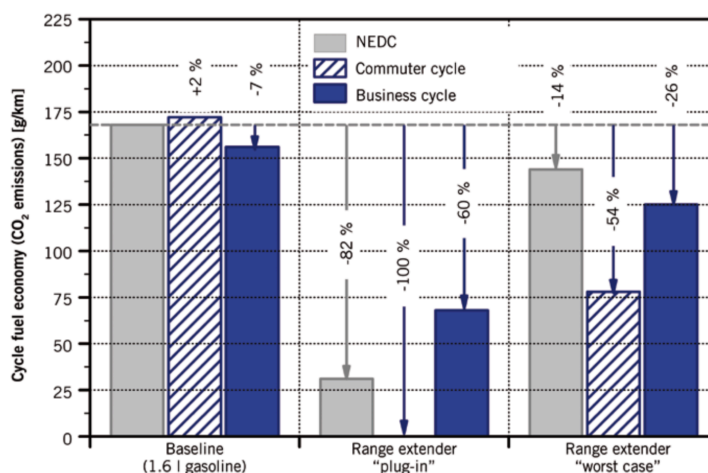
4.5.4 Koncepty a experimentální vozidla

Lotus Evora 414E

V roce 2013 představila firma Lotus koncept sportovního sériového hybridu. Kromě nízké hmotnosti, skvělých dynamických parametrů a jízdních vlastností byl kladen důraz na každodenní použitelnost. Tento vůz disponuje kombinovaným dojezdem 480 km a možností ujet čistě na elektřinu přes 50 km. Tento vůz byl však vyroben především jako demonstrátor firmou Lotus nově vyvinutého prodlužovače dojezdu. Jedná se o 1,2 litrový zážehový tříválec o výkonu 37 kW při 3 500 min⁻¹, jenž vyniká vysokou tepelnou účinností. [14,15]

Audi A1 Mahle

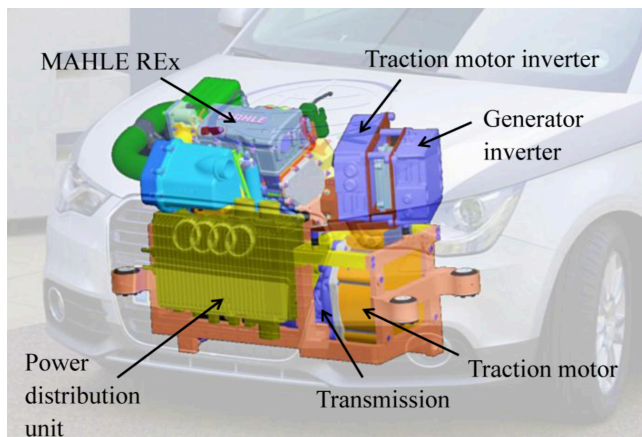
V roce 2012 se společnost Mahle zaměřila na konstrukci spalovacího motoru speciálně pro provoz v roli prodlužovače dojezdu, jež implantovala do městského Audi A1. S důrazem na nízkou cenu, vysokou účinnost, nízkou hlučnost a kultivovanost vznikl čtyřtákní dvouválec o objemu 900 cm³ a výkonu 30 kW. Díky kompaktním rozměrům motoru se pod kapotu vešel zároveň trakční elektromotor o výkonu 55 kW. Nárůst hmotnosti včetně baterií dosáhl pouze 200 kg (z toho motor a generátor dohromady 70 kg). Hybrid byl navržen tak, aby byl schopen Charge-sustaining režimu až do rychlosti 120 km/h a čistě na elektřinu ujet 80 km. K tomu mu slouží 15 kWh baterie. [9,10]



Graf 10 - Srovnání spotřeby konceptu S-HEV Mahle s fiktivním klasickým zážehovým vozem. [16]

Graf 10 srovnává emise tohoto experimentálního vozidla v porovnání s fiktivním vozem poháněným benzinovým motorem 1,6 l. v různých jízdních cyklech – NEDC, 190 km dlouhém „každodenním“ cyklu a 610 km dlouhém „pracovním“ cyklu. Porovnání je provedeno jak pro případ plně nabitě baterie na začátku

cyklu, tak pro případ plně vybité baterie. Sériový hybrid vykazuje ve všech případech nižší emise CO₂ a spotřebu, než fiktivní čistě spalovací vůz.



Obrázek 6 –Uspořádání SHEV v experimentálním Audi A1 upraveném firmou MAHLE. [23] Zleva: řídicí jednotka, REx, převodovka, usměrňovače a trakční elektromotor.

Fiat 500 KSPG

Firma KSPG představila netradiční spalovací motor v roli prodlužovače dojezdu. Do prostoru pro rezervní pneumatiku vozu Fiat umístila dvouválec uspořádaný do V, kdy každý válec je napojen na zvláštní generátor a dochází tak ke kompenzaci vibrací. Výhodou mají být minimální zástavbové rozměry. Ostatní parametry jsou srovnatelné s dalšími obdobnými motory – objem 0,8l a výkon 30 kW. [5]

Mazda Demio EV Technology

Mazda, jenž se dlouhodobě zabývá vývojem Wankelova motoru, použila tento jako prodlužovač dojezdu do experimentálního vozu na základě modelu Demio (v Evropě známý jako Mazda 2). [17] Rotační motor je konstrukčně zajímavý z důvodu teoreticky nízkých vibrací i hluku, jakožto i vysokého specifického výkonu a teoreticky vysoké efektivity. V minulosti tento typ motoru vykazoval úskalí v oblasti životnosti utěsnění spalovací komory a v oblasti emisí z důvodu pronikání oleje do spalovacích prostor. Podle posledních informací Mazda stále pracuje na vylepšení této technologie a v blízké budoucnosti by se měl objevit produkční hybrid s Wankelovým motorem. [18]

Také Audi vyvíjelo SHEV s rotačním motorem, jenž měl být umístěn pod podlahou zavazadlového prostoru. Vznikl tak koncept A1 e-tron. Od původně

plánované produkční verze bylo ale nakonec upuštěno. Přesto je rotační spalovací motor atraktivním pohonem generátoru.

4.5.5 BMW i3 REX

i3 REX (z anglického Range Extender – prodlužovač dojezdu) je v současnosti nejprodávanější sériové hybridní vozidlo. Existují dvě varianty tohoto vozu; čistě elektrická (BEV) a sériový hybrid. Jedná se o



městský čtyřmístný, **Obrázek 7 - BMW i3. [BMW]**

pětidveřový vůz o délce 3

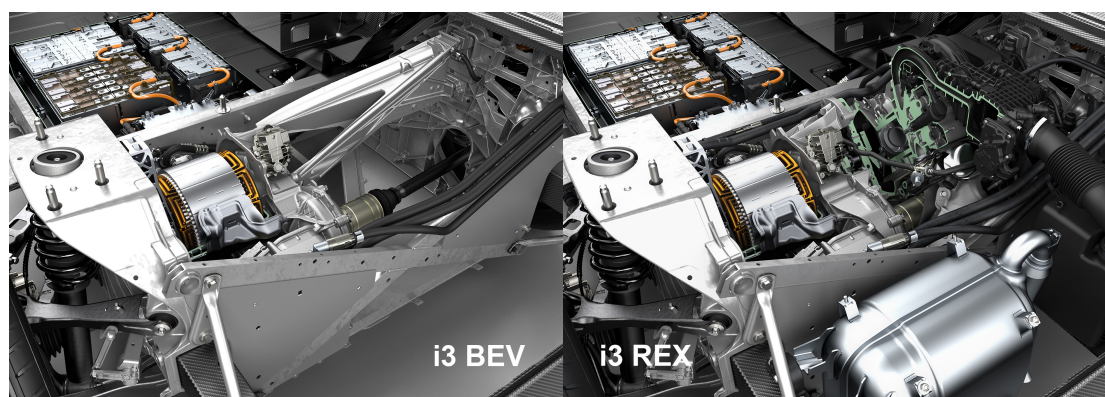
999 mm s pohonem zadních kol a elektromotorem umístěným v zadní části dvouprostorové samonosné karoserie. Vyznačuje se futuristickým designem. Zadní dveře se otevírají proti směru jízdy a integrují v sobě B sloupek. Dále je vůz velmi úzký (1 775 mm) a vysoký (1 578 mm) – minimalizuje tak čelní plochu při zachování prostoru pro pasažéry. Pro snížení valivého odporu používá velice úzké a velké pneumatiky o rozměru 155/70 R19. Od roku 2013, kdy produkce začala, prodalo BMW dohromady již 100 000 exemplářů i3, elektrické a hybridní verze přibližně ve stejném počtu.

Vůz má zvýšenou podlahu, pod níž se nachází svazek lithium-iontových baterií. Přední část vozu je vyhrazena deformačním zónám a periferiím. Díky pětiprvkovému nezávislému zavěšení zadních kol je maximalizován prostor mezi koly. V levé polovině šířky mezi nápravou se tak nachází trakční elektromotor a v případě verze s prodlužovačem dojezdu je spalovací motor vměstnán mezi elektromotor a zavěšení pravého zadního kola, jak ilustruje **Error! Reference source not found.** Díky tomu tak vůz nabízí rovnou podlahu zavazadelníku a objem 270 dm³, jenž se vyrovná běžným městským vozům typu VW Polo. Zajímavostí je, že z důvodu úspory hmotnosti používá i3 jádro karoserie z uhlíkových vláken. To tak váží jen 67 kg, což je přibližně o 30% méně, než by vážila ocelová struktura. Elektrický vůz váží 1 245 kg a REX 1 365 kg, což

zahrnuje 235 kg baterií. Pro porovnání neprodávanější evropský vůz VW Golf s benzinovým motorem 1.4 TSI váží 1 225 kg.

4.5.5.1 Elektrický vůz (BEV)

Obě verze pohání elektromotor o výkonu 125 kW (v nejnovější sportovní verzi i3s až 135 kW). Původně se do vozu montovaly 60 Ah akumulátory, jejichž kapacita je přibližně 18,8 kWh. Od roku 2017 byly akumulátory zvětšeny na 94 Ah a 27,2 kWh. Dojezd původní elektrické verze je podle evropského NEDC cyklu 190 km, u verze s větší baterií pak 312 km při průměrné spotřebě okolo 13 kWh/100km. V reálných podmínkách se tak dojezd pohybuje okolo 150, resp. 200 km. Vůz je schopen zrychlení 0-100 km/h za 7,3 s a z důvodu vysoké spotřeby energie ve vyšších rychlostech je maximální rychlost elektronicky omezena na 150 km/h. Dobíjení je možné jak z 230V sítě, kdy nabíjení celkové kapacity baterií trvá asi 10h, tak z 380V sítě, kdy je čas potřebný k dobití zkrácen asi na 3 hodiny.



Obrázek 8 - Porovnání uspořádání pohonu BMW i3 BEV a i3 REX [24]

4.5.5.2 Sériový hybrid (REx)

Hlavním rozdílem verze s prodlužovačem dojezdu je přidání dvouválcového čtyřtákního benzinového motoru o objemu 647 cm³ s výkonem 25 kW a kroutícím momentem 55 Nm při 4 300 min⁻¹. Díky nádrži na 9l paliva je schopný zvýšit dojezd vozu přibližně o 150 km. Dohromady spalovací motor, nádrž a generátor váží přibližně 120 kg, což znamená prodloužení dojezdu přibližně o 1,25 km/kg. Elektromotor s bateriemi na 150 km reálného dojezdu váží 285 kg, což představuje 0,53 km/kg. Strategie řízení nevyužívá složitějších principů

adaptace podle dat GPS. V praxi proto probíhá tak, že vůz funguje v Charge-Depleting módu, tedy chová se jako elektromobil až do okamžiku, kdy SoC dosáhne přibližně 5%. Poté se zapne spalovací motor s generátorem a nadále vůz pracuje v Charge-Sustaining módu. Vzhledem k malému výkonu spalovacího motoru a generátoru však není vůz schopen rychlé jízdy po dálnici v Charge-Sustaining módu.

	i3	i3 REX	Fisker Karma	LEVC TX	Note e-Power	Evora 414E
Parametry						
Kapacita baterie [kWh]	27,2	27,2	20,1	31	1,5	17
El. výkon [kW]	125	125	300	110	80	304
El. dojezd (NEDC) [km]	312	238	83	129	5	56
Celk. dojezd (NEDC) [km]	312	410	483	600	650	480
0-100 [s]	7,3	8,1	5,9	13,2	10,3	4
Hmotnost DIN [kg]	1245	1365	2405	2230	1220	1760
Prodlužovač dojezdu						
Objem [cm ³]	-	647	1998	1477	1198	1198
Výkon [kW]	-	28	191	63	58	35
Typ, počet válců	-	řadový, 2	řadový 4, turbo	řadový 3, turbo	řadový, 3	řadový, 3

Tabulka 4 - Porovnání parametrů BMW i3 s vybranými S-HEV

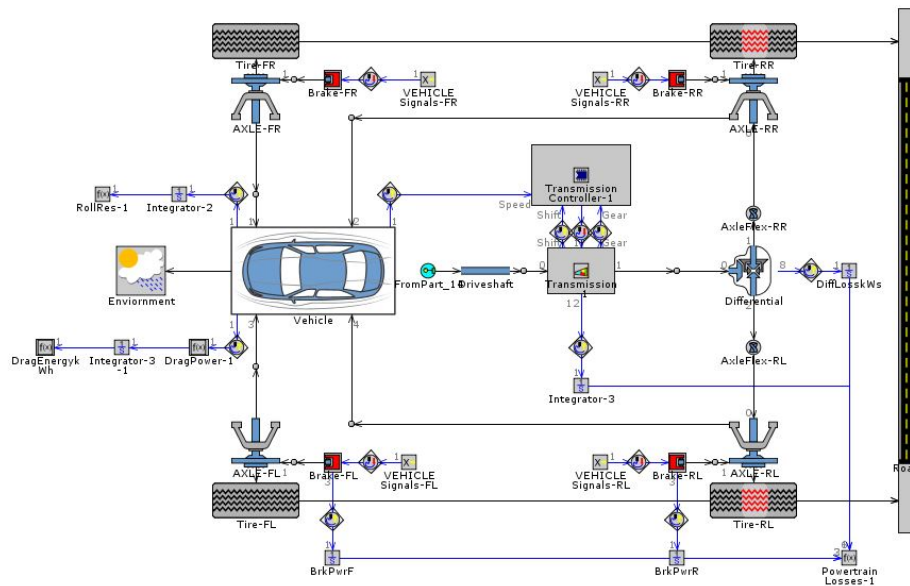
5 Simulace BMW i3 v programu GT-Suite

Pro praktické zkoumání byl zvolen vůz BMW i3 z několika důvodů. Je sériově vyráběným vozidlem zavedené automobilky, jehož prodeje již v roce 2017, 4 roky po zahájení výroby, překonaly 100 000 kusů [19]. Jedná se tedy o dostatečně zdokumentované vozidlo, u něhož je možné ověřit závěry práce s reálnými hodnotami. Dále je BMW i3 vhodné pro simulaci právě z důvodu, že existuje elektrická a hybridní verze, které se liší v zásadě pouze zástavbou spalovacího motoru a pro obě verze existují data deklarovaná automobilkou a také nezávisle naměřená data [20,21]. To umožnilo vytvořit nejprve jednodušší model elektrické verze a ten optimalizovat, otestovat a kalibrovat. Následně byl přidán spalovací motor a tak vznikl kompletní model sériového hybridu i3 REx.

Tvorba modelu, simulace i studie byly provedeny v programu GT-Suite, softwaru společnosti Gamma Technologies, který používá pro simulace většina vývojářských firem nejen v automobilovém průmyslu.

Cílem práce byla tvorba věrohodného modelu vozu i3 a i3 REx, jeho otestování a následně zkoumání možností, jak by bylo možné zlepšit některé parametry těchto vozů – především spotřebu energie a dojezd. Vybrány byly následující úpravy: zvýšení kapacity baterií, instalace dvoustupňové převodovky pro přenos točivého momentu z trakčního elektromotoru na nápravu a zvýšení účinnosti spalovacího motoru hybridu. Dále bylo nutné posoudit, zda by tyto úpravy vylepšily parametry natolik, aby bylo možné uvažovat o jejich implementaci. Zkoumán byl i vliv stárnutí baterie na výše uvedené parametry.

Model je zjednodušený a zabývá se základními souvislostmi. Některé vnější vlivy jako například změna teploty prostředí jsou nad rámec této práce a nebyly uvažovány. Důležité je zdůraznit, že tato práce se týká původního modelu s 60 Ah baterií, pro kterou byla k dispozici níže uvedená experimentální data.



Obrázek 9 - Model BMW i3 s 2° převodovkou v GT-Suite

5.1 Tvorba modelu

Vedoucí této práce, Ing. Rastislav Toman, poskytl základní model vozu i3. Ten byl nejprve prozkoumán a následně upraven pro účely této práce. Pro upřesnění parametrů modelu se vycházelo z oficiálních dat poskytnutých automobilkou a dále z experimentálních dat. National Idaho Laboratory zkoumala několik vozů i3 i i3 REx v různém stádiu opotřebení a zaměřila se především na akumulátory, dynamické parametry vozů a spotřebu energie. Naměřená data chování akumulátorů byla odečtena a vložena přímo do GT. Chování baterie by tak mělo dobře odpovídat realitě.

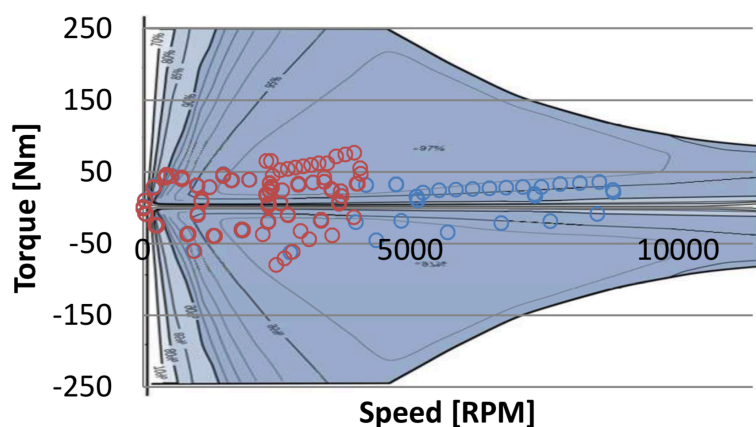
5.1.1 Úpravy zadaného modelu

Nejprve proběhla kontrola, že technické údaje a rozměry vozu v modelu odpovídají dostupným informacím o voze. Aby bylo možné porovnat model s naměřenými daty spotřeby, bylo nutné přidat do modelu tzv. integrátory, které integrují výstupy z jednotlivých celků modelu. Ty bylo nutné pomocí matematických operací upravit tak, aby se výstupem staly ty veličiny, které se nacházejí v referenčních datech. Následovala tvorba a zástavba modelu obsahujícího dvoustupňovou převodovku u výstupu z trakčního motoru a dále byl využit Pacejkův model pneumatik tak, aby byl zpřesněn valivý odpor kol a umožněn prokluz hnaných kol při rozjezdu při měření dynamických vlastností.

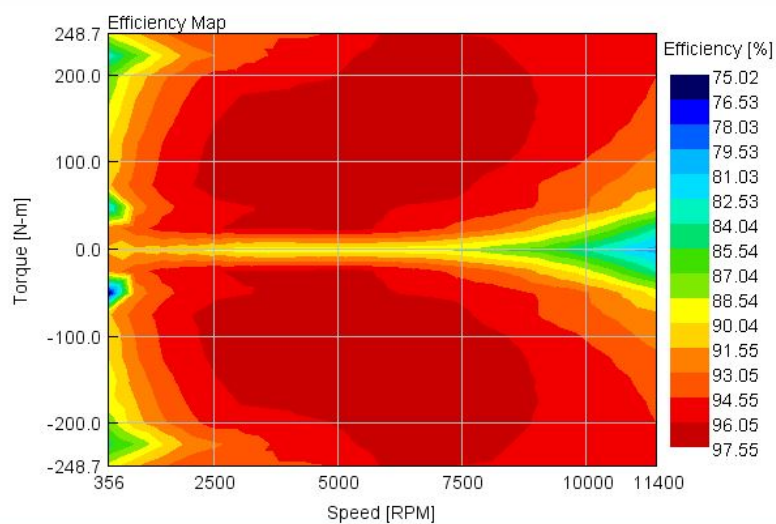
Také byly do hnacích součástí přidány torzní členy pro zpřesnění jejich chování. Pro účely testování bylo nutné parametrizovat vstupní údaje do nastavení programu a také naprogramovat všechny jízdní situace, které bylo rozhodnuto testovat.

5.1.1.1 Účinnost trakčního motoru

Největším úskalím modelu se ukázal být trakční motor. Bohužel nebylo možné získat přímo od BMW přesná data účinnosti jejich použitého motoru. Byl proto použit jiný model, poskytnutý vedoucím práce. Ten neodpovídal přesně referenčním hodnotám a tak byl ručně upraven, aby vykazoval hodnoty více podobné grafu [22]. Mapu elektromotoru se podařilo částečně optimalizovat, avšak nebylo možné ji zpřesnit zcela. Zde se tak nachází největší odchylka modelu oproti reálnému vozu.



Graf 11 - Skutečná účinnost trakčního motoru BMW i3



Graf 12 - Účinnost trakčního motoru modelu

5.2 Kalibrace modelu

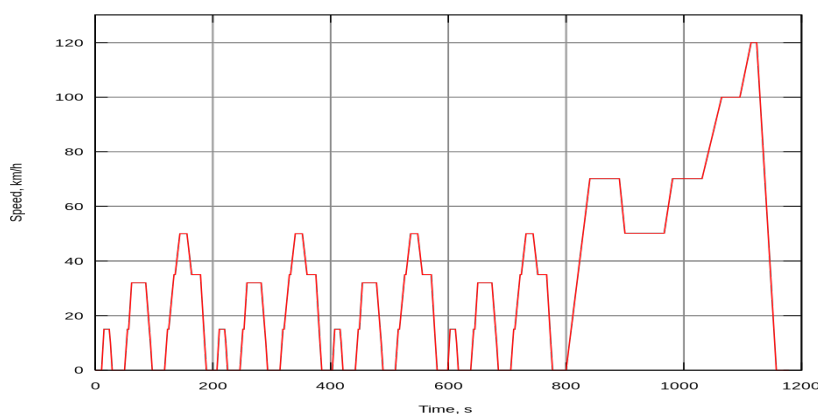
Model byl kalibrován porovnáním zrychlení a spotřeby v evropském cyklu NEDC a americkém HWFET. Výsledky byly porovnávány a model upravován, než bylo dosaženo uspokojivé přesnosti. Zejména bylo potřeba oproti původnímu modelu snížit rekuperaci energie, protože původně byl model schopen rekuperovat výrazně více, než ve skutečnosti.

5.2.1 Jízdní cykly

Aby bylo možné porovnávat spotřebu, vznikly standardizované měřicí cykly. Zpravidla každá světová oblast používá vlastní cyklus, jenž vychází z tamního provozu. Budou představeny ty cykly, které byly použity v této práci.

5.2.1.1 NEDC

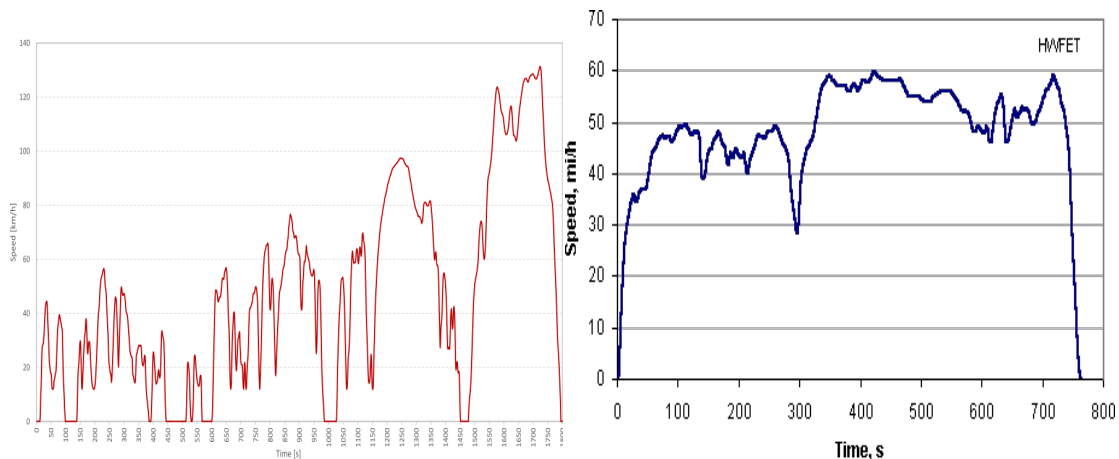
Pro porovnání spotřeby modelu s reálným vozem byl vybrán cyklus NEDC z důvodu dostatečného množství dat. NEDC je standardizovaný cyklus pro homologaci a měření spotřeby všech automobilů v Evropské Unii používaný od roku 1997 do roku 2017.



Graf 13 - Rychlostní profil cyklu NEDC

5.2.1.2 WLTP, HWFET

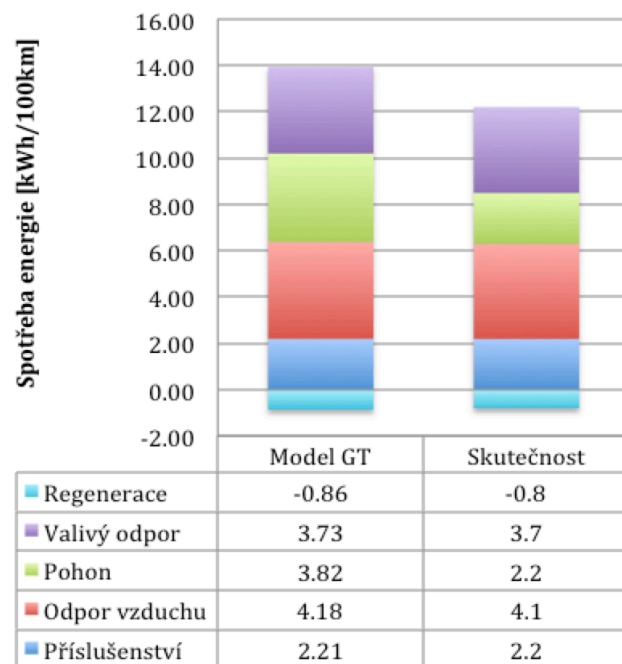
Od roku 2018 budou vozidla homologována podle nového cyklu WLTP, který je realističtější a zároveň by měl fungovat celosvětově. Osobních automobilů se týká test třídy „Class 3“. Ve Spojených státech je potom používaným cyklem HWFET. Na rozdíl od evropského neobsahuje pomalé městské úseky, ale více odpovídá provozu na americké dálnici.



Graf 14 - Rychlostní profil cyklu WLTP Class 3, respektive HWFET

5.2.2 Porovnání spotřeby v jízdních cyklech s modelem

Porovnání spotřeby model vs. skutečnost



Tabulka 5 - Porovnání spotřeby ze simulace vs. naměřené [20]

	Spotřeba energie [kWh/100km]	
	Model	Naměřeno
NEDC	13,91	12,90
HWFET	11,76	13,06

Graf 15 - Rozbor spotřeby v cyklu NEDC

Jak již bylo uvedeno výše, z důvodu dostupnosti dat bylo porovnání provedeno v testu NEDC a HWY. Pro NEDC jsou k dispozici přesnější data, která dělí spotřebu do kategorií. Je patrné, že kromě kategorie „Pohon“ model věrně kopíruje naměřená data. Kategorii „Pohon“ tvoří z významné části ztráty na trakčním elektromotoru, pro něž nebylo možné získat přesnou mapu účinnosti, jak bylo uvedeno výše. Zdroj této nepřesnosti je tedy určen. Simulované hodnoty spotřeby energie v porovnání s naměřenými v obou cyklech shrnuje Tabulka 5. Je patrné, že kvůli nepřesnosti v modelu vykazuje simulace v obou případech asi

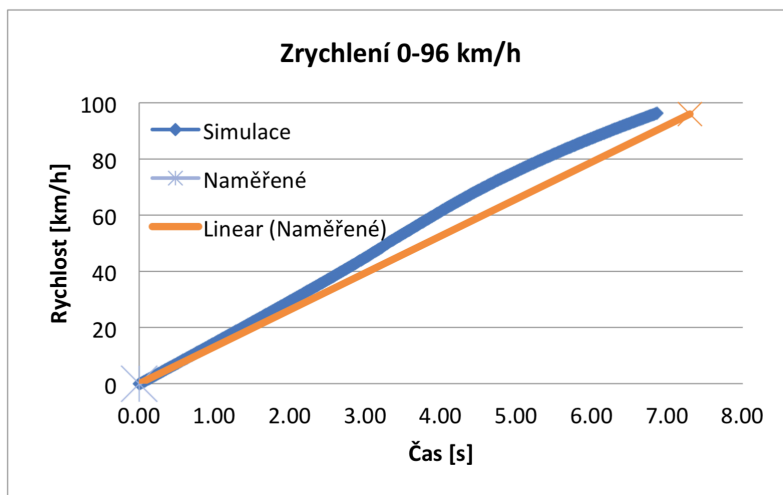
o 1 kWh/100km vyšší spotřebu. Tato odchylka však není zásadní pro validaci modelu. Pokud se týče dojezdu, udávaná hodnota pro 60 Ah baterii je v cyklu NEDC 190 km. V modelu se podařilo dosáhnout dojezdu na úrovni 155 km v témž cyklu. Část tohoto rozdílu je způsobena vyšší spotřebou modelu.

5.2.3 Dynamické vlastnosti

Další oblastí pro ověření správnosti modelu je kontrola dynamických vlastností. Byla provedena série testů pro porovnání s naměřenými hodnotami zrychlení v různých jízdních situacích.

5.2.3.1 Zrychlení 0-96 km/h

Byl proveden test plné akcelerace z klidu do rychlosti 60 mil/h, tj. 96 km/h. Čas pro zrychlení vyšel přibližně 6,9 s, což je o 0,3 s rychlejší, než bylo naměřeno. Rozdíl je tedy méně než 5%.



Graf 17 - Zrychlení 0-96 km/h

5.2.3.2 Ostatní

Pro kalibraci byly provedeny další dynamické testy, jež shrnuje Tabulka 6. Model vykazuje lepší hodnoty zrychlení, než skutečný vůz s odchylkou od 20% do 40%. Jednou z příčin může být, že ve skutečnosti po sešlápnutí akcelérátoru nějakou chvíli trvá, než elektronika dovolí elektromotoru vydat plný výkon. V modelu však elektromotor začne plný výkon dodávat okamžitě. Další možný rozdíl může být dán softwarovým omezením maximálního výkonu ve vyšších rychlostech z důvodu vysoké spotřeby energie, což by vysvětlovalo narůstání rozdílu při vyšších rychlostech.

Tabulka 6 - Porovnání dynamických parametrů [20]

Test			Čas		
Počáteční rychlost [mph]	Konečná rychlost [mph]	Stoupání [%]	Model	Naměřeno	Odchylka [%]
35	55	0	2,43	2,9	19,3
35	55	3	2,63	3,5	33,1
35	55	6	2,88	3,7	28,5
35	70	0	5,06	6,3	24,5
55	80	0	4,89	6,9	41,1

5.3 Studie

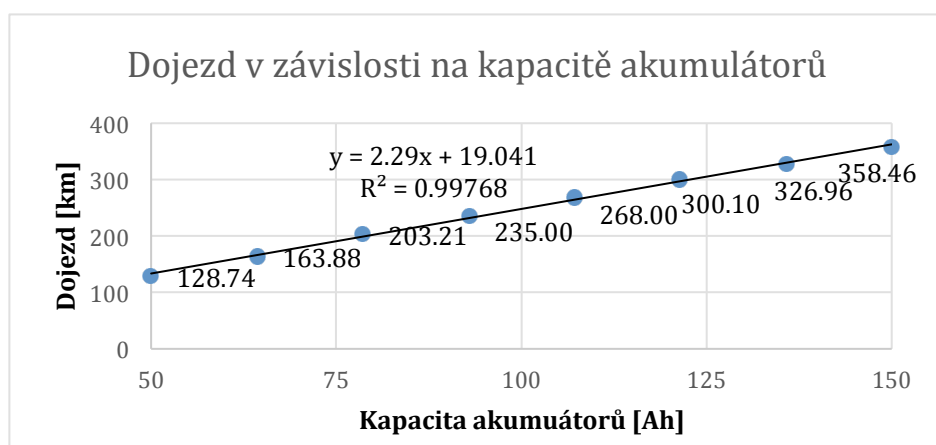
Model byl validován a dále následují studie zkoumající možnosti zlepšení parametrů elektromobilu BMW i3.

5.3.1 Vliv kapacity baterie na dojezd s uvažováním hmotnosti baterií

Se zvyšováním kapacity narůstá dojezd, ale zároveň také stoupá hmotnost celého vozu. Výchozí bod byl stanoven sériovou verzí BMW i3, jejíž akumulátory váží při kapacitě 60 Ah 235 kg [20]. Je předpokládána lineární závislost kapacity akumulátorů na hmotnosti, z hodnot hmotnosti a kapacity baterie BMW i3 byla stanovena měrná hmotnost akumulátorů 3,92 kg/Ah. V programu byl poté vypočítán dojezd 5 variant a z modelu vyplývá, že pro kapacitu baterie v intervalu od 50 Ah do 150 Ah je možné pro tento konkrétní případ stanovit lineární závislost dojezdu na kapacitě baterií. Po odečtení z grafu je závislost následující:

$$\text{Dojezd [km]} = 2,29 \cdot \text{Kapacita [Ah]} + 19,041$$

Je tedy možné výrazně zvýšit dojezd kapacitou akumulátorů, avšak dalším důležitým aspektem, který je zapotřebí zvážit, jsou náklady.



Graf 18 - Dojezd v závislosti na kapacitě akumulátorů

Tabulka 7 - Nastavení parametrů pro studii velikosti akumulátorů

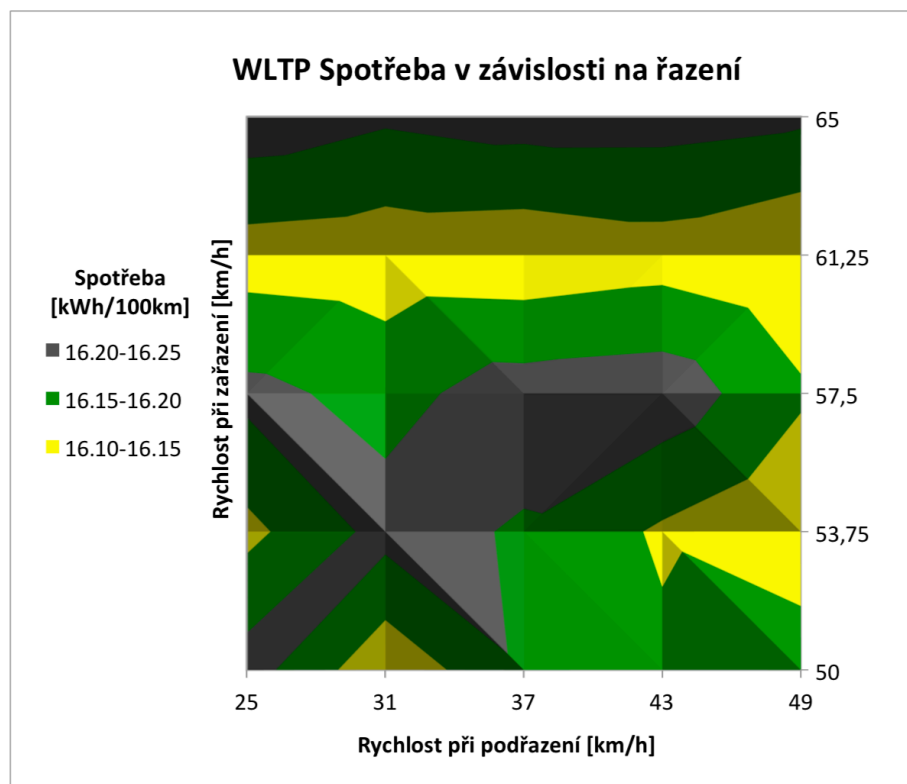
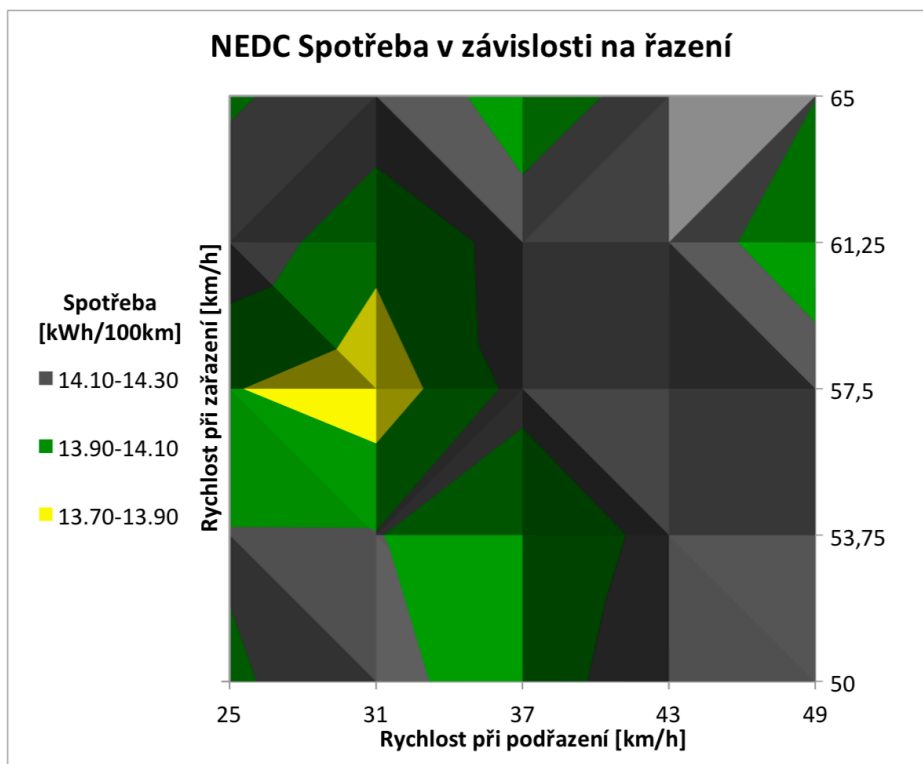
Nastavení parametrů pro studii velikosti akumulátorů								
Případ číslo	1	2	3	4	5	6	7	8
Hmotnost prázdného vozidla [kg]	1254	1310	1366	1422	1478	1534	1590	1646
Přídavná hmotnost podle NEDC [kg]	75	75	75	75	75	75	75	75
Kapacita baterie [Ah]	50	64,3	78,6	92,9	107,1	121,4	135,7	150

5.3.2 Optimalizace 2stupňové převodovky a určení ideálních okamžiků řazení pro spotřebu v jízdních cyklech

Další možností, jak snížit spotřebu energie a prodloužit dojezd, je použití dvoustupňové převodovky pro snížení otáček trakčního motoru ve vyšších rychlostech vozidla. Pro účely simulace byla do modelu přidána jednoduchá dvoustupňová převodovka s možností nastavit změnu převodů podle aktuální rychlosti vozu a s možností určit převodové poměry.

První stupeň byl zvolen o převodovém poměru $i_{s1} = 9,665$, což odpovídá převodu jednostupňové převodovky v BMW i3. U druhého stupně byl zvolen převod $i_{s2} = 4,47$, jenž byl určen s ohledem na jízdní cykly. Poté byla provedena studie s cílem určit nejvhodnější okamžiky k řazení pro co nejnižší spotřebu energie v cyklech NEDC a WLTP.

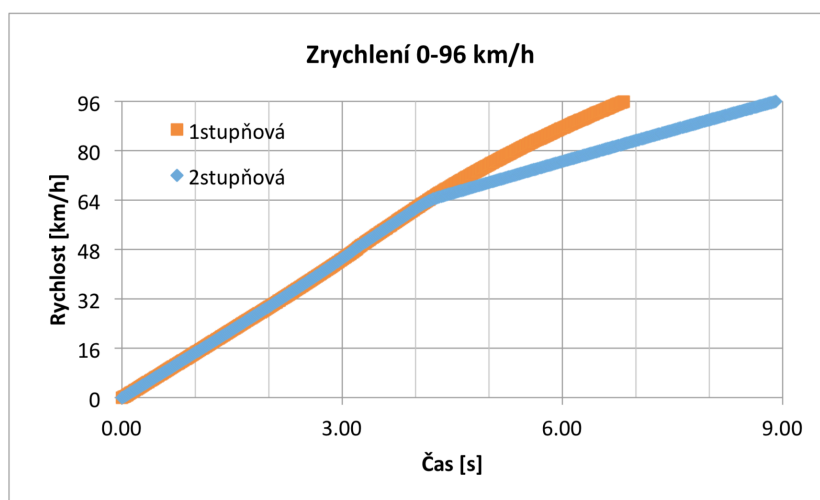
Z Graf 18 je patrné, že spotřeba v cyklu WLTP není příliš závislá od okamžiku přeřazení, mění se pouze v řádu desetin kWh/100km. Nejnižší (žlutá oblast grafu) vychází pro zařazení v 61,25 km/h a podřazení při 49 km/h. V cyklu NEDC jsou rozdíly větší, pohybují se přibližně v intervalu jedné kWh/100km. Nejlepší hodnota vyšla pro zařazení při 57,5 km/h a podřazení ve 31 km/h, avšak hned druhá nejnižší spotřeba byla dosažena ve stejných rychlostech přeřazení, pro které byla dosažena nejnižší spotřeba ve WLTP (viz Graf 19). Proto byly tedy rychlosti zařazení v 61,25 km/h a podřazení ve 49 km/h zvoleny jako optimální. Je ovšem důležité zmínit, že takto vypočtené hodnoty se do velké míry odvíjí od závislosti účinnosti trakčního motoru na otáčkách a točivém momentu. Tato studie tedy odpovídá mapě účinnosti trakčního elektromotoru použitého v modelu, takže nemusí být aplikovatelná na reálný vůz BMW i3.



5.3.3 Vliv 2stupňové převodovky na jízdní dynamiku a spotřebu

Byl prozkoumán vliv vložení dvoustupňové převodovky s výše určenými okamžiky řazení na jízdní dynamiku a spotřebu. Zrychlení z 0-96 km/h proběhne

asi o 2 sekundy pomaleji, než s jednostupňovou převodovkou. Přesto je však zrychlení stále pod 10s, tedy dostačující. Ze simulace je však patrné, že pro zkoumaný model není 2° převodovka vhodná. Trakční motor se dostává během měřicího cyklu do oblastí s menší účinností a dále ztráty kvůli dalším přidaným prvkům pohonného ústrojí stály za zvýšením spotřeby nad hodnoty pro model s jednostupňovou převodovkou.



Graf 19 – Porovnání zrychlení s 1° vs. 2° převodovkou

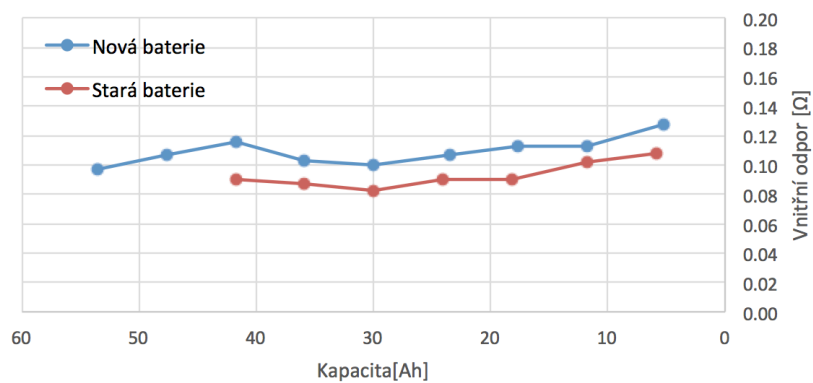
Tabulka 8 - Porovnání spotřeby s 1° vs. 2° převodovkou

Spotřeba [kWh/100km]	1°	2°
NEDC	13,91	14,17
WLTP	14,49	14,55
HWFET	11,76	11,85

5.3.4 Vliv stárnutí baterie na dojezd, spotřebu a jízdní dynamiku

Dále byl zkoumán vliv stárnutí baterie na dojezd, spotřebu a jízdní dynamiku. Do modelu byla vložena experimentální data zjištěná Národní laboratoří v Idahu [20], na jejichž základě byly provedeny simulace. U vozu s najetými 38 700 km klesla maximální kapacita z 60 Ah na 47,5 Ah. To se zásadním způsobem podepsalo na snížení dojezdu. Ten klesl ze 155 km na 122 km. Zároveň však stárnutím klesl vnitřní odpor baterií (viz. Graf 20). Ve výsledku se tak poněkud zlepšila spotřeba energie. Tyto změny jsou ale pouze v řádu jednotek procent, jak ilustruje Tabulka 8. Na dynamických parametrech je změny neprojevíly.

Vnitřní odpor při vybíjení



Graf 20 - Vnitřní odpor při vybíjení

Tabulka 9 - Spotřeba nová vs. starší baterie

Spotřeba [kWh/100km]	Nová	Starší
NEDC	13,91	13,87
WLTP	14,49	14,43
HWFET	11,76	11,73

6 Simulace BMW i3 REx

Model sériového hybridu BMW i3 REx je podobný modelu elektrického vozu. K tomu je přidán schematizovaný spalovací motor a dále řídicí členy. Ve skutečnosti pracuje většina Range Extenderů včetně motoru i3 v několika pracovních bodech (zpravidla ve třech) a na parametry mají vliv různé okolnosti, například studený start či teplota okolí (viz. 4.3.1.1) . Pro zjednodušení je spalovací motor modelu nahrazen členem generující točivý moment a otáčky. Ten tak pracuje pouze v jednom pracovním bodě. Tento pracovní bod byl odvozen z údajů poskytovaných automobilkou, Range Extender tedy poskytuje 55 Nm při 4300 min⁻¹. Další parametry, jako je velikost nádrže a měrná spotřeba paliva, jsou modelovány pomocí určení maximální doby běhu motoru. Dále je možné nastavit spuštění motoru v závislosti na aktuální rychlosti vozu a na úrovni SoC. Byla provedena kalibrace modelu tak, aby se chováním podobal produkční verzi a následně studie úpravy parametrů pro zvýšení dojezdu sériového hybridu. Parametry vybrané k úpravě jsou změna měrné spotřeby paliva, zvětšení kapacity nádrže a jejich kombinace. Dále byl zkoumán vliv stárnutí baterie na dojezd a spotřebu sériového hybridu.

6.1 Kalibrace modelu

Kalibrace modelu byla provedena zadáním všech známých hodnot [21,22] do modelu a otestováním jeho zrychlení 0-96 km/h, spotřeby v NEDC a HWFET cyklech a dojezdu v cyklu NEDC. Byla vypočtena maximální doba běhu spalovacího motoru ze zadaných parametrů podle rovnice

$$t_{sp} = \frac{1,08 \cdot 10^8 \cdot D_{sp} \cdot S_{REx}}{\pi \cdot M \cdot n}$$

kde t_{sp} je maximální čas v sekundách, D_{sp} udávaný dojezd na spalovací motor v km, S_{REx} normovaná spotřeba i3 REx v kWh/100km, M točivý moment motoru v Nm a n otáčky motoru za minutu. Čas vychází pro 9litrovou nádrž při průměrné spotřebě 13,5 kWh/100km a dojezdu na spalovací motor 150 km (dle tvrzení automobilky) 2 943,5 sekund.

6.2 Testy a studie

Pro ověření modelu byly provedeny testy zrychlení 0-96 km/h a testy spotřeby a dojezdu. Výsledky shrnuje Tabulka 9. Je patrné, že přidaná hmotnost Range Extenderu a jeho periférií zvyšuje spotřebu elektrické energie v Charge-Depleting módu a prodlužuje čas akcelerace. Nárůst hodnot je však v souladu s experimentálními a oficiálními daty.

Tabulka 10 - Porovnání i3 BEV a i3 REx

	Model		Experimentální data	
	BEV	REx	BEV	REx
NEDC spotřeba [kWh/100km]	13,91	14,16	12,9	13,5
HWFET spotřeba [kWh/100km]	11,76	12,1	13,1	14,1
Celkový dojezd NEDC [km]	155	287	190	320
Zrychlení 0-96 km/h [s]	6,86	7,25	7,2	7,8

6.2.1 Vliv optimalizace spotřeby Range Extenderu na dojezd

Nejprve bylo nutné spočítat průměrnou měrnou spotřebu spalovacího motoru použitého v BMW i3 REx. Ta byla vypočtena pomocí vzorce

$$m_{pe} = \frac{100 \cdot V_n \cdot \rho_{ben}}{D_{sp} \cdot S_{REx}}$$

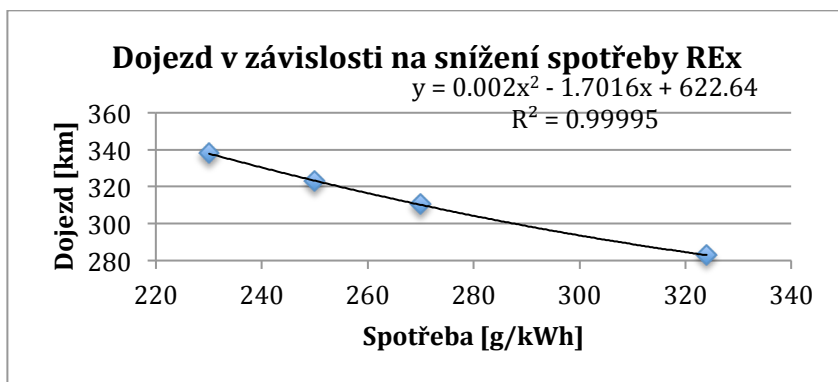
kde m_{pe} je měrná spotřeba v g/kWh, V_n objem nádrže v litrech a ρ_{ben} hustota benzínu v g/L. Objem nádrže uvažujeme podle dat výrobce 9L a hustotu benzínu 730 g/L. Průměrná spotřeba tohoto motoru tedy vychází 324 g/kWh. Optimalizací motoru přímo pro použití jako prodlužovač dojezdu je možné snížit spotřebu motoru až na 240g/kWh jako v případě motoru Mahle [23]. Pro změření vlivu snížení spotřeby Range Extenderu na dojezd byla vypočítána maximální doba běhu spalovacího motoru pro jiné hodnoty měrné spotřeby podle vzorce

$$t_{sp} = \frac{1,08 \cdot 10^8 \cdot V_n \cdot \rho_{ben}}{m_{pe} \cdot \pi \cdot M \cdot n}$$

Jako možné hodnoty snížení spotřeby byly uvažovány hladiny 270 g/kWh, 250 g/kWh a 230 g/kWh. Výsledky shrnuje Tabulka 11. Při snížení spotřeby na 270 g/kWh činí nárůst dojezdu pouze asi 18 km. Při snížení spotřeby až na 230 g/kWh je nárůst dojezdu už významných 55 km, ovšem tak velké snížení spotřeby by zajisté vyžadovalo značné investice do vývoje motoru. Při použití malé, 9litrové nádrže tedy není ospravedlnitelné z ekonomického hlediska.

Tabulka 11 - Dojezd při snížení spotřeby REx

Kapacita nádrže [L]	REX max. čas běhu [s]	Spotřeba [g/kWh]	Dojezd [km]
9	2944	324	282,9
9	3535	270	310,3
9	3826	250	323,0
9	4153	230	338,0



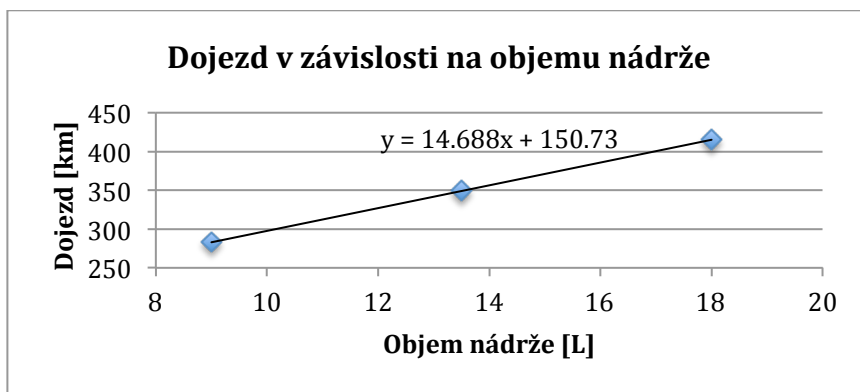
Graf 21 - Dojezd v závislosti na snížení spotřeby REx

6.2.2 Vliv zvětšení kapacity nádrže na dojezd

Relativně jednoduchý způsob zvětšení dojezdu vozidla s prodlužovačem dojezdu je zvětšení palivové nádrže. Výhoda takového řešení je nízká přidaná hmotnost a v případě nízkých objemů nádrže jako v našem případě též malá prostorová (zástavbová) náročnost. Jako nevýhoda může být vnímán fakt, že zvětšení nádrže nijak neprospívá ekologické šetrnosti vozidla, což je důležitý aspekt u elektrických a hybridních vozidel. Toto řešení také může představovat odklon konceptu vozu dále od elektromobilu směrem ke klasickému spalovacímu motoru. Nicméně jak ukazuje Tabulka 12, vliv na prodloužení dojezdu tohoto řešení je značný.

Tabulka 12 - Dojezd při zvětšení kapacity nádrže

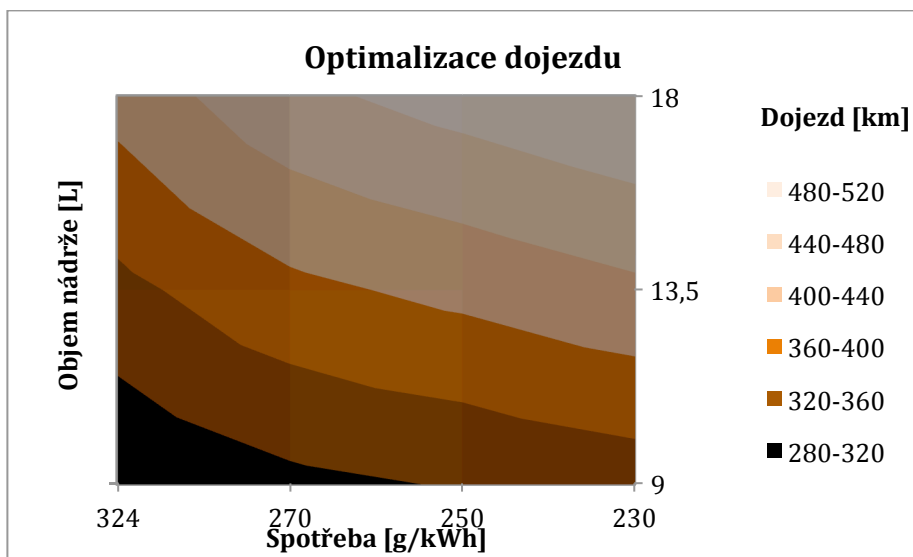
Kapacita nádrže [L]	REX max. čas běhu [s]	Spotřeba [g/kWh]	Dojezd [km]
9	2944	324	282,9
13,5	4416	324	349,0
18	5888	324	415,1



Graf 22 - Dojezd v závislosti na zvětšení kapacity nádrže

6.2.3 Zvětšení kapacity nádrže a optimalizace spotřeby Range Extenderu

V případě, že by poptávka požadovala u tohoto typu vozu zásadní nárůst dojezdu (např. pro použití v taxislužbě), ukazuje se, že při kombinaci obou výše uvedených postupů je možné značně prodloužit dojezd při zachování relativně nízkého objemu nádrže. V případě požadavku na velký dojezd a zároveň na větší šetrnost k životnímu prostředí, než v případě čistě spalovacího vozu, by také mohly být ospravedlnitelné vyšší vývojové náklady na speciální Range Extender. Jak ukazuje Graf 23, je možné při optimalizaci spalovacího motoru, zvětšení nádrže na 18 litrů a zachování stávající kapacity akumulátorů zvětšit dojezd až na hranici 500 km.



Graf 23 - Optimalizace dojezdu

6.2.4 Vliv stárnutí baterie na spotřebu a dobu běhu Range Extenderu

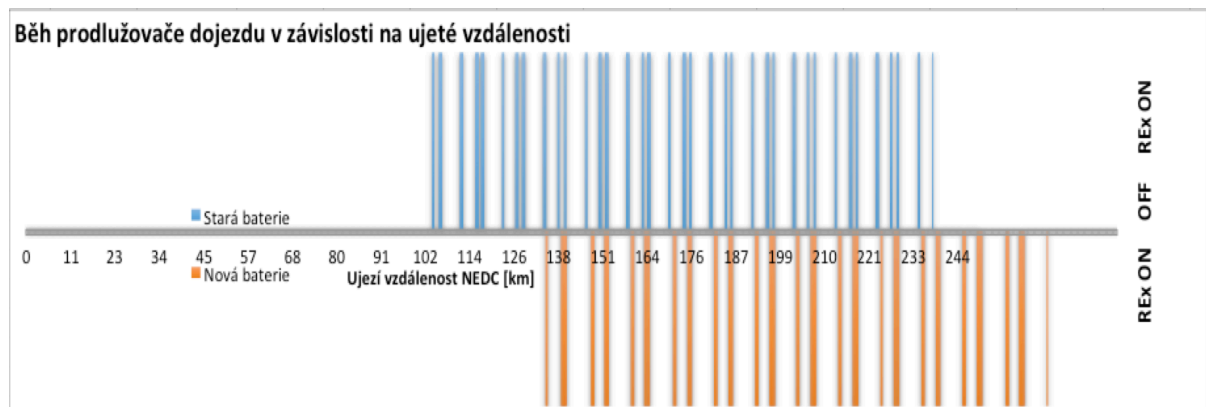
Byl otestován také vliv stárnutí baterie na spotřebu, dojezd a chování hybridního vozu. Tabulka 13 shrnuje hodnoty získané simulací. Výsledky jsou obdobné

elektrické verzi vozu. Spotřeba nepatrně klesla díky poklesu vnitřních odporů baterie, avšak dojezd poklesl výrazně z důvodu zmenšení maximální kapacity.

Tabulka 13 - Porovnání staré vs. nové baterie u REX

	Baterie	
	Nová	Stará
NEDC spotřeba [kWh/100km]	14,16	14,11
HWFET spotřeba [kWh/100km]	12,10	12,07
WLTP spotřeba [kWh/100km]	14,63	14,59
Celkový dojezd NEDC [km]	287	251
Zrychlení 0-96 km/h [s]	7,25	7,25

Z Graf 24 je patrné, že u starší baterie se prodlužovač dojezdu zapne asi o 36 km dříve, než u nové baterie. Úměrně tomu také dříve dojde palivo a následně dojde k vyčerpání veškeré dostupné energie.



Graf 24 - Zapínání prodlužovače dojezdu v závislosti na ujeté vzdálenosti

7 Závěr

V první části byla provedena rešerše hybridních vozidel. Nejprve byla uvedena hybridní vozidla obecně, důvod jejich existence a byla provedena klasifikace existujících řešení podle uspořádání a podle funkce. Následně se teoretická část zaměřila na sériová hybridní vozidla. Bylo popsáno, jakým způsobem pracují, jaké je jejich zaměření a konstrukční výhody a nevýhody. Poté byly uvedeny možné strategie řízení sériového hybridu a nakonec uveden přehled konkrétních existujících vozidel s tímto uspořádáním.

Praktická část byla provedena v programu GT-Suite. Nejdříve byl kalibrován model elektromobilu BMW i3. Podařilo se odladit model, který popisuje chování vozu. Dochází však k jistým odchylkám od skutečnosti, jelikož nebylo možné získat zcela přesná data pro trakční elektromotor. Následně byly provedeny studie zkoumající vliv změny kapacity a stárnutí baterie na spotřebu a dojezd elektromobilu. Bylo zjištěno, že již při nájezdu okolo 40 tisíc km významně klesá dojezd vozu. Také byla prověřena možnost přidání dvoustupňové převodovky do pohonného řetězce. To se však pro tento konkrétní model ukázalo jako nevhodné.

V poslední části byl podroben zkoumání model sériového hybridu BMW i3 REx. Nejprve byl ověřen soulad modelu se skutečností. Poté byly provedeny studie zkoumající vliv změny kapacity nádrže a měrné spotřeby spalovacího motoru na dojezd. Bylo zjištěno, že při zachování koncepce vozu je úpravami možné zvýšit dojezd až k hranici 500 km. Nakonec byl zkoumán vliv stárnutí baterie na moment spuštění spalovacího motoru a na celkový dojezd. Přestože z výše uvedených příčin není model zcela přesný, je možné s jeho pomocí získat představu o vlivu provedených změn na finální parametry vozu. Cíl práce byl tedy splněn.

Pro další upřesnění modelu by bylo nutné získat a zpracovat přesnější data pro chování baterie, trakčního elektromotoru a řídicí elektroniky přímo od výrobce či je získat vlastním měřením.

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Uspořádání paralelního hybridu [2].....	4
Obrázek 2 - Uspořádání sériovo-paralelního hybrid, Generator - generátor	5
Obrázek 3 - Uspořádání sériového hybridního pohonu [3]	8
Obrázek 4 - Uspořádání S-HEV s elektromotory v kolech [3]	9
Obrázek 5 - Uspořádání pohonu vozu Fisker Karma [13].....	19
Obrázek 6 –Uspořádání SHEV v experimentálním Audi A1 upraveném firmou MAHLE. [24].....	22
Obrázek 7 - BMW i3. [BMW].....	23
Obrázek 8 - Porovnání uspořádání pohonu BMW i3 BEV a i3 REx [24]	24
Obrázek 9 - Model BMW i3 s 2° převodovkou v GT-Suite.....	28

Seznam grafů

Graf 1- Relativní spotřeba S-HEV a P-HEV v závislosti na rychlosti	10
Graf 2 - Ekonomické porovnání TCO různých druhů pohonu [6]	11
Graf 3 - SoC v čase, strategie zapínání spalovacího motoru [4]	12
Graf 4 - Operační bod při nízkém SoC. Při vyšším SoC motor pracuje v nižších otáčkách. [7].....	13
Graf 5 - Operační bod při vysokém SoC. Při nižším SoC motor dodává vyšší točivý moment. [7]	13
Graf 6 - Dojezd v závislosti na teplotě okolí v městském a mimoměstském provozu [4].....	14
Graf 7 - Průměrná denní ujetá vzdálenost v Německu [9]	16
Graf 8 - Dodatečné náklady a dodatečná váha v závislosti na dojezdu [5]	18
Graf 9 - Účinnost motoru v závislosti na otáčkách [10]	19
Graf 10 - Srovnání spotřeby konceptu S-HEV Mahle s fiktivním klasickým zážehovým vozem. [16].	21
Graf 11 - Skutečná účinnost trakčního motoru BMW i3	30
Graf 12 - Účinnost trakčního motoru modelu	30
Graf 13 - Rychlostní profil cyklu NEDC	31
Graf 14 - Rychlostní profil cyklu WLTP Class 3, respektive HWFET.....	32
Graf 15 - Rozbor spotřeby v cyklu NEDC.....	32
Graf 16 - Porovnání spotřeby NEDC model vs. simulace	33
Graf 17 - Zrychlení 0-96 km/h	33
Graf 18 - Dojezd v závislosti na kapacitě akumulátorů.....	34
Graf 19 – Porovnání zrychlení s 1° vs. 2° převodovkou	37
Graf 20 - Vnitřní odpor při vybíjení	38
Graf 21 - Dojezd v závislosti na snížení spotřeby REx	41
Graf 22 - Dojezd v závislosti na zvětšení kapacity nádrže	42
Graf 23 - Optimalizace dojezdu.....	42
Graf 24 - Zapínání prodlužovače dojezdu v závislosti na ujeté vzdálenosti	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Hodnoty parametru u pro P-HEV.....	4
Tabulka 2 - Hodnoty parametru u pro S-HEV	5
Tabulka 3 - Parametry pro výpočet minimálního výkonu vozidla	16
Tabulka 4 - Porovnání parametrů BMW i3 s vybranými S-HEV.....	26
Tabulka 5 - Porovnání spotřeby ze simulace vs. naměřené [22]	32
Tabulka 6 - Porovnání dynamických parametrů [22]	34
Tabulka 7 - Nastavení parametrů pro studii velikosti akumulátorů	35
Tabulka 8 - Porovnání spotřeby s 1° vs. 2° převodovkou.....	37
Tabulka 9 - Spotřeba nová vs. starší baterie	38
Tabulka 10 - Porovnání i3 BEV a i3 REx.....	40
Tabulka 11 - Dojezd při snížení spotřeby REx	41
Tabulka 12 - Dojezd při zvětšení kapacity nádrže.....	41
Tabulka 13 - Porovnání staré vs. nové baterie u REx	43

Seznam literatury

- [1] Lino GUZZELLA and Antonio SCIARRETTA, *Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization*, 3rd ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.
- [2] C. PARAG JOSE and S. MEIKANDASIVAM, "A Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles," in *Lecture Notes in Mechanical Engineering.*, 2017, pp. 211-229.
- [3] Chris MI and M. Abul MASRUR, *Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives*, 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Ltd, 2018.
- [4] Guenter K. FRAIDL, Frank BESTE, and Paul E. KAPUS, "Challenges and Solutions for Range Extenders - From Concept Considerations to Practical Experiences," SAE, Paper 0148-7191, Sep. 2011.
- [5] Jakob ANDERT, Eduard KÖHLER, Jürgen NIEHUES, and Gregor SCHÜRMAN, "KSPG Range Extender: A New Pathfinder to Electromobility," *MTZ*, vol. 73, May 2012.
- [6] Oscar van VLIET, Thomas KRUIHOF, Wim TURKENBURG, and André FAAIJ, "Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in hybrid, fuel cell and regular cars," *Journal of Power Sources*, vol. 195, Apr. 2010.
- [7] Jongryeol JEONG, Wonbin LEE, and Namdoo KIM, "Control Analysis and Model Validation for BMW i3 Range Extender," *SAE International*, Mar. 2017.
- [8] Madhwi KUMARI, P. R. THAKURA, and D. R. BADODKAR, "Design of Series Hybrid Electric Vehicles," , Mumbai, 2012.
- [9] Robert FISCHER, Günter FRAIDL, and Christian HUBMANN, "Range Extender Module Enabler for Electric Mobility," *ATZ*, vol. 9, May 2009.
- [10] Mike BASSETT, Jonathan HALL, Tony CAINS, and Marco WARTH, "Vehicle Integration of a Range Extender Engine," *MTZ*, vol. 73, Nov. 2012.
- [11] Jan HORČÍK. (2011, Nov.) Hybrid.cz. [Online].
<http://www.hybrid.cz/hybrid-fisker-karma-v-nezavislem-testu-spotreba-21-1100-km>
- [12] Andrea MATTHEWS. (2018, February) Motoring. [Online].
<https://www.motoring.com.au/nissan-note-e-power-2018-review-111177/>
- [13] Gary S. VASILASH. (2017, Nov.) Automotive Design&Production. [Online].
<https://www.adandp.media/articles/the-london-cab-where-tradition-intersects-with-contemporaneity>
- [14] James TURNER, Darren BLAKE, Jason MOORE, and Paul BURKE, "The Lotus Range Extender Engine," *SAE International*, vol. 3, no. 2, Oct. 2010.
- [15] Lotus Cars. Evora 414E Hybrid. [Online].
<http://www.lotuscars.com/engineering/evora-414e-hybrid>
- [16] Bernd MAHR, Mike BASSETT, Jonathan HALL, and Marco WARTH, "Development of an Efficient and Compact Range Extender Engine," *MTZ*,

vol. 72, Nov. 2011.

- [17] Ken GRATTON. (2015, Nov.) Motoring. [Online].
<https://www.motoring.com.au/range-extending-rotary-opportunity-for-mazda-100079>
- [18] Bart OOSTVOGELS. (2018, Mar.) ZERauto.nl. [Online].
<https://zerauto.nl/mazdas-elektrische-auto-krijgt-optioneel-wankelmotor-als-range-extender/>
- [19] Mark KANE. (2017, Oct.) InsideEVs. [Online]. <https://insideevs.com/bmw-i3-100000-rolls-off-assembly-line/>
- [20] Idaho National Laboratory. (2016, Oct.) INL Advanced Vehicles. [Online].
<https://avt.inl.gov/vehicle-button/2014-bmw-i3>
- [21] Idaho National Laboratory. (2016, Oct.) INL Advanced Vehicles. [Online].
<https://avt.inl.gov/vehicle-button/2014-bmw-i3-rex>
- [22] Sanketh JAMMALAMADAKA, Philipp SCHAEFLEIN, and Philipp KAUFFMANN, "Impact of BEV Powertrain architectures on energy consumption in various driving cycles," in *European GT Conference*, Frankfurt am Main, 2017.
- [23] Michael BASSETT, Jonathan HALL, and Gordon KENNEDY, "The Development of a Range Extender Electric Vehicle Demonstrator," *SAE International*, Jan. 2013.
- [24] Chuck VOSSLER. (2014, Dec.) BMW Blog. [Online].
<https://www.bmwblog.com/2014/12/05/underbody-bmw-i3-rex/>

