

**KATEDRA ELEKTRICKÝCH
POHONŮ A TRAKCE
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**



**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
NÁVRH POHONU
ELEKTROMOBILU
S RELUKTANČNÍM MOTOREM**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

KVĚTEN 2022

**KRYŠTOF
VILÍMEK**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Vilímek** Jméno: **Kryštof** Osobní číslo: **492140**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh pohonu elektromobilu s reluktančním motorem

Název bakalářské práce anglicky:

Design of Electric Vehicle with Reluctance Motor Drive

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši literatury ohledně nejdůležitějších součástí pohonu elektromobilu
- 2) Stanovte požadované parametry vozidla
- 3) Vyberte základní součásti jako je úložiště energie, měničová výbava a motor
- 4) Proveďte výpočty nutné pro zjištění parametrů jednotlivých komponent
- 5) Simulujte úsek jízdy navrženého elektromobilu

Seznam doporučené literatury:

Bimal K. Bose, Modern power electronics and AC drives, Prentice-Hall, 2002
M. Ehsani, et al., State of the Art and Trends in Electric and Hybrid Electric Vehicles, IEEE, 2021.
M. Guarnieri, When Cars Went Electric, IEEE Industrial Electronics Magazine, 2011
C. Sulzberger, An early road warrior: electric vehicles in the early years of the automobile, IEEE Power and Energy Magazine, 2004

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Skarolek katedra elektrických pohonů a trakce FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **11.02.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Pavel Skarolek
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlu Skarolkovi za odborné rady založené na znalosti zpracovaného tématu. Také bych rád poděkoval za trpělivost a ochotu při osobních či online konzultacích, díky nimž jsem byl schopen tuto práci dokončit.

PROHLÁŠENÍ

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

V Praze dne 20. května 2022

.....

ABSTRAKT

Primárním cílem tohoto dokumentu je prozkoumat vhodnost synchronních reluktančních motorů pro trakční použití v elektromobilech. Průzkum vhodnosti proběhne prostřednictvím návrhu nejdůležitějších komponent pohonu elektromobilu. Za účelem vyhodnocení přijatelnosti synchronních reluktančních motorů pro trakční použití bude sestaven výpočetní model pro simulaci úseku jízdy elektromobilu. Výstup ze simulace bude podnětem pro vyhodnocení. Sekundárním cílem tohoto dokumentu je na základě simulace úseku jízdy navrženého elektromobilu zhodnotit jeho vhodnost pro užití při cestách na delší vzdálenosti.

Klíčová slova: synchronní reluktanční motor, návrh pohonu, elektromobilita, návrh baterie, simulace jízdních cyklů

ABSTRACT

The primary goal of this document is to explore the suitability of synchronous reluctance motors for traction applications. The exploration of suitability will take place by the means of design of the most important components of an electric drive. In order to evaluate the suitability of synchronous reluctance motors for traction applications, a computational model for the simulation of a section of an electric vehicle's journey will be constructed. The simulation output will be stimulus for evaluation. The secondary goal of this document is to evaluate the suitability of the designed electric vehicle for long range journey applications based on the simulation output.

Keywords: synchronous reluctance motor, drive design, electromobility, battery design, driving cycles simulation

OBSAH

ÚVOD.....	1
KAPITOLA 1: STANOVENÍ POŽADOVANÝCH PARAMETRŮ VOZIDLA.....	2
1.1 TYP ELEKTROMOBILU, JEHO UŽITÍ A KONKURENCE.....	2
1.2 ELEKTROMOTOR.....	2
1.3 ULOŽIŠTĚ ENERGIE.....	2
1.4 MĚNIČOVÁ VÝBAVA.....	2
1.5 VÝKONNOSTNÍ VLASTNOSTI.....	3
KAPITOLA 2: RELUKTANČNÍ MOTORY.....	4
2.1 ZÁKLADNÍ POPIS FUNKCE RELUKTANČNÍCH MOTORŮ	4
2.2 SROVNÁNÍ SYNRM VS IPMSYNRM	4
2.2.1 Zhodnocení točivého momentu a výkonu.....	5
2.2.2 Zhodnocení charakteristik v ustálených stavech.....	7
2.2.3 Chování reluktančních motorů při odbuzování.....	7
2.2.4 Přetížení SynRM	9
2.2.5 Přetížení IPMSynRM a demagnetizace permanentních magnetů.....	10
2.2.6 Testovaný motor	14
2.2.7 Shrnutí.....	14
2.3 SROVNÁNÍ SYNRM VS PMSM	14
KAPITOLA 3: ULOŽIŠTĚ ENERGIE	15
3.1 ÚVOD K BATERIÍM.....	15
3.2 TECHNOLOGIE ČLÁNKŮ	15
KAPITOLA 4: MĚNIČOVÁ VÝBAVA ELEKTROMOBILU	17
4.1 PŘEHLED MĚNIČOVÉ VÝBAVY ELEKTROMOBILU	17
4.2 ÚČINNOST TRAKČNÍHO MĚNIČE.....	18
KAPITOLA 5: ZJIŠTĚNÍ PARAMETRŮ JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT	19
5.1 ZÁKLADNÍ A AERODYNAMICKÉ VLASTNOSTI.....	19
5.1.1 Určení hmotnosti	19
5.1.2 Aerodynamický odpor	19
5.1.3 Sestavení křivky aerodynamického odporu.....	20
5.2 PNEUMATIKY A VALIVÝ ODPOR	21
5.2.1 Volba pneumatiky.....	21
5.2.2 Určení RRC zvolené pneumatiky	23
5.2.2.1 SAE J2452 standard.....	24
5.2.2.2 Rovnice a její korekce.....	24
5.2.3 Sestavení křivky valivého odporu.....	25
5.2.4 Sestavení křivky celkové odporové síly.....	26
5.3 DIMENZOVÁNÍ ELEKTROMOTORŮ A PŘEVODOVEK	26
5.3.1 Elektromotory.....	27
5.3.1.1 Odvození štítkových hodnot pro návrh.....	27
5.3.1.2 Určení maximálních otáček motoru	28
5.3.1.3 Sestavení momentové charakteristiky navrhovaného SynRM.....	28
5.3.1.4 Účinnost SynRM.....	30
5.3.2 Převodovka.....	31

5.3.3	Určení převodů jednotlivých motorů.....	31
5.4	DIMENZOVÁNÍ BATERIOVÉHO SYSTÉMU	35
5.4.1	Parametry pro vyhodnocení návrhu	36
5.4.2	Porovnávané články	36
5.4.3	Baterie sestavená z cylindrických článků.....	39
5.4.4	Baterie sestavená z prismatických článků	40
5.4.5	Zhodnocení testovaných článků.....	41
	KAPITOLA 6: SIMULACE JÍZDY NAVRŽENÉHO ELEKTROMOBILU	42
6.1	WLTP JÍZDNÍ CYKLY	42
6.2	VOLBA ÚSEKU JÍZDY A ZÍSKÁNÍ POTŘEBNÝCH DAT	43
6.2.1	Úsek.....	43
6.2.2	Získání potřebných dat	44
6.3	SPOTŘEBA ELEKTROMOBILU	44
6.3.1	Výpočetní model.....	45
6.3.1.1	Energetická spotřeba motorů.....	45
6.3.1.2	Ztráty na vnitřním odporu baterie	46
6.3.1.3	Rekuperace.....	47
6.3.1.4	Shrnutí principu funkce výpočetního modelu	49
6.3.1.5	Korekce jízdního profilu pro aplikaci na zvoleném úseku.....	50
6.3.1.6	Analýza simulovaného úseku cesty z Prahy do Tallinnu.....	54
6.4	ZRYCHLENÍ	59
	KAPITOLA 7: POROVNÁNÍ NAVRŽENÉHO ELEKTROMOBILU S KONKURENČNÍMI VOZY NA TRHU.....	60
	ZÁVĚR.....	61
	LITERATURA.....	62

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Synchronní reluktanční motor	4
Obr. 2-2 Schéma synchronního reluktančního motoru bez a s permanentními magnety [1]	5
Obr. 2-3 Graf závislosti průměrného točivého momentu na úhlu proudu [1]	6
Obr. 2-4 Momentová a výkonová charakteristika SynRM motoru [1].....	8
Obr. 2-5 Momentová a výkonová charakteristika IPMSynRM motoru [1]	9
Obr. 2-6 Graf závislosti momentu na statorovém proudu SynRM motoru [1]	9
Obr. 2-7 Závislost koeficientu k_T na statorovém proudu [1]	10
Obr. 2-8 Analýza konečných prvků – demagnetizace permanentních magnetů (1) [1] ..	11
Obr. 2-9 Analýza konečných prvků – demagnetizace permanentních magnetů (2) [1] ..	11
Obr. 2-10 Graf závislosti magnetické indukce na natočení rotoru pro různé amplitudy proudů (feritový magnet) [1]	12
Obr. 2-11 Hysterezní křivky různých permanentních magnetů [1]	13
Obr. 2-12 Graf závislosti magnetické indukce na natočení rotoru pro různé amplitudy proudů (MQ2 magnet) [1]	13
Obr. 3-1 Graf hustoty energie různých bateriových technologií [42].....	15
Obr. 3-2 Tabulka parametrů různých technologií článků [43]	16
Obr. 4-1 Schéma měničové výbavy elektromobilu	17
Obr. 4-2 Symbol CCS Type 2 – Combined Charging Systém pro Evropu	17
Obr. 4-3 Mapa účinnosti trakčního měniče.....	18
Obr. 5-1 Graf rychlostní závislosti síly aerodynamického odporu pro různá vozidla	21
Obr. 5-2 Zvolená pneumatika Pirelli PZero 245/35 R21 96 Y XL RFT [3]	22
Obr. 5-3 Štítek zvolené pneumatiky [4]	22
Obr. 5-4 Graf rychlostní závislosti valivého odporu navrhovaného vozidla.....	25
Obr. 5-5 Graf rychlostní závislosti celkové odporové síly působící proti směru zrychlení vozidla	26

SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1 Průměrný točivý moment SynRM a IPMSynRM [1].....	6
Tab. 2-2 Hustota točivého momentu SynRM a IPMSynRM [1].....	6
Tab. 2-3 Charakteristiky v ustálených stavech SynRM a IPMSynRM [1].....	7
Tab. 5-1 Určení hmotnosti navrhovaného elektromobilu	19
Tab. 5-2 Veličiny pro sestavení křivky aerodynamického odporu	20
Tab. 5-3 Nastavení parametrů online kalkulačky	23
Tab. 5-4 Parametry zvolené pneumatiky	23
Tab. 5-5 Parametry referenčního IPMSynRM motoru	27
Tab. 5-6 Srovnání referenčního IPMSynRM s odvozeným SynRM.....	27
Tab. 5-7 Optimální kombinace převodů	32
<i>Tab. 5-8 Tabulka parametrů baterie sestavené z cylindrických článků</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 5-9 Tabulka parametrů baterie sestavené z prismatických článků</i>	<i>40</i>
Tab. 6-1 Shrnutí základních dat charakterizujících jízdní cyklus	43
Tab. 6-2 Tabulka rychlostních limitů a odpovídajících vzdáleností	44
Tab. 6-3 Výsledky teoretického zkušebního procesu WLTP	50
Tab. 6-4 Výstupy výpočetního modelu pro korigované WLTP jízdní cykly (1)	55
Tab. 6-6 Ukázka principu zápisu a analýzy dat simulovaného úseku jízdy	55
<i>Tab. 6-7 Data o úseku 1</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 6-8 Data o úseku 2</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6-9 Data o úseku 3</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 6-10 Data o úseku Praha - Tallinn</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 7-1 Srovnání navrženého elektromobilu s konkurencí</i>	<i>60</i>

Obr. 5-6 Aproximace tvaru výkonové charakteristiky testovaného SynRM.....	28
Obr. 5-7 Výsledná křivka aproximace výkonové charakteristiky testovaného SynRM.....	28
Obr. 5-8 Určení rovnice sklonu výkonové charakteristiky po dosažení maximálního výkonu	29
Obr. 5-9 Orientační momentová charakteristika SynRM	30
Obr. 5-10 Mapa účinnosti SynRM	31
Obr. 5-11 Zjištění rovnic popisujících oblast odbuzování mechanické charakteristiky.....	32
Obr. 5-12 Rychlostní závislosti točivého momentu obou motorů.....	33
Obr. 5-13 Přehled sil působících na vozidlo (1) ..	34
Obr. 5-14 Přehled sil působících na vozidlo (2) ..	35
Obr. 5-15 Zobrazení využitelné kapacity baterie	36
Obr. 5-16 Cylindrický článek LiFePO ₄ 32700 6000 mAh [24] – LiFePO ₄ cyl.....	37
Obr. 5-17 Prismatický článek LiFePO ₄ 135 Ah [25] – LiFePO ₄ pris.....	37
Obr. 5-18 Cylindrický článek NMC 21700 5000 mAh [26] – NMC cyl 21700.....	37
Obr. 5-19 Cylindrický článek NMC 18650 2600 mAh [27] – NMC cyl 18650 (1)	37
Obr. 5-20 Cylindrický článek NMC 18650 2600 mAh [28] – NMC cyl 18650 (2)	38
Obr. 5-21 Prismatický článek NMC 50 Ah [29] – NMC pris 50	38
Obr. 5-22 Prismatický článek NMC 100 Ah [30] – NMC pris 100.....	38
Obr. 5-23 Prismatický článek NMC 150 Ah [31] – NMC pris 150.....	38
Obr. 6-1 Časová závislost rychlosti WLTP plného jízdního cyklu.....	42
Obr. 6-2 Zvolená trasa znázorněna na mapě	44
Obr. 6-3 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 50 km/h.....	51
Obr. 6-4 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 70 km/h.....	51
Obr. 6-5 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 90 km/h.....	52
Obr. 6-6 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 100 km/h	52
Obr. 6-7 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 110 km/h.....	53

Obr. 6-8 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 120 km/h	53
Obr. 6-9 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 130 km/h	54
Obr. 6-10 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 140 km/h	54
Obr. 6-11 Trasa simulovaného úseku s vyznačenými zastávkami na dobítí elektromobilu	56
Obr. 6-12 Zrychlení z 0 na 250 km/h	59

ÚVOD

Elektromobily byly historicky poháněny stejnosměrnými a střídavými stroji. Dnes se používají pro trakční aplikace převážně synchronní motory s permanentními magnety a motory asynchronní. Ačkoli koncept synchronních reluktančních motorů není novinkou, synchronní reluktanční motor je relativním nováčkem ve světě trakčních aplikací. Po světě již dnes elektromobily s takovými motory jezdí, jejich zastoupení je ale mezi elektromobily slabé. Mezi elektromobily jezdící na technologii synchronních reluktančních motorů patří určité ročníky Tesla Model S Performance a Tesla Model 3 Performance. Zmiňované elektromobily mají vždy součástí pohonu kromě motoru reluktančního ještě motor asynchronní.

Synchronní reluktanční motor se zdá být pro trakci potenciální alternativou synchronních motorů s permanentními magnety. Od trakčních motorů se vyžaduje vysoká hustota výkonu a točivého momentu, kompaktnost provedení, veliké záběrné momenty, vysoká účinnost a další požadavky.

Výběrem motoru pro pohánění vozidla ovlivňujeme návrh celého pohonu. Návrh pohonu je kritickým faktorem, který udává jízdní vlastnosti elektromobilu. V dnešní době atraktivní téma délka dojezdu elektromobilu ve srovnání s délkou dojezdu automobilu se spalovacím motorem. Ačkoli elektrické motory mají výrazně vyšší účinnost přeměny energie, nízká hustota uložené energie bateriových technologií v porovnání s fosilními palivy je důvodem, proč mají v dnešní době elektromobily výrazně nižší dojezd než automobily jedoucí na motor spalovací. V budoucnu se dá očekávat vývoj bateriových technologií směrem k větší objemové a hmotnostní hustotě. V současnosti se obecným dojmem populace zdá být, že elektromobil je pro užívání na delších trasách nevhodný.

V Praze dne 20.05.2022

Kryštof Vilímek, autor práce

KAPITOLA 1: STANOVENÍ POŽADOVANÝCH PARAMETRŮ VOZIDLA

Pro návrh pohonu elektromobilu je nutné si nejdříve vyjasnit, co od vozidla vlastně vyžadujeme a jaký účel má plnit. Na základě našich požadavků pak patřičně navrheme nejdůležitější součásti elektromobilu tak, aby byly požadavky splněny. Vzhledem ke komplexnosti dimenzování motorů a baterií se z návrhu pohonu elektromobilu v podstatě stává návrh elektromobilu jako celku. Na závěr této práce se podíváme, zda byly požadavky splněny, zda jsou jejich okolnosti realistické, zda jsou ostatní data vycházející z navržených prvků elektromobilu realistická a zajímavé parametry virtuálního elektromobilu porovnáme s parametry konkurenčních vozů na trhu.

1.1 Typ elektromobilu, jeho užití a konkurence

Navrhovaný elektromobil bude výkonný prémiový vůz do města i na dálnici sloužící pro každodenní užívání. Pohodlně zvládne vozit až 4 pasažéry včetně řidiče a jejich nákladu. Bude se od něj vyžadovat dlouhý dojezd, dobré zrychlení, vysoká účinnost přeměny elektrické energie na mechanickou energii a dobrý požitek z jízdy. Vozidlo by mělo být schopné konkurovat automobilům se spalovacími motory z hlediska poskytnutého pohodlí při cestách na delší vzdálenosti (např. cesta k moři na dovolenou). Od elektromobilu bude také vyžadována dobrá manévrovatelnost jak ve městě, tak na dálnici. To znamená pohon všech čtyř kol a poskytnutí vysokého točivého momentu i při dálničních rychlostech.

Mezi konkurenční vozidla na trhu patří Tesla Model S, Porsche Taycan nebo Mercedes-Benz EQS.

1.2 Elektromotor

Elektromobil bude poháněn soustavou dvou stejně dimenzovaných synchronních reluktančních elektromotorů bez vložených permanentních magnetů. Jeden bude umístěn v zadní části vozu a bude pohánět zadní nápravu. Druhý bude umístěn v přední části vozu a bude pohánět přední nápravu. Vzhledem k identickému provedení obou motorů bude optimalizace poskytnutého točivého momentu realizována různými převodovými poměry přenosu točivého momentu na kola. Oba elektromotory budou schopny vracet energii z brzdění zpět do systému neboli rekuperace.

1.3 Uložiště energie

Uložiště energie bude schopno poskytnout dostatečnou energii nejen pro cestování na delší vzdálenosti, ale i pro chod obou motorů na plný výkon najednou a pro přetížení obou motorů po dobu zrychlení z 0 km/h na maximální dosažitelnou rychlost. Požadována bude využitelná kapacita uložité energie 100 kWh. Baterie bude umístěna v podlaze, tudíž kompaktnost a vysoká plošná a objemová hustota energie budou žádoucí.

1.4 Měničová výbava

Vůz bude vybaven systémem výkonových měničů, které umožní jeho optimální chod. Pro každý motor bude ve vozidle nainstalován trakční měnič, který bude měnit energii přijatou z baterie na energii přijatelnou motorem. Další z měničů bude měnit parametry vysokonapěťové baterie na parametry přijatelné nízkonapěťovou baterií, která napájí elektroniku vozidla.

Poslední výkonový měnič zajišťuje energii ze sítě na energii přijatelnou vysokonapěťovou baterií při nabíjení vozidla ze sítě.

1.5 Výkonnostní vlastnosti

Maximální dosažitelná rychlost vozidla je dimenzována na 250 km/h. Jedná se o horní mez rychlosti elektromobilu. S touto maximální rychlostí se bude počítat při dimenzování elektromotorů. V pracovním režimu přetížení budou motory schopny dodat výkon a točivý moment na přesažení této rychlosti. Elektronické omezení rychlosti nad 250 km/h je ke zvážení.

Elektromobil bude také schopen zrychlit z 0 km/h na 100 km/h za maximálně 10 s, ovšem výrazně kratší doba, je očekávána.

Od vozidla bude vyžadována dojezdová vzdálenost alespoň 400 km na jedno nabití.

KAPITOLA 2: RELUKTANČNÍ MOTORY

2.1 Základní popis funkce reluktančních motorů

Reluktanční motory fungují na principu změny odporu magnetického obvodu motoru neboli reluktance. Reluktanční motory se dělí na spínané a synchronní. Pro účel této práce se zaměříme na reluktanční motory synchronní.

Konstrukce statoru synchronního reluktančního motoru je stejná jako u klasického synchronního motoru. Rozdíl je v geometrii rotoru a principu vzniku točivého momentu. Točivý moment klasických synchronních motorů také může vznikat změnou reluktance, ale jedná se pouze o část celkového momentu. Točivý moment synchronních reluktančních motorů vzniká čistě na principu změny odporu magnetického obvodu.

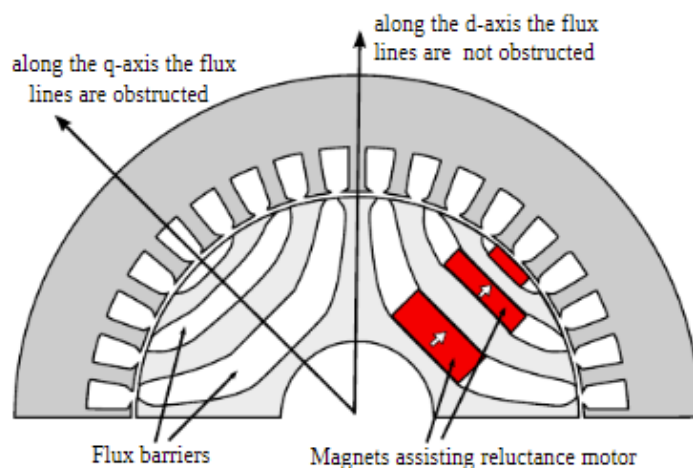


Obr. 2-1 Synchronní reluktanční motor

Točivý moment synchronních reluktančních motorů je tedy závislý na anizotropii konstrukce rotoru. Rozdíl reaktancí podélné osy d (direct) a příčné osy q (quadrature) je dosažen vytvořením tokových bariér. Tokové bariéry jsou vhodně zvolené vzduchové mezery, které v ose q výrazně zmenšují „množství železa“ na rozdíl od osy d , na kterou nemají vliv.

2.2 Srovnání SynRM vs IPMSynRM

Alternativní provedení SynRM zahrnuje vložení permanentních magnetů do vzduchových mezer. Tato úprava zvýší hustotu momentu a zlepší účinnost. Zároveň však ale omezí přetížitelnost, což je velmi důležitá vlastnost motorů pro trakční aplikace. Vliv zakomponování permanentních magnetů do konstrukce synchronního reluktančního motoru na důležité parametry bude v této sekci popsán podrobněji.



Obr. 2-2 Schéma synchronního reluktančního motoru bez a s permanentními magnety [1]

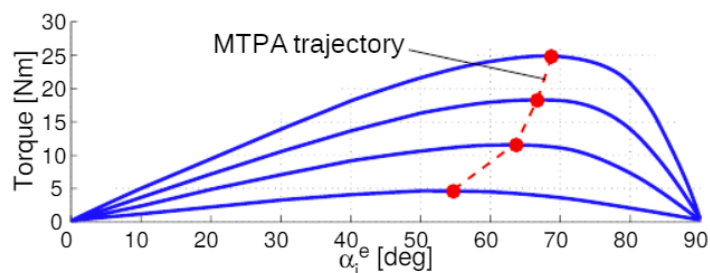
Porovnání provedeme zaměřením se na parametry/charakteristiky, které jsou důležité pro trakční elektrický motor. Od takového motoru bychom chtěli:

- vysokou hustotu výkonu – snížení hmotnosti
- schopnost velkého přetížení – akcelerační přechodné děje
- malé zvlnění momentu – snížení vibrací a zvuku
- schopnost efektivně pracovat při odbuzování – operace ve vysokém rozsahu rychlostí
- vysokou účinnost – nízké ztráty

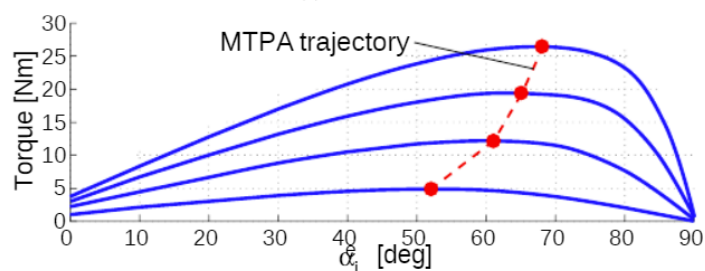
Hodnocení vlastností SynRM a IPMSynRM proběhne na základě experimentální studie, kdy byly měřeny různé charakteristiky reluktančních motorů s různými konstrukčními vlastnostmi (Ferritové PM). Ačkoli se jedná o motory konkrétní velikosti, dají se odvodit obecné závěry pro reluktanční motory různých velikostí.

2.2.1 Zhodnocení točivého momentu a výkonu

Točivý moment je základní parametr trakčních motorů, na který se klade důraz zvláště u prémiových vozů. Vysoký točivý moment umožňuje dosáhnout rychlé akcelerace, což je zvláště u elektromobilů atraktivní vlastnost. Výsledkem prvního testu jsou křivky závislosti točivého momentu na úhlu vektoru proudu.



(a) REL motor



(b) PMAREL motor

Obr. 2-3 Graf závislosti průměrného točivého momentu na úhlu proudu [1]

Měření z článku [1] bylo provedeno pro statorové proudy 5 A, 10 A, 15 A, 20 A (amplitudy). Úhlem proudu je myšlen vektor proudu tvořený řídicí strukturou měniče tak, aby motor pracoval vždy v bodě trajektorie MTPA (Maximum Torque Per Ampere). K určení takového proudu je nutné znát polohu rotoru. Na základě tohoto testu můžeme porovnat průměrné hodnoty momentu obou motorů. Z výsledku měření je vidět, že motor asistovaný ferritovými permanentními magnety vyvinul průměrně o 7% vyšší hodnoty točivého momentu než motor bez PM.

Tab. 2-1 Průměrný točivý moment SynRM a IPMSynRM [1]

Statorový proud I (A)	Průměrný moment SynRM T (Nm)	Průměrný moment IPMSynRM T (Nm)
10	11.3	12.1
15	17.7	19.0

Vidíme, že asistence PM průměrný výkon sice zvyšuje, ale jedná se o relativně limitované navýšení.

Permanentní magnety zvyšují hmotnost motoru, ale z hlediska hustoty točivého momentu se jejich implementace vyplatí.

Tab. 2-2 Hustota točivého momentu SynRM a IPMSynRM [1]

Statorový proud I (A)	Hustota točivého momentu SynRM (Nm/l)	Hustota točivého momentu IPMSynRM (Nm/l)
10	9	9.6
20	19.9	21.3

Dále si můžeme všimnout vyznačené MTPA trajektorie. Jedná se o spojení bodů maximálních hodnot momentu pro jednotlivá měření lišících se v hodnotě statorového proudu. Znalost této trajektorie se využívá při řízení motorů. Všimneme si, že pro motor s permanentními

magnety se tato trajektorie lehce posune k nižším hodnotám úhlu vektoru proudu. To je způsobeno natočením výsledného vektoru proudu přítomností PM.

2.2.2 Zhodnocení charakteristik v ustálených stavech

Zajímavé srovnání motorů je analýza vlastností v ustálených stavech. Test v článku [1] byl prováděn napájením motorů různými proudy takovým způsobem, aby produkovaly daný točivý moment v rozsahu od 2 do 12 Nm, pro dvě různé otáčivé rychlosti (Proudy byly zvoleny, aby odpovídaly MTPA trajektorii). V tabulce Tab. 2-3 jsou uvedeny výsledky z měření.

Tab. 2-3 Charakteristiky v ustálených stavech SynRM a IPMSynRM [1]

n (ot/min)	T (Nm)	SynRM			IPMSynRM		
		I_{rms} (A)	PF	ztráty (W)	I_{rms} (A)	PF	ztráty (W)
250	2	2.26	0.64	48	2.00	0.71	25
	4	3.35	0.72	76	3.07	0.78	54
	6	4.40	0.78	114	4.06	0.84	88
	8	5.39	0.81	158	5.03	0.87	128
	10	6.42	0.83	223	6.03	0.88	182
	12	7.43	0.85	290	6.99	0.90	237
500	2	2.25	0.70	67	2.00	0.77	28
	4	3.34	0.75	94	3.07	0.81	63
	6	4.38	0.79	128	4.06	0.86	94
	8	5.38	0.82	180	5.03	0.87	140
	10	6.38	0.83	235	6.03	0.88	194
	12	7.44	0.84	309	6.99	0.89	257

Přestože v motoru jsou nízkoenergetické Ferritové magnety, můžeme si všimnout, že užití permanentních magnetů sníží potřebný statorový proud pro dosažení určitého točivého momentu. Uvedené ztráty jsou celkové, neboli zahrnují i mechanické ztráty, které při 250 ot/min činí 4 W a při 500 ot/min činí 9 W. Jelikož test probíhal pro nízké otáčky a nízký výkon, ztráty byly relativně vysoké (viz. mapa/křivka účinnosti). Při takto nízkých otáčkách převažují Jouleovy ztráty.

Porovnáme-li oba motory s ohledem na ztráty, vidíme značný pokles ztrát při užití permanentních magnetů. Tento pokles je nejzřetelnější při nízkém zatížení. Se zvyšujícím se zatížením poměrný rozdíl ztrát mezi motory klesá.

Z tabulky také vyčteme informace o účinnosti (PF – Power Factor). Když porovnáme SynRM a IPMSynRM, je jasné vidět, že s přidáním permanentních magnetů se účinnost zlepšuje. Tento fakt úzce souvisí s velikostí statorového proudu nutného pro dosažení určitého točivého momentu.

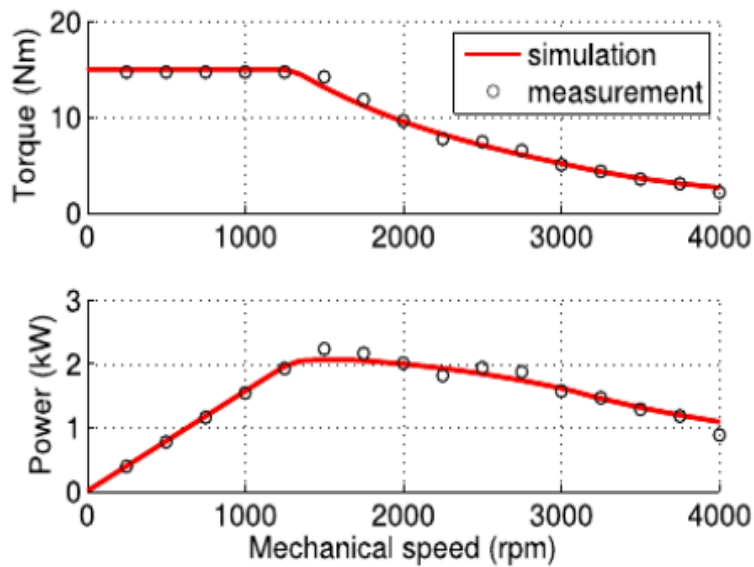
2.2.3 Chování reluktančních motorů při odbuzování

Pracování motoru v režimu sníženého magnetického toku je jednou z nejdůležitějších oblastí při analyzování elektrického motoru a určení jeho vhodnosti pro trakční použití. Je výhodné trakční motory dimenzovat, aby dosáhly maximálního výkonu v otáčkách, které jsou nižší než maximální otáčky, kterých bychom chtěli dosáhnout.

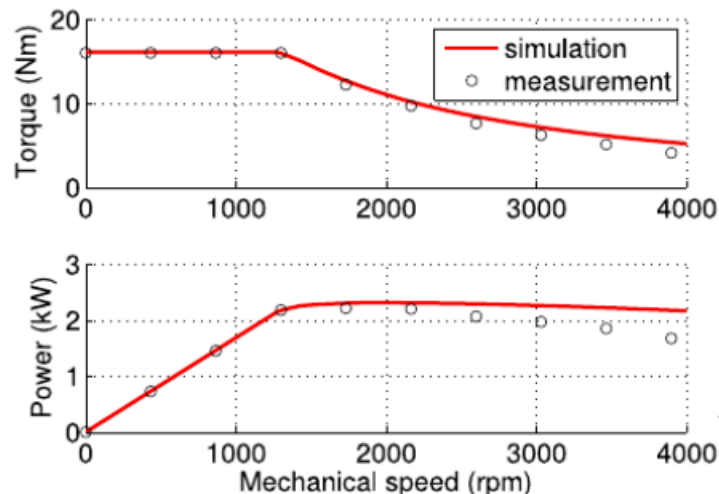
$$P = M\Omega \quad (2-1)$$

Ze vzorce lze odvodit, že po dosažení maximálního výkonu motoru je jedinou možností, jak dále zvyšovat otáčky proces, při kterém se zároveň musí snižovat točivý moment. Tento proces samozřejmě “není zadarmo” a existuje horní hranice otáček, kterých má smysl dosáhnout. Zvyšováním otáček v pracovním režimu odbuzování se snižuje dosažitelný výkon motoru. Následkem tohoto procesu je snižování točivého momentu. Nastane chvíle, kdy síla působící proti směru jízdy vozidla způsobená aerodynamickým a valivým odporem bude natolik velká, že motor nebude schopen dodat dostatečně veliký točivý moment, aby vozidlo nadále zrychloval. V tuto chvíli vozidlo dosáhne své maximální rychlosti.

Chování momentových a výkonových charakteristik SynRM a IPMSynRM motorů v oblasti režimu sníženého magnetického toku je zásadní faktor pro návrh pohonu elektromobilu.



Obr. 2-4 Momentová a výkonová charakteristika SynRM motoru [1]

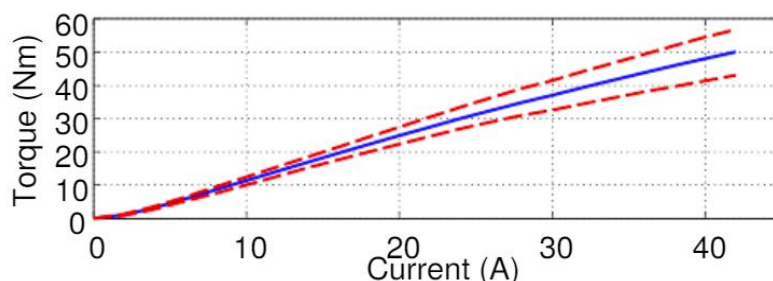


Obr. 2-5 Momentová a výkonová charakteristika IPMSynRM motoru [1]

Principiálně stejný výsledek srovnání SynRM a IPMSynRM se dozvíme i z článku [36] a [38]. Motory v [1] byly testovány při různých rychlostech. Prázdné tečky představují naměřené hodnoty a spojitá čára představuje simulaci. Z minulé kapitoly 2.2.1 víme, že IPMSynRM disponuje vyšším točivým momentem v nízkých otáčkách v porovnání se SynRM. Uvedené grafy znázorňují, že IPMSynRM dosahuje vyššího točivého momentu a zároveň i vyššího výkonu nejen v nízkých a středních otáčkách. Velký rozdíl mezi motory nastává při vysokých otáčkách. V oblasti vysokých otáček IPMSynRM disponuje výrazně vyšším točivým momentem a výkonem. U motoru s permanentními magnety dochází k mnohem pozvolnějšímu poklesu charakteristik než u SynRM motoru. Testovaný SynRM motor dosahoval při otáčkách 4000 ot/min pouze polovičního výkonu a točivého momentu v porovnání s testovaným IPMSynRM. U SynRM si v oblasti vysokých otáček také můžeme všimnout kolísání momentu a výkonu.

2.2.4 Přetížení SynRM

Dalším důležitým faktorem při návrhu elektropohonu je jeho přetížitelnost. Krátkodobé přetížení motoru umožňuje elektromobilu prudce akcelarovat, což je pro elektromobilitu velice atraktivní a žádaná vlastnost.

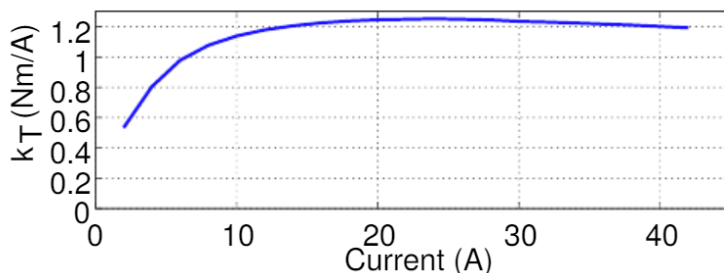


Obr. 2-6 Graf závislosti momentu na statorovém proudu SynRM motoru [1]

Na grafu je naměřená závislost točivého momentu na statorovém proudu SynRM motoru. Všimneme si důležitého faktu, že statorový proud přesahoval 40 A, což znamená, že se SynRM podařilo přetížit až čtyřnásobně. Plná čára představuje průměrnou hodnotu měřeného momentu,

zatímco přerušované čáry představují maxima a minima oscilací průběhu točivého momentu. Po parabolickém nárůstu v oblasti nízkých proudů (motor pracuje bez dosažení saturace) točivý moment narůstá téměř lineárně se statorovým proudem. Porovnáním plné čáry s přerušovanými si všimneme zvlnění točivého momentu. Ačkoli se zvlnění zvětšuje s rostoucím statorovým proudem, jeho procentuální zastoupení vzhledem k velikosti točivého momentu zůstává limitované i během přetížení.

Zajímavý pohled na vlastnosti motoru nám nabízí závislost koeficientu k_T na statorovém proudu. Koeficient vyjadřuje poměr naměřeného průměrného točivého momentu a statorového proudu (amplituda).

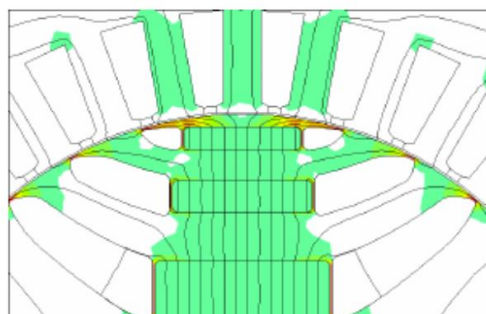


Obr. 2-7 Závislost koeficientu k_T na statorovém proudu [1]

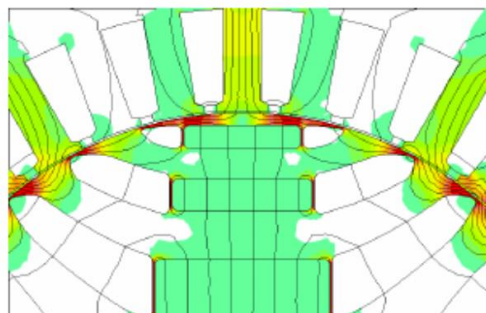
Z grafu vyčteme skutečnost, že v oblasti přetížení zůstává koeficient k_T téměř konstantní. To znamená, že točivý moment je při přetížení úměrný statorovému proudu podobně jako u motorů s povrchově uloženými permanentními magnety. Zároveň také vidíme, že při nárůstu na maximální trvalý výkon motoru koeficient stoupá. To znamená, že při nižších výkonech motor dodává menší točivý moment na jednotku statorového proudu. Při nižších výkonech se více uplatňují Jouleovy ztráty.

2.2.5 Přetížení IPMSynRM a demagnetizace permanentních magnetů

Narozdíl od dobře přetížitelného SynRM si u IPMSynRM musíme hlídat funkci permanentních magnetů. Aby tato funkce byla zachována, je třeba se ujistit, že při provozu nedojde k nevratné demagnetizaci přílišným namáháním vnitřně uložených permanentních magnetů. Byla vykonána analýza konečných prvků (FEA – finite element analysis) pro účel prozkoumání vlivu statorového proudu na demagnetizaci permanentních magnetů.

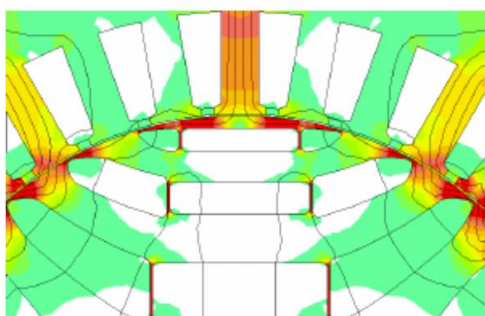


(a) no stator current

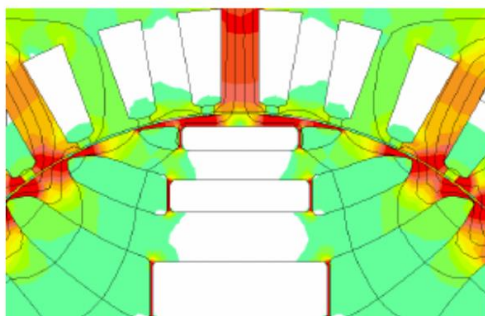


(b) stator current 7.5 A

Obr. 2-8 Analýza konečných prvků – demagnetizace permanentních magnetů (1) [1]



(c) stator current 15 A



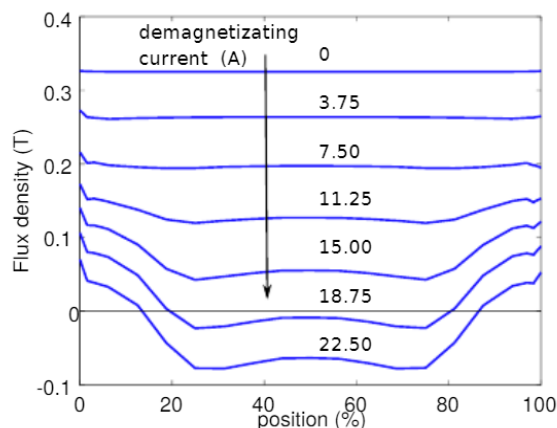
(d) stator current 22.5 A

Obr. 2-9 Analýza konečných prvků – demagnetizace permanentních magnetů (2) [1]

Na obrázku vidíme magnetické silové čáry společně s mapami hustoty magnetického toku pro statorové proudy 0 A, 7.5 A, 15 A a 22.5 A. S rostoucím proudem silové čáry postupně mizí z permanentních magnetů. Obdobně s rostoucím proudem hustota magnetického toku v

permanentních magnetech klesá na nulu (permanentní magnety se na obrázku zabarví do bíla). Pro statorové proudy 15 A a 22.5 A dochází k demagnetizaci permanentních magnetů. Jelikož je motor dimenzován na jmenovitý proud okolo 12 A obrázek c) odpovídá lehkému přetížení a obrázek d) odpovídá přetížení téměř dvojnásobnému.

Ke znázornění nevhodnosti přetěžování reluktančního motoru s feritovými permanentními magnety bude uveden graf závislosti hustoty magnetického toku permanentního magnetu nejbližší ke vzduchové mezeře na natočení rotoru pro několik hodnot statorových proudů.

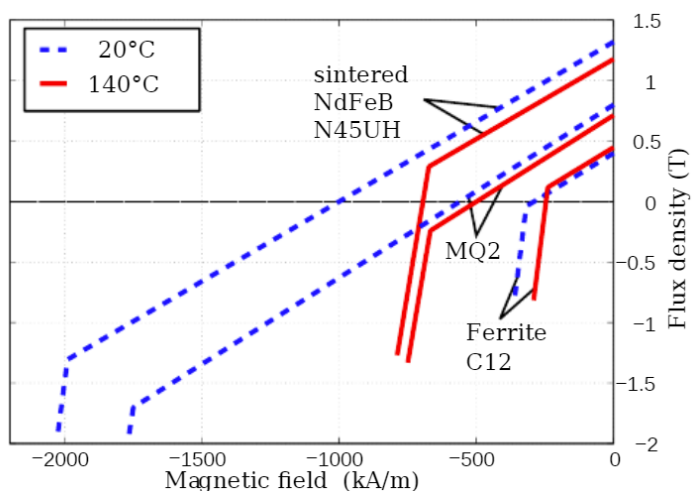


Obr. 2-10 Graf závislosti magnetické indukce na natočení rotoru pro různé amplitudy proudů (feritový magnet) [1]

S rostoucím proudem prudce klesá hustota magnetického toku permanentního magnetu. Při vysokých proudech se hustota toku dostává do záporných hodnot. Tento fakt znázorňuje, že není bezpečné přetěžovat reluktanční motor s feritovými permanentními magnety.

Ve všech porovnáních se IPMSynRM zatím jevil jako lepším ze dvou zkoumaných motorů. Přetížitelnost je ale slabá stránka reluktančního motoru s permanentními magnety. Zatímco SynRM se prokázal být přetížitelný až čtyřnásobně s konstantním koeficientem k_T , IPMSynRM schopnost provozu v přetíženém stavu postrádá.

K provedení přetížitelného IPMSynRM motoru je zapotřebí alternativní návrh. Jednou z možností je užití permanentních magnetů s větší koercitivitou, jejichž cena je ale výrazně větší. Často používaným permanentním magnetem pro trakci je NdFeB. Cena takového permanentního magnetu je velmi vysoká kvůli kombinaci vzácných těžkých zemin Dysprosia (Dy) a Terbia (Tb). Jako snaha o zlevnění výroby motorů se začínají používat NdFeB sloučeniny bez přítomnosti Dysprosia. Dvěmi takovými sloučeninami jsou sintrované Dy-free NdFeB a Dy-free NdFeB lisované za tepla, také známé jako MQ2. Tyto sloučeniny disponují porovnatelnými vlastnostmi jako NdFeB s Dysprosiem a Terbiem a zároveň výrazně nižší cenou.

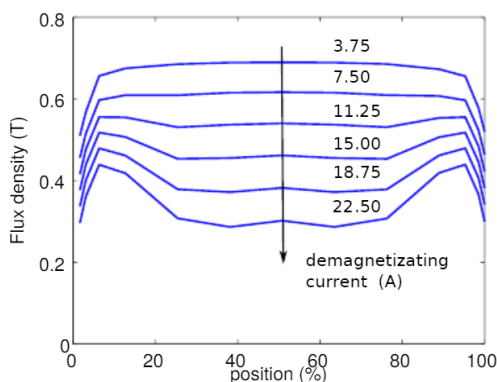


Obr. 2-11 Hysterezní křivky různých permanentních magnetů [1]

V grafu jsou vidět hysterezní křivky tří permanentních magnetů. MQ2 má o 40% menší remanentní magnetickou indukci při pokojové teplotě než sintrované NdFeB, ale dvojnásobnou v porovnání s Ferritovým magnetem. Při vysokých teplotách je koercitivita MQ2 srovnatelná se sintrovaným NdFeB.

Užití takových magnetů dovoluje dosažení bezpečných hodnot demagnetizace a dosažení dobrých vlastností v pracovním režimu oslabení magnetického toku. Užití Dy-free NdFeB permanentních magnetů v reluktančních motorech není v této době dobře veřejně zdokumentováno. Nicméně v porovnání s Ferritovými magnety se očekává vyšší hustota točivého momentu, lepší účinnost a účinník a lepší chování momentových a výkonových charakteristik v pracovním režimu oslabení magnetického toku.

Níže je uveden graf závislosti magnetické indukce MQ2 permanentního magnetu nejbližší ke vzduchové mezeře na natočení rotoru pro několik hodnot statorového proudu. Magnetická indukce klesá s rostoucím proudem, ale narozdíl od Ferritového magnetu zůstává při vyšších statorových proudech v kladných hodnotách. Statorový proud 22.5 A odpovídá téměř dvojnásobnému přetížení. Tento fakt zdůrazňuje odolnost Dy-free NdFeB magnetů vůči demagnetizaci a tím i jejich schopnost pracovat ve stavu přetížení.



Obr. 2-12 Graf závislosti magnetické indukce na natočení rotoru pro různé amplitudy proudů (MQ2 magnet) [1]

2.2.6 Testovaný motor

Parametry testovaného motoru [1]:

- Vnější průměr 200 mm
- Vnitřní průměr 125 mm
- 36 drážek
- 4 pól
- Délka rotoru 40 mm
- Jmenovitý proud 10 – 15 A (RMS)
- Proudová hustota 6 – 9 A/mm² (RMS)

2.2.7 Shrnutí

Reluktanční motor s feritovými permanentními magnety se prokázal lepšími charakteristikami z hlediska výkonu, hustoty točivého momentu, účinnosti, ztrát a vlastností v pracovním režimu snížení magnetického toku. Ačkoli navýšení výkonu a točivého momentu se pohybuje okolo 7 % oproti SynRM, zásadní rozdíl je v momentových a výkonových charakteristikách v pracovním režimu sníženého magnetického toku. Zde se IPMSynRM projevil jako výrazně lepší, má ve vysokých otáčkách až dvojnásobný výkon a točivý moment v porovnání se SynRM.

Silnou stránkou reluktančního motoru bez permanentních magnetů je jeho vysoká přetížitelnost, velmi důležitá vlastnost pro trakční použití. Koeficient k_T zůstal konstantní i při čtyřnásobném přetížení. IPMSynRM s Ferritovými permanentními magnety se prokázal být nevhodným motorem z hlediska přetížení natolik, jelikož po překročení jmenovitého statorového proudu docházelo k nebezpečné demagnetizaci Ferritových permanentních magnetů.

Bylo nastíněno, že užití kvalitnějších permanentních magnetů by mohlo zlepšit všechny zmíněné parametry IPMSynRM a zároveň motoru dovolit aspoň dvojnásobné přetížení. Bohužel užití kvalitnějších permanentních magnetů v reluktančních motorech není dobře veřejně zdokumentováno.

Z článků [36] a [38] dospějeme ke sejným či velmi podobným závěrům.

2.3 Srovnání SynRM vs PMSM

Srovnání synchronního reluktančního motoru se synchronním motorem s permanentními magnety vlastně proběhlo v kapitole 2.2. IPMSynRM můžeme myšlenkově nahradit motorem PMSM s vysokým reluktančním momentem. Na základě informací z článku [36] a 63[37] je zajímavé podotknout, že IPMSynRM kvůli přítomnosti vysokého reluktančního momentu dosahuje podobných parametrů jako PMSM za využití menšího objemu permanentních magnetů. IPMSynRM jako náhrada PMSM může být podnětem k další práci.

KAPITOLA 3: ULOŽIŠTĚ ENERGIE

3.1 Úvod k bateriím

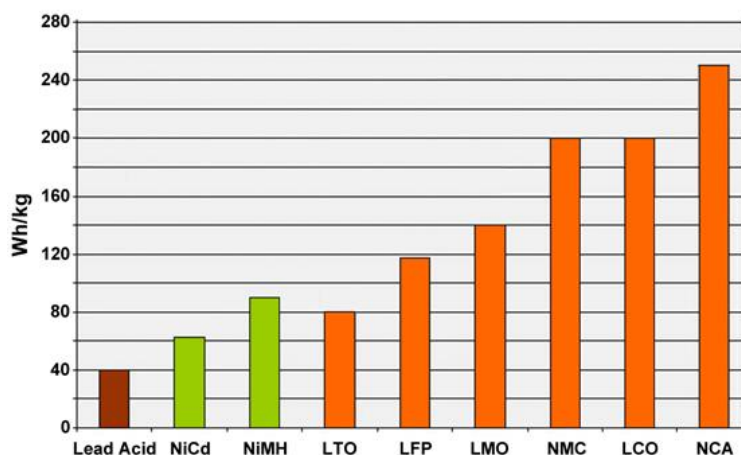
Baterie elektromobilů se liší od zapalovacích baterií v automobilech. Jsou navrženy na dodávání energie po delší dobu a jedná se o deep-cycle baterie, které jsou navrženy pro pravidelné vybíjení a nabíjení většiny kapacity baterie. Baterie pro elektrická vozidla jsou charakteristické relativně vysokou hmotnostní hustotou výkonu. Lehčí baterie jsou žádoucí, jelikož nadměrná hmotnost baterie negativně ovlivňuje jízdní vlastnosti elektromobilu. V porovnání s tekutými palivy, většina současných bateriových technologií má mnohem nižší hustotu výkonu, což negativně ovlivňuje dosažitelný maximální dojezd elektrických vozidel.

Baterie pro elektromobily se skládají ze stovek až tisíců bateriových článků. Články v baterii jsou zapojeny sériově nebo paralelně dle požadovaného napětí a proudu. Nejčastěji používané typy článků jsou cylindrické, prismatické a pouzdrové.

Bateriové články se skládají do bateriových modulů, které tvoří stavební bloky baterií. Takové řešení umožňuje snazší výrobu, instalaci, management a údržbu. Dle potřeby je možné vyměnit samotné moduly[41].

3.2 Technologie článků

Historicky se pro konstrukci baterií užívaly různé technologie. Olověné, nikl-kadmiové, zinko-chloridové a další typy technologií se dnes pro výrobu baterií do elektromobilů sice nepoužívají, ale také najdou své uplatnění. Například olověné akumulátory dodnes najdeme v automobilech, kvůli jejich vysokým impulsním proudům potřebným k nastartování vozidla. Nikl-kadmiové baterie najdou uplatnění pro vojenské účely kvůli spolehlivosti a bezpečnosti.



Obr. 3-1 Graf hustoty energie různých bateriových technologií [42]

Lithiové články dnes tvoří dominantní většinu všech baterií do elektromobilů. Není ale lithiový článek jako lithiový článek. Na Obr. 3-1 vidíme graf hmotnostní hustoty energie pro různé typy lithiových baterií. Dnes obecně pro lithiové články platí, že čím vyšší hustota energie, tím nebezpečnější článek je. Pro nás budou nejdůležitější články LTO – $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (lithium-titanát), LFP – LiFePO_4 (lithium-železo-fosfát) a NMC – LiNiMnCoO_2 (lithium-iont).

LTO článek je sice velmi bezpečný, má velký počet cyklů, vysoké vybíjecí proudy, ale jeho energetická hustota je příliš nízká, aby se článek uvažoval pro konstrukci baterie elektromobilu. LFP článek nabízí dobrou životnost, bezpečnost a přijatelnou hustotu energie, přijatelné vybíjecí proudy. NMC článek nabízí velmi dobrou hustotu energie, přijatelné vybíjecí proudy. Životnost NMC článku a jeho bezpečnost jsou jeho nevýhodami.

Technologie	LFP	LTO	NCA	NMC	LMO	LCO	NiCd	NiMH	Pb
Chemický vzorec katody	LiFePO ₄	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	LiNiCoAlO ₂	LiNiMnCoO	LiMn ₂ O ₄	LiCoO ₂	2Ni(OH) ₂	NiO(OH)	PbSO ₄
Nominální napětí článku [V]	3.2	2.4	3.6	3.7	3.7	3.6	1.2	1.2	2.1
Energetická hustota [Wh/kg]	90-110	50-70	200-260	150-210	100-150	150-200	40-60	60-120	30-40
Energetická hustota [Wh/dm ³]	200-240	110-160	440-550	320-440	220-300	310-420	50-150	140-300	60-75
Cyklovatelnost [počet cyklů]	2000-4000	6000-10000	500	1000-2000	300-700	500-1000	2000	500-1000	500-800
Minimální napětí [V]	2.5	1.7	3	2.5	2.5	2.5	0	0	1.75
Maximální napětí [V]	4	2.8	4.2	4.2	4.2	4.2	1,4	1,4	2,3-2,45 (dle typu)
Maximální proudová zatížitelnost	3C	15C	1C	3C	3C	1C	různé (<2C)	různé (<2C)	různé

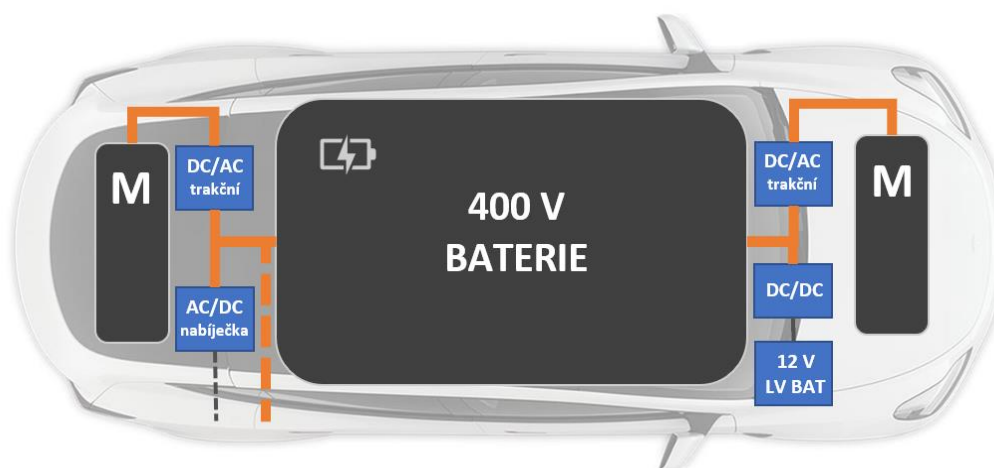
Obr. 3-2 Tabulka parametrů různých technologií článků [43]

Budou to právě LFP a NMC články, které budeme zvažovat při návrhu baterie elektromobilu. Bude zhodnoceno, které články se hodí pro konstrukci navrhovaného elektromobilu nejvíce.

KAPITOLA 4: MĚNIČOVÁ VÝBAVA ELEKTROMOBILU

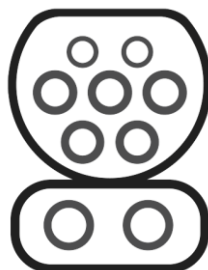
4.1 Přehled měničové výbavy elektromobilu

Elektrický pohon by se neobešel bez soustavy výkonových měničů. Soustava výkonových měničů plní funkci přeměny parametrů elektrické energie procházející mezi komponenty pohonu. Například baterie se nabíjí a vybíjí stejnosměrným proudem. Naopak stator motorů potřebují proud napětí a proud střídavé. Energií je tedy nutno upravit na parametry, na které jsou komponenty pohonu navrženy.



Obr. 4-1 Schéma měničové výbavy elektromobilu

V elektromobilu najdeme hned několik druhů měničů. Postupně si popíšeme jejich funkci. Prvním měničem je palubní nabíječka. Jedná se o výkonový usměrňovač, který přeměňuje střídavé napětí na stejnosměrné. Palubní nabíječka je využívána při nabíjení auta střídavým proudem ze sítě. Jelikož baterie přijímá pouze proud stejnosměrný, je zapotřebí mít v autě usměrňovač. Při nabíjení stejnosměrným proudem nabíjecí stanice komunikuje přímo s bateriovým systémem. Měníče v případě DC nabíjení není třeba. Náš elektromobil bude vybaven systémem CCS Type 2 pro nabíjení střídavým a stejnosměrným proudem.



Obr. 4-2 Symbol CCS Type 2 – Combined Charging Systém pro Evropu

Dalším měničem přítomným ve vozidle je stejnosměrný měnič napětí. Napětí baterie elektromobilu je příliš vysoké, aby z ní byla přímo napájena elektronika ve vozidle. Proto je v autě ještě nízkonapěťová baterie identická bateriím v automobilech se spalovacími motory. Tento DC/DC měnič mění napětí ze 400 V na 12 V přijímaných nízkonapěťovou baterií. Z nízkonapěťové baterie je napájena elektronika vozidla.

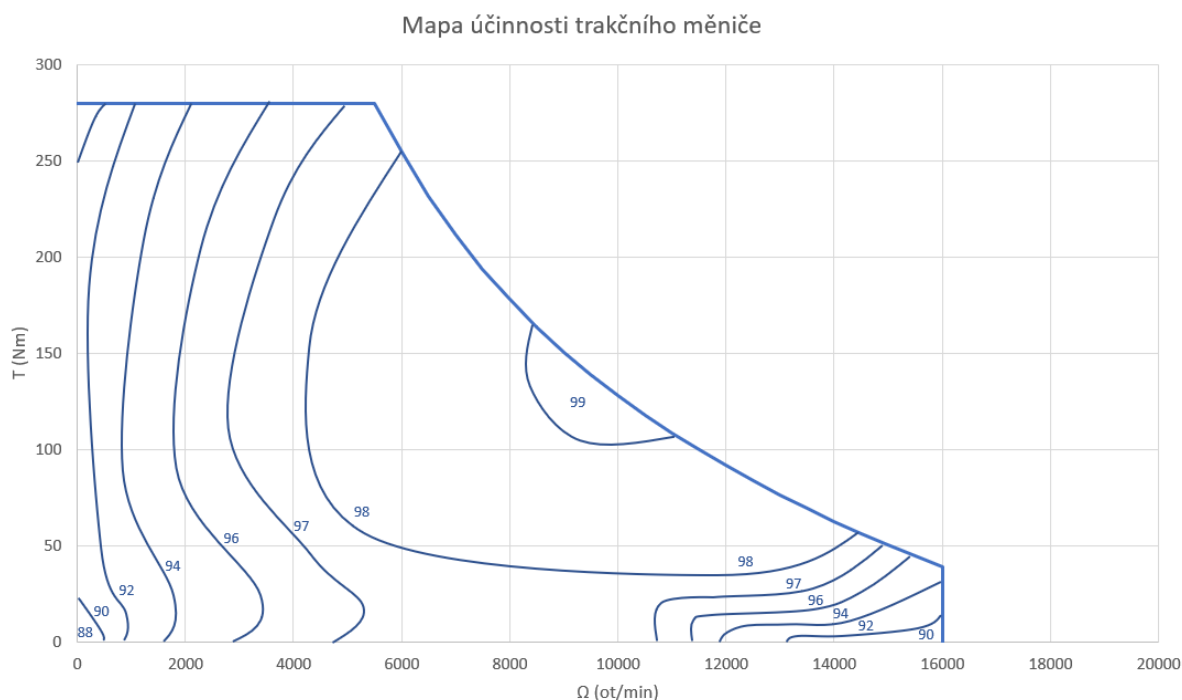
Posledním měničem v elektromobilu je trakční výkonový měnič. Trakční výkonový měnič mění stejnosměrné napětí a proud z vysokonapěťové baterie na střídavé napětí a proud napájecí elektromotor vozidla. Každý motor v elektromobilu bude mít svůj vlastní trakční měnič. Trakční měnič přijímá data specifická pro typ řízení a podle těchto dat reguluje energii dodávanou do motoru.

Na schématu je oranžovou tlustou čarou vyznačena cesta, na které je vysoké napětí. Kabele vedoucí tuto energii v elektromobilech bývají silné a mají zpravidla oranžovou barvu.

V porovnání s autem se spalovacím motorem má elektromobil navíc vysokonapěťovou baterii, palubní nabíječku, DC/DC měnič a trakční měnič. Ve vozidle se spalovacím motorem je nízkonapěťová baterie nabíjena alternátorem. Alternátor často bývá BLDC stroj. Alternátor generuje střídavé napětí a proud, tudíž mezi nízkonapěťovou baterií a alternátorem musí být usměrňovač.

4.2 Účinnost trakčního měniče

Účinnost trakčního měniče bude proměnlivá pro různé okamžité hodnoty otáček a točivého momentu na hřídeli. Na základě článků [39] a [40] byla sestavena mapa účinnosti trakčního měniče. Z článku [39] byla mapa účinnosti odvozena jako symetrická pro vrácení energie zpět do systému.



Obr. 4-3 Mapa účinnosti trakčního měniče

KAPITOLA 5: ZJIŠTĚNÍ PARAMETRŮ JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT

Pro simulaci úseku jízdy navrženého elektromobilu je nezbytné zjistit základní parametry jednotlivých komponent vozu. Návrh elektrického pohonu by sám o sobě zahrnoval pouze motor, uložisko energie a měničovou výbavu. Jelikož ale požadujeme, aby elektromobil plnil určitá realistická kritéria, neobejdeme se bez návrhu dalších důležitých částí vozidla.

5.1 Základní a aerodynamické vlastnosti

Navrhovaný elektromobil je čtyřdveřový sportovní vůz s dlouhým dojezdem a relativně vysokým výkonem. Očekáváme od něj splnění určitých požadavků popsanych v kapitole Kapitola 1: Splnění všech těchto požadavků se projeví na hmotnosti vozidla. Hmotnost je jedním z nejdůležitějších parametrů při dimenzování komponent automobilu. Další velmi důležitou vlastností vozidla, ovlivňující jak výkonové vlastnosti, tak i spotřebu, je aerodynamika vozu.

5.1.1 Určení hmotnosti

Pro účel této práce se podíváme po konkurenčních vozidlech, které splňují naše stanovené požadavky buďto zcela nebo dle uvážení dostatečně. Následovně provedeme aritmetický průměr jejich hmotností a získáme hmotnost námi navrhovaného vozidla. Těmito konkurenčními vozy jsou Tesla Model S, Porsche Taycan a Mercedes EQS.

Tab. 5-1 Určení hmotnosti navrhovaného elektromobilu

	Tesla Model S	Porsche Taycan	Mercedes EQS	průměr
m_{min} (kg)	1961	2140	2480	2194
m_{max} (kg)	2250	2305	2655	2403
průměr (kg)				2298

5.1.2 Aerodynamický odpor

Při návrhu elektromobilu je velmi důležité brát ohled na jeho tvar. Aerodynamika vozidla má velký vliv nejen na spotřebu, ale i na dimenzování motoru. Vzhledem ke kvadratickému navyšování odporu vzduchu při vyšších rychlostech se odpor vzduchu stává důležitým faktorem při dimenzování motoru. Po dosažení maximálního výkonu motoru se otáčky zvyšují na úkor točivého momentu. V tomto pracovním režimu aerodynamický odpor a rychlost vozidla stoupá, moment klesá a nastane chvíle, ve které už motor nedokáže dodat dostatečný točivý moment, aby vozidlo dále urychlil. Tento bod je třeba navrhnout vhodně tak, aby odpovídal účelu, kterému má vozidlo sloužit.

Při pohybu na vozidlo působí odporová síla ve směru proti jeho pohybu. "Při nízkých rychlostech je odporová síla relativně malá a je považována za přímo úměrnou rychlosti pohybu. Při vyšších rychlostech však odporová síla vzrůstá s druhou mocninou rychlosti [2]."

Velikost odporové síly můžeme vyjádřit Newtonovým zákonem odporu prostředí:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} C_d S_{\zeta p} \rho v^2 \quad (5-1)$$

Ze vztahu je patrné, že velikost odporové síly závisí na velikosti čelní plochy $S_{\check{c}p}$ (průřez v místě s největší čelní plochou), na hustotě okolního prostředí (vzduch), druhé mocnině rychlosti a na tvaru tělesa. K popisu tvaru a kvality povrchu tělesa slouží tzv. součinitel aerodynamického odporu (drag coefficient) C_d .

5.1.3 Sestavení křivky aerodynamického odporu

Posouzení chování automobilu z hlediska aerodynamiky je nemožné provést bez konkrétní představy o tvaru a kvalitě povrchu vozidla. 3D model elektromobilu a následná analýza jeho aerodynamických vlastností je sice zajímavým podnětem pro další práci, nyní si ale poradíme bez něj.

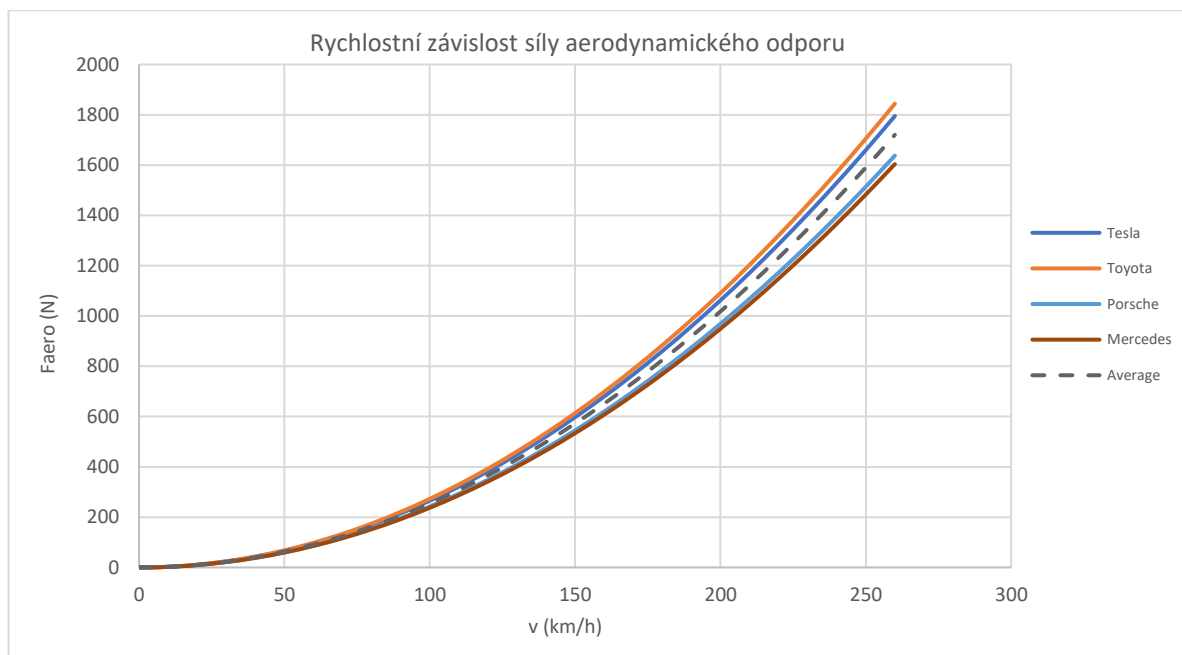
Řekněme, že náš automobil má aerodynamické vlastnosti schopné konkurovat ostatním vozidlům na trhu v odpovídající třídě, ale nepatří v této oblasti mezi lepší z nich. Proto křivku sestavíme získáním aritmetických průměrů hodnot součinitele aerodynamického odporu a průřezu čelní plochy konkurenčních vozidel. Pro zachování předpokladu podprůměrných aerodynamických vlastností v porovnání s konkurencí, zařadíme mezi vozidla i Toyotu Prius, která má horší aerodynamické vlastnosti než kterékoli konkurenční vozidlo.

Mezi vzorkovaná vozidla tedy patří Tesla Model S, Porsche Taycan, Mercedes EQS a Toyota Prius.

Tab. 5-2 Veličiny pro sestavení křivky aerodynamického odporu

	Tesla Model S	Porsche Taycan	Mercedes EQS	Toyota Prius	Průměr
C_d (-)	0.24	0.22	0.2	0.26	0.23
$S_{\check{c}p}$ (m ²)	2.341	2.33	2.510	2.22	2.35

Po dosažení hodnot získaných aritmetickým průměrem do rovnice (5-1) za uvažované hustoty vzduchu 1.225 kg/m³ získáme závislost aerodynamické odporové síly na rychlosti našeho navrhovaného elektromobilu.



Obr. 5-1 Graf rychlostní závislosti síly aerodynamického odporu pro různá vozidla

Z grafu na Obr. 5-1 jde vidět, že na vůz při rozjezdu nepůsobí zpočátku žádná síla aerodynamického odporu. Tato síla se postupně parabolicky navyšuje a bude hrát významnou roli při určování maximální rychlosti vozidla. V našem případě bude hrát významnou roli při dimenzování komponent vozidla na maximální rychlost 250 km/h.

5.2 Pneumatiky a valivý odpor

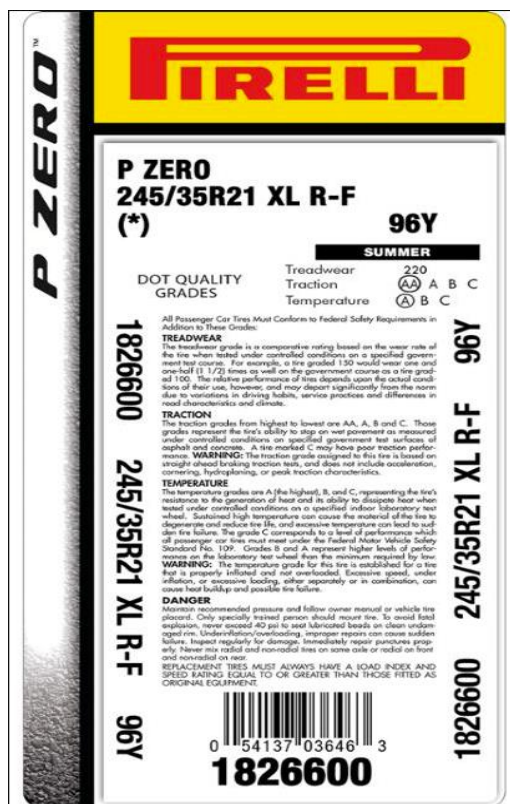
Pravděpodobně nejdůležitější součástí jakéhokoli vozidla jsou jeho pneumatiky. Jedná se o jedinou část vozu, která je v přímém kontaktu s vozovkou, na které se vozidlo snažíme udržet. Pro správnou volbu pneumatiky je nezbytné zvážit požadované vlastnosti vozidla, a jak se tyto vlastnosti s volbou pneumatiky mohou měnit. Pro naše účely potřebujeme pneumatiku, která bude poskytovat dobrou přilnavost při rozjezdu, v zatáčkách a při zhoršených podmínkách (déšť). Volba takové pneumatiky bude mít negativní vliv na valivý odpor, a tudíž i na spotřebu elektromobilu. Nesmíme také zapomenout na maximální provozní hmotnost, kterou pneumatika bezpečně vydrží bez trvalého poškození.

5.2.1 Volba pneumatiky

Byla zvolena high-performance pneumatika Pirelli PZero 245/35 R21 96 Y XL RFT [3]. Touto volbou dosáhneme požadavků na vysokou přilnavost za dobrého i zhoršeného počasí. Zároveň budeme mít možnost elektromobil naložit nákladem.



Obr. 5-2 Zvolená pneumatika Pirelli PZero 245/35 R21 96 Y XL RFT [3]



Obr. 5-3 Štítek zvolené pneumatiky [4]

Ze štítku a názvu pneumatiky vyčteme hned několik informací, které bude třeba dešifrovat, abychom pochopili jejich věčný význam.

První číslovka před lomítkem určuje šířku pneumatiky v milimetrech. Druhé číslo (za lomítkem) určuje profil neboli poměr šířky a boční stěny pneumatiky. Číslo za velkým písmenem R určuje průměr pneumatiky v palcích. Znaménka XL a R-F nebo RFT znamenají „extra-load“ a „reinforced“. To znamená, že jsou pneumatiky navrženy pro vyšší nosnost, než je obvyklé. Dvojmístné číslo před písmenem Y udává tzv. Load Index (hmotnostní index), který nám přesněji říká, jakou hmotnost jedna pneumatika bezpečně unese. Poslední písmeno z kódu nám dává informaci o maximální dosažitelné rychlosti pneumatiky, a tak i vozidla. Na štítku vidíme také

menší tabulku, která nám kromě představy o přilnavosti pneumatiky a jejím chování při vyšších teplotách dává také informaci nazvanou „treadwear“, která nás informuje o běhounech a opotřebení pneumatiky.

Ke zjištění koeficientu tření můžeme využít jak vzorec uvedený v článku [6], tak online kalkulačku [10].

$$C_{fr} = \frac{2.25}{treadwear^{0.15}} = \frac{2.25}{220^{0.15}} = 1.002 \quad (5-2)$$

V případě použití kalkulačky [10] je zapotřebí nastavit správné parametry odpovídající naší pneumatice.

Tab. 5-3 Nastavení parametrů online kalkulačky

Typ charakteristiky	Friction coefficient based on treadwear (street tires)
Tire type	Hi-performance
Road type	Dry asphalt/Concrete
treadwear	220

Výsledkem online kalkulačky je koeficient tření v rozsahu od 0.9 do 1.10. Výsledek ze vzorce (5-2) a výsledek online kalkulačky [10] si neodporují. Pro dosažení realistického výsledku budeme uvažovat horší ze dvou scénářů a koeficient tření pneumatiky určíme jako 0.9.

Tab. 5-4 Parametry zvolené pneumatiky

Pirelli PZero 245/35 R21 96 Y XL RFT	
Šířka (mm)	245
Průměr (mm)	533.4
Profil	35
Speed Index	Y
Maximální rychlost (km/h)	300
Load Index	96
Nosnost pneumatiky (kg)	710
Maximální hmotnost vozidla (kg)	2840
Valivý odpor	E
Tlak (kPa)	290
Koeficient tření	0.9
Treadwear	220

V tabulce Tab. 5-4 jsou shrnuty základní parametry námi zvolené pneumatiky. Tyto parametry byly zjištěny za využití [3] - [10].

5.2.2 Určení RRC zvolené pneumatiky

Abychom určili valivý odpor vozidla, potřebujeme znát RRC – koeficient valivého odporu. RRC se často uvádí pouze jako konstanta. Pro účely této práce nebude nám konstanta stačit. Koeficient valivého odporu je totiž závislý na rychlosti pohybu vozidla. S rostoucí rychlostí

roste i koeficient valivého odporu. Tato skutečnost ovlivní dimenzování a návrh převodových poměrů obou motorů.

5.2.2.1 SAE J2452 standard

K určování valivého odporu v praxi slouží SAE J2452 standard. Přesná podoba vzorce pro výpočet valivého odporu není veřejně bezplatně dostupná. Je ale známý její obecný tvar [9].

$$F_{RR} = p^\alpha Z^\beta (a + bv + cv^2) \quad (5-3)$$

$$C_{RR} = p^\alpha (a + bv + cv^2) \quad (5-4)$$

α , β , a , b , c jsou koeficienty modelu. α a β jsou bezrozměrné veličiny. a , b a c závisí jak na jednotkovém systému, tak na veličinách α a β .

5.2.2.2 Rovnice a její korekce

Pro výpočet závislosti RRC na rychlosti vozidla využijeme vzorec uvedený v [11].

$$C_{RR} = a + p^\alpha (b + c(\frac{v}{100})^2) \quad (5-5)$$

$$C_{RR} = 0.005 + \frac{1}{p} (0.01 + 0.0095(\frac{v}{100})^2) \quad (5-6)$$

Je důležité podotknout, že do vzorce (5-6) se dosazuje tlak v jednotce bar a rychlost v jednotce km/h. Po dosazení hodnoty tlaku z Tab. 5-4 a rychlosti 0 km/h do vzorce (5-6) získáme koeficient valivého odporu pro vozidlo ve stacionárním stavu.

$$C_{RR} = 0.005 + \frac{1}{2.9} (0.01 + 0) = 0.0084 \quad (5-7)$$

Na základě informací z [9] usoudíme, že RRC se pohybuje u silničních vozidel v rozmezí 0.007 – 0.014. Pro přesnější určení RRC využijeme online kalkulačku [10]. Podmínky zvolíme stejné jako při určování koeficientu tření pneumatiky. Kalkulačku nastavíme podle Tab. 5-3.

Z kalkulačky jsme získali konkrétnější hodnotu koeficientu valivého odporu odpovídající našemu typu pneumatiky 0.014. Vzhledem k vlastnostem zvolené pneumatiky, informacím z [9] a Tab. 5-4 budeme považovat 0.014 jako orientační hodnotu RRC ve stacionárním stavu vozidla.

Nyní upravíme rovnici (5-7), aby její výsledek ve stacionárním stavu vozidla odpovídal orientační hodnotě 0.14.

$$C_{RR} = 0.011 + \frac{1}{2.9} (0.01 + 0) = 0.0145 \quad (5-8)$$

Závislost koeficientu valivého odporu na rychlosti navrhovaného vozidla je popsána následující rovnicí.

$$C_{RR} = 0.011 + \frac{1}{p} \left(0.01 + 0.0095 \left(\frac{v}{100} \right)^2 \right) \quad (5-9)$$

Při srovnání (5-9) s obecnou rovnicí standardu SAE J2452 (5-4) vidíme, že jsou si v principu výpočtu velmi podobné, tudíž námi sestavenou rovnicí označíme za dostatečně přesnou pro účely této práce.

5.2.3 Sestavení křivky valivého odporu

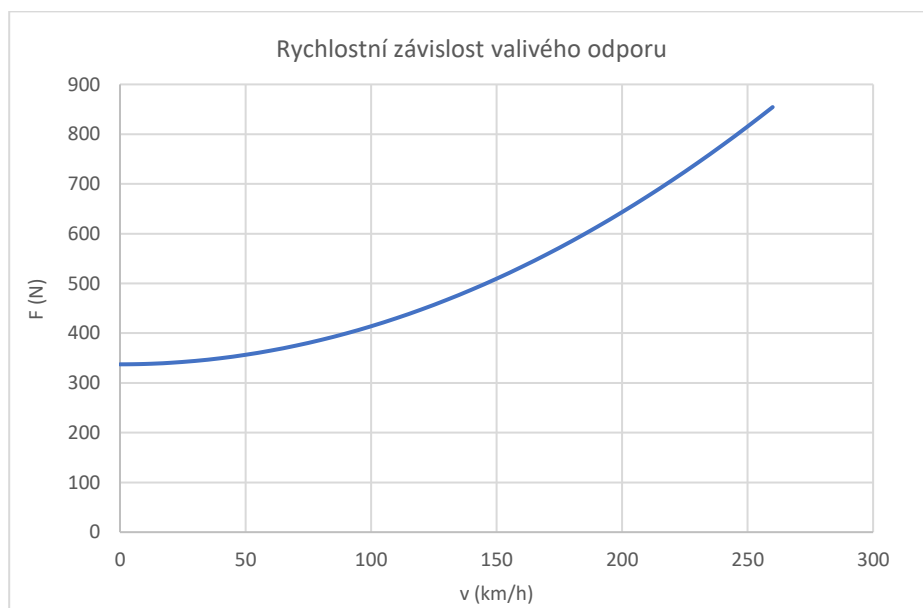
Jakmile známe rychlostní závislost koeficientu valivého odporu a hmotnost vozidla, můžeme sestavit křivku rychlostní závislosti valivého odporu. Valivý vozidla odpor spočítáme následovně.

$$F_{RR} = mgC_{RR} = mg \left(0.011 + \frac{1}{p} \left(0.01 + 0.0095 \left(\frac{v}{100} \right)^2 \right) \right) \quad (5-10)$$

Valivý odpor pneumatik vozidla ve stacionárním stavu spočítáme dle vzorce (5-10) následovně.

$$F_{RR} = 2380 \cdot 9.81 \left(0.011 + \frac{1}{2.9} \left(0.01 + 0.0095 \left(\frac{0}{100} \right)^2 \right) \right) = 337.5 \text{ N} \quad (5-11)$$

Jako hmotnost vozidla pro dimenzování považujeme dříve definovanou hmotnost samotného vozidla 2300 kg navýšenou o hmotnost řidiče 80 kg.



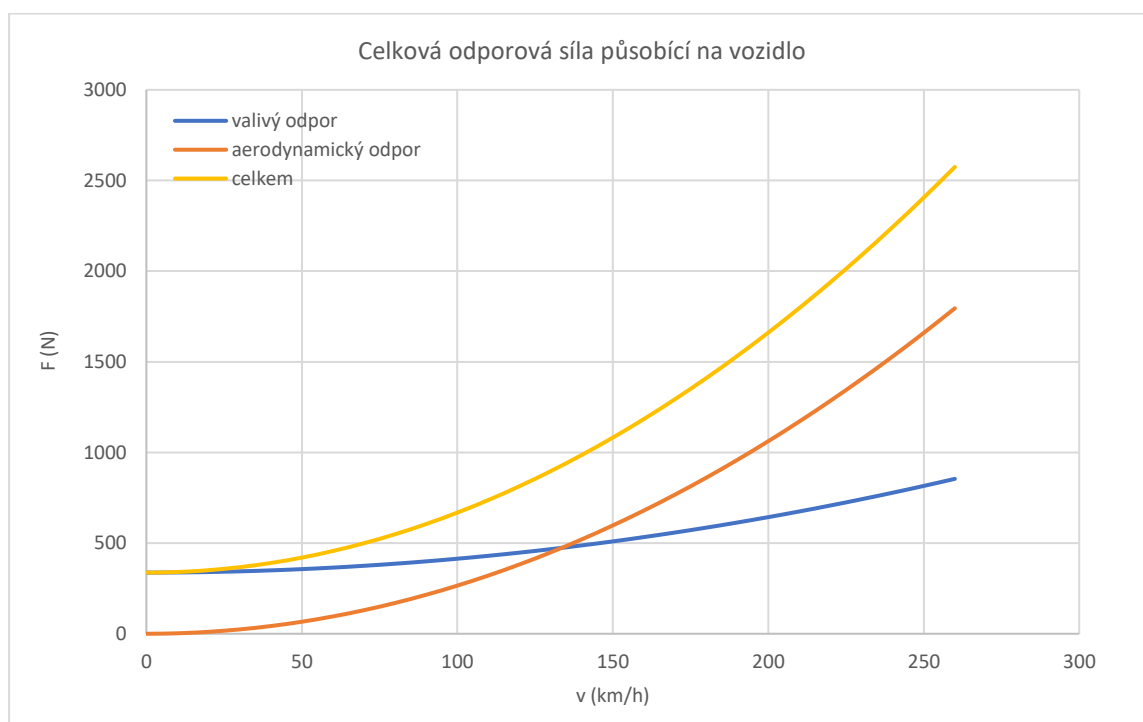
Obr. 5-4 Graf rychlostní závislosti valivého odporu navrhovaného vozidla

Z grafu rychlostní závislosti valivého odporu vidíme, že i při nulové rychlosti pneumatiky působí odporovou silou, která bude působit proti směru zrychlení vozidla. Odporová síla s rychlostí stoupá.

5.2.4 Sestavení křivky celkové odporové síly

Se znalostí rychlostních závislostí aerodynamického a valivého odporu můžeme sestavit křivku celkové odporové síly působící proti směru zrychlení vozidla. Křivka bude součtem aerodynamického a valivého odporu pro danou okamžitou rychlost pohybu vozidla.

$$F_{odp} = F_{aero} + F_{RR} \quad (5-12)$$



Obr. 5-5 Graf rychlostní závislosti celkové odporové síly působící proti směru zrychlení vozidla

Z grafu Obr. 5-5 je vidět, že v nižších rychlostech je valivý odpor větší než aerodynamický. Naopak ve vyšších rychlostech je aerodynamický odpor větší než valivý. Křivky odporů se protínají zhruba v rychlosti 135 km/h. Elektromotory budou muset překonávat sílu danou křivkou celkové odporové síly, aby vozidlo dokázalo urychlit.

5.3 Dimenzování elektromotorů a převodovek

Klíčovým komponentem při návrhu elektromobilu je jeho elektromotor. Typ, počet a výkon motorů jsou hlavními parametry, od kterých se odvíjí návrh všech ostatních součástí elektromobilu. V našem případě se jedná o dva identické synchronní reluktanční motory bez vložených permanentních magnetů. S problematikou elektromotorů a přenášením výkonu na kola je pevně spjatá problematika převodovek.

5.3.1 Elektromotory

Jelikož nemáme pro návrh k dispozici žádný dostatečně výkonný synchronní reluktanční motor, musíme se odrazit od nějakého existujícího motoru, jehož základní parametry budou známy. Shánění informací o trakčních SynRM motorech je v této době velmi obtížné, jelikož nejsou jakožto motory pro trakční užití dobře veřejně zdokumentované. O jejich užití v některých elektromobilech se veřejně ví, ale bližší informace ohledně jejich návrhu a vlastnostech zůstávají tajemstvím automobilky, jež elektromotor navrhla. Na trhu ani neexistují volně prodejné synchronní reluktanční motory pro trakční použití, jejichž šítkové hodnoty by se daly použít pro návrh.

5.3.1.1 Odvození šítkových hodnot pro návrh

O některých elektromobilech od Tesly je známo, že jsou alespoň částečně poháněny IPMSynRM motorem. Konkrétně se jedná o přední motor Tesly Model S Performance 2020 a o zadní motor Tesly Model 3 Performance 2021. Pro tuto práci byl vybrán přední motor elektromobilu Tesla Model S Performance 2020 jako základ pro odvození šítkových hodnot pro navrhovaný SynRM motor.

Tab. 5-5 Parametry referenčního IPMSynRM motoru

Tesla Model S Performance 2020 přední IPMSynRM motor	
Napětí (V)	320
Výkon (kW)	193
Točivý moment (Nm)	330
Koleno charakteristiky (ot/min)	6100
Rekuperace	Ano
Převodový poměr	9.325

V kapitole 2.2 bylo ukázáno, že SynRM v porovnání s IPMSynRM s feritovými permanentními magnety ztrácí 7 % točivého momentu a výkonu. Lze předpokládat, že v referenčním IPMSynRM od Tesly budou magnety silnější než feritové. Mohlo by se jednat o NdFeB nebo Dy-free NdFeB magnety. Proto relativní ztrátu momentu a výkonu SynRM vzhledem k referenčnímu IPMSynRM alespoň zdvojnásobíme na 15 %. [21] indikuje, že takto vysoká relativní ztráta by mohla být vyšší než předpokládaná.

Šítkové hodnoty navrhovaného SynRM poté budou vypadat následovně.

Tab. 5-6 Srovnání referenčního IPMSynRM s odvozeným SynRM

	IPMSynRM	SynRM
Napětí (V)	320	320
Výkon (kW)	193	164
Točivý moment (Nm)	330	280
Koleno charakteristiky (ot/min)	6100	5500
Rekuperace	Ano	Ano
Převodový poměr	9.325	-

Zvolení kolena charakteristiky odvozeného SynRM bude detailněji popsáno později.

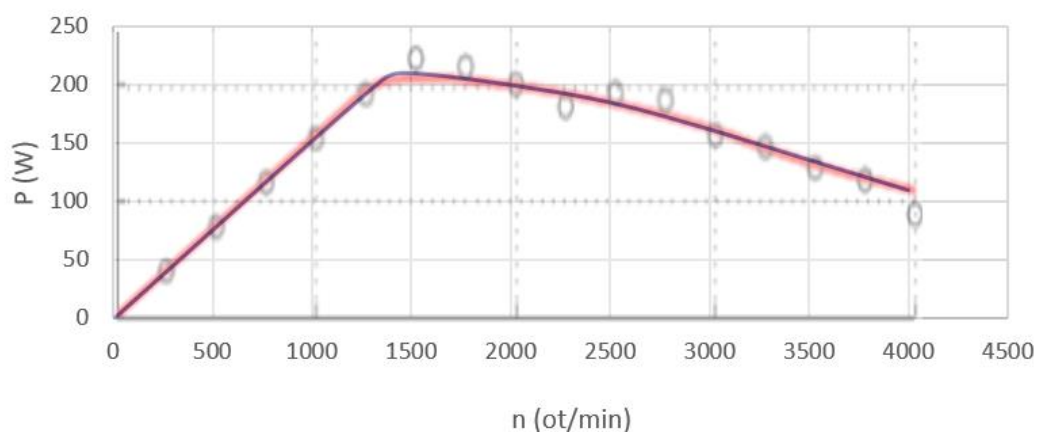
5.3.1.2 Určení maximálních otáček motoru

Každý elektrický motor má horní limit otáčivé rychlosti, které může dosáhnout. Tento horní limit je dán konstrukcí rotoru a jeho mechanickou pevností. Vzhledem ke konstrukci rotoru SynRM (existence tokových bariér má za následek menší mechanickou pevnost rotoru) je tento horní limit nižší než například u PMSM. Tento limit je potřeba určit a při návrhu s ním počítat.

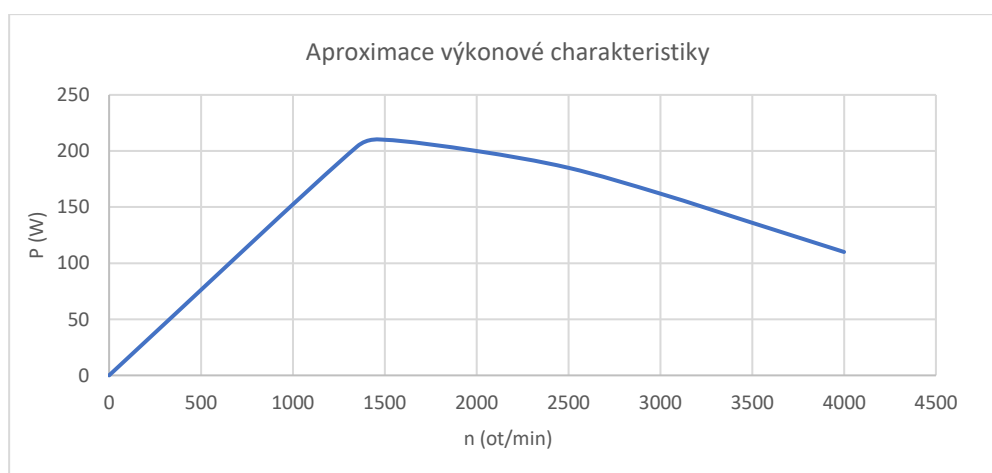
Na základě informací dostupných v článkách [12] - [15] je realistické tento limit uvažovat při rychlosti otáčení 16000 ot/min. Na základě [16] - [18] lze očekávat, že SynRM motory v blízké budoucnosti budou dosahovat i vyšších otáčivých rychlostí.

5.3.1.3 Sestavení momentové charakteristiky navrhovaného SynRM

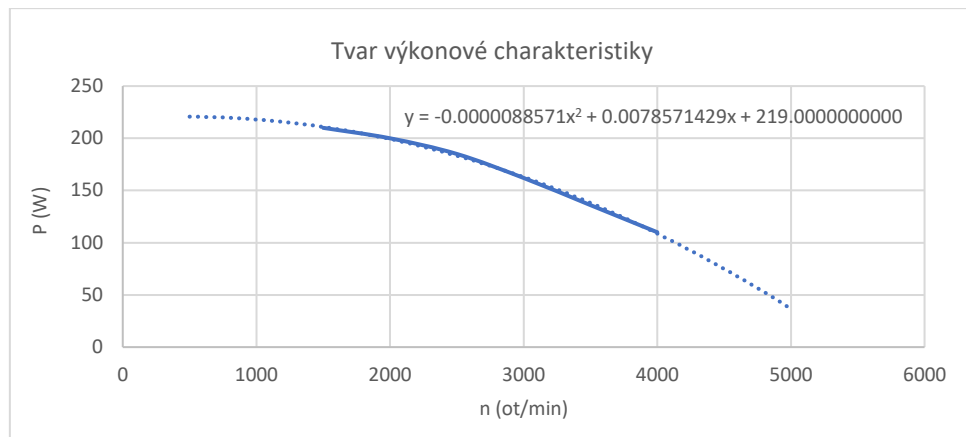
Pro sestavení momentové charakteristiky je nutné znát závislost výkonu motoru na jeho otáčkách. V kapitole 2.2 byla ukázána naměřená výkonová charakteristika SynRM. Tvar této charakteristiky Obr. 2-4 použijeme k popisu poklesu výkonu navrhovaného SynRM během pracovního režimu odbuzování.



Obr. 5-6 Aproximace tvaru výkonové charakteristiky testovaného SynRM



Obr. 5-7 Výsledná křivka aproximace výkonové charakteristiky testovaného SynRM



Obr. 5-8 Určení rovnice sklonu výkonové charakteristiky po dosažení maximálního výkonu

$$P = -0.0000008857n^2 + 0.007857n + 219 \quad (5-13)$$

Známe tvar výkonové charakteristiky, maximální výkon a maximální moment navrhovaného SynRM. Než sestavíme momentovou charakteristiku, určíme, v jakých otáčkách bude koleno charakteristiky. Koleno momentové charakteristiky bude v takových otáčkách, ve kterých motor dosáhne maximálního výkonu.

Tyto otáčky zjistíme dosažením maximálního výkonu a maximálního točivého momentu do následujícího vzorce.

$$\Omega = \frac{P}{M} = \frac{164000}{280} = 585.714 \text{ rad/s} \quad (5-14)$$

Výsledná hodnota je v jednotce rad/s. Je tudíž zapotřebí ji přepočítat na otáčky za minutu.

$$n = \frac{60\Omega}{2\pi} = \frac{60 \cdot 585.714}{2\pi} = 5593 \text{ ot/min} \quad (5-15)$$

Koleno charakteristiky vychází v 5593 ot/min. Pro návrh elektromobilu koleno zvolíme v nižších otáčkách 5500 ot/min. Kromě pracování s hezkým číslem bude mít takto zvolený bod za následek o něco méně prudký pokles momentu v přechodné fázi mezi dosáhnutím kolena charakteristiky a odbuzováním. V otáčkách 5500 ot/min bude motor dosahovat výkonu 161.3 kW.

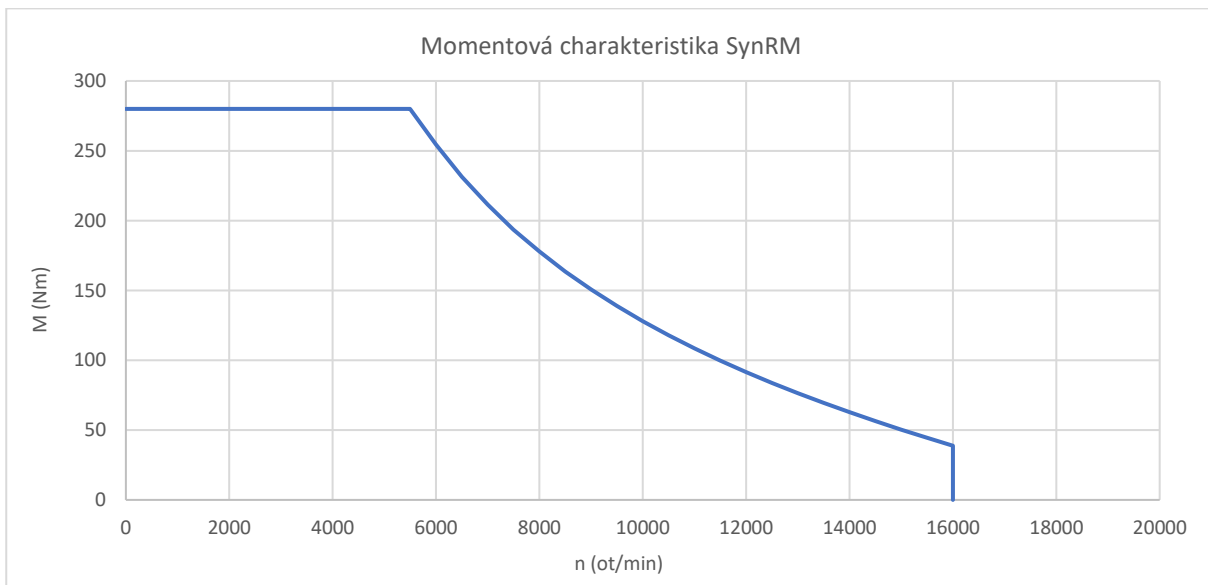
Nyní známe tvar výkonové charakteristiky, koleno charakteristiky, maximální výkon, maximální točivý moment a maximální otáčky motoru. Můžeme sestavit momentovou charakteristiku.

Postupovat budeme následovně. Víme, že do otáček 5500 ot/min má motor konstantní maximální točivý moment 280 Nm a výkon postupně narůstá dle vzorce (2-1). V otáčkách vyšších než 5500 ot/min výkon postupně s rostoucími otáčkami klesá dle rovnice (5-13). Točivý moment vypočítáme jako:

$$M = \frac{P}{\Omega} \quad (5-16)$$

Výkon postupně klesá až do 16000 ot/min, kde je nastaven horní limit otáček kvůli mechanickým vlastnostem rotoru.

Orientační momentová charakteristika navrženého SynRM vypadá následovně.



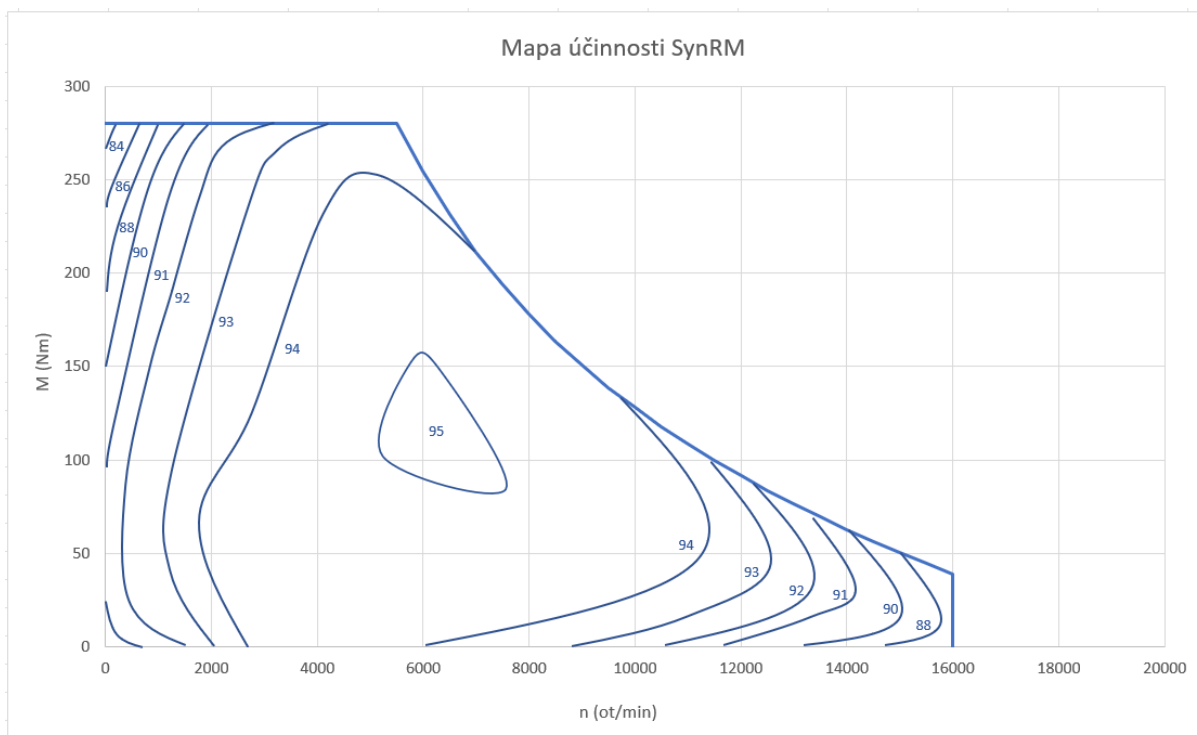
Obr. 5-9 Orientační momentová charakteristika SynRM

5.3.1.4 Účinnost SynRM

Účinnost elektromotorů se dokáže výrazně lišit v závislosti na okamžitých otáčkách a okamžitém točivém momentu. Pro trakční motory obecně platí, že rozjezd je nejztrátovější, jinak řečeno ve velmi nízkých otáčkách je účinnost nejnižší. Konkrétně (a nejen) u SynRM jde o fakt, že vyvíjený točivý moment je úměrný proudu. Ze vzorce (2-1) vidíme, že výkon je přímo úměrný otáčivé rychlosti motoru. Při rozjezdu jsou vyvíjeny vysoké točivé momenty, ale otáčky jsou velmi malé. To znamená, že do motoru je dodáván vysoký proud při produkci malého výkonu.

Proměnlivá účinnost elektromotoru se nejlépe znázorňuje mapou účinnosti. Z článků [13], [15], [20] - [22] odvodíme obecnou mapu účinnosti pro SynRM. Maximální účinnost SynRM se pohybuje kolem hodnoty 95 %, zatímco maximální účinnost IPMSynRM se pohybuje nad 97 %.

Z článku [23] vyplývá, že mapa účinnosti lze pro účely této práce být považována za symetrickou. Pro účinnost stroje při rekuperaci bude použita stejná mapa účinnosti jako pro motor.



Obr. 5-10 Mapa účinnosti SynRM

5.3.2 Převodovka

Vysoké točivé momenty elektrických motorů umožňují použití jednostupňových převodovek. Pro navrhovaný elektromobil je zvolena planetová převodovka s jedním převodem specifickým pro každý ze dvou motorů.

Planetová převodovka byla zvolena pro její malé rozměry a nízké mechanické ztráty 3 %, což znamená účinnost přenosu momentu na kola 97 % [19].

5.3.3 Určení převodů jednotlivých motorů

Snahou návrhu převodových poměrů je balancovat maximální dosažitelnou rychlost vozidla s použitelným maximálním točivým momentem při zrychlování vozidla. Návrh se řídí maximálním výkonem motorů a požadavkem na maximální rychlost vozidla. Maximální výkon obou motorů dohromady je 328 kW a požadovaná maximální rychlost je 250 km/h.

Další požadavky na návrh jsou následující. Za účelem dosažení co nejlepších výkonnostních vlastností bude požadováno, aby maximální rychlost 250 km/h byla dosažena přirozeně neboli aby se při rychlosti 250 km/h a hmotnosti vozidla s řidičem 2380 kg rovnaly síly pohánějící vozidlo a odporové síly působící proti směru pohybu vozidla. Do pohonu nehodláme zakomponovat spojku, tudíž se musíme ujistit, že oba motory dosáhnou maximálních otáček 16000 ot/min až při rychlosti větší než 250 km/h. Navrhnout motor tak, aby dosáhl 16000 ot/min při rychlosti 250 km/h je poněkud riskantní, motor tedy navrhne tak, aby dosáhl maximálních otáček až za maximální rychlostí s určitou rezervou. Řešením bez spojky se sice připravíme o možnost vysokého převodu jednoho z motorů a tím i o vysoký záběrný moment. Vzhledem k existenci maximálního efektivně využitelného momentu daného přilnavostí pneumatik a vysoké přetížitelnosti SynRM se řešení bez spojky jeví jako lepší, jelikož spojka představuje do systému další nechtěné mechanické ztráty.

Tab. 5-7 Optimální kombinace převodů

Převod zadního motoru	Převod předního motoru
6.2	5.35

Optimální kombinace převodů obou motorů byla zjištěna experimentálně. Postup si ukážeme na již zjištěné kombinaci převodů.

Z již určené momentové charakteristiky dokážeme zjistit všechny potřebné údaje. Chceme-li charakteristiky obou motorů sečíst v celkovou momentovou charakteristiku motoru za předpokladu, že jsou různě převodované, musíme opět popsat momentové charakteristiky v oblasti odbuzování rovnicemi. Ideální bude získat závislost točivého momentu na rychlosti vozidla.

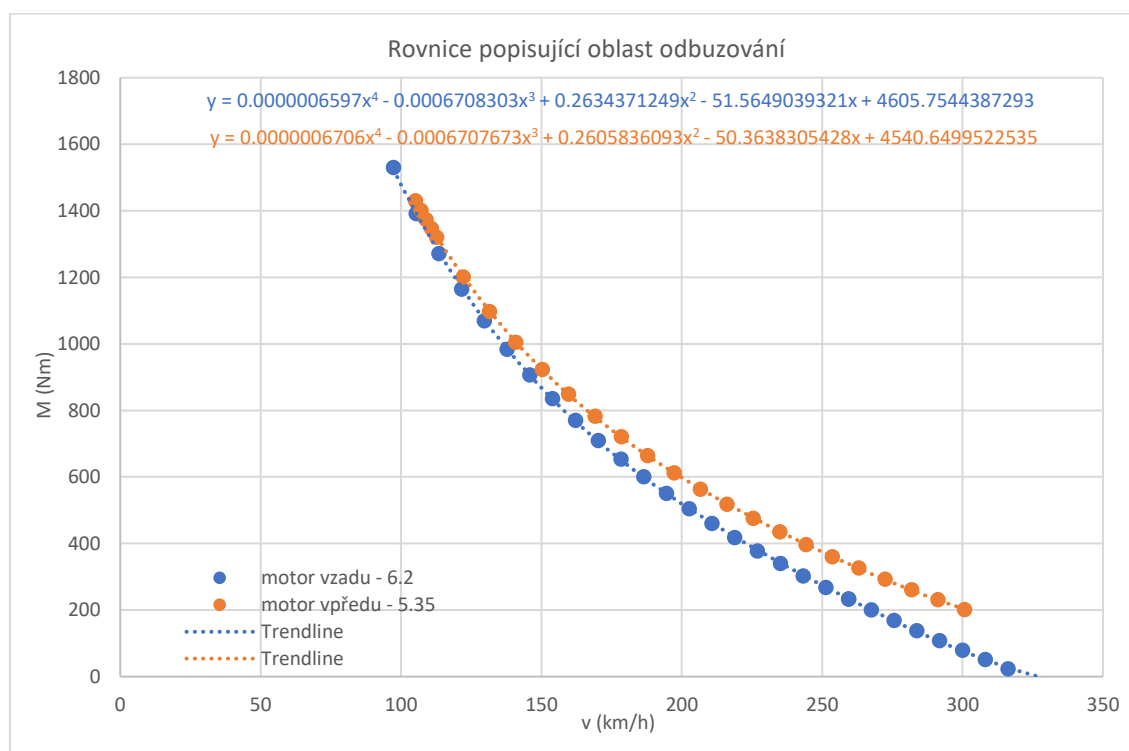
Otáčky motoru přepočítáme na rychlost vozidla.

$$v \text{ (km/h)} = \frac{2\pi r \cdot n \cdot 3.6}{k_{b,f} \cdot 60} \text{ (km/h)} \quad (5-17)$$

Poté vypočteme točivý moment přenesený na kola.

$$M_k = M \cdot k_{b,f} \cdot \eta_{př} \quad (5-18)$$

Výpočty provedeme pro oba motory a výsledné body proložíme polynomem 4. stupně.



Obr. 5-11 Zjištění rovnic popisujících oblast odbuzování mechanické charakteristiky

Nyní můžeme sestavit rychlostní závislosti točivého momentu obou motorů a následně je i sečíst. Hledáme závislost točivého momentu přeneseného na kola na rychlosti vozidla. Nyní volíme odlišný postup výpočtu. Vstupní hodnota bude rychlost v km/h. Rychlost přepočteme na otáčky motoru.

$$n = \frac{60 \cdot k_{b/f} \cdot v}{3.6 \cdot 2\pi r} \quad (5-19)$$

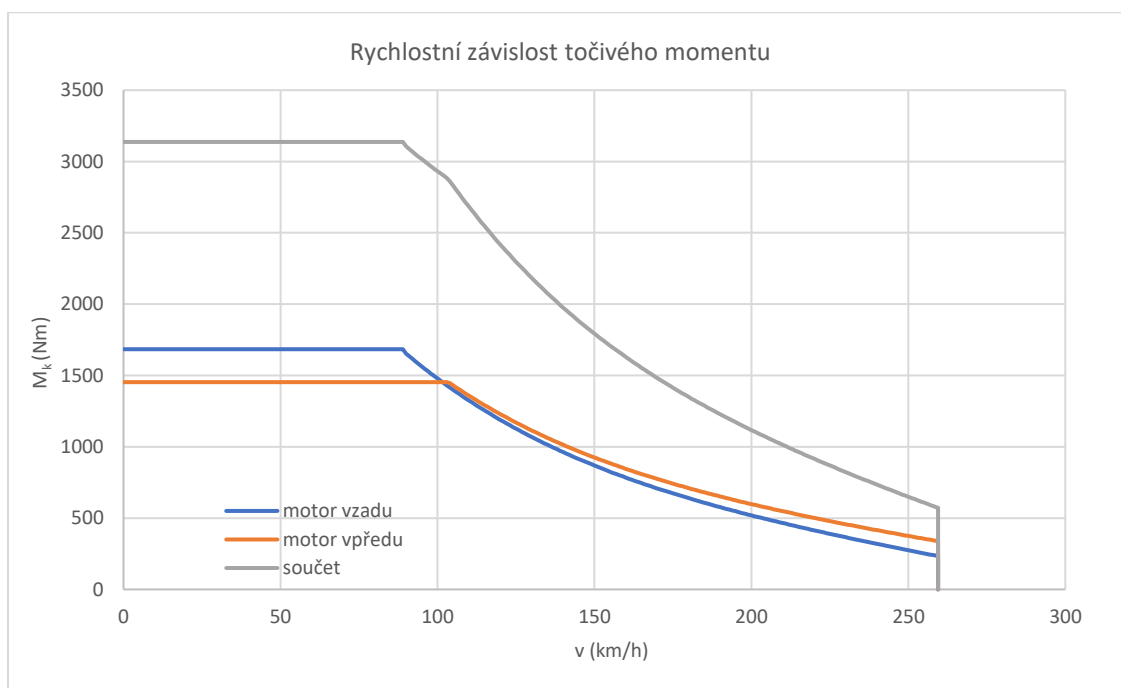
Točivý moment budeme počítat odlišně pro různé oblasti charakteristiky. Před kolenem charakteristiky vypočteme konstantní maximální moment podle vzorce (5-18). Za kolenem charakteristiky počítáme točivý moment využitím polynomů 4. stupně. Pro motor vzadu s převodem 6.2 použijeme polynom:

$$M_k = 0.000000659v^4 - 0.0006708v^3 + 0.2634v^2 - 51.56v + 4605 \quad (5-20)$$

Pro motor vpředu s převodem 5.35 použijeme polynom:

$$M_k = 0.0000006706v^4 - 0.0006708v^3 + 0.2606v^2 - 50.36v + 4540 \quad (5-21)$$

Po provedení těchto výpočtů můžeme jednoduše obě charakteristiky sečíst a získáme výslednou rychlostní závislost točivého momentu vozidla.



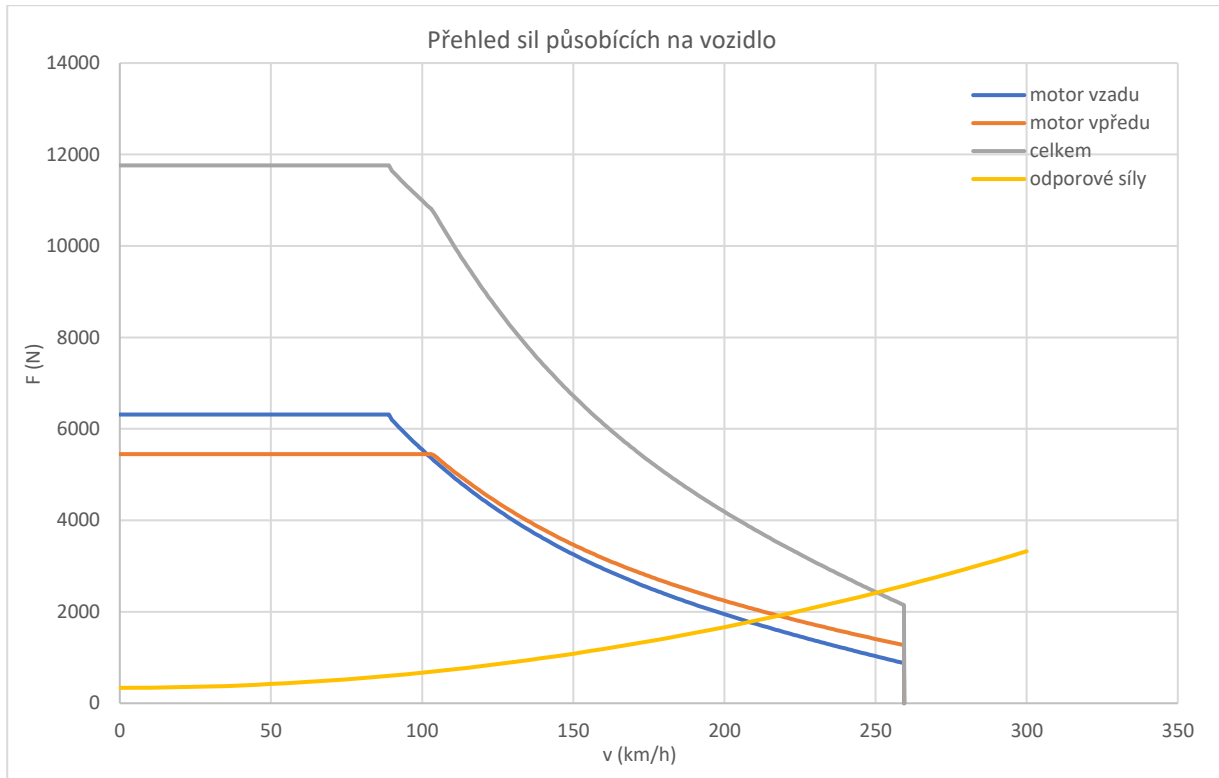
Obr. 5-12 Rychlostní závislosti točivého momentu obou motorů

Z grafu lze ověřit předpoklad, že vyšší převod znamená větší moment před kolenem charakteristiky, ale menší moment ve vyšších rychlostech vozidla. Zároveň si lze všimnout, že jakmile motor s vyšším převodem dosáhne 16000 ot/min, na nulu klesne i moment motoru s menším převodem, který 16000 ot/min ještě nedosáhl. Motor s menším převodem nikdy 1600 ot/min nedosáhne, jelikož v pohonech není přítomna spojka a tím pádem by dosažení 16000 ot/min motoru s menším převodem znamenalo mechanické poškození motoru s vyšším převodem.

Pro vizuální reprezentaci maximální dosažitelné rychlosti přepočítáme točivý moment přenesený na kola na sílu, kterou kola působí na vozidlo ve směru pohybu vozidla.

$$F = \frac{M}{r} \quad (5-22)$$

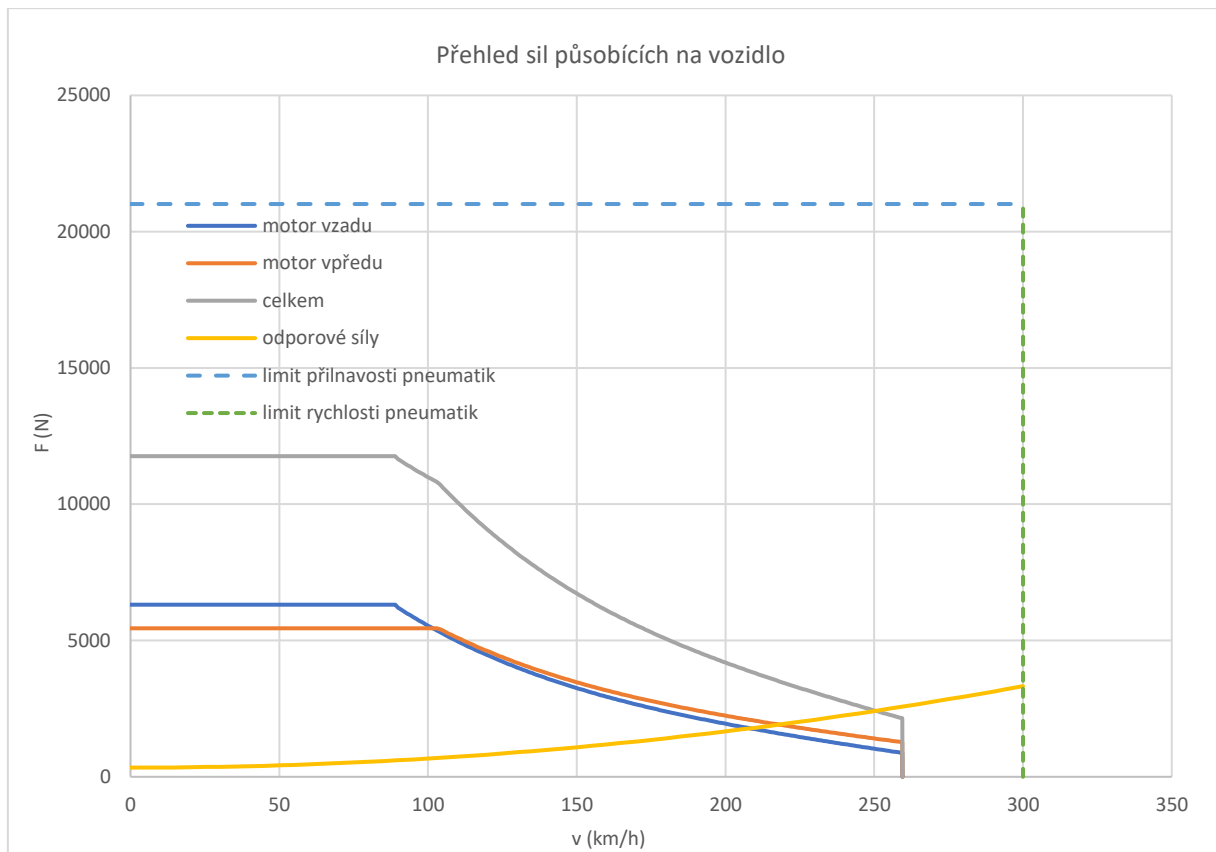
K přepočítaným točivým momentům na odpovídající sílu do grafu ještě přidáme křivku odporových sil, které působí proti směru pohybu vozidla, kterou jsme sestavili v kapitole 5.2.4.



Obr. 5-13 Přehled sil působících na vozidlo (1)

Průsečíky jednotlivých průběhů sil pohánějících vozidlo s křivkou odporových sil nám udávají maximální dosažitelnou rychlost. Lze vidět, že vozidlo poháněné oběma motory zároveň na plný výkon dosahuje maximální rychlosti 250 km/h. Při vyšší rychlosti nejsou motory schopny dodat dostatečný točivý moment pro další zrychlení. Zároveň vidíme, že motory mají určitou bezpečnostní rezervu, co se týče maximálních otáček. Při dosažení maximální rychlosti má motor s vyšším převodem 15416 ot/min a motor s nižším převodem 13302 ot/min. Tyto skutečnosti odpovídají požadavkům návrhu.

Z grafu lze také vyčíst maximální rychlosti vozidla, kdyby bylo poháněno pouze jedním z dvou motorů. Při pohánění pouze zadním motorem by maximální rychlost byla 210 km/h a při pohánění pouze předním motorem by maximální rychlost byla 220 km/h.



Obr. 5-14 Přehled sil působících na vozidlo (2)

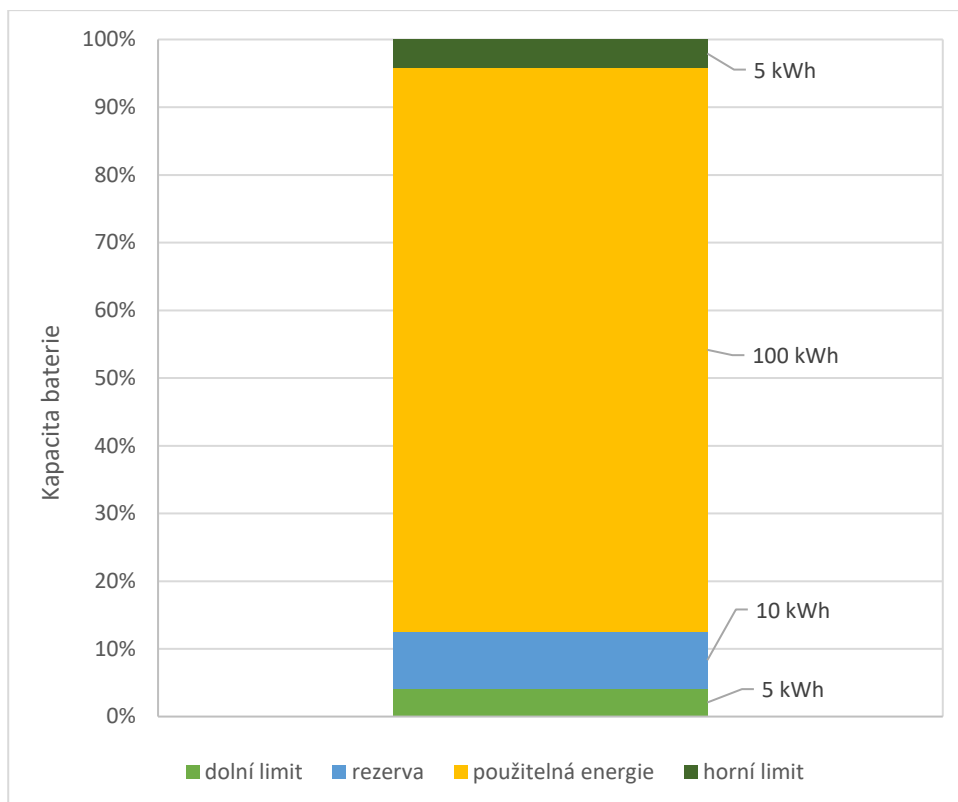
V grafu Obr. 5-14 jsou navíc přidány čárkovanými čarami vyznačené limity rychlosti a přilnavosti pneumatik. Limit rychlosti jsme vyčetli z Tab. 5-4 a limit přilnavosti byl vypočten následovně.

$$F_{adh} = mgC_{fr} = 2380 \cdot 9.81 \cdot 0.9 = 21013 \text{ N} \quad (5-23)$$

Návrh motorů nedovoluje maximální rychlosti pneumatik dosáhnout. Zároveň vidíme, že při zrychlování z 0 km/h na 100 km/h nám pneumatiky po většinu zrychlování ani nedovolí přetížení větší než dvojnásobné. Při větším přetížení by pneumatiky začaly ztrácet přilnavost k vozovce, protáčet se a vozidlo by zrychlovalo výrazně pomaleji.

5.4 Dimenzování bateriového systému

V situaci, kdy už známe výkon obou motorů a požadavky na vlastnosti uložení energie popsané v kapitole 1.3, jsme schopni navrhnout systém uložení energie. Baterii budeme dimenzovat na napětí 400 V a využitelnou kapacitu 100 kWh. Uložení energie je potřeba chránit před přílišným nabitím nebo přílišným vybitím. Budeme uvažovat rezervu 5 % z využitelné kapacity nahoře a 5 % z využitelné kapacity dole. Dále je vhodné zahrnout do systému rezervu na dojezd vozidla 10 kWh v případě vybití baterie na nevhodném místě. Uložení energie bude dimenzováno na 120 kWh, z čehož 12.5 % – 95.8 % je rozsah, ve kterém se nachází využitelná kapacita baterie. Optimální řešení budeme vyhodnocovat porovnáním několika klíčových parametrů navrženého systému uložení energie.



Obr. 5-15 Zobrazení využitelné kapacity baterie

5.4.1 Parametry pro vyhodnocení návrhu

Maximální jmenovitý výkon baterie a maximální výkon baterie při přetížení. Motory jsme navrhli na určitou hodnotu výkonu. Od baterie budeme vyžadovat, aby byla schopna dodávat dostatečný trvalý výkon na provoz obou motorů na maximální výkon zároveň. Bateriové články budou schopny po určitou dobu dodávat výkon vyšší než jmenovitý. Hodnota tohoto výkonu a délka trvání tohoto režimu bude důležitým faktorem při proudovém přetížení motoru.

Cena. Zaměření této práce sice není ekonomické, ale srovnání ceny sestavených baterií může být určitě přínosné.

Hmotnost. Hmotnost baterie má přímý vliv na jízdní vlastnosti, spotřebu a dojezd elektromobilu. Obecná snaha je baterii udržet co nejlehčí.

Výška baterie a zabraná plocha. Jelikož baterie bude instalována v podlaze elektromobilu, je třeba zvolit články s malou výškou. Zároveň se baterie musí do podlahy plošně vejít.

Hustota energie a hustota výkonu. Budeme hodnotit hustoty hmotnostní, objemové a plošné. Pro elektromobil je žádoucí, aby objem, plocha a hmotnost baterie byly co nejmenší. Tudíž vysoké číslo hustoty je indikátorem dobré volby článku.

5.4.2 Porovnávané články

Porovnávali jsme sestavení bateriového uložení z různých článků volně dostupných na trhu. Pro přehlednost si články představíme, přiřadíme jim název a odkážeme na zdroj informací. Je vhodné upozornit, že některé články již nejsou na trhu dostupné a odkazy směřují na stránku s výběrem článků stejného typu.



Obr. 5-16 Cylindrický článek LiFePO_4 32700 6000 mAh [24] – LiFePO_4 cyl



Obr. 5-17 Prismatický článek LiFePO_4 135 Ah [25] – LiFePO_4 pris



Obr. 5-18 Cylindrický článek NMC 21700 5000 mAh [26] – NMC cyl 21700



Obr. 5-19 Cylindrický článek NMC 18650 2600 mAh [27] – NMC cyl 18650 (1)



Obr. 5-20 Cylindrický článek NMC 18650 2600 mAh [28] – NMC cyl 18650 (2)



Obr. 5-21 Prismatický článek NMC 50 Ah [29] – NMC pris 50



Obr. 5-22 Prismatický článek NMC 100 Ah [30] – NMC pris 100



Obr. 5-23 Prismatický článek NMC 150 Ah [31] – NMC pris 150

5.4.3 Baterie sestavená z cylindrických článků

Tab. 5-8 Tabulka parametrů baterie sestavené z cylindrických článků

	LiFePO ₄ cyl	NMC cyl 21700	NMC cyl 18650 (1)	NMC cyl 18650 (2)
<i>Jmenovité napětí (V)</i>	3.2	3.6	3.6	3.6
<i>Kapacita (mAh)</i>	6000	5000	2600	2600
<i>Kapacita (Wh)</i>	19	18	9.3	9.3
<i>Hmotnost (g)</i>	141	69	100	49
<i>Vnitřní odpor (mΩ)</i>	20	35	-	35
<i>Rozměry (mm)</i>	32d x 70	20d x 70	18d x 65	18d x 65
<i>Životnost (počet cyklů)</i>	2000+	500+	-	500+
<i>Cena (Kč)</i>	99	140	175	51
<i>Maximální trvalý vybíjecí proud článku(A/C)</i>	2.9	10.2	35	7.8
<i>Maximální dočasný vybíjecí proud článku (A/C)</i>	18	-	-	15
<i>Maximální trvalý vybíjecí proud baterie (A)</i>	145	612	4060	904.8
<i>Maximální dočasný vybíjecí proud baterie (A)</i>	900	-	-	1740
<i>Trvalý výkon baterie (kW)</i>	58	244.8	1624	361.9
<i>Dočasný výkon baterie (kW)</i>	360	-	-	696
<i>Počet článků v sérii</i>	125	112	112	112
<i>Počet paralelních článků</i>	50	60	116	116
<i>Počet článků v baterii</i>	6250	6720	12992	12992
<i>Cena baterie (tis. Kč)</i>	619	941	2274	663
<i>Hmotnost baterie (kg)</i>	881.25	464	1299	637
<i>Objem článků (m³)</i>	0.35	0.15	0.21	0.21
<i>Objem baterie (m³)</i>	0.448	0.19	0.27	0.27
<i>Plocha baterie (m²)</i>	6.4	2.7	4.2	4.2
<i>Výška baterie (mm)</i>	70	70	65	65
<i>Skutečné jmenovité napětí baterie (V)</i>	400	403.2	403.2	403.2
<i>Skutečná kapacita baterie (Wh)</i>	120000	120000	120640	120640
<i>Objemová hustota energie (kWh/m³)</i>	268	638	441	441
<i>Plošná hustota energie (kWh/m²)</i>	188	446	287	287
<i>Hmotnostní hustota energie (Wh/kg)</i>	136	259	93	190
<i>Objemová hustota výkonu (kW/m³)</i>	130	1301	5935	1323
<i>Plošná hustota výkonu (kW/m²)</i>	9	91	386	86
<i>Hmotnostní hustota výkonu (W/kg)</i>	66	528	1250	569

5.4.4 Baterie sestavená z prismatických článků

Tab. 5-9 Tabulka parametrů baterie sestavené z prismatických článků

	LiFePO ₄ pris	NMC pris 100	NMC pris 50	NMC pris 150
<i>Jmenovité napětí (V)</i>	3.2	3.65	3.65	3.65
<i>Kapacita (Ah)</i>	135	100	50	150
<i>Kapacita (Wh)</i>	54000	40000	20000	60000
<i>Hmotnost (g)</i>	2600	1700	830	2600
<i>Vnitřní odpor (mΩ)</i>	0.5	0.7	1	0.5
<i>Rozměry (mm)</i>	149x103x79	148x103x52.5	148x97x27	148x103x79
<i>Životnost (počet cyklů)</i>	2500+	1600+	1600+	1600+
<i>Cena (Kč)</i>	1735	1699	702	1818
<i>Maximální trvalý vybíjecí proud článku(A)</i>	135 - 1C	100 - 1C	150 - 3C	450 - 3C
<i>Maximální dočasný vybíjecí proud článku (A)</i>	399 - 2.95C	200 - 2C	300 - 6C	750 - 5C
<i>Maximální doba přetížení (s)</i>	60	30	30	30
<i>Standardní nabíjecí proud článku (C-rate)</i>	1C	1C	1C	1C
<i>Standardní nabíjecí proud baterie (A)</i>	405	300	300	300
<i>Maximální trvalý nabíjecí výkon baterie (kW)</i>	162	120	120	120
<i>Maximální trvalý vybíjecí proud baterie (A)</i>	405	300	900	900
<i>Maximální dočasný vybíjecí proud baterie (A)</i>	1197	600	1800	1500
<i>Trvalý výkon baterie (kW)</i>	162	120	360	360
<i>Dočasný výkon baterie (kW)</i>	478.8	240	720	600
<i>Počet článků v sérii</i>	125	110	110	110
<i>Počet paralelních článků</i>	3	3	6	2
<i>Počet článků v baterii</i>	375	330	660	220
<i>Cena baterie (tis. Kč)</i>	651	561	463	400
<i>Hmotnost baterie (kg)</i>	975	561	548	572
<i>Objem článků (m³)</i>	0.455	0.264	0.256	0.265
<i>Objem baterie (m³)</i>	0.455	0.264	0.256	0.265
<i>Plocha baterie (m²)</i>	4.41	2.56	2.64	2.57
<i>Výška baterie (mm)</i>	103	103	97	103
<i>Skutečné jmenovité napětí baterie (V)</i>	400	401.5	401.5	401.5
<i>Skutečná kapacita baterie (Wh)</i>	162	120	120	120
<i>Objemová hustota energie (kWh/m³)</i>	356	454	469	453
<i>Plošná hustota energie (kWh/m²)</i>	367	468	455	467
<i>Hmotnostní hustota energie (Wh/kg)</i>	166	214	219	210
<i>Objemová hustota výkonu (kW/m³)</i>	356	454	1407	1359
<i>Plošná hustota výkonu (kW/m²)</i>	37	47	137	140
<i>Hmotnostní hustota výkonu (W/kg)</i>	166	214	657	629

5.4.5 Zhodnocení testovaných článků

Z tabulek jde dobře vidět, že LiFePO_4 články neplní požadavky stanovené v kapitole 1.3. Baterie sestavená z takových článků by nedosahovala požadované hodnoty výkonu, jelikož vybíjecí proudy jsou u LiFePO_4 článků pro naše potřeby příliš malé. Tyto články se ale pyšní značně delší životností a bezpečnějším provedením. Dali by se aplikovat v situacích, kdy není kladen takový důraz na poměr výkonu ku hmotnosti vozidla a zároveň se očekává velmi časté používání – cyklické vybíjení a nabíjení baterií (například elektrické autobusy).

NMC články již mají lepší vlastnosti pro trakční aplikace. Větší vybíjecí proudy znamenají vyšší hustotu výkonu, což umožňuje jejich užití v pohonech pro výkonnostní trakční aplikace. Nevýhodou NMC článků je menší bezpečnost a kratší životnost v porovnání s technologií LiFePO_4 .

NMC cyl 21700 článek má většinu parametrů vyhovujících, ale maximální trvalý výkon není dostačující na pohánění obou motorů zároveň.

Zajímavé je srovnání článků NMC cyl 18650 (1) a NMC cyl 18650 (2). Články jsou si velmi podobné a z výkonnostního hlediska se liší pouze velikostí vybíjecích proudů a hmotností. Článek (1) má pro užití v navrhovaném elektromobilu abnormálně vysoké vybíjecí proudy. Dle výpočtů by baterie sestavená z tohoto článku schopna dodávat trvalý výkon 1.6 MW. Zároveň jeho hmotnost je dvojnásobná oproti článku (2) a baterie by vážila 1300 kg. Článek NMC cyl 18650 (2) všemi svými parametry vyhovuje. Životnost 500+ cyklů je ale pro elektromobil pro každodenní užívání velmi málo.

Nejatraktivnějšími články pro použití v navrhovaném systému uložení energie se jeví být prismatické články NMC pris 50 a NMC pris 150. Trvalý výkon baterií sestavených z těchto článků by byl identický – vyšší než součet maximálních výkonů obou motorů. NMC pris 50 umožňuje proudové přetížení motoru 2.195, zatímco NMC pris 150 umožňuje přetížení 1.829. Z dat v grafu Obr. 5-14 zjistíme maximální přetížení dané přilnavostí pneumatik. Toto přetížení je v oblasti 0 km/h – 90 km/h konstantní a má hodnotu 1.786. Oba články jsou schopny dodat dostatečné přetížení po stejně dlouhou dobu 30 vteřin. Baterie z NMC pris 50 by byla o 24 kg lehčí a zhruba o 60 000 Kč dražší než baterie NMC pris 150. Z pohledu automobilky by ale cena byla výrazně nižší při pořízení velkého množství článků.

Pro návrh uložení energie je zvolena baterie sestavená z článků NMC pris 50.

KAPITOLA 6: SIMULACE JÍZDY NAVRŽENÉHO ELEKTROMOBILU

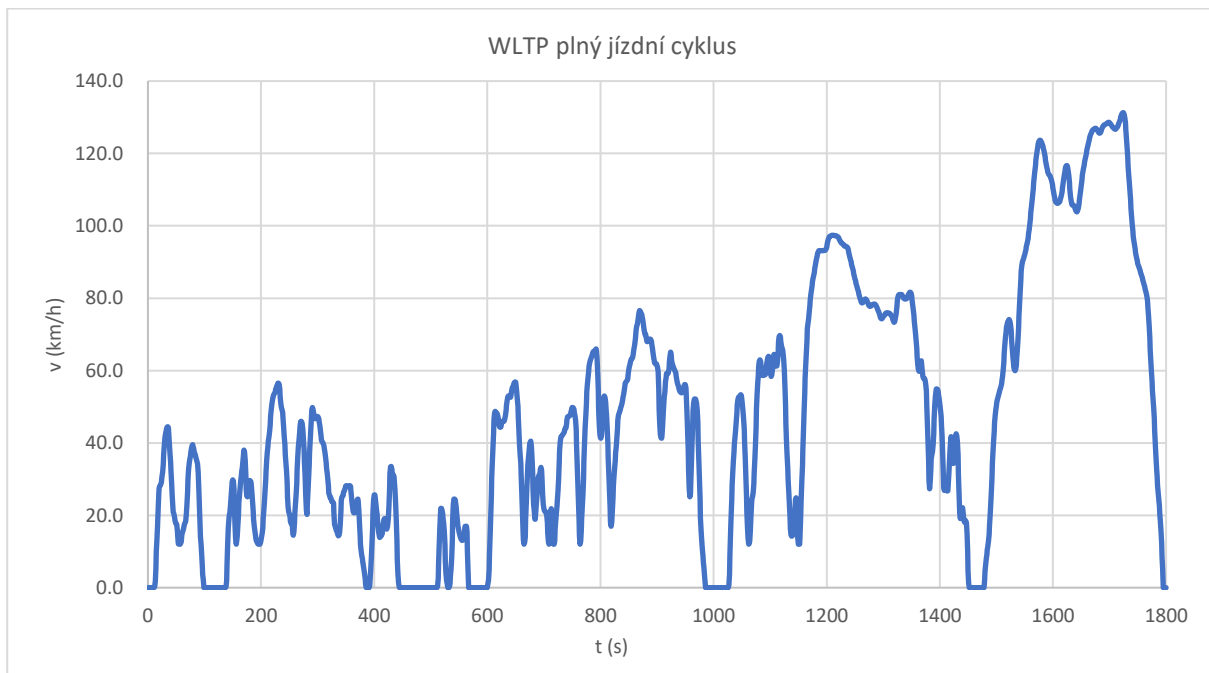
Nejdůležitější komponenty elektromobilu jsou navrženy tak, aby splňovaly určitá kritéria. Nejlepší způsob ověření validity výsledků je simulovat jízdu navrženého elektromobilu. Simulace proběhne dvěma způsoby. Bude vytvořen elementární matematicko-fyzikální model pro výpočet spotřeby elektromobilu. Tento model bude poté aplikován na vybraný úsek jízdy za účelem vyhodnocení návrhu elektromobilu.

6.1 WLTP jízdní cykly

WLTP (Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure) jízdní cykly jsou mezinárodním standardem pro určování palivové či elektrické spotřeby automobilů. Testy se zpravidla provádí na válcových dynamometrech. Podstata WLTP jízdních cyklů je harmonizovaný jízdní profil, který má realisticky simulovat provoz na silnici. Data o silničním provozu byla nasbírána z několika zemí na světě za účelem vytvoření univerzálního jízdního profilu aplikovatelného po celém světě.

Jízdních profilů je hned několik. Navrhovaný elektromobil patří vzhledem ke svému poměru výkonu ku hmotnosti do třetí třídy. Samotný jízdní profil udává informace o rychlosti a zrychlení vozidla každou sekundu po dobu trvání jízdního cyklu. Výsledkem WLTP je spotřeba automobilu za předpokladu, že jel přesně podle dat uváděných profilem jízdního cyklu.

Reálná spotřeba automobilu se bude lišit pro různé řidiče, jejichž jízdní dovednosti a vlastnosti jsou specifické pro každého z nich. Další nevýhodou WLTP je nerealistický jízdní profil pro výkonná vozidla. Nejvyšší výkonnostní třída WLTP odpovídá minimálnímu PtW poměru 34 W/kg. To je pro sportovní vozy nízká hodnota. Například námi navrhovaný elektromobil má poměr PtW 138.7 W/kg. Jízdní profil takto výkonných automobilů se bude lišit od WLTP jízdního cyklu pro nejvyšší výkonnostní třídu.



Obr. 6-1 Časová závislost rychlosti WLTP plného jízdního cyklu

Vidíme, že plný jízdní cyklus má čtyři fáze. Cykly se dělí podle maximální dosažené rychlosti. Jednotlivé cykly se snaží simulovat reálné podmínky pro různé typy silnic.

Cykly si pro lepší popis rozdělíme dle maximální dosažené rychlosti a simulovaného typu silnice na low, medium, high a extra-high.

Tab. 6-1 Shrnutí základních dat charakterizujících jízdní cyklus

	Low	Medium	High	Extra-high	Plný cyklus
Doba trvání (s)	589	433	455	323	1800
Doba stání (s)	156	48	31	7	241
Doba stání (%)	26.5	11.1	6.8	2.2	13.4
Vzdálenost (m)	3095	4756	7158	8254	23262
Maximální rychlost (km/h)	56.5	76.6	97.4	131.3	131.3
Průměrná rychlost bez stání (km/h)	25.7	44.5	60.8	94.0	53.8
Průměrná rychlost se stáním (km/h)	18.9	39.5	56.6	92.0	46.5
Minimální zrychlení (m/s ²)	-1.47	-1.49	-1.49	-1.21	-1.49
Maximální zrychlení (m/s ²)	1.47	1.57	1.58	1.03	1.58

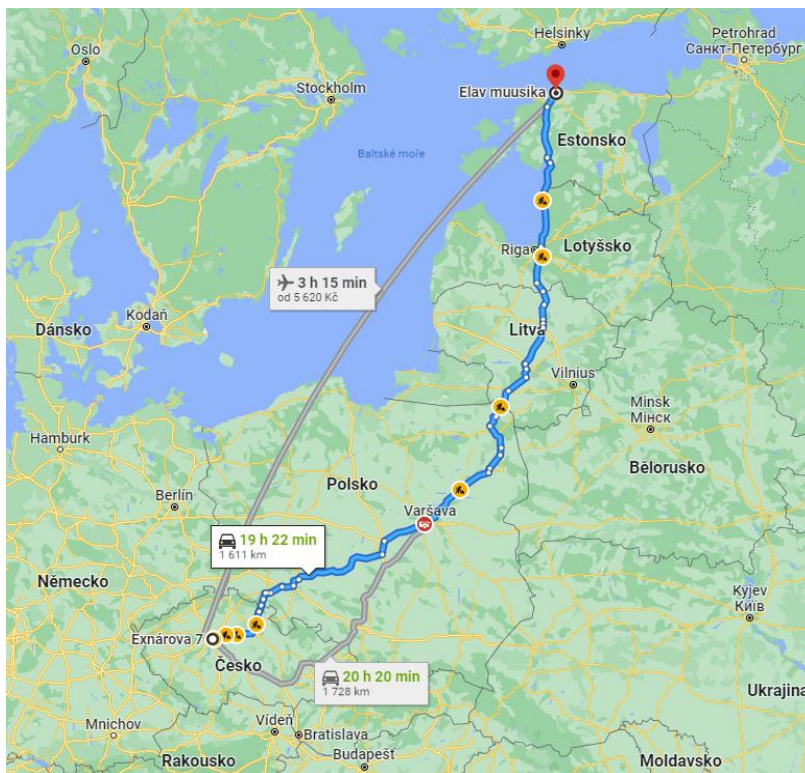
6.2 Volba úseku jízdy a získání potřebných dat

Úsek jízdy, na který budeme aplikovat data o energetické spotřebě elektromobilu získaná z vytvořeného modelu, byl vybrán tak, aby na něm šla ověřit kvalita návrhu komponent a vozidla jako celku.

6.2.1 Úsek

Zvolený úsek je cesta na dovolenou z Prahy do Tallinnu – hlavního města Estonska. Během cesty se projíždí přes Varšavu a Rigu. Cesta je dostatečně dlouhá na to, aby muselo minimálně jednou tankovat i auto se spalovacím motorem. Jedná se o vzdálenost typickou pro rodinnou cestu autem na dovolenou. Trasa je dlouhá 1611 km a očekávaná doba ujetí trasy je 19 hodin a 22 minut v ideálním provozu dle map Google. Je možné zobrazení konkrétní trasy [32].

Primárně budeme předpokládat, že trasa se pojede nonstop. Řidiči se kvůli bezpečnosti budou střídat. Jako alternativa bude prozkoumáno přenocování řidiče a pasažérů v hotelech ve velkých městech podél zvolené trasy.



Obr. 6-2 Zvolená trasa znázorněna na mapě

6.2.2 Získání potřebných dat

K simulování jízdy navrženého elektromobilu po zvolené trase je zapotřebí znát rychlostní limity po celé délce trasy. Mapy Google mají funkci exportování dat popisujících zvolenou trasu souřadnicovým systémem. Tato funkce je určena pro navigační systémy. V této práci bude použita za účelem zjištění rychlostních limitů podél celého zvoleného úseku cesty z Prahy do Tallinnu.

Exportovaná souřadnicová data upravíme a za využití služby Google Roads API [33] zjistíme rychlostní limity. V tuto chvíli jsou známá data o jednotlivých úsecích cesty a jejich odpovídajících rychlostních limitech. Z těchto dat bude pro pozdější výpočty sestavena tabulka s rychlostními limity a vzdálenostmi těmto rychlostním limitům odpovídajícím.

Tab. 6-2 Tabulka rychlostních limitů a odpovídajících vzdáleností

Rychlostní limit (km/h)	50	70	90	100	110	120	130	140
Vzdálenost (m)	18921	21490	757284	2000	28800	247050	186020	348700

6.3 Spotřeba elektromobilu

Energetická spotřeba elektromobilu je závislá na mnoha faktorech. Znalosti z předchozích kapitol, především z kapitoly Kapitola 5., nám umožňují provést sestavit výpočetní model, jehož výstupem bude energetická spotřeba elektromobilu na určitém úseku.

6.3.1 Výpočetní model

Vstupními daty výpočetního modelu bude časová závislost rychlosti vozidla udávaná plným WLTP jízdním cyklem zobrazeným na Obr. 6-1 společně s parametry vozidla určenými v předchozích kapitolách. Za účelem lepší přehlednosti model rozdělíme na několik částí. První část se zaměří na energii spotřebovanou elektrickými motory na pohánění vozidla. Druhá část se zaměří na energii ztracenou na vnitřním odboru baterie. Třetí část se zaměří na výpočet energie vrácené do systému rekuperací.

Výpočetní model je vytvořen v prostředí Microsoft Excel. Každé políčko ve sloupci odpovídá jedné vteřině jízdního cyklu. Má-li jízdní cyklus 1800 vteřin, jeho rychlostní profil je popsán osmnácti sty políčky pod sebou seřazenými v jednom sloupci. Níže popsané rovnice budou aplikovány na všechny políčka ve sloupci. Někdy společně s rovnicí je do políčka zadána podmínka.

Příklad výpočtu s podmínkou je, že síla pohybující vozidlem je rovna nule, pokud je zrychlení menší než nula. Když je zrychlení větší nebo rovno nule, síla se rovná násobku zrychlení a hmotnosti vozidla. Tímto získáme sílu, kterou můžeme použít pro výpočet výkonu motoru. Sloupeček výkonu motoru pak jednoduše sečteme a získáme celkový výkon motoru na daném úseku.

Časové závislosti rychlosti vozidla během jízdního cyklu budeme dále říkat jízdní profil.

6.3.1.1 Energetická spotřeba motorů

Pro následující výpočty předpokládáme, že ve vozidle sedí pouze řidič bez jakéhokoli nákladu. Elektromobil je poháněn všemi čtyřmi koly. Motor vzadu pohání zadní nápravu a pohon vpředu pohání přední nápravu. Motory se dělí o točivý moment na kolech 1:1. Tento poměr momentů neplatí při provozu motorů na plný výkon vzhledem k převodům a poklesu výkonu v oblasti odbuzování odlišným tempem vzhledem k rychlosti vozidla. V rozmezí otáček a momentů charakteristických pro jízdní cykly je možné tento poměr uvažovat. Neuvažujeme pro vozidlo diferenciál.

Síla pohybující vozidlem. Pro sílu platí podmínka vysvětlená v úvodu kapitoly 6.3.1.

$$F_{mov} = ma \quad (6-1)$$

Nyní vypočteme aerodynamický odpor (5-1) a valivý odpor (5-11) pro celý jízdní profil. Celková odporová síla působící proti směru pohybu vozidla se vypočte dle (5-12).

Sečteme-li sílu z vzorce (6-1) s celkovou odporovou silou (5-12), získáme sílu, kterou vyvíjí vozidlo v daném okamžiku.

$$F_p = F_{mov} + F_{aero} + F_{RRC} \quad (6-2)$$

Výkon dodávaný oběma motory v daném okamžiku získáme vynásobením síly vyvíjené vozidlem s rychlostí v m/s. Následně ještě podělíme účinností převodovky, jelikož motor musí vyvinout o něco větší výkon, než se objeví na kolech, kvůli mechanickým ztrátám v převodovce.

$$P = \frac{F_p v}{\eta_{př}} \quad (6-3)$$

Sílu na jedno kolo vypočítáme následovně. Točivý moment je rozdělen rovnoměrně mezi přední a zadní nápravu, poháněna jsou všechna čtyři kola.

$$F_{1k} = \frac{F_p}{4} \quad (6-4)$$

Sílu na jedno kolo přepočteme na moment na jedno kolo.

$$M_{1k} = F_{1k}r \quad (6-5)$$

Ze známé rychlosti vozidla v km/h a převodového poměru vypočteme otáčky motoru.

$$n_{b,f} = \frac{60 \cdot v \cdot k_{b,f}}{3.6 \cdot 2\pi r} \quad (6-6)$$

Točivý moment motoru vypočteme ze znalosti identického točivého momentu na každém kole. Každý motor pohání dvě kola.

$$M_{b,f} = \frac{2M_{1k}}{k_{b,f} \cdot \eta_{př}} \quad (6-7)$$

Energii spotřebovanou elektrickými motory vypočteme sečtením všech okamžitých hodnot výkonů obou motorů P vypočtených v (6-3)

$$E_x = \sum_{i=1}^y P_i \quad (6-8)$$

kde y je doba trvání cyklu (počet sekund – počet políček v Excelu).

Získáme průměrnou hodnotu otáček a točivého momentu zadního i předního motoru. Tuto hodnotu získáme aritmetickým průměrem všech nenulových hodnot otáček či momentu. Je vhodná připomínka, že nulové jsou i hodnoty momentu a otáček, když vozidlo zpomaluje viz. podmínka v úvodu kapitoly 6.3.1 Zajímají nás průměrné hodnoty z okamžitých hodnot, kdy vozidlo zrychlovalo nebo drželo nenulovou rychlost.

Tyto průměrné hodnoty otáček a momentu využijeme k odečtení účinnosti z map účinnosti motoru a invertoru. Jakmile známe účinnosti motoru a invertoru pro daný úsek, můžeme vypočítat energetickou spotřebu motorů.

$$E_m = \frac{E_x}{\frac{(\eta_{bm} + \eta_{fm})}{2} \cdot \frac{(\eta_{bi} + \eta_{fi})}{2}} \quad (6-9)$$

Získali jsme údaj o energetické spotřebě motorů na úseku daném jízdním cyklem ve Watech.

6.3.1.2 Ztráty na vnitřním odporu baterie

Skutečná energie odebraná z baterie bude větší než energie spotřebovaná oběma motory. Vodiče a elektrolyt článků nejsou ideální a představují do systému vnitřní odpor. Průchodem proudem se na vnitřním odporu elektrická energie přeměňuje v tepelnou energii. Tato energie je ztrátová a musíme ji přičíst k energii spotřebované oběma motory.

Nejprve vypočteme vnitřní odpor navrhnuté baterie. Z *Tab. 5-9* víme, že vnitřní odpor použitého článku je 1 mΩ. Těchto článků je v sérii zapojeno 110. Jelikož sériové odpory se sčítají, vnitřní odpor R_i baterie je 110 mΩ. Čím je vyšší hodnota vnitřního odporu, tím jsou větší tepelné ztráty. V jízdním cyklu nám bude okamžitá hodnota ztrát na vnitřním odporu růst s okamžitým výkonem motorů. Uvažujeme konstantní napětí baterie 400 V, s výkonem se mění odběr proudů. Čím větší proud poteče z baterie, tím více se baterie bude ohřívat. Proud tekoucí z baterie v určitých okamžicích se získá jednoduše.

$$I = \frac{P}{U_{bat}} \quad (6-10)$$

Z Ohmova zákona vypočítáme úbytek napětí na vnitřním odporu.

$$U_{Ri} = I \cdot R_i \quad (6-11)$$

Okamžitou hodnotu energie ztracené na vnitřním odporu baterie získáme následovně.

$$P_{Ri} = I^2 R_i \quad (6-12)$$

Energii ztracenou na celém úseku spočítáme opět součtem všech okamžitých hodnot.

$$E_{Ri} = \sum_{j=1}^x P_{Rij} \quad (6-13)$$

Získali jsme hodnotu energie přeměněné v teplo na vnitřním odporu baterie ve Wattech.

6.3.1.3 Rekuperace

Rekuperace se nazývá pracovní režim, kdy je elektromobil brzděn strojem v generátorickém režimu. V tomto režimu je stroj poháněn koly a je generována energie, která je vrácena zpět do uložení energie.

Hodnota rekuperovatelné energie byla odvozena z vozu Škoda ENYAQ iV. ENYAQ má tři různě silné nastavení rekuperace. Středně silný režim zvládne vozidlo zpomalovat až na zrychlení -1 m/s^2 [34]. Tuto hodnotu zrychlení dosažitelného rekuperačním brzděním aplikujeme na navrhovaný elektromobil.

Nejprve vypočteme maximální sílu, kterou je auto schopno rekuperačně zpomalovat. Jelikož minimální zrychlení zvládnutelné rekuperačním systémem je -1 m/s^2 . Maximální sílu vypočteme jako násobek hmotnosti vozidla s řidičem se zápornou hodnotou minimálního zrychlení. Maximální rekuperovatelná brzdná síla je $F_{rek,max} = 2380 \text{ N}$.

Vzhledem k plynulému charakteru zpomalování lze usoudit, že rekuperace probíhá při sešlápnutí brzdového pedálu, nikoli puštěním nohy z plynu. Po přesažení maximální dosažitelné rekuperovatelné brzdné síly se zapojí mechanické brzdy vozidla a jejich brzdná síla se přičítá k rekuperační brzdné síle.

Vypočteme sílu, kterou vozidlo zpomaluje, z údajů o zrychlení a hmotnosti vozidla. Vzoreček bude aplikován na celý jízdní profil s podmínkou, že síla je vypočtena pouze pro okamžiky, kdy má zrychlení záporné hodnoty. Tato podmínka nám umožní později získat hodnotu energie vrácené do systému na daném úseku definovaném jízdním cyklem.

$$F_{dec} = -am \quad (6-14)$$

Tato síla odpovídá výslednému zpomalování vozu. Kromě brzdných účinků na vozidlo působí také odporové síly. Brzdná síla vozidla bude rozdílem síly zpomalující vozidlo a celkové odporové síly. Následující rovnice byla aplikována za podmínky, že $F_{dec} > F_{odp}$. Získaná veličina je síla celkového brzdného systému, tedy rekuperace i mechanického brzdění.

$$F_{br} = F_{dec} - F_{odp} \quad (6-15)$$

Je třeba rozlišit, kdy je brzděno rekuperací a kdy mechanickým brzdným systémem. Získáme okamžitou sílu rekuperačního brzdění. Když platí $F_{br} < F_{rek,max}$, platí následující vzorec.

$$F_{br} = F_{rek} \quad (6-16)$$

Tudíž snažíme se brzdit pouze rekuperačně. Mechanické brzdy se zapojí pouze při požadované brzdné síle větší, než zvládne vyvinout rekuperační systém. Když platí $F_{br} < F_{rek,max}$, platí následující vzorec.

$$F_{br} = F_{rek,max} \quad (6-17)$$

Pro celý jízdní profil vypočteme rekuperační brzdnu sílu na jedno kolo. Rekuperujeme oběma motory, tudíž celková rekuperační brzdná síla je rozložena mezi všechny 4 kola. Opět uvažujeme rovnoměrné rozložení sil na všechna kola. Neuvažujeme pro vozidlo brake bias.

$$F_{rek,1k} = \frac{F_{rek}}{4} \quad (6-18)$$

Rekuperační brzdnu sílu na jedno kolo přepočítáme na rekuperační brzdny točivý moment na jedno kolo.

$$M_{rek,1k} = F_{rek,1k} \cdot r \quad (6-19)$$

Vypočteme okamžité otáčky zadního a předního motoru. Pro výpočet použijeme vzorec (6-6) obohacený o podmínku, že výpočet bude proveden pouze pro okamžiky, ve kterých je rekuperační brzdná síla větší než nula. Tato podmínka nám umožní jednoduše vypočítat průměrnou hodnotu otáček odpovídající úseku definovanému jízdním cyklem.

Vypočteme rekuperační brzdny moment jednotlivých motorů za předpokladu, že každý motor je poháněn odpovídající nápravou se dvěma koly.

$$M_{rek,b,f} = \frac{2M_{rek,1k}}{k_{b,f}} \eta_{př} \quad (6-20)$$

Za pomoci hodnot průměrných otáček a průměrného točivého momentu odečteme účinnost strojů a trakčních měničů z map účinnosti Obr. 4-3 a Obr. 5-10. Pro výpočet energie vrácené do systému potřebujeme přepočítat okamžité otáčky strojů na okamžité otáčivé rychlosti.

$$\Omega_{b,f} = \frac{2\pi \cdot n_{b,f}}{60} \quad (6-21)$$

Vypočteme okamžitý výkon strojů při rekuperaci.

$$P_{b,f} = M_{rek,b,f} \cdot \Omega_{b,f} \quad (6-22)$$

Celkovou energii vrácenou do uložení energie se zanedbáním účinností získáme následovně.

$$E_r = \sum_{i=1}^x P_{bi} + \sum_{i=1}^x P_{fi} \quad (6-23)$$

Kde x je délka trvání jízdního cyklu neboli počet okamžitých hodnot jízdního profilu na trase definované jízdním cyklem.

Stroj poháněný koly vozidla má společně s trakčním měničem při rekuperaci účinnost závislou na otáčkách a brzděném momentu stroje. Jelikož mapy účinnosti stroje a trakčního měniče byly odvozeny jako symetrické, využije se pro jejich určení stejných map účinnosti jako v kapitole 4.2 a 5.3.1.4. Použité hodnoty otáček a momentů budou opět získané průměrem z okamžitých hodnot při aktivní rekuperaci.

$$E_{rek} = E_r * \frac{(\eta_{bm} + \eta_{fm})}{2} * \frac{(\eta_{bi} + \eta_{fi})}{2} \quad (6-24)$$

Můžeme si všimnout, že účinnostmi rekuperovanou energii na rozdíl od (6-9) násobíme. Účinnosti při rekuperaci generovanou energii snižují, zatímco při pohánění motorů účinnosti spotřebovanou energii zvyšují.

6.3.1.4 Shrnutí principu funkce výpočetního modelu

Celkovou energii spotřebovanou na daném úseku, respektive rozdíl energie v baterii před a po ujetí úseku daného jízdním cyklem, vypočteme následujícím způsobem.

$$E = E_m + E_{Ri} - E_{rek} \quad (6-25)$$

Tímto výpočtem dostaneme spotřebovanou energii na úseku daném plným WLTP jízdním cyklem. WLTP je standardizovaný zkušební postup široce užívaný k určování orientační hodnoty spotřeby. Spotřeba hodně závisí na řidiči, klimatických, teplotních, silničních a mnoha dalších podmínkách. Skutečná spotřeba bude tedy vždy specifická pro danou kombinaci různých faktorů.

Z plného jízdního cyklu tedy určíme spotřebu navrhovaného elektromobilu. Přepočítáme celkovou spotřebovanou energii na energii spotřebovanou v kWh na 100 km.

$$A = \frac{E \cdot 100 \cdot 1000}{3600} \quad (6-26)$$

Spotřeba elektromobilu vypočtená ve vzorci (6-26) bere v potaz energii vrácenou do systému rekuperací. Zajímavé je vypočítat spotřebu elektromobilu bez aktivní rekuperace a zhodnotit, kolik procent z celkové spotřebované energie vrátil rekuperační systém zpět do uložště energie.

$$B = \frac{(E_m + E_{Ri}) \cdot 100 \cdot 1000}{3600} \quad (6-27)$$

$$\varepsilon = \frac{E_{rek}}{E_m + E_{Ri}} \cdot 100 \quad (6-28)$$

Výsledkem WLTP plného jízdního cyklu vykonávaného navrhovaným elektromobilem jsou následující data.

Tab. 6-3 Výsledky teoretického zkušebního procesu WLTP

	S aktivní rekuperací	Bez aktivní rekuperace
Spotřeba (kWh/100 km)	16.354	20.857
Dojezd (km)	611.5	479.5
Rekuperační poměr (%)	21.6	-

Výsledná data se na první pohled zdají být realistická. Spotřeba odpovídá výkonnějšímu elektromobilu. Dojezd je vzhledem k vysoké kapacitě baterie a vysoké účinnosti motoru relativně velký. Na úseku se podaří rekuperovat 21.6 % spotřebované energie. Typická hodnota rekuperačního poměru se pohybuje okolo 30 % [44]. Navrhnutý elektromobil určitý poměr brzdné energie ztratí při mechanickém brzdění. Na simulovaném úseku snižuje tento poměr přítomnost emulace vysokorychlostních silničních úseků, na kterých se brzdí méně. Na těchto úsecích jsou odporové síly podstatně vyšší než na nízkorychlostních úsecích.

Ačkoli metoda řízení pohonu není předmětem této práce, můžeme současně uvažovanými základními způsoby řízení zhodnotit. Pohánění všech čtyř kol zároveň má za následek nižší točivé momenty obou motorů. To má za následek nižší účinnost motorů. Tuto myšlenku lze ověřit při pohledu na mapu účinnosti motoru a měniče. Při nízkovýkonových aplikacích není zapotřebí pohánět všechna čtyři kola zároveň. Postačilo by vozidlo pohánět pouze jedním se dvěma motorů. Aplikování tohoto způsobu řízení by mělo za následek zdvojnásobení dodávaného točivého momentu motoru a tím pádem i lepší účinnost. Točivý moment bude dvojnásobný při pohánění i rekuperaci vozidla.

Při přepočtu dat na pohon jedním motorem se spotřeba sníží z 16.354 kWh/100 km na 16.084 kWh/100 km. Spotřeba se sníží o 1.65 % a rekuperační poměr se zvýší z 21.6 % na 22.2 %.

6.3.1.5 Korekce jízdního profilu pro aplikaci na zvoleném úseku

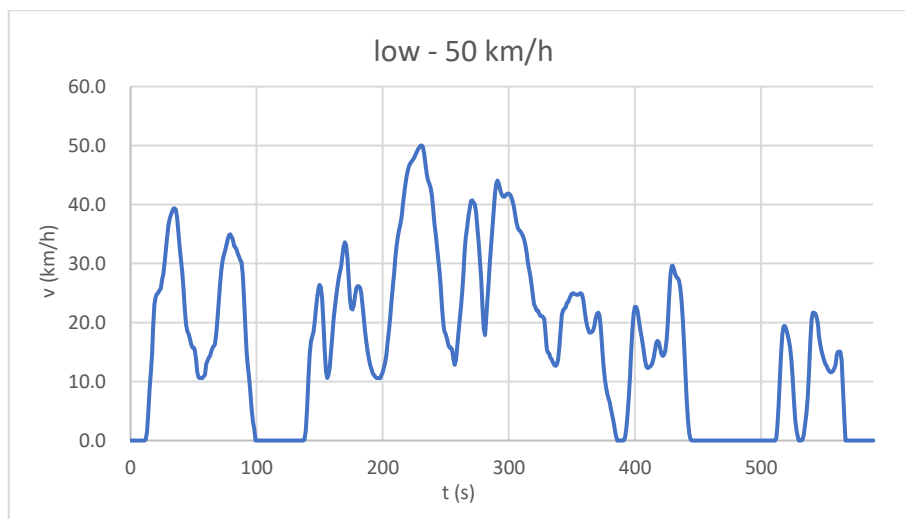
Rychlostní profil plného WLTP jízdního cyklu byl zjištěn z dat o silničním provozu v několika různých zemích. Jelikož známe konkrétní úsek a profil jeho rychlostních limitů, můžeme provést korekci jednotlivých jízdních cyklů, aby rychlostní profil odpovídal maximální rychlosti a typu vozovky. Každému rychlostnímu limitu bude přiřazen adekvátní typ cyklu, který tvarem časové závislosti rychlosti pohybu simuluje daný typ vozovky. Cykly se také snaží simulovat určitou hustotu provozu.

Korekci provedeme pronásobením rychlostního profilu poměrem požadované maximální rychlosti a maximální rychlosti původní podoby rychlostního profilu cyklu. Korekce bude následovná.

$$v_2 = v_1 \cdot \frac{v_{2max}}{v_{1max}} \quad (6-29)$$

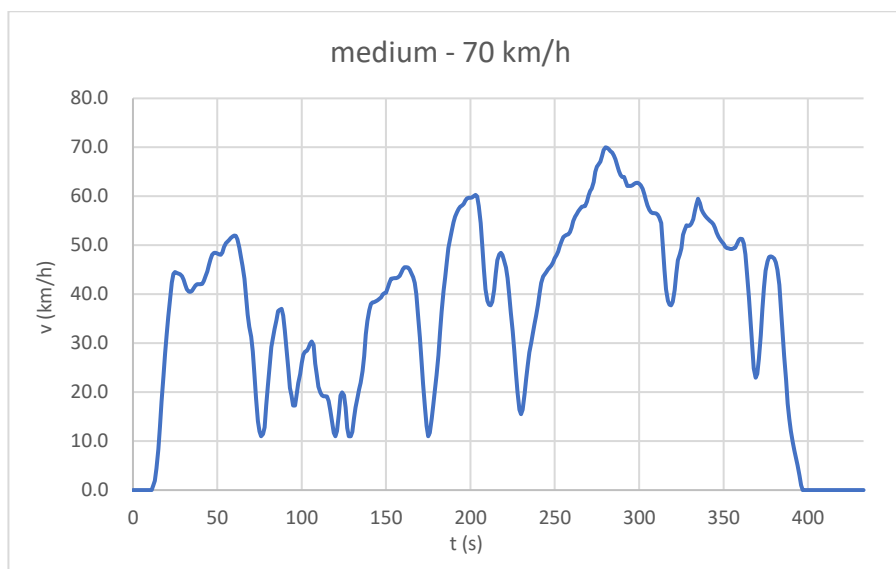
Takto pronásobíme celý jízdní profil a získáme nový jízdní cyklus pro daný rychlostní limit. Nové jízdní cykly předpokládají, že nebude překročena maximální povolená rychlost.

Korigované jízdní cykly mají následující podobu. Pro korigovaný cyklus s rychlostním limitem 50 km/h byl zvolen typ cyklu *low*.



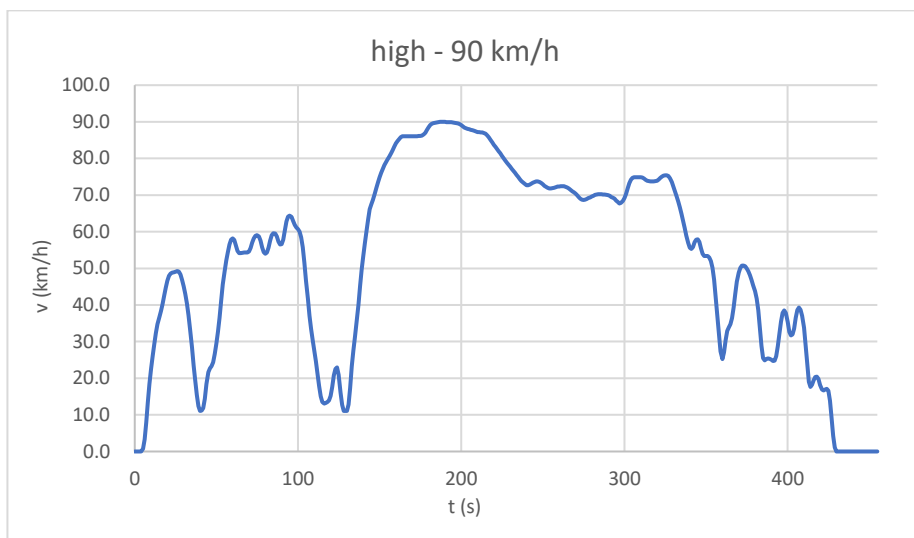
Obr. 6-3 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 50 km/h

Pro korigovaný cyklus s rychlostním limitem 70 km/h byl zvolen typ cyklu *medium*.



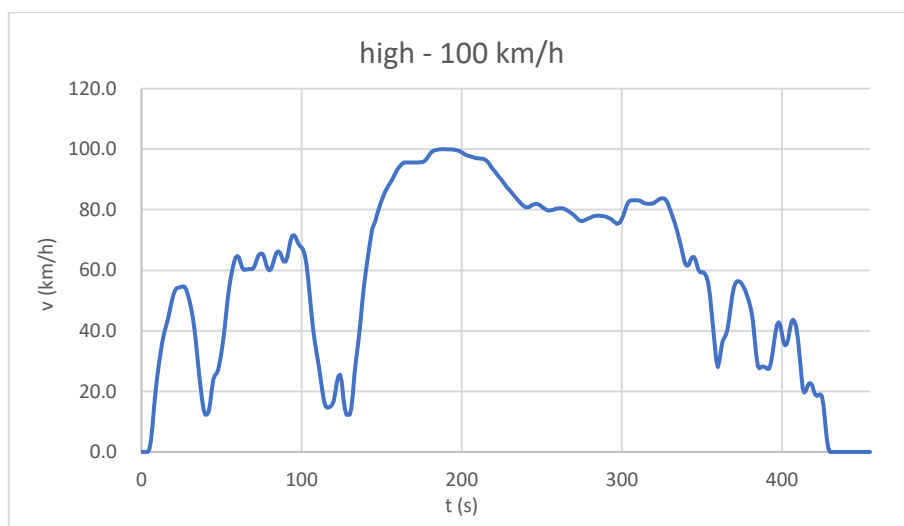
Obr. 6-4 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 70 km/h

Pro korigovaný cyklus s rychlostním limitem 90 km/h byl zvolen typ cyklu *high*.



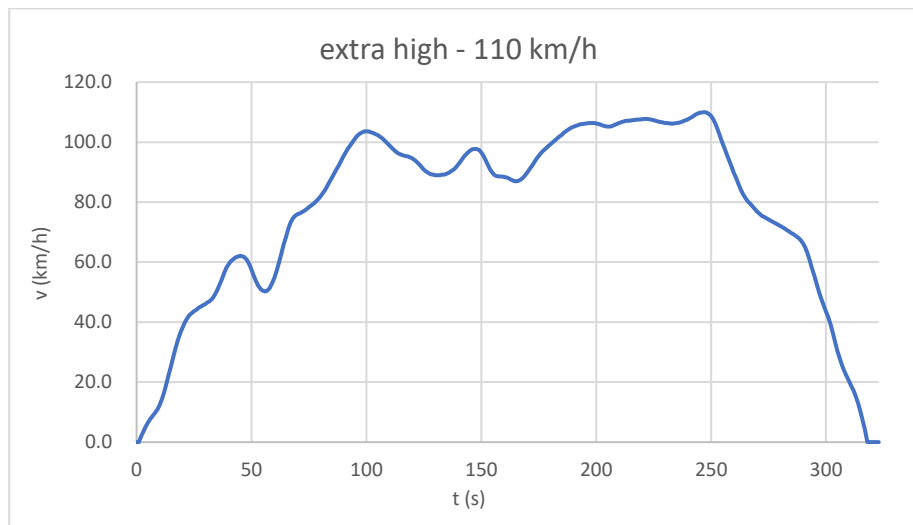
Obr. 6-5 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 90 km/h

Pro korigovaný cyklus s rychlostním limitem 100 km/h byl zvolen typ cyklu *high*.



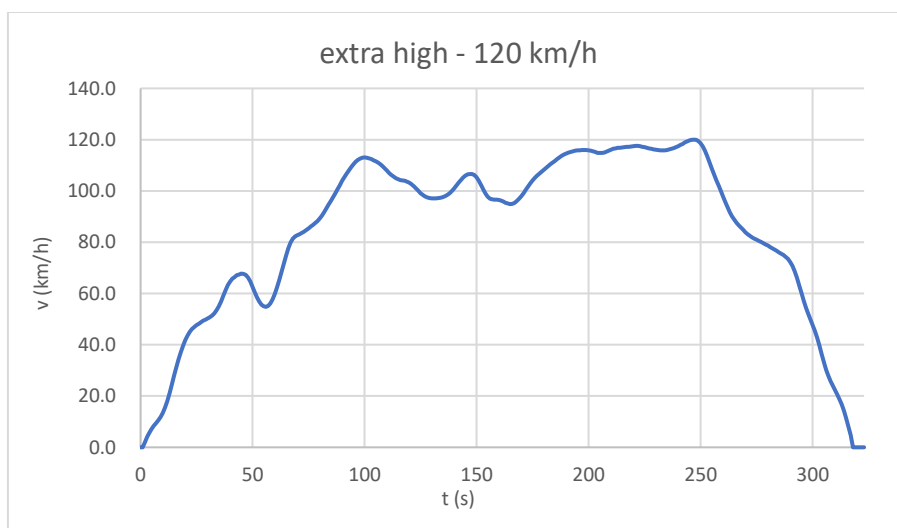
Obr. 6-6 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 100 km/h

Pro korigovaný cyklus s rychlostním limitem 110 km/h byl zvolen typ cyklu *extra-high*.



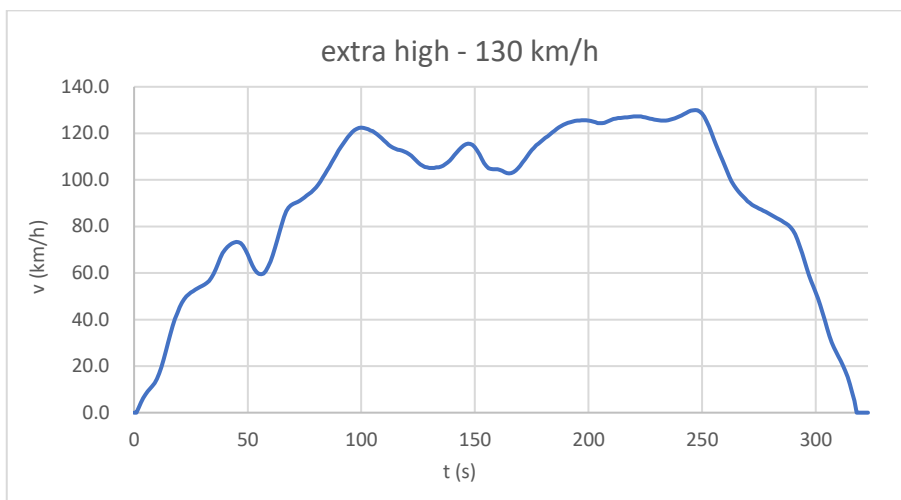
Obr. 6-7 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 110 km/h

Pro korigovaný cyklus s rychlostním limitem 120 km/h byl zvolen typ cyklu *extra-high*.



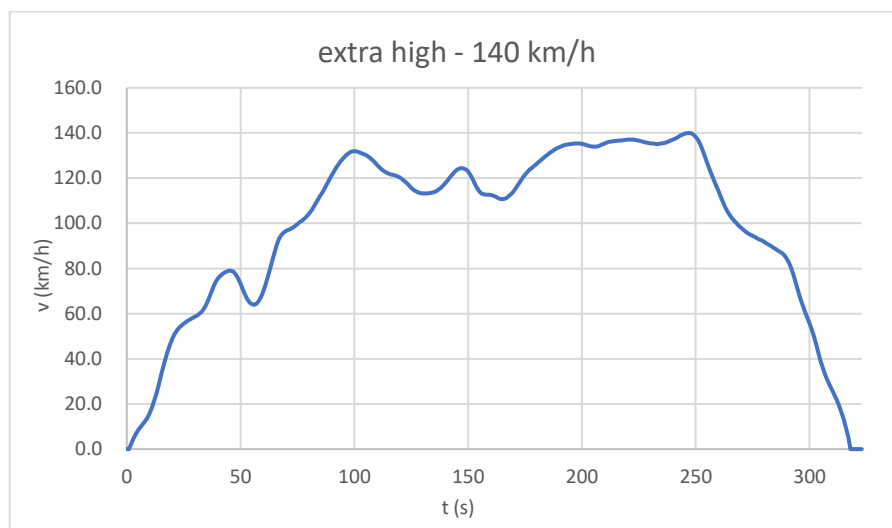
Obr. 6-8 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 120 km/h

Pro korigovaný cyklus s rychlostním limitem 130 km/h byl zvolen typ cyklu *extra-high*.



Obr. 6-9 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 130 km/h

Pro korigovaný cyklus s rychlostním limitem 140 km/h byl zvolen typ cyklu *extra-high*.



Obr. 6-10 Korigovaný WLTP jízdní cyklus pro rychlostní limit 140 km/h

6.3.1.6 Analýza simulovaného úseku cesty z Prahy do Tallinnu

Využitím vytvořeného výpočetního modelu pro výpočet spotřeby elektromobilu zjistíme hodnoty energetické spotřeby navrhovaného vozidla pro specifické jízdní cykly.

Jelikož již simulujeme cestu na dovolenou, hmotnost vozidla se navýší o 3 nové pasažéry ženského pohlaví a jejich náklad. Do výpočetního modelu dosazujeme hmotnost vozidla 2580 kg. Jelikož rekuperační brzdový systém byl navrhnout, aby dokázal brzdit elektromobil s řidičem o celkové hmotnost 2380 kg se zrychlením -1 m/s^2 , brzdná síla rekuperačního systému zůstává 2380 N. Rekuperační brzdový systém vozidla s pasažéry a nákladem již nebude schopen zpomalovat vozidlo zrychlením -1 m/s^2 .

Výpočetní model byl aplikován na všechny korigované jízdní cykly. Výstupy modelu jsou následující.

Tab. 6-4 Výstupy výpočetního modelu pro korigované WLTP jízdní cykly (1)

Označení cyklu	Vzdálenost cyklu (m)	Doba trvání cyklu (s)	Spotřeba s rekuperací (kWh/100 km)	Spotřeba bez rekuperace (kWh/100 km)	Rekupační poměr (%)
50	2739	589	15.513	22.069	29.7
70	4346	433	16.385	23.225	29.5
90	6614	455	13.561	17.451	22.3
100	7349	455	14.820	19.056	22.2
110	6915	323	17.241	19.638	12.2
120	7544	323	18.635	21.308	12.5
130	8172	323	20.139	23.062	12.7
140	8801	323	21.865	25.029	12.6

Označení cyklu odpovídá maximální rychlosti v jízdním cyklu dosažené. Důležité jsou pro nás hodnoty energetické spotřeby elektromobilu s aktivní rekuperací. Tyto hodnoty využijeme při analýze spotřebované energie na námi zvolené trase z Prahy do Tallinnu. Zajímavý výsledek je, že nejmenší spotřeba vychází pro jízdní cyklus s rychlostním limitem 90 km/h. Tento výsledek je způsoben ideální kombinací typu cyklu, při němž nedochází k nadměrnému zpomalování, nízké rychlosti vzhledem k působící celkové odporové síle a účinnosti stroje a trakčního měniče.

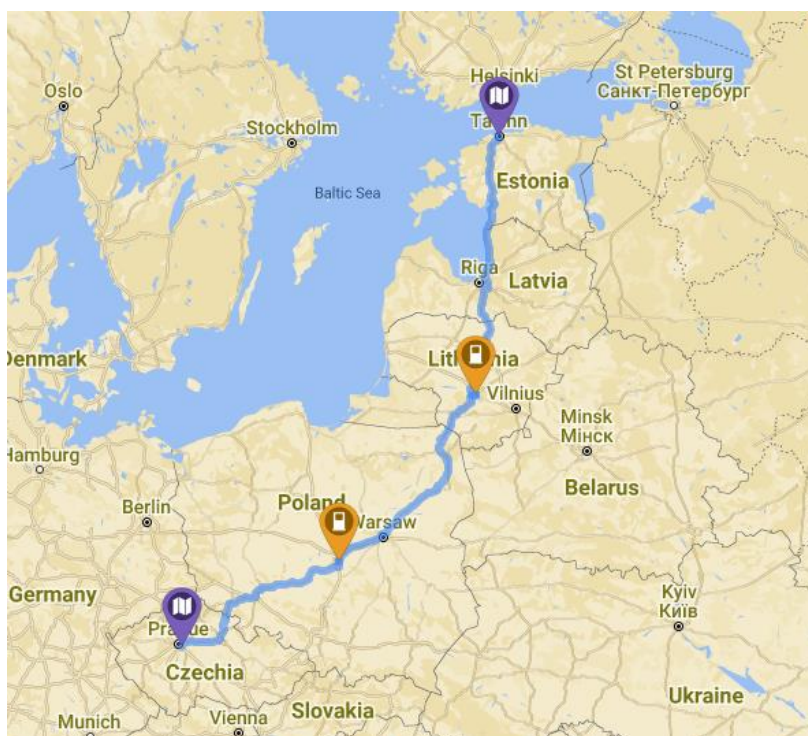
Z Map Google byly vypsány navigační instrukce do jednotné tabulky. Ke každé instrukci byla přiřazena vzdálenost následujícího úseku, rychlostní limit úseku, energie spotřebovaná na úseku, celková spotřebovaná energie od počátku trasy a zbývající kapacita baterie na konci úseku. Princip zápisu dat je znázorněn v následující tabulce.

Tab. 6-5 Ukázka principu zápisu a analýzy dat simulovaného úseku jízdy

Instrukce	Vzdálenost (m)	Rychlostní limit (km/h)	Energie na úseku (Wh)	Energie od počátku (kWh)	SoC (%)
Jed'te na sever	100	50	15.5	0.0155	99.98
Odbočte doprava	240	70	39.3	0.0548	99.94
Odbočte doleva	1800	70	294.9	0.3498	99.65

Data byla zapsána tímto způsobem pro celou zvolenou trasu. SoC baterie byl pro nás indikátorem, kdy a kde po cestě zastavit u dobíjecí stanice a nabít elektromobil. Je vhodné připomenout, že SoC považuje využitelnou kapacitu 100 kWh jako 100 %. Tudíž údaj o SoC nás také informuje o zbývající kapacitě baterie v kWh.

Za využití mapy nabíjecích stanic [35] byla sestavena trasa i se zastávkami na nabití elektromobilu. Nabíjecí stanice byla vždy pečlivě zvolena, aby se nacházela na zvolené trase a poskytovala dostatečné množství nabíjecích míst s dostatečným výkonem pro rychlé nabití.



Obr. 6-11 Trasa simulovaného úseku s vyznačenými zastávkami na dobítí elektromobilu

Simulovaná trasa byla pro zajímavější analýzu rozdělena do 3 úseků. Úseky jsou rozděleny zastávkami na dobítí elektromobilu. Na začátku každého úseku byla baterie plně nabita neboli indikátor SoC byl 100 %. Pro každý ze tří zvolených úseků byla ze zjištěných informací, viz. princip znázorněný v Tab. 6-5 Ukázka principu zápisu a analýzy dat simulovaného úseku jízdy Tab. 6-5, vypočtena vzdálenost ujetá při odpovídajícím rychlostním limitu. Pro celkovou vzdálenost ujetou na úseku při daném rychlostním limitu byla vypočtena odpovídající spotřebovaná energie. Z těchto dat byla vypočtena spotřeba energie pro každý ze tří úseků. Jako první úsek byla zvolena trasa z Prahy k nabíjecí stanici v polském městě Lodž.

Tab. 6-6 Data o úseku 1

Úsek 1 (Praha – nabíjecí stanice Lodž, Polsko)

Maximální rychlost na úseku (km/h)	Vzdálenost (km)	Spotřebovaná energie (kWh)
50	12.4	1.92
70	10.04	1.66
90	80	10.85
100	2	0.30
110	0	0
120	47.4	8.83
130	112.8	22.72
140	226.4	49.50
Celkem	491	95.76

Spotřeba (kWh/100 km)

19.503

Na úseku 1 byla ujetá vzdálenost 491 km. Spotřebovaná energie byla 95.76 kWh. K nabíjecí stanici vůz dojel se SoC 4.24 %. Spotřeba je na prvním úseku vyšší než spotřeba určená

plným WLTP cyklem v Tab. 6-3. Větší spotřeba je způsobena přítomností dlouhého úseku trasy s rychlostním limitem 140 km/h. Při takových rychlostech je spotřeba výrazně větší.

Nabíjecí stanice ve městě Lodž má k dispozici 4 stanice CCS s maximálním výkonem 150 kW. Vzhledem k trvalému nabíjecímu proudu naší baterie jsme schopni nabíjet výkonem pouze 120 kW. Budeme nabíjet 95.76 kWh energie. Takové nabíjení by za ideálních podmínek trvalo pouze 48 minut.

Druhý zvolený úsek je cesta z nabíjecí stanice v polské Lodži k nabíjecí stanici ve městě Kaunas v Litvě.

Tab. 6-7 Data o úseku 2

Úsek 2 (nabíjecí stanice Lodž, Polsko - nabíjecí stanice Kaunas, Litva)

Maximální rychlost na úseku (km/h)	Vzdálenost (km)	Spotřebovaná energie (kWh)
50	845	0.13
70	1150	0.19
90	173474	23.52
100	0	0
110	0	0
120	199650	37.20
130	61620	12.41
140	122300	26.74
<i>Celkem</i>	559039	100.20

Spotřeba (kWh/100 km)

17.924

Na druhém úseku byla ujeta vzdálenost 559 km a spotřebovaná energie činila 100.2 kWh. K nabíjecí stanici se došlo se SoC -0.2 %, což znamená dojetí na dojezdovou rezervu baterie. V rezervě při příjezdu z původních 10 kWh zbylo 9.8 kWh. Vzhledem k preferenci nabíjecí stanice s vysokým výkonem a velkým počtem dostupných stanic byla potřeba dojet na rezervu.

Nabíjecí stanice v litevském městě Kaunas se pyšní 5 stanicemi CCS s výkonem 150 kW. Pro náš elektromobil opět platí výkonnostní strop nabíjení 120 kW. Dobíjená kapacita bude 100.2 kWh. Za ideálních podmínek bude nabíjení elektromobilu trvat 51 minut.

Jako třetí zkoumaný úsek byla zvolena cesta z nabíjecí stanice v litevském městě Kaunas do estonského hlavního města Tallinn.

Tab. 6-8 Data o úseku 3

Úsek 3 (nabíjecí stanice Kaunas, Litva – Tallinn, Estonsko)

Maximální rychlost na úseku (km/h)	Vzdálenost (km)	Spotřebovaná energie (kWh)
50	5208	0.81
70	10300	1.69
90	503350	68.26
100	0	0
110	28800	4.97
120	0	0
130	11600	2.34
140	0	0
	559258	78.06
Spotřeba (kWh/100 km)		13.957

Na třetím zkoumaném úseku byla ujeta vzdálenost 559.3 km a spotřebovaná energie činila 78.06 kWh. Do centra města Tallinn se došlo se SoC 21.94 %. Spotřeba na třetím úseku byla menší než spotřeba udávaná plným WLTP jízdním cyklem. Menší spotřeba je způsobena přítomností rychlostního limitu 90 km/h po většinu třetího úseku. Jízdní cyklus s rychlostním limitem 90 km/h byl prověřen jako energeticky nejméně náročný.

Tab. 6-9 Data o úseku Praha - Tallinn

Praha - Tallinn

Vzdálenost (km)	1609.305
Spotřebovaná energie (kWh)	274.02
Spotřeba (kWh/100 km)	17.027
Doba trvání	25 hod 8 min

Jízda elektromobilu na úseku cesty z Prahy do Tallinnu byla simulována. Během trasy se stávkilo na dobítí elektromobilu pouze dvakrát. K první dobíjecí stanici se musel velmi krátký úsek dojet na rezervu baterie. Tato rezerva má kapacitu 10 kWh, ze kterých jsme schopni dostat za průměrného provozu zhruba 62 km. Z této rezervy bylo vybito pouze 0.2 kWh. Elektromobil byl na nabíjecí stanici vždy dobit velmi rychle, zhruba během hodiny za ideálních podmínek. Přesnější výpočet doby nabíjení by zahrnoval ztráty na vnitřním odporu baterie a energii spotřebovanou k jejímu chlazení. Vzhledem k povaze vybrané trasy je tento čas s ohledem na délku ostatních zastávek zanedbatelný. Během takto dlouhých cest se více času stráví zastávkami na jídlo, záchod a odpočinek. Chytrý řidič tyto aktivity naplánuje během nabíjení elektromobilu a nemusí být nabíjením výrazně zdržen.

Doba trvání simulované trasy byla 25 hodin a 8 minut bez zastávek na dobítí

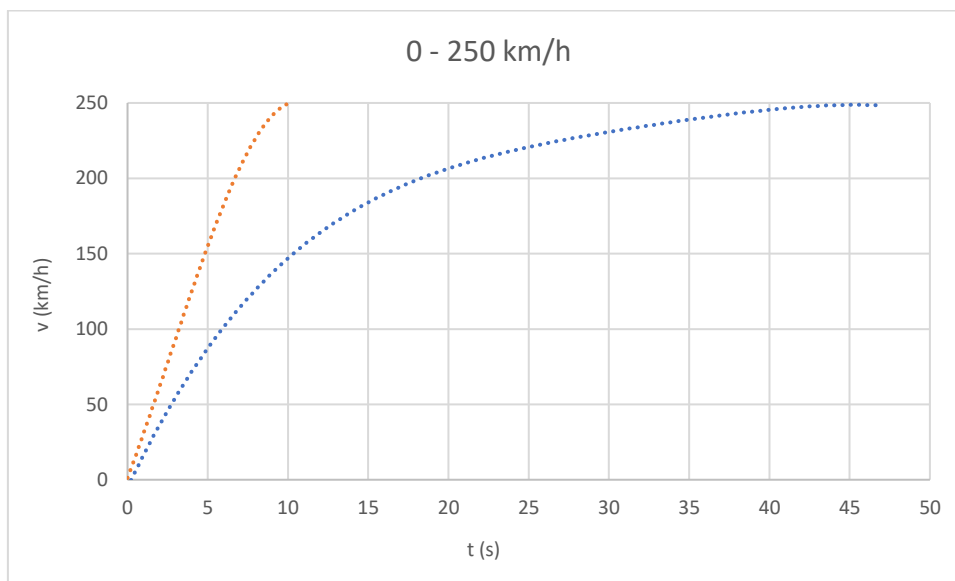
Alternativou je přenocování v hotelech ve větších městech. V takovém případě by se elektromobil dobíjel v noci a řidiče také nezdržoval. Uvažujeme-li přítomnost nabíjecích míst s výkonem 11 kW, elektromobil by se z 0 % - 100 % SoC nabíjel za ideálních podmínek zhruba 9 hodin. Varšava, první velké město podél trasy, se nachází až za hranicí dojezdu elektromobilu na jedno nabití. Tato varianta by vyžadovala krátké nabití v řádu minut třeba během zastávky na kávu.

6.4 Zrychlení

Zrychlení elektromobilu je jedna z velmi atraktivních vlastností v porovnání s automobily poháněnými spalovacími motory. Vysoké točivé momenty elektrických motorů umožní rychlý rozjezd. Absence vícestupňové převodovky má na zrychlení elektromobilu také pozitivní vliv.

Zrychlení z 0 na 100 km/h bylo vypočteno pro celkovou hmotnost vozidla s přítomností řidiče 2380 kg. Zrychlení bylo vypočteno pro dva scénáře. První scénář zohledňuje situaci, že se rozjíždíme pouze na maximální trvalý výkon obou motorů. Druhý scénář zohledňuje rozjezd s přetížením obou motorů. vypočteno užitím vzorců na stejném principu jako v kapitole Kapitola 6:. Vzhledem ke znalosti momentových charakteristik obou motorů můžeme vypočítat jakou silou bude vůz poháněn. Nesmíme ale zapomenout na adhezní a bateriový limit přetížení. Při rozjezdu u 0 na 100 km/h nás po celou trasu ovlivňuje pouze limit adhezní. Při rozjezdu z 0 na 250 km/h nás ovlivňuje po většinu jízdy limit adhezní. Až při rychlosti 244 km/h nás začne omezovat limit bateriový. Ze znalosti odporových sil dokážeme vypočítat sílu která hýbe vozidlem kupředu. Z těchto informací dokážeme popsat zrychlení rovnicí. Jakmile známe rovnici závislosti zrychlení na rychlosti vozidla, máme vyhráno. Vytvoříme časovou osu. Ze znalosti závislosti zrychlení na rychlosti vozidla a definované časové osy dokážeme určit dobu zrychlení. Každou vzorkovanou jednotku času navýšíme rychlost v metrech za sekundu a zrychlení předchozího bodu na časové ose. Bod v čase, ve kterém vozidlo přesáhne 100 km/h určuje dobu zrychlení z 0 na 100 km/h.

Oranžový průběh odpovídá zrychlení s přetížením, modrý průběh odpovídá zrychlení bez přetížení.



Obr. 6-12 Zrychlení z 0 na 250 km/h

Vypočtené hodnoty zrychlení z 0 na 100 km/h jsou pouze orientační. Vozidlo zrychlovalo z 0 na 100 km/h s přetížením 1.786 po dobu 3.3 s. Tato hodnota byla určena adhezním limitem pneumatik. Při překonání této síly by se pneumatiky začaly protáčet, což by zrychlení zpomalilo.

Vozidlo zrychlovalo z 0 na 100 km/h bez přetížení po dobu 5.9 s.

KAPITOLA 7: POROVNÁNÍ NAVRŽENÉHO ELEKTROMOBILU S KONKURENČNÍMI VOZY NA TRHU

Elektromobil je navržen. Ze samotného návrhu, z výpočetního modelu a ze simulace úseku jízdy jsme získali data, která můžeme použít k porovnání navrženého elektromobilu s konkurencí. Pro porovnání byly zvoleny výkonnější verze jednotlivých elektromobilů z řad vozů nabízených danou automobilkou.

Tab. 7-1 Srovnání navrženého elektromobilu s konkurencí

	Navržený elektromobil	Tesla Model S Performance 2020	Porsche Taycan Turbo S	Mercedes 580 QES 4MATIC
<i>Hmotnost (kg)</i>	2300	2241	2295	2585
<i>Maximální hotnost vozidla (kg)</i>	2840	2720	2870	3060
<i>Koeficient C_d</i>	0.23	0.24	0.25	0.2
Zadní motor				
<i>Typ motoru</i>	SynRM	Asynchronní	PMSM	PMSM
<i>Výkon (kW)</i>	164	375	160	245
<i>Maximální točivý moment (Nm)</i>	280	650	300	565
<i>Koleno charakteristiky (ot/min)</i>	5500	5900	-	4500
<i>Maximální otáčky (ot/min)</i>	16000	-	-	13500
Přední motor				
<i>Typ motoru</i>	SynRM	PMASynRM	PMSM	PMSM
<i>Výkon (kW)</i>	164	193	300	140
<i>Maximální točivý moment (Nm)</i>	280	330	-	290
<i>Koleno charakteristiky (ot/min)</i>	5500	6100	-	-
<i>Maximální otáčky (ot/min)</i>	16000	-	-	-
Pohonná soustava				
<i>Jmenovitý výkon (kW)</i>	328	568	460	385
<i>Maximální výkon při přetížení (kW)</i>	600	-	560	-
<i>Maximální točivý moment (Nm)</i>	560	980	-	855
<i>Maximální točivý moment při přetížení (Nm)</i>	1024	-	1050	-
Uložiště energie				
<i>Napětí baterie (V)</i>	400	400	800	500
<i>Kapacita baterie (kWh)</i>	120	100	93.4	107.8
<i>Využitelná kapacita baterie (kWh)</i>	100	-	-	-
<i>Počet článků baterie</i>	660	8256	396	-
Spotřeba				
<i>WLTP spotřeba (kWh/100 km)</i>	16.4/20.9	16.2	25	18.6
<i>Dojezd (km)</i>	612/480	593	412	668
Výkonnostní data				
<i>Maximální rychlost (km/h)</i>	250	250	260	210
<i>Zrychlení z 0 na 100 km/h (s)</i>	5.9/3.3	2.6	2.8	4.3

Prostřednictvím řešerše a návrhu pohonu byl prozkoumán synchronní reluktanční motor bez permanentních magnetů jako hnací ústrojí elektromobilu. Varianta synchronního reluktančního motoru s vloženými permanentními magnety nebyla vzhledem k ekologicko-ekonomické náročnosti a podobnosti s široce užívaným typem stroje PMSM zvolena. Bližší zkoumání IPMSynRM může být podnětem pro další práci.

Na základě veřejně dostupných informací byl navržen motor se jmenovitým výkonem 164 kW, maximálním točivým momentem 280 Nm a maximálními otáčkami rotoru 16000 ot/min. Koleno momentové charakteristiky bylo navrženo v otáčkách 5500 ot/min. Navržený elektromobil pohání dva identicky navržené motory. Byly zjištěny převodové poměry obou motorů optimalizované pro splnění podmínek uvedených v Kapitola 1.: Dále byly zjištěny parametry navržených komponent elektromobilu.

S využitím WLTP jízdních cyklů by sestaven výpočetní model pro kalkulaci spotřeby navrženého elektromobilu. Výpočetní model byl aplikován na korigované WLTP jízdní cykly za účelem simulace jízdy elektromobilu po trase Praha – Tallinn.

Synchronní reluktanční motor bez permanentních magnetů se jeví být velmi vhodnou alternativou PMSM pro trakční aplikace. Na výrobu SynRM není třeba permanentních magnetů ze vzácných zemin. Jeho výroba je tedy levnější a šetrnější k životnímu prostředí než výroba synchronních motorů s permanentními magnety. Další výhodou SynRM je vysoká přetížitelnost kvůli absenci permanentních magnetů, u kterých proudovou přetížitelnost omezuje hrozba trvalé demagnetizace permanentních magnetů. Nicméně u výkonných trakčních motorů pro užití v elektromobilech je kvůli existenci maximálního točivého momentu daného přílnavostí pneumatik možné dosáhnout dostatečné přetížitelnosti i u synchronních motorů s permanentními magnety. Dalším limitujícím faktorem při proudovém přetížení je maximální dočasný vybíjecí proud baterie. V případě našeho návrhu elektromobilu baterie určovala maximální přetížení motoru na hodnotu 1.829. Maximální přetížení dané přílnavostí pneumatik bylo při rozjezdu 1.786. Z toho vyplývá, že návrh pohonu umožňuje využití maximálního trakčního potenciálu pneumatik. Nevýhodou SynRM je kromě nižší hustoty točivého momentu značný pokles výkonu při pracovním režimu odbuzování. Před dosažením maximálních otáček klesne výkon motoru na polovinu jmenovitého výkonu. To se projeví menším výkonem při vysokých rychlostech a v závislosti na návrhu se tento jev může projevit na nižší maximální rychlosti vozidla. Návrh pohonu popsáný v tomto dokumentu je důkazem, že pokles výkonu není překážkou pro použití SynRM v elektromobilu. Další nevýhoda SynRM je menší účinnost v porovnání se synchronními motory s permanentními magnety. Nicméně pokles účinnosti je dostatečně malý, aby byl SynRM považován za high-efficiency motor. Nevýhodou jak SynRM tak IPMSynRM je menší mechanická odolnost rotoru při vysokých otáčivých rychlostech. PMSM bude dosahovat v porovnání se synchronními reluktančními motory vyšších maximálních otáček.

Za zmínku stojí, že synchronní reluktanční motor s vloženými permanentními magnety spotřebuje na svou konstrukci menší množství permanentních magnetů než PMSM srovnatelných výkonů a točivých momentů.

Z výstupů simulace jízdního úseku Praha – Tallinn můžeme dojít k závěru, že navržený elektromobil je vhodný pro cestování na delší vzdálenosti. Disponuje vysokou kapacitou baterie, vysokým nabíjecím výkonem, dlouhým dojezdem a spotřebou srovnatelnou s konkurencí. Po cestě bylo nutno zastavit na dobítí elektromobilu pouze dvakrát. Nabíjení za ideálních podmínek trvalo zhruba hodinu. Chytrý řidič je schopen si nabíjení naplánovat tak, aby ho příliš nezdržovalo. Na stejné trase by automobil se spalovacím motorem musel zastavit pro palivo alespoň jednou.

LITERATURA

- [1] BIANCHI, Nicola, Silverio BOLOGNANI, Enrico CARRARO, Mosè CASTIELLO a Emanuele FORNASIERO. Electric Vehicle Traction Based on Synchronous Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. IEEE, 2016, 12 August 2016, (6) [cit. 2022-05-15]. ISSN 1939-9367. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7542569>
- [2] SAJDL, Jan. Aerodynamika. *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/aerodynamika/>
- [3] Zvolená pneumatika. *Pirelli.com* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.pirelli.com/tires/en-us/car/catalog/product/p-zero/245-35-r21?ipcode=1826600>
- [4] Pirelli PZero 245/35 R21 96 Y XL RFT: ecolabel. In: *Pirelli.com* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://www.pirelli.com/ecolabels/web/us/1826600_US_P.jpg
- [5] Tlak odpovídající zvolenému typu pneumatiky: tire pressure chart. In: *Tirepressure.com* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://tirepressure.com/245-35r21-tire-pressure>
- [6] Určení koeficientu tření pneumatiky: UTQG standard. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Uniform_Tire_Quality_Grading
- [7] Určení nosnosti pneumatiky: Tire Load Index Chart. *Tyresizecalculator.com* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.tyresizecalculator.com/charts/tire-load-index-chart>
- [8] Určení maximální dosažitelné rychlosti pneumatiky: Tabulka indexů rychlosti. *Rajpneu.cz* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.rajpneu.cz/technicky-radce/267>
- [9] Základní informace o určování valivého odporu: SAE J2452. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Low_rolling_resistance_tire
- [10] Tire friction and rolling resistance coefficients: online calculator. *Hpwizard.com* [online]. [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://hpwizard.com/tire-friction-coefficient.html>
- [11] Koeficienty pro výpočet koeficientu valivého odporu: Rolling friction and rolling resistance. *Engineeringtoolbox.com* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html
- [12] GRACE, Kevin, Steven GALIOTO, Karthik BODLA a Ayman EL-REFAIE. 2017 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE): Carbon-fiber-wrapped synchronous reluctance traction motor* [online]. IEEE, 2017, 7 November 2017 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8096687>
- [13] Hsu, J S, Burress, T A, Lee, S T, Wiles, R H, Coomer, C L, McKeever, J W, and Adams, D J. 2007. "16,000-rpm Interior Permanent Magnet Reluctance Machine with Brushless Field Excitation". United States. <https://doi.org/10.2172/921780>. <https://www.osti.gov/servlets/purl/921780>.
- [14] E. Castagnaro and N. Bianchi, "High-Speed Synchronous Reluctance Motor for Electric-Spindle Application," *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2020, pp. 2419-2425, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270970. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9270970>
- [15] VILLANI, Marco. Synchronous Reluctance motor: a rare-earth free solution for electric vehicles. *Electricmotorengineering.com* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.electricmotorengineering.com/synchronous-reluctance-motor-a-rare-earth-free-solution-for-electric-vehicles/>
- [16] LEHIKONEN, Antti. Tesla's 'Carbon-Wrapped' Motor. *Anttilehikoinen.fi* [online]. [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://www.anttilehikoinen.fi/technology/electrical-engineering/teslas-carbon-wrapped-motor/>
- [17] MUSK, Elon. *Tesla carbon-wrapped motor information* [online]. In: . USA, 2021, 13 June 2021 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: https://twitter.com/elonmusk/status/1404128430585618433?ref_src=twsrc%5Etfw%7Ctwcamp%5Etweetembed%7Ctwterm%5E1404128430585618433%7Ctwgr%5E%7Ctwcon%5Es1_c10&ref_url=https%3A%2F%2Fcleantechnica.com%2F2021%2F06%2F16%2Fmore-details-on-teslas-innovative-carbon-wrapped-motor%2F
- [18] CRIDER, Johnna. More Details On Tesla's Innovative Carbon-Wrapped Motor. *Cleantechnica.com* [online]. USA, 2021, 16 June 2021 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2021/06/16/more-details-on-teslas-innovative-carbon-wrapped-motor/>
- [19] Epicyclic gearing: Účinnost planetové převodovky. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Epicyclic_gearing
- [20] H. Won, Y. -K. Hong, M. Choi, B. Bryant, J. Platt and S. Choi, "Cost-Effectiveness Hybrid Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for Electric Vehicle," 2021 IEEE International

- Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEMDC47953.2021.9449503. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9449503>
- [21] GUAN, Y., Z.Q. ZHU, I.A.A. AFINOWI, J.C. MIPO a J. FARAH. *Design of Synchronous Reluctance and Permanent Magnet Synchronous Reluctance Machines for Electric Vehicle Application: 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* [online]. Hang Zhou, China: IEEE, 2014 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7013785>
- [22] D. B. Herrera, E. Galvan and J. M. Carrasco, "Synchronous reluctance motor design based EV powertrain with inverter integrated with redundant topology," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015, pp. 003851-003856, doi: 10.1109/IECON.2015.7392700. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7392700>
- [23] L. Hao, C. Namuduri, C. Mavuru, S. Gopalakrishnan and T. Nehl, "Low Cost and High Power Density PM-Assisted Synchronous Reluctance Machine Drive System for Automotive Engine Torque Management," *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2018, pp. 5810-5816, doi: 10.1109/ECCE.2018.8557802. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8557802>
- [24] LiFePO4 cyl 32700 6000 mAh. *Mivvyenergy.cz* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.mivvyenergy.cz/cs/clanky-lifepo4/30-clanek-lifepo4-6000mah-32v-o-cell-32700.html>
- [25] LiFePO4 pris 135000 mAh. *Mivvyenergy.cz* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.mivvyenergy.cz/cs/clanky-lifepo4/127-143-clanek-lifepo4-135ah-32v-rept.html#/158-inicializacni-nabiti-ne>
- [26] NMC cyl 21700 5000 mAh. *Mivvyenergy.cz* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.mivvyenergy.cz/cs/clanky-li-ion/21-clanek-li-ion-5000mah-36v-bak-n21700cg.html>
- [27] NMC cyl (1) 18650 2600 mAh. *Battery.cz* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.battery.cz/sony-murata-us18650vtc5a--baterie-18650-3-6v-2600mah-35a/>
- [28] NMC cyl (2) 18650 2600 mAh. *Mivvyenergy.cz* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.mivvyenergy.cz/cs/clanky-li-ion/17-clanek-li-ion-2600mah-36v-cham-cmicr18650f8.html>
- [29] NMC pris (1) 50 Ah. *Mivvyenergy.cz* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.mivvyenergy.cz/cs/clanky-li-ion/19-clanek-li-ion-50ah-365v-youlion-vda2714897he.html>
- [30] NMC pris (2) 100 Ah. *Mivvyenergy.cz* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.mivvyenergy.cz/cs/clanky-li-ion/18-clanek-li-ion-100ah-365v-catl-ncm52e896.html>
- [31] NMC pris (3) 150 Ah. *Mivvyenergy.cz* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.mivvyenergy.cz/cs/clanky-li-ion/106-clanek-li-ion-150ah-365v-catl-ncm79148102.html>
- [32] Trasa z Prahy do Tallinnu. *Google Maps* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://www.google.com/maps/dir/50.032435,14.541556/59.436827,24.746365/@53.6799058,15.7800781,5.75z>
- [33] *Google Roads API: Zjištění rychlostních limitů* [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://developers-dot-devsite-v2-prod.appspot.com/maps/documentation/roads/full/inspector_with_api_key
- [34] ŠKODA ENYAQ iV: Rekuperační režimy Škody ENYAQ iV. *Skoda-storyboard.com* [online]. 2021, 29. 3. 2021 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/91-enyaq-iv-dpl/>
- [35] Mapa nabíjecích stanic. *Plugshare.com* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.plugshare.com/>
- [36] E. Carraro, M. Degano and N. Bianchi, "Permanent magnet volume minimization in permanent magnet assisted synchronous reluctance motors," *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/EVER.2013.6521539. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6521539>
- [37] M. Al-Ani et al., "Multi-physics Design Optimisation of PM-assisted Synchronous Reluctance Motor for Traction Application," *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2019, pp. 4353-4359, doi: 10.1109/IECON.2019.8926697. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8926697>
- [38] A. K. and K. Selvajothi, "Performance Comparison of Synchronous Reluctance Motor and Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Traction Application," *2021 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2021 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2021, pp. 100-106, doi: 10.1109/OPTIM-ACEMP50812.2021.9590079. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9590079>
- [39] MASHALY, Aly a Masaharu NAKANISHI. Utilizing SiC Traction Technology Inverters in Automotive Applications. *Eepower.com* [online]. 2018, 16 July 2018 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://eepower.com/technical-articles/utilizing-sic-traction-technology-inverters-in-automotive-applications/>

-
- [40] J. Zhu, H. Kim, H. Chen, R. Erickson and D. Maksimović, "High efficiency SiC traction inverter for electric vehicle applications," 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2018, pp. 1428-1433, doi: 10.1109/APEC.2018.8341204.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8341204>
- [41] Elektromobily, jejich baterie a jak nabíjet. *Evexpert.cz* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://www.evexpert.cz/eshop/znalostni-centrum/elektromobily-a-jejich-baterie>
- [42] Types of Lithium-ion. *Batteryuniversity.com* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>
- [43] HRZINA, Pavel. Lithiové akumulátory a moderní způsoby ukládání energie. *Moodle.fel.cvut.cz* [online]. 2022 [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/337273/mod_resource/content/0/04_Li_aku.pdf
- [44] TOLL, Micah. Regenerative braking: how it works and is it worth it in small EVs?. *Electrek.co* [online]. [cit. 2022-05-20]. Dostupné z: <https://electrek.co/2018/04/24/regenerative-braking-how-it-works/>

PŘÍLOHA A: SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A.1 Seznam symbolů

P (W)	výkon
M (Nm)	točivý moment
Ω (rad · s ⁻¹)	otáčivá rychlost
F_{aero} (N)	aerodynamická odporová síla
C_d	součinitel aerodynamického odporu
ρ (kg · m ⁻³)	hustota
$S_{\check{c}p}$ (m ²)	průřez čelní plochy
v (m · s ⁻¹)	rychlost vozidla
v (km · h ⁻¹)	rychlost vozidla
μ	koeficient tření
F_{RR} (N)	síla valivého odporu
p (Pa, psi, bar)	tlak pneumatiky
Z (N)	gravitační síla vozidla
a, b, c	koeficienty modelu
C_{RR}	koeficient valivého odporu
g (m · s ⁻²)	gravitační zrychlení
m (kg)	hmotnost vozidla
F_{odp} (N)	celková odporová síla působící na vozidlo
n (ot/min)	otáčky stroje
r (m)	poloměr kola
k_b	převodový poměr zadního motoru
k_f	převodový poměr předního motoru
M_k (Nm)	točivý moment přenesený na kola
$\eta_{př}$	účinnost převodovky
F (N)	síla
F_{adh} (N)	adhezní síla pneumatik
C_{fr}	koeficient tření
F_{mov} (N)	síla pohybující vozidlem
F_p (N)	síla vyvíjena vozidlem
F_{1k} (N)	síla na jedno kolo
M_{1k} (Nm)	točivý moment na jedno kolo
n_b (ot/min)	otáčky zadního motoru
n_f (ot/min)	otáčky předního motoru
M_b (Nm)	točivý moment zadního motoru
M_f (Nm)	točivý moment předního motoru
E_x (W)	energie spotřebovaná motory se zanedbáním účinností
E_m (W)	energie spotřebovaná motory
η_{bm}	účinnost zadního motoru
η_{fm}	účinnost předního motoru
η_{bi}	účinnost zadního trakčního měniče
η_{fi}	účinnost předního trakčního měniče
I (A)	proud
U_{bat} (V)	napětí baterie
U_{Ri} (V)	úbytek napětí na vnitřním odporu
R_i (Ω)	vnitřní odpor baterie
P_{Ri} (W)	okamžité ztráty na vnitřním odporu baterie

E_{Ri} (W)	celkové ztráty na vnitřním odporu baterie
F_{dec} (N)	síla zpomalující vozidlo
F_{br} (N)	síla celého brzdného systému
F_{rek} (N)	síla rekuperačního brzdného systému
$F_{rek,max}$ (N)	maximální brzdná síla rekuperačního systému
$F_{rek,1k}$ (N)	brzdná síla rekuperačního systému na jedno kolo
$M_{rek,1k}$ (Nm)	brzdný točivý moment rekuperačního systému na jedno kolo
$M_{rek,b}$ (Nm)	brzdný točivý moment rekuperačního systému zadního stroje
$M_{rek,f}$ (Nm)	brzdný točivý moment rekuperačního systému předního stroje
Ω_b ($rad \cdot s^{-1}$)	otáčivá rychlost zadního stroje
Ω_f ($rad \cdot s^{-1}$)	otáčivá rychlost předního stroje
P_b (W)	okamžitý výkon zadního stroje při rekuperaci
P_f (W)	okamžitý výkon předního stroje při rekuperaci
E_r (W)	celková energie vrácená do uložiště energie se zanedbáním účinností
x (s)	délka trvání jízdního cyklu
E_{rek} (W)	celková energie vrácená do uložiště energie
E (W)	celková energie spotřebovaná na úseku jízdního cyklu
A (kWh/100 km)	spotřeba elektromobilu na úseku jízdního cyklu s aktivní rekuperací
B (kWh/100 km)	spotřeba elektromobilu na úseku jízdního cyklu bez aktivní rekuperace
ε (%)	rekuperační poměr
v_1 ($km \cdot h^{-1}$)	okamžitá rychlost referenčního cyklu
v_2 ($km \cdot h^{-1}$)	okamžitá rychlost korigovaného cyklu
v_{1max} ($km \cdot h^{-1}$)	maximální rychlost referenčního cyklu
v_{2max} ($km \cdot h^{-1}$)	maximální rychlost korigovaného cyklu

A.1.1 Seznam zkratk

RMS	efektivní hodnota
PM	permanentní magnet
SynRM	Synchronous Reluctance Motor (synchronní reluktanční motor)
IPMSynRM	Internal Permanent Magnet Synchronous Reluctance Motor (synchronní reluktanční motor s vloženými permanentními magnety)
REL	synchronní reluktanční motor
PMAREL	Permanent Magnet Assisted synchronous Reluctance motor (synchronní reluktanční motor s permanentními magnety)
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machine (synchronní stroj s permanentními magnety)
MTPA	Maximum Torque Per Ampere (maximální moment na jednotku proudu)
PF	Power Factor (účinník)
Dy-free	Bez Dysprosia
BMS	Battery Management System
NMC	LiNiMnCoO ₂
LFP	LiFePO ₄
LTO	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂
RRC	Rolling Resistance Coefficient (koeficient valivého odporu)
UTQG	Uniform Tyre Quality Grading (systém hodnocení vlastností pneumatik)
CCS	Combined Charging System (kombinovaný systém nabíjení)
cyl	cyklindrický článek
pris	prismatický článek
WLTP	Worldwide harmonized Light vehicle Test Procedure

PtW	Power to Weight (výkon ku hmotnosti)
SoC	State of Charge (stav nabití baterie)