

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ A
KOLEJOVÝCH VOZIDEL



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Analýza elektrifikace vozového parku firmy United Bakeries a.s.

Analysis of electrification of the fleet of United Bakeries a.s.

AUTOR: Bc. Tomáš Diviš

STUDIJNÍ PROGRAM: Strojní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: Dopravní, letadlová a transportní technika

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Miloslav Emrich, Ph.D.

PRAHA 2020

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Diviš** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **457662**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza elektrifikace vozového parku firmy United Bakeries a.s.

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of electrification of the fleet of United Bakeries a.s.

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte měření základních jízdních dat na vybraných trasách distribuce pečiva při rozvozu s konvenčními vozidly.
- 2) Na základě naměřených dat v bodě 1 analyzujte energetické spotřeby a použitelnost elektromobilu Mercedes-Benz eSprinter pro rozvozové trasy za různých provozních podmínek.
- 3) Podrobně vyhodnoťte energetickou spotřebu dostupného elektromobilu Mercedes-Benz eVito s využitím vozidlového dynamometru a analyzujte využitelnost pro dopravu pečiva.
- 4) Proveďte koncepční návrh dobíjecí infrastruktury a nabíjecí logistiky v sídle pekárny pro konkrétní počet elektromobilů Mercedes-Benz eSprinter a eVito včetně orientační ekonomické analýzy návratnosti investice do elektromobilů a dobíjecí infrastruktury.

Seznam doporučené literatury:

Svoboda, J. Teorie dopravních prostředků: vozidla silniční a terénní. 2004. Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 8001030059, 9788001030059
VLK, František. Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory : hnací charakteristika : brzdění : odpruženost : říditelnost, ovladatelnost : stabilita. Brno, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
Vdoleček, Halaj - Nejistoty v měření. Časopis Automa. 2016
Uživatelský manuál vozidlového dynamometru MAHA.ECDM 48
Firemní literatura Mercedes-Benz

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

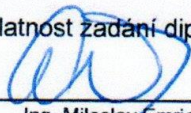
Ing. Miloslav Emrich, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS


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

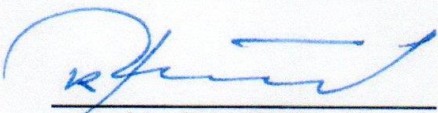
Datum zadání diplomové práce: **27.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____


Ing. Miloslav Emrich, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


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

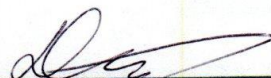

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

30.4.2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá analýzou elektrifikace části vozového parku pekárenské společnosti United Bakeries, konkrétně její pražské pekárny Odkolek. Práce se z části zaměřuje na stanovení spotřeb a posouzení použitelnosti elektrických dodávek Mercedes-Benz eSprinter a Mercedes-Benz eVito při distribuci pečiva. Tato analýza je provedena na základě měření reálných jízdních dat současných vznětových dodávek při rozvozech a také podle provedených simulací na vozidlovém dynamometru. Ze zjištěných poznatků je poté navržena dobíjecí infrastruktura v sídle pekárny a provedena ekonomická analýza návratnosti investice do elektrických dodávek a dobíjecích zařízení.

Klíčová slova

Elektrické dodávky, elektromobilita, spotřeba elektromobilů, vozidlový dynamometr, dobíjecí infrastruktura

Abstract


This diploma thesis deals with the analysis of the electrification of a part of the fleet of the company of United Bakeries, specifically its Prague bakery Odkolek. The work focuses partly on determining the consumption and assessing the usability of electric vans Mercedes-Benz eSprinter and Mercedes-Benz eVito in bakery products distribution. The analysis is performed based on measuring of real driving data of current diesel vans during distribution and according to performed simulations on the chassis dynamometer. Based on the findings, the recharging infrastructure at the bakery headquarters is designed and economic analysis of the return on investment in electric vans and charging devices is performed.

Keywords

Electric vans, electromobility, consumption of electric cars, chassis dynamometer, charging infrastructure

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Dále prohlašuji, že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu literatury.

.....

podpis

V Praze dne 13. 7. 2020

Tomáš Diviš

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat panu Ing. Miloslavu Emrichovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a za čas, který mi v průběhu zpracování této práce věnoval. Mé velké poděkování také patří Ing. Josefu Morkusovi, CSc. za odborné konzultace a rady v oblasti elektromobility. Dále děkuji společnosti United Bakeries, zejména Ing. Michalu Valentovi, za umožnění měření při rozvozech a za poskytnutí podkladů. Děkuji také Ing. Vojtěchu Klírovi, Ph.D. a Ing. Vítu Beránkovi, Ph.D. za pomoc a konzultace při experimentálních měřeních. V neposlední řadě děkuji také společnosti Mercedes-Benz, zejména Mariu Zetíkovi, za zapůjčení vozidel k testování a také společnosti PRE měření za poskytnutí informací ohledně elektrické přípojky pekárny Odkolek.

Obsah

1	ÚVOD	9
1.1	CHARAKTERISTIKA SPOLEČNOSTI	11
2	OBECNÝ ZPŮSOB ŘEŠENÍ	13
3	SPOTŘEBY ELEKTROMOBILU ESPRINTER	16
3.1	TECHNICKÁ DATA DODÁVEK SPRINTER A ESPRINTER	16
3.2	MĚŘENÍ DISTRIBUČNÍCH LINEK	18
3.2.1	Charakteristika distribučních linek	18
3.2.2	Měřicí zařízení	21
3.2.3	Naměřená data	24
3.3	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	24
3.3.1	Rychlostní profil	25
3.3.2	Profil stoupání vozovky	29
3.3.3	Hmotnost dodávek během rozvozu.....	31
3.3.4	Přiřazení rychlostního profilu k profilu stoupání.....	31
3.3.5	Jízdní odpory.....	32
3.3.6	Spotřeba energie na kolech	36
3.3.7	Spotřeba energie z baterie	38
4	SPOTŘEBY ELEKTROMOBILU EVITO	44
4.1	TECHNICKÉ PARAMETRY DODÁVKY EVITO.....	44
4.2	DEFINICE JÍZDNÍHO CYKLU PRO VOZIDLOVÝ DYNAMOMETR	46
4.3	DOJEZDOVÁ ZKOUŠKA	48
4.3.1	Vyhodnocení dojezdové zkoušky	51
4.4	SIMULACE NA VOZIDLOVÉM DYNAMOMETRU	57
4.4.1	Nastavení dynamometru	58
4.4.2	Simulace jízdních cyklů.....	60
4.4.3	Naměřená data	62
4.5	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	64
4.5.1	Spotřeba energie z baterie	64
4.5.2	Spotřeba energie na kolech	67

4.5.3	Účinnost rekuperace	71
4.5.4	Kompenzace stoupání a nákladu.....	73
4.5.5	Vliv topení na spotřebu.....	76
5	DOBÍJECÍ INFRASTRUKTURA.....	78
5.1	HARMONOGRAM A PARAMETRY DC DOBÍJENÍ.....	78
5.2	HARMONOGRAM A PARAMETRY AC DOBÍJENÍ.....	84
5.3	KONTROLA REZERVOVANÉHO PŘÍKONU.....	86
6	EKONOMICKÁ ANALÝZA.....	89
6.1	KALKULACE NÁKLADŮ	90
7	ZÁVĚR.....	97
8	SEZNAM LITERATURY	99
	SEZNAM OBRÁZKŮ	105
	SEZNAM TABULEK.....	107
	SEZNAM PŘÍLOH.....	109
	PŘÍLOHA 1.....	I
	PŘÍLOHA 2.....	IV

1 Úvod

Ačkoliv je v současné době pohon většiny vozidel zajištěn převážně spalovacími motory, dochází dnes postupně k čím dál většímu rozvoji a provozu elektromobilů. Tento fakt je způsoben zpřísnujícími se legislativními požadavky na produkci emisí při provozu silničních vozidel – od roku 2020 platí pro průměr emisí oxidu uhličitého nových osobních automobilů registrovaných v Evropské unii pro výrobce limit 95 gramů na ujetý kilometr [1], od roku 2030 by se dle současných nařízení Evropského parlamentu a Rady měl tento limit ještě snížit na hodnotu 59 gCO₂/km [1]. Ačkoliv zmíněné hodnoty platí pro osobní automobily, obdobným způsobem jsou od roku 2020 regulovány také emise CO₂ nových lehkých užitkových vozidel, a to hodnotou 147 gCO₂/km [1].

Současné spalovací motory nejsou schopné těmto striktním požadavkům vyhovět, ovšem za nesplnění popsaných limitů výrobci vozidel platí pokuty, které mohou být pro samotné automobilky až likvidační. [2]

Elektromobily mají legislativně z hlediska provozu nulové emise, navíc se každý prodaný elektromobil do emisního flotilového průměru automobilky započítává v roce 2020 dvakrát [1], čímž jsou výrobci motivováni prodávat právě vozidla s čistě elektrickým pohonem. Hlavní nevýhodou elektromobilů však v současné době stále zůstává poměrně nízký maximální dojezd na jedno nabití a dlouhá doba dobíjení, a tak oblast působení vozidel s tímto pohonem je dnes stále omezená. Právě z těchto důvodů se elektrifikace pohonu jeví jako vhodná pro vozidla určená pro provoz ve městě, pro který je menší denní nájezd charakteristický a automobil je pak možné přes noc plně dobít pro následující den. Použití elektromotoru namísto spalovacího motoru je v této oblasti užitečné také z toho důvodu, že se spalovací motor při jízdě v malých rychlostech a při rozjezdech, které jsou v provozu ve městě velmi časté, dostává mimo optimální pracovní oblast a vykazuje tak vyšší měrnou spotřebu paliva a tím pádem také vyšší emise CO₂. Nepočítáme-li emise pevných částic z otěru pneumatik o vozovku a z brzd, je provoz elektromobilů skutečně bezemisní, a ve městech a v jejich okolí by elektrifikací pohonu došlo k významnému snížení koncentrace zdraví nebezpečných látek, jako jsou oxidy dusíku a pevné částice. Dalším pochopitelným lákadlem pro pořízení elektromobilů namísto vozidel se spalovacími motory jsou také menší provozní náklady, jelikož cena elektřiny na ujetý kilometr bývá udávána menší v porovnání s benzínem či naftou [3].

Jelikož je popsáné téma velmi aktuální, zabývá se tato diplomová práce analýzou elektrifikace pohonu části vozového parku pekárenské společnosti United Bakeries, která

kromě výroby pečiva zajišťuje také rozvoz výrobků svým zákazníkům ve městech po celé České republice. Konkrétně se práce zaměřuje na jednu z největších pekáren tohoto podniku – pražský Odkolek, jehož vedení do budoucna z výše zmíněných důvodů uvažuje o pořízení čistě elektrických dodávek pro rozvoz na městských linkách.

Jelikož je společnost United Bakeries dlouholetým zákazníkem firmy Mercedes-Benz, konkrétně její vedení uvažuje o rozšíření vozového parku o elektrické dodávky Mercedes-Benz eVito a Mercedes-Benz eSprinter. Hlavním cílem práce je tedy rozhodnout, zdali a do jaké míry je použití těchto dvou elektrických vozů v pekárně na městských rozvážecích linkách vhodné. Dalším cílem je poté navrhnout dobíjecí infrastrukturu v sídle podniku a provést ekonomickou analýzu návratnosti případné investice do těchto elektrických vozidel a dobíjecích zařízení.

Tato diplomová práce kromě společnosti United Bakeries vznikala také ve spolupráci s firmou Mercedes-Benz, která poskytovala potřebné technické parametry vozidel a také zapůjčila dodávky Mercedes-Benz Vito a Mercedes-Benz eVito k testování v reálném provozu a v laboratorních podmínkách.

V první části práce bude objasněn způsob řešení popsané problematiky, tedy postup vedoucí k dosažení požadovaných výstupů diplomové práce.

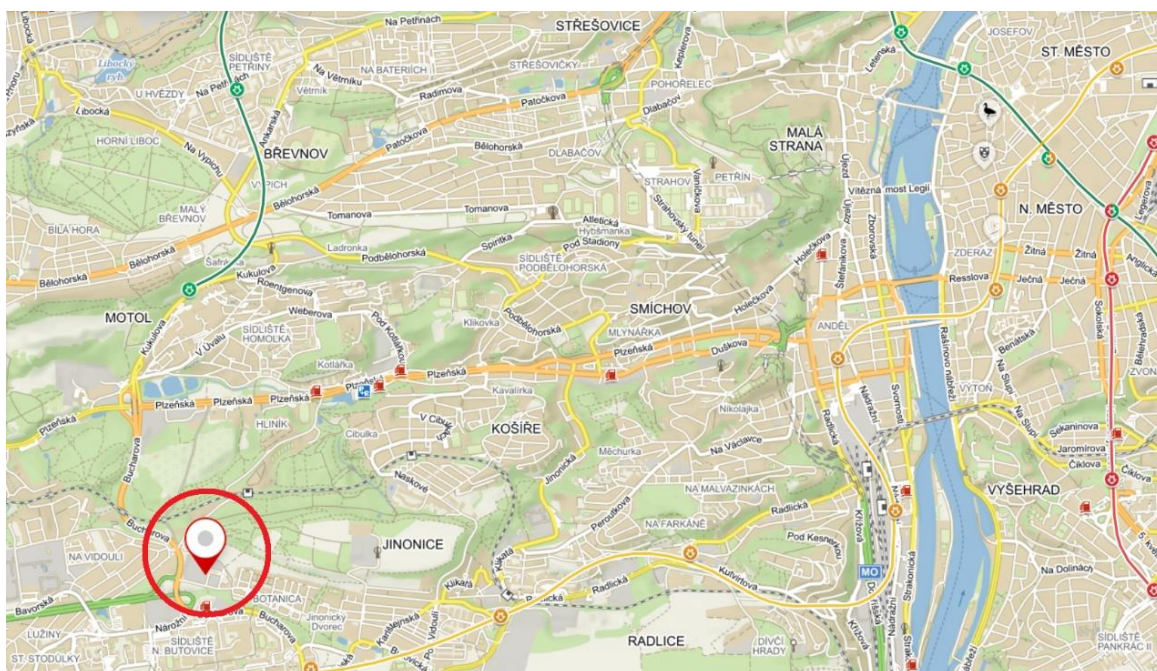
Druhá část se zabývá měřením a výpočtem předpokládaných spotřeb elektrické energie dodávky Mercedes-Benz eSprinter při provozu na městských rozvážecích linkách, na nichž jsou v současné době provozovány vznětové verze Mercedes-Benz Sprinter 314 a 316 CDI. Třetí pasáž je zaměřena na zkoušení a stanovení spotřeb elektrické dodávky Mercedes-Benz eVito pomocí simulací na vozidlovém dynamometru.

Na základě zjištěných dat, zejména elektrických spotřeb, bude poté proveden návrh dobíjecí infrastruktury v pekárně a dle možností dobíjení bude posouzena vhodnost aplikace elektromobilů při distribuci pečiva. Pro posouzení finanční rentabilnosti elektromobility bude na závěr provedena ekonomická analýza návratnosti investice do zmíněných elektrických dodávek a dobíjecích zařízení.

Před objasněním postupu řešení bude však ve stručnosti popsána společnost United Bakeries, zejména základy logistiky rozvozu pečiva a její vozový park, jež by mohl být v budoucnu nahrazen zmíněnými vozy s elektrickým pohonem.

1.1 Charakteristika společnosti

Společnost United Bakeries, a. s. je pekárenská skupina, která působí na českém trhu od roku 2007 a řadí se mezi přední tuzemské výrobce a dodavatele pečiva. Firma vlastní několik regionálních pekáren pokrývajících celé území ČR, kdy mezi ty největší patří pekárna Odkolek, pekárny Delta a dále značky jako Toasttip či Cerea. Tato práce se zabývá elektrifikací vozového parku právě ve firmě Odkolek, jejíž historie sahá až do roku 1850. [4] Pekárna sídlí v Praze 5, konkrétně na adrese Pekařská 1, kdy z tohoto místa probíhá veškerá logistika prodávaných výrobků značky Odkolek.



obr. 1 – Sídlo pekárny Odkolek v Praze 5 [5]

V současné době se k distribuci po Praze využívá vznětových dodávek Mercedes-Benz Sprinter 314 a 316 CDI, jejichž rozměry jsou vhodné pro průjezd úzkými uličkami v centru města. Celkem je ve městě rozváženo dvěma dodávkami 314 CDI a čtyřmi vozy 316 CDI. Tyto dvě verze se liší maximálním výkonem motoru.

Pekárna zajišťuje distribuci také mimo Prahu, tedy zejména ve Středočeském kraji. Na těchto mimoměstských linkách jsou nejvíce využívány vznětové dodávky Mercedes-Benz Sprinter 514 CDI, které mají oproti prvním zmíněným verzím Sprintera větší objem nákladového prostoru a jsou celkově rozměrnější, jelikož zde odpadá požadavek na vhodnou velikost dodávky pro průjezd úzkými ulicemi v centru města.

Tato práce se soustředí pouze na náhradu dodávek Mercedes-Benz Sprinter 314 a 316 CDI elektrickými vozidly. Dodávkou 514 CDI se text nezabývá z toho důvodu, že nájezdy

na městských distribučních linkách, kde je rozváženo menšími verzemi Sprintera (314 a 316 CDI), odpovídají několika desítkám kilometrů, zatímco mimoměstské trasy, na nichž je používána právě verze 514 CDI, svou délkou přesahují hranici sta kilometrů. Tyto vzdálenosti již nemusí být zvládnutelné při současných možnostech elektrických dodávek, a to například v zimě, kdy je maximální dojezd snížen používáním topení. Na mimoměstské trasy se ze zmíněného důvodu jako vhodné jeví spíše dodávky s hybridním pohonem.

Rozvozy pečiva probíhají v tzv. prvních, druhých a třetích závozech. Číslo závozu indikuje, jak brzy probíhá náklad pečiva do vozidla (např. pro první závoz se v pekárně nakládá mezi 1:00 a 4:00, pro druhý závoz mezi 6:00 a 8:00 atp.). Ve skutečnosti pak platí, že zhruba 80 % objemu zakázek je z pekárny rozvezeno během prvních závozů. Dále pak existují také tzv. ambulantní rozvozy, které nastávají tehdy, pokud si zákazník dodatečně objedná pečivo, kdy tato situace může samozřejmě nastat kdykoliv během dne.

Pokud tedy dodávka během dne rozváží pouze první závoz, po jeho skončení je v pekárně zaparkována a nevyužívána až do následujícího dne. V případě druhých a třetích závozů je dodávka nějakou dobu po skončení předchozího závozu zaparkována v pekárně, poté je využívána znovu (dle výjezdových časů druhých a třetích závozů) a to až do skončení posledního závozu. Jelikož náklad zboží do vozidla trvá přibližně půl hodiny, je mezi rozvozy dodávka v pekárně zaparkována minimálně tuto dobu.

Na jednotlivých distribučních linkách jsou dány adresy zákazníků, kterým má být zboží doručeno, ovšem skutečnou trasu rozvozu si volí každý řidič sám. Jelikož ale ve většině případů za jednu dodávku odpovídá jeden řidič, tedy jeden řidič také rozváží na jedné lince, jsou tyto trasy každý den podobné. Výjimky mohou nastat v případech, kdy si např. některý zákazník neobjedná v daný den zboží, nebo když dodávka vyjíždí z pekárny se zpožděním a některý odběratel vyžaduje dodání zboží přesně v daný čas. V těchto případech tedy řidič trasu mírně upraví.

Dle vyjádření společnosti Pražská energetika, a. s., která v pekárně Odkolek zajišťuje energetické služby, činí v současné době rezervovaný příkon pekárny 1000 kW. To znamená, že maximální elektrický odběr pekárny v jeden okamžik je smluvně omezen touto hodnotou a při jejím překročení platí pekárna pokuty. Smluvně je možné rezervovaný příkon navýšit, a to až do hodnoty celkového instalovaného příkonu, který je dán maximální zatížitelností trafostanice a činí 3000 kW. [6]

2 Obecný způsob řešení

V této kapitole bude objasněn postup řešení diplomové práce.

Požadované výstupy práce

Jak bylo zmíněno, mezi hlavní cíle práce patří posouzení použitelnosti elektromobilů eSprinter a eVito v pekárně Odkolek. Úkolem je tedy rozhodnout, kolik těchto elektrických dodávek je technicky možné na současných trasách rozvozu pečiva provozovat. Jelikož vozidlo eSprinter bude na trhu dostupné ve dvou verzích podle kapacity baterie, jak bude blíže popsáno v kapitole 3.1, mezi cíle práce patří také určit, jakými bateriemi by měla tato vozidla pro účely rozvozu v pekárně Odkolek disponovat. Dalším požadovaným výstupem práce je navrhnout dobíjecí infrastrukturu v sídle pekárny, to znamená navrhnout počty a výkonové parametry AC (alternating current – střídavý proud) a DC (direct current – stejnosměrný proud) wallboxů pro dobíjení elektromobilů. Posledním požadovaným výstupem je provedení ekonomické analýzy a rozhodnutí o tom, zdali je v současné době přechod na elektromobilitu pro pekárnu rentabilní.

Postup řešení

K získání požadovaných výstupů byl zvolen následující postup řešení.

Základem k posouzení použitelnosti elektrických dodávek a stejně tak k návrhu dobíjecí infrastruktury a provedení ekonomické analýzy je znalost spotřeb elektromobilů eSprinter a eVito při rozvozu pečiva. Jelikož dodávka eSprinter nebyla v době tvorby této práce k dispozici na českém trhu a nebylo jí ani možné zapůjčit od výrobce a zjistit tak její spotřebu v reálném provozu, resp. na vozidlovém dynamometru, musela být k jejímu stanovení použita jiná metoda. Ta spočívá ve zjištění energií na kolech vozidla (dále jen „na kolech“) během reálných rozvážecích tras, a to pomocí rovnic podélné dynamiky, jejichž integrací lze odvodit funkční předpisy pro velikost energie na kolech během rozvozu. Následně bude tato spotřeba energie na kolech přepočítána na spotřebu energie z baterie.

Ve zmíněných funkčních předpisech udávajících energii na kolech figurují mimo technických parametrů vozidla také hmotnost nákladu, průběh rychlosti dodávky a stoupání vozovky. Za účelem získání těchto dat bylo při řešení práce provedeno několik měření polohy a rychlosti během skutečného rozvozu pečiva na městských trasách v současných vznětových dodávkách Mercedes-Benz Sprinter 314 CDI, přičemž hmotnost nákladu a její změny byly zaznamenány z dodacích listů. Na základě naměřené polohy dodávky byl poté k trase přiřazen profil stoupání vozovky použitím mapových služeb.

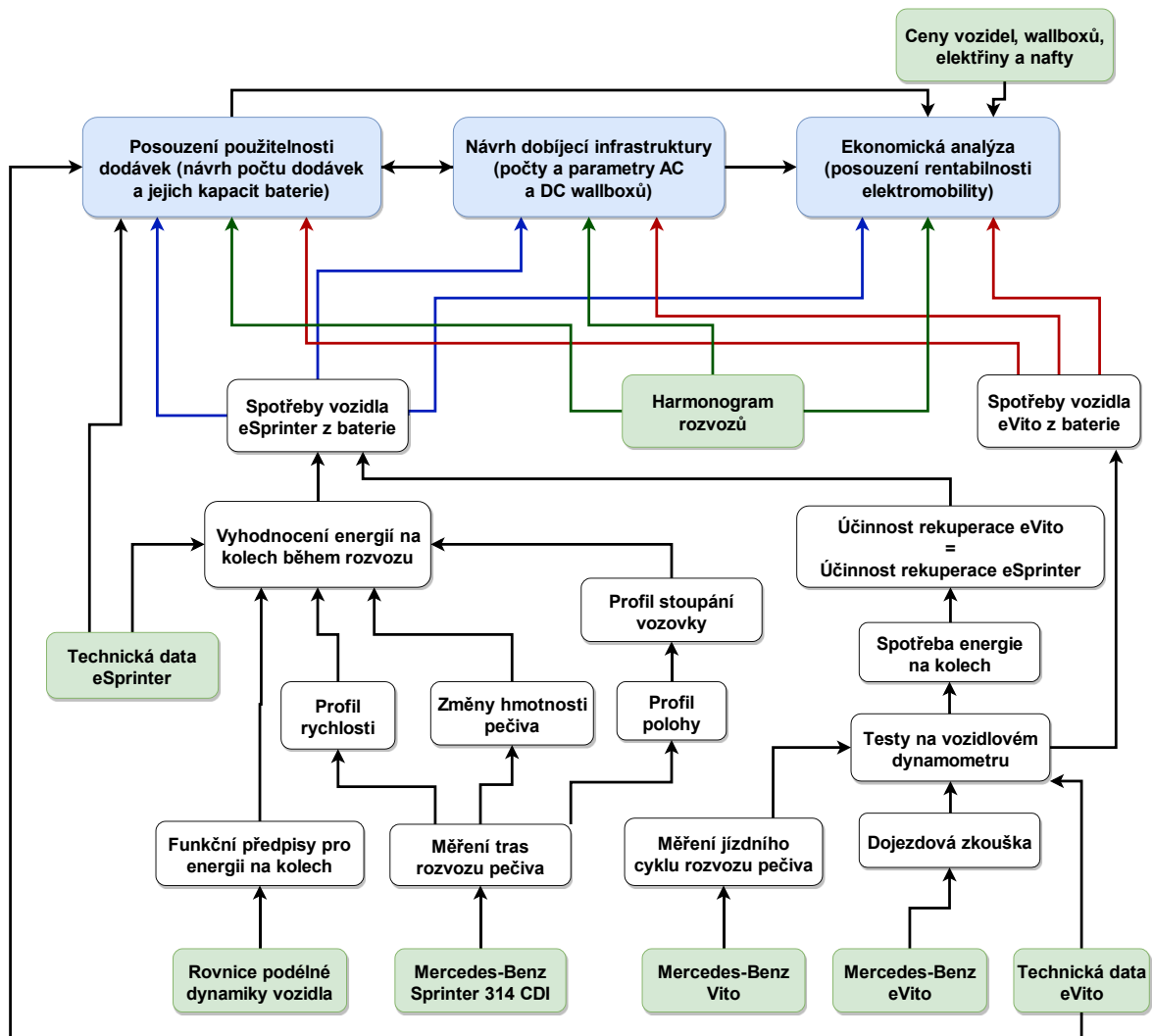
S těmito naměřenými daty bude tedy zjištěna velikost energie na kolech během rozvozů pečiva, přičemž za technické parametry vozidla budou dosazeny parametry elektrické dodávky eSprinter. Předpoklad je tedy takový, že by vozy eSprinter rozvážecí linky projížděly stejnými rychlostmi jako stávající vznětové dodávky Sprinter.

Při přepočtu energie na kolech na spotřebu energie z baterie ovšem nastává potíž v tom, že je k němu zapotřebí znalost účinnosti rekuperace elektromobilu eSprinter během jízdy, tj. účinnosti přeměny záporných energií na kolech do baterie. Jelikož tato hodnota známá není, musela být zjištěna pomocí simulací městského jízdního cyklu rozvozu pečiva s elektromobilem eVito na vozidlovém dynamometru, kdy je řídicí jednotka dynamometru schopna naměřit data, z nichž je možné určit energii na kolech. Jelikož spotřebu z baterie ukazuje sama dodávka, je možné účinnost rekuperace vozu eVito při jízdě v tomto jízdním cyklu dopočítat. Průběh rychlosti tohoto jízdního cyklu byl změřen během rozvozu pečiva se vznětovou dodávkou Vito, která byla pro tyto účely zapůjčena firmou Mercedes-Benz. Bylo tedy předpokládáno, že je účinnost rekuperace dodávky eVito při jízdě v tomto cyklu stejná jako u vozu eSprinter, jelikož se obou v případech jedná o rozvoz ve městě a styl jízdy je podobný. Těmto testům samozřejmě předcházelo provedení dojezdové zkoušky s vozem eVito, aby bylo možné dynamometr správně nastavit. Popsaných zkoušek na dynamometru bylo také využito ke zjištění elektrických spotřeb vozidla eVito při rozvozu pečiva.

V dalším kroku bude proveden návrh dobíjecí infrastruktury, a to na základě zjištěných spotřeb obou vozidel a také na základě reálného měsíčního harmonogramu rozvozů všech současných vznětových dodávek Sprinter, který byl pro účely této práce dodán společností United Bakeries, a. s. a který obsahuje časy rozvozů a nájezdy vozidel na všech rozvozových linkách. Z těchto údajů bude také určeno, zdali a jaké dodávky jsou schopny rozvozy pečiva zvládnout, a to i v kriticky vytížené dny a také např. v zimě, kdy je jejich spotřeba zvýšená kvůli vytápění. Pro tyto konkrétní dodávky a navržená dobíjecí zařízení bude také zjišťováno, zdali je současný rezervovaný příkon pekárny schopen dobíjení elektromobilů zajistit, resp. zdali je třeba elektrickou přípojku pekárny Odkolek v tomto ohledu modernizovat.

Na základě určených spotřeb vozidel, dodaného harmonogramu rozvozů a dalších parametrů bude následně provedena ekonomická analýza návratnosti investice do navrženého počtu konkrétních elektrických dodávek a dobíjecích zařízení, z níž bude posouzeno, zdali v současné době zavedení elektromobility v pekárně Odkolek je či není finančně rentabilní. Popsaný způsob řešení je také graficky zpracován v následujícím síťovém diagramu na obr. 2. Modře vyznačené bloky jsou požadované výstupy diplomové práce a bloky

označené zeleně znázorňují vstupy pro řešení této práce, z nichž bude popsána analýza provedena a které vyplývají z popsaného postupu řešení.



obr. 2 – Síťový diagram znázorňující postup řešení diplomové práce (zelené bloky – vstupy; modré bloky – výstupy)

Spotřeby elektromobilů jsou velmi závislé na hmotnosti vozidla, trase, stylu jízdy řidiče a dalších faktorech (např. vytápění interiéru) a její hodnoty jsou tak do jisté míry individuální. Navíc v dnešní době stále není snadné nalézt veřejnou dobíjecí stanici, z níž by bylo možné vozidlo bezprostředně dobíjet, což je v případě nadměrného poklesu kapacity baterie během rozvozu důležité zejména s uvážením, že jsou některé závozy pečiva vázány na přesný čas. Zkušenosti s provozem elektromobilů jsou také zatím obecně malé, proto se tato práce vydává cestou důkladné analýzy na základě experimentálně-výpočetního přístupu. V nadcházejících kapitolách bude zde naznačený postup podrobně rozebrán.

3 Spotřeby elektromobilu eSprinter

V této kapitole budou analyzovány energetické spotřeby elektrické dodávky Mercedes-Benz eSprinter na vybraných městských trasách rozvozu pečiva. Jak bylo zmíněno, na těchto trasách v současné době probíhá rozvoz vznětovými vozidly Mercedes-Benz Sprinter 314 a 316 CDI.

Jak bylo popsáno v kapitole 2, dodávka nebyla v době tvorby této práce k dispozici k zapůjčení, tudíž ke zjištění její spotřeby při rozvozu pečiva musela být použita metoda spočívající ve zjištění energetických náročností na kolech vozidla během reálných rozvážecích tras, a to pomocí rovnic podélné dynamiky, které udávají velikosti jízdních odporů.

V rámci této statě budou nejprve specifikovány technické parametry elektrické a vznětové verze dodávky Sprinter, poté se text bude zabývat měřením rozvážecích tras, úpravou naměřených jízdních dat a tvorbou profilu stoupání vozovky, odvozením vztahů pro určení energií na kolech a vyhodnocením energetických spotřeb z baterie. Spotřeby z baterie budou analyzovány za různých podmínek, jako např. se zapnutým či vypnutým topením nebo v dopravních zácpách.

3.1 Technická data dodávek Sprinter a eSprinter

V případě vznětové verze Mercedes-Benz Sprinter 314 CDI se jedná o dodávku spadající do druhé generace tohoto modelu, vyráběné v letech 2006 až 2018, s pohonem zadních kol, vysokou střechu a v extra dlouhé variantě co se rozvoru týče. Ostatní podstatné technické parametry dodávky jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce 1. [7]

Maximální výkon motoru	105 kW
Provozní hmotnost	2 443 kg
Čelní plocha	4,8 m ²

tabulka 1 – Technické parametry vozidla Mercedes-Benz Sprinter 314 CDI [7], [8]

Maximální výkon motoru byl spolu s provozní hmotností zjištěn z malého technického průkazu vozidla a k odečtu čelní plochy byl použit výkres dodávky. Provozní hmotností se rozumí součet pohotovostní hmotnosti vozidla a hmotnosti řidiče (75 kg), přičemž pohotovostní hmotnost vozidla udává hmotnost prázdného vozu s výbavou a veškerými provozními náplněmi, přičemž palivová nádrž je naplněna z 90 %.



obr. 3 – Mercedes-Benz Sprinter 314 CDI [9]

Elektrická dodávka eSprinter disponuje oproti vznětové verzi pohonem předních kol a bude k dispozici ve dvou variantách využitelné kapacity baterie – 35 kWh a 47 kWh [7]. Další technické parametry dodávky jsou uvedeny v tabulce 2.

Kapacita baterie (nominální/využitelná)	41/35 kWh a 55/47 kWh
Maximální výkon elektromotoru (trvalý/krátkodobý)	70/85 kW
Pohotovostní hmotnost (pro obě varianty kapacity)	Od 2 460/2 600 kg
Dojezd ve WLTC (pro obě varianty kapacity)	115/150 km
Možnosti dobíjení	AC 3,7 kW (1x16 A) AC 7,4 kW (2x16 A) DC 20 kW, DC 80 kW

tabulka 2 – Technické parametry vozidla Mercedes-Benz eSprinter [7]

Maximální výkon elektromotoru je tedy pro obě varianty stejný a činí 70 kW s možným krátkodobým přetížením na hodnotu 85 kW. Dobíjení je realizováno standardem Mennekes typ 2 v případě AC dobíjení či CSS Combo II v případě DC dobíjení. Pohotovostní hmotnost dodávek je závislá na volitelné výbavě a její přesnou hodnotu je možné zjistit pouze vážením. To však v době tvorby práce nebylo možné, jelikož se dodávka ještě neprodávala a nebyla v pekárně k dispozici. Uvedené hodnoty v tabulce 2 jsou minimální hodnoty této pohotovostní hmotnosti, se kterými bude dále v práci počítáno. Ze stejného důvodu nebyl také k dispozici výkres dodávky, dle výrobce jsou však rozdíly mezi velikostí čelní plochy u vznětové a elektrické verze velmi malé, tudíž bude v práci uvažováno, že velikost čelní

plochy dodávek eSprinter činí také 4,8 m². Že jsou obě verze velikostně podobné ukazují obr. 3 a obr. 4.



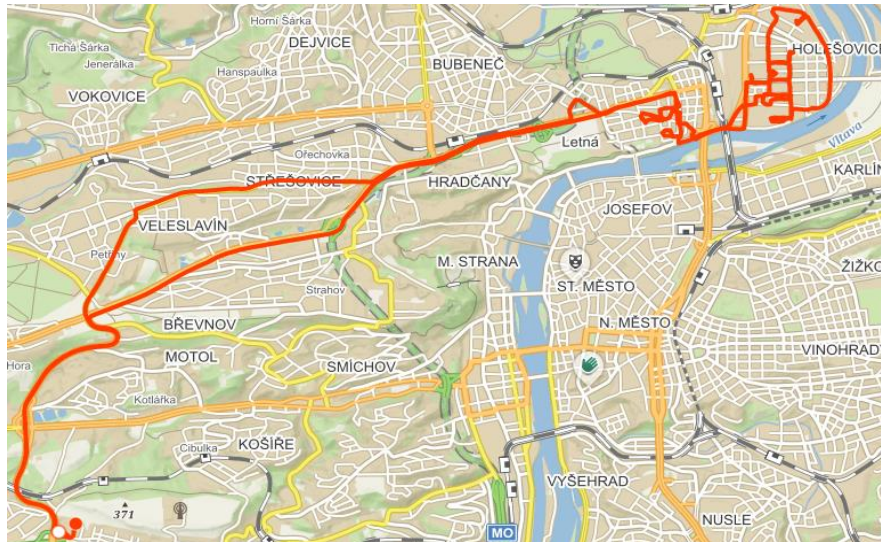
obr. 4 – Mercedes-Benz eSprinter [10]

3.2 Měření distribučních linek

Jak již bylo zmíněno, cílem provedených měření je získání profilu polohy a rychlosti dodávky na reálných trasách rozvozu pečiva, které následně slouží jako podklad pro výpočet energetické náročnosti trasy. K proměření byly vedením pekárny zvoleny celkem 3 rozvážecí linky, které budou podrobněji popsány v kapitole 3.2.1. Měření probíhalo v zimě a na jaře v roce 2019, přičemž každá trasa byla z odměřena s cílem zpřesnění výsledků celkem třikrát.

3.2.1 Charakteristika distribučních linek

První vybranou a proměřenou linkou je rozváženo k maximálně 20 zákazníkům v Praze 7 v Holešovicích. Délka tohoto jízdního cyklu je zhruba 35 km, přičemž při všech třech provedených měřeních bylo rozváženo stejným řidičem. Na obr. 5 je zobrazen záznam polohy dodávky z prvního měření, v tomto případě se jedná o standardní rozvážecí trasu, kdy příjezd i odjezd z doručovací oblasti, tj. z Holešovic, se odehrává přes Letnou, Vypich a Motol.

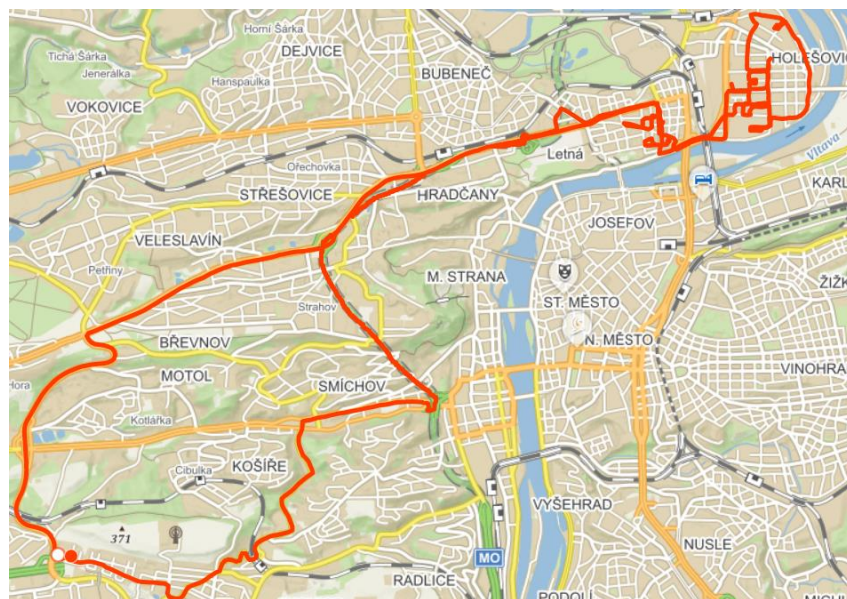


obr. 5 – Rozvážecí linka Holešovice – měření 1 [5]

Během druhého a třetího měření se však v lokalitě Vypich v důsledku silničních prací tvořily dlouhé kolony, proto byla řidičem k odjezdu z Holešovic zvolena trasa z Letné přes Strahovský tunel až na Anděl a odtud zpět do sídla pekárny, jak je znázorněno na obr. 6. Z tohoto důvodu je jízdní cyklus z druhého a třetího měření zhruba o 2 kilometry delší než při prvním měření, což ukazuje tabulka 3.

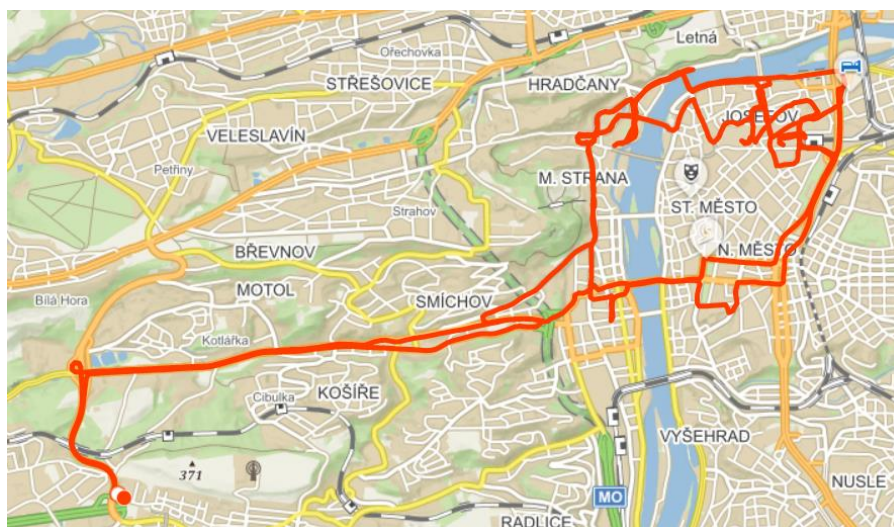
Číslo měření	Délka [km]	Počet zákazníků
1	34,3	18
2	36,7	18
3	36,3	19

tabulka 3 – Délky tras a počty zákazníků – linka Holešovice



obr. 6 – Rozvážecí linka Holešovice – měření 2 [5]

Ve druhé analyzované lince je doručovací oblastí centrum Prahy, přesněji řečeno zejména Josefov, Staré Město, Nové Město a Malá Strana, proto bude v delším textu tato trasa, resp. linka označována jako „Centrum 1“. Záznam polohy při rozvozu je ukázán na obr. 7.



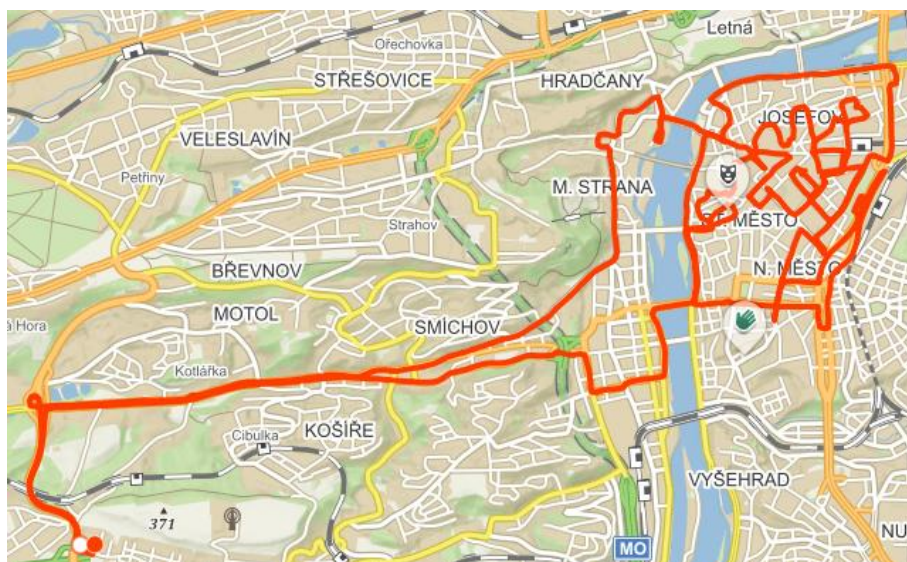
obr. 7 – Rozvážecí linka Centrum 1 [5]

S výjimkou druhého měření zde bylo rozváženo stejným řidičem. Nejvýše je na této lince doručováno celkem k 29 zákazníkům, ovšem poměrně velká část z nich si neobjednává pečivo pravidelně každý den. Délky trasy, které jsou ve dnech jednotlivých měření ukázány v tabulce 4, tím pádem samozřejmě mimo jiné závisí na počtu zákazníků, kterým je v daný den rozváženo.

Číslo měření	Délka trasy [km]	Počet zákazníků
1	38,6	16
2	45,4	19
3	46,0	15

tabulka 4 – Délky tras a počty zákazníků – linka Centrum 1

Poslední z měřených linek slouží k rozvozu pečiva také do centra města, a to do stejných lokalit jako v lince „Centrum 1“. Touto linkou, pro níž bude dále používáno označení „Centrum 2“, je nejvýše rozváženo k 29 odběratelům, ovšem obdobně jako v minulém případě, i zde si velká část z nich neobjednává pečivo každý den, od čehož se také odvíjí délka trasy. Obr. 8 ukazuje záznam polohy dodávky z druhého měření.



obr. 8 – Rozvážecí linka Centrum 2 [5]

Délky tras s odpovídajícími počty zákazníků v jednotlivých dnech měření ukazuje tabulka 5.

Číslo měření	Délka trasy [km]	Počet zákazníků
1	33,9	15
2	42,4	21
3	42,5	17

tabulka 5 – Délky tras a počty zákazníků – linka Centrum 2

Na popsáných třech linkách tedy bylo provedeno měření profilu polohy, rychlosti a také dalších veličin s cílem určit množství energie na kolech během rozvozu. Ke měření bylo použito zařízení popsané v kapitole 3.2.2.

3.2.2 Měřicí zařízení

Možností a přístupů k určení rychlostního profilu jedoucího vozidla je velké množství. V dnešní době spíše historickým způsobem je použití vlečeného kola, kdy úhlová rychlost tohoto tzv. pátého kola, jež je pomocí závěsu připojeno na zadní část vozidla, je snímána snímačem otáček a odpovídá dopředné rychlosti vozidla. Dalším systémem umožňující určení rychlosti vozidla je např. optický přístroj Correvit. Tyto dva zmíněné druhy měření však představují jisté nároky na zástavbové rozměry, které by komplikovaly náklad zboží v pekárně a dále také průjezdy úzkými uličkami. [11]

Často používaným přístupem je měření pomocí systému GPS, kdy podmínkou pro správnou funkci tohoto zařízení je viditelnost na nejméně 4 družice [12], což znamená, že zařízení není schopné zaznamenat polohu a rychlost např. při jízdě tunelem a v místech se zhoršenou

viditelností může být naměřený profil nepřesný.

Rychlost vozidla lze také zjistit užitím akcelerometru, v tomto případě je však nutné provést integraci zrychlení a znát integrační konstantu, tedy počáteční rychlost. Navíc je také naměřený profil zrychlení ovlivněn sklonem vozovky, jelikož na hmotu uvnitř akcelerometru působí při zrychlení kromě setrvačné síly také tíhová síla, tudíž je pro určení přesné hodnoty zrychlení nutné znát sklon vozovky. Naměřené zrychlení akcelerometrem je tedy rovno podélnému zrychlení vozidla pouze při jízdě po rovině. [11]

Vůbec nejpřesnějším a nejspolehlivějším přístupem je vyčítání rychlosti vozidla přímo z řídicí jednotky motoru, a to napojením měřicího zařízení na systém E-OBD přes zásuvku CARB, kdy tímto způsobem získáme rychlost vozidla odpovídající úhlové rychlosti otáčení kol. Napojení měřicí jednotky na systém E-OBD však nebylo vedením pekárny povoleno z důvodu obav o poškození řídicí jednotky motoru cizím zařízením. Z výše uvedených důvodů bylo pro měření rychlostního profilu zvoleno měření pomocí technologie GPS, konkrétně měřicí jednotkou CarScout. Jedná se o zařízení vyvinuté Fakultou elektrotechnickou a Fakultou dopravní ČVUT v Praze, které je schopné zaznamenávat data o poloze, rychlosti a zrychlení vozidla s frekvencí až 50 Hz. Poloha (zeměpisná šířka, zeměpisná délka a elipsoidická výška) a rychlost vozidla je jednotkou vyhodnocena pomocí technologie GPS, ke měření zrychlení je použit tříosý akcelerometr s nastavitelným rozsahem až ± 16 g. Jednotka kromě zmíněných snímačů v sobě obsahuje také magnetometr a gyroskop. Zařízení také umožňuje číst otáčky motoru a rychlost vozidla přímo z řídicí jednotky motoru při napojení na systém E-OBD. Tento přístup však nemohl být realizován z důvodu popsaného v předešlém odstavci. Detailnější produktový list jednotky lze nalézt v [13].

Jednotku a její instalaci ve vozidle během rozvozu pečiva lze spatřit na obr. 9. Zařízení bylo umístěno na bočním okně pomocí oboustranné lepicí pásky. Tento způsob umístění byl zvolen z toho důvodu, aby jedna z os akcelerometru byla shodná s podélnou osou vozidla a bylo tak umožněno měření zrychlení v podélném směru. Jelikož se v interiéru dodávky nevyskytovaly žádné rovné plochy, byl zvolen tento způsob.



obr. 9 – Umístění jednotky CarScout – pohled zevnitř

Kabel připojený do levé části jednotky (obr. 9) zajišťuje napájení. Pravý kabel je částí antény, která byla vyvedená na střechu dodávky (obr. 10) a zde umístěna pomocí magnetu, který má v sobě integrovaný.



obr. 10 – Umístění jednotky CarScout – pohled zvenku

Během měření všech veličin byla frekvence vzorkování nastavena na hodnotu 20 Hz, zrychlení bylo snímáno s rozsahem ± 2 g.

Pro kontrolu a pro ojedinělé výpadky signálu jednotky CarScout byl rychlostní profil během rozvozů měřen také pomocí mobilního telefonu Huawei P7, a to aplikacemi Endomondo

a SportsTracker, přičemž při měření byl v mobilním telefonu zapnutý GPS přijímač i datové připojení.

V místech, kde signál GPS není, tj. ve tunelech, byl rychlostní profil mimo akcelerometru jednotky CarScout zaznamenán také pomocí vozidlového tachometru, kdy byla po pěti vteřinách zapisována hodnota rychlosti z palubního displeje.

3.2.3 Naměřená data

Zařízeními popsanými v předešlé kapitole tedy bylo získáno celkem 9 záznamů polohy, rychlosti a dalších zmíněných veličin během devíti rozvozů v reálném provozu. Veškerá naměřená data jednotkou CarScout a mobilním telefonem lze nalézt v Příloze 3.

V naměřených hodnotách je zeměpisná délka a šířka udávána ve stupních, jednotkou naměřené rychlosti je km/h, zrychlení je udáváno jako tisícinásobek podílu naměřeného a tíhového zrychlení, jednotkou je tedy mg.

3.3 Vyhodnocení měření

Cílem vyhodnocení naměřených dat je zjištění předpokládané energetické náročnosti na kolech dodávky eSprinter během jednotlivých rozvozů a následně přepočítání těchto energií na kolech na elektrickou spotřebu z baterie. Energetická náročnost na kolech je v práci chápána jako množství energie na kolech, které bylo během jedné rozvážecí trasy dodané motorem pro překonání všech jízdních odporů, které na vůz působí. Vyhodnocení bude provedeno pro obě verze vozu eSprinter dle kapacity baterie, jež se liší pohotovostní hmotností.

Základem zjištění energetické náročnosti na kolech je rozdělení trasy do úseků, na nichž je definované konstantní zrychlení vozidla a konstantní stoupání vozovky. Nejprve tedy budou vytvořeny úseky s konstantním zrychlením, a to na základě rozdělení naměřených rychlostních profilů konstantním časovým intervalem rovným 4 sekundám. Tato velikost časového intervalu je dostatečně velká na to, aby byly z rychlostního profilu eliminovány nereálné hodnoty zrychlení, a dostatečně malá na to, aby byl vzniklý rychlostní profil stále reálný a sledoval průběh naměřených rychlostí (tato hodnota byla také zvolena na základě zkušeností Ing. Josefa Morkuse, CSc., konzultanta této práce). Následně budou vytvořeny úseky nadmořské výšky s konstantním stoupáním a sjednocením rychlostního profilu a profilu stoupání dojde ke vzniku finálních úseků, na nichž bude vyšetřována potřebná energie na kolech pro překonání jízdních odporů. Celková energie na kolech během jednoho

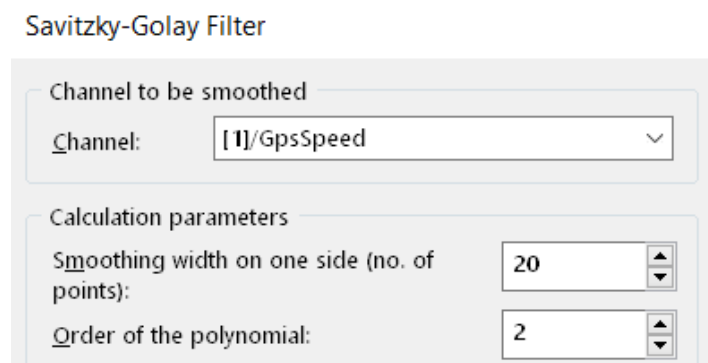
rozvozu je poté dána součtem energií v jednotlivých úsecích.

V nadcházejících kapitolách bude podrobně popsán postup vyhodnocení naměřených dat, nejprve tedy budou upraveny naměřené rychlostní profily tak, aby na nich bylo zaručeno konstantní zrychlení, poté bude k tomuto profilu přiřazen průběh nadmořské výšky a následně budou z jízdních odporů odvozeny vztahy pro výpočet energetické náročnosti, do nichž bude dosazen zmíněný profil rychlostí dodávky a stoupání vozovky.

3.3.1 Rychlostní profil

Rychlostní profil použitý do výpočtu energetické náročnosti všech devíti odměřených jízdních cyklů byl téměř výhradně vytvořen na základě dat získaných z jednotky CarScout. Data z mobilního telefonu byla použita ve výjimečných případech, kdy byl naměřený signál jednotkou CarScout nekvalitní. Při jízdě tunelem bylo nutné pro vytvoření rychlostního profilu použít zapsané hodnoty rychlostí z tachometru.

Jak bylo zmíněno, naměřená data jednotkou CarScout byla zaznamenána s frekvencí 20 Hz. Jedná se však o surová data, která je před dalším zpracováním třeba filtrovat a odstranit tak některé chybně naměřené hodnoty, zákmity, jež vyplývají z vlastností měření s GPS. Prvním krokem k získání výsledného rychlostního profilu je tedy filtrace naměřených dat. K tomu byl použit Savitzky-Golay filtr realizovaný v programu National Instruments DIAdem. Jedná se o filtr, který k vyhlazení dat využívá metody nejmenších čtverců, jak bude dále popsáno [14]. Před samotnou filtrací je v tomto softwaru nutno definovat výpočetní parametry filtru. Konkrétně se jedná o počet bodů, přes které bude filtrace provedena a řád polynomu filtrace. Rozhraní pro definici parametrů v programu DIAdem je ukázáno na obr. 11.



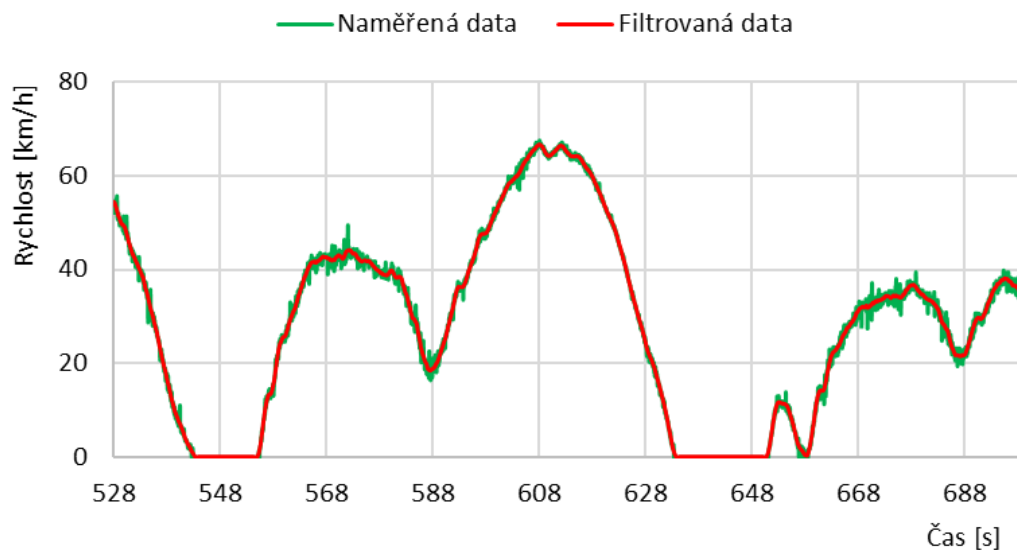
obr. 11 – Definice parametrů Savitzky-Golay filtru v programu DIAdem

Tento obrázek také znázorňuje použité vstupní parametry filtru – počet bodů filtrace na jedné straně byl nastaven na 20, přičemž byl použit polynom druhého řádu. To znamená, že

konkrétní naměřené hodnotě rychlosti (pracovní bod) bylo přiřazeno z každé strany nejbližších 20 naměřených hodnot, a těmito celkem 41 body byl proložen polynom druhého stupně pomocí metody nejmenších čtverců. Funkční hodnota vzniklého polynomu druhého stupně v pracovním bodě je poté brána jako filtrovaná hodnota rychlosti a jedná se tedy o finální výstup z tohoto filtru.

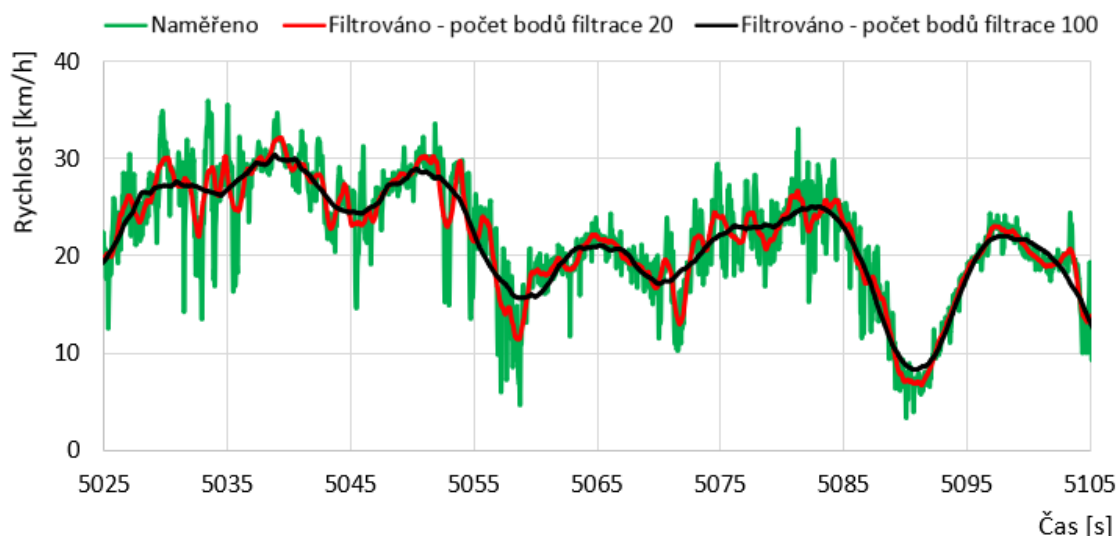
Parametry filtru ukázané na obr. 11 byly zvoleny z toho důvodu, že se filtrovaný rychlostní profil jevil jako nejvíce realistický v porovnání s jinými parametry.

Na obr. 12 je možné vidět, jak popsaný filtr s těmito parametry funguje. Zelenou barvou je znázorněn výňatek z naměřeného průběhu rychlosti, červená barva pak reprezentuje filtrovaná data.



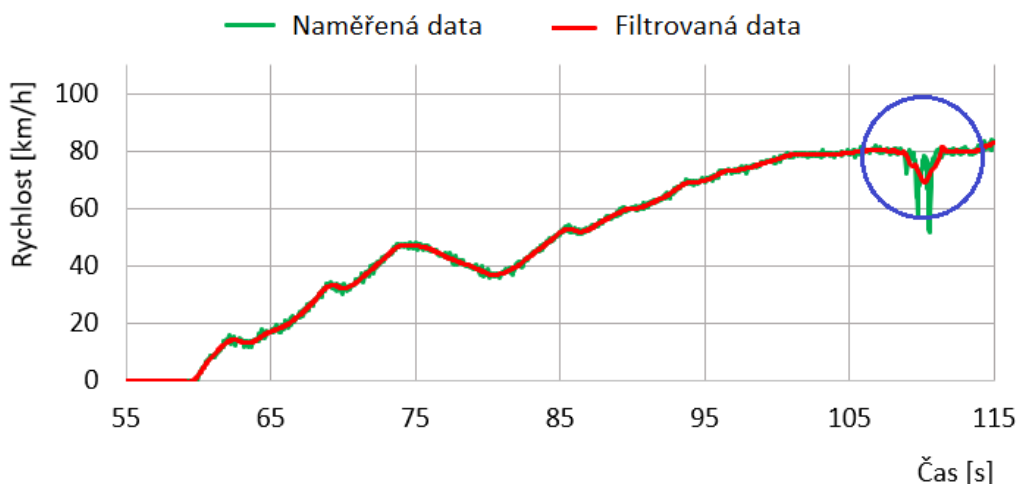
obr. 12 – Ukázka filtrace dat Savitzky-Golay filtrem

Tímto způsobem, tedy se zmíněnými parametry filtru, byl vyhlazen naměřený průběh rychlosti ve velké většině případů. Ve výjimečných situacích bylo však nutné použít ještě jemnější filtr, např. při průjezdech úzkými uličkami v centru Prahy, kdy vyfiltrovaný signál se zmíněnými výpočetními parametry byl i tak rozkmitaný. Ve tomto jemnějším filtru byl počet bodů filtrace zvýšen z původních 20 na 100, řád filtrace byl ponechán na 2. Porovnání obou filtrů na dalším výňatku z naměřených dat lze vidět na obr. 13.



obr. 13 – Porovnání dvou Savitzky-Golay filtrů

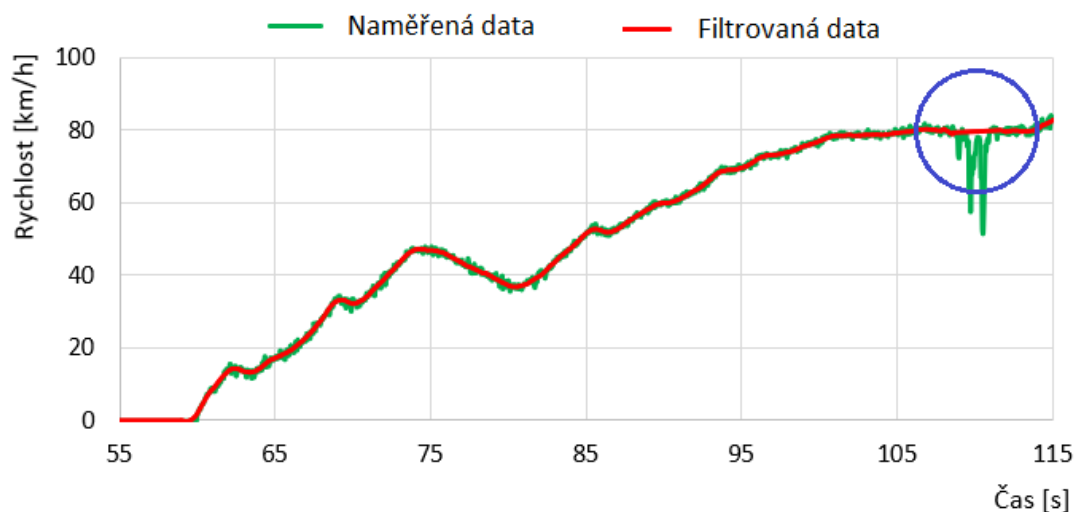
Z obr. 13 je tedy zřejmé, že při použití původního filtru byl vzniklý profil stále poněkud rozkmitaný (červená křivka), což bylo odstraněno použitím jemnějšího filtru (černá křivka). Situace, v níž není splněna podmínka ke správné funkci zařízení GPS, tedy dostatečná viditelnost na oblohu, nastává také při průjezdu pod mostem, kdy naměřený signál nemusí odpovídat skutečným hodnotám. Tento jev ukazuje obr. 14, kdy je v modře zakroužkované oblasti patrný zákmit v průběhu rychlosti, jež se vyskytl právě při průjezdu pod mostem.



obr. 14 – Průjezd pod mostem (oblast vyznačená modrým kruhem)

Jelikož tedy takovéto naměřené hodnoty neodpovídají skutečnosti, bylo nutné je ve všech místech, kde je při průjezdu pod mostem vykazována obdobná tendence, odstranit a nahradit novými hodnotami. Tato náhrada rychlostí byla provedena úsečkou spojující body odpovídající počátku a konci průjezdu. Jelikož oblast pod mostem představuje krátký úsek, na kterém nedochází k výrazné změně trendu rychlosti, je tato náhrada úsečkou pro účely

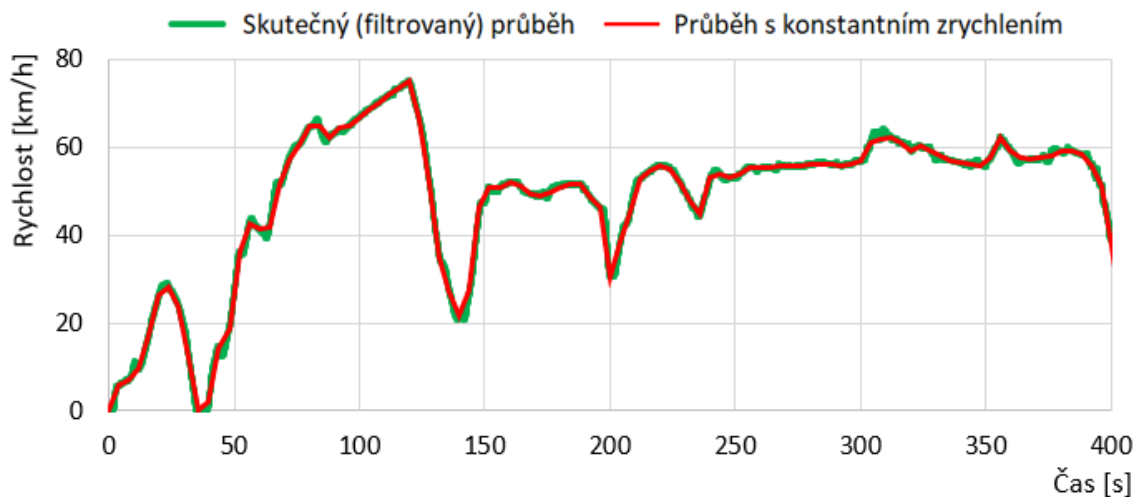
této práce postačující. Zmíněný postup je lépe patrný z obr. 15, kde je ukázána část výsledného, tedy dále do výpočtu použitého rychlostního profilu, který je vytvořený z naměřených hodnot z obr. 14.



obr. 15 – Tvorba rychlostního profilu (průjezd pod mostem)

V ojedinělých případech během rozvozu (opět v oblastech se špatnou viditelností na oblohu) však jednotka CarScout ztratila GPS signál, a v těchto místech tak bylo nutné pro vytvoření rychlostního profilu použít naměřené hodnoty z akcelerometru jednotky CarScout při znalosti stoupání, či data o rychlostech vozidla naměřená mobilním telefonem.

V kapitole 3.3 bylo popsáno, že výpočet energetické náročnosti bude proveden s průběhem rychlosti, u něhož je zaručeno konstantní zrychlení. Tento rychlostní profil s konstantním zrychlením byl vytvořen z filtrovaného průběhu rychlosti, a to tak, že byly časovým krokem rovným 4 sekundám na tomto profilu vytvořeny body a následně byly všechny vzniklé sousedící body spojeny úsečkou. Popsaný postup je lépe patrný z obr. 16.

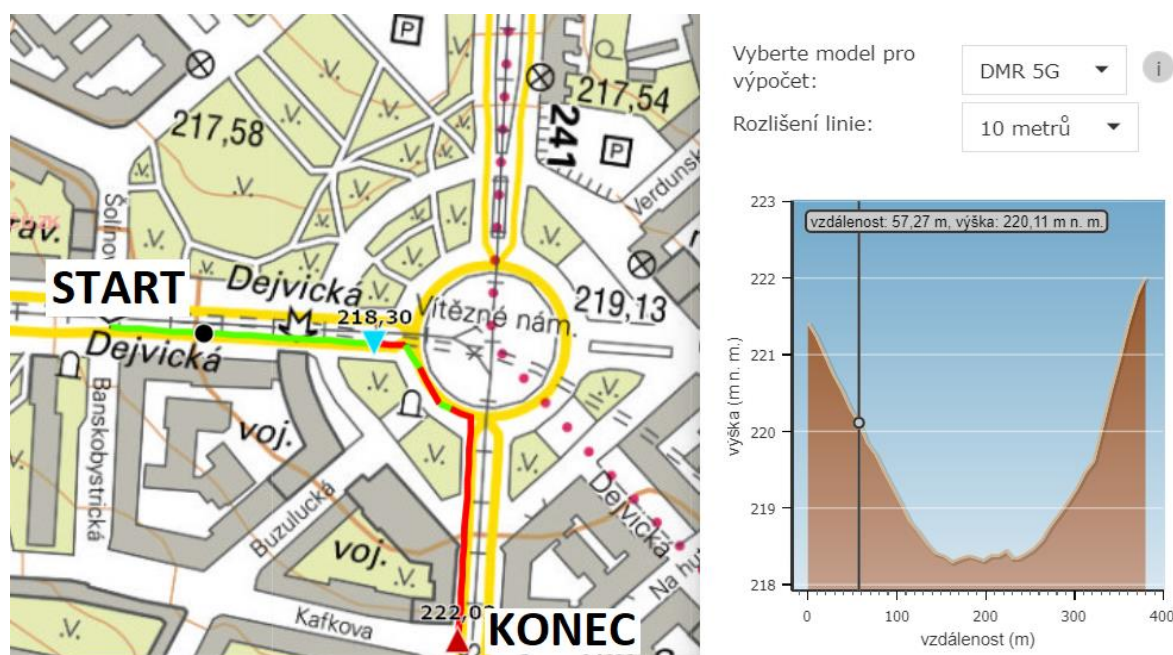


obr. 16 – Ukázka vytvořeného rychlostního profilu s konstantním zrychlením

Jelikož derivací úsečky, resp. přímky, je konstanta, je u tohoto průběhu zaručeno konstantní zrychlení a může s ním být počítána energie na kolech. Veškeré takto vytvořené profily rychlostí s konstantním zrychlením lze nalézt v Příloze 3.

3.3.2 Profil stoupání vozovky

K sestavení profilu nadmořské výšky na trase byla použita aplikace „Analýzy výškopisu“ [15], jejímž provozovatelem je Český úřad zeměměřický a katastrální. Jedná se o aplikaci, ve které nejprve uživatel nadefinuje trasu a aplikace na ní poté sama vyhodnotí průběh nadmořské výšky. Zdrojem výškopisných dat je digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G), získaný metodou leteckého laserového skenování, tedy v současné době nejmodernější technologií sběru 3D dat o objektech na zemském povrchu [16]. Funkce zmíněné aplikace bude popsána dle příkladu na následujícím obr. 17.



obr. 17 – Ukázkový příklad v aplikaci „Analýzy výškopisu“

V tomto případě byla pro ukázkou nadefinována krátká trasa poblíž Vítězného náměstí v pražských Dejvicích. Začátek trasy je popsán nápisem „START“ (ulice Evropská) a konec trasy nápisem „KONEC“ (ulice Svatovítská) na obr. 17. Červený trojúhelník na mapě znázorňuje místo s nejvyšší nadmořskou výškou a azurově modrý trojúhelník naopak nejnižší položené místo na definované trase.

Po nakreslení trasy uživatel v aplikaci vybere výškopisný model pro výpočet (v ukázaném případě DMR 5G) a rozlišení linie (v ukázaném případě 10 metrů). Toto rozlišení bylo zvoleno z toho důvodu, jelikož je takto získaný profil nadmořské výšky z nabízených

možností nejvíce hladký.

Po zadání zmíněných parametrů aplikace zobrazí závislost nadmořské výšky na vzdálenosti. Černý bod na mapě na obr. 17 odpovídá svislé čáře v grafu profilu nadmořské výšky. Z něj si lze také všimnout, že vzdálenost i nadmořská výška je vyhodnocena s přesností na centimetry. To je největší přednost této aplikace oproti jiným mapovým službám (Mapy.cz, Google maps), kde je výškový profil udáván v celých metrech, a tudíž zde místa přechodu mezi celočíselnými nadmořskými výškami odpovídají nekonečnému stoupání. Stoupání vozovky mezi body 1 a 2 dle závislosti nadmořské výšky na dráze je poté možné určit ze vztahu 3.1.

$$s = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1}, \quad (3.1)$$

kde $h_2 - h_1$ je rozdíl nadmořských výšek bodů 2 a 1,

$x_2 - x_1$ je vzdálenost mezi body 1 a 2.

Jak se lze všimnout z obr. 17, aplikace indikuje výškový profil i na vyznačené trase. Vyskytuje-li se na trase stoupání, aplikace tuto část trasy vybarví červenou barvou, pokud se vyskytuje klesání, tak zelenou. Přesune-li uživatel ukazatel myši na vybarvený úsek trasy, zobrazí se sklon vozovky přímo ve stupních, jak zachycuje obr. 18. Zde je ukazatel myši přesunutý na původně zelenou část trasy, která se po najetí kurzorem vybarví jako azurově modrá a zobrazí se údaje o nadmořské výšce na tomto úseku. Úhel sklonu vozovky je tedy možné odečíst také tímto přístupem.



obr. 18 – Zobrazení sklonu trasy v aplikaci „Analýzy výškopisu“

Těmito dvěma způsoby tedy byly vytvořeny profily stoupání vozovky na jednotlivých odměřených linkách. Výjimkou jsou oblasti odpovídající průjezdům na mostě a v tunelech, jelikož v těchto místech aplikace zobrazuje nadmořské výšky jiného reliéfu vyskytujícího se pod či nad zmíněnými objekty. Průběh nadmořské výšky v těchto úsecích tak byl vytvořen pomocí úsečky spojující nadmořské výšky počátečního a koncového bodu tunelu či mostu. Na každé trase bylo popsány postupy vytvořeno zhruba 100 až 200 úseků s různým stoupáním, jež je možné nalézt v Příloze 3. Ačkoliv byl výškový profil měřen také jednotkou CarScout pomocí GPS, nebyla tato data pro sestavení výškového profilu z následujících důvodů použita. Tím hlavním je již zmíněná nepřesnost měření GPS v místech se zhoršenou viditelností na oblohu. Druhým důvodem je fakt, že zařízení GPS neměří nadmořskou, ale elipsoidickou výšku, což je vzdálenost nad referenčním elipsoidem, tedy objektem, který nahrazuje skutečný tvar země (geoid) pro účely GPS. Ač je rozdíl mezi elipsoidickou výškou a výškou nad geoidem (nadmořskou výškou) na malé oblasti přibližně konstantní [17], stále je v tomto ohledu výhodnější použití map, jež zobrazují přímo nadmořskou výšku. [18]

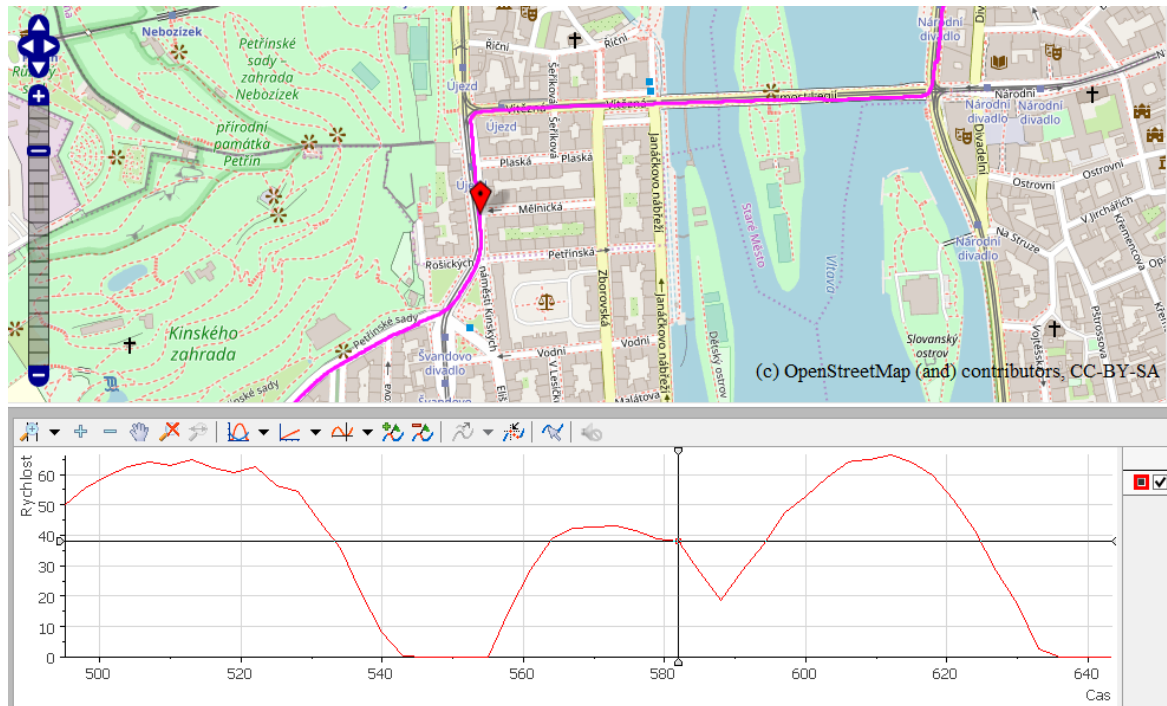
3.3.3 Hmotnost dodávek během rozvozu

Ve vztazích pro určení energetické náročnosti na kolech, jež budou odvozeny v dalších kapitolách, figuruje hmotnost vozidla. Ta je složena z hmotnosti samotné dodávky, řidiče a nákladu. Hmotnost nákladu se ovšem během rozvozu mění, jelikož dochází k vykládání pečiva u jednotlivých zákazníků. Z tohoto důvodu bylo nutné hmotnost zboží a její změny během rozvozu zaznamenat, čehož bylo dosaženo nahlédnutím a zapsáním hodnoty hmotnosti pečiva z dodacích listů při každé vykládce. Dodací listy nejsou v této práci uvedeny, jelikož kromě hmotností objednávek obsahují také ceny pečiva a jiné citlivé údaje. Změny hmotností nákladu během rozvozu lze nalézt v Příloze 3. Zde si lze všimnout, že hmotnost nákladu na začátku distribuce všech devíti rozvozu dosáhla maximálně zhruba 505 kg. Jelikož celková hmotnost vozidla eSprinter činí u obou verzí 3,5 tuny a pohotovostní hmotnost je zhruba 2460 kg či 2600 kg, je zřejmé, že rezerva pro další případný náklad je, co se týče hmotnosti, dostatečná.

3.3.4 Přiřazení rychlostního profilu k profilu stoupání

V kapitolách 3.3.1 a 3.3.2 byl popsán postup tvorby rychlostního profilu s konstantním zrychlením a profilu stoupání vozovky. Tyto dva průběhy je před dalším vyhodnocením nutné k sobě přiřadit, tedy zjistit, při jakých rychlostech se dodávka pohybovala na jakém stoupání. K těmto účelům bylo opět použito programu National Instruments DIAdem, který

umožňuje přiřadit a vykreslit záznam polohy a rychlosti dodávky, jak ukazuje snímek z tohoto programu na obr. 19.



obr. 19 – Zobrazení polohy a rychlosti vozidla (s konst. zrychlením) v programu DIAdem

Přiřazení rychlostního profilu k profilu stoupání tedy bylo provedeno v tomto rozhraní. Tímto sjednocením došlo ke vzniku finálních úseků, na nichž bude prováděna integrace jízdních odporů s cílem zjistit potřebnou energii na kolech. V rámci jednoho úseku jsou tedy oba zmíněné parametry (zrychlení a stoupání) konstantní. Jakmile dojde ke změně zrychlení či stoupání, nastane nový výpočetní úsek. Tyto finální úseky lze nalézt v Příloze 3.

3.3.5 Jízdní odpory

Jízdními odpory jsou obecně nazývány síly, které působí při jízdě proti pohybu vozidla, konkrétně se jedná o odpor valení, odpor vzduchu, odpor setrvačnosti a odpor stoupání. Dráhovou integrací těchto sil na nějakém úseku lze získat předpisy pro energii spotřebovanou na kolech vozidla na tomto úseku. V následujících kapitolách bude tato integrace provedena za předpokladu, že je na dráhovém segmentu, na němž je prováděna integrace, konstantní zrychlení vozidla a konstantní stoupání vozovky, což je splněno, jak bylo popsáno v předešlých kapitolách.

3.3.5.1 Energie potřebná na překonání odporu valení

Síla vznikající v důsledku odvalování pneumatiky po vozovce se nazývá odpor valení.

Velikost tohoto odporu je definována vztahem 3.2.

$$O_f = m \cdot g \cdot f \cdot \cos(\alpha), \quad (3.2)$$

kde m je hmotnost vozidla (včetně řidiče a nákladu),
 g je tíhové zrychlení,
 f je koeficient valivého odporu,
 α je úhel sklonu vozovky.

Pro získání potřebné energie na kolech bude provedena dráhová integrace tohoto vztahu, ovšem naměřený rychlostní profil byl získán v závislosti na čase, nikoliv na dráze. Proto je nutné vyjádřit diferenciál dráhy v závislosti na čase, jak ukazuje rovnice 3.3. Jak již bylo popsáno, integrace je prováděná na časovém intervalu, na němž je definováno konstantní zrychlení a konstantní stoupání, tedy konstantní úhel α .

$$E_f = \int_{s_1}^{s_2} O_f \cdot ds = \int_{t_1}^{t_2} m \cdot g \cdot f \cdot \cos(\alpha) \cdot v(t) \cdot dt, \quad (3.3)$$

kde $v(t)$ je rychlost vozidla,
 t je čas.

Po integraci a úpravě vypadá výsledný předpis pro energii na kolech potřebnou pro překonání valivého odporu v časovém intervalu $\langle t_1 ; t_2 \rangle$ následovně

$$E_f = m \cdot g \cdot f \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{(v_2 + v_1)}{2} \cdot (t_2 - t_1). \quad (3.4)$$

Hmotnost dodávky m , tedy součet pohotovostní hmotnosti dodávky, hmotnosti řidiče a nákladu, byla zjištěna na základě údajů uvedených v kapitole 3.1 (obě verze vozu eSprinter dle kapacity baterie se ve výpočtu liší pouze pohotovostní hmotností) a také dle hmotnosti zboží uvedených v dodacích listech, přičemž hmotnost řidiče byl uvažována jako 75 kg. Velikost tíhového zrychlení byla ve výpočtu použita jako $9,81 \text{ m/s}^2$.

Jelikož tvorba rychlostí v a úhlů stoupání α byla popsána v předešlých kapitolách, je jediným neznámým parametrem v rovnici 3.4 koeficient valivého odporu mezi pneumatikou a vozovkou. Publikace [19] udává interval hodnoty této veličiny v rozmezí 0,005 až 0,015 pro suchý asfalt a pneumatiku. Ve stejném zdroji je pro mokrou asfaltovou vozovku udáván

interval 0,008 až 0,02 [19]. Jiný pramen udává obecně interval koeficientu valivého odporu v rozmezí 0,01 až 0,02 [20]. Jelikož má odpor valení při jízdě v malých rychlostech, tj. např. ve městě, na celkovou energetickou náročnost ze všech jízdních odporů největší vliv, bude výpočet energie na překonání odporu valení a tím pádem celkové energie na kolech proveden se dvěma hodnotami koeficientu valivého odporu, a to s $f = 0,01$ a $f = 0,015$. Dále bude tedy předpokládáno, že hodnota $f = 0,01$ je platná pro suchý asfalt a hodnota $f = 0,015$ pro asfalt mokrý.

3.3.5.2 Energie potřebná na překonání odporu vzduchu

Odpor vzduchu je nejvýznamnějším odporem při jízdě ve vysokých rychlostech, např. na dálnici, ovšem ani při jízdě ve městě má nemalý vliv na spotřebu vozidla. Tato síla je definována vztahem

$$O_{vzd} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S_x \cdot \rho \cdot [v(t)]^2, \quad (3.5)$$

kde C_x je součinitel odporu vzduchu vozidla,

S_x je čelní plocha vozidla,

ρ je hustota vzduchu,

$v(t)$ je relativní rychlost vozidla vůči okolnímu vzduchu.

Obdobně jako v předchozím případě, integrací předpisu 3.5 dle dráhy získáme vztah pro energii na kolech vozidla, jež je potřeba pro překonání odporu vzduchu v časovém intervalu $\langle t_1 ; t_2 \rangle$. Tedy platí

$$E_{vzd} = \int_{s_1}^{s_2} O_{vzd} \cdot ds = \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S_x \cdot \rho \cdot [v(t)]^2 \cdot v(t) \cdot dt. \quad (3.6)$$

Po integraci a úpravě získáme výsledný vztah ve tvaru

$$E_{vzd} = \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot S_x \cdot \rho \cdot \frac{(v_2^2 + v_1^2)}{2} \cdot (t_2 - t_1) \cdot \frac{(v_2 + v_1)}{2}. \quad (3.7)$$

Součinitel odporu vzduchu C_x závisí zejména na tvaru karoserie a bývá pro dodávky udáván v rozmezí 0,35 až 0,5 [21]. Publikace [22] uvádí průměrný koeficient odporu vzduchu jako

0,46, kdy tato hodnota byla získána na základě měření celkem 17 dodávek. Pro účely této práce je dle uvedených poznatků volena hodnota C_x dodávky eSprinter jako 0,45. Čelní plocha S_x tohoto vozu činí $4,8 \text{ m}^2$, jak je uvedeno v kapitole 3.1. Za hustotu vzduchu ρ byla zvolena hodnota $1,25 \text{ kg/m}^3$, jež odpovídá teplotě vzduchu 10 °C a tlaku $101,4 \text{ kPa}$ [23].

3.3.5.3 Energie potřebná na překonání odporu setrvačnosti

Odpor setrvačnosti, někdy také nazývaný odpor ze zrychlení, působí na vozidlo pouze při změně rychlosti, tj. při zrychlení a zpomalování. Velikost této síly vyplývá z druhého Newtonova zákona, ovšem je nutné si uvědomit, že během zrychlení je urychlováno nejen samotné vozidlo, ale také rotující komponenty v jeho pohonném řetězci, tj. kola, hřídele, ozubená kola, motor apod. Z tohoto důvodu je nutné vliv rotujících komponent do výpočtu zahrnout a počítat s tzv. součinitelem rotujících hmot, který udává, jak velký tento vliv je. Výsledný vztah udávající odpor setrvačnosti uvádí rovnice 3.8.

$$O_a = (m_0 \cdot \delta + m_{\text{řidič}} + m_{\text{náklad}}) \cdot a, \quad (3.8)$$

kde m_0 je pohotovostní hmotnost vozidla,

$m_{\text{řidič}}$ je hmotnost řidiče,

$m_{\text{náklad}}$ je hmotnost nákladu,

δ je součinitel rotujících hmot,

a je zrychlení vozidla.

Konstantní zrychlení vozidla a bylo zjištěné ze vztahu 3.9.

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}, \quad (3.9)$$

kde $v_2 - v_1$ je změna rychlosti vozidla časovém intervalu $t_2 - t_1$,

$t_2 - t_1$ je délka časového intervalu, na kterém je počítáno zrychlení.

Po dosazení integračních mezí do vztahu 3.8 získáme rovnici 3.10.

$$E_a = \int_{s_1}^{s_2} O_a \cdot ds = \int_{t_1}^{t_2} (m_0 \cdot \delta + m_{\text{řidič}} + m_{\text{náklad}}) \cdot a \cdot v(t) \cdot dt. \quad (3.10)$$

Po integraci a úpravě vyjde výsledný předpis pro potřebnou energii na kolech v časovém úseku $\langle t_1 ; t_2 \rangle$ ve tvaru

$$E_{\alpha} = (m_0 \cdot \delta + m_{\text{řidič}} + m_{\text{náklad}}) \cdot a \cdot \frac{(v_1 + v_2)}{2} \cdot (t_2 - t_1). \quad (3.11)$$

Za pohotovostní hmotnost dodávky m_0 byla dosazena hodnota 2460 kg či 2600 kg (dle verze dodávky podle kapacity baterie), hmotnost řidiče byla uvažována jako 75 kg a hmotnost nákladu byla dosazena dle údajů z dodacích listů, jak bylo popsáno v kapitole 3.3.3. Jediným neznámým parametrem je tedy součinitel rotujících hmot δ , který byl přibližným výpočtem stanoven na hodnotě 1,07. Postup určení této hodnoty je uveden v Příloze 1.

3.3.5.4 Energie potřebná na překonání odporu stoupání

Odpor stoupání brzdí vozidlo při jízdě do svahu, ovšem při jízdě z kopce jej naopak pohání. Jeho velikost je rovna sinové složce tíhy, jak ukazuje rovnice 3.12.

$$O_{\alpha} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha), \quad (3.12)$$

kde m je hmotnost vozidla (včetně řidiče a nákladu),

g je tíhové zrychlení,

α je úhel sklonu vozovky.

Výsledný vztah pro energii potřebnou k překonání tohoto odporu v časovém intervalu $\langle t_1; t_2 \rangle$ uvádí rovnice 3.13 a 3.14 (v případě jízdy ze svahu se jedná o energii vozidlu dodanou).

$$E_{\alpha} = \int_{s_1}^{s_2} O_{\alpha} \cdot ds = \int_{t_1}^{t_2} m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot v(t) \cdot dt, \quad (3.13)$$

$$E_{\alpha} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot \frac{(v_1 + v_2)}{2} \cdot (t_2 - t_1). \quad (3.14)$$

Číselné hodnoty hmotnosti m i tíhového zrychlení g byly použity stejné jako v kapitole 3.3.5.1.

3.3.6 Spotřeba energie na kolech

V předešlých kapitolách byly odvozeny vztahy, jimiž lze určit velikost energie potřebné na překonání jednotlivých jízdních odporů. Pro celkovou energii na kolech na výpočetním

úseku poté platí

$$E_{kolo_usek} = E_f + E_{vzd} + E_a + E_\alpha, \quad (3.15)$$

kde E_f je energie potřebná na překonání valivého odporu na výpočetním úseku,
 E_{vzd} je energie potřebná na překonání odporu vzduchu na výpočetním úseku,
 E_a je energie potřebná na překonání odporu setrvačnosti na výpočetním úseku,
 E_α je energie potřebná na překonání odporu stoupání na výpočetním úseku.

Celková energie na úseku může vyjít jako kladná či záporná, a to z toho důvodu, že odpor stoupání a odpor setrvačnosti může nabývat kladných i záporných hodnot.

V prvním případě (energie na kolech kladná) to znamená, že musí být energie na kola dodána z motoru. V druhém případě (energie na kolech záporná) naopak energie na kolech motor roztáčí a v případě elektrického pohonu může být část této energie uložena zpět do baterie rekuperací, jelikož elektromotor přejde do generátorového režimu.

Celková energie na kolech, jež musela být během jedné trasy na kola dodána z motoru, je součet všech energií na jednotlivých výpočetních úsecích, na kterých je celková energie na kolech dodávky větší než 0, tedy platí

$$E_{kolo_kladne} = \sum_{j=1}^n (E_{f_j} + E_{vzd_j} + E_{a_j} + E_{\alpha_j}) \quad (3.16)$$

pro $E_{f_j} + E_{vzd_j} + E_{a_j} + E_{\alpha_j} > 0$

kde j je index označující jednotlivé výpočetní úseky,
 n je celkový počet úseků.

Pro energetickou náročnost na kolech během jedné trasy vztaženou na 100 km jízdy pak platí

$$E_{kolo_kladne_100km_i} = \frac{E_{kolo_kladne} \cdot 100}{s_i}, \quad (3.17)$$

kde s_i je délka i -té trasy [km].

Výsledky takto provedeného výpočtu jsou pro obě varianty koeficientu valivého odporu f a pro obě varianty dodávky Mercedes-Benz eSprinter uvedeny v tabulce 6.

Spotřeba energie na kolech [kWh/100 km]				
Linka	$f = 0,01$		$f = 0,015$	
	Verze 35 kWh	Verze 47 kWh	Verze 35 kWh	Verze 47 kWh
Holešovice – měření 1	26,7	27,9	29,0	30,3
Holešovice – měření 2	25,1	26,2	27,3	28,6
Holešovice – měření 3	25,3	26,5	27,7	28,9
Centrum 1 – měření 1	23,6	24,7	26,0	27,1
Centrum 1 – měření 2	20,7	21,6	23,1	24,2
Centrum 1 – měření 3	24,0	25,1	26,4	27,6
Centrum 2 – měření 1	28,0	29,3	30,3	31,7
Centrum 2 – měření 2	24,5	25,6	26,9	28,1
Centrum 2 – měření 3	24,2	25,3	26,7	27,9

tabulka 6 – Zjištěné dráhové spotřeby energie na kolech na jednotlivých linkách

3.3.7 Spotřeba energie z baterie

Doposud byly zjištěny předpokládané energetické spotřeby na kolech dodávky Mercedes-Benz eSprinter, a to u všech devíti analyzovaných tras rozvozu pečiva. Nyní je úkolem této kapitoly přepočítat zmíněné energetické spotřeby na kolech na spotřebu elektrické energie z baterie.

V kapitole 3.3.6 bylo zmíněno, že energie na kolech vozidla může být na každém výpočetním úseku kladná či záporná. Je-li tato energie kladná, musela být práce dodána z motoru, je-li naopak záporná, přejde elektromotor do generátorového režimu a vyrábí elektrickou energii, jež je uložena zpět do baterie. Vozidlu je tím pádem ubírána kinetická energie a je tedy brzděno. Jelikož toto rekuperační brzdění může zvýšit dojezd vozidla až v řádu desítek procent, jak bude ukázáno v kapitole 4.5.3, měl by být tento druh brzdění v městském provozu řidičem používán v co nejvyšší možné míře. Klasická mechanická brzda by měla být využívána pouze v situacích jako je např. dobrzdění v malých rychlostech, nebo když je rekuperační brzdění pro požadované zpomalení nedostačující.

Pro energii, jejíž část může být během jízdy uložena zpět do baterie rekuperační, platí rovnice 3.18.

$$E_{kolo_zaporne} = \sum_{j=1}^n (E_{f_j} + E_{vzd_j} + E_{a_j} + E_{\alpha_j}) \quad (3.18)$$

$$pro E_{f_j} + E_{vzd_j} + E_{a_j} + E_{\alpha_j} < 0,$$

Spotřebu elektrické energie z baterie během jedné rozvážecí trasy lze poté vyjádřit rovnicí 3.19.

$$E_{bat} = \frac{E_{kolo_kladne}}{\eta_{bat_kolo}} - |E_{kolo_zaporne}| \cdot \eta_{rec}, \quad (3.19)$$

kde E_{kolo_kladne} je součet kladných energií na kolech, viz rovnice 3.16,

η_{bat_kolo} je účinnost přeměny energie z baterie na kola vozidla,

$E_{kolo_zaporne}$ je součet záporných energií na kolech, viz rovnice 3.18,

η_{rec} je účinnost rekuperace - účinnost přeměny záporných energií na kolech do baterie.

Neznámými parametry figurující v této rovnici je tedy účinnost přeměny energie z baterie na kola vozidla η_{bat_kolo} a účinnost rekuperace η_{rec} .

Účinnost přeměny energie z baterie na kola vozidla, tedy účinnost tank-to-wheel (TTW), je dána ztrátami při vybíjení baterie, v měniči napětí, elektromotoru a také v převodech. Pro elektromobil Mitsubishi iMiev je udávána hodnota této účinnosti jako 0,802 [24]. Publikace [25] udává obecně pro tuto účinnost interval 0,8-0,85. Na základě těchto údajů byla pro účely této práce zvolena hodnota TTW účinnosti elektrické dodávky Mercedes-Benz eSprinter jako 0,8. Zmiňovaná účinnost se ve skutečnosti mění a šlo by jí vypočítat, pokud by bylo známé pole účinnosti baterie v závislosti na odebíraném výkonu a stavu nabití baterie SOC (případně také na teplotě) a pole účinnosti elektromotoru v závislosti na momentu a otáčkách. Tato data bohužel výrobce neposkytuje, a tudíž bude v dalším textu pracováno s uvedenou konstantní hodnotou získanou na základě literární rešerše.

Účinnost rekuperace, tedy účinnost udávající, jaká část ze záporných energií na kolech vozidla bude uložena zpět do baterie, byla převzata z kapitoly 4.5.3 a stanovena tak na hodnotě 0,61. Jedná se o účinnost zjištěnou z dat z válcového dynamometru při jízdě v reálném městském rozvážecím cyklu s elektrickou dodávkou Mercedes-Benz eVito. Tato hodnota v sobě zahrnuje mimo ztrát v převodech, elektromotoru, měniči napětí a při dobíjení baterie během rekuperace také podíl brzdění mechanickými brzdami a elektromotorem. Jelikož se v případě dodávky eSprinter jedná o jízdu v podobném městském cyklu, byla pro další výpočty zvolena tato hodnota.

Výpočet rovnice 3.19 byl proveden pro všechny hodnoty odpovídající tabulce 6, kdy výsledky, přepočtené na 100 km jízdy, znázorňuje následující tabulka.

Spotřeba energie z baterie [kWh/100 km]				
Linka	$f = 0,01$		$f = 0,015$	
	Verze 35 kWh	Verze 47 kWh	Verze 35 kWh	Verze 47 kWh
Holešovice – měření 1	25,4	26,4	29,1	30,3
Holešovice – měření 2	24,0	25,0	27,7	28,8
Holešovice – měření 3	24,4	25,4	28,1	29,2
Centrum 1 – měření 1	22,7	23,6	26,4	27,5
Centrum 1 – měření 2	20,0	20,9	23,8	24,9
Centrum 1 – měření 3	23,1	24,0	26,9	28,0
Centrum 2 – měření 1	25,7	26,8	29,4	30,7
Centrum 2 – měření 2	22,8	23,8	26,7	27,8
Centrum 2 – měření 3	23,1	24,0	27,0	28,1
Průměr	23,5	24,4	27,2	28,4
Maximum	25,7	26,8	29,4	30,7

tabulka 7 – Zjištěné dráhové spotřeby elektrické energie z baterie

Z uvedených hodnot je patrné, že energeticky nejnáročnější byla rozvážka odpovídající prvnímu měření na trase Centrum 2. Tato skutečnost je způsobena velmi dynamickým stylem jízdy během tohoto měření.

Zjištěné dráhové spotřeby zobrazené v tabulce 7 odpovídají podmínkám, ve kterých je veškerá spotřebovaná energie z baterie použita na pohon vozidla (samozřejmě kromě ztrát při přenosu). To však ve skutečnosti nemusí být vždy splněno, zejména v zimě, kdy je nutné v dodávce topit jednak pro pohodlí řidiče a také pro odmlžení skel. Na rozdíl od vozidel se spalovacím motorem, kde je vytápěno odpadní tepelnou energií vznikající spalováním paliva v motoru, je u elektromobilů nutno topit energií z baterie, čímž samozřejmě dojde ke snížení maximálního dojezdu.

V následujícím výpočtu bude pracováno pouze s průměrnými a maximálními hodnotami vypočtené spotřeby elektrické energie (tabulka 7), u nichž bude zjišťován jejich růst vlivem zapnutého topení. Vytápění interiéru vozidla eSprinter je řešeno tepelným čerpadlem, ovšem jeho maximální elektrický příkon není udáván. V tomto výpočtu tak bude předpokládáno, že

elektrický příkon tepelného čerpadla v zimě činí 1,5 kW. Dodaný tepelný výkon do interiéru vozidla však bude vyšší než tato hodnota. Kolikrát, to udává tzv. topný faktor čerpadla (COP). Například pro elektromobil Renault Zoe je udávána hodnota COP až 3 [26]. Výkon topení samozřejmě závisí na subjektivním pocitu řidiče, nicméně během distribuce řidiči rozváží kvůli častým zastávkám v bundách, tudíž výkon topení nemusí být tak vysoký. Celková spotřebovaná energie na vytápění závisí na příkonu tepelného čerpadla a na době, během které se topí. Pro spotřebovanou energii na topení tedy platí

$$E_{\text{topení}} = P_{t.č.} \cdot t, \quad (3.20)$$

kde $P_{t.č.}$ je elektrický příkon tepelného čerpadla,
 t je doba jízdy (bez zastávek, které odpovídají vykládání zboží u zákazníků).

Jelikož vykládky zboží u odběratelů trvají větší jednotky až malé desítky minut, motor vozidel se při nich vypíná, a proto je v rovnici 3.20 uvažována doba jízdy bez zastávek, během kterých je pečivo vykládáno. Při výpočtu této rovnice je také uvažováno, že je příkon čerpadla po celou dobu samotné jízdy roven hodnotě 1,5 kW. Z naměřených hodnot jednotkou CarScout vyplývá, že průměrná doba jízdy ze všech devíti měření činí 1,66 hodiny. S těmito údaji tedy bude spočtena předpokládaná průměrná spotřeba elektrické energie potřebná k vytápění dodávky.

Aby bylo možné takto zjištěnou spotřebu energie na vytápění interiéru přičíst ke dráhovým spotřebám vztaženým na sto kilometrů jízdy, je třeba také respektovat délku trasy. Jelikož je v tomto případě počítána průměrná spotřeba elektrické energie na vytápění, bude také počítáno s průměrnou délkou trasy, zjištěnou ze všech devíti měřených tras. Ta je dle údajů uvedených v kapitole 3.2.1 rovna 39,6 km. Tedy platí

$$E_{\text{topení}} = P_{t.č.} \cdot t_{\text{prum}} \cdot \frac{100}{s_{\text{prum}}} = \left(1,5 \cdot 1,66 \cdot \frac{100}{39,6} \right) \text{ kWh}/100 \text{ km} \quad (3.21)$$

$$E_{\text{topení}} \cong 6,3 \text{ kWh}/100 \text{ km}$$

kde t_{prum} je průměrná doba jízdy ze všech devíti měření (bez zastávek, které odpovídají vykládce zboží) [h].

s_{prum} je průměrná délka trasy ze všech devíti měření [km].

Průměrně tedy zapnuté tepelné čerpadlo pracující s příkonem 1,5 kW může zvýšit spotřebu

elektrické energie vozidla eSprinter o zhruba 6,3 kWh/100 km.

V kritickém případě však může nastat situace, při níž bude dodávka v důsledku dopravních komplikací v provozu déle, než odpovídá dobám v běžných případech. Je tedy nutné také vypočítat nárůst spotřeby elektrické energie v této kritické situaci, při níž bude dodávka stát např. v koloně, ovšem řidič bude chtít v kokpitu topit. Tento výpočet bude proveden tak, že bude nárůst spotřeby v důsledku dopravních komplikací vypočítán pro každou trasu zvlášť, přičemž bude uvažováno topení tepelným čerpadlem s příkonem 1,5 kW a příslušná doba jízdy bude navýšena o 1 hodinu. Toto navýšení o 1 hodinu je provedeno ze zmíněného důvodu, kdy může být dodávka v provozu delší dobu kvůli dopravním zácpám. Následně bude z těchto hodnot vybráno maximum a s tím bude dále počítáno.

V případě uvažování dopravních komplikací tak bude nárůst spotřeby kvůli topení vypadat následovně

$$E_{topení_max} = \max \left\{ P_{t.č.} \cdot (t_i + 1 h) \cdot \frac{100}{s_i} \right\} = \left(1,5 \cdot (1,6 + 1) \cdot \frac{100}{33,9} \right) \frac{kWh}{100 km} \quad (3.22)$$

$$E_{topení_max} = 11,5 kWh/100 km$$

kde t_i je doba jízdy i-té odměřené trasy (bez zastávek, které odpovídají vykládce zboží) [h].

s_i je délka i-té odměřené trasy.

V kritickém případě, tedy v zimním provozu a při dopravních komplikacích, může spotřeba dodávky eSprinter v důsledku topení vzrůst až o 11,5 kWh/100 km.

V tabulce 8 jsou shrnuty vypočtené spotřeby dodávky eSprinter v různých typech provozu. V případě normálního provozu, tedy v prvním řádku, se jedná o průměrné hodnoty převzaté z tabulky 7. Spotřeby v řádku odpovídající dynamickému provozu jsou taktéž převzaté z tabulky 7, kdy se jedná o maximální hodnoty z této tabulky. Spotřeby příslušící řádku „Normální provoz v zimě“, jsou hodnoty spotřeb v normálním provozu zvýšené o spotřebu na topení (o 6,3 kWh/100 km), uvedenou v rovnici 3.21. Údaje v posledním řádku tabulky 8 pak odpovídají spotřebám v normálním provozu a jsou zvýšené o spotřebu na topení v případě dopravních komplikací (o 11,5 kWh/100 km) dle rovnice 3.22.

Spotřeba energie z baterie [kWh/100 km]				
Druh provozu	Suchá vozovka ($f = 0,01$)		Mokrá vozovka ($f = 0,15$)	
	Verze 35 kWh	Verze 47 kWh	Verze 35 kWh	Verze 47 kWh
Normální provoz (průměrná dynamika jízdy, bez topení a dopravních komplikací)	23,5	24,4	27,2	28,4
Dynamický provoz (dynamická jízda, bez topení a dopravních komplikací)	25,7	26,8	29,4	30,7
Normální provoz v zimě (s topením)	29,8	30,7	33,5	34,7
Normální provoz v zimě při dopravních komplikací	35,0	35,9	38,7	39,9

tabulka 8 – Výsledné zjištěné spotřeby dodávky eSprinter za různých podmínek

Z výsledků je patrné, že dynamický styl jízdy a zejména topení mají na spotřebu významný vliv. Z tohoto důvodu je důležité, aby řidiči elektrických dodávek byli před jízdou proškoleni a vyhnuli se příliš dynamickému stylu jízdy. Příkon tepelného čerpadla může samozřejmě řidič v případě potřeby snížit a zvýšit tak dojezd vozidla.

Hodnoty uvedené v tabulce 8 jsou hlavním výstupem této kapitoly. Posouzení použitelnosti dodávek eSprinter v pekárně Odkolek bude na základě těchto hodnot vyhodnoceno v kapitole 5.1, jelikož tato záležitost závisí nejen na spotřebách vozidel, ale také na harmonogramu rozvozů, který určuje možnosti dobíjení mezi jednotlivými rozvozy, pokud je vozidlo v provozu vícekrát za den.

Veškeré popsané výpočty vedoucí ke zjištění energetických spotřeb lze nalézt v Příloze 3.

4 Spotřeby elektromobilu eVito

Jak bylo popsáno, rozvozy pečiva během dne probíhají v několika závozech, přičemž většina zboží je zákazníkům doručena během prvního závozu, a naopak během třetích a ambulantních rozvozů je distribuované množství pečiva v porovnání s prvním závozem malé. To znamená, že na trasách třetích a ambulantních rozvozů tak může velká část nákladového prostoru dodávky eSprinter zůstat nevyužita. Firma Mercedes-Benz v současné době nabízí elektrickou dodávku Mercedes-Benz eVito, která je velikostně menší než eSprinter a která by mohla být v pekárně využívána k rozvozu právě v těchto případech. V této kapitole tak budou analyzovány spotřeby vozidla eVito při rozvozech na trasách třetích a ambulantních závozů.

V rámci řešení popsané problematiky byla nejprve společností Mercedes-Benz zapůjčena vznětová dodávka Mercedes-Benz Vito, s níž byl proveden rozvoz pečiva na reálné trase třetího závozu, během něhož byla snímána poloha a rychlostní profil dodávky. Následně byla výrobcem zapůjčena také elektrická dodávka eVito, s níž byl poté tento jízdní cyklus společně s dalšími cykly simulován na vozidlovém dynamometru, kdy ze zjištěných dat byly poté vyhodnoceny spotřeby energie a také účinnost rekuperace během jízdy, která již byla použita při výpočtu spotřeb vozidla eSprinter v kapitole 3.3.7. Pro správné nastavení dynamometru bylo před tímto testováním však nutné s dodávkou eVito provést a vyhodnotit dojezdovou zkoušku. Popsaný proces bude podrobněji vysvětlen v následujících kapitolách, nejprve však budou uvedeny technické parametry testované dodávky Mercedes-Benz eVito.

4.1 Technické parametry dodávky eVito

Mercedes-Benz eVito je elektrická dodávka, jež má být na český trh uvedena v roce 2020. Toto vozidlo disponuje pohonem předních kol, který zajišťuje identický elektromotor jako u vozidla eSprinter. Vůz eVito bude dostupný pouze v jedné verzi kapacity baterie a jeho podstatné technické parametry lze nalézt v tabulce 9. [7]

Maximální výkon elektromotoru (trvalý/krátkodobý)	70/85 kW
Kapacita baterie (nominální/využitelná)	41/35 kWh
Udávaný dojezd v cyklu WLTC	150 km
Udávaný dojezd v cyklu NEDC	150 – 190 km
Maximální rychlost	120 km/h

tabulka 9 – Technické parametry dodávky Mercedes-Benz eVito [7]

Dodávku lze dobít z wallboxu či dobíjecí stanice pouze střídavým proudem, a to na dvou fázích proudem 16 A, tj. přibližně výkonem 7,4 kW. Druhou možností je dobíjení jednofázové, a to stejným proudem, tudíž výkonem 3,7 kW. Dobíjení je realizováno standardem Mennekes typ 2. [7]

Z obr. 20 a již uvedeného obr. 4 se lze přesvědčit, že je dodávka eVito oproti dodávce eSprinter skutečně menší.



obr. 20 – Mercedes-Benz eVito [27]

Dodávka umožňuje pomocí tlačítka na středovém panelu výběr z několika jízdních režimů, kterými může řidič ovlivnit spotřebu vozidla a tím pádem také dojezd. Označení těchto jízdních režimů je spolu s jejich vlastnostmi uvedeno v tabulce 10.

Symbol	Označení	Vlastnosti
C	Comfort	Max. výkon 80 kW, max. točivý moment 295 Nm, přímá odezva, plný vytápěcí a klimatizační výkon, snížený dojezd.
E	Economy	Max. výkon 85 kW, max. točivý moment 295 Nm, vyvážená odezva, vyvážený výkon topení a klimatizace. V tomto režimu bylo vozidlo homologováno.
E+	Economy Plus	Max. výkon 70 kW, max. točivý moment 270 Nm, zpožděná odezva, snížený výkon vytápění a klimatizace, maximální dojezd

tabulka 10 – Nastavitelné jízdní režimy dodávky eVito [7]

Řidič si také pomocí pádel pod volantem může zvolit rekuperační režim, jímž ovlivňuje

úroveň rekuperace, tedy to, jak moc bude vozidlo během jízdy rekuperovat energii a tím pádem také brzdit. Tyto režimy jsou více popsány v tabulce 11.

Symbol	Rekuperace	Vlastnost
D-	Maximální	Zpomalení 1,5 m/s ² a tím i maximální dobíjení
D	Normální	Zpomalení 1 m/s ²
D+	Nízká	Zpomalení 0,5 m/s ²
D++	Žádná	Žádné zpomalení a žádné nabíjení
N	Žádná	Rozpojená mechanická vazba mezi motorem a koly

tabulka 11 – Nastavitelné rekuperační režimy dodávky eVito [7]

4.2 Definice jízdního cyklu pro vozidlový dynamometr

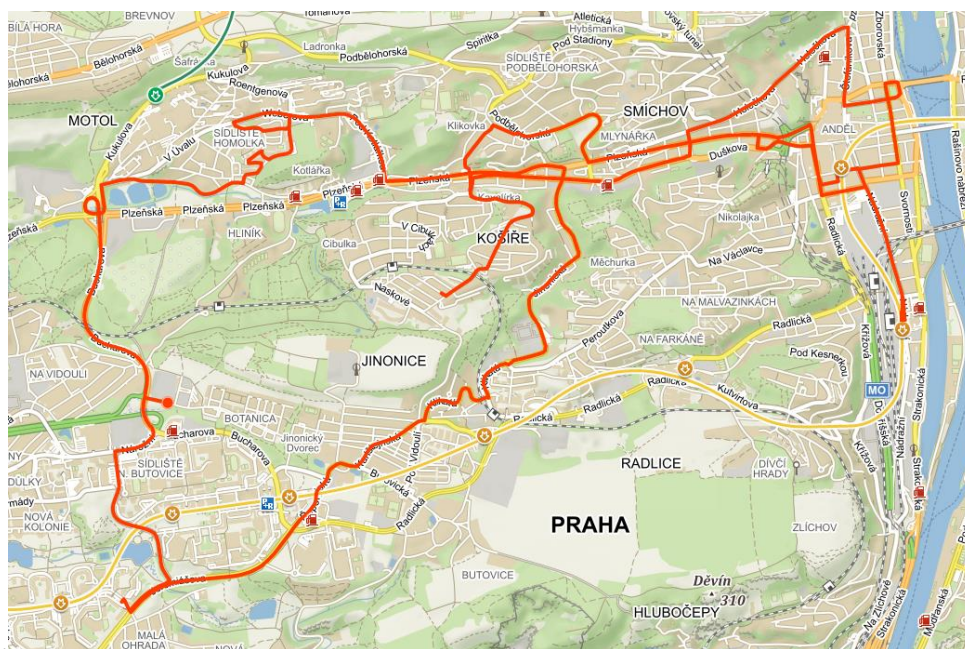
Pro simulaci na vozidlovém dynamometru byla zvolena a proměřena reálná trasa třetího závozu, na níž je v běžném případě v současné době rozváženo vznětovou dodávkou Sprinter. Pro účely této práce však bylo v den měření rozváženo vznětovou dodávkou Mercedes-Benz Vito 114 CDI, jež byla pro účely tohoto měření zapůjčena výrobcem. Tato vznětová verze je elektrickému eVitu velice podobná, jak se lze přesvědčit z obr. 20 a 21.



obr. 21 – Mercedes-Benz Vito 114 CDI

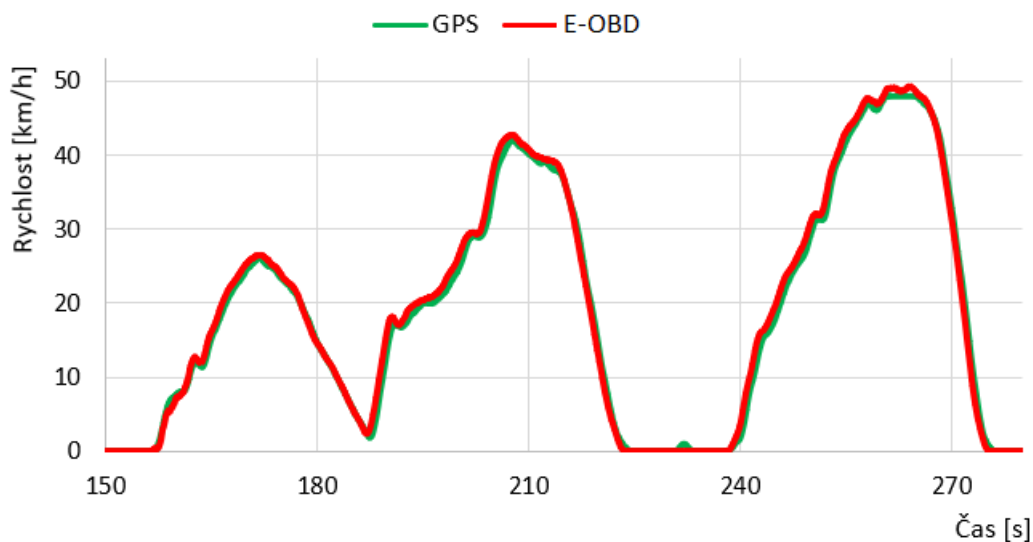
Při rozvozu pečiva touto dodávkou bylo provedeno měření polohy a rychlosti, a to na trase,

jež je zobrazena na obr. 22 a jejíž délka činí zhruba 30 km. Během tohoto závodu bylo rozváženo k celkem 11 zákazníkům.



obr. 22 – Trasa třetího závodu určená pro simulaci na vozidlovém dynamometru [5]

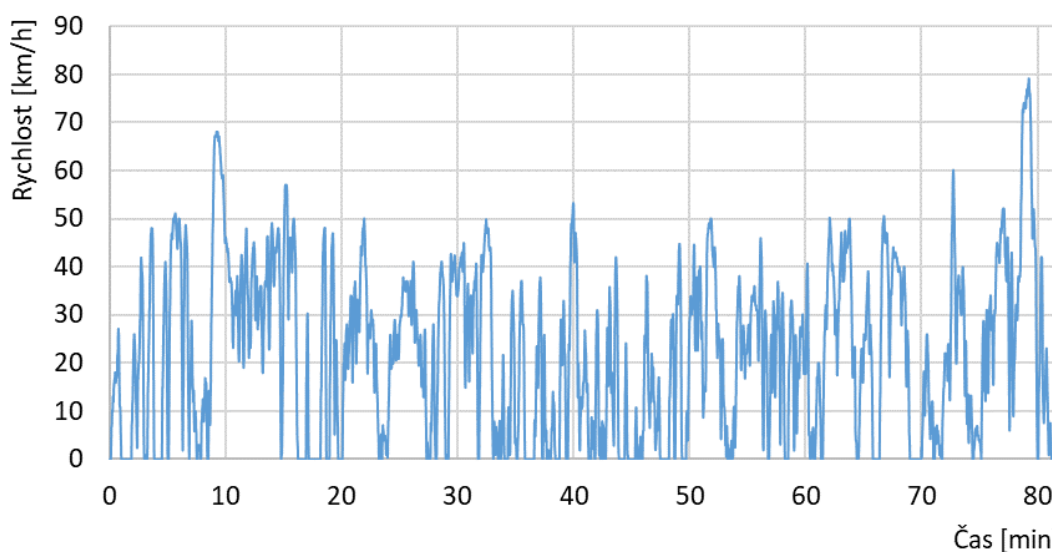
Výrobce vozidla bylo povoleno při rozvozu vyčítat rychlost vozidla ze systému E-OBD. K měření rychlostního profilu tedy byla použita již popsaná jednotka CarScout, kdy byla rychlost měřena jednak pomocí systému GPS (způsobem popsaným v kapitole 3.2.2) a také čtením dat ze systému E-OBD pomocí napojení jednotky na 16 pinovou zásuvku CARB. Část naměřených průběhů rychlosti je pro porovnání obou záznamů ukázána na obr. 23.



obr. 23 – Porovnání naměřených dat z jednotky CarScout

Z obrázku je patné, že se obě naměřené křivky téměř překrývají. Jelikož záznam získaný pomocí E-OBD znázorňuje skutečné hodnoty rychlosti odpovídající úhlové rychlosti otáčení

kol, dokazuje tento graf také korektnost měření jednotky CarScout pomocí systému GPS. Problémy při měření s GPS ovšem přetrvávají v místech se špatnou viditelností na oblohu, kdy může být naměřený profil rozkmitaný. Tento problém u dat získaných z diagnostického rozhraní odpadá, tudíž pro simulaci jízdního cyklu trasy třetího závozu na vozidlovém dynamometru byl zvolen rychlostní profil odpovídající datům naměřených pomocí E-OBD. V simulovaném cyklu byly odstraněny zastávky odpovídající vykládce zboží u zákazníků, jež ve skutečnosti trvají až desítky minut a je při nich vypnutý motor. Tyto zastávky byly během simulace nahrazeny nulovými rychlostmi po dobu 5 sekund a poté se pokračovalo v jízdě dále. Simulovaný cyklus je zobrazen na obr. 24.



obr. 24 – Jízdní cyklus třetího závozu pro simulaci na vozidlovém dynamometru.

Průměrná rychlost tohoto zhruba osmdesáti minutového jízdního cyklu činí přibližně 22 km/h.

Veškerá naměřená data z měření je možné nalézt v Příloze 4.

4.3 Dojezdová zkouška

Dojezdová zkouška s vozem eVito byla provedena s cílem zjistit parametry, které charakterizují jízdní odpory této dodávky, jejichž znalost je nezbytná pro správné nastavení vozidlového dynamometru.

Jedná se o zkoušku, při níž se vozidlo na zkušební dráze rozjede na určitou rychlost, přičemž poté dojde k rozpojení mechanické vazby mezi motorem a koly (zařazení neutrální polohy převodového ústrojí) a vozidlo tak pokračuje v jízdě pouze setrvačností a je zpomalováno účinkem jízdních odporů. Během této jízdy výběhem je měřena závislost rychlosti na čase,

z níž je posléze vyhodnocena závislost jízdnicích odporů na rychlosti jízdy.

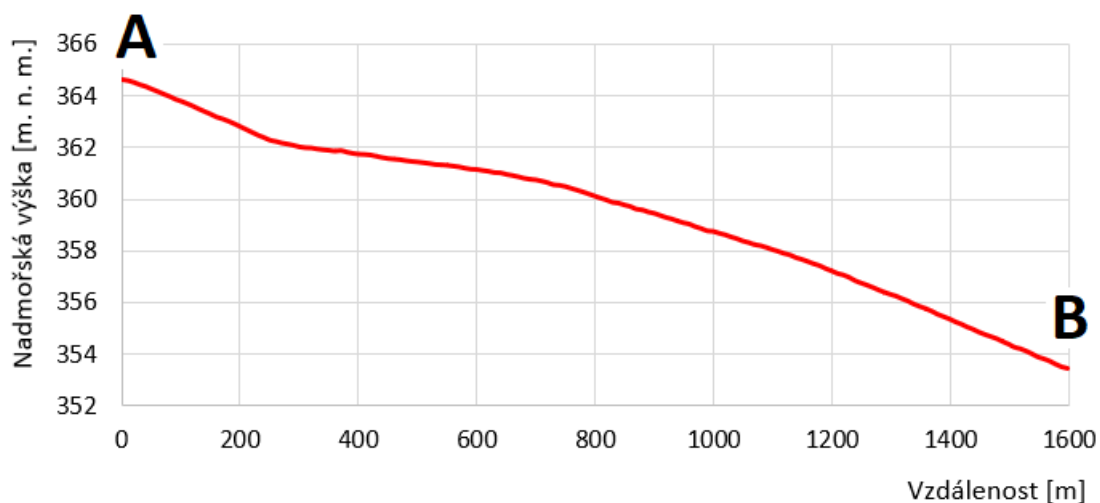
Podrobně je dojezdová zkouška silničních motorových vozidel definována v normě ČSN 30 0554. Normou jsou definovány různé technické požadavky na zkoušené vozidlo (např. huštění a vzorek pneumatik, geometrie kol), zkušební dráhu (např. povrch a jeho rovnost, sklon trati), jsou také definované okolní podmínky (např. teplota a tlak vzduchu, rychlost větru) a další záležitosti. Jelikož byla dodávka eVito k testování zapůjčena na krátký čas, nemohly být během zkoušky splněny všechny touto normou požadované podmínky, jako je např. teplota a tlak vzduchu. Ačkoliv je pro provedenou zkoušku, jež bude dále podrobně popsána, v práci používán název dojezdová zkouška, nejedná se o dojezdovou zkoušku přesně dle popsané normy. [11]

Dojezdová zkouška byla s dodávkou Mercedes-Benz eVito provedena dne 19. 6. 2019, a to na letišti Panenský Týnec na asfaltové dráze vyznačené na obr. 25.



obr. 25 – Trať pro dojezdovou zkoušku na letišti Panenský Týnec [15]

Průběh nadmořské výšky na této trati spolu s vyznačenými body A a B znázorňuje obr. 26.



obr. 26 – Profil nadmořské výšky na zkušební dráze [15]

Délka vyznačené dráhy, na níž zkouška proběhla, činí dle popsané aplikace „Analýzy výškopisu“ zhruba 1 600 m, přičemž průměrné stoupání ve směru „A-B“ je dle této služby -0,69 %. [15]

Podmínky měření

V den zkoušky panovalo na letišti Panenský Týnec bezvětří, bylo jasno, s teplotou vzduchu 24 °C. Tlak v pneumatikách byl před měřením nastaven na jmenovité hodnoty dle štítku, tedy na 330 kPa na předních kolech a na 340 kPa na zadních kolech.

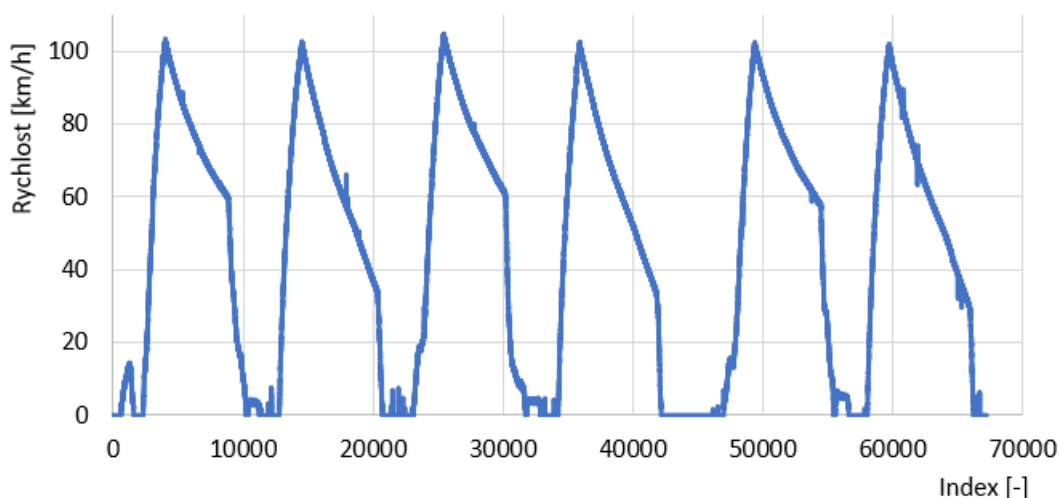
Průběh zkoušky

Dojezdová zkouška byla provedena v obou směrech, tj. ve směru „A-B“ a také ve směru „B-A“ dle obr. 25 a to v každém směru celkem třikrát.

Před samotným testem byl jízdní program dodávky nastaven na „C“ a režim rekuperace na „D++“ (viz tabulka 10 a 11). Po rozjezdu a dosažení rychlosti přesahující 100 km/h byl následně pomocí tlačítka na středovém panelu zařazen režim „N“ (neutrální stupeň) a dodávka tak dojela setrvačností až na konec zkušební dráhy.

Jelikož test komunikace mezi systémem E-OBD dodávky eVito a jednotkou CarScout nebyl úspěšný, byla touto jednotkou ke měření rychlosti vozidla využívána technologie GPS. Jelikož letištní dráha představuje úsek s velmi dobrou viditelností na oblohu, nevyskytují se zde popsané problémy, jež mohou nastat právě v místech se zhoršenou viditelností.

Před dojezdovou zkouškou prošla jednotka CarScout na Fakultě elektrotechnické ČVUT softwarovou modernizací, během níž byla frekvence vzorkování defaultně nastavena na 84 Hz, tudíž s touto frekvencí bylo také prováděno měření. Naměřená data rychlostí z dojezdové zkoušky jsou zobrazena na obr. 27 a lze je také nalézt v Příloze 4.



obr. 27 – Naměřená data rychlostí z dojezdové zkoušky v obou směrech

Z obrázku je patrný vliv sklonu zkušební dráhy, který při zkoušce v jednom směru vozidlo urychluje a ve druhém naopak zpomaluje. Tato skutečnost bude při vyhodnocení kompenzována.

V příloze práce lze také nalézt protokol z dojezdové zkoušky, který obsahuje přehledné shrnutí veškerých informací o provedené zkoušce.

4.3.1 Vyhodnocení dojezdové zkoušky

Jízdní odpory vozidla jsou závislé na rychlosti jízdy a lze je obecně vyjádřit rovnicí 4.1.

$$F = K_1 \cdot v^2 + K_2 \cdot v + K_3, \quad (4.1)$$

kde F je součet všech jízdních odporů působících na vozidlo,
 K_1, K_2, K_3 jsou koeficienty (reálná čísla),
 v je rychlost vozidla.

Cílem vyhodnocení dojezdové zkoušky je zjištění koeficientů K_1, K_2, K_3 figurující v této rovnici. Tyto tři parametry následně slouží jako vstupní údaj pro simulaci jízdních cyklů na vozidlovém dynamometru.

Jelikož velikost jízdních odporů odpovídá během zkoušky průběhu zrychlení, resp. zpomalení vozidla, lze silové účinky při dojezdové zkoušce popsat rovnicí 4.2, jež je platná pro jízdu po rovné vozovce, proto v ní také odpor ze stoupání nefiguruje.

$$F = (m_0 \cdot \delta + m_{\text{řidič}}) \cdot |a| = O_f + O_{vzd}, \quad (4.2)$$

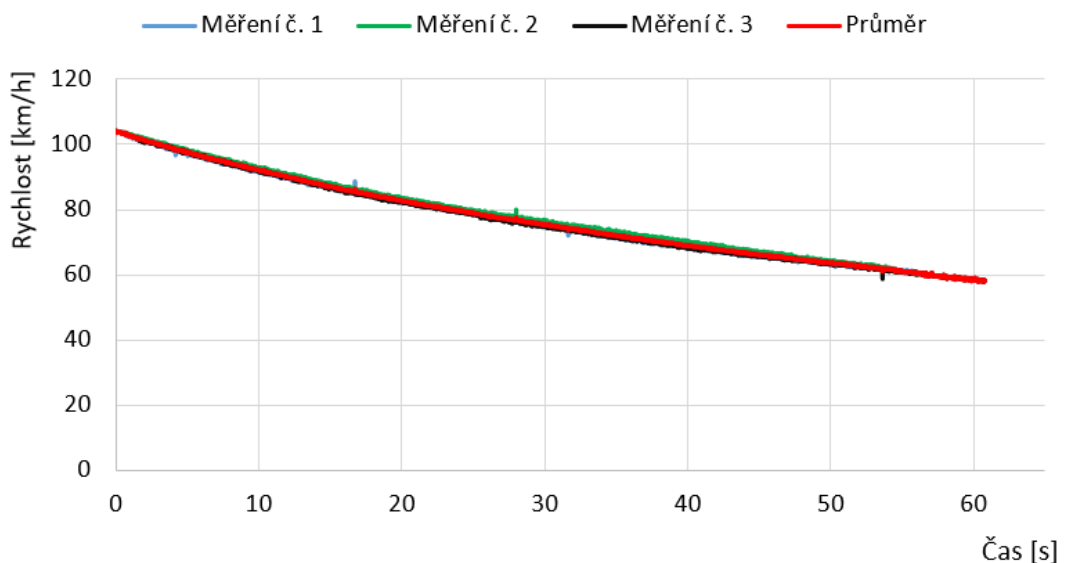
kde m_0 je pohotovostní hmotnost vozidla,
 $m_{\text{řidič}}$ je hmotnost řidiče,
 δ je součinitel rotujících hmot při neutrální poloze převodového ústrojí,
 $|a|$ je absolutní hodnota zrychlení, resp. zpomalení vozidla,
 O_f je odpor valení,
 O_{vzd} je odpor vzduchu.

Z rovnice 4.2 je patrné, že možným způsobem k určení zmíněných koeficientů K_1, K_2, K_3 , je zjistit průběh zpomalení při dojezdové zkoušce, který odpovídá jízdě po rovině, a poté tento průběh vynásobit hmotností dodávky a řidiče při zahrnutí součinitele rotujících hmot. Tento přístup však vyžaduje znalost hodnoty zmíněného součinitele rotujících hmot pro dodávku

eVito při rozpojené mechanické vazbě mezi elektromotorem a koly vozidla, pro jehož určení nebyla k dispozici potřebná data. Ke zjištění závislosti 4.1 tak byl použit jiný přístup, který bude popsán v následujících odstavcích.

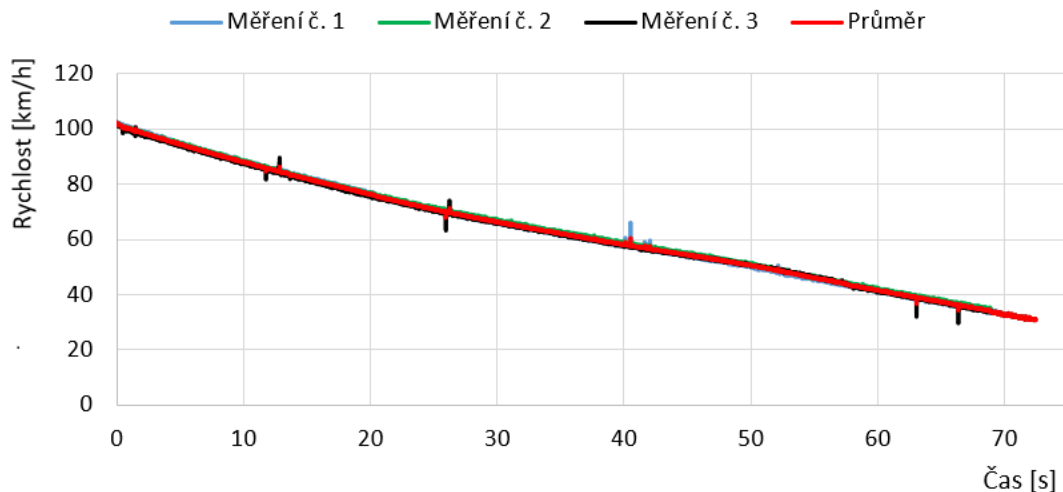
V prvním kroku je nutné ze šesti naměřených průběhů rychlosti při dojezdové zkoušce vytvořit jeden jediný průběh, který bude dále zpracován. Jelikož měření probíhalo v obou směrech zkušební dráhy, která vykazuje malý, leč nezanedbatelný sklon, je zřejmé, že naměřené hodnoty v jednom směru neodpovídají hodnotám naměřeným ve směru druhém, jak již bylo popsáno.

Výsledný průběh rychlosti při zpomalování byl sestaven tím způsobem, že byl nejprve ze třech měření provedených ve směru „A-B“ vytvořen průměrný profil zpomalení v tomto směru, a to následujícím způsobem. Každé naměřené hodnotě rychlosti při každém měření byl přiřazen „výpočtový čas“, který respektuje to, že vozidlo začalo při každém měření jízdu výběhem z trochu jiné počáteční rychlosti. Zprůměrováním hodnot dle tohoto výpočtového času byl tedy získán průměrný profil zpomalení ve směru „A-B“. Detailně je tento postup uveden v Příloze 4. Následně bylo totéž provedeno s naměřenými hodnotami ve směru „B-A“, kdy byl tedy získán průměrný profil zpomalení také v tomto směru. Zprůměrováním těchto dvou dílčích průměrů byl poté vytvořen výsledný profil rychlosti při dojezdové zkoušce. Tímto způsobem je kompenzován vliv různého stoupání v obou směrech dráhy a také případný vliv rychlosti větru vanoucí v jednom směru, ačkoliv, jak již bylo řečeno, v den měření panovalo bezvětří. Popsaný postup je lépe patrný z následujících dvou obrázků. Na prvním z nich (obr. 28) jsou zobrazeny naměřené hodnoty rychlostí při jízdě výběhem ve směru „A-B“ a také průměr z těchto naměřených hodnot.



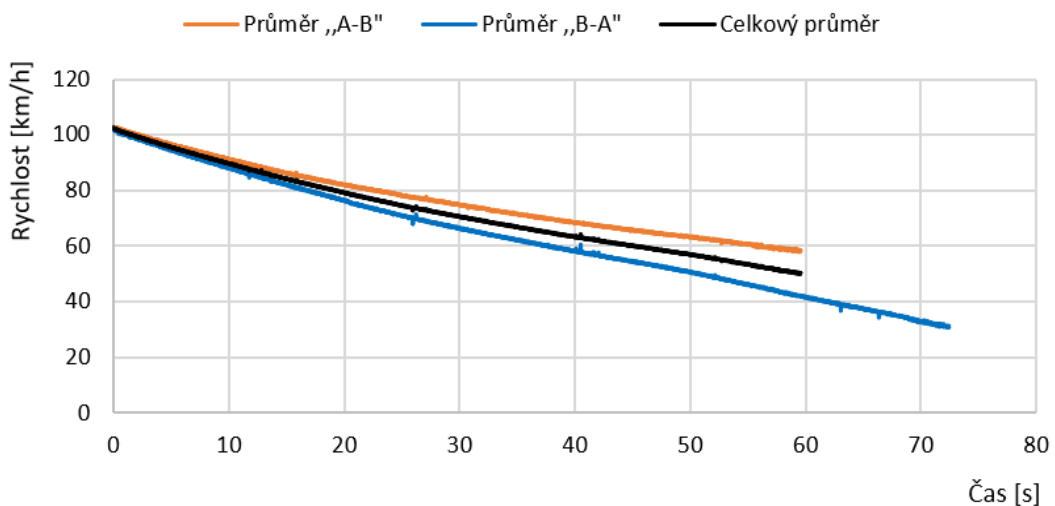
obr. 28 – Záznamy z dojezdové zkoušky ve směru „A-B“

Na druhém obrázku jsou znázorněny naměřené průběhy rychlostí při zpomalování ve směru „B-A“ a takéž průměr z těchto dat. V porovnání s obr. 28 je patrné, že ve směru „B-A“ rychlost dodávky za stejný čas poklesla na nižší hodnotu než ve směru „A-B“, což je způsobeno zmíněným klesáním ve směru „A-B“.



obr. 29 – Záznamy z dojezdové zkoušky ve směru „B-A“

Tyto průměrné hodnoty získané měřením v obou směrech dráhy byly následně vyneseny do společného grafu a z těchto dat byl vytvořen další průměr, jež je zobrazený na obr. 30 černou křivkou a který představuje výsledný profil rychlosti při dojezdové zkoušce.



obr. 30 – Tvorba výsledného rychlostního profilu při dojezdové zkoušce

Jelikož na vozidlo během jízdy působí odpor vzduchu, který závisí na druhé mocnině rychlosti, lze očekávat, že průběh rychlosti při dojezdové zkoušce bude mít parabolický charakter. Tomu také odpovídá tvar výsledné černé křivky na obr. 30, nicméně při bližším pohledu na tento graf si lze všimnout, že při rychlostech menších než zhruba 60 km/h se trend

černé křivky od původního parabolického tvaru mírně odchyluje. Tato skutečnost je nejspíše způsobena tím, že při těchto nižších rychlostech mají na průběh zpomalování vliv nerovnosti vozovky (hrboly atp.), které zapříčiní zmíněné odchylky od parabolického tvaru.

Dojezdová zkouška bude z tohoto důvodu dále vyhodnocena z rychlostí vyšších než 60 km/h, kdy zmiňované koeficienty K_1 , K_2 , K_3 , budou určeny z následující úvahy (stejný postup vyhodnocení dojezdové zkoušky je uveden v [28]).

Během jízdy výběhem lze aktuální kinetickou energii vozidla vyjádřit dle rovnice 4.3.

$$E(t) = \frac{1}{2} \cdot m \cdot [v(t)]^2, \quad (4.3)$$

kde m je hmotnost vozidla (včetně řidiče),

v je aktuální rychlost vozidla.

Jelikož během jízdy výběhem při dojezdové zkoušce dochází ke změně rychlosti, mění se také kinetická energie vozidla, jež disipuje do okolí. Snížení kinetické energie dodávky za nějaký čas lze vyjádřit ztrátovým (absorbovaným) výkonem, který je při dojezdové zkoušce způsoben pouze působením jízdních odporů, jelikož je odpojena mechanická vazba mezi motorem a koly. Tento ztrátový výkon je úměrný jízdním odporům dle vztahu 4.4.

$$P = F \cdot v, \quad (4.4)$$

kde P je ztrátový výkon,

F je součet všech jízdních odporů,

v je rychlost vozidla.

Úkolem je tedy určit velikost tohoto ztrátového výkonu. Z vytvořeného výsledného časového průběhu rychlosti během dojezdové zkoušky dle obr. 30 (černá křivka) byly odečteny následující doby zpomalování v příslušných intervalech rychlostí.

Interval rychlosti vozidla [km/h]	Doba zpomalování [s]
100 – 90	8,13
90 – 80	9,5
80 – 70	11,62
70 – 60	14,26

tabulka 12 – Doby zpomalování při dojezdové zkoušce v příslušných intervalech rychlostí

Jak již bylo odůvodněno, rychlosti nižší než 60 km/h nejsou dále vyhodnocovány. Zmíněný ztrátový výkon v rovnici 4.4 je tedy roven změně kinetické energie vozidla za čas. Jedná se o průměrný ztrátový výkon jízdních odporů na daném rychlostním intervalu. Platí tedy

$$P = \frac{E_1 - E_2}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2}{\Delta t}, \quad (4.5)$$

kde m je hmotnost vozidla včetně řidiče,

v_1, v_2 jsou počáteční a koncové rychlosti vozidla v daném rychlostním intervalu dle tabulky 12,

Δt je doba zpomalování na příslušném rychlostním intervalu uvedená v tabulce 12.

Hmotnost dodávky Mercedes-Benz eVito byla zjištěna vážením jako 2207 kg, kdy proces vážení zachycuje obr. 31. K takto zjištěné hmotnosti je ovšem ještě třeba pro výpočet rovnice 4.5 přičíst hmotnost řidiče, celkem tedy hmotnost m figurující v této rovnici činí 2307 kg.



obr. 31 – Vážení dodávky Mercedes-Benz eVito

Výpočet ztrátového výkonu v prvním intervalu rychlosti vozidla, tedy mezi 100 km/h a 90 km/h bude vypadat následovně.

$$P = \frac{\frac{1}{2} \cdot m \cdot v_1^2 - \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_2^2}{\Delta t} \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot 2307 \cdot \left(\frac{100}{3,6}\right)^2 - \frac{1}{2} \cdot 2307 \cdot \left(\frac{90}{3,6}\right)^2}{8,13} \text{ W}, \quad (4.6)$$

$$P = 20,88 \text{ kW} . \quad (4.7)$$

Průměrné absorbované výkony v dalších rychlostních intervalech vypočtené stejným způsobem lze nalézt v tabulce 13.

Interval rychlosti vozidla [km/h]	Ztrátový výkon [kW]
100 – 90	20,88
90 – 80	15,88
80 – 70	11,48
70 – 60	8,14

tabulka 13 – Absorbované výkony při dojezdové zkoušce

Jak již bylo zmíněno, tyto průměrné ztrátové výkony představují průměrné výkony jízdních odporů na daném rychlostním intervalu. Velikost jízdních odporů při průměrné rychlosti na tomto intervalu lze zjistit dle vztahu 4.8, v němž je proveden ukázkový výpočet pro první rychlostní interval 100 km/h až 90 km/h, kterému přísluší průměrná rychlost 95 km/h (ve skutečnosti je průměrná rychlost kvůli odporu vzduchu nepatrně vyšší, což však bude kvůli zmíněné minimální odchylce zanedbáno).

$$F = \frac{P}{v} = \frac{20880}{\frac{95}{3,6}} \text{ N} = 791,2 \text{ N} , \quad (4.8)$$

kde P je absorbovaný výkon na daném rychlostním intervalu [W],

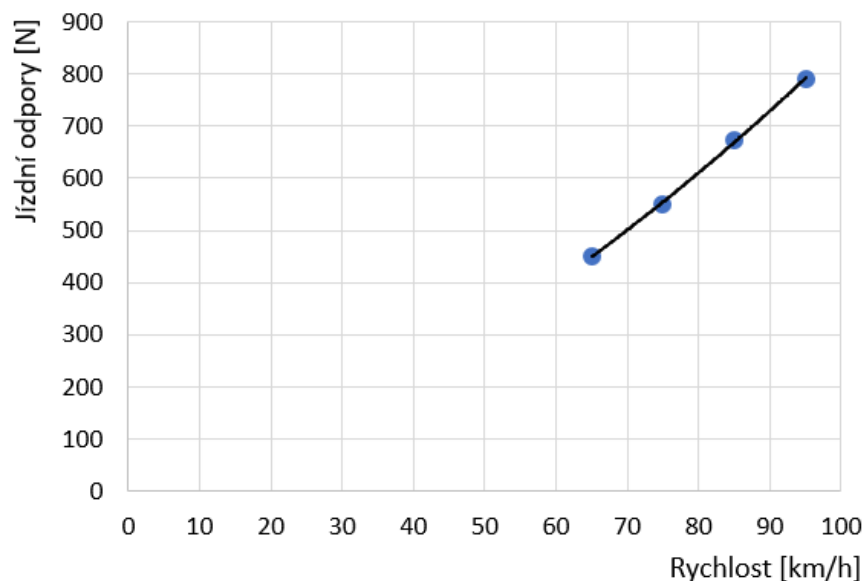
v je průměrná rychlost na daném rychlostním intervalu [m/s],

Při rychlosti 95 km/h mají tedy jízdní odpory velikost 791,2 N. Výsledné velikosti jízdních odporů zjištěné stejným postupem z dalších rychlostních intervalů vozidla jsou uvedeny v tabulce 14.

Interval rychlosti [km/h]	Průměrná rychlost [km/h]	Velikost jízdních odporů [N]
100 – 90	95	791,2
90 – 80	85	672,7
80 – 70	75	551,2
70 – 60	65	450,6

tabulka 14 – Velikost jízdních odporů při různých rychlostech jízdy

Body uvedené v této tabulce jsou zakresleny v grafu na obr. 32. Je jimi také proložen polynom druhého stupně pomocí metody nejmenších čtverců.



obr. 32 – Závislost jízdních odporů na rychlosti vozidla

Předpis takto vzniklého polynomu je

$$F = 0,0448 \cdot v^2 + 4,2698 \cdot v - 17,29 = K_1 \cdot v^2 + K_2 \cdot v + K_3 \quad . \quad (4.9)$$

Hledané koeficienty K_1 , K_2 , K_3 jsou tedy

$$K_1 = 0,0448 \frac{N}{(km/h)^2} ,$$

$$K_2 = 4,2698 \frac{N}{km/h} ,$$

$$K_3 = -17,29 N .$$

Tyto tři koeficienty společně s hmotností vozidla slouží jako vstupní data pro nastavení vozidlového dynamometru.

4.4 Simulace na vozidlovém dynamometru

Simulace jízdních cyklů byla provedena na vozidlovém dynamometru MAHA AIP-ECDM 48L-4mot v laboratořích Centra vozidel udržitelné mobility Josefa Božka ve Vědeckotechnickém parku Roztoky. Tento dynamometr se skládá ze čtyř válcových jednotek o průměru 48“, z nichž je každá řízena vlastním trojfázovým asynchronním motorem s frekvenční regulací otáček. Stator asynchronních motorů je uložen kyvně a podepřen siloměrem, jenž měří trakční sílu ve vztahu k obvodu válců. Na hřídeli každého

motoru jsou umístěny rotační snímače, pomocí kterých řídicí jednotka vyhodnocuje ujetou vzdálenost, rychlost, zrychlení. [29]

S dodávkou eVito byla na tomto dynamometru provedena simulace popsaného jízdního cyklu odpovídající trase třetího závodu, a také simulace jízdních cyklů WLTC a NEDC, kdy bylo zjišťováno, jak se dodávka chová při jízdě v jiných rychlostech.

4.4.1 Nastavení dynamometru

Před simulací jednotlivých jízdních cyklů je nutné vozidlový dynamometr správně nastavit. Cílem je, aby bylo vozidlo umístěné na dynamometru brzděno takovými silami, které odpovídají skutečným jízdním odporům při jízdě po klasické vozovce. Jinými slovy – je nutné, aby vozidlo na válcích při jízdě výběhem zpomalovalo stejně jako ve skutečnosti při dojezdové zkoušce.

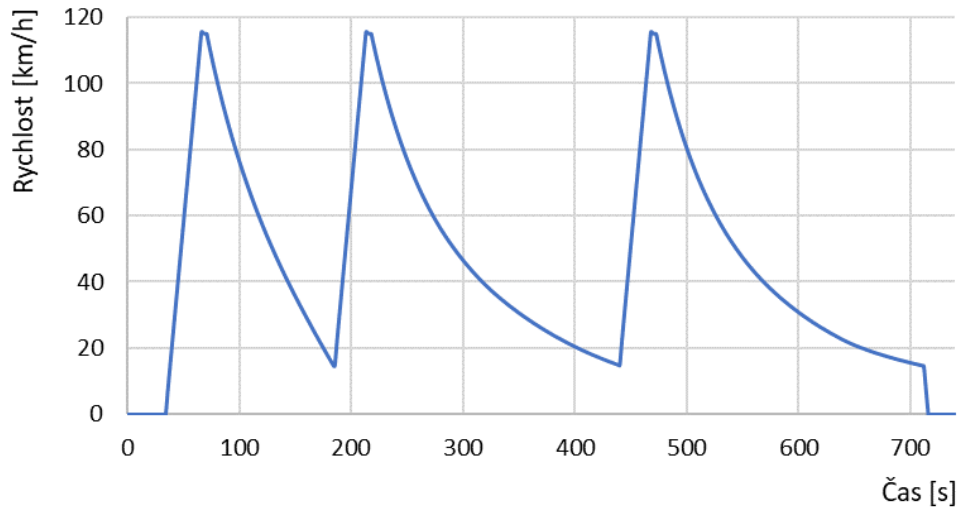
Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.3.1, vstupními parametry pro nastavení dynamometru jsou koeficienty K_1 , K_2 , K_3 parabolického polynomu definující jízdní odpory vozidla v závislosti na rychlosti, a také hmotnost vozidla, přičemž tato zadaná hmotnost vozidla do řídicího softwaru dynamometru je navýšena o 100 kg oproti skutečné hmotnosti vozidla (kvůli hmotnosti řidiče). Do řídicího softwaru tedy byla spolu se zjištěnými koeficienty zadána hmotnost dodávky jako 2307 kg.

V den provedení simulace byly pneumatiky nahuštěny na jmenovitý tlak dle štítku (330 kPa na předních kolech a 340 kPa na zadních).

Dodávka byla následně umístěna na všechny čtyři válce dynamometru, kdy k jeho nastavení byl proveden tzv. road load derivation test. Jedná se o několik dobehových zkoušek, během kterých je určeno, jaké zatížení (v závislosti na rychlosti vozidla) musí dynamometr vyvinout k tomu, aby byly simulovány skutečné jízdní odpory zjištěné z dojezdové zkoušky. Vozidlový dynamometr totiž vytváří pouze část skutečných jízdních odporů, jelikož jisté odpory působí na vozidlo umístěné na válcích při samotné jízdě (např. odpor valení kol po válcích).

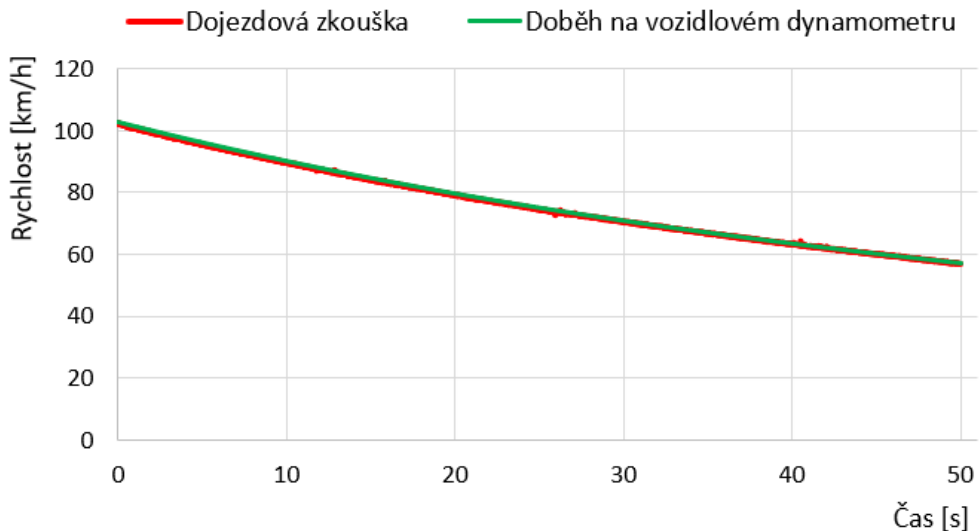
Během tohoto testu byl jízdní režim dodávky nastaven na „N“ a kola dodávky byla urychlena válci dynamometru na úhlovou rychlost odpovídající dopředné rychlosti 115 km/h, následně byl pohon dynamometrem přerušen a dodávka byla brzděna silou, jejíž předpis odpovídá rovnici 4.9. Během následné jízdy výběhem je dynamometrem měřena doba zpomalení na určité rychlosti a tato doba je porovnána s teoretickou (vypočtenou) hodnotou odpovídající zadané hmotnosti vozidla a křivce jízdních odporů zjištěné v rovnici 4.9. Pokud leží rozdíl mezi skutečnou a vypočtenou dobou zpomalení mimo předepsané toleranční

pásmo, provede dynamometr iterační nastavení koeficientů K_1 , K_2 , K_3 . Následně se celý proces (urychlení vozidla na požadovanou rychlost a následný doběh) opakuje. Toto iterační nastavení koeficientů proběhlo v případě testované dodávky eVito celkem dvakrát, přičemž jednotlivé doběhy na dynamometru jsou zobrazené na obr. 33.



obr. 33 – Doběhy při nastavování vozidlového dynamometru na dodávku eVito

Poslední doběh tedy představuje výsledné nastavení vozidlového dynamometru. Průběh rychlosti při posledním doběhu na obr. 33 tak musí odpovídat zjištěnému rychlostnímu profilu při dojezdové zkoušce. Porovnání těchto dvou průběhů je uvedeno na obr. 34.



obr. 34 – Porovnání výsledného doběhu na dynamometru s dojezdovou zkouškou

Z tohoto obrázku je patrné, že se křivka zpomalování při doběhu na vozidlovém dynamometru shoduje s křivkou zpomalování z dojezdové zkoušky, tudíž byl dynamometr správně nastaven.

4.4.2 Simulace jízdních cyklů

Během jízdního cyklu jsou na vozidlovém dynamometru simulovány všechny popsané jízdní odpory kromě stále se měnícího odporu stoupání. Toto „zanedbání“ odporu stoupání nemá však na celkové výsledky velký vliv. Jelikož rozvoz pečiva začíná a končí na stejném místě, je celkové převýšení na trase nulové. Při jízdě do kopce se tak sice vozidlu snižuje kinetická energie, ta se však uchová ve formě energie potenciální, která se při jízdě z kopce přeměňuje částečně zpět na energii kinetickou a pohání tak vozidlo. Tato přeměna však neprobíhá beze ztrát, proto bude vliv stoupání dále kompenzován v kapitole 4.5.4.

Před samotnou simulací byla provedena kontrola jmenovitého tlaku v pneumatikách (330 kPa na předních kolech, 340 kPa na zadních kolech). Rekuperační režim byl nastaven na „D“, tedy na maximální rekuperaci (viz kapitola 4.1), a jízdní režim dodávky byl nastaven na „E“, jelikož v tomto režimu bylo vozidlo homologováno. Při samotné jízdě byl k brzdění byl využíván především elektromotor, kdy povolením pedálu akcelérátoru přešel do generátorového režimu, čímž byla dodávka brzděna a rekuperovala část kinetické energie zpět do baterie. Klasická mechanická brzda byla využívána pouze k dobrzdění z malých rychlostí do úplného zastavení, místy také při výraznějším brzdění, kdy brzdový výkon elektromotoru nebyl dostačující.

Umístění a upevnění dodávky Mercedes-Benz eVito na vozidlovém dynamometru lze vidět na obr. 35 a obr. 36.



obr. 35 – Testování dodávky eVito vozidlovém dynamometru

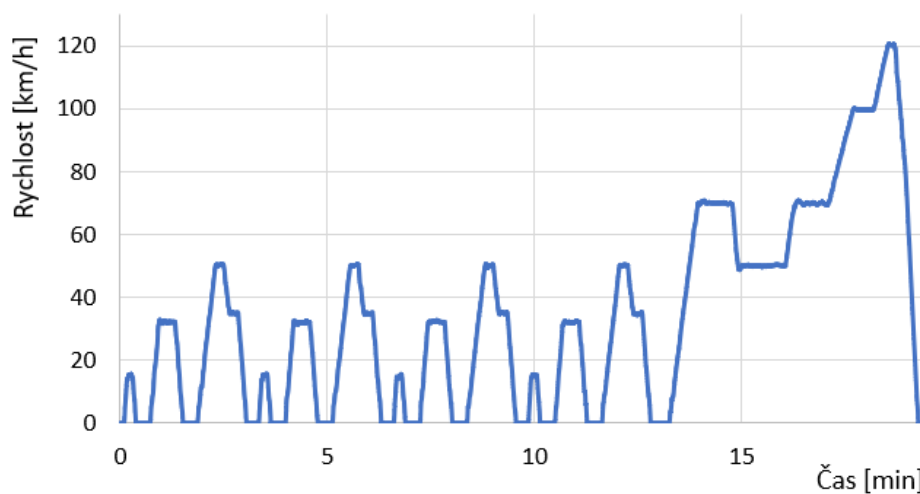


obr. 36 – Testování dodávky eVito na vozidlovém dynamometru

Na vozidlovém dynamometru byl celkem šestkrát simulován jízdní cyklus trasy třetího závozu (viz obr. 24), poté dvakrát cyklus NEDC a dvakrát cyklus WLTC.

Tyto další dva cykly byly simulovány zejména z toho důvodu, aby mohly být zjištěné dojezdy v těchto cyklech porovnány s údaji udávanými výrobcem (viz tabulka 9), čímž bude v případě shody potvrzena správnost provedení dojezdové zkoušky a nastavení vozidlového dynamometru.

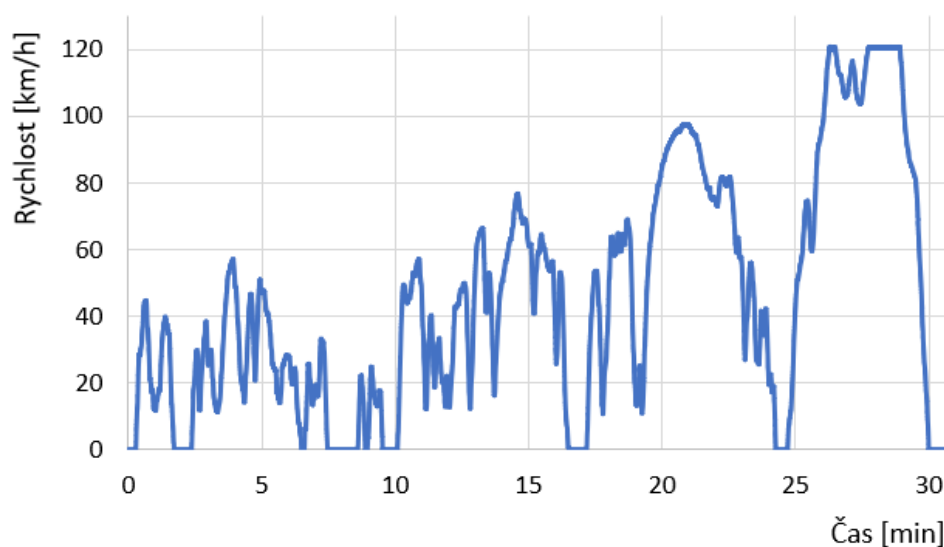
NEDC je jízdní cyklus, dle kterého byly do září roku 2018 (s postupných přechodem na WLTC od r. 2017) zjišťovány emise CO₂ a dráhové spotřeby nově certifikovaných a registrovaných osobních vozidel v Evropské unii [30]. Naměřený záznam rychlosti při jízdě v tomto zhruba 11 km dlouhého cyklu s průměrnou rychlostí 33 km/h je ukázán na obr. 37.



obr. 37 – Záznam simulovaného NEDC cyklu

Dodávka byla také testována ve zmíněném cyklu WLTC, který od roku 2017 postupně nahradil cyklus NEDC při homologačních zkouškách vozidel. Cyklus WLTC se dělí do několika tříd, a to na základě poměru výkonu a hmotnosti vozidla a také dle maximální dosažitelné rychlosti. Konkrétně byla dodávka eVito na dynamometru testována v cyklu WLTC 3b. Maximální rychlost předepsaná v tomto cyklu dosahuje hodnoty 130 km/h, dodávka eVito má však nejvyšší rychlost omezenou na 120 km/h, tudíž byl cyklus simulován s touto maximální rychlostí.

Naměřený záznam rychlosti při simulaci tohoto zhruba 23 km dlouhého cyklu s průměrnou rychlostí 46 km/h je ukázán na obr. 38.



obr. 38 – Záznam simulovaného cyklu WLTC 3b

4.4.3 Naměřená data

Během všech provedených měření (6x cyklus trasy třetího závozu, 2x NEDC, 2x WLTC) byl zaznamenáván úbytek kapacity baterie dodávky, a to pomocí palubního displeje, který zobrazuje aktuální stav nabití baterie (SOC) v procentech. Ačkoliv by vhodnějším způsobem ke zjištění této veličiny bylo použití proudových kleští a měření elektrického proudu vytékajícího z baterie, nebyl tento způsob měření realizován, jelikož toto zařízení nebylo v době provádění simulací na zkušebně k dispozici.

V tabulce 15 jsou uvedeny naměřené úbytky kapacity baterie během jednotlivých simulací jízdního cyklu trasy třetího závozu a také naměřené délky těchto cyklů. Tyto procentuální úbytky užitečné kapacity baterie (35 kWh) jsou v tabulce také přepočteny na úbytky v kWh. Rozdíly v délkách stejných cyklů během jednotlivých simulací jsou dány toleranční pásmem rychlosti, v němž je nutné rychlost dodávky během jízdního cyklu udržet.

Číslo simulace	Úbytek kapacity baterie [%]	Úbytek kapacity baterie [kWh]	Délka [km]
1	13	4,55	30,16
2	14	4,9	30,13
3	14	4,9	30,06
4	14	4,9	30,05
5	13	4,55	30,12
6	13	4,55	30,05
Průměr	13,5	4,73	30,1

tabulka 15 – Naměřená data během jízdních cyklů trasy třetího závozu

Úbytky kapacit byly tedy během všech simulací téměř stejné, z čehož vyplývá, že kapacita baterie dodávky eVito klesala lineárně s ujetou vzdáleností. Rozdíly úbytků kapacit mohou být způsobeny zaokrouhlováním palubního displeje na celá čísla a také zmíněným tolerančním pásmem od předepsané rychlosti, kdy mohl být rychlostní profil v rámci různých simulací nepatrně odlišný.

Naměřené úbytky kapacity baterie při simulacích jízdních cyklů NEDC a WLTC uvádí tabulky 16 a 17.

Číslo simulace	Úbytek kapacity baterie [%]	Úbytek kapacity baterie [kWh]	Délka [km]
1	6	2,1	10,85
2	6	2,1	10,85

tabulka 16 – Naměřená data během jízdních cyklů NEDC

Číslo simulace	Úbytek kapacity baterie [%]	Úbytek kapacity baterie [kWh]	Délka [km]
1	15	4,9	23,14
2	15	4,9	23,11

tabulka 17 – Naměřená data během jízdních cyklů WLTC 3b

Dále byla během simulace jednotlivých cyklů měřena obvodová rychlost všech čtyř kol dodávky, síly na všech čtyřech kolech a od nich odvozené výkony na kolech. Zmíněné veličiny byly měřeny snímači, jež byly popsány v kapitole 4.4, a to frekvencí 10 Hz, a byly zaznamenány pomocí systému automatického sběru dat. Tato data lze nalézt v Příloze 4.

4.5 Vyhodnocení naměřených dat

V této kapitole budou vyhodnocena naměřená data uvedená a popsána v předešlé kapitole. Cílem vyhodnocení je určit spotřebu elektřiny z baterie během všech jízdých cyklů, spotřebu energie na kolech v jízdém cyklu trasy třetího závozu a z toho plynoucí účinnost rekuperace.

4.5.1 Spotřeba energie z baterie

Spotřeba elektrické energie z baterie bude vyhodnocena na základě naměřených úbytků kapacity baterie během jednotlivých cyklů, jež byly uvedeny v kapitole 4.4.3.

Pro dráhovou spotřebu elektřiny, tj. pro spotřebu vztahenou na sto kilometrů jízdy, platí

$$S = \frac{u_{cyklus}}{L_{cyklus}} \cdot C_{evito} , \quad (4.10)$$

kde S je dráhová spotřeba elektřiny [kWh/100 km],

u_{cyklus} je úbytek kapacity baterie během jízdého cyklu dle tabulek 15, 16, 17 [%],

C_{evito} je využitelná kapacita baterie dodávky eVito [kWh], tedy 35 kWh,

L_{cyklus} je ujetá dráha během jednoho cyklu dle tabulek 15 až 17 [km].

Maximální dojezd na jedno nabití odpovídající takto zjištěné dráhové spotřebě lze zjistit z rovnice 4.11.

$$D = \frac{L_{cyklus}}{u_{cyklus}} \cdot 100 , \quad (4.11)$$

kde D je maximální dojezd na jedno nabití [km],

L_{cyklus} je ujetá dráha během jednoho cyklu dle tabulek 15 až 17 [km],

u_{cyklus} je procentuální úbytek kapacity baterie během jednoho cyklu [%],

Výsledné hodnoty spotřeb elektrické energie a dojezdů dle znázorněných výpočtů v jízdém cyklu trasy třetího závozu uvádí tabulka 18. Z té je zřejmé, že průměrná spotřeba dodávky eVito v tomto jízdém cyklu tedy dosahuje hodnoty 15,7 kWh/100 km, čemuž odpovídá maximální dojezd 223 km.

Číslo simulace	Dráhová spotřeba [kWh/100 km]	Dojezd [km]
1	15,1	232
2	16,3	215
3	16,3	215
4	16,3	215
5	15,1	232
6	15,1	231
Průměr	15,7	223

tabulka 18 – Spotřeby a dojezdy v jízdním cyklu trasy třetího závodu

Výsledné hodnoty spotřeb a maximálních dojezdů na jedno nabití v cyklech WLTC a NEDC uvádí tabulka 19.

Cyklus	Dráhová spotřeba [kWh/100 km]	Dojezd [km]
NEDC – simulace č. 1	19,4	181
NEDC – simulace č. 2	19,4	181
NEDC – průměr	19,4	181
WLTC – simulace č. 1	22,7	154
WLTC – simulace č. 2	22,7	154
WLTC – průměr	22,7	154

tabulka 19 – Spotřeby a dojezdy v cyklech WLTC a NEDC

Z těchto hodnot je patrné, že je spotřeba v cyklu NEDC menší v porovnání s WLTC, ovšem zároveň je jízdní cyklus trasy třetího závodu méně energeticky náročný než oba dva homologační cykly. Tento fakt je způsoben méně dynamickým stylem jízdy a také menší průměrnou rychlostí.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1, maximální dojezd na jedno nabití udávaný výrobcem činí v cyklu WLTC 150 km a pro NEDC je udáván interval 150 – 190 km. Zjištěný dojezd provedenými simulacemi na vozidlovém dynamometru v cyklu WLTC činí 154 km a v NEDC 181 km. Tyto hodnoty tak dobře odpovídají údajům udávaným výrobcem dodávky, kdy tato skutečnost verifikuje korektnost nastavení nejen vozidlového dynamometru, ale také provedení dojezdové zkoušky.

Výpočty spotřeb elektrické energie a dojezdů vychází z úbytků kapacity baterie během jednoho cyklu, jež byly odečtené z palubního displeje, který zobrazuje SOC zaokrouhleně

na celá čísla. Je tedy zřejmé, že skutečný úbytek kapacity baterie před zaokrouhlením může ležet někde mezi dvěma celočíselnými hodnotami, a to v intervalu

$$\langle u_{cyklus} - \sigma ; u_{cyklus} + \sigma \rangle,$$

kde u_{cyklus} je naměřený celočíselný úbytek kapacity baterie [%],
 σ je polovina nejmenšího dílku přístroje, tedy 0,5 %.

Pro nejistotu dráhové spotřeby elektřiny a dojezdu v cyklu trasy třetího závodu, jež je způsobena zaokrouhlováním SOC na celá čísla, lze psát

$$\sigma_{S_{treti_zavoz}} = \frac{\sigma}{\overline{L_{treti_zavoz}}} \cdot C_{evito} = \left(\frac{0,5}{30,1} \cdot 35 \right) kWh/100 km, \quad (4.12)$$

$$\sigma_{S_{treti_zavoz}} \cong 0,6 kWh/100 km.$$

kde C_{evito} je užitečná kapacita baterie dodávky eVito [kWh],
 $\overline{L_{treti_zavoz}}$ je průměrná ujetá dráha v cyklu trasy třetího závodu, viz tabulka 15 [km].

Analogicky lze nejistotu (způsobenou zaokrouhlováním SOC) dráhové spotřeby elektřiny v cyklech WLTC a NEDC zjistit dle následujících rovnic.

$$\sigma_{S_{NEDC}} = \frac{\sigma}{\overline{L_{NEDC}}} \cdot C_{evito} = \left(\frac{0,5}{10,85} \cdot 35 \right) kWh/100 km \cong 1,6 kWh/100 km, \quad (4.13)$$

$$\sigma_{S_{WLTC}} = \frac{\sigma}{\overline{L_{WLTC}}} \cdot C_{evito} = \left(\frac{0,5}{23,13} \cdot 35 \right) kWh/100 km \cong 0,8 kWh/100 km, \quad (4.14)$$

kde $\overline{L_{WLTC}}$ a $\overline{L_{NEDC}}$ jsou průměrné délky cyklů NEDC a WLTC z tabulek 16 a 17 [km],
 Průměrné hodnoty dráhových spotřeb v simulovaných jízdních cyklech lze při uvažování zmíněného zaokrouhlování palubního displeje tedy vyjádřit ve tvaru

$$S_{treti_zavoz} = (15,7 \pm 0,6) kWh/100 km, \quad (4.15)$$

$$S_{NEDC} = (19,4 \pm 1,6) \text{ kWh}/100 \text{ km} , \quad (4.16)$$

$$S_{WLTC} = (22,7 \pm 0,8) \text{ kWh}/100 \text{ km} . \quad (4.17)$$

Takto zjištěné nejistoty samozřejmě nejsou celkovými, tj. kombinovanými standardními nejistotami dráhových spotřeb. Pro jejich vyjádření by bylo nutné znát mimo jiné samotnou přesnost měření palubního přístroje, jež není výrobcem uváděna, a proto se text těmito nejistotami nezabývá.

Z provedených simulací tedy vyplývá, že je dodávka eVito schopná ujet jízdní cyklus trasy třetího závozu na jedno nabití teoreticky až sedmkrát. Tato hodnota však platí pro jízdní cyklus na vozidlovém dynamometru, který není schopen simulovat odpor stoupání. Navíc byly simulace na dynamometru provedeny v nenaložené dodávce, ovšem ve skutečnosti bude dodávka rozvážen náklad v podobě pečiva. Tyto dva faktory, které spotřebu elektřiny mírně navýší, je pro zpřesnění výsledků třeba kompenzovat, čemuž se věnuje kapitola 4.5.4. Nejprve však bude vyhodnocena spotřeba energie na kolech a z ní následně zjištěna účinnost rekuperace při brzdění, jejíž znalost je nezbytná pro kompenzaci odporu stoupání a nákladu.

4.5.2 Spotřeba energie na kolech

Cílem této kapitoly je určit energii na kolech vozidla při simulaci jízdního cyklu trasy třetího závozu. Toho je možné docílit vyhodnocením naměřených dat dynamometrem, tedy pomocí naměřeného výkonu na kolech a času.

Je však nutné si uvědomit, že tyto naměřené hodnoty výkonů odpovídají silám, kterými musel dynamometr vozidlo brzdit, resp. pohánět. To znamená, že zde není zohledněn fakt, že je vozidlo během simulace jízdního cyklu brzděno nejen dynamometrem, ale také valivým odporem mezi pneumatikou a válci dynamometru. Skutečný výkon na kolech je tak dán součtem naměřeného výkonu a výkonu valivého odporu, jehož hodnoty během simulací je třeba identifikovat. Naměřený výkon dynamometrem je také navíc snížen ventilačními ztrátami rotujících komponent a třením v ložiskách. Tyto dvě ztráty jsou však malé a jejich přesné určení je složité, tudíž budou v dalších výpočtech zanedbány.

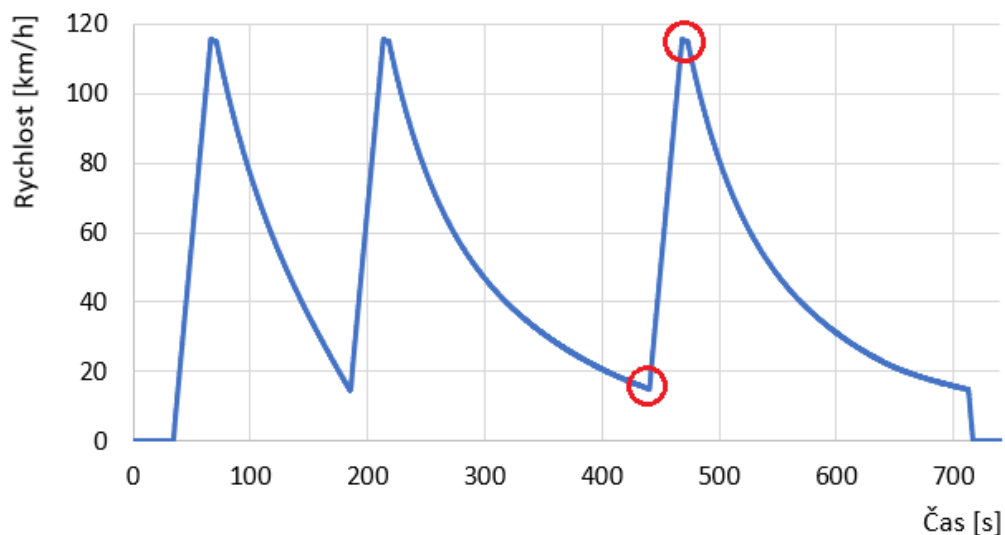
Při znalosti výkonu valivého odporu mezi pneumatikou dodávky a válci dynamometru je možné množství energie na kolech na časovém úseku spočítat dle rovnice 4.18. Jelikož byla data řídicím softwarem dynamometru zaznamenána s frekvencí 10 Hz, je tento časový úsek roven jedné desetíně sekundy.

$$E_{kolo_usek} = (P_{namereno} + P_f) \cdot t, \quad (4.18)$$

kde E_{kolo_usek} je energie na kola dodaná, resp. spotřebovaná během času t ,
 $P_{namereno}$ je naměřený výkon při jízdě v cyklu na všech kolech dodávky během daného časového okamžiku. Hodnoty tohoto výkonu lze nalézt v Příloze 4,
 P_f je výkon valivého odporu mezi pneumatikou a válci dynamometru,
 t je čas, v tomto případě se jedná o jednu desetiny sekundy.

Zmiňovaný výkon valivého odporu P_f je možné určit následujícím způsobem. Výkon valivého odporu je roven naměřenému výkonu v situaci, při níž je vozidlem na dynamometru protáčeno, a navíc dodávka není urychlována ani zpomalována – tedy v situaci, kdy je dodávka udržována dynamometrem na konstantní rychlosti, přičemž je v dodávce zařazena neutrální poloha převodového ústrojí.

Zmíněný protáčivý režim již byl popsán v kapitole 4.4.1, kdy bylo vozidlem se zařazenou neutrální polohou převodového ústrojí protáčeno při nastavování dynamometru. V průběhu rychlosti na čase, kdy byl již dynamometr nastaven, je tak třeba nalézt body, v nichž je zrychlení nulové. Tyto body jsou v naměřeném průběhu rychlosti celkem dva a jsou vyznačené na obr. 39. První bod se tedy nachází po konci druhého doběhu a před urychlením na doběh třetí, druhý bod s nulovým zrychlením lze nalézt ve výsledném doběhu po rozjezdu na požadovanou rychlost a před následným zpomalováním.



obr. 39 – Vyznačené body s nulovým zrychlením při posledním doběhu

Rychlosti v těchto dvou bodech jsou spolu s příslušnými naměřenými výkony sepsané v tabulce 20.

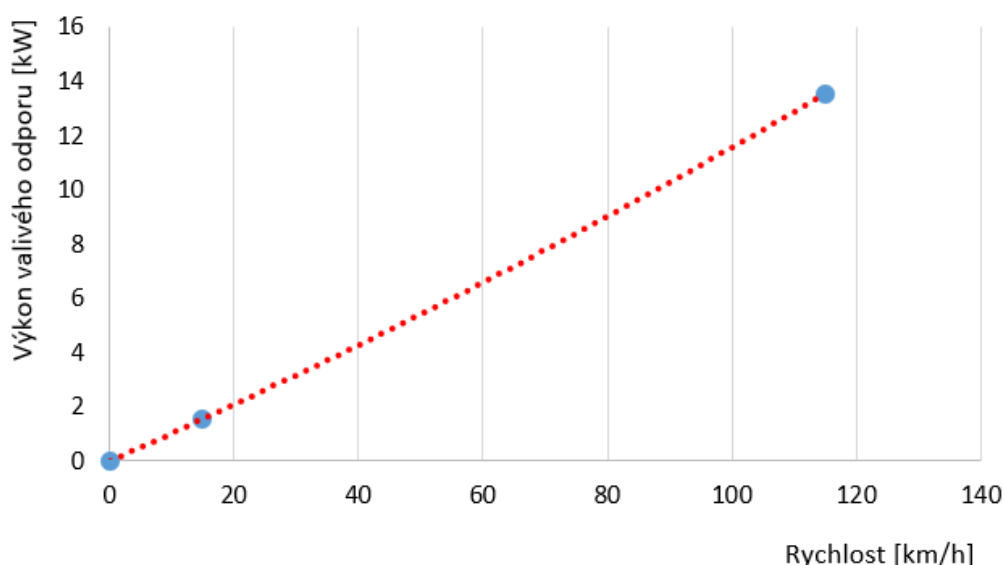
Rychlost [km/h]	Naměřený výkon [kW]
14,8225	-1,53
115,0175	-13,55

tabulka 20 – Hodnoty rychlostí a výkonů v bodech s nulovým zrychlením

Těmito body prochází křivka popisující průběh výkonu valivého odporu v závislosti na rychlosti jízdy. Jelikož je výkon na kolech vozidla úměrný rychlosti, musí při nulové rychlosti být výkon valivého odporu také nulový. Z této úvahy byl získán další bod popisované závislosti, tedy bod $[v, P_f] = [0, 0]$. Tyto tři popsání body jsou v absolutních hodnotách graficky znázorněné na obr. 40, navíc je jimi proložen polynom druhého stupně, jehož předpis je

$$P_f = 0,000146 \cdot v^2 + 0,101064 \cdot v, \quad (4.19)$$

kde P_f je výkon valivého odporu mezi pneumatikou dodávky a válci dynamometru [kW], v je obvodová rychlost kol dodávky [km/h].



obr. 40 – Závislost výkonu valivého odporu na rychlosti

Dle teorie je odpor valení až do určitých vyšších rychlostí zhruba konstantní funkce a poté narůstá [31]. Jelikož je výkon valivého odporu úměrný práci valivého odporu, která je primitivní funkcí k samotnému odporu valení, měla by dle teorie být závislostí výkonu valivého odporu na rychlosti zhruba lineární funkce. To je u této závislosti splněno, jelikož kvadratický člen v rovnici 4.19 je velmi malý.

Výkon popsáný rovnicí 4.19 je tedy nutné přičíst k naměřeným výkonům dynamometrem

během jízdnicích cyklů, kdy touto operací získáme skutečný výkon na kolech, s nímž bude dále pracováno.

Kladné energie na kolech během jednoho jízdnicího cyklu byly zjištěny dle rovnice 4.20. Jak již bylo zmíněno, takto získané hodnoty představují energie, jež musely být dodány z motoru.

$$E_{kolo_kladne} = \sum_{q=1}^w \left((P_{namereno_q} + P_{f_q}) \cdot t \right) \quad (4.20)$$

$$pro \left(P_{namereno_q} + P_{f_q} \right) > 0 ,$$

kde q označuje jednotlivé úseky, jež jsou dlouhé jednu desetinu sekundy, w je celkový počet úseků.

Analogickým způsobem byly určeny záporné energie na kolech během jízdnicího cyklu, jak uvádí následující rovnice.

$$E_{kolo_zaporne} = \sum_{q=1}^w \left((P_{namereno_q} + P_{f_q}) \cdot t \right) \quad (4.21)$$

$$pro \left(P_{namereno_q} + P_{f_q} \right) < 0 ,$$

Výsledky takto provedeného výpočtu pro všechny simulace cyklu trasy třetího závozu znázorňuje tabulka 21. V ní jsou uvedené také rozšířené nejistoty měření kladných a záporných energií na kolech s koeficientem rozšíření 2, jejichž postup určení je detailně uveden v Příloze 2.

Číslo simulace	Kladné energie na kolech [kWh]	Nejistota kladné energie [kWh]	Záporné energie na kolech [kWh]	Nejistota záporné energie [kWh]
1	5,30	0,39	-3,2	0,2
2	5,36	0,39	-3,23	0,19
3	5,36	0,39	-3,24	0,19
4	5,39	0,39	-3,27	0,19
5	5,34	0,38	-3,2	0,2
6	5,34	0,39	-3,22	0,19

tabulka 21 – Výsledné energie na kolech a nejistoty v cyklech trasy třetího závozu

Hodnoty energií na kolech jsou tedy během všech simulací téměř stejné, malý rozdíl je dán udržováním rychlosti dodávky ve zmíněném tolerančním pásmu od předepsané rychlosti.

4.5.3 Účinnost rekuperace

Účinnost rekuperace, jež bude v této kapitole vyhodnocena pro jízdní cyklus trasy třetího závozu, je chápána jako účinnost přeměny záporných energií na kolech do baterie. Tato hodnota je dána mechanickými ztrátami v převodech, v elektromotoru pracujícím v generátorovém režimu, v měniči napětí, při nabíjení baterie a také poměrem brzdění elektromotorem a mechanickými brzdami, kdy při použití mechanických brzd dochází k disipaci kinetické energie na teplo, které nemůže být dále zužitkováno. Jak již bylo zmíněno, při simulaci jízdního cyklu trasy třetího závozu byla dodávka brzděna převážně elektromotorem a mechanické brzdy byly použity jako výpomoc při výraznějším brzdění a při dobrzdění na nulovou rychlost.

Popsaná účinnost rekuperace bude vyhodnocena z rovnice 4.22, jež udává energetickou bilanci za jeden jízdní cyklus.

$$E_{kolo_kladne} = E_{bat} \cdot \eta_{bat_kolo} = (E_{bat_displ} + |E_{kolo_zaporne}| \cdot \eta_{rec}) \cdot \eta_{bat_kolo}, \quad (4.22)$$

kde E_{kolo_kladne} je součet kladných energií na kolech během jízdního cyklu dle tab. 21,
 E_{bat} je součet kladných energií na baterii během jízdního cyklu,
 η_{bat_kolo} je účinnost přeměny energie z baterie na kola vozidla,
 E_{bat_displ} je skutečný úbytek energie na baterii během jízdního cyklu přepočtený z údajů palubního displeje, viz tabulka 15,
 $E_{kolo_zaporne}$ je součet záporných energií na kolech během jízdního cyklu (tab. 21),
 η_{rec} je účinnost rekuperace.

Účinnost přeměny energie z baterie na kola vozidla je způsobena ztrátami při vybíjení baterie, v měniči napětí, elektromotoru a v převodech. Hodnota této účinnosti byla stanovena na základě literární rešerše, a to stejným způsobem jako v kapitole 3.3.7, tedy hodnotě 0,8. Pro připomenutí – volba této hodnoty vychází z udávané účinnosti TTW elektromobilu Mitsubishi iMiev, pro který je uváděna tato účinnost jako 0,802 [24]. Pro validaci této hodnoty byla užita publikace [25], v níž je udáván interval této účinnosti jako 0,8 až 0,85. Hledanou účinnost rekuperace lze úpravou vztahu 4.22 určit dle rovnice 4.23. Na ukázkou bude výpočet proveden pro naměřené hodnoty z první simulace trasy třetího závozu, tedy platí

$$\eta_{rec} = \frac{E_{kolo_kladne} - E_{bat_displ} \cdot \eta_{bat_kolo}}{|E_{kolo_zaporne}| \cdot \eta_{bat_kolo}} = \frac{5,3 - 4,55 \cdot 0,8}{|-3,2| \cdot 0,8} \cong 0,65 , \quad (4.23)$$

Účinnost rekuperace z první simulace jízdního cyklu trasy třetího závozu tedy vychází jako 65 %. Výsledky stejně provedeného výpočtu získané z ostatních simulací jsou uvedeny v tabulce 22.

Číslo simulace	Účinnost rekuperace [%]
1	65
2	56
3	56
4	56
5	66
6	66
Průměr	60,8

tabulka 22 – Zjištěné účinnosti rekuperace v jízdním cyklu trasy třetího závozu

Jak je z uvedených hodnot patrné, zjištěná účinnost rekuperace vychází v rozmezí 56 % až 66 %. Tento rozptyl je způsoben zejména naměřenými hodnotami E_{bat_displ} (skutečné úbytky kapacity baterie odečtené z palubního displeje), kdy palubní displej udává stav SOC pouze v celočíselných procentech. Na základě výše uvedených hodnot byla tedy průměrná účinnost rekuperace po zaokrouhlení stanovena na hodnotě 61 %. Tato hodnota je tedy platná pro jízdu v městském provozu, a to při využívání rekuperačního brzdění v co nejvyšší možné míře a byla již užita v kapitole 3.3.7 při výpočtu energetických spotřeb dodávky Mercedes-Benz eSprinter.

Při znalosti účinnosti rekuperace je nyní možné ukázat, kolik energie bylo průměrně během jízdního cyklu trasy třetího závozu zrekuperováno, tj. uloženo zpět do baterie. Platí tedy

$$E_{zrekup} = |\overline{E_{kolo_zaporne}}| \cdot \overline{\eta_{rec}} = (|-3,23| \cdot 0,61) kWh \cong 1,97 kWh , \quad (4.24)$$

kde $\overline{E_{kolo_zaporne}}$ je průměrná záporná energie na kolech za 6 simulací trasy třetího závozu dle tabulky 21,

$\overline{\eta_{rec}}$ je průměrná účinnost rekuperace dle tabulky 22.

Z této hodnoty je zřejmé, že klíčovým faktorem při provozování nejen elektrických dodávek, ale i elektromobilů obecně, je při jízdě ve městě využívání brzdění elektromotorem v maximální možné míře. Vhodné tedy je, aby řidič během rozvozu nastavil režim rekuperace na D- (maximální rekuperace) a rychlost elektromobilu reguloval především pedálem akcelérátoru, kdy jeho vyšlápnutím začne elektromotor dodávku vozidlo a ukládat část kinetické energie zpět do baterie. Mechanické brzdy je tedy vhodné použít pouze při dobrzdění na nulovou rychlost, resp. v situacích kdy je požadováno větší zpomalení.

Pakliže by bylo rekuperační brzdění vypnuto, tj. režim rekuperace by byl nastaven na D++ (viz kapitola 4.1), a k brzdění by byly využívány tím pádem pouze mechanické brzdy, veškerá energie uvedená v rovnici 4.24 by disipovala na teplo a nemohla by být dále využita. Jak ukazuje rovnice 4.25, v popsaném případě, tj. při nevyužívání rekuperačního brzdění, se může zvýšit spotřeba dodávky eVito v tomto cyklu až o 6,5 kWh/100 km.

$$\Delta S = \frac{100 \cdot E_{zrekup}}{\overline{L_{cyklus}}} = \frac{100 \cdot 1,97}{30,1} kWh/100 km \cong 6,5 kWh/100 km , \quad (4.25)$$

kde $\overline{L_{cyklus}}$ je průměrná délka trasy třetího závodu ze všech šesti simulací dle tabulky 15.

4.5.4 Kompenzace stoupání a nákladu

Jak již bylo komentováno, zjištěné hodnoty spotřeb elektřiny z baterie byly zjištěny simulacemi na dynamometru, který nedovede simulovat stále se měnící odpor stoupání během jízdy. Simulace byly navíc provedeny s prázdnou dodávkou, tj. bez nákladu. V této kapitole bude tedy řešen nárůst zjištěných spotřeb elektřiny (viz tabulka 18) při uvažování zmíněného odporu stoupání a hmotnosti nákladu. Analýza bude provedena následujícím způsobem.

Ze zaznamenaného profilu rychlosti jednotkou CarScout z uskutečněné rozvážky třetího závodu (viz kapitola 4.2) bude pomocí integrace jízdních odporů vyhodnocena spotřeba energie z baterie, a to zcela obdobně jako byla zjištěna předpokládaná spotřeba dodávky eSprinter v rámci celé kapitoly 3. Tento výpočet bude proveden jednak bez zahrnutí hmotností nákladu a stoupání na trase, a také se zahrnutím těchto dvou faktorů. Porovnáním dvou takto získaných spotřeb lze zjistit, jaký přibližný vliv má na spotřebu zmíněný odpor stoupání a hmotnost nákladu.

Je důležité zdůraznit, že cílem této metody tedy není zjistit přesnou spotřebu energie, ale její

přibližný procentuální růst při zahrnutí hmotnosti nákladu a stoupání na trase.

Hmotnost nákladu a její změny byly během měření trasy třetího závozu zaznamenány z dodacích listů. Průběh stoupání na trase byl vytvořen stejným způsobem jako v případě vyhodnocení u dodávek Mercedes-Benz eSprinter, tedy z aplikace „Analýzy výškopisu“ [15], jejímž provozovatelem je Český úřad zeměměřický a katastrální. Na této zhruba 30 km dlouhé trase bylo vytvořeno přibližně 120 úseků s různou nadmořskou výškou.

Výpočet spotřeby energie z baterie pomocí integrace jízdních odporu tedy nejprve spočívá ve zjištění energií na kolech dle rovnic popsanych v kapitolách 3.3.5.1 až 3.3.6. Při znalosti energie na kolech je poté spotřeba z baterie určena pomocí vztahu 3.19.

V tabulce 23 jsou shrnuty hodnoty parametrů použitých při výpočtu energií na kolech. Čelní plocha S_x byla odečtena z výkresu vozidla Mercedes-Benz Vito 111 CDI, jež byl poskytnut společností Mercedes-Benz a jehož čelní plocha je totožná s čelní plochou elektrické dodávky eVito [7]. Součinitel odporu vzduchu C_x byl stanoven na hodnotě 0,4, a to na základě údajů v publikaci [21], kde je pro dodávky udáván interval této veličiny jako 0,35 – 0,5. Součinitel rotujících hmot byl stanoven na hodnotě 1,07, tedy stejně a ze stejného důvodu jako v případě dodávky eSprinter (viz Příloha 1), jelikož vůz eVito disponuje stejným motorem a stálým převodem jako eSprinter. Hustota vzduchu byla uvažována jako 1,25 kg/m³, což odpovídá teplotě vzduchu 10 °C a tlaku 101,4 kPa [23]. Za pohotovostní hmotnost dodávky eVito byla dosazena hodnota 2207 kg, jež byla zjištěna vážením, jak již bylo popsáno v kapitole 4.3.1. Hmotnost řidiče byla uvažována jako 100 kg, stejně jako u testů na vozidlovém dynamometru. Klíčovým parametrem je však opět součinitel odporu valení. Ten byl pro účely tohoto výpočtu stanoven na hodnotě 0,008, a to z toho důvodu, že s touto hodnotou výsledné energetické spotřeby nejen z baterie, ale i na kolech, vychází velice podobně jako hodnoty naměřené dynamometrem, jak bude dále ještě popsáno. Tato hodnota je také ve shodě s udávaným intervalem koeficientu odporu valení 0,005 až 0,015 mezi suchým asfaltem a pneumatikou, jež je udáván v [19].

Veličina	Označení	Hodnota
Součinitel odporu valení	f	0,008
Čelní plocha vozidla	S_x	3 m ²
Součinitel odporu vzduchu	C_x	0,4
Součinitel rotujících hmot	δ	1,07
Hustota vzduchu	ρ	1,25 kg/m ³
Pohotovostní hmotnost	m_0	2207 kg
Hmotnost řidiče	$m_{řidič}$	100 kg

tabulka 23 – Parametry pro výpočet vlivu stoupání a nákladu na spotřebu energie

Jak již bylo zmíněno, hmotnost nákladu během rozvážky byla zaznamenána z dodacích listů a její hodnoty je možné najít v Příloze 4. Z těchto dat je patrné, že hmotnost nákladu při výjezdu z pekárny činila zhruba 150 kg, tedy méně než v případě rozvozů s vozidly Sprinter. Jelikož rychlostní profil použitý do výpočtu byl získaný sběrem dat ze systému E-OBD, kdy naměřená data nevykazují zákřivky jako v případě měření s GPS, byl časový krok k získání rychlostního profilu s konstantním zrychlením zmenšen (oproti výpočtům u dodávky eSprinter) na 2 sekundy.

Při výpočtu spotřeby energie z baterie dle rovnice 3.19 byla uvažována účinnost rekuperace jako 61 % a účinnost přeměny energie z baterie na kolo jako 80 %, jak bylo odůvodněno v kapitole 4.5.3. Výsledky takto provedeného výpočtu uvádí následující tabulka.

Veličina	Bez nákladu a stoupání	S nákladem a stoupáním
Kladné energie na kolech [kWh]	5,36	6,5
Záporné energie na kolech [kWh]	-3,14	-4,24
Spotřeba energie z baterie [kWh/100 km]	15,97	18,48
Nárůst spotřeby energie z baterie	+15,7 %	

tabulka 24 – Výsledky analýzy nárůstu spotřeby energie z baterie

Spotřeba energie z baterie při uvažování hmotnosti nákladu a měnícího se stoupání tedy vzroste o zhruba 15,7 % v porovnání s případem, kdy tyto faktory uvažovány nejsou.

Data uvedená v tabulce 24 jsou velmi dobré shodě se spotřebami získanými simulacemi na vozidlovém dynamometru, jak ukazuje následující tabulka.

Veličina	Integrace jízdních odporů (bez stoupání a nákladu)	Dynamometr (průměrné hodnoty)
Kladné energie na kolech [kWh]	5,36	5,35
Záporné energie na kolech [kWh]	-3,14	-3,23
Spotřeba energie z baterie [kWh/100 km]	15,97	15,7

tabulka 25 – Srovnání energií zjištěných na dynamometru s energiemi získanými pomocí integrace jízdních odporů

Při uvážení procentuálního nárůstu spotřeby energie z baterie bude skutečná spotřeba dodávky eVito při rozvozu na analyzované trase třetího závozu vypadat následovně.

$$S_{treti_zavoz_skut} = S_{treti_zavoz} \cdot 1,157 = 15,7 \cdot 1,157 \frac{kWh}{100 km} \cong 18,2 \frac{kWh}{100 km}, \quad (4.26)$$

kde S_{treti_zavoz} je průměrná spotřeba v cyklu trasy třetího závozu dle tabulky 18.

Platnost této hodnoty pro dodávku eVito lze samozřejmě uvažovat nejen v tomto jízdním cyklu, ale také obecně při rozvozu ve městě.

4.5.5 Vliv topení na spotřebu

Ke zjištění spotřebě dodávky eVito v rovnici 4.26 je v zimním období nutné přičíst spotřebu na topení. Tato analýza bude provedena obdobným způsobem jako u dodávky eSprinter, kdy ke zjištění průměrného nárůstu spotřeby energie kvůli topení bude použita rovnice 4.27. Jelikož interiér pro posádku u dodávky eVito je menší než u vozu eSprinter a maximální příkon tepelného čerpadla vozu eVito není udáván, bude zde příkon tepelného čerpadla během jízdy uvažován na hodnotě 1 kW. Jak bylo řečeno, řidiči vozidel kvůli častým vykládkám zboží jezdí oblečení v bundě, tudíž výkon topení nemusí být pro zajištění komfortu tak vysoký a průměrný příkon tepelného čerpadla 1 kW je pro odmlžení skel považován za dostačující.

$$E_{topeni} = P_{t.č.} \cdot t_{treti_zavoz} \cdot \frac{100}{s_{prum}} = \left(1 \cdot 1,36 \cdot \frac{100}{30,1}\right) kWh/100 km \quad (4.27)$$

$$E_{topeni} \cong 4,5 kWh/100 km$$

kde $P_{t.č.}$ je předpokládaný příkon tepelného čerpadla [kW],

t_{treti_zavoz} je čas trvání jízdního cyklu trasy třetího závozu (bez zastávek na vykládku zboží) [h],

s_{prum} je průměrná délka cyklu trasy třetího závozu dle tabulky 15 [km].

Předpokládané energetické spotřeby z baterie dodávky eVito při jízdě ve městě se zapnutým topením, tj. v zimním období, tedy vychází jako

$$S_{treti_zavoz_topeni} = S_{treti_zavoz_skut} + E_{topeni} \quad (4.28)$$

$$S_{treti_zavoz_topeni} = (18,2 + 4,5) \text{ kWh}/100 \text{ km} = 22,7 \text{ kWh}/100 \text{ km}$$

Stejně jako u vozu eSprinter, i zde bude dále spočtena kritická spotřeba vozu eVito, jež nastane v situaci, při níž se bude v dodávce při provozu topit a distribuce pečiva se např. z důvodu dopravních komplikací prodlouží. V následujícím výpočtu, který určuje nárůst spotřeby v popsané situaci, bude tedy uvažováno, že se trasa ze zmíněného důvodu prodlouží o 1 hodinu.

$$E_{top_max} = P_{t.č.} \cdot (t_{treti_zavoz} + 1 \text{ h}) \cdot \frac{100}{S_{prum}} = \left(1 \cdot (1,36 + 1) \cdot \frac{100}{30,1}\right) \frac{\text{kWh}}{100 \text{ km}} \quad (4.29)$$

$$E_{topeni_max} \cong 7,8 \text{ kWh}/100 \text{ km}$$

Spotřeby z baterie v tomto kritickém případě tedy vychází dle následující rovnice.

$$S_{treti_zavoz_topeni_max} = S_{treti_zavoz_skut} + E_{topeni_max} \quad (4.30)$$

$$S_{treti_zavoz_topeni_max} = (18,2 + 7,8) \text{ kWh}/100 \text{ km} = 26 \text{ kWh}/100 \text{ km}$$

Experimenty na vozidlovém dynamometru a výpočty provedené v rámci celé kapitoly 4 tedy určily zejména spotřeby elektrické energie dodávky Mercedes-Benz eVito při rozvozu pečiva na trase třetího závozu, které jsou pro přehlednost sepsány v tabulce 26. Platnost těchto hodnot lze však obecně rozšířit na jakýkoliv rozvoz v městě.

Spotřeba	Hodnota [kWh/100 km]
na vozidlovém dynamometru	15,7
v reálném provozu	18,2
v reálném provozu v zimě	22,7
v reálném provozu v zimě při dopravních komplikacích	26

tabulka 26 – Zjištěné spotřeby dodávky Mercedes-Benz eVito

Obdobně jako u vozu eSprinter bude i v případě elektromobilu eVito využitelnost dodávky pro rozvoz pečiva na základě těchto hodnot posouzena v kapitole 5.1.

5 Dobíjecí infrastruktura

Úkolem této statě je na základě zjištěných poznatků v kapitolách 3 a 4 navrhnout dobíjecí infrastrukturu v sídle pekárny, z níž by mohly být dodávky Mercedes-Benz eSprinter a eVito dobíjeny. Podle možností dobíjení bude také posouzena vhodnost použití těchto elektromobilů pro distribuci na jednotlivých linkách.

Při návrhu dobíjecí infrastruktury bude uvažována hypotetická situace, při níž budou všechny současné vznětové dodávky Sprinter 314 a 316 CDI, s nimiž je rozváženo v Praze, nahrazeny elektromobily eSprinter. Dále bude také předpokládáno pořízení jedné dodávky eVito. Konkrétně bude tedy dobíjení dimenzováno pro šest dodávek eSprinter a jeden vůz eVito a zároveň bude zjišťováno, zdali jsou tyto dodávky schopny rozvozy pečiva z technického hlediska zvládnout.

Obecně může být nabíjení elektromobilů v pekárně Odkolek řešeno dvěma způsoby. Tím prvním je napojení dobíjecích zařízení přímo na elektrický rozvod pekárny. V tomto případě je cena dobíjení stejná jako cena, za kterou pekárna nakupuje elektřinu pro běžný provoz a příkon pro dobíjení elektromobilů je omezen rozdílem rezervovaného příkonu pekárny a aktuálním elektrickým odběrem ostatních spotřebičů v pekárně. Druhým způsobem je vybudování dobíjecích zařízení na samostatném odběrném místě, které se nachází v areálu pekárny, ovšem disponuje vlastním elektroměrem. V tomto případě je dobíjení nezávislé na elektrickém rozvodu pekárny a má také svůj vlastní rezervovaný příkon a odlišnou cenu elektřiny. Ačkoliv lze výhodnější variantu posoudit pouze na základě konkrétních smluvních podmínek, jako výhodnější se jeví varianta první, jelikož zde odpadají náklady za vybudování nového odběrného místa. Z tohoto důvodu bude v následujícím textu uvažováno, že by byla dobíjecí zařízení napojena na současný elektrický rozvod pekárny, kdy je třeba, aby celkový odběr pekárny během dobíjení elektromobilů nepřekročil hodnotu rezervovaného příkonu.

5.1 Harmonogram a parametry DC dobíjení

Stejnoseměrným proudem by byla vozidla dobíjena pouze v těch případech, v nichž některá dodávka provádí distribuci vícekrát denně a je jí tedy možné alespoň částečně nabít v mezičase mezi rozvozy, kdy je zaparkována v areálu pekárny. V rámci této kapitoly bude kromě návrhu parametrů DC dobíjení posouzena také využitelnost vozidel pro rozvozy na distribučních trasách. Tyto dvě záležitosti spolu souvisí, jelikož možnosti použití

elektromobilů při rozvozech závisí na parametrech DC zařízení, ovšem pro návrh tohoto dobíjení je nutné vědět, jaká konkrétní vozidla budou na jednotlivých trasách využívána.

Kritériem při návrhu parametrů DC dobíjení bude to, aby byly všechny elektromobily schopné rozvážet pečivo stejně, tedy ve stejné časy a na stejných trasách, jako současné vznětové dodávky. To znamená, že dobíjecí infrastruktura musí zajistit distribuci pečiva během celého dne, kdy se v žádném případě nesmí při rozvozu elektromobily vybit.

Ačkoliv je pro rozvoz pečiva charakteristická jistá časová pravidelnost, tedy ve většině případů jsou časy výjezdů a příjezdů na pekárnu stejné a nájezdy na linkách podobné, může samozřejmě stát, že se při distribuci trasa prodlouží, např. kvůli objížďkám nebo ve dnech, kdy je objednávek více než obvykle. Stejnoseměrné dobíjení tedy musí být dimenzováno na takovýto kritický den, kdy jsou nájezdy na linkách větší než v běžných případech.

Za tímto účelem byl pro tuto práci společností United Bakeries, a. s. poskytnut reálný měsíční harmonogram rozvozu dodávek Sprinter 314 a 316 CDI, který obsahuje časy výjezdů a příjezdů na pekárnu a jednotlivé kilometrové nájezdy u každé dodávky na každé rozvážecí lince během měsíce března roku 2020.

Z těchto dodaných podkladů byl sestaven virtuální, kriticky vytížený den (dále jen „kritický den“), a to následujícím způsobem. Pro každou dodávku byly z popsaného harmonogramu odečteny maximální nájezdy na jednotlivých rozvozech za celý měsíc a tyto nájezdy byly dosazeny do harmonogramu zmíněného kritického dne. To znamená, že pokud jsou některé dodávky v provozu pouze jednou za den, byl za nájezd v uvažovaném kritickém dni dosazen maximální nájezd dodávky během celého měsíce. Je-li dodávka v provozu vícekrát za den, pak byla za délku každého rozvozu během dne dosazena maximální délka příslušného rozvozu za celý měsíc. Je-li dodávka v provozu vícekrát za den, byly pro časy výjezdů a příjezdů do tohoto kritického případu zvoleny hodnoty odpovídající dni, v němž byly intervaly mezi dvěma rozvozy (během nichž může probíhat DC dobíjení) za celý měsíc nejmenší. Pokud vozidlo provádí distribuci pouze jednou za den, byly za časy výjezdů a příjezdů použity hodnoty v den, kdy byly rozvozy z časového hlediska za celý měsíc nejdéší.

Časový harmonogram popsaného kritického dne je uveden v tabulce 27. Místo vznětových dodávek je zde již uvažováno použití elektrických vozidel a každý rozvoz je pro další zpracování označen indexem. Jelikož dodávkou Vito v současné době rozváženo není, byla délka rozvozu vozidla eVito v kritickém dni vytvořena na základě proběhnuvšího třetího závozu simulovaného na vozidlovém dynamometru. Skutečná délka trasy činila zhruba 30 km a v tomto kritickém dni byla navýšena na hypotetických 45 km.

Dodávka	Index rozvozu	Čas výjezdu	Čas příjezdu	Nájezd [km]
eSprinter 1	1	4:00	10:00	38
	2	11:00	14:00	38
	3	14:30	18:00	82
eSprinter 2	4	4:00	10:00	45
	5	12:00	18:00	56
eSprinter 3	6	4:00	7:30	55
eSprinter 4	7	5:00	12:00	43,1
eSprinter 5	8	4:00	8:20	42,2
eSprinter 6	9	2:30	6:00	34
	10	6:45	10:00	34,7
eVito	11	9:00	11:30	45

tabulka 27 – Harmonogram kriticky vytiženého dne

Návrh DC dobíjení a také posouzení použitelnosti elektromobilů pro rozvozy bude provedeno na základě tohoto harmonogramu. Ve výpočtu bude předpokládáno, že jsou veškeré dodávky při prvním výjezdu z pekárny plně nabity. Spotřeby vozidel budou uvažovány také jako kritické a budou za ně tedy dosazeny maximální hodnoty spotřeb zjištěné v kapitolách 3 a 4. V případě elektromobilu eSprinter s vyšší kapacitou baterie (47 kWh využitelných) bude počítáno s hodnotou 39,9 kWh/100 km, u verze s nižší kapacitou (35 kWh využitelných) se spotřebou 38,7 kWh/100 km, viz tabulka 8. U vozu eVito bude kalkulováno se spotřebou 26 kWh/100 km, viz tabulka 26.

V prvním výpočtu bude zjištěno, které dodávky z tabulky 27 je nezbytné mezi jednotlivými rozvozy dobíjet stejným proudem a zdali vozidla, která rozváží za den pouze jedenkrát, jsou vůbec schopna rozvoz s popsánými spotřebami zvládnout. Nejprve bude tedy předpokládáno, že dodávky nejsou mezi jednotlivými rozvozy nabíjeny. V tomto případě lze kapacitu baterie na konci každého rozvozu určit z rovnice 5.1.

$$C_i^{\text{příjezd}} = C_i^{\text{výjezd}} - \frac{S \cdot s_i}{100}, \quad (5.1)$$

kde C je kapacita baterie při příjezdu, resp. výjezdu i -tého rozvozu [kWh],
 S je spotřeba dodávky eSprinter, resp. eVito [kWh/100 km],
 s_i je délka i -tého rozvozu [km].

Nebudou-li dodávky mezi rozvozy dobíjeny, je samozřejmé, že kapacita baterie při i -tém příjezdu bude rovna kapacitě baterie při následném odjezdu, tedy platí (rovnice je platná samozřejmě pro indexy i v rámci jedné dodávky).

$$C_i^{\text{příjezd}} = C_{i+1}^{\text{výjezd}} \quad (5.2)$$

Jelikož se jedná o výpočet v kritické situaci, bude také respektována skutečnost, že s počtem nabíjecích cyklů klesá maximální kapacita baterie. Mercedes-Benz udává, že dodávky jsou schopny urazit 160 000 km, než nominální kapacita baterie poklesne na 70 % původní hodnoty, což také označuje jako konec životnosti baterie. Baterii je samozřejmě možné po této době provozovat dál, v tomto výpočtu však bude hodnota 70 % uvažována jako hraniční. To znamená, že v této situaci nominální kapacity baterie dodávek eSprinter klesnou z původních 41 kWh a 55 kWh (viz tabulka 2) na 28,7 kWh a 38,5 kWh, což odpovídá využitelným kapacitám 22,7 kWh a 30,5 kWh (rozdíl mezi nominální a využitelnou kapacitou je pro baterii stále stejný). Využitelná kapacita dodávky eVito klesne z původních 35 kWh také na 22,7 kWh. S těmito hodnotami bude popsáním způsobem proveden výpočet rovnic 5.1 a 5.2, čímž lze zjistit stavy baterií na konci kritického dne u všech vozidel. Výsledky pro obě verze dodávky eSprinter a dodávku eVito uvádí tabulka 28.

Dodávka	Index rozvozu	Verze 35 kWh		Verze 47 kWh	
		Kap. baterie při výjezdu [kWh]	Kap. baterie při příjezdu [kWh]	Kap. baterie při výjezdu [kWh]	Kap. baterie při příjezdu [kWh]
eSprinter 1	1	22,7	8,0	30,5	15,3
	2	8,0	-6,7	15,3	0,2
	3	-6,7	-38,4	0,2	-32,5
eSprinter 2	4	22,7	5,3	30,5	12,5
	5	5,3	-16,4	12,5	-9,8
eSprinter 3	6	22,7	1,4	30,5	8,6
eSprinter 4	7	22,7	6,0	30,5	13,3
eSprinter 5	8	22,7	6,4	30,5	13,7
eSprinter 6	9	22,7	9,5	30,5	16,9
	10	9,5	-3,9	16,9	3,1
eVito	11	22,7	11	-	-

tabulka 28 – Kapacity baterie během kritického dne (bez DC dobíjení)

Uvedené záporné hodnoty kapacit baterií jsou samozřejmě pouze teoretické, ovšem znázorňují, že během jízdy dojde k plnému vybití baterie a dodávka tak distribuci není bez dobíjení mezi rozvozy schopna zvládnout. Toto platí konkrétně pro vozy eSprinter č. 1 a 2 v obou verzích kapacity, u nichž je DC dobíjení mezi rozvozy nezbytné.

V ostatních případech je situace odlišná. Vozidla eSprinter č. 3, 4 a 5 jsou schopny rozvoz zvládnout i s nižší verzí kapacity baterie. V případě první zmíněné dodávky však činí kapacita baterie na konci dne pouze 1,4 kWh, kdy je tato rezerva považována za nedostatečnou, a tudíž se pro rozvoz č. 6 jeví jako vhodnější provozování dodávky ve vyšší verzi kapacity. Dodávka eSprinter č. 6 je schopna rozvoz zvládnout bez DC dobíjení pouze v případě verze s vyšší kapacitou baterie, kdy nákup tohoto vozidla je navíc finančně výhodnější než pořízení DC dobíjecího zařízení, jak bude ukázáno v kapitole 6.1. Vůz eVito je schopen distribuci také bez problému zvládnout.

Z uvedeného vyplývá, že DC dobíjení je nutné pouze u vozidel eSprinter č. 1 a 2. U nich bude v následujícím výpočtu uvažováno, že budou mezi rozvozy dobíjeny výkonem 20 kW. Tento výkon je plně kompatibilní s nabíječkou ve vozidle eSprinter, jak bylo popsáno v kapitole 3.1. V intervalu mezi rozvozy se tedy kapacita baterie navýší, a to na hodnotu danou rovnicí 5.3 (indexy i platí samozřejmě opět v rámci jedné dodávky).

$$C_{i+1}^{vyjezd} = C_i^{prijezd} + P \cdot t \cdot \eta_{DC} \cdot K, \quad (5.3)$$

kde P je výkon dobíjecího zařízení, tedy zmíněných 20 kW,

t je doba, po kterou je dodávka na pekárně mezi rozvozy zaparkována (lze odečíst z tabulky 27),

η_{DC} je účinnost DC dobíjení,

K je koeficient udávající jakou část z celkového mezičasu mezi rozvozy je vozidlo dobíjeno.

Jsou-li elektromobily obecně dobíjeny vyšším výkonem, může nastat situace, jež je dána nelineární dobíjecí charakteristikou baterie. Během ní dochází při dobíjení ve vyšších hodnotách SOC k nárůstu odporu baterie, tím pádem lze baterii dobíjet pouze menším proudem (a tedy i menším výkonem) a tím pádem proces dobíjení trvá déle. Často bývá udáváno, že tato situace nastává zhruba od hodnot SOC = 80 %, může to však být i od nižších hodnot. Výkon dobíjení 20 kW je však považován za dostatečně nízký výkon na to, aby popsaný efekt nenastal. Je tedy předpokládáno, že se baterie dobije výkonem 20 kW až do

100 % kapacity. [32]

Účinnost přenosu energie při DC dobíjení bývá menší v porovnání s AC dobíjením, což je dáno zpravidla vyššími dobíjecími výkony při použití stejnosměrného proudu a tím pádem také vyššími tepelnými ztrátami, jež rostou s druhou mocninou dobíjecího proudu. Za účinnost DC dobíjení byla do výpočtu zvolena hodnota 0,9, jež byla stanovena na základě [33].

Koeficient využití času K v rovnici 5.3 zohledňuje, že dodávka ve skutečnosti nebude nabíjena během celého časového intervalu mezi rozvozy, a tedy že nějakou dobu zabere, než řidič s vozidlem k dobíjecímu místu dojede, připojí jej do dobíjecího zařízení a podobně. Ve výpočtu je uvažován faktor využití času 0,8, což znamená, že je vozidlo nabíjeno 80 % času, během kterého je v pekárně mezi rozvozy zaparkováno.

Výsledky popsaného výpočtu u vozidel eSprinter č. 1 a 2 znázorňuje tabulka 29.

Dodávka	Index rozvozu	Verze 22,7 kWh		Verze 30,5 kWh	
		Kap. baterie při výjezdu [kWh]	Kap. baterie při příjezdu [kWh]	Kap. baterie při výjezdu [kWh]	Kap. baterie při příjezdu [kWh]
eSprinter 1	1	22,7	8,0	30,5	15,3
	2	22,4	7,7	29,7	14,6
	3	14,9	-16,8	21,8	-10,9
eSprinter 2	4	22,7	5,3	30,5	12,5
	5	22,7	1,0	30,5	8,2

tabulka 29 – Kapacity baterie během kritického dne (s uvažováním DC dobíjení 20 kW)

Z těchto dat vyplývá, že DC dobíjení teoreticky umožní rozvoz dodávky eSprinter č. 2 i v menší verzi kapacity baterie, ovšem na konci dne činí rezerva v tomto případě pouze 1 kWh a jako vhodnější se zde tedy jeví použití verze s vyšší kapacitou.

U vozu č. 1 však popsané DC dobíjení dostačující v obou případech není. Elektromobil eSprinter sice umožňuje DC dobíjení výkonem 80 kW, ovšem při pohledu na hodnoty uvedené v tabulce 29 je zřejmé, že ani dobíjení tímto výkonem nezajistí dojetí první dodávky během rozvozu č. 3. Pokles kapacity ve vyšší verzi během tohoto rozvozu totiž činí zhruba 32,7 kWh, ovšem maximální využitelná kapacita na konci životnosti je pouze 30,5 kWh. I kdyby se tedy trakční baterie před tímto rozvozem plně nabíla, nebude její kapacita dostačující. Z tohoto důvodu nemá DC dobíjení výkonem 80 kW smysl.

Provozování dodávky eSprinter č. 1 během kritického dne se kvůli délce rozvozu č. 3 tedy

jeví jako nevhodné. Je však nutné poznamenat, že v běžném případě činí délka tohoto rozvozu nikoliv 82 km (jak je uvažováno v kritickém dni), ale pouze zhruba 33 km. Pro rozvozy v běžné dny je tedy tato dodávka plně dostačující. Na základě podkladů od United Bakeries je délka rozvozu č. 3 rovna osmdesáti kilometrům zhruba třikrát do měsíce, tudíž ojediněle. Veškeré výpočty byly navíc provedeny s kapacitami baterií na konci životnosti a také s maximálními spotřebami, které lze kvůli topení očekávat pouze v zimě. Z uvedeného vyplývá, že dodávka není schopna tento rozvoz zvládnout pouze ve výjimečných případech.

Řešení popsaného problému tak může být následující. Vůz eSprinter č. 1 s novou baterií může být na distribuci používán po celý rok, a to i v kriticky vytížený den. Po několika letech, kdy se maximální kapacita baterie sníží, bude vozidlo stále schopno rozvozy zvládnout v běžné dny a pravděpodobně i v kriticky vytížené dny v létě, kdy bude spotřeba snížena díky vypnutému topení. V kriticky vytížené dny v zimě může být náklad určený pro rozvoz č. 3 rozdělen např. mezi vozy eSprinter č. 1 a č. 3, jelikož vozidlo č. 3 končí závoz v 7:30 a má tedy dostatek času být v případě potřeby plně nabito. Tímto rozdělením se tedy nájezd dodávky č. 1 sníží a vůz tak distribuci bez problému zvládne.

Na základě výše popsaných poznatků se v případě elektrifikace flotily pekárny Odkolek pro městské rozvozy jeví jako technicky vhodné provozování dvou dodávek eSprinter s využitelnou kapacitou 35 kWh, dále čtyř dodávek eSprinter s využitelnou kapacitou 47 kWh a také jednoho vozu eVito. Z hlediska rychlého dobíjení je nezbytné pořízení dvou DC dobíjecích zařízení o výkonu 20 kW. Konkrétně byly tyto účely vybrány DC wallboxy o výkonu 20 kW z nabídky firmy PRE měření, a. s. Tyto wallboxy obsahují zásuvku pro standard CSS Combo II a disponují také regulačním systémem, který v případě přetížení elektrické sítě v pekárně dokáže nabíjecí výkon snížit a upřednostnit tak odběr jiných zařízení (např. pecí) [6]. Jelikož jsou intervaly mezi rozvozy krátké a náklad pečiva do dodávek trvá zhruba půl hodiny, musí být DC wallboxy instalovány u nakládacích ramp, aby bylo možné dobíjení vozidel právě během nakládání dodávek.

Výpočty provedené v rámci této kapitoly lze nalézt v Příloze 5.

5.2 Harmonogram a parametry AC dobíjení

V předešlé kapitole bylo předpokládáno, že všechny elektromobily začínají první denní distribuci s plně nabitými bateriemi. Úkolem AC dobíjecí infrastruktury je tento stav zajistit. Vozidla eSprinter a eVito disponují stejnými možnostmi AC dobíjení, jak bylo popsáno

v kapitolách 3.1 a 4.1. Vozidla lze dobíjet na dvou fázích, z každé proudem 16 A, což odpovídá výkonu zhruba 7,36 kW. Možné je také dobíjení jednofázové proudem 16 A, tedy zhruba výkonem 3,68 kW.

Harmonogram a parametry AC dobíjení budou navrženy z požadavku, aby bylo možné vozidla plně dobít v nočních hodinách. V tuto dobu může být totiž elektřina odebírána z nízkého tarifu a je tedy levnější. Distribuční sazba pekárny Odkolek je sice v současné době jednotarifní [6], ovšem tato skutečnost se může v budoucnu při tvorbě nové smlouvy změnit. Kritériem pro návrh AC dobíjecí infrastruktury tak bude požadavek, aby bylo možné elektromobily plně dobít od 22:00. Tento čas je v současné době platný např. pro spínání osmihodinového nízkého tarifu pro distribuční sazbu C27d u distributora PRE distribuce, a. s., jež je určená pro dobíjení elektromobilů ve firmách [34]. Dalším kritériem pro návrh také bude, aby byla vozidla plně nabitá půl hodiny před plánovaným prvním výjezdem z pekárny, jelikož se v tuto dobu začíná vozidlo nakládat pečivem a přejíždí z nočních parkovacích míst k nakládacím rampám. Z toho vyplývá, že AC wallboxy mohou být na rozdíl od DC wallboxů instalovány kdekoliv v areálu pekárny.

Harmonogram a parametry AC dobíjení byly navrženy pro kritický den dle tabulky 27. To znamená, že kapacity baterií na začátku AC dobíjení odpovídají hodnotám na konci tohoto kritického dne. Návrh byl také proveden pro konkrétní vozidla popsána ve stati 5.1, jejichž provozování na městských linkách je z technického hlediska možné.

Při dobíjení je také samozřejmě třeba počítat s účinností, která bývá pro dobíjení AC udávána jako 0,95 [35], kdy s touto hodnotou bylo také kalkulováno. Aktuální kapacita baterie během dobíjení je pak dána vztahem 5.4.

$$C = C_0 + P \cdot t \cdot \eta_{AC} , \quad (5.4)$$

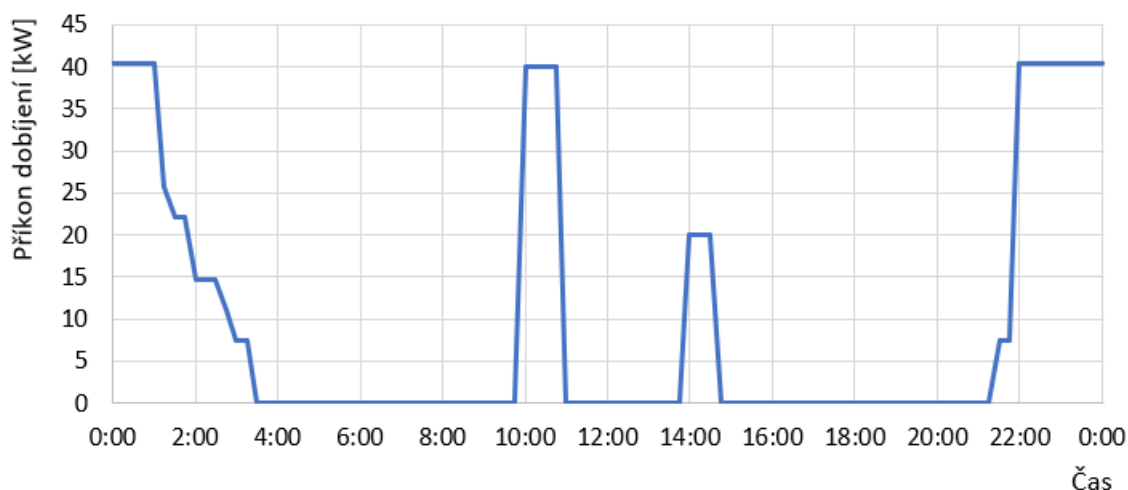
kde C_0 je kapacita baterie na začátku AC dobíjení,
 P je dobíjecí výkon,
 t je čas,
 η_{AC} je účinnost AC dobíjení.

Výpočty rovnice 5.4 vedoucí k návrhu parametrů AC dobíjení je možné nalézt v Příloze 5. Z ní vyplývá, že na základě popsaných kritérií je k dobíjení elektromobilů eSprinter č. 4, 5 a eVito možné použít jednofázový AC wallbox o výkonu 3,68 kW. Konkrétně byl vybrán wallbox [36] z nabídky firmy PRE měření, a. s. U ostatních vozidel je pro plné nabití

v nočních hodinách nutné dobíjení výkonem 7,36 kW. Toho bude dosaženo použitím třífázového wallboxu, který umožňuje dobíjení 3x16 A, což odpovídá výkonu 11 kW. Vozidla eSprinter ovšem umí využít pouze dvě fáze, tudíž budou z těchto wallboxů dobíjena výkonem 7,36 kW. Konkrétní wallbox byl vybrán také z nabídky společnosti PRE měření, a. s. a je možné jej najít v [37].

Oba zvolené wallboxy jsou v kovovém provedení a jsou vybaveny zásuvkou na standard Mennekes typ 2. Wallboxy také disponují regulačním systémem popsaným v kapitole 5.1.

Kompletní harmonogram dobíjení (včetně DC dobíjení) je dobře patrný z obr. 41, který znázorňuje odebíraný příkon wallboxů během kritického dne.



obr. 41 – Příkon pro dobíjení elektromobilů během kritického dne

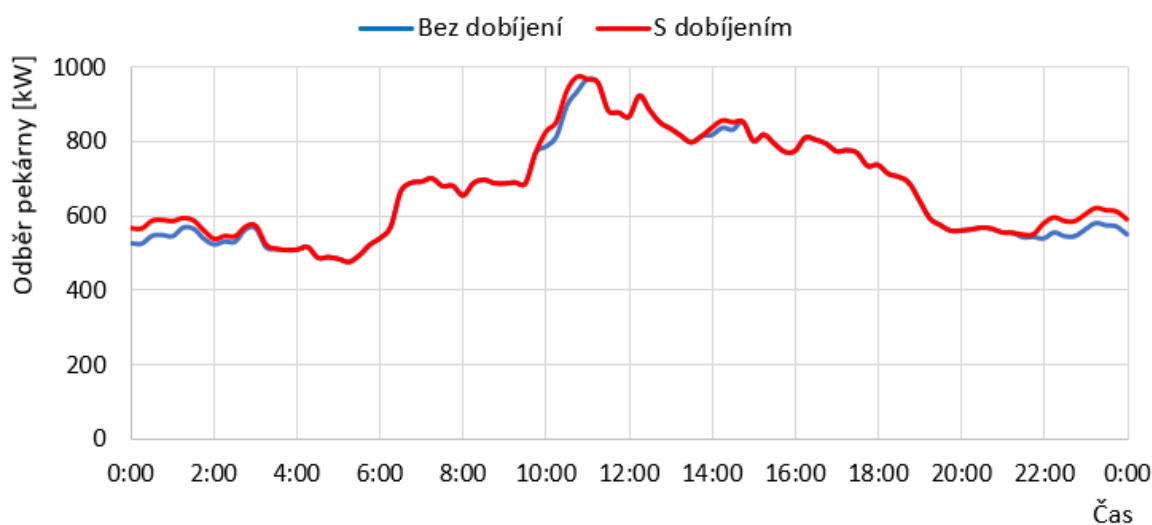
Z grafu je zřejmé, že se všechny dodávky začnou dobíjet kolem 22:00 a poté se odpojují v ranních hodinách podle toho, v jaký čas jsou plně nabitě. Dodávku eSprinter č. 1 je nutné začít dobíjet již ve 21:30, jelikož vzhledem k času výjezdu její plné dobití od 22:00 není ani výkonem 7,36 kW možné. Dvě lokální maxima kolem 10:00 a 14:00 odpovídají popsanému DC dobíjení výkonem 20 kW.

5.3 Kontrola rezervovaného příkonu

V této kapitole bude ověřeno, zdali je dobíjení elektromobilů dle harmonogramu na obr. 41 současnou elektrickou přípojkou pekárny vůbec realizovatelné, tedy zdali je nynější rezervovaný příkon pekárny pro tyto účely dostačující.

Z grafu na obr. 41 je patrné, že by maximum dobíjecího příkonu nastalo v nočních hodinách, ovšem téměř stejnou hodnotu příkonu lze také nalézt zhruba mezi 10:00 a 11:00 dopoledne. Jak bylo popsáno v kapitole 1.1, rezervovaný příkon pekárny je v současné době smluvně nastaven na hodnotě 1 MW a v případě potřeby je možné jej navýšit až na 3 MW.

Společností PRE měření, a. s. byl pro účely této práce poskytnut záznam elektrického odběru pekárny Odkolek v období 1. 1. 2019 až 1. 4. 2020, který obsahuje hodnoty odebíraného příkonu každou čtvrt hodinu v tomto časovém úseku a lze jej nalézt v Příloze 5. Maximálního odběru bylo dosaženo dne 31. 7. 2019, kdy odebíraný příkon činil 966 kW a to v 11:00 hod. Odběrová křivka z tohoto dne je ukázána na obr. 42 modrou barvou. V tomto obrázku je také zakreslen hypotetický odběr pekárny, kterého by bylo dosaženo ve stejný den v případě dobíjení elektromobilů dle vytvořeného harmonogramu dle obr. 41. Červená křivka je tedy dána součtem modré křivky na obr. 42 a příkonem dobíjecí infrastruktury ukázaném na obr. 41.



obr. 42 – Odběr pekárny dne 31. 7. 2019 a jeho navýšení při dobíjení elektromobilů [6]

Z toho grafu je zřejmé, že příkon dobíjecí infrastruktury je porovnání s běžným odběrem pekárny, který je dán zejména provozem pekárenských zařízení, nízký. Ačkoliv v dopoledních hodinách na obr. 42 dochází k superpozici odebíraného výkonu pro DC dobíjení s běžným odběrovým maximem, je odběr pekárny stále menší než rezervovaný příkon 1 MW.

Téměř každý den je trend odběrové křivky pekárny podobný – k nejvyššímu odběru dochází zhruba kolem 11. hodiny dopoledne, a naopak v noci je odběr v porovnání s tímto maximem o několik stovek kW menší.

Maximum odběru v případě dobíjení na obr. 42 činí 973 kW. Ačkoliv je rezerva vůči hodnotě 1 MW v tomto případě poměrně nízká, je nutné poznamenat, že červená křivka na tomto obrázku znázorňuje hypotetický odběr v situaci, v níž je počítáno s maximálním odběrem pekárny za rok a čtvrt provozu a také s příkonem dobíjení, který je potřebný během popsaného kritického dne, jež nastává také výjimečně. V uvedeném patnáctiměsíčním

období odběr pekárny přesáhl hodnotu 900 kW pouze v 15 dnech. Z toho tedy vyplývá, že je bezpečnost vůči rezervovanému příkonu 1 MW ve velké většině případů výrazně vyšší a současný rezervovaný příkon pekárny je tedy pro nabíjení firemní flotily dostačující.

V rámci celé kapitoly 5 tedy byla na základě možností dobíjení identifikována vhodnost použití elektromobilů pro městské rozvozy v pekárně Odkolek, kdy je provoz elektromobilů eSprinter a eVito na všech současných městských distribučních linkách technicky možný, a to jak z hlediska energetických spotřeb a nájezdů na linkách, tak i s ohledem na velikost rezervovaného příkonu pekárny při dobíjení.

6 Ekonomická analýza

Tato kapitola se bude zabývat orientační ekonomickou analýzou návratnosti investice do elektrických dodávek a do dobíjecí infrastruktury. Cílem statě je tedy jednoduchými výpočty posoudit, zdali je v současné době uvažovaný přechod na elektromobilitu v pekárně Odkolek rentabilní.

V kapitole 5 bylo ukázáno, že pro nynější harmonogramu rozvožů městských linek jsou z technického hlediska vhodné dvě dodávky eSprinter s kapacitou baterie 35 kWh, čtyři dodávky eSprinter kapacitou 47 kWh a jeden vůz eVito. Pro jejich dobíjení jsou nezbytné dva DC wallboxy o výkonu 20 kW, tři jednofázové AC wallboxy o výkonu 3,68 kW a čtyři trojfázové AC wallboxy o maximálním výkonu 11 kW.

V této stati bude uvažována investice právě do těchto vozidel a zařízení. Pro posouzení její návratnosti bude proveden výpočet nákladů na nákup a provoz šesti vznětových dodávek Mercedes-Benz Sprinter 314 CDI třetí generace, s vysokou střechou a v extra dlouhé variantě. Jedná se tedy o stejné dodávky, jaké pekárna vlastní v současnosti, ovšem o generaci novější. Vznětovou dodávkou Vito v současnosti rozváženo není, v tomto případě tak bude pro porovnání uvažována vznětová dodávka Mercedes-Benz Vito 114 CDI v dlouhé variantě, což je analogie k testované elektrické dodávce eVito.

Možným způsobem k posouzení rentabilnosti elektromobility je použití metody celkových nákladů vlastnictví – TCO (total cost of ownership), která hodnotí celkové náklady spojené s koupí a provozem vozidel v průběhu let. Tyto celkové náklady jsou složeny z pořizovacích nákladů při koupi vozidel a wallboxů, nákladů na pohonné hmoty a elektrickou energii, servisních nákladů, nákladů na pojištění vozidel a z dalších nákladů, jež se mohou v průběhu let vyskytnout. [38]

Servisní náklady jsou u vznětových dodávek spojeny zejména s údržbou motoru, podvozku, brzd apod., u elektromobilů servis spalovacího motoru odpadá a opotřebení brzd je také menší kvůli rekuperačnímu brzdění. Jisté náklady sice vyžaduje každoroční kontrola baterií kvůli záruce, je ovšem vysoce pravděpodobné, že náklady na údržbu elektromobilů budou nižší v porovnání se vznětovými vozy. Velikost těchto servisních nákladů je jak pro vznětové, tak i pro elektrické dodávky ovšem obtížně zjištělná a jejich výše je navíc oproti pořizovacím cenám dodávek nízká, a tudíž budou mít na celkovou rentabilitu malý vliv. Z těchto důvodů nebudou tyto náklady v provedené orientační analýze započítány. Ze stejného důvodu nebude kalkulováno ani s náklady spojenými s pojištěním vozidel.

Cena montáže wallboxů je zahrnuta v samotných cenách wallboxů, jisté náklady si ovšem

vyžádají stavební práce v podobě vyvedení přírodních kabelů na místa určená k dobíjení a také samotný nákup kabelů. Výše těchto nákladů je individuální, jelikož závisí na způsobu a délce uložení kabelů, a proto nebudou tyto náklady v analýze započteny. Obecně se cena za nákup a vyvedení jednoho metru kabelu pohybuje řádově ve stovkách Kč. [36]

Poměrně výrazné zvýšení nákladů představuje výměna baterií po uplynutí její životnosti. Jak již bylo popsáno, životnost baterie je výrobcem udávána jako doba, než její nominální kapacita klesne na 70 % původní hodnoty, což nastane po zhruba 160 000 km. Baterii je však možné vyměnit i dříve či později a okamžik její výměny je do jisté míry individuální záležitost. Náklady při výměně baterií jsou taktéž obtížně odhadnutelné, a tedy tato záležitost v provedené studii započtena nebude.

Je zřejmé, že pokud přechod na elektromobilitu z provedené orientační analýzy vyjde jako nerentabilní, připočtením nyní zanedbaných nákladů při výměně baterií, při stavebních pracích apod. se míra nerentabilnosti pouze zvýší. Bude-li se naopak elektromobilita z této analýzy jevit jako rentabilní, poté se společnosti United Bakeries vyplatí provést detailnější ekonomickou studii, v níž budou zde zanedbané náklady započteny.

V provedené analýze tedy budou hodnoceny pouze pořizovací náklady na vozidla a wallboxy a náklady na pohonné hmoty či elektrickou energii.

6.1 Kalkulace nákladů

Veškeré kalkulační údaje budou provedené s částkami bez DPH, a to z následujícího důvodu. Společnost United Bakeries je tzv. plátcem DPH a má tím pádem nárok na odpočet daně z přidané hodnoty při pořízení automobilů, wallboxů a také při nákupu pohonných hmot a elektřiny. Jelikož budou tyto objekty využívány výhradně pro podnikatelskou činnost, je možné uplatnit odpočet DPH v plné výši. Firma tak sice při nákupu zaplatí částky včetně DPH, po vyplnění daňového přiznání však stát vrátí DPH společnosti zpět na účet. [39], [40] Růst nákladů vznětových i elektrických dodávek během let bude znázorněn pomocí lineárních funkcí, kde nezávislou proměnou je čas, počáteční hodnotou jsou pořizovací náklady a směrnici přímk jsou náklady na dobíjení či tankování. Tedy platí

$$NAKLADY_{el} = X_{el} + P_{el} \cdot t , \quad (6.1)$$

$$NAKLADY_{nafta} = X_{nafta} + P_{nafta} \cdot t , \quad (6.2)$$

kde X_{el} jsou pořizovací náklady elektromobilů a dobíjecí infrastruktury a X_{nafta} jsou pořizovací náklady vznětových vozidel,
 P_{el} jsou roční náklady za dobíjení a P_{nafta} roční náklady za naftu,
 t udává čas, tedy počet let.

V následujících odstavcích budou určeny veličiny figurující v rovnicích 6.1 a 6.2.

Ceny obou vznětových dodávek (Sprinter a Vito) byly převzaty z oficiálního ceníku firmy Mercedes-Benz pro ČR platného od roku 2020. V případě elektromobilů nebyl oficiální ceník v době tvorby této práce ještě k dispozici, tudíž je v tomto případě pracováno s ceníkem, jež byl pro účely této kapitoly sdělen společností Mercedes-Benz. Tyto ceníkové ceny jsou spolu s počty vozidel uvedené v tabulce 30. V ní jsou také sepsány počty a ceny popsanych wallboxů, jež byly poskytnuty společností PRE měření, a. s. Dále jsou zde také vypočtené celkové pořizovací náklady elektromobilů a wallboxů X_{el} a vznětových vozidel X_{nafta} .

Vozidlo / wallbox	Cena bez DPH	Počet vozidel / wallboxů
Sprinter 314 CDI	887 000 Kč	6
eSprinter (35 kWh)	1 390 000 Kč	2
eSprinter (47 kWh)	1 566 000 Kč	4
Vito 114 CDI	617 000 Kč	1
eVito	1 089 000 Kč	1
AC wallbox 3,68 kW	31 082 Kč	3
AC wallbox 11 kW	33 464 Kč	4
DC wallbox 20 kW	250 000 Kč	2
Pořizovací náklady – elektromobilita (X_{el})		10 860 102 Kč
Pořizovací náklady – vznětové dodávky (X_{nafta})		5 939 000 Kč

tabulka 30 – Ceník dodávek a pořizovací náklady [6], [7], [36], [37], [41], [42]

Z tabulky jsou na první pohled patrné výrazně vyšší ceny elektrických dodávek oproti vznětovým, a to u obou vozů až zhruba o 75 %. Jak již bylo zmíněno, jedná se o ceníkové ceny, což znamená, že v nich nejsou zohledněny případné slevy pro fleetového zákazníka, jakým je United Bakeries. Skutečné ceny však zůstávají obchodním tajemstvím, a proto s nimi v práci nebude počítáno. Jak je dále z tabulky patrné, tyto vyšší ceny se spolu s náklady na nákup wallboxů projeví tím, že pořizovací náklady v případě elektromobility vychází o zhruba 5 mil. Kč vyšší v porovnání se vznětovými vozy.

Státní dotace

Na elektromobily a také na soukromé dobíjecí stanice či wallboxy jsou v současné době vypisovány dotace, konkrétně se v roce 2020 jedná o program podpory Nízkouhlíkové technologie – Elektromobilita vypsaný Ministerstvem průmyslu a obchodu. Celkově stát tímto programem firmám rozdělí 150 mil. korun, kdy pro podniky nad 250 zaměstnanců, dosahuje dotace výše až 30 % ze způsobilých výdajů, což jsou ceny elektromobilů a dobíjecích stanic/wallboxů bez DPH. Podmínkou přidělení dotace ovšem je, že se sídlo společnosti musí nacházet mimo Prahu, což United Bakeries nesplňuje. Dotační programy jsou však vypisovány každoročně, a ačkoliv se v současné době vztahují pouze na mimopražské společnosti, v budoucnu se situace může změnit a programy podpory mohou být vypisovány i pro firmy se sídlem v hlavním městě. Z tohoto důvodu bude finanční analýza provedena jednak pro případ bez dotací, ale také pro situaci, v níž budou elektromobily a wallboxy státem dotovány ve výši 30 % ze způsobilých výdajů, tedy s maximální výší dotace dle aktuálního dotačního programu. [43], [44]

Požizovací náklady elektromobilů a dobíjecí infrastruktury X_{el} v případě udělené dotace klesnou o 30 %, tj. na 7 602 071 Kč, což je ovšem stále o 1,7 mil. Kč více ve srovnání se vznětovými dodávkami.

Náklady v i -tém měsíci v roce na dobíjení jednoho elektromobilu lze určit z rovnice 6.3.

$$P_{eli} = \frac{M_{el} \cdot S_{eli} \cdot C_{el}}{100 \cdot \eta_{dob}}, \quad (6.3)$$

kde M_{el} udává měsíční nájezd jedné dodávky eSprinter či eVito [km],

S_{eli} udává spotřebu dodávky eSprinter či eVito v i -tém měsíci [kWh/100 km],

C_{el} udává cenu elektřiny [Kč/kWh],

η_{dob} je účinnost dobíjení [-].

Měsíční nájezdy jednotlivých dodávek M_{el} byly určeny na základě reálného harmonogramu rozvozu, jež byl popsán v kapitole 5.1. Ve výpočtu rovnice 6.3 bude tedy uvažováno, že by měsíční nájezdy elektromobilů byly stejné jako v současnosti. Tyto měsíční nájezdy jsou ukázány v tabulce 31. V případě vozu eVito bude počítáno s nájezdem 930 km, jež odpovídá dennímu nájezdu 30 km každý den v měsíci (stejně jako v měřené trase třetího závozu).

Vozidlo	Měsíční nájezd [km]
eSprinter 1	2523
eSprinter 2	2169
eSprinter 3	1028
eSprinter 4	705
eSprinter 5	901
eSprinter 6	1528
eVito	930

tabulka 31 – Měsíční nájezdy vozidel [8]

Účinnost dobíjení η_{dob} byla v rámci kapitoly 5 pro AC dobíjení počítána jako 0,95 a pro DC dobíjení jako 0,9. Vozy eSprinter č. 3 až 6 a eVito jsou dobíjeny pouze střídavým proudem, proto při výpočtu rovnice 6.3 bude u těchto vozidel kalkulováno s hodnotou $\eta_{dob} = 0,95$. První dvě dodávky eSprinter jsou však dobíjeny kombinací AC i DC. Účinnost dobíjení byla v těchto případech stanovena na základě poměru energií dodaných střídavým a stejnosměrným proudem dle sestaveného harmonogramu dobíjení, kdy situace 100% AC dobíjení odpovídá účinnosti 0,95 a situace 0% AC (a tedy 100% DC) dobíjení účinnosti 0,9. Výpočet je proveden v Příloze 5, kdy takto zjištěná účinnost odpovídá u vozů eSprinter č. 1 i 2 hodnotě $\eta_{dob} = 0,93$.

Spotřeby elektromobilů S_{el} byly zjišťovány podrobnou analýzou v kapitolách 2 a 3. Jelikož budou dodávky v pekárně v provozu celý rok, bude se také lišit jejich spotřeba v zimě a v ostatních obdobích, a to kvůli výkonu topení. Rozvoz se zapnutým topením bude uvažován v měsících listopad až březen. Jelikož byly spotřeby dodávky eSprinter počítány pro dvě hodnoty součinitele odporu valení, budou za spotřeby S_{el} vozidel eSprinter v této analýze dosazeny průměrné spotřeby pro normální (nedynamický) provoz vzhledem k hodnotám $f = 0,01$ a $f = 0,015$ z tabulky 8. U vozu eVito bude počítáno se spotřebami uvedenými v tabulce 26. Použité spotřeby vozidel do výpočtu rovnice 6.3 ukazuje následující tabulka.

Vozidlo (období)	Spotřeba [kWh/100 km]
eSprinter 35 kWh (duben – říjen)	25,4
eSprinter 35 kWh (listopad – březen)	31,7
eSprinter 47 kWh (duben – říjen)	26,4
eSprinter 47 kWh (listopad – březen)	32,7
eVito (duben – říjen)	18,2
eVito (listopad – březen)	22,7

tabulka 32 – Spotřeby vozidel pro účely ekonomické analýzy

Všechny uvedené hodnoty jsou tedy spotřeby bez uvažování dopravních komplikací, které se sice při rozvážce ojediněle vyskytnout mohou, ovšem na celkovou průměrnou spotřebu v měsíci mají minimální vliv. Jistý nárůst spotřeby lze očekávat také v letních měsících kvůli klimatizaci, toto zvýšení spotřeby je ovšem v porovnání s topením malé [45], a proto v tomto textu uvažováno není.

Výpočet bude dále proveden s cenou elektřiny C_{el} , jež by byla platná pro rok 2020 při dobíjení elektromobilů pod vlastním elektroměrem (detaily byly popsány v kapitole 5), jelikož s ohledem na znění smlouvy o elektrické přípojce pekárny Odkolek nemohla být cena elektřiny, jež by byla platná při dobíjení elektromobilů pod elektroměrem pekárny, pro účely této práce sdělena. Použitá hodnota C_{el} se tedy pravděpodobně o několik desítek haléřů liší od ceny, za kterou pekárna Odkolek nakupuje elektřinu pro běžný provoz (a jež by byla platná při dobíjení elektromobilů pod elektroměrem pekárny). Tato skutečnost nemá však vzhledem k vysokým pořizovacím nákladům vozidel na celkovou rentabilitu velký vliv.

Výpočet rovnice 6.3 byl proveden v každém měsíci v roce pro každou dodávku zvlášť a lze jej nalézt v Příloze 6.

Roční náklady na dobíjení elektromobilů jsou poté sumou nákladů všech dodávek za rok:

$$P_{el} = \sum_{q=1}^7 \sum_{i=1}^{12} P_{el_i}^q, \quad (6.4)$$

kde index i udává měsíc v roce a q udává index dodávky.

Zcela analogickým způsobem lze určit měsíční palivové náklady vznětových vozidel. Rovnice 6.5 tedy udává náklady na tankování nafty jedné dodávky v jednom měsíci.

$$P_{nafta} = \frac{M_{nafta} \cdot S_{nafta} \cdot C_{nafta}}{100}, \quad (6.5)$$

kde M_{nafta} udává měsíční nájezd jedné dodávky Sprinter či Vito, který je stejný jako u elektrických dodávek v tabulce 31 [km],

S_{nafta} udává spotřebu nafty dodávky Sprinter či Vito [l/100 km],

C_{nafta} udává cenu nafty [Kč/l].

Spotřeba paliva vozu Sprinter 314 CDI byla stanovena na hodnotě 13,55 l/100 km, a to na základě podkladů dodaných společností United Bakeries. Jedná se o skutečné spotřeby těchto dodávek při rozvozu po Praze získané jako průměr spotřeb za jeden měsíc. [8]

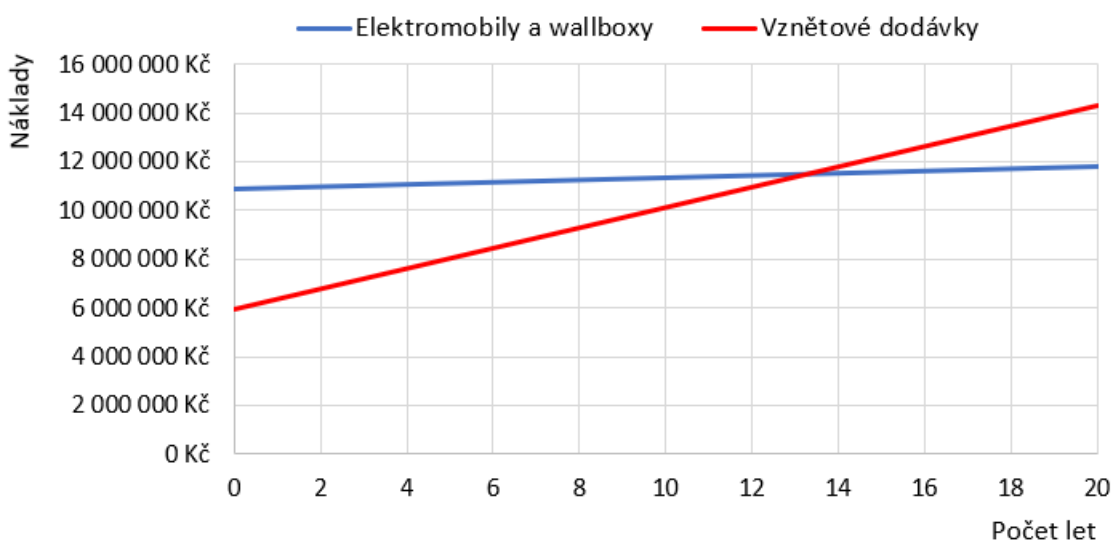
U dodávky Vito 114 CDI, jež není v současnosti v pekárně provozována, bude uvažována spotřeba 11,3 l/100 km, jež byla stanovena použitím následující úvahy. V případě vozu Sprinter 314 CDI je kombinovaná spotřeba v cyklu NEDC výrobcem udávána jako 7,8 l/100 km [46]. Poměr skutečné a NEDC spotřeby u vozu Sprinter 314 CDI tedy činí 1,74. Tato hodnota byla aplikována na dodávku Vito, jehož kombinovaná spotřeba v cyklu NEDC je rovna 6,5 l/100 km [47]. Bylo tedy předpokládáno, že poměr udávající zvýšení skutečné spotřeby oproti spotřebě v NEDC cyklu u dodávky Vito je stejný jako u vozu Sprinter.

Hodnota ceny nafty C_{nafta} , jež bude použita ve výpočtu, byla stanovena na základě průměrné ceny nafty v Praze k 1. 1. 2020 dle dat společnosti CSS. Její hodnota činí 32,24 Kč/l s DPH, tedy 26,64 Kč/l bez DPH. [48]

Roční náklady na pohonné hmoty jsou poté opět sumou palivových nákladů všech sedmi dodávek za celý rok.

$$P_{nafta} = \sum_{q=1}^7 12 \cdot P_{nafta}^q \quad (6.6)$$

Nyní byly popsány veškeré veličiny figurující v původních rovnicích 6.1 a 6.2 a je tedy možné tyto závislosti vyjádřit graficky. Obr. 43 znázorňuje porovnání nákladů na elektrické dodávky a wallboxy (bez státní dotace) s náklady na vznětová vozidla.



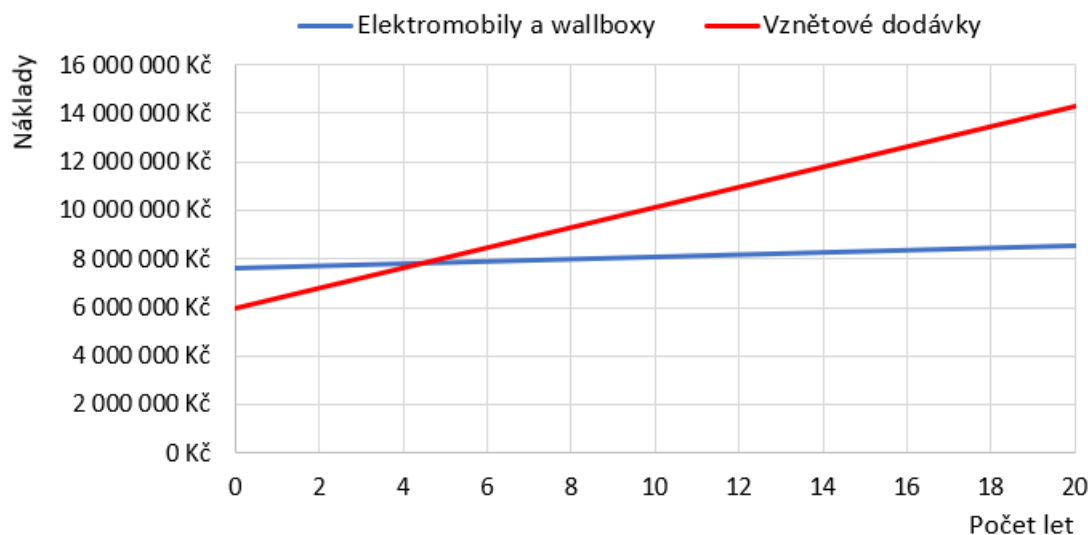
obr. 43 – Růst nákladů na elektromobilitu a vznětové dodávky v průběhu let

Z grafu je patrné, že se v tomto případě elektromobily a wallboxy finančně vyrovnají vznětovým vozidlům po zhruba 13 letech provozu. Během této poměrně dlouhé doby by navíc pravděpodobně u všech vozidel musela být vyměněna trakční baterie (z důvodu

nadměrného poklesu kapacity), což si vyžádá další náklady, které v provedené orientační analýze, jak již bylo odůvodněno, nebyly zohledněny. Ve skutečnosti by tedy doba návratnosti byla ještě vyšší. Na rentabilitnost investice mají také vliv další záležitosti, jako např. diskontní faktor, kdy je pro firmu výhodnější disponovat stejnými penězi v současnosti než v budoucnosti (kvůli inflaci a možnosti dříve investovat peníze, které mohou generovat další zisk), což v tomto případě hraje také v neprospěch elektromobility.

Z těchto důvodů lze pořízení a provozování elektromobilů v současné době v pekárně Odkolek hodnotit jako nerentabilní. Je zřejmé, že tato skutečnost je způsobena zejména vysokými pořizovacími náklady elektromobilů.

Finančně příznivěji vypadá situace, při které by byla při pořízení elektromobilů a wallboxů udělena popsaná státní dotace ve výši 30 % způsobilých výdajů. Porovnání nákladů v tomto případě ukazuje obr. 44.



obr. 44 – Náklady v případě 30% dotace na elektromobily a wallboxy

Z analýzy tedy vyplývá, že se elektromobily finančně vyrovnají vznětovým vozům po zhruba 4 letech provozu, tedy o přibližně 9 let dříve v porovnání s případem, při němž investice státem dotována nebude. Jak již bylo komentováno, v provedené studii byly zanedbány některé náklady, které mohou mít na rentabilitnost vliv, a to spíše v neprospěch elektromobility. Proto v případě, při kterém by v budoucnu existovala možnost státní dotace při pořízení elektromobilů, se společnosti United Bakeries vyplatí provést detailnější ekonomickou studii, v níž by byly tyto faktory započteny.

Výpočty provedené v rámci této kapitoly lze nalézt v Příloze 6.

7 Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat možnosti použití elektrických vozidel Mercedes-Benz eSprinter a eVito v rámci rozvozu pečiva v pekárenské společnosti United Bakeries, konkrétně v její pražské pekárně Odkolek. Za tímto účelem bylo nejprve provedeno několik měření základních jízdních dat (poloha, rychlost) při distribuci pečiva současnými vznětovými dodávkami Mercedes-Benz Sprinter. Na základě provedených měření byly následně vyhodnoceny předpokládané energetické spotřeby dodávky eSprinter při distribuci, a to za různých provozních podmínek, jako např. se zapnutým či vypnutým topením, nebo v dopravních zácpách. Bylo ukázáno, že na spotřebu má kromě zapnutého topení nemalý vliv také dynamika jízdy a je tedy vhodné se příliš dynamické jízdě s elektromobilem vyvarovat.

V druhé části práce byla zjišťována spotřeba elektromobilu Mercedes-Benz eVito na reálné rozvážecí trase, a to pomocí simulací na vozidlovém dynamometru. Ke správnému nastavení dynamometru byla s touto dodávkou provedena a vyhodnocena dojezdová zkouška. Zároveň byla korektnost nastavení dynamometru verifikována simulacemi cyklů NEDC a WLTC, kdy zde zjištěné dojezdy velmi dobře odpovídají údajům udávaným výrobcem vozidla. Z provedených zkoušek je patrné, že velice důležitým faktorem při provozování elektromobilu ve městě je využívání rekuperačního brzdění elektromotorem v co nejvyšší možné míře, které může výrazně snížit spotřebu vozidla. Z tohoto faktu také vyplývá toto praktické zjištění – při rozvozu pečiva je v elektromobilu výhodné nastavit úroveň rekuperace na maximální a rychlost vozidla regulovat jedním pedálem – pedálem akceleračního, při jehož vyslápnutí elektromotor začne brzdit vozidlo rekuperační. Brzdový pedál je vhodné využít pouze při výraznějším brzdění nebo při dobrzdění na nulovou rychlost.

V souladu se současným harmonogramem rozvozu pečiva byla poté navržena dobíjecí infrastruktura v pekárně, a to včetně rychlého dobíjení stejnosměrným proudem výkonem 20 kW, jehož použití mezi dvěma rozvozy, kdy je dodávka v pekárně zaparkována, je v některých případech pro umožnění distribuce nezbytné. Vzhledem k možnostem dobíjení dále vyplývá, že je aplikace elektromobilů eSprinter namísto konvenčních vozidel technicky možná na všech šesti městských linkách, kterými je v současné době rozváženo zákazníkům. To platí také pro vůz eVito, jehož použití pro rozvoz na trasách třetích, resp. ambulantních rozvozů je také z technického hlediska možné. Tato zjištění jsou mimo jiné dána také relativně malými denními nájezdy při distribuci a samotným stylem jízdy, pro něž jsou

charakteristické nízké rychlosti a časté rozjezdy. Aplikace elektromobility se z technického hlediska tedy jeví jako jistá alternativa ke konvenčním vozidlům, a to nejen pro účely pekárny Odkolek, ale obecně pro jakékoliv městské rozvážecí služby. V práci bylo dále také zjištěno, že je současný rezervovaný příkon pekárny schopen nabíjení celé flotily vozidel zajistit i při kritickém odběru běžných pekárenských zařízení a není tak v tomto ohledu třeba elektrickou přípojku modernizovat.

Z finančního hlediska se však v současné době aplikace elektromobilů nejeví jako rentabilní, a to zejména kvůli vysokým pořizovacím nákladům při koupi elektrických dodávek, které jsou o zhruba 75 % vyšší než u dodávek vznětových, a také při výstavbě soukromé dobíjecí infrastruktury. Z provedené analýzy, v níž byly hodnoceny pouze pořizovací náklady a náklady na pohonné hmoty, vyplývá, že se elektrické dodávky finančně vyrovnají vznětovým až zhruba po 13 letech provozu. Během této doby by navíc z důvodu poklesu kapacity musely být pravděpodobně vyměněny trakční baterie, což dobu návratnosti ještě zvýší. Řešením tohoto úskalí může být v budoucnu pro firmu přidělení státní dotace při nákupu elektromobilů a dobíjecí infrastruktury. Bylo ukázáno, že v případě 30% dotace z pořizovacích cen elektromobilů a wallboxů lze očekávat finanční návratnost po zhruba 4 letech. Zanedbáním nákladů při výměně trakční baterie se zde však v případě možnosti udělení dotace pro komplexní posouzení rentabilnosti jeví jako vhodné provedení detailnější ekonomické studie, v níž by byly tyto náklady započteny.

Námětem pro další práci může být verifikovat výpočty energetické náročnosti dodávky eSprinter v reálném provozu či pomocí simulací na vozidlovém dynamometru, což v této práci nemohlo být uskutečněno z důvodu, že toto vozidlo ještě nebylo v ČR k dispozici k zapůjčení. Jelikož se značná část odběratelů pekárny Odkolek nachází mimo Prahu, může být dalším námětem provedení analýzy použití hybridních dodávek v rámci rozvozů na mimoměstských trasách, jejichž délky bývají výrazně větší než v případě distribucí po Praze a jsou pro současné možnosti elektromobility příliš vysoké. Jako vhodné se zde z tohoto důvodu jeví použití právě hybridních vozidel, např. range-extenderů.

8 Seznam literatury

- [1] *NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2019/631 ze dne 17. dubna 2019, kterým se stanoví výkonnostní normy pro emise CO₂ pro nové osobní automobily a pro nová lehká užitková vozidla a kterým se zrušují nařízení (ES) č. 443/2009 a (EU) č. 510/2011.* In: . Evropská Unie, 2020, číslo 631. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:02019R0631-20200121&from=EN>
- [2] MORKUS, Josef, Jan MACEK, Miloslav EMRICH a Tomáš DIVIŠ. Některé důsledky hromadného rozšíření elektromobilů pro ČR. *Časopis Stavebnictví* [online]. 2019, (11), 30-39 [cit. 2020-03-29]. ISSN 1802-2030. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/online/dokumenty/pdf/stavebnictvi_2019_11.pdf
- [3] BĚNEK, Ondřej. Benzín, LPG, nebo elektřina? Velké srovnání pohonů na českých silnicích. *Čistou stopou Prahou* [online]. 2019 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.cistoustopou.cz/autem/clanek/benzin-lpg-nebo-elektrina-velke-srovnani-pohonu-na-ceskych-silnicich-1073>
- [4] Historie firmy Odkolek | United Bakeries. *United Bakeries* [online]. 2016 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.united-bakeries.cz/nase-znacky/fr-odkolek/historie-firmy-fr-odkolek/>
- [5] *Mapy.cz. Mapy.cz* [online]. Seznam.cz, 2020 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://mapy.cz/>
- [6] *PRE měření, a. s. - interní podklady.* Praha, 2020.
- [7] *Mercedes-Benz - interní podklady.* Praha, 2019.
- [8] *United Bakeries, a. s. - interní podklady.* Praha, 2019.
- [9] Auto. In: *United Bakeries* [online]. 2016 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.united-bakeries.cz/wp-content/uploads/2019/01/auto.jpg>
- [10] Mercedes-eSprinter-2. In: *Autobible.cz - Předjedeme vaše představy!* [online]. Mladá fronta a.s., 2020 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/wp-content/uploads/2018/05/Mercedes-eSprinter-2.jpg>
- [11] ŠKAROHLÍD, Marcel. *Zkoušení vozidel a jejich částí - podklady k přednáškám.* 2020. Dostupné z: <https://studium.fs.cvut.cz/>

- [12] ČÁBELKA, Miroslav. Úvod do GPS. In: *Fakulta — Přírodovědecká fakulta UK* [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/geografie/geoinformatika-kartografie/ke-stazeni/vyuka/gps/skriptum-uvod-do-gps>
- [13] Produktový list Car Scout. In: *Ústav bezpečnostních technologií a inženýrství FAKULTA DOPRAVNÍ* [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://security.fd.cvut.cz/wp-content/uploads/2018/03/CarScout-Master.pdf>
- [14] LUO, Jianwen, Kui YING a Jing BAI. Savitzky–Golay smoothing and differentiation filter for even number data. *Signal Processing* [online]. 2005, **85**(7), 1429-1434 [cit. 2020-03-30]. DOI: 10.1016/j.sigpro.2005.02.002. ISSN 01651684. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165168405000654>
- [15] Analýzy výškopisu. *Český úřad zeměměřický a katastrální* [online]. 2020 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://ags.cuzk.cz/dmr/>
- [16] MAREŠOVÁ, Jana. LASEROVÉ SKENOVACÍ SYSTÉMY. In: *Střední průmyslová škola stavební | SPŠS České Budějovice* [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: https://www.spsstavcb.cz/download2/3382_3738_cs_fot4_18_iss.pdf
- [17] Měření nadmořské výšky pomocí GPS. *TerraHunt - teambuildingové GPS programy pro firemní akce* [online]. [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <https://www.terrahunt.cz/blog/mereni-nadmorske-vysky-pomoci-gps>
- [18] Geodetické a kartografické základy. [Http://transformace.webst.fd.cvut.cz/](http://transformace.webst.fd.cvut.cz/) [online]. 2009 [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: http://transformace.webst.fd.cvut.cz/Iframe/Basics_iframe.htm
- [19] ACHTENOVÁ, Gabriela a Vlastislav TŮMA. *Vozidla s pohonem všech kol*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-236-7.
- [20] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory : hnací charakteristika : brzdění : odpruženost : řiditelnost, ovladatelnost : stabilita*. Brno, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [21] HEISLER, Heinz. *Advanced Vehicle Technology. 2*. Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 978-0-7506-5131-8.
- [22] HUCHO, Wolf-Heinrich. *Aerodynamics of Road Vehicles* [online]. Butterworth-Heinemann, 2013 [cit. 2020-03-29]. ISBN 9781483102078. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=psP8BAAAQBAJ&pg=PA104&lpg=PA104&dq=>

drag+coefficient++vans&source=bl&ots=Z0GdmD2Dom&sig=ACfU3U35OIVUr7pDEHtPDdIbDrVDtIxGZQ&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjykoSvzvbnAhWxUBUIHSV5DWUQ6AEwEXoECAkQAQ#v=onepage&q=drag%20coefficient%20%20vans&f=false

- [23] Hustota suchého vzduchu. *TZB-info - stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. 2020 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/70-hustota-sucheho-vzduchu>
- [24] BESSELINK, Igo, P.F. VAN OORSCHOT, E. MEINDERS a Henk NIJMEIJER. Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition. In: *The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition* [online]. China, 2010 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236609252_Design_of_an_efficient_low_weight_battery_electric_vehicle_based_on_a_VW_Lupo_3L
- [25] MACEK, Jan. *Spalovací motory*. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05015-6.
- [26] HOŘČÍK, Jan. Renault: elektromobil Zoe zvládne léto i zimu beze ztráty výkonu. *Hybrid.cz | Elektromobily, elektrokola, elektroskútry, auta na plyn CNG, LPG, testy* [online]. Chamanne s.r.o., 2019 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/renault-elektromobil-zoe-zvladne-leto-i-zimu-beze-zraty-vykonu>
- [27] Evito_02. In: *Autobible.cz - Předjedeme vaše představy!* [online]. Mladá fronta a.s., 2020 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: https://autobible.euro.cz/wp-content/uploads/2019/04/evito_02.jpg
- [28] KADIJK, Gerrit a Norbert LIGTERINK. *Road load determination of passenger cars* [online]. [cit. 2020-04-14]. Dostupné z: https://www.tno.nl/media/1971/road_load_determination_passenger_cars_tno_r10237.pdf
- [29] *VÁLCOVÁ ZKUŠEBNA AIP-ECDM 48L-4mot - ORIGINÁLNÍ NÁVOD K OBSLUZE*. Haldenwang, 2012.
- [30] WLTP a RDE: nové testy pro certifikaci spotřeby paliva, emisí CO₂ a znečišťujících látek. *Fiat Professional* [online]. [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: <https://www.fiatprofessional.com/cz/WLTP>

- [31] SVOBODA, Jiří. *Teorie dopravních prostředků: vozidla silniční a terénní*. Vyd. 4. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 80-010-3005-9.
- [32] MORBUS, Josef. Hybridní pohony: 4. část. In: *Studium - podklady pro studium na Fakultě strojní* [online]. 2020 [cit. 2020-06-14].
- [33] GENOVESE, Antonio, Fernando ORTENZI a Carlo VILLANTE. On the energy efficiency of quick DC vehicle battery charging. In: *MDPI - Publisher of Open Access Journals* [online]. 2015 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2032-6653/7/4/570/pdf>
- [34] Stav HDO. *PREdistribuce* [online]. 2018 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.predistribuce.cz/cs/potrebuji-zaridit/zakaznici/stav-hdo/>
- [35] CHLEBIŠ, Petr, Martin TVRDOŇ, Aleš HAVEL a Kateřina BAREŠOVÁ. Comparison of Standard and Fast Charging Methods for Electric Vehicles. *THEORETICAL AND APPLIED ELECTRICAL ENGINEERING* [online]. 2014, **12**(2) [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/112097/975-6095-1-PB.pdf?sequence=1>
- [36] Wallbox PRE 1F 3,6kW PLC REG Z M. *E-shop PRE měření* [online]. 2017 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://eshop.premereni.cz/wallbox-pre-1f-36kw-plc-reg-z-m>
- [37] Wallbox PRE 3F 11kW PLC REG Z M. *E-shop PRE měření* [online]. 2017 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://eshop.premereni.cz/wallbox-pre-3f-11kw-plc-reg-z-m>
- [38] Národní akční plán čisté mobility. In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. <https://www.mpo.cz/> [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/54377/62106/640972/priloha001.pdf>
- [39] Co je dobré vědět o odpočtu DPH?. *Finance.cz - daně, banky, kalkulačky, spoření, kurzy měn* [online]. 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: https://www.finance.cz/523353-narok-na-odpocet-dph/?_fid=y40g#survey-place
- [40] Jak na odpočet DPH u osobních automobilů. *YOURFIRM - Založení a prodej obchodních společností, virtuální sídlo* [online]. 2017 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.yourfirm.cz/on-line-poradna/prakticke-rady/jak-na-odpocet-dph-u-osobnich-automobilu/jak-na-odpocet-dph-u-osobnich-automobilu/>
- [41] Ceníky Mercedes-Benz Sprinter: od 1. 1. 2020. In: *Osobní vozy Mercedes-Benz* [online]. 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.mercedes->

- benz.cz/vans/content/dam/vans/czechia/ceniky/Cenik-Sprinter.pdf
- [42] Ceníky Mercedes-Benz Vito: od 1. 6. 2020. In: *Osobní vozy Mercedes-Benz* [online]. 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.cz/vans/content/dam/vans/czechia/ceniky/Cenik-Vito.pdf>
- [43] NÍZKOUHLÍKOVÉ TECHNOLOGIE - Elektromobilita - V. výzva. *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/cz/podnikani/dotace-a-podpora-podnikani/oppik-2014-2020/vyzvy-op-pik-2019/nizkoughlikove-technologie---elektromobilita---v--vyzva--251085/>
- [44] Výzva V programu podpory NÍZKOUHLÍKOVÉ TECHNOLOGIE – Elektromobilita. In: *Ministerstvo průmyslu a obchodu* [online]. 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/cz/podnikani/dotace-a-podpora-podnikani/oppik-2014-2020/vyzvy-op-pik-2019/2019/12/NUT-V--Vyzva-elektromobilita.pdf>
- [45] *Analýza důsledků elektrifikace pohonu osobních automobilů s benzínovým motorem*. Praha, 2018. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/79921/F2-BP-2018-Divis-Tomas-BP_Divis_2018.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [46] Sprinter Skříňová dodávka 314 CDI Extra dlouhý. *Daimler* [online]. 2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://voc.i.daimler.com/voc/cz_cs/stage/90763713ZM00001-0
- [47] The Mercedes-Benz Vito. In: *Mercedes-Benz* [online]. 2020 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: <https://tools.mercedes-benz.co.uk/current/vans/brochures/new-vito-panel-crew-van.pdf>
- [48] Průměrné ceny benzínu a nafty v ČR stoupají, na Nový rok skočily. *České noviny.cz* [online]. Česká tisková kancelář, 2020 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.ceskenoviny.cz/zpravy/prumerne-ceny-benzinu-a-nafty-v-cesku-stoupaji/1837816>
- [49] KOLÁŘ, Josef. Úvod do dopravní techniky. In: *Studium - podklady pro studium na Fakultě strojní* [online]. [cit. 2020-06-25].
- [50] GILLESPIE, Thomas. *Fundamentals of vehicle dynamics*. SAE International, 1992. ISBN 9781560911999.
- [51] Technical data powerMELA-C. In: *STW Technic* [online]. [cit. 2020-04-24].

- Dostupné z: <https://ec2.afe.myftpupload.com/wp-content/uploads/2015/08/powerMELA-c.pdf>
- [52] *Remy International HVH 250 -Series & 650 Volt.*
- [53] VDOLEČEK, František a Martin HALAJ. Nejistoty v měření II: nejistoty přímých měření. *Časopis Automa časopis pro automatizační techniku* [online]. 2016 [cit. 2020-03-29]. Dostupné z: http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10961.pdf
- [54] VDOLEČEK, František a Martin HALAJ. Nejistoty v měření III: nejistoty nepřímých měření. *Časopis Automa časopis pro automatizační techniku* [online]. 2016 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: http://www.automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10962.pdf
- [55] *Kalibrační listy k válcové zkušebně MAHA AIP-ECDM 48L-4mot.* Roztoky, 2018.
- [56] MAHA, . *Product Data Chassis Dynamometer: Model: ECDM 48.* 2004.
- [57] VDOLEČEK, František a Martin HALAJ. Nejistoty v měření I: vyjadřování nejistot. *Časopis Automa časopis pro automatizační techniku* [online]. 2016 [cit. 2020-06-17]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10960.pdf

Seznam obrázků

<i>OBR. 1 – SÍDLO PEKÁRNY ODKOLEK V PRAZE 5 [5]</i>	11
<i>OBR. 2 – SÍŤOVÝ DIAGRAM ZNÁZORŇUJÍCÍ POSTUP ŘEŠENÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (ZELENÉ BLOKY – VSTUPY; MODRÉ BLOKY – VÝSTUPY)</i>	15
<i>OBR. 3 – MERCEDES-BENZ SPRINTER 314 CDI [9]</i>	17
<i>OBR. 4 – MERCEDES-BENZ eSPRINTER [10]</i>	18
<i>OBR. 5 – ROZVÁŽECÍ LINKA HOLEŠOVICE – MĚŘENÍ 1 [5]</i>	19
<i>OBR. 6 – ROZVÁŽECÍ LINKA HOLEŠOVICE – MĚŘENÍ 2 [5]</i>	19
<i>OBR. 7 – ROZVÁŽECÍ LINKA CENTRUM 1 [5]</i>	20
<i>OBR. 8 – ROZVÁŽECÍ LINKA CENTRUM 2 [5]</i>	21
<i>OBR. 9 – UMÍSTĚNÍ JEDNOTKY CARSCOUT – POHLED ZE VNITŘ</i>	23
<i>OBR. 10 – UMÍSTĚNÍ JEDNOTKY CARSCOUT – POHLED Z VENKU</i>	23
<i>OBR. 11 – DEFINICE PARAMETRŮ SAVITZKY-GOLAY FILTRU V PROGRAMU DIADEM</i>	25
<i>OBR. 12 – UKÁZKA FILTRACE DAT SAVITZKY-GOLAY FILTREM</i>	26
<i>OBR. 13 – POROVNÁNÍ DVOU SAVITZKY-GOLAY FILTRŮ</i>	27
<i>OBR. 14 – PRŮJEZD POD MOSTEM (OBLAST VYZNAČENÁ MODRÝM KRUHEM)</i>	27
<i>OBR. 15 – TVORBA RYCHLOSTNÍHO PROFILU (PRŮJEZD POD MOSTEM)</i>	28
<i>OBR. 16 – UKÁZKA VYTVOŘENÉHO RYCHLOSTNÍHO PROFILU S KONSTANTNÍM ZRYCHLENÍM</i>	28
<i>OBR. 17 – UKÁZKOVÝ PŘÍKLAD V APLIKACI „ANALÝZY VÝŠKOPISU“</i>	29
<i>OBR. 18 – ZOBRAZENÍ SKLONU TRASY V APLIKACI „ANALÝZY VÝŠKOPISU“</i>	30
<i>OBR. 19 – ZOBRAZENÍ POLOHY A RYCHLOSTI VOZIDLA (S KONST. ZRYCHLENÍM) V PROGRAMU DIADEM</i>	32
<i>OBR. 20 – MERCEDES-BENZ eVITO [27]</i>	45
<i>OBR. 21 – MERCEDES-BENZ VITO 114 CDI</i>	46
<i>OBR. 22 – TRASA TŘETÍHO ZÁVOZU URČENÁ PRO SIMULACI NA VOZIDLOVÉM DYNAMOMETRU [5]</i> 47	
<i>OBR. 23 – POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT Z JEDNOTKY CARSCOUT</i>	47
<i>OBR. 24 – JÍZDNÍ CYKLUS TŘETÍHO ZÁVOZU PRO SIMULACI NA VOZIDLOVÉM DYNAMOMETRU</i>	48
<i>OBR. 25 – TRATĚ PRO DOJEZDOVOU ZKOUŠKU NA LETIŠTI PANENSKÝ TÝNEC [15]</i>	49
<i>OBR. 26 – PROFIL NADMOŘSKÉ VÝŠKY NA ZKUŠEBNÍ DRÁZE [15]</i>	49
<i>OBR. 27 – NAMĚŘENÁ DATA RYCHLOSTÍ Z DOJEZDOVÉ ZKOUŠKY V OBOU SMĚRECH</i>	50
<i>OBR. 28 – ZÁZNAMY Z DOJEZDOVÉ ZKOUŠKY VE SMĚRU „A-B“</i>	52
<i>OBR. 29 – ZÁZNAMY Z DOJEZDOVÉ ZKOUŠKY VE SMĚRU „B-A“</i>	53
<i>OBR. 30 – TVORBA VÝSLEDNÉHO RYCHLOSTNÍHO PROFILU PŘI DOJEZDOVÉ ZKOUŠCE</i>	53

<i>OBR. 31 – VÁŽENÍ DODÁVKY MERCEDES-BENZ eVITO.....</i>	<i>55</i>
<i>OBR. 32 – ZÁVISLOST JÍZDNÍCH ODPORŮ NA RYCHLOSTI VOZIDLA</i>	<i>57</i>
<i>OBR. 33 – DOBĚHY PŘI NASTAVOVÁNÍ VOZIDLOVÉHO DYNAMOMETRU NA DODÁVKU eVITO.....</i>	<i>59</i>
<i>OBR. 34 – POROVNÁNÍ VÝSLEDNÉHO DOBĚHU NA DYNAMOMETRU S DOJEZDOVOU ZKOUŠKOU ..</i>	<i>59</i>
<i>OBR. 35 – TESTOVÁNÍ DODÁVKY eVITO VOZIDLOVÉM DYNAMOMETRU</i>	<i>60</i>
<i>OBR. 36 – TESTOVÁNÍ DODÁVKY eVITO NA VOZIDLOVÉM DYNAMOMETRU.....</i>	<i>61</i>
<i>OBR. 37 – ZÁZNAM SIMULOVANÉHO NEDC CYKLU</i>	<i>61</i>
<i>OBR. 38 – ZÁZNAM SIMULOVANÉHO CYKLU WLTC 3B.....</i>	<i>62</i>
<i>OBR. 39 – VYZNAČENÉ BODY S NULOVÝM ZRYCHLENÍM PŘI POSLEDNÍM DOBĚHU.....</i>	<i>68</i>
<i>OBR. 40 – ZÁVISLOST VÝKONU VALIVÉHO ODPORU NA RYCHLOSTI.....</i>	<i>69</i>
<i>OBR. 41 – PŘÍKON PRO DOBÍJENÍ ELEKTROMOBILŮ BĚHEM KRITICKÉHO DNE.....</i>	<i>86</i>
<i>OBR. 42 – ODBĚR PEKÁRNY DNE 31. 7. 2019 A JEHO NAVÝŠENÍ PŘI DOBÍJENÍ ELEKTROMOBILŮ [6]</i> <i>.....</i>	<i>87</i>
<i>OBR. 43 – RŮST NÁKLADŮ NA ELEKTROMOBILITU A VZNĚTOVÉ DODÁVKY V PRŮBĚHU LET</i>	<i>95</i>
<i>OBR. 44 – NÁKLADY V PŘÍPADĚ 30% DOTACE NA ELEKTROMOBILY A WALLBOXY</i>	<i>96</i>
<i>OBR. I – HORNÍ A DOLNÍ MEZE VÝKONU VALIVÉHO ODPORU</i>	<i>VII</i>

Seznam tabulek

TABULKA 1 – TECHNICKÉ PARAMETRY VOZIDLA MERCEDES-BENZ SPRINTER 314 CDI [7], [8]..	16
TABULKA 2 – TECHNICKÉ PARAMETRY VOZIDLA MERCEDES-BENZ eSPRINTER [7].....	17
TABULKA 3 – DÉLKY TRAS A POČTY ZÁKAZNÍKU – LINKA HOLEŠOVICE.....	19
TABULKA 4 – DÉLKY TRAS A POČTY ZÁKAZNÍKU – LINKA CENTRUM 1	20
TABULKA 5 – DÉLKY TRAS A POČTY ZÁKAZNÍKU – LINKA CENTRUM 2	21
TABULKA 6 – ZJIŠTĚNÉ DRÁHOVÉ SPOTŘEBY ENERGIE NA KOLECH NA JEDNOTLIVÝCH LINKÁCH .	38
TABULKA 7 – ZJIŠTĚNÉ DRÁHOVÉ SPOTŘEBY ELEKTRICKÉ ENERGIE Z BATERIE	40
TABULKA 8 – VÝSLEDNÉ ZJIŠTĚNÉ SPOTŘEBY DODÁVKY eSPRINTER ZA RŮZNÝCH PODMÍNEK	43
TABULKA 9 – TECHNICKÉ PARAMETRY DODÁVKY MERCEDES-BENZ eVITO [7]	44
TABULKA 10 – NASTAVITELNÉ JÍZDNÍ REŽIMY DODÁVKY eVITO [7]	45
TABULKA 11 – NASTAVITELNÉ REKUPERAČNÍ REŽIMY DODÁVKY eVITO [7].....	46
TABULKA 12 – DOBY ZPOMALOVÁNÍ PŘI DOJEZDOVÉ ZKOUŠCE V PŘÍSLUŠNÝCH INTERVALECH RYCHLOSTÍ	54
TABULKA 13 – ABSORBOVANÉ VÝKONY PŘI DOJEZDOVÉ ZKOUŠCE	56
TABULKA 14 – VELIKOST JÍZDNÍCH ODPORŮ PŘI RŮZNÝCH RYCHLOSTECH JÍZDY	56
TABULKA 15 – NAMĚŘENÁ DATA BĚHEM JÍZDNÍCH CYKLŮ TRASY TŘETÍHO ZÁVOZU	63
TABULKA 16 – NAMĚŘENÁ DATA BĚHEM JÍZDNÍCH CYKLŮ NEDC	63
TABULKA 17 – NAMĚŘENÁ DATA BĚHEM JÍZDNÍCH CYKLŮ WLTC 3B	63
TABULKA 18 – SPOTŘEBY A DOJEZDY V JÍZDNÍM CYKLU TRASY TŘETÍHO ZÁVOZU.....	65
TABULKA 19 – SPOTŘEBY A DOJEZDY V CYKLECH WLTC A NEDC.....	65
TABULKA 20 – HODNOTY RYCHLOSTÍ A VÝKONŮ V BODECH S NULOVÝM ZRYCHLENÍM.....	69
TABULKA 21 – VÝSLEDNÉ ENERGIE NA KOLECH A NEJISTOTY V CYKLECH TRASY TŘETÍHO ZÁVOZU	70
TABULKA 22 – ZJIŠTĚNÉ ÚČINNOSTI REKUPERACE V JÍZDNÍM CYKLU TRASY TŘETÍHO ZÁVOZU ...	72
TABULKA 23 – PARAMETRY PRO VÝPOČET VLIVU STOUPÁNÍ A NÁKLADU NA SPOTŘEBU ENERGIE .	74
TABULKA 24 – VÝSLEDKY ANALÝZY NÁRŮSTU SPOTŘEBY ENERGIE Z BATERIE	75
TABULKA 25 – SROVNÁNÍ ENERGIE ZJIŠTĚNÝCH NA DYNAMOMETRU S ENERGIEMI ZÍSKANÝMI POMOCÍ INTEGRACE JÍZDNÍCH ODPORŮ	75
TABULKA 26 – ZJIŠTĚNÉ SPOTŘEBY DODÁVKY MERCEDES-BENZ eVITO	77
TABULKA 27 – HARMONOGRAM KRITICKY VYTÍŽENÉHO DNE	80
TABULKA 28 – KAPACITY BATERIE BĚHEM KRITICKÉHO DNE (BEZ DC DOBÍJENÍ)	81
TABULKA 29 – KAPACITY BATERIE BĚHEM KRITICKÉHO DNE (S UVAŽOVÁNÍM DC DOBÍJENÍ 20 kW)	

.....	83
TABULKA 30 – CENÍK DODÁVEK A POŘIZOVACÍ NÁKLADY [6], [7], [36], [37], [41], [42].....	91
TABULKA 31 – MĚSÍČNÍ NÁJEZDY VOZIDEL [8].....	93
TABULKA 32 – SPOTŘEBY VOZIDEL PRO ÚČELY EKONOMICKÉ ANALÝZY	93
TABULKA I – TECHNICKÉ PARAMETRY ELEKTROMOTORŮ.....	II
TABULKA II – UKÁZKA VÝSLEDKŮ NEJISTOT ENERGIÍ ZJIŠTĚNÝCH Z NAMĚŘENÝCH VÝKONU PŘI CYKLU.....	VI
TABULKA III – HODNOTY K URČENÍ NEJISTOT ENERGIÍ ZJIŠTĚNÝCH Z VÝKONU VALIVÉHO ODPORU	VII
TABULKA IV – VÝLEDNÉ ROZŠÍŘENÉ NEJISTOTY KLADNÝCH A ZÁPORNÝCH ENERGIÍ NA KOLECH IX	

Seznam příloh

Příloha 1: Určení součinitele rotujících hmot dodávky eSprinter

Příloha 2: Nejistoty měření na vozidlovém dynamometru

Příloha 3: Adresář „Spotřeby elektromobilu eSprinter“

Příloha 4: Adresář „Spotřeby elektromobilu eVito“

Příloha 5: Soubor „Dobíjecí infrastruktura.xlsx“

Příloha 6: Soubor „Ekonomická analýza.xlsx“

Příloha 1

Určení součinitele rotujících hmot dodávky eSprinter

Součinitel rotujících hmot závisí mimo jiné na celkovém převodovém poměru mezi motorem a koly vozidla, a tudíž se během jízdy s klasickými automobily se spalovacím motorem mění, jelikož dochází ke změnám zařazených rychlostních stupňů v převodovce. Pro osobní i nákladní automobil se spalovacím motorem bývá pro nejvyšší rychlostní stupeň (tedy nejnižší převodový poměr) udávána hodnota součinitele rotujících hmot v rozmezí 1,05 až 1,08 [19]. Pro první rychlostní stupeň bývá pro tyto osobní automobily udáván interval 1,2 – 1,5 [19], pro nákladní automobily pak 1,5 až 3 [19]. Elektromobil eSprinter v pohonném řetězci však převodovku nemá a disponuje pouze stálým převodem, tudíž je součinitel rotujících hmot pro tato vozidla konstantní.

Součinitel rotujících hmot lze přibližně určit ze vztahu I. [49]

$$\delta = 1 + \frac{J_m \cdot i_c^2}{m_0 \cdot r^2} + \sum_{i=1}^4 \frac{J_{K_i}}{m_0 \cdot r^2} \quad (\text{I})$$

kde J_m je moment setrvačnosti motoru,

i_c je celkový převodový poměr mezi motorem a koly vozidla,

m_0 je pohotovostní hmotnost vozidla,

J_{K_i} je moment setrvačnosti i -tého kola,

r je dynamický poloměr pneumatiky (předpokládá se, že všechny pneumatiky mají stejný dynamický poloměr).

Dynamický poloměr pneumatiky se za jízdy mění, jelikož závisí na svislém zatížení kola a také na teplotě, při dalších výpočtech tak bude namísto dynamického poloměru uvažován volný poloměr (nezatíženého a nerotujícího kola). Touto náhradou sice vznikne malá chyba, nicméně cílem výpočtu je zjistit součinitel rotujících hmot pouze přibližně, což je pro tyto účely postačující.

Poslední člen ve vztahu I (suma) udává vliv momentů setrvačnosti kol vozidla na celkový součinitel rotujících hmot. To znamená, že při rozpojené mechanické vazbě mezi motorem a koly (zařazené neutrální poloze převodového ústrojí) bude mít součinitel rotujících hmot velikost

$$\delta_{neutral} = 1 + \sum_{i=1}^4 \frac{J_{K_i}}{m_0 \cdot r^2} \quad (II)$$

Pohotovostní hmotnost dodávek eSprinter je známá (tabulka 2), volný poloměr pneumatiky však přesně ne, jelikož dodávka ještě není na trhu, nicméně vznětová verze Sprinter jezdí na pneumatikách 235/65 R 16 C, tudíž bude předpokládáno, že stejnými pneumatikami bude disponovat také eSprinter. Moment setrvačnosti kol však známý není. V publikaci [50] je však udávána hodnota součinitele rotujících hmot pro zařazenou neutrální polohu převodového ústrojí, a to ve výši 1,04. Jelikož není známá hodnota momentu setrvačnosti kol, bude pro účely dalších výpočtu uvažována hodnota $\delta_{neutral}$ jako 1,04.

Volný poloměr pneumatik 235/65 R 16 C figurující ve vztahu I byl zjištěn z následující rovnice

$$r = \frac{\Phi_{vnitrni}}{2} + \frac{p}{100} \cdot w = \frac{16 \cdot 25,4}{2} + \frac{65}{100} \cdot 235 \cong 356 \text{ mm} \quad (III)$$

kde $\Phi_{vnitrni}$ je vnitřní průměr pneumatiky a zároveň průměr ráfku [mm], kdy 1 palec odpovídá 25,4 milimetrům,

p je profil pneumatiky [mm],

w je šířka pneumatiky [mm].

Celkový převodový poměr mezi motorem a koly dodávky eSprinter je 13,2 [7]. Jediným neznámým parametrem ve výpočtu tedy zůstává moment setrvačnosti elektromotoru, který tak musel být pro účely tohoto přibližného výpočtu odhadnut. Tento odhad byl proveden na základě porovnání technických parametrů (maximální moment, výkon, otáčky) motoru dodávky eSprinter s katalogovými hodnotami elektromotorů, jež se používají pro pohon ve vozidlech. Zmíněné technické parametry dvou podobných motorů jsou spolu s technickými údaji elektromotoru dodávky eSprinter shrnuty v této tabulce.

Motor	Max. výkon	Max. moment	Max. otáčky	Moment setrvačnosti
eSprinter [7]	85 kW	295 Nm	11500 min ⁻¹	?
[51]	88 kW	338 Nm	6000 min ⁻¹	0,0493 kgm ²
[52]	158 kW	311 Nm	10000 min ⁻¹	0,054 kgm ²

tabulka I – Technické parametry elektromotorů

V případě motoru [52] je katalog uveden v Příloze 3.

Elektromotor [51] má podobný maximální výkon a moment jako motor v dodávce eSprinter a jeho moment setrvačnosti rotujících částí činí 0,0493 kgm². Motor [52] má naopak podobné maximální otáčky a také moment a jeho moment setrvačnosti činí 0,054 kgm². Na základě těchto skutečností tak byla pro účely tohoto přibližného výpočtu odhadnuta hodnota momentu setrvačnosti elektromotoru J_m dodávky eSprinter jako 0,05 kgm².

S touto hodnotou lze součinitel rotujících hmot vypočíst dle rovnice IV a V, kde je výpočet proveden pro obě verze dodávek eSprinter dle kapacity baterie.

$$\delta = \frac{J_m \cdot i_c^2}{m_0 \cdot r^2} + \delta_{neutral} = \frac{0,05 \cdot 13,2^2}{2460 \cdot 0,356^2} + 1,04 \cong 1,07 \quad (IV)$$

$$\delta = \frac{J_m \cdot i_c^2}{m_0 \cdot r^2} + \delta_{neutral} = \frac{0,05 \cdot 13,2^2}{2600 \cdot 0,356^2} + 1,04 \cong 1,07 \quad (V)$$

Z výpočtů je patrné, že součinitel rotujících hmot vychází po zaokrouhlení pro obě dodávky stejný a činí 1,07.

Příloha 2

Nejistoty měření na vozidlovém dynamometru

V této příloze budou určeny nejistoty energií na kolech pro jízdní cyklus trasy třetího závodu (tabulka 21). Ačkoliv bylo provedeno několik simulací tohoto jízdního cyklu, vždy byl test realizován trochu odlišným rychlostním profilem. Z tohoto důvodu zde nebude řešena nejistota typu A, jež bývá stanovena z opakovaně provedených měření nějaké neměnné veličiny, ale pouze nejistota typu B, jež je na rozdíl od nejistoty typu A vázána na známé a kvantifikovatelné zdroje. [53]

Jak již bylo řečeno v kapitole 4.4, síla na kolech byla měřena siloměrem na kyvně uloženém satoru každého asynchronního motoru. Obvodová rychlost kol, resp. obvodová rychlost válců, byla měřena pomocí rotačních snímačů umístěných na hřídeli každého motoru.

Energie na kolech uvedené v tabulce 21 byly získány pomocí součinu výkonu na kolech a času (rovnice 4.20 a 4.21). Tento výkon na kolech byl získán součtem naměřeného výkonu při jízdním cyklu a křivky výkonu valivého odporu. Rovnice popisující energii na kolech na jednom výpočetním úseku je zde přepsána do tvaru, se kterým bude dále pracováno:

$$E_{kolo_usek} = (P_{namereno} + P_f) \cdot t = P_{namereno} \cdot t + P_f \cdot t = E_{namereno} + E_f, \quad (VI)$$

Z této rovnice je patrné, že pro určení celkové nejistoty energie na kolech je nutné určit:

- a) nejistotu energie $E_{namereno}$ zjištěné z naměřených výkonů při jízdním cyklu,
- b) nejistotu energie E_f zjištěné z naměřeného výkonu valivého odporu.

Výsledná nejistota na jednom výpočetním úseku je poté dána součtem těchto dílčích nejistot. Analýza bude tedy dále rozčleněna dle uvedeného dělení.

a) Nejistota energie zjištěná z naměřených výkonů při jízdním cyklu

Tato energie je dle rovnice VI vypočtena součinem času a naměřeného výkonu na kolech při jízdním cyklu, jež je dán součinem naměřené síly na kolech a obvodové rychlosti kola. Platí tedy

$$E_{namereno} = P_{namereno} \cdot t = F_{namereno} \cdot v \cdot t. \quad (VII)$$

Nejistota tohoto nepřímého měření veličiny $E_{namereno}$ je dána vztahem VIII [54], ze kterého

vyplývá, že pro její určení je třeba znát standardní nejistotu měření síly $F_{namereno}$, rychlosti v a času t .

$$u_B(E_{namereno}) = \sqrt{A_{F_{namereno}}^2 \cdot u_B^2(F_{namereno}) + A_v^2 \cdot u_B^2(v) + A_t^2 \cdot u_B^2(t)}, \quad (\text{VIII})$$

kde A_i jsou citlivostní koeficienty síly $F_{namereno}$, rychlosti v a času t ,

$u_B(i)$ jsou standardní nejistoty typu B naměřené síly $F_{namereno}$, rychlosti v a času t .

Citlivostní koeficienty figurující v této rovnici lze určit z následujících vztahů.

$$A_{F_{namereno}} = \frac{\partial E_{namereno}}{\partial F_{namereno}} = \frac{\partial}{\partial F_{namereno}} (F_{namereno} \cdot v \cdot t) = v \cdot t, \quad (\text{IX})$$

$$A_v = \frac{\partial E_{namereno}}{\partial v} = \frac{\partial}{\partial v} (F_{namereno} \cdot v \cdot t) = F_{namereno} \cdot t, \quad (\text{X})$$

$$A_t = \frac{\partial E_{namereno}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (F_{namereno} \cdot v \cdot t) = F_{namereno} \cdot v. \quad (\text{XI})$$

Určení standardních nejistot každého zdroje bylo provedeno na základě údajů uvedených v aktuálních kalibračních listech válcové zkušebny a v dalších podkladech, jež byly poskytnuty přímo výrobcem vozidlového dynamometru – firmou MAHA. Tyto dokumenty je možné nalézt v Příloze 4.

Přesnost měření síly byla stanovena na základě údajů z produktového listu dynamometru, kde je uvedeno, že přesnost měření trakčních sil činí 0,05 % z rozsahu snímače [56]. Tento rozsah je dle kalibračního listu 15 000 N, tím pádem přesnost měření síly tedy činí 7,5 N. Takto určená přesnost měření byla konzultována a verifikována od výrobce dynamometru. Z kalibračních listů dále vyplývá, že zařízení, pomocí kterých je měřena rychlost a čas, jsou kalibrována a také že jsou tyto veličiny měřeny velmi přesně, tudíž jejich příspěvek k celkové nejistotě energie na kolech je malý.

Jelikož měření času a rychlosti je tedy velmi přesné a jediným významným zdrojem nejistoty je snímač síly, bude v dalších výpočtech uvažována pouze nejistota měření síly a nejistoty měření času a rychlosti budou zanedbány. Rovnice pro určení nejistoty energie $E_{namereno}$ se tedy zjednoduší do následujícího tvaru.

$$u_B(E_{namereno}) = \sqrt{A_{F_{namereno}}^2 \cdot u_B^2(F_{namereno})} = v \cdot t \cdot u_B(F_{namereno}) , \quad (\text{XII})$$

přičemž pro standardní nejistotu typu B měření síly při jízdním cyklu platí (číslem 4 je čísel násoben z toho důvodu, že se jedná o nejistotu pro měření na 4 kolech)

$$u_B(F_{namereno}) = \frac{4 \cdot Z_{max}}{k} = \frac{4 \cdot 7,5 \text{ N}}{\sqrt{3}} \cong 17,32 \text{ N} , \quad (\text{XIII})$$

kde Z_{max} je výrobcem udávaná přesnost snímače síly,

k je součinitel vycházející ze zákona rozdělení, ve výpočtu je uvažováno rovnoměrné rozdělení [57].

Z naměřených dat ze simulací jízdních cyklů trasy třetího závozu tak byla pro každou naměřenou hodnotu rychlosti a času (tedy pro každou vypočtenou hodnotu energie na kolech) určena nejistota energie na kolech, a to dle vztahů XII a XIII. Ukázkou výsledných nejistot energií zjištěných z naměřených výkonů při jízdním cyklu uvádí tabulka II. Nejistoty jsou vyjádřené v jednotkách joule, jelikož jsou její hodnoty v jednotlivých časových okamžicích příliš malé pro použití kilowatthodin.

Čas [s]	Rychlost [km/h]	Nejistota síly na kole [N]	Nejistota energie [J]
1542,1	23,345	17,32	11,23
1542,2	23,745	17,32	11,42
1542,3	23,948	17,32	11,52

tabulka II – Ukázka výsledků nejistot energií zjištěných z naměřených výkonů při cyklu

b) Nejistota energie zjištěná z naměřeného výkonu valivého odporu

Průběh výkonu valivého odporu byl určen ze dvou naměřených hodnot výkonů a rychlostí při protáčení vozidlem na dynamometru, viz kapitola 4.5.2, kdy tyto výkony a rychlosti lze pro rekapitulaci nalézt v tabulce III. V ní je také uvedena síla na kolech, jež odpovídá těmto výkonům a rychlostem dle rovnice VII. V dalších úvahách nebude opět uvažována nejistota měření rychlosti a času, z důvodu komentovaných v části a) této přílohy, ovšem hodnotám sil na kolech, ze kterých byl výkon valivého odporu zjištěn, nejistotu přiřadit lze.

Na základě této nejistoty síly lze vypočítat horní a dolní mez naměřených výkonů uvedených

v tabulce III, a to dle následujících vztahů.

$$P_{f_horni} = (F_{namereno} + u_B(F_{namereno})) \cdot v, \quad (XIV)$$

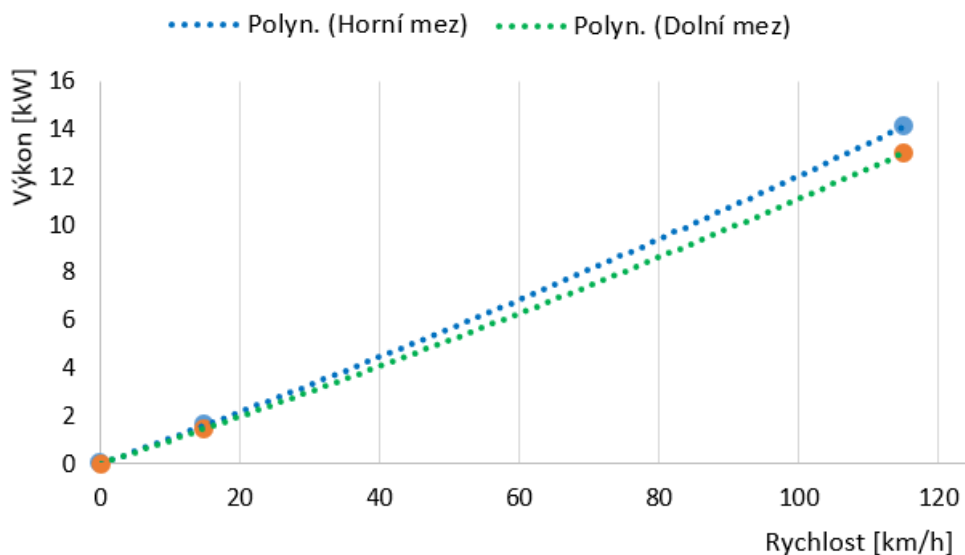
$$P_{f_dolni} = (F_{namereno} - u_B(F_{namereno})) \cdot v, \quad (XV)$$

kde $F_{namereno}$ je síla na kolech (zjištěná z naměřeného výkonu na kolech), viz tab. 25, $u_B(F_{namereno})$ je nejistota měření síly dle rovnice XIII.

Rychlost v [km/h]	Výkon na kolech P_f [kW]	Síla na kolech $F_{namereno}$ [N]	Nejistota síly na kolech $u_B(F_{namereno})$ [N]	Horní mez výkonu P_{f_horni} [kW]	Dolní mez výkonu P_{f_dolni} [kW]
14,8225	1,53	371,6	17,32	1,6	1,46
115,0175	13,55	424,1	17,32	14,1	13,0

tabulka III – Hodnoty k určení nejistot energií zjištěných z výkonu valivého odporu

Skutečné velikosti výkonů valivého odporu při dvou uvedených rychlostech se tedy mohly vyskytovat mezi dolní a horní mezí. Křivka závislosti výkonu valivého odporu může mít tím pádem také horní a dolní mez, jak ukazuje obr. I, kdy byla horními a dolními hodnotami výkonů z tabulky III proložena parabola pomocí metody nejmenších čtverců.



obr. I – Horní a dolní meze výkonu valivého odporu

Předpis funkce horní meze výkonu valivého odporu (modrá křivka) je

$$P_{f_horni}(v) = 0,000146 \cdot v^2 + 0,105875 \cdot v . \quad (\text{XVI})$$

Předpis funkce dolní meze výkonu valivého odporu (zelená křivka) je

$$P_{f_dolni}(v) = 0,000146 \cdot v^2 + 0,096252 \cdot v . \quad (\text{XVII})$$

Nejistotu energie zjištěné z výkonu valivého odporu lze poté určit z rovnice XVIII, kdy čas t opět odpovídá jedné desetinně sekundy.

$$u_B(E_f) = \frac{(P_{f_horni}(v) - P_{f_dolni}(v)) \cdot t}{2} . \quad (\text{XVIII})$$

Tento výpočet byl opět proveden pro veškeré naměřené hodnoty rychlosti a času během jízdniho cyklu.

Nyní jsou tedy známy velikosti nejistot energií zjištěných z naměřených výkonů při jízdniím cyklu a také energií zjištěných z naměřeného výkonu valivého odporu.

Je zřejmé, že celková nejistota je součtem těchto dvou dílčích nejistot:

$$u_B(E_{kolo_usek}) = u_B(E_{namereno}) + u_B(E_f) , \quad (\text{XIX})$$

Pro standardní nejistotu kladných energií na kolech, jež jsou uvedeny v tabulce 21, platí, že je dána součtem všech nejistot v úsecích, na nichž je energie na kolech kladná:

$$u_B(E_{kolo_kladne}) = \sum_{q=1}^w (u_B(E_{kolo_usek})_q) \quad (\text{XX})$$

$$pro (E_{kolo_usek})_q > 0 ,$$

kde q označuje jednotlivé úseky, jež jsou dlouhé jednu desetinu sekundy,

w je celkový počet úseků

Analogicky lze definovat standardní nejistotu záporných energií na kolech, a to dle následujícího vztahu.

$$u_B(E_{kolo_zaporne}) = \sum_{q=1}^w (u_B(E_{kolo_usek})_q) \quad (XXI)$$

$$pro (E_{kolo_usek})_q < 0 ,$$

Tyto hodnoty standardních nejistot energií budou dále rozšířeny koeficientem rozšíření $k = 2$, a to proto, aby výsledek definoval skutečnou hodnotu měřené veličiny s vyšší pravděpodobností. Pro rozšířené nejistoty tedy platí

$$U(E_{kolo_kladne}) = u_B(E_{kolo_kladne}) \cdot k = u_B(E_{kolo_kladne}) \cdot 2 , \quad (XIX)$$

$$U(E_{kolo_zaporne}) = u_B(E_{kolo_zaporne}) \cdot k = u_B(E_{kolo_zaporne}) \cdot 2 , \quad (XIX)$$

Výsledky takto provedeného výpočtu jsou pro všechny cykly trasy třetího závozu shrnuty v tabulce IV. Popsaný výpočet vedoucí k určení nejistot je také možné nalézt v Příloze 4.

Číslo simulace	Kladné energie na kolech [kWh]	Nejistota kladné energie [kWh]	Záporné energie na kolech [kWh]	Nejistota záporné energie [kWh]
1	5,30	0,39	-3,2	0,2
2	5,36	0,39	-3,23	0,19
3	5,36	0,39	-3,24	0,19
4	5,39	0,39	-3,27	0,19
5	5,34	0,38	-3,2	0,2
6	5,34	0,39	-3,22	0,19

tabulka IV – Výsledné rozšířené nejistoty kladných a záporných energií na kolech

Tato rozšířená nejistota s koeficientem rozšíření 2 pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %.