

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

12120 ÚSTAV AUTOMOBILŮ, SPALOVACÍCH MOTORŮ A KOLEJOVÝCH VOZIDEL



DIPLOMOVÁ PRÁCE

KONCEPČNÍ NÁVRH ELEKTRICKÉHO POHONU KOMUNÁLNÍHO VOZIDLA

VYPRACOVAL :

BC. MICHAL ZBOJOVSKÝ

VEDOUcí PRÁCE:

ING. JOSEF MORKUS, CSc.

PRAHA 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zbojovský** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **419968**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající 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:

Koncepční návrh elektrického pohonu komunálního vozidla

Název diplomové práce anglicky:

Conceptual design of electric drive of a municipal vehicle

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši pohonných ústrojí komunálních vozidel. Pro vybrané vozidlo zjistěte typický pracovní cyklus a stanovte jeho výkonovou a energetickou náročnost. Vyberte vhodný elektromotor a navrhnete kapacitu trakční baterie s ohledem na charakter provozu, pracovní podmínky a možnosti rekuperace energie. Vypracujte koncepční návrh pohonu zvoleného vozidla.

Seznam doporučené literatury:

Konzultace u provozovatelů komunálních vozidel, internet, podklady vybraného výrobce elektromotorů

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Josef Morkus, CSc., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

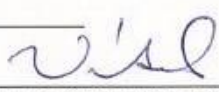
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **18.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **10.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce:


Ing. Josef Morkus, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

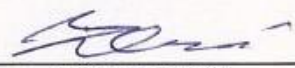

doc. Ing. Oldřich Vitek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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.

30.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Josefa Morkusa, CSc. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Prahe dňa

.....

Bc. Michal Zbojovský

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval pánovi Ing. Josefovi Morkusovi, CSc. za vedenie tejto diplomovej práce, cenné rady a ochotu pri konzultáciách. Ďalej by som chcel poďakovať Ing. Adamovi Podhrázskemu a Ing. Františkovi Pechovi za konzultácie pri výbere a návrhu elektrického pohonu pre navrhované komunálne vozidlo. Pražským službám a.s. za poskytnuté materiály z merania jazdných cyklov a veľkú ochotu pomôcť. Nakoniec by som rád poďakoval celej mojej rodine a všetkým priateľom za pomoc a podporu počas celého štúdia.

Anotačný list

| | |
|-----------------------|--|
| Meno autora: | Bc. Michal Zbojovský |
| Názov DP: | Koncepční návrh elektrického pohonu komunálního vozidla |
| Anglický název: | Conceptual design of electric drive of a municipal vehicle |
| Rok: | 2019 |
| Študijný program: | Strojní inženýr |
| Odbor štúdia: | Dopravní, letadlová a transportní technika |
| Ústav: | Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel |
| Vedúci DP: | Ing. Josef Morkus, CSc |
| Konzultant: | Ing. Josef Morkus, CSc |
| Bibliografické údaje: | počet stran 56 počet obrázků: 21 počet tabulek: 15 počet příloh 6 |
| Klíčové slova | Elektromobil, Elektrický pohon, Komunálne vozidlo, Batéria, Energetická náročnosť, Jazdný cyklus |
| Keywords | Electric car, Electric drive, Communal vehicle, Battery, Energy performance, Drive cycle |

ABSTRAKT

Táto práca sa zaoberá koncepčným návrhom elektrického pohonu komunálneho vozidla so snahou ponechať čo najviac možných dielov z pôvodnej spaľovacej verzie vozidla .

Z dôvodu využitia vozidiel a určení jazdného cyklu, v ktorom bude navrhované vozidlo pracovať, bola k jeho návrhu spracovaná rešerš a prieskum trhu s elektrickými úžitkovými vozmi. Pre správny návrh elektrického pohonu bolo potrebné analyzovať profil trate a následne z toho vypočítať jazdné odpory, ktoré musí vozidlo prekonať pri práci. Z nich boli dopočítané všetky potrebné parametre pre výber vhodného elektromotora a energetická spotreba vozidla, na ktorú bola navrhovaná kapacita batérie.

Z navrhnutých komponentov pre elektrický pohon bol zostavený 3D model koncepčného návrhu, ktorý nahradil spaľovací pohon vozidla elektrickým.

ABSTRACT

This thesis focuses on the conceptual design of an electric drive for a communal vehicle whilst aiming to keep as many parts as possible from the original combustion version of the vehicle.

Due to the use of the vehicle and determination of the driving cycle, in which the designed vehicle will operate, a recherche and research of the electric utility vehicle market was prepared. For the correct design of the electric drive it was necessary to analyse the track profile and calculate the driving resistances that the vehicle will have to overcome during operation. From these, all required parameters for the selection of a suitable electric motor and the vehicle's energy consumption, for which the battery capacity was chosen, were calculated.

A 3D model of the conceptual design, which replaces the combustion drive with an electric drive, was created from the designed components of the electric drive.

Obsah

| | |
|---|----|
| ÚVOD..... | 1 |
| 1 HISTÓRIA ELEKTROMOBILU | 2 |
| 2 KOMUNÁLNE VOZIDLÁ..... | 4 |
| 2.1 Komunálne elektrické vozidlá | 5 |
| 2.1.1 MEGA e-Worker | 6 |
| 2.1.2 Goupil | 6 |
| 2.1.3 Street Scooter..... | 7 |
| 2.1.4 Alké..... | 7 |
| 2.2 Komunálne služby | 8 |
| 2.3 Pracovná trasa vozidla | 8 |
| 2.4 Multicar M27..... | 9 |
| 3 MERANIE HODNÔT VOZIDLA..... | 11 |
| 4 VYHODNOTENIE MERANIA..... | 12 |
| 4.1 Zrýchlenie..... | 12 |
| 4.2 Dráha | 12 |
| 4.3 Profil trate..... | 13 |
| 5 JAZDNÉ ODPORY | 14 |
| 5.1 Odpor valenia | 14 |
| 5.2 Odpor vzduchu..... | 14 |
| 5.3 Odpor stúpania..... | 15 |
| 5.4 Odpor zrýchlenia | 15 |
| 5.5 Hmotnosť vozidla | 16 |
| 5.5.1 Hmotnosť elektrickej verzie vozidla | 16 |
| 5.5.2 Zmena hmotnosti od naložky košov..... | 17 |
| 6 ENERGIA NA KOLESÁCH | 19 |
| 6.1 Energia na prekonanie odporu valenia..... | 19 |
| 6.2 Energia na prekonanie odporu vzduchu | 20 |
| 6.3 Energia na prekonanie odporu zrýchlenia | 21 |
| 6.4 Energia na prekonanie odporu zo stúpania..... | 21 |
| 6.5 Celková energia na kolesách | 22 |
| 7 ÚČINNOSTI | 23 |

| | | |
|--------|--|----|
| 8 | KRÚTIACI MOMENT, VÝKON..... | 24 |
| 8.1 | Maximálny krútiaci moment..... | 25 |
| 8.2 | Výkon | 25 |
| 9 | ELEKTROMOTOR..... | 27 |
| 9.1 | Účinnosť elektromotoru | 30 |
| 9.2 | Overenie elektromotora pre maximálnu rýchlosť vozidla..... | 30 |
| 10 | BATÉRIA | 31 |
| 10.1 | Batériové články | 31 |
| 10.2 | Návrh batérie..... | 32 |
| 10.2.1 | Počet článkov | 32 |
| 10.2.2 | Kapacita článkov..... | 32 |
| 10.3 | Účinnosť batérie | 33 |
| 11 | CELKOVÁ SPOTREBA ENERGIE | 34 |
| 12 | KONCEPČNÝ NÁVRH MODELU VOZIDLA | 37 |
| 13 | ANALÝZA CITLIVOSTI A ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV | 40 |
| 13.1 | Predpokladaná cena | 41 |
| 14 | ZÁVER..... | 44 |
| | ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV | 45 |
| | ZOZNAM OBRÁZKOV | 47 |
| | ZOZNAM TABULIEK..... | 48 |
| | ZOZNAM ZDROJOV | 49 |
| | PRÍLOHY..... | 51 |

Úvod

Jednou z najväčších výziev 21. storočia je zmierniť negatívne vplyvy dopravy, ktorá sa podieľa na tvorbe skleníkových plynov, znečistení ovzdušia, hluku a súčasne zabezpečiť pozitívne aspekty mobility. V dnešnej dobe je doprava v Európe zodpovedná za škodlivé hladiny látok znečisťujúcich ovzdušie a za štvrtinu emisií skleníkových plynov v EÚ. Najväčší podiel na znečistení má nákladná a osobná automobilová doprava. Táto problematika vedie k hľadaniu nových možností zníženia emisií a efektívnejšiemu využitiu energie. Jednou z relatívne starých možností riešenia je využívanie elektrických a hybridných pohonov vo vozidlách, ktoré využívajú elektrickú energiu z akumulátorov. Táto technológia vznikla už koncom 19. storočia ale veľmi rýchlo sa dostavala do pozadia z dôvodu nástupu zlepšovania spalovacích motorov. Aj napriek tomu, že myšlienka elektrického a hybridného pohonu má veľký potenciál, nebola dlhú dobu výrazne používaná. Znovu sa k nej dostávame v posledných desaťročiach, kedy začíname riešiť ropné krízy, spotrebu paliva a samotný dopad na životné prostredie. Práve preto sa človek vracia k obnoviteľným zdrojom energie. Jedným z týchto zdrojov je aj elektrická energia, ktorú dokážeme vyrobiť viacerými spôsobmi. Bez emisným spôsobom napríklad vo vodných, slnečných či veterných elektrárňach. Veľký vplyv na využitie tohto spôsobu stavby elektrárni má geografická poloha. Druhým spôsobom výroby elektrickej energie sú elektrárne, ktoré spaľujú nerastné suroviny. Tie však produkujú určité množstvo emisií a odpadu. Aj napriek tomu, takýto spôsob výroby elektrickej energie ma jednu výhodu, a to, že elektrárne sú stavané mimo veľkých miest, kam sa tieto škodliviny nedostávajú.

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou nahradenia elektrického pohonu u komunálnych vozidiel spaľovacím motorom, ktoré pracujú v mestskom prostredí na údržbe čistoty a mestskej zelene. Pojednáva o samotnom návrhu, jeho využití, energetickej náročnosti, koncepčnom návrhu a výhodách a nevýhodách v premávke.

1 História elektromobilu

Samotná história elektromobilu je staršia ako koncept automobilu poháňaný spaľovacím motorom. Prvý zdokumentovaný elektromobil pochádza z holandského Groningenu, ktorý navrhol profesor Sibrandus Stratingh a v roku 1835 bol skonštruovaný jeho asistentom Christopherom Beckerom. Prvý prakticky použiteľný elektromobil však postavil až Thomas Parker v roku 1884. [1]



Obr. 1.1 Elektromobil postavený Thomasom Parkerom v roku 1884 [1]

Už okolo roku 1900 bol zostavený prvý elektromobil, ktorý dosahoval hranicu rýchlosti 100km/h. Začiatkom 20.storočia jazdili ulicami aj spaľovacie a parné automobily. Napriek tomu boli elektromobily najpredávanejším typom vozidiel. Elektromobily tej doby mali množstvo výhod oproti svojej konkurencii. Netrpeli na vibrácie, neboli hlučné, nemali problémy s radením a nemuseli sa štartovať kľukou (spaľovacie autá) a ani nemali dlhú nábehovú dobu ako parné automobily (v chladnom počasí trvalo aj 45 minút, kým boli schopné jazdy). Vtedajšie elektromobily dosahovali rýchlosti v priemerne 32km/h a samozrejme neprodukovali žiadne splodiny. [2]

Najväčší rozmach elektromobilov nastal okolo roku 1911, kedy bolo registrovaných dvakrát viac elektromobilov ako automobilov so spaľovacím motorom. Táto prevaha

elektromobilov skončila hneď v nasledujúcom roku, kedy bol vynájdený štartér, ktorý umožňoval pohodlné štartovanie, kde človek nemusel roztáčať motor kľukou. Tento vývoj využil aj Henry Ford, ktorý zahájil masovú výrobu automobilov modelu Ford T pre širokú verejnosť. Ceny elektromobilov boli o 2/3 drahšie ako ceny benzínových automobilov. Ďalším dôvodom bola výstavba diaľnic, kde elektromobily strácali nároky na vyšší dojazd a takisto veľký nález ropy v Texase, ktorý spôsobil pokles cien benzínu. Prvé náznaky návratu elektromobilov na trh začínajú v 70. rokoch 20 storočia, kedy arabské ropné embargo vyhnalo ceny ropy na rekordné hodnoty. Štáty začali v tom období dotovať vývoj elektromobilov, avšak žiadny z nich sa výraznejšou mierou nedokázal presadiť. Keď klesli ceny benzínu, všetko sa vrátilo do „emisného“ štandardu. Po príchode celosvetovej hospodárskej krízy v roku 2008 môžeme hovoriť o tretej ére elektromobility, ktorá rozvírila povedomie a trend až do dnešnej doby. [1]

2 Komunálne vozidlá

Za komunálne vozidlá sú považované všetky multifunkčné úžitkové vozidlá, ktoré sú určené na rôzne pracovné činnosti v oblasti komunálneho hospodárstva, údržbu cestných komunikácií, v stavebníctve a ďalších pracovných činnosti. Hlavne tam, kde priestorové podmienky nedovoľujú nasadenie väčších a výkonnejších motorových vozidiel. Prevažne tieto vozy spadajú do kategórie *N1*. Jedná sa o malé nákladné vozidlá, ktorých najvyššia prípustná hmotnosť nepresahuje 3500 kg. Veľkou výhodou týchto vozidiel v danej kategórii je aj to, že k riadeniu nepotrebnú špeciálne zaškolenú obsluhu, ktorej stačí základný vodičský preukaz typu B. Komunálne vozidla sa obecné rozdeľujú do viacerých variánt:

- Valníkové komunálne vozidlá: slúžia predovšetkým na prepravu materiálu, kusového tovaru, pracovného náradia a podobne. Štandardne sú tieto vozy vybavené možnosťou sklápania korby. Majú širokú škálu využitia v oblasti logistiky.
- Komunálne vozy s nadstavbou: do tejto kategórie sa zaradzujú vozy s prídavnou technológiou na zber komunálneho odpadu, umývacie a polievacie nadstavby určené na umývanie ulíc, chodníkov, dopravných značiek, zvodidiel, fasád, ošetrovanie zelených pásov, široký sortiment údržby zelene a rôzne hydraulické zariadenia a plošiny.
- Univerzálne vozidlo s ovládaním predradených a vlečných agregátov: patria sem posypové vozy so snežným pluhom alebo kefami, určené na údržbu vozoviek a chodníkov. Vzadu sú prevažne nainštalované posypové zariadenie na rozmetanie soli a štrku alebo vysávač na zber prachu, lístia a nečistôt. [3]



Obr. 2.1 Multicar M25 [4]

Jedným z najznámejších výrobcov komunálnych vozidiel v Európe je značka *Multicar*. Firma ma bohatú históriu a je na trhu už vyše 50 rokov. Za ten čas vytvorila mnoho zaujímavých modelov, ktoré sa predávali do celej Európy. Najúspešnejším modelom v celej histórii automobilky sa stal model *Multicar M25*, ktorého bolo vyrobených viac ako 100 tisíc kusov. Vozidlo už malo pohon všetkých štyroch kolies a operovalo redukčnou prevodovkou.

2.1 Komunálne elektrické vozidlá

S príchodom novej vlny elektromobility sa v dnešnej dobe každá automobilka snaží vyrábať okrem svojich „bežných“ osobných automobilov so spaľovacím motorom aj osobné elektromobily, ktoré sa snažia neustále vylepšovať za účelom vyššieho dojazdu a efektívnejšieho využitia trakčného pohonu. Tieto požiadavky vznikli z návrhu vlád a noriem na životné prostredie a ekvivalentne aj zvyšujúcim sa záujmom ľudí o automobily s elektrickým pohonom. Výnimkou nie sú ani výrobcovia zameraní na výrobu nákladných a úžitkových vozidiel. Na trhu sa začína objavovať čoraz väčšia škála úžitkových vozidiel s elektrickým pohonom.

Pre porovnanie v tejto oblasti bola zostavená rešerš, ktorá porovnáva štyroch výrobcov, ktorí sa najviac približujú funkčnosťou a viac účelnosťou komunálnym vozidlám. Jedna sa o modely:

2.1.1 MEGA e-Worker


Obr. 2.2 MEGA e-Worker [5]

| | |
|----------------------------|----------------------|
| Název | <i>MEGA e-Worker</i> |
| Dojazd | 100 km |
| Výkon elektromotoru | 11,5 kW |
| Max. rychlost | 40 km/h |
| Kapacita batérie | 17,3 kWh |
| Typ batérie | 2V, olovená 240Ah |
| Úžitková hmotnosť | 872 kg |
| Celková hmotnosť | 2040 kg |

Tabuľka 1 :Základné technické údaje MEGA e-Worker [5]

2.1.2 Goupil


Obr. 2.3 Goupil G5 [6]

| | |
|----------------------------|------------------|
| Název | <i>Goupil G5</i> |
| Dojazd | 200 km |
| Výkon elektromotoru | 19,7 kW |
| Max. rychlost | 70 km/h |
| Kapacita batérie | 19,2 kWh |
| Typ batérie | Lithium LiFePo4 |
| Úžitková hmotnosť | 1100 kg |
| Celková hmotnosť | 2380 kg |

Tabuľka 2: Základné technické údaje Goupil G5 [6]

2.1.3 Street Scooter



Obr. 2.4 Street Scooter [7]

| | |
|----------------------------|---------------|
| Název | StreetScooter |
| Dojazd | 118 km |
| Výkon elektromotoru | 38 kW |
| Max. rychlost | 85 km/h |
| Kapacita batérie | 20 kWh |
| Typ batérie | Lithium |
| Úžitková hmotnosť | 720 kg |
| Celková hmotnosť | 2180 kg |

Tabuľka 3: Základné technické údaje Street Scooter [7]

2.1.4 Alké



Obr. 2.5 Alké ATX [8]

| | |
|----------------------------|-----------------|
| Název | Alké ATX |
| Dojazd | 150 km |
| Výkon elektromotoru | 14 kW |
| Max. rychlost | 44 km/h |
| Kapacita batérie | 20 kWh |
| Typ batérie | Lithium LiFePo4 |
| Úžitková hmotnosť | 1085 kg |
| Celková hmotnosť | 2150 kg |

Tabuľka 4: Základné technické údaje Alké ATX [8]

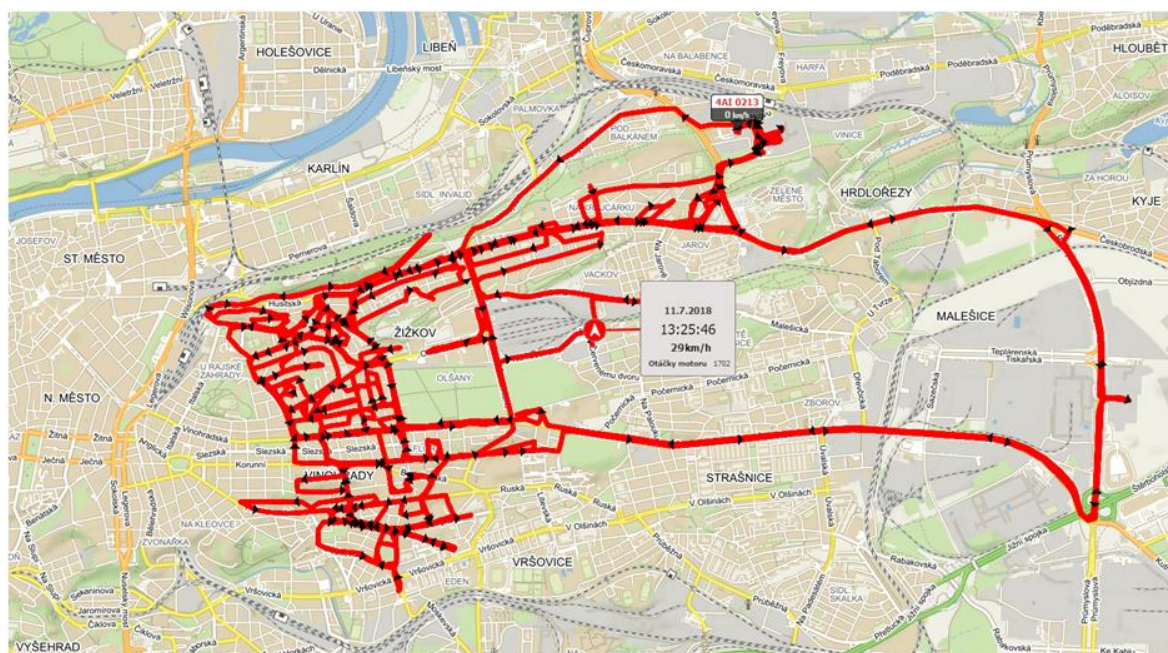
2.2 Komunálne služby

Jednou z hlavných firiem zodpovedných za čistotu a údržbu hlavného mesta Praha sú Pražské služby a.s., ktoré patria medzi najväčšie komunálne spoločnosti v Českej republike . Spoločnosť zamestnáva približne 1400 pracovníkov. Ich hlavnou úlohou je zber, zvoz a spaľovanie komunálneho odpadu, a tak isto údržba, poriadok a značenie komunikácií v hlavnom meste. K tomu aby to zvládli, používajú k výkonu svojej práce rôzne typy strojov a špecializovanú techniku, na to určenú. Pražské služby disponujú rozsiahlym vozovým parkom, ktorý obsahuje 500 vozidiel z toho 180 vozidiel na zvoz odpadu, 150 vozidiel na údržbu komunikácií a 170 viacúčelových vozidiel. Denne sa do ulíc vysiela približne 90 vozidiel na zvoz odpadu. Jedným z týchto typov sú aj menšie komunálne vozidlá valníkového typu, ktoré sú využívané predovšetkým na zber malých odpadkových košov v meste, hliadky čistoty či zvoz trávy a údržbu v parkoch. [9]

Objektom skúmania diplomovej práce je komunálne vozidlo Multicar M27, ktoré je využívané v Pražských službách. Vozidlo je vybavené korbou upravenou na zber malých odpadkových košov, ktoré sa nachádzajú na chodníkoch a v parkoch hlavného mesta. Z dôvodu rozľahlosti mesta sú pracovné zmeny Pražských služieb rozdelené do mestských okruhov, v ktorých vykonávajú svoju činnosť.

2.3 Pracovná trasa vozidla

Merané vozidlo Multicar M27 pracuje predovšetkým v jazdnom cykle znázornenom na obrázku Obr. 2.6. Jedná sa čisto o mestskú premávku po spevnených komunikáciách v mestských častiach Žižkov, Vinohrady a Na Ohradě. Za jednu zmenu pracovného cyklu vozidlo prejde v priemere vzdialenosť 85km a vysype približne 170 malých smetných košov na svojej trase. Svoju jazdu začína z garáže centrálnej prevádzky Pražských služieb na ulici Pod Šancemi, z ktorej pokračuje do spomínaných mestských častí vykonávať požadovanú pracovnú činnosť. Po ukončení zmeny alebo v prípade úplného naplnenia svojich zberných kapacít posádka vyváža nazbieraný odpad do zariadenia na energetické využitie odpadu, takzvanej spaľovne v Malešiciach. Po vysypaní odpadu sa vozidlo vracia do garáže, kde sa dotankuje a pripraví na ďalšiu pracovnú zmenu.



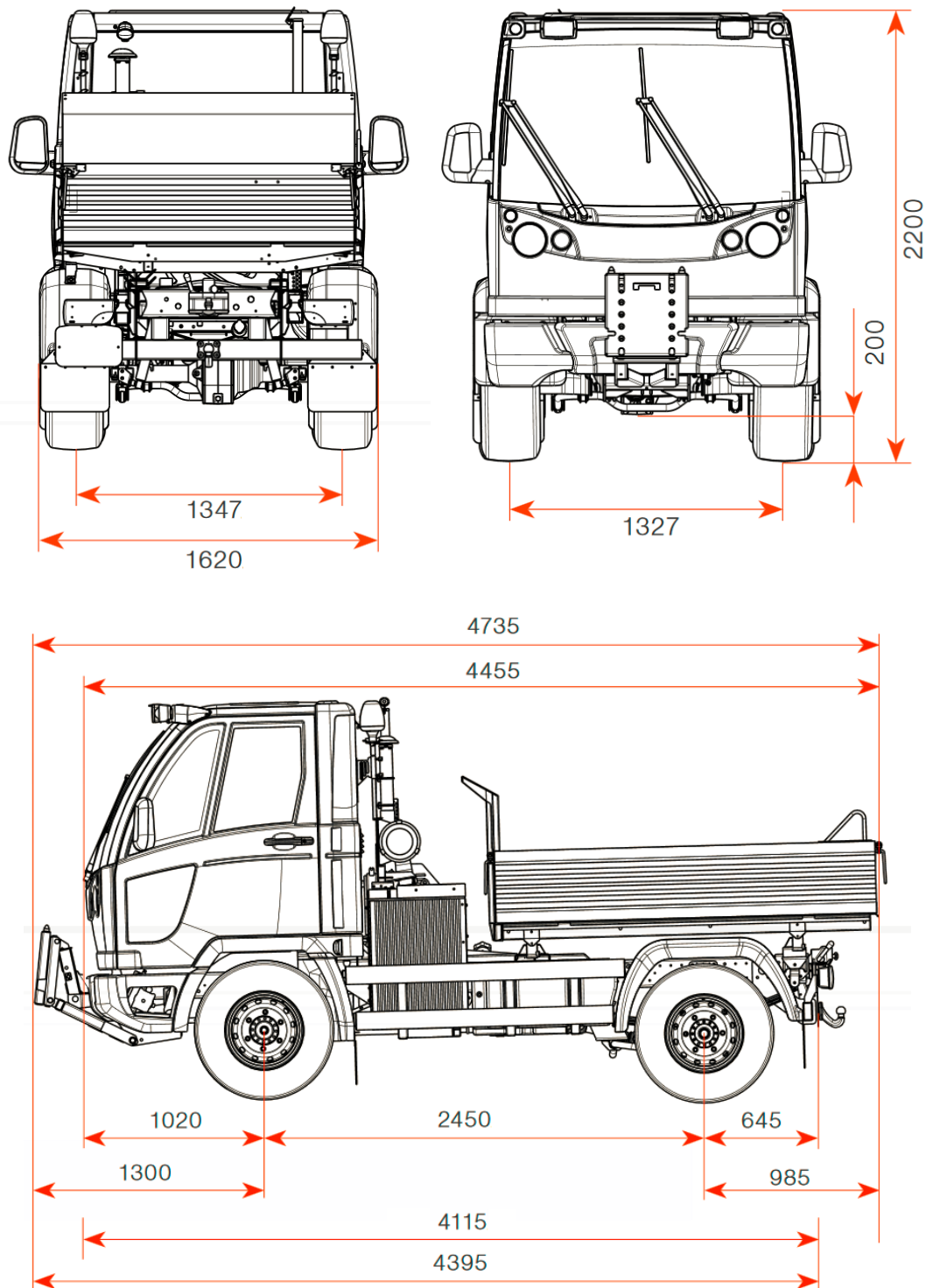
Obr. 2.6 Mapy trasy meraného jazdného cyklu z 11.7.2018 [18]

2.4 Multicar M27

Celým obchodným názvom Multicar M27 Carrier je komunálne vozidlo používané ako kompaktný nosič nadstavieb s vysokým prepravným výkonom. Model vyniká vysokou variabilitou a funkcionalitou. Na vozidle je možno použiť až 80 druhov nadstavieb pre letnú a zimnú údržbu. Nami merané vozidlo je vybavené korbou, ktorá je upravená pre zber odpadu. Základné technické údaje o vozidle sú zhrnuté v Tabuľka 5.

| | |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Názov | <i>Multicar M27 C</i> |
| Zdvihový objem motora | <i>1968 cm³</i> |
| Typ/Počet valcov | <i>TurboDiesel / 4</i> |
| Emisná trieda | <i>EURO 5</i> |
| Výkon | <i>75 /3000 kW/min⁻¹</i> |
| Max. rýchlosť | <i>110 km/h</i> |
| Pohon náprav | <i>4x4 (predná odpojiteľná)</i> |
| Pneumatiky | <i>225/75 R 16C</i> |
| Hydraulika | <i>3 okruhová</i> |
| Výkon hydrauliky | <i>2 x 45l/min pri 200 bar</i> |
| Úžitková hmotnosť | <i>1320 kg</i> |
| Celková hmotnosť | <i>2180 kg</i> |

Tabuľka 5: Základné technické údaje Multicar M27 C [13][8]



Obr. 2.7 Základné rozmery vozidla Multicar M27 [13]

3 Meranie hodnôt vozidla

V dnešnej dobe sa z dôvodu zlepšenia riadenia dopravy, optimálneho vyťaženia kapacity vozového parku, vyhodnocovania jazd či manažérskych správ využívajú softvéry, ktoré monitorujú jednotlivo každé vozidlo. V každom pracovnom vozidle Pražských služieb je nainštalovaná GPS telemetria, ktorá zaznamenáva všetky potrebné údaje o jazde, polohe, spotrebe či stave vozidla, ktoré daná firma vyžaduje k svojmu vyhodnocovaniu a údržbe. Nami merané vozidlo *Multicar M27* bolo vybavené softvérom *Protang Dynamics* ktorý je napojený priamo na zbernicu CAN vo vozidle, odkiaľ vyhodnocuje potrebné údaje. Softvér pracuje nepretržite od doby spustenia hnacieho spaľovacieho motora až po jeho vypnutie. Pri ďalšom spustení zaznamená čas od ktorého pokračuje v zápise. Pomocou systému GPS, program zaznamenáva v jednotlivých časových intervaloch zemepisnú šírku, zemepisnú dĺžku a aktuálnu rýchlosť komunálneho vozidla. Namerané dáta boli následne vyexportované v tabuľkovom editore *Microsoft Excel*, v ktorom prebiehalo samotné vyhodnocovanie nameraných jazd a výpočty tejto diplomovej práce. V Tabuľka 6 je názorná ukážka nameraných hodnôt z jazdy. Pre určenie jazdného cyklu komunálneho vozidla boli použité namerané dáta z jedného pracovného týždňa, čo predstavuje 5 pracovných dní. Jedna sa o obdobie od 9.7. až 13.7. 2018.

| Čas | Zemepisná šírka | Zemepisná dĺžka | Rýchlosť [km/h] |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 7:14:39 | 50,0707 | 14,4597 | 0 |
| 7:14:49 | 50,0707 | 14,4598 | 1,75 |
| 7:14:53 | 50,0707 | 14,4599 | 6,43 |
| 7:14:57 | 50,0707 | 14,4601 | 15,32 |
| 7:15:07 | 50,0706 | 14,4607 | 15,25 |
| 7:15:17 | 50,0704 | 14,4615 | 21,12 |
| 7:15:27 | 50,0703 | 14,4622 | 18,66 |

Tabuľka 6: Ukážka nameraných vstupných veličín jazdného cyklu [18]

4 Vyhodnotenie merania

Z nameraných hodnôt boli následne dopočítané ďalšie potrebné veličiny, ktoré popisujú chovanie komunálneho vozidla a sú potrebné k určeniu jeho energetickej náročnosti. Spôsob analýzy a výpočtu jednotlivých veličín je popísaný v nasledujúcich podkapitolách tejto práce.

4.1 Zrýchlenie

Z ukážky nameraných hodnôt v Tabuľka 6 je poznať, že software *Protank Dynamic* nezapisoval merané hodnoty v rovnakom časovom intervale. Príčina nekonštantného časového zápisu nebola zistená. Namerané hodnoty časového kroku zápisu sa pohybujú v intervale <1;10> sekundy. Z tohto dôvodu bol uvažovaný rovnomerne zrýchlený/spomalený pohyb vozidla v jednotlivých meraných intervaloch. Pre výpočet zrýchlenia a bol použitý vzťah 4.1, ktorý uvažuje začiatočnú rýchlosť v_1 a koncovú rýchlosť v_2 vozidla za čas t , pri ktorom bola táto zmena rýchlosti dosiahnutá.

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t} \quad (4.1)$$

Najvyššia hodnota zrýchlenia z nameraných dní je $2,48 \text{ ms}^{-2}$, ktorá bola nameraná pri rozjazde vozidla. Najnižšia hodnota zrýchlenia je $-4,32 \text{ ms}^{-2}$, ktorá bola nameraná pri väčšom brzdení vozidla z neznámeho dôvodu v premávke.

4.2 Dráha

Celková prejdená dráha jedného cyklu komunálneho vozidla bola spočítaná ako súčet dráh jednotlivých nameraných intervalov podľa vzťahu 4.2 pre výpočet dráhy s uvažovaním rovnomerne zrýchleného/spomaleného pohybu.

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (4.2)$$

Výsledné vypočítané súčty dráh boli porovnané s hodnotami kilometrov na tachometri vozidla, ktoré obsluha každý deň po skončení zmeny zapisuje do knihy jázd. Odchýlka výpočtu vzdialenosti od nameranej hodnoty na tachometri vozidla

predstavovala 1,31%, čo pri priemernej vzdialenosti 86 km za jazdný cyklus prestavuje približne 1,12 km.

4.3 Profil trate

Z nameraných hodnôt popisujúcich polohu vozidla boli známe len zemepisná šírka a zemepisná dĺžka. K získaniu výškového profilu trate bol použitý software *GPS Visualizer*, ktorý k daným bodom jednotlivých nameraných intervalov zemepisnej šírky a zemepisnej dĺžky priradil nadmorskú výšku.

Z doplnených hodnôt bol dopočítaný sklon vozovky a celkové prevýšenie trate. Komunálne vozidlo pri danom jazdnom cykle prekonáva celkové prevýšenie trate 186 m a pri štrnástom kilometri prejdenej dráhy zdoláva maximálne stúpanie trate 11,3 %



Obr. 4.1 Výškový profil trate jazdného cyklu z 11.7.2018 [18]

5 Jazdné odpory

Jazdné odpory sú sily, ktoré pôsobia proti pohybu vozidla. Čím vyššie hodnoty jazdných odporov vozidlo dosahuje, tým narastajú požiadavky na vyšší výkon motora vozidla a tým rastie aj spotreba potrebnej energie. Celkový jazdný odpor sa skladá zo súčtu odporu valenia O_f , odporu vzduchu O_{vz} , odporu stúpania O_α a odporu zrýchlenia O_a .

5.1 Odpor valenia

Valivý odpor vzniká pri odvaľovaní pneumatiky po vozovke. Veľkosť odporu valenia závisí od hmotnosti vozidla, od použitých pneumatík a starostlivosti o pneumatiky. Napríklad konštrukcia pneumatiky: diagonálne pneumatiky majú väčší odpor valenia ako radiálne pneumatiky, pneumatiky s vyšším tlakom majú menšiu deformáciu a tým aj odpor a pri pneumatike so zväčšujúcim sa priemerom kolesa klesá odpor. [10]

Pre výpočet valivého odporu platí vzťah:

$$O_f = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \quad (5.1)$$

kde m je hmotnosť vozidla s posádkou a pripočítanou hmotnosťou odpadu v danom úseku trasy. Hodnota tiažového zrýchlenia g je v tejto práci uvažovaná s veľkosťou $g=9,81m/s^2$. Merané vozidlo sa pohybuje po spevnených komunikáciách, predovšetkým po asfalte. Veľkosť súčiniteľa valivého odporu f pre asfalt sa pohybuje medzi hodnotami 0,01-0,02. Pre výpočet bolo uvažovaná stredná hodnota $f=0,015$. [11] Uhol α odpovedá veľkosti uhlu medzi vodorovnou a naklonenou rovinou vozovky.

5.2 Odpor vzduchu

Odpor vzduchu je druhý odpor jazdy, ktorý sa vždy objavuje pokiaľ je vozidlo v pohybe. Pre výpočet odporu vzduchu platí rovnica :

$$O_{vz} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^2 \quad (5.2)$$

Na veľkosť odporu vzduchu ma najväčší vplyv rýchlosť vozidla v , ktorá narastá s druhým kvadrátom veľkosti. Pre tento typ vozidla je súčiniteľ odporu vzduchu rovný $c_x=0,6$ a hodnota čelnej plochy vozidla je $s_x=3,65m^2$. Hodnota hustoty vzduchu ρ sa mení v závislosti na teplote prostredia. Pre výpočet uvažujeme hodnotu $\rho_{vzd}=1,185 kg/m^3$ ktorá odpovedá $20^\circ C$. [11]

5.3 Odpor stúpania

Odpor stúpania vzniká pri jazde vozidla do kopca alebo z kopca. Odpor stúpania je zložka rozkladu tiaže vozidla, ktorá je rovnobežná s pojazdovou rovinou. Pre výpočet platí vzťah :

$$O_\alpha = \pm m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (5.3)$$

Pri stúpaní vozidla do kopca, uvažujeme odpor s kladnou hodnotou a pri zjazde z kopca počítame so zápornou hodnotou výsledného odporu.

5.4 Odpor zrýchlenia

Pre zmenu rýchlosti pohybu telesa je potrebné na teleso pôsobiť určitou silou, ktorej veľkosť sa určuje ako násobok jeho hmoty v kg a zrýchlenia telesa v $m \cdot s^{-2}$. U automobilov sa však okrem priamočiareho zrýchlenia/spomalenia telesa uskutočňuje aj zmena uhlovej rýchlosti rotujúcich hmôt. Veľkosť odporu zotrvačnosti je možné určiť pomocou nasledujúcej rovnice:

$$O_a = O_{zp} + O_{zr} \quad (5.4)$$

kde odpor zo zrýchlenia posuvných častí vozidla má tvar:

$$O_{zp} = m \cdot a \quad (5.5)$$

a odpor zo zrýchlenia rotačných hmôt :

$$O_{zr} = \frac{M_r}{r_d} = \frac{I \cdot \varepsilon}{r_d} = \frac{I \cdot a}{r_d^2} \quad (5.6)$$

M_r reprezentuje redukovaný moment na kolese, I je moment zotrvačnosti a ε reprezentuje uhlové zrychlenie. Z dôvodu neznámych veľkosti momentov zotrvačnosti a uhlových rýchlosti jednotlivých časti vozu, zohľadňujeme výpočet v tvare:

$$O_a = (\delta \cdot m_p + m_n) \cdot a \quad (5.7)$$

kde δ je súčiniteľ vplyvu rotujúcich hmôt, zohľadňujúci vplyv rotujúcich hmôt motora, spojky, prevodovky, rozvodovky, hriadeľov, brzdových kotúčov a kolies vozidla. Pre výpočty bola použitá hodnota súčiniteľa rotačných hmôt $\delta=1,2$, pohotovostná hmotnosť m_p a hmotnosť nákladu m_n . [12]

5.5 Hmotnosť vozidla

Jednou z najviac ovplyvňujúcich veličín jazdných odporov je hmotnosť vozidla. U bežných osobných automobiloch sa pri výpočte jazdných odporov a energií uvažuje hmotnosť konštantná, nakoľko sa pri jazde mení takmer minimálne o zníženie hmotnosti spotrebovaného paliva počas jazdy vozidla. V prípade komunálnych vozidiel sa táto veličina mení výraznejšie počas fungovania v prevádzke. Záleží, na akú prácu sa práve vozidlo využíva. V prípade vozidiel s cisternou pre polievanie záhonov a ciest alebo so sypačom na posyp komunikácií v zime sa hmotnosť vozidla v priebehu pracovnej činnosti znižuje. Naopak u vozidiel s korbou alebo zberačom sa hmotnosť počas pracovnej činnosti zvyšuje. V tomto meranom prípade sa hmotnosť meraného vozidla pre jeho výpočet odporov a energetickú náročnosť menila dvakrát.

5.5.1 Hmotnosť elektrickej verzie vozidla

Z dôvodu spresnenia výpočtu bola hmotnosť *Multicary M27* so spaľovacím motorom nahradená elektrickými súčiastkami so snahou zachovať čo najviac dielov z pôvodnej spaľovacej verzie a hmotnostne sa priblížiť navrhovanej elektrickej verzii komunálneho vozidla. Hmotnosť jednotlivých časti znázorňuj Tabuľka 7. Pohotovostná hmotnosť *Multicar M27* je 2180kg. K celkovej pohotovostnej hmotnosti bola pripočítaná hmotnosť dvoch členov posádky vozidla. Priemerná hmotnosť osoby bola stanovená na 90kg.

Elektro verzia:

| | |
|----------------------|--------------|
| • Batériové články | 471 kg |
| • Battery management | 50 kg |
| • Elektromotor | 90 kg |
| • <u>Prevodovka</u> | <u>25 kg</u> |
| Suma | 636 kg |

Spaľovacia verzia:

| | |
|------------------|--------|
| • Vznetový motor | 267 kg |
| • Prevodovka | 71 kg |
| Suma | 338 kg |

Tabuľka 7: Hmotnosti časti vozu [18]

$$636 - 338 = 298 \text{ kg} \quad (5.8)$$

$$2180 + (2 \cdot 90) + 298 = 2658 \text{ kg} \quad (5.9)$$

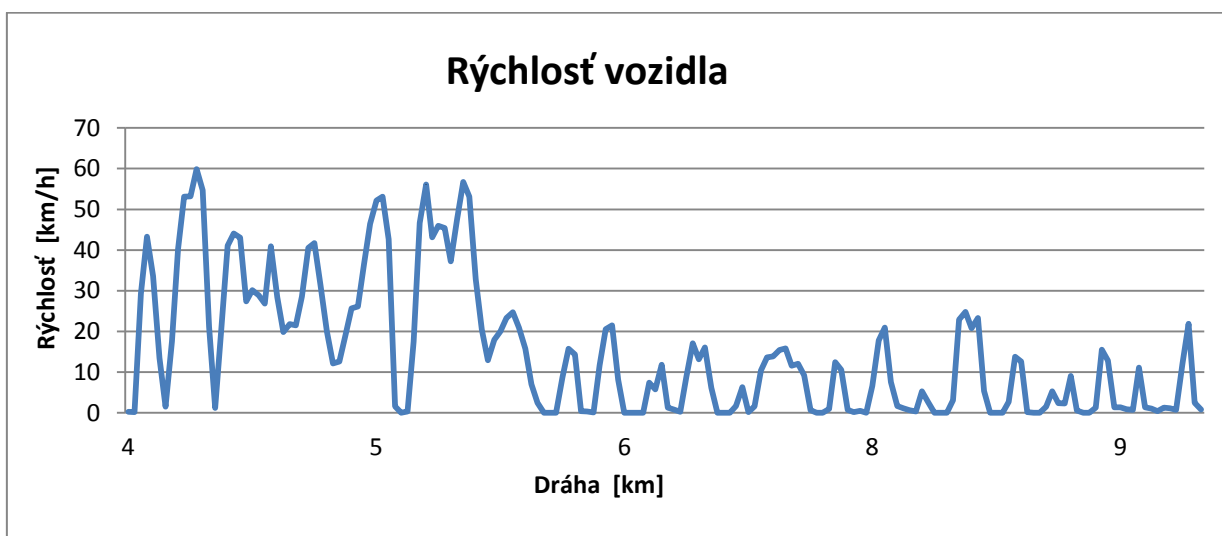
Z rovnice 5.8 vyplýva, že pri nahradení vznetového motora a prevodovky elektrickými časťami sa hmotnosť vozidla zvýši o 298 kg. Ak sa k tomu ešte pripočíta hmotnosť dvoch pracovníkov, tak sa podľa rovnice 5.9 celková pohotovostná hmotnosť elektrického komunálneho vozidla rovná 2658 kg.

5.5.2 Zmena hmotnosti od nahládky košov

V druhom prípade navýšenia hmotnosti meraného vozidla dochádza tým, že sa vozidlo využíva pri práci na zbere malých odpadkových košov. Z informácií obsluhy vozidla bola zistená približná hmotnosť vyzbieraného odpadu a to 500 až 600 kg za zmenu. S tým, že v priemere obsluha vysype 180 až 200 košov do korby vozu. Z týchto informácií, bola pre samotný výpočet a analýzu uvažovaná horná hranica hmotnosti vyzbieraného odpadu. Pri uvažovaní 200 vysypaných košov za zmenu sa priemerná hmotnosť malého odpadkového koša rovná 3kg.

Pre zápis a výpočet zvyšujúcej sa hmotnosti z nazbieraného odpadu bola zhotovená funkcia, ktorá pri zastavení vozidla v pracovnom režime vysypávania košov pripočítala hmotnosť koša. S touto navýšenou hmotnosťou sa počítali ďalej jazdné odpory a energie v intervale merania, pokiaľ nedošlo k ďalšiemu navýšeniu hmotnosti. Podrobný výpočet a popis funkcie je obsiahnutý v prílohách tejto práce.

V ukážky na grafe z Obr. 5.1 je znázornený úsek pracovného režimu. Vozidlo sa v prvých necelých šiestich kilometroch dráhy premiestňovalo na pracovnú pozíciu a svoju hmotnosť nemenilo. Od šiesteho kilometra je zrejmé ako sa vozidlo presúva od jedného zberného miesta k druhému. V týchto oblastiach dochádza ku zvyšovaniu hmotnosti. V rozmedzí prejdenej dráhy 3,5 km pracovnej činnosti zberu košov vozidlo zastavilo 14krát. Svoju hmotnosť tak navýšilo o zhruba 42 kg odpadu. Nami skúmané vozidlo vysypalo v jazdnom cykle priemerne 175 odpadkových košov, vďaka čomu zvýšilo celkovo svoju hmotnosť o 525 kg odpadu na konci zmeny.



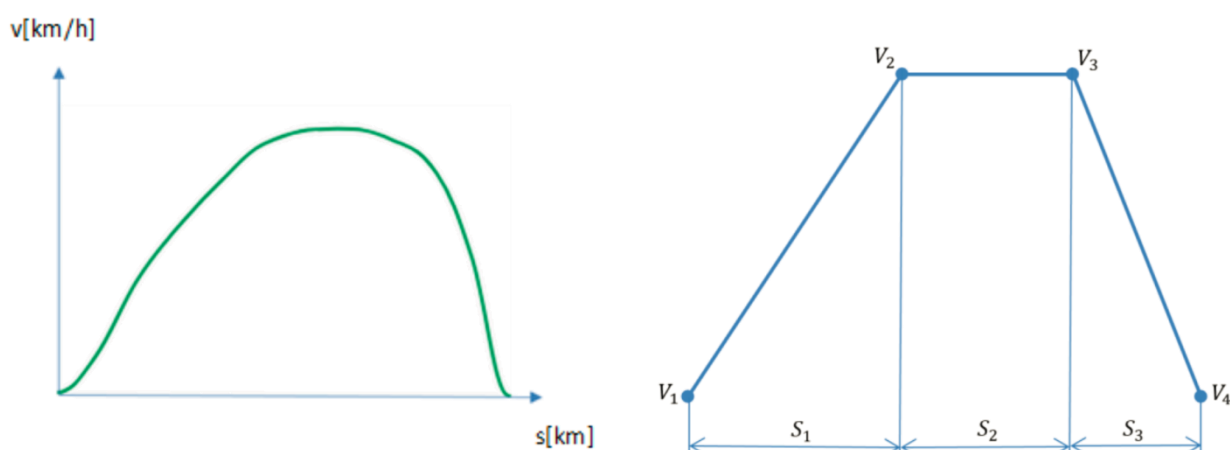
Obr. 5.1 Priebeh rýchlostí v časti skúmaného úseku jazdného cyklu 11.7.2018 [18]

6 Energia na kolesách

Jedná sa o energiu vozidla na kolesách, ktorú je potrebné vozidlu dodať k tomu, aby prekonalo jazdné odpory a bolo schopné vykonávať požadovaný pohyb. Táto celá kapitola bola prebraná a citovaná vlastnými slovami zo zdroja. [12]

Pre výpočet tejto energie uvažujeme obecný úsek, ktorý je znázornený na Obr. 6.1, a ktorý sa skladá z troch častí. Akcelerácia, jazda s konštantnou rýchlosťou a brzdenie vozidla. Týmto rozdelením sa riadi aj samotný výpočet.

Výpočet jednotlivých druhov energie pre prekonanie odporov sú jednotlivito integrované odpory po prejdenej dráhe v každom úseku. Úsek 1 je zrýchľovanie, úsek 2 predstavuje konštantnú rýchlosť a úsek 3 spomaľovanie.



Obr. 6.1 Rýchlostný profil rozdelený do úsekov [12]

6.1 Energia na prekonanie odporu valenia

Prvou zo zložiek energie na kolesách je energia na prekonanie odporu valenia. Jej obecný tvar je popísaný v rovnici 6.1.

$$E_f = \int_{sm}^{sn} O_f ds = \int_{sm}^{sn} (m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha) ds = \int_{tm}^{tn} (m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha) \cdot v dt \quad (6.1)$$

kde indexy m, n sú celé kladné čísla, označujúce obecnú fázu v meranom úseku.

V oblastech akcelerácie a brzdění ma vzťah pre výpočet energie tvar:

$$E_{f1,3} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \cdot \frac{1}{a} \left[\frac{v_n^2}{2} - \frac{v_m^2}{2} \right] \quad (6.2)$$

kde a predstavuje priemerné zrýchlenie/ spomalenie v danom úseku. Pre konštantnú rýchlosť a po úprave sa vzorec zjednodušil na finálnu podobu:

$$E_{f2} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \cdot v \cdot t = m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha \cdot s \quad (6.3)$$

6.2 Energia na prekonanie odporu vzduchu

Jedna sa o druhú zložku energie na kolesách, k prekonaniu odporu vzduchu vozidla. Jej obecný vzťah pre jej určenie ma tvar :

$$E_{vz} = \int_{sm}^{sn} O_{vz} ds = \int_{sm}^{sn} \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot s_x \cdot v^2 \right) ds = \int_{tm}^{tn} \left(\frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot s_x \cdot v^2 \right) \cdot v dt \quad (6.4)$$

Po integrovaní a úprave rovnice vzniká vzťah pre oblasť akcelerácie a brzdění v tvare:

$$E_{vz1,3} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot s_x \cdot \frac{1}{a} \left[\frac{v_n^4}{4} - \frac{v_m^4}{4} \right] \quad (6.5)$$

Pre oblasti s konštantnou rýchlosťou má vzťah pre výpočet energie na prekonanie odporu vzduchu tvar:

$$E_{vz2} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot s_x \cdot v_2^3 \cdot t = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot s_x \cdot v_2^2 \cdot s \quad (6.6)$$

Obe zložky energie na prekonávanie spomínaných jazdných odporov majú vždy kladnú hodnotu v každej fáze úseku.

6.3 Energia na prekonanie odporu zrýchlenia

Treťou zo zložiek energie na kolesách je energia ku prekonaniu odporu zrýchlenia vozidla. Jej obecný tvar je:

$$E_a = \int_{sm}^{sn} O_a ds = \int_{sm}^{sn} (\delta \cdot m_p + m_n) \cdot a \cdot ds = \int_{tm}^{tn} (\delta \cdot m_p + m_n) \cdot a \cdot v dt \quad (6.7)$$

Po úprave má v oblastiach akcelerácie a brzdenia vzťah pre výpočet energie tvar:

$$E_{a1,3} = (\delta \cdot m_p + m_n) \cdot \left[\frac{v_n^2}{2} - \frac{v_m^2}{2} \right] \quad (6.8)$$

Hodnoty energie pre prekonanie odporu zrýchlenia môžu naberať kladnú aj zápornú hodnotu. Pri zrýchľovaní vozidla je potrebné túto energiu dodávať. Pri brzdení, spomaľovaní odpor pomáha v pohybe dopredu. Túto formu energie je možné využívať pre rekuperáciu a tým pádom nazbieranú energiu opäť využiť k pohonu vozidla. Pri výpočtoch má tento druh energie záporné znamienko.

Pri konštantnom pohybe vozidla, odpor zo zrýchlenia/spomalenia nevzniká z tohto dôvodu ma nulovú hodnotu.

$$E_{a2} = 0 \quad (6.9)$$

6.4 Energia na prekonanie odporu zo stúpania

Posledným druhom energie na kolesách je energia na prekonanie odporu zo stúpania. Jej veľkosť sa určuje zo vzťahu:

$$E_\alpha = \int_{sm}^{sn} O_\alpha ds = \int_{sm}^{sn} (m \cdot g \cdot \sin \alpha) ds = \int_{tm}^{tn} (m \cdot g \cdot \sin \alpha) v dt \quad (6.10)$$

Hodnota energie môže naberať kladné hodnoty ak vozidlo stúpa do kopca a záporne pri zjazde z kopca, pri ktorom získava energiu na rekuperáciu a tým pádom dobíja baterky. V prípade jazdy po rovine pri nulovom sklone vozovky sa hodnota energie

rovná nule. Po integraci se výsledný vzorec pro zrychlení a brzdění v určitém skloně vozovky rovná vztahu:

$$E_{\alpha 1,3} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \frac{1}{a} \cdot \left[\frac{v_n^2}{2} - \frac{v_m^2}{2} \right] \quad (6.11)$$

Pre klesanie či stúpanie s konštantnou rýchlosťou je energia rovná:

$$E_{\alpha 2} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s_2 = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot v_2 \cdot t \quad (6.12)$$

6.5 Celková energia na kolesách

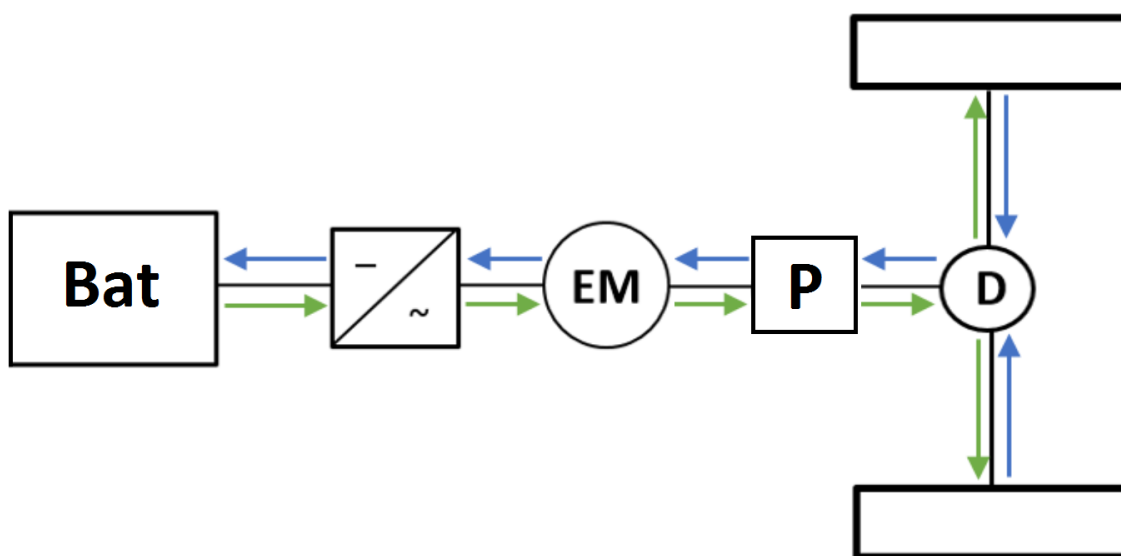
Celková energia na kolesách sa rovná súčtu všetkých štyroch energií, ktoré sú potrebné na prekonávanie jazdných odporov v jednotlivých úsekoch meranej trate.

$$E_{Kol} = E_f + E_{vz} + E_a + E_{\alpha} \quad (6.13)$$

Ak je celkový súčet všetkých energií vyšší ako nula aj napriek tomu, že niektorý z odporov má záporné hodnoty, tak sa energia spotrebováva. Pri záporných hodnotách celkovej energie na kolesách vzniká energia, ktorú je možno využiť na rekuperáciu vozidla. Konkrétny výpočet jazdného cyklu celkových hodnôt je priložený v prílohe tejto diplomovej práce.

7 Účinnosti

Samotná celková energia na kolesách k určení energetickej náročnosti komunálneho vozidla ešte nestačí. K určení celkovej energie potrebnej pre pohon a návrh vozidla musíme prepočítat energiu z kolies cez pohonné ústrojenstvo až do bateriek ich účinnosťami. Poradie toku výkonu a jednotlivé súčasti sú znázornené na schéme elektrického komunálneho vozidla na Obr. 7.1



Obr. 7.1 Schéma pohonu elektrického komunálneho vozidla [18]

Z kolies sa výkon cez poloosy prenáša do rozvodovky, ktorej účinnosť bola uvažovaná s hodnotou $\eta_r=96\%$. Z nej sa tok výkonu prenáša cez kardanový hriadeľ na zuby jednostupňovej prevodovky, ktorá je cez prírubu spojená s elektromotorom. Účinnosť prevodovky má hodnotu $\eta_p=98\%$. Elektromotor dostáva riadiace impulzy a energiu z frekvenčného meniča, ktorý je integrovaný priamo v obale motora. Vďaka tomu sú znížené straty a lepšie tienenie káblov na prenos energie z meniča do motora. Pri výpočte celkovej energie bola uvažovaná účinnosť meniča $\eta_{menič}=97\%$. Frekvenčný menič je napojený na batériu, ktorá je zdrojom energie celého vozidla.

Hodnota účinnosť batérie η_{Bat} a elektromotoru η_m sa v priebehu jazdy vozidla menia. Práve preto sa ich veľkosť nedá stanoviť jednou stálou hodnotou. Presné veľkosti účinnosti v jednotlivých časových intervaloch a spôsob výpočtu oboch účinnosti sú popísane v nasledujúcich kapitolách 9.1 Účinnosť elektromotoru a 10.3 Účinnosť batérie.

8 Krútiaci moment, výkon

Dôležitou súčasťou správneho návrhu súčastí elektrického pohonu komunálneho vozidla sú vstupné podmienky na ktoré by malo byť vozidlo napočítané a ktoré by malo pri svojej činnosti zvládnuť. Jednou z týchto základných kritérií je aj maximálny výkon a maximálny krútiaci moment. Tieto vstupné parametre hrajú dôležitú úlohu pri výbere vhodného elektromotora a návrhu prevodového ústrojenstva.

Prvou veličinou k určení výkonu a krútiaceho momentu je trakčná sila F_t . Trakčná sila je sila, ktorá je prenesená od pohonnej jednotky na kolesa vozidla. Aby vozidlo bolo schopne pohybu, musí byť hodnota trakčnej sily v každom okamžiku minimálne rovná hodnote odpovedajúcej okamžitému celkovému odpor pôsobiaceho na vozidlo. Veľkosť tejto sily spočítame ako súčet všetkých jazdných odporov vozidla v jednotlivom meranom intervale vozidla. Jej tvar je:

$$F_t = O_f + O_{vz} + O_a + O_\alpha \quad (8.1)$$

Pri znalosti vypočítanej trakčnej sily a dynamického polomeru kolesa vozidla r_d , ktorého hodnota pre pneumatiky R15 190/60 je 0,30 m, bol spočítaný krútiaci moment na kolesách. K určení bola uvažovaná rovnica 8.2

$$M_k = F_t \cdot r_d \quad (8.2)$$

Krútiaci moment na kolesách bolo potrebné previesť a prepočítať na požadovaný krútiaci moment M_M na motore. Jeho veľkosť bola daná v tvare :

$$M_M = \frac{M_k}{i_c \cdot \eta_c} = \frac{M_k}{i_c \cdot (\eta_r \cdot \eta_p)} = \frac{M_k}{7,3 \cdot (0,96 \cdot 0,98)} \quad (8.3)$$

kde celkový prevodový pomer hnacieho ústrojenstva i_c medzi elektromotorom a kolesami vozidla, má hodnotu 7,3. Hodnota bola spočítaná z celkového prevodu rozvodovky 3,5 a navrhnutého prevodu prevodovky 2,08 tak, aby vyhovovala splneniu prenosu krútiaceho momentu, a otáčok elektromotora pre maximálnu požadovanú rýchlosť vozidla. Celková účinnosť rozvodovky a jednostupňovej

prevodovky dosahovala hodnotu 94%. Z nameraných hodnôt jazdného cyklu sa priemerná hodnota krútiaceho momentu na motore rovná 293,1 Nm.

8.1 Maximálny krútiaci moment

Pri navrhovaní vozidla na kritické namáhanie pohonného ústrojenstva bol uvažovaný rozjazd vozidla pri najvyššej povolenej hmotnosti $m_{max}=3500\text{kg}$ do 20% stúpania, čo je približne $11,3^\circ$ pri zrýchlení $a=0,1\text{ ms}^{-2}$ a súčiniteli valivého odporu $f=0,015$. Výpočet maximálneho krútiaceho momentu $M_{M_{max}}$ na motore bol určený podľa rovnice 8.6 ,v ktorej sa trakčná sila skladala z odporu stúpania, valenia a zrýchlenia. Jej veľkosť ma hodnotu:

$$F_{t_{max}} = O_\alpha + O_v + O_a = m \cdot g \cdot \sin \alpha + m \cdot g \cdot f \cdot \cos \alpha + (\delta \cdot m_p + m_n) \cdot a \quad (8.4)$$

$$F_{t_{max}} = 7636,1\text{ N}$$

Odpor vzduchu sa v tomto prípade zanedbáva z dôvodu malej rýchlosti vozidla, pri ktorých má odpor vzduchu minimálne hodnoty. Krútiaci moment na kolesách pri kritickom namáhaní je rovný 2290,83 Nm podľa rovnice :

$$M_{k_{max}} = F_t \cdot r_d = 7636,1 \cdot 0,3 = 2290,83\text{ Nm} \quad (8.5)$$

Pri prepočte na motor ma maximálny krútiaci moment na motore hodnotu:

$$M_{M_{max}} = \frac{M_{k_{max}}}{i_c \cdot \eta_c} = \frac{2290,83}{7,3 \cdot 0,94} = 333,83\text{ Nm} \quad (8.6)$$

8.2 Výkon

Druhou dôležitou veličinou k správne návrhu elektrického motora je jeho výkon. K určení jeho veľkosti bol použitý vzťah 8.7, ktorý vychádza z prepočtu krútiaceho momentu na motore M_M a uhlovej rýchlosti motora ω_M .

$$P_M = M_M \cdot \omega_M \quad (8.7)$$

Veľkosť uhlovej rýchlosti na motore bola vypočítaná z predpokladu 8.8, kde bola

uhlová rychlost' na kolese ω_k vynásobená celkovým převodem hnacieho traktu i_c .

$$\omega_M = \omega_k \cdot i_c \quad (8.8)$$

Uhlová rychlost' na kolesách bola určená podľa tvaru 8.10, z ktorého otáčky na kolesách predstavovala rovnica:

$$n_k = \frac{30 \cdot v}{\pi \cdot r_d} \quad (8.9)$$

$$\omega_k = \frac{2\pi \cdot n_k}{60} \quad (8.10)$$

Po celkovej analýze a prepočte jednotlivých pracovných cyklov vozidla, ktoré boli rozdelené do piatich pracovných dní, boli zistené maximálne hodnoty výkonu a krútiaceho momentu v jednotlivých dňoch. Tieto hodnoty boli vypočítané podľa vzťahov z postupu uvedeného v tejto kapitole z jednotlivých časových intervalov nameraných z jazdy vozidla.

Z vypočítaných hodnôt v Tabuľka 8 vyplýva, že maximálna hodnota požadovaného výkonu na motore pre jazdný cyklus je $P_M = 78,94 \text{ kW}$. Hodnota maximálneho výkonu, bola určená, ako maximálna hodnota výkonu v daný deň, ktorá bola potrebná pre prekonanie jazdných odporov, v jednotlivých meraných intervaloch jazdného cyklu. Celkový priebeh veľkostí výkonu a točivého momentu na analyzovanom jazdnom cykle je uvedený v grafickej podobe v prílohe tejto práce.

| Deň | Max rýchlosť [Km/h] | Max výkon na motore [kW] | Max M_M na motore [Nm] | Dráha [km] |
|----------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|------------|
| 9.7. | 80,66 | 77,02 | 292,3 | 96 |
| 10.7. | 79,72 | 78,94 | 301,2 | 83 |
| 11.7 | 73,02 | 75,62 | 288,9 | 86 |
| 12.7 | 80,56 | 77,48 | 284,4 | 82 |
| 13.7 | 86,99 | 72,82 | 298,6 | 83 |
| PRIEMER | 80,19 | 76,38 | 293,1 | 86 |

Tabuľka 8: Maximálne vypočítané hodnoty z analýzy cyklov [18]

9 Elektromotor

Z vyhodnotenia nameraných hodnôt vyplynuli požiadavky na krútiaci moment a výkon, ktoré musí byť elektromotor schopný dodať, aby vozidlo zvládlo prácu v požadovanom jazdnom cykle. K výberu elektromotoru boli uvažované minimálne požadované hodnoty 334 Nm pre krútiaci moment a 79 kW výkonu. To však neboli jediné parametre, ktoré musel elektromotor spĺňať. Ďalšími boli jeho maximálne otáčky k dosiahnutiu maximálnej rýchlosti vozidla, zástavbové rozmery a kvalita prevedenia vonkajšieho obalu motora vzhľadom na pracovné prostredie a požadované krytie. Po porovnaní požadovaných parametrov a prieskume elektromotorov na trhu bol vybraný elektromotor *PowerMELA C80* od nemeckej firmy *STW Technic*.



Obr. 9.1 Elektromotor *STW Technic*, *Power MELA-C 80 kW* [19]

| | |
|----------------------------------|-------------------------|
| Menovitý výkon | 80 kW |
| Menovité napätie | 600 V |
| Menovitý krútiaci moment | 250 Nm |
| Menovité otáčky | 3000 min^{-1} |
| Maximálny výkon | 88 kW (max. 15 sekund) |
| Maximálny krútiaci moment | 338 Nm (max. 15 sekund) |
| Maximálne otáčky | 6000 min^{-1} |
| Trieda ochrany krytia | IP6K9K |

Tabuľka 9 Základné technické parametre elektromotora *Power MELA-C 80 kW* [19]

Jedná sa o synchronný elektromotor s permanentnými magnetmi s menovitým napätím 600 V DC. Jeho momentová a výkonová charakteristika je znázornená na grafe na Obr. 9.3. Veľkou výhodou je integrovaná výkonová a riadiaca elektronika, ktorá je spolu v jednej skrini s elektromotorom. Tento spoločný koncept zvyšuje jeho účinnosť a znižuje elektromagnetické rušenie spôsobené slučkami zle uložených káblov. Tak isto to šetrí priestor a znižuje hmotnosť. Hmotnosť celej zostavy činí 90 kg. Aj pri vysokej účinnosti elektrickej zostavy vznikajú straty v podobe tepla. Celá skriňa je vnútorne chladená olejom, ktorý umožňuje chladenie jednotlivých komponentov zostavy elektromotoru.

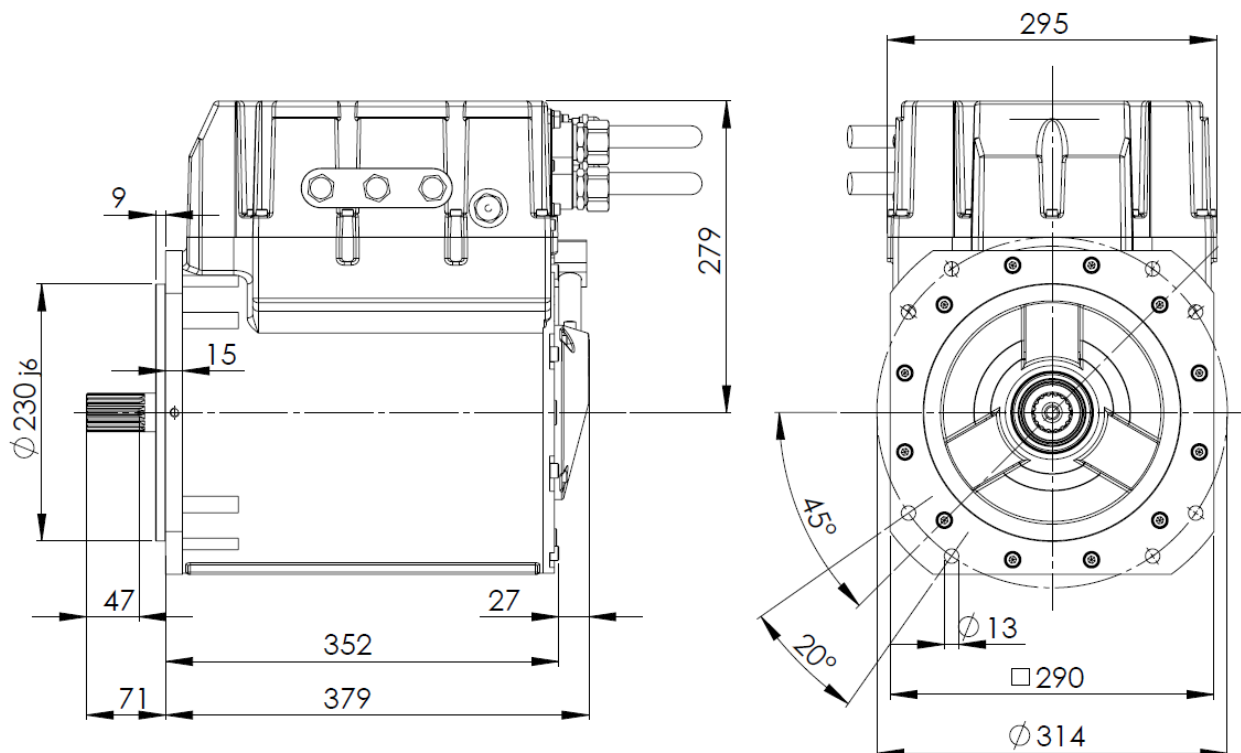
Elektromotor *Power MELA-C 80* je vyrobený s vysokým krytím v medzinárodnom štandarde, ktorý klasifikuje stupeň ochrany krytia elektrického zariadenia proti vniknutiu pevných telies a kvapalín. Označenie stupňa krytia *IP 6K9K* predstavuje:

6K - „Ochrana pred vniknutím pevných cudzích predmetov“

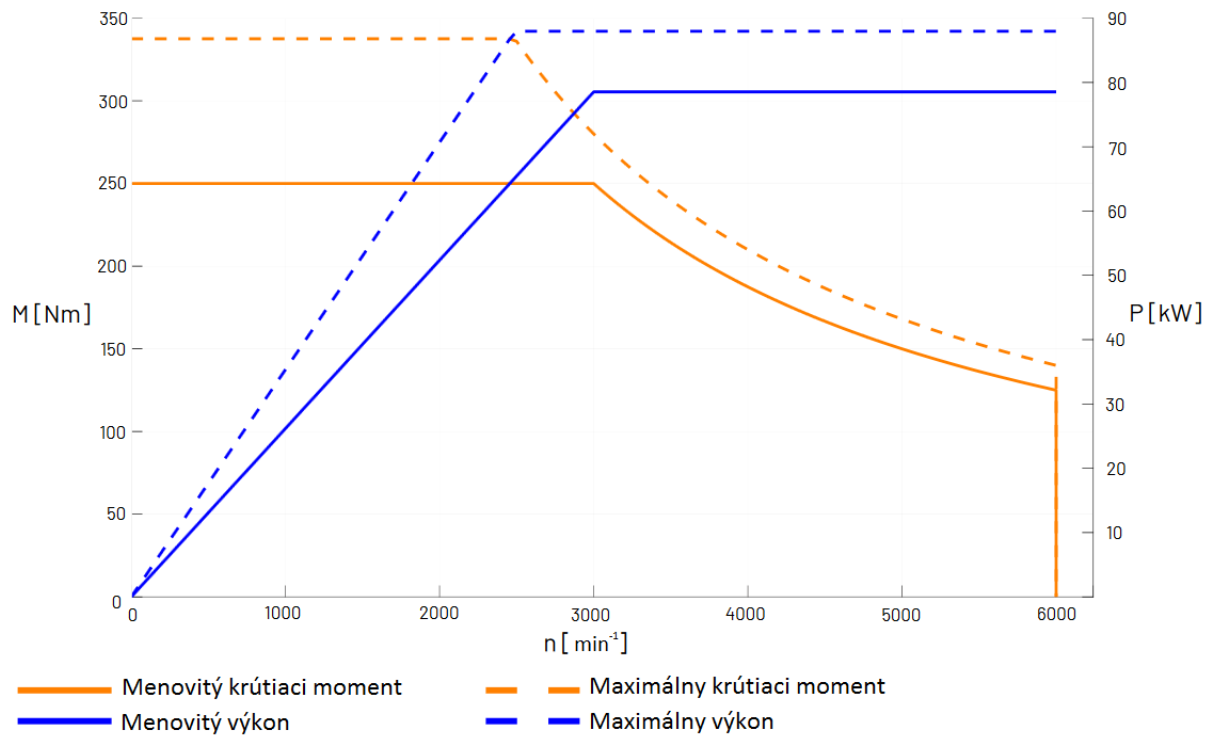
Prachotesné v horších podmienkach (prach nenaruší funkciu zariadenia)

9K - „Ochrana proti vniknutiu vody“

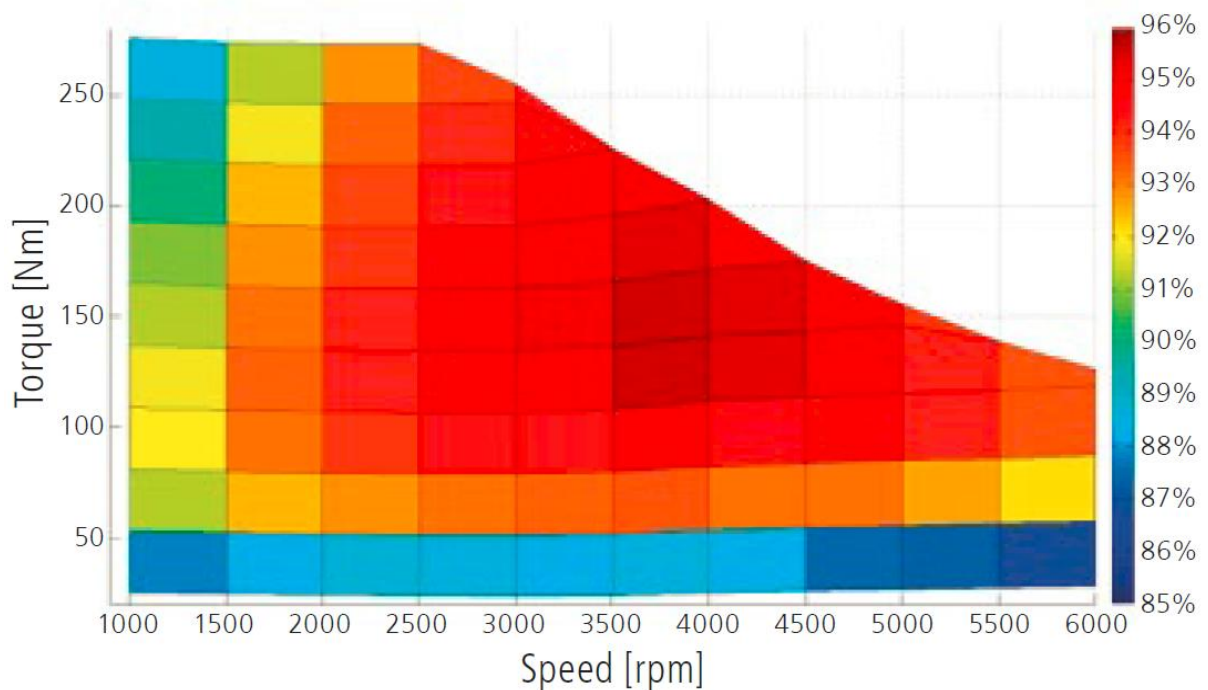
Trvalé ponorenie do vody - pod tlakom/ parný prúd [14]



Obr. 9.2 Základné rozmery elektromotora Power Mela-C 80 kW [19]



Obr. 9.3 Momentová a výkonová charakteristika elektromotora Power MELA-C 80kW [19]



Obr. 9.4 Pole účinnosti elektromotora Power MELA-C 80kW [19]

9.1 Účinnost' elektromotoru

Účinnost' elektromotoru je premenlivá veličina, ktorá závisí na otáčkach motora a na jeho krútiacom momente. Celé pole účinnosti je znázornené v grafe na Obr. 9.4, ktoré udáva výrobca v technickom liste elektromotoru.

K určení účinnosti elektromotoru v jednotlivých nameraných úsekoch, bola zostavená funkcia. Tá ku každému meranému časovému úseku, priradila účinnost' elektromotoru podľa aktuálnych priemerných otáčok, v danom úseku na motore a jeho veľkosti krútiaceho momentu z grafu na Obr. 9.4. V Tabuľka 10 je ukážka priradenia účinnosti elektromotoru pomocou funkcie. Krútiaci moment M_M a otáčky na motore n sú počítané podľa vzťahov popísaných v kapitole 8 tejto práce. Rovnaký postup určenia účinnosti bol uvažovaný aj v generatorickom móde motora, keď vozidlo energiu rekuperovalo späť do bateriek.

| Čas | Krútiaci moment M_M na motoru [Nm] | Otáčky n na motoru [min ⁻¹] | Účinnost'[%] |
|---------|--------------------------------------|---|--------------|
| 7:05:06 | 8,5 | 862,3 | 88 |
| 7:05:17 | 33,7 | 281,4 | 88 |
| 7:05:23 | 100,2 | 52,8 | 92 |
| 7:05:32 | 204,5 | 531,1 | 90,5 |
| 7:05:36 | 80,1 | 1381,7 | 92 |

Tabuľka 10 Ukážka priradenia účinnosti elektromotoru v jednotlivých časových intervaloch cyklu [18]

9.2 Overenie elektromotoru pre maximálnu rýchlosť vozidla

Maximálna rýchlosť navrhovaného komunálneho vozidla bola stanovená na 90 km/h. Snahou pri navrhovaní bolo dosiahnu aspoň minimálnych rýchlostných limitov na všetkých typoch komunikácií vrátane diaľnice.

K overeniu bol urobený výpočet, ktorý uvažoval, že vozidlo dosiahne svoju maximálnu rýchlosť 90km/h po rovine, pri pohotovostnej hmotnosti $m=2658\text{kg}$. Pri veľkosti súčiniteľa valivého odporu $f=0,015$, súčiniteľa odporu vzduchu $c_x=0,6$, čelnej plochy vozidla $s_x=3,65\text{m}^2$ a hustoty vzduchu $\rho_{vzd}=1,25\text{kg/m}^3$ mala trakčná sila F_{TR} veľkosť 1198,6 N. Podľa rovníc popísaných v 8. kapitole, bol vypočítaný potrebný výkon motora a jeho otáčky. K dosiahnutiu požadovanej rýchlosti 90 km/h pri jazde po rovine je potrebný výkon 31,8kW a 5812 min⁻¹ otáčok na motore pri celkovom prevode hnacieho ústrojenstva 7,3. Motor splňuje potrebné požiadavky.

10 Batéria

Zdroj energie celého elektromobilu je uložený v jeho batérií. To, aký bude mať vozidlo dojazd a aké funkcie zvládne záleží na veľkosti kapacity batérie. V súčasnosti sa veľkokapacitné batérie skladajú z viacerých batériových článkov ktoré sú uložené prevažne sériovo do zásobníkov „stackov“, ktoré sú prepojené a dohromady tvoria jeden zdroj energie. Z charakteristiky elektromotora *Power MELA-C 80* vyplýva, že celý návrh vysokého napätia elektrického pohonu komunálneho vozidla bude pracovať pri menovitom napätí 600 V. Na tieto požiadavky bola navrhovaná aj batéria.

10.1 Batériové články

K návrhu batérie pre komunálne vozidlo, ktorá pozostáva z elektrických článkov bol vybraný batériový lítiový článok *WB-LYP60AHA LiFeYPO4* od firmy *Winston*. Tieto články sú vhodné pre všetky trakčné aplikácie vrátane elektromobilov. Ich veľkou výhodou je, že články majú veľmi malý efekt samo vybíjania a majú možnosť nabíjania v akomkoľvek stave vybitia, bez pamäťového efektu. [15]



Obr. 10.1 Batériový článok *WB-LYP60AHA LiFeYPO4* (3.2V/60Ah)[15]

| | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Menovité napätie | 3,2 V |
| Kapacita | 60 Ah |
| Prevádzkové napätie | 2,8 - 3,8 V |
| Minimálne napätie | 2,5 V |
| Maximálny vybíjací prúd | 3C |
| Prevádzková teplota | -45 °C až 85 °C (vybíjanie) |

Tabuľka 11 Základné technické parametre *WB-LYP60AHA LiFeYPO4* [15]

10.2 Návrh batérie

K presnému typu a počtu článkov v batérií elektrického komunálneho vozidla bol prevedený výpočet a návrh popísaný v ďalšej časti tejto kapitoly.

10.2.1 Počet článkov

Z menovitého napätia elektromotora $U_m = 600\text{ V}$ a menovitého napätia batériového článku $U_\xi = 3,2\text{ V}$, bol vypočítaný minimálny počet potrebných článkov batérie, podľa vzťahu:

$$\frac{U_m}{U_\xi} = \frac{600}{3,2} = 187,5 \text{ článku} \quad (10.1)$$

Najbližšia celá vyššia hodnota počtu článkov, ktorá je dobre deliteľná do väčších celkov pre zásobníky je 192 článkov. Z predpokladu, že všetkých 192 článkov je zapojene sériovo, hodnota menovitého napätia celej batérie U_i ma veľkosť:

$$U_i = 192 \cdot 3,2 = 614,4\text{ V} \quad (10.2)$$

10.2.2 Kapacita článkov

Z celkovej energie na kolesách pre jednotlivé dni jazdné cyklu, bola vypočítaná jej priemerná hodnota 32 kWh. Tá sa využila k predbežnému výpočtu potrebnej kapacity batériových článkov v tvare:

$$\frac{E_{Kol}}{U_m} = \frac{32000}{600} = 53,33\text{ Ah} \quad (10.3)$$

V týchto oblastiach hodnôt sa batériové články typu 3,2V LiFeYPO4 vyrábajú s kapacitou 40Ah, 50Ah, 60Ah, 80Ah a viac. Z predpokladu navýšenia energie pri prepočte celkovej energie na kolesách účinnosťou hnacieho traktu a energetickej rezervy pre dojazd vozidla, bol zvolený článok s kapacitou 60Ah.

Zo zistených hodnôt presného typu a počtu článkov bola následne vypočítaná celková energia $E_{Bat_celková}$ uložená v batérií navrhovaného elektrického komunálneho vozidla.

$$E_{Bat_celková} = 192 \cdot 3,2 \cdot 60 = 36\,864\text{ Wh} \quad (10.4)$$

10.3 Účinnost' batérie

Rovnako ako pri účinnosti elektromotora, tak isto aj u batérie je jej účinnosť premenlivá v závislosti na veľkosti druhej mocniny prúdu, ktorým je zaťažovaná. Veľkosť prúdu I_{Bat} bola počítaná z napätia batérie a výkonu na meniči podľa vzťahu 10.5, pre každý časový úsek meraného jazdného cyklu.

$$I_{Bat} = \frac{P_{menič}}{U_i} = \frac{P_{kolesa}}{U_i \cdot \eta_r \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_{menič}} \quad (10.5)$$

Hodnota vnútorného odporu batériového článku *WB-LYP60AHA LiFeYPO4* je udávaná výrobcom a jej hodnota je $\leq 0,7 \text{ m}\Omega$. [16] Táto hodnota je používaná ako teoreticky najmenej priaznivá situácia pre účinnosť batériového článku. Najväčšia teoretická hodnota vnútorného odporu batérie R_{Bat} je spočítaná ako násobok počtu článkov batérií, ktoré batéria obsahuje ich vnútorným odporom.

$$R_{Bat} = 192 \cdot 0,0007 = 0,134 \Omega \quad (10.6)$$

Po určení všetkých potrebných parametrov bola vypočítaná účinnosť batérie η_{Bat} pre jednotlivé časových úsekov merania podľa vzorca:

$$\eta_{Bat} = 1 - \frac{R_{Bat} \cdot I_{Bat}^2}{U_i \cdot I_{Bat}} \quad (10.7)$$

11 Celková spotřeba energie

Z nameraných hodnot spotřeby energie na koleších a znalosti všech energetických účinností části hnacího ústrojenstva je možné vypočítat celkovou energetickou náročnost elektrického pohonu komunálního vozidla. Výsledná celková energie je spočítaná jako součet výsledných celkových energií vozidla v jednotlivých časových úsecích meraného jízdného cyklu. V daných meraných úsecích mohli nastat dva případy.

- V prvom prípade bola výsledná energia na koleších $E_{kolies} > 0$, tým pádom je potrebné dodávať energiu z batérie na kolešá. Táto situácia nastáva pri rozjazdoch a zrýchľovaní vozidla na požadovanú rýchlosť alebo pri udržiavaní konštantnej rýchlosti. Veľkosť tohto typu energie bola počítaná podľa vzťahu:

$$E_{1,2} = \frac{E_{Kol}}{\eta_r \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_{menič} \cdot \eta_{Bat}} \quad (11.1)$$

- V druhom prípade je výsledná energia na koleších $E_{kolies} < 0$. Tento stav nastáva pri znižovaní rýchlosti z dôvodu brzdenia alebo dojazdu vozidla, keď už šofér nepridáva plyn a vozidlo spomaľuje na základe jazdných odporov. Ďalšou možnosťou zápornej hodnoty energie je jazda z kopca. V týchto prípadoch vozidlo nepotrebuje dodávať energiu z batérie ale naopak, je možné túto energiu rekuperovať a čiastočne vracať späť do batérie. Veľkosť tejto energie bola určená podľa vzorca:

$$E_3 = E_{Kol} \cdot \eta_r \cdot \eta_p \cdot \eta_m \cdot \eta_{menič} \cdot \eta_{Bat} \quad (11.2)$$

Výsledná celková energia jízdného cyklu ma tvar:

$$E_{Celková} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n \quad (11.3)$$

Hodnoty energetickej náročnosti pre jednotlivé merané dni jízdného cyklu komunálního vozidla sú znázornené v Tabuľka 12. Jednotlivé jazdne cykly v daný deň sú rozdelené do viacerých častí. Prvou energiou je energia k pohonu, ktorú vozidlo spotrebuje k svojej činnosti bez uvažovania rekuperácie. Ďalšou zložkou

je hodnota energie, ktorú by vozidlo pri svojom jazdnom cykle bolo schopné späťne dobyť do batérie. Výsledná energia je energia, ktorú vozidlo potrebuje k zvládnutiu jazdného cyklu s uvažovaním rekuperácie. Poslednou zložkou tabuľky je prepočet množstva energie kilowatthodín na 1km prejdenej dráhy v danom jazdnom cykle.

| Deň | Dráha [km] | Energie k pohonu [kWh] | Energia rekuperácie [kWh] | Výsledná energia [kWh] | kWh/km |
|-------|------------|------------------------|---------------------------|------------------------|--------|
| 9.7. | 96 | 36,29 | 14,06 | 22,23 | 0,232 |
| 10.7. | 83 | 30,52 | 11,96 | 18,56 | 0,224 |
| 11.7 | 86 | 30,52 | 11,82 | 18,70 | 0,217 |
| 12.7 | 82 | 31,06 | 12,24 | 18,82 | 0,229 |
| 13.7 | 83 | 29,95 | 11,23 | 18,72 | 0,226 |

| | | | | | |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|
| PRIEMER | 86 | 31,67 | 12,26 | 19,41 | 0,226 |
|----------------|----|-------|-------|-------|-------|

Tabuľka 12 Energetická náročnosť jednotlivých jazdných cyklov v dané dni [18]

Z dopočítaných priemerných hodnôt vyplýva, že elektrické komunálne vozidlo k prejdenu jedného kilometra dráhy v pracovnom cykle potrebuje dodať energiu z batérie o veľkosti $0,226 \text{ kWh/km}$. Do tejto spotreby energie nie je započítaná ďalšia energetická vyťaženosť prídavných technológií k práci a ani vyhrievania vo vozidle. Jedna sa čisto len o jazdu.

Z celkovej kapacity batérie $36,864 \text{ kWh}$, nie je možné využívať celkovú energiu na pohon vozidla. Čím vyššie percento rezervy energie ponecháme v batérií, o to šetrnejší prístup k batérií bol navrhnutý. Rezervou znižujem takzvaný DoD (Depth of discharge), hĺbku vybitia, čím prispievam k vyššej životnosti batérie. Pri uvažovaní týchto rezerv, by malo vozidlo dojazd:

- Pri 20% rezerve, sa kapacita batérií rovná $29,491 \text{ kWh}$, čo predstavuje energiu pre dojazd vozidla na $130,4 \text{ km}$.
- Pri 15% rezerve, sa kapacita batérií rovná $31,334 \text{ kWh}$, a teda veľkosť tejto energie vystačí vozidlu na dojazd $138,6 \text{ km}$.

Tieto predpoklady predstavujú veľkosť dojazdu elektrického komunálneho vozidla v teplých mesiacoch, kedy vozidlo nevyužíva vykurovanie v kabíne a slúži na navrhovaný jazdný cyklus zberu košov, pri ktorom nevyužíva žiadnu prídavnú

technologii. V tomto případě by energie v bateriích bohatě dostávala na požadované využití.

Na rozdíl od vozidel se spalovacím motorem, které využívají teplo od motoru na vyhřívání kabíny v zimním období mají elektromobily nevýhodu. Elektromobily převážně využívají elektrické topení, které čerpá energii z baterie a tím pádem sa znižuje ich samotný dojazd. V návrhu elektrického komunálního vozidla bolo uvažované elektrické topenie od firmy *Webasto*, o topnom výkone *1,3 kW*. Pri uvažovaní denného cyklu pracovnej zmeny pri nepretržitom vykurovaní 7,5 hod, sa spotreba energie topenia vyšplhá na 9,75 kWh. Celkovo sa zníži dojazd na:

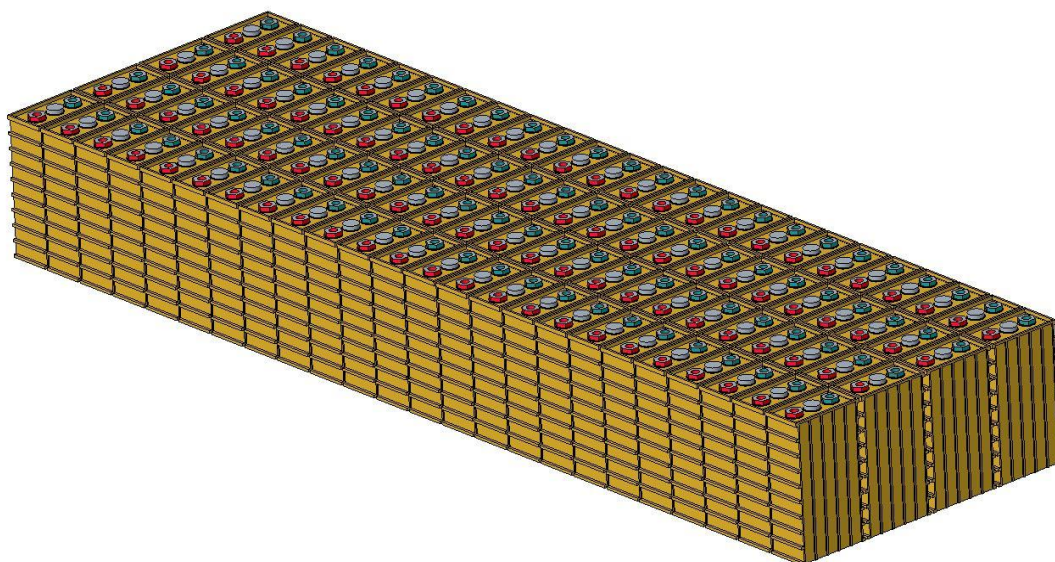
- Pri 20% rezerve a vykurovaní sa kapacita baterií rovná *19,741 kWh*, čo predstavuje energiu pre dojazd vozidla na *87,3 km*.
- Pri 15% rezerve a vykurovaní sa kapacita baterií rovná *21,584 kWh*, veľkosť tejto energie vystačí vozidlu na dojazd *95,5 km*.

Pri uvažovaní, že nenastane žiadna extrémna situácia v doprave a 15% rezervy je zvládnuteľný dojazd jazdného cyklu aj v zimných mesiacoch. Energetická náročnosť vozidla sa môže meniť so zmenou teploty, hmotnosti vozidla, pridanej pracovnej technológie a jazdnými podmienkami. O tom, aký to môže mať vplyv na dojazd, popisuje analýza citlivosti v ďalšej kapitole tejto práce.

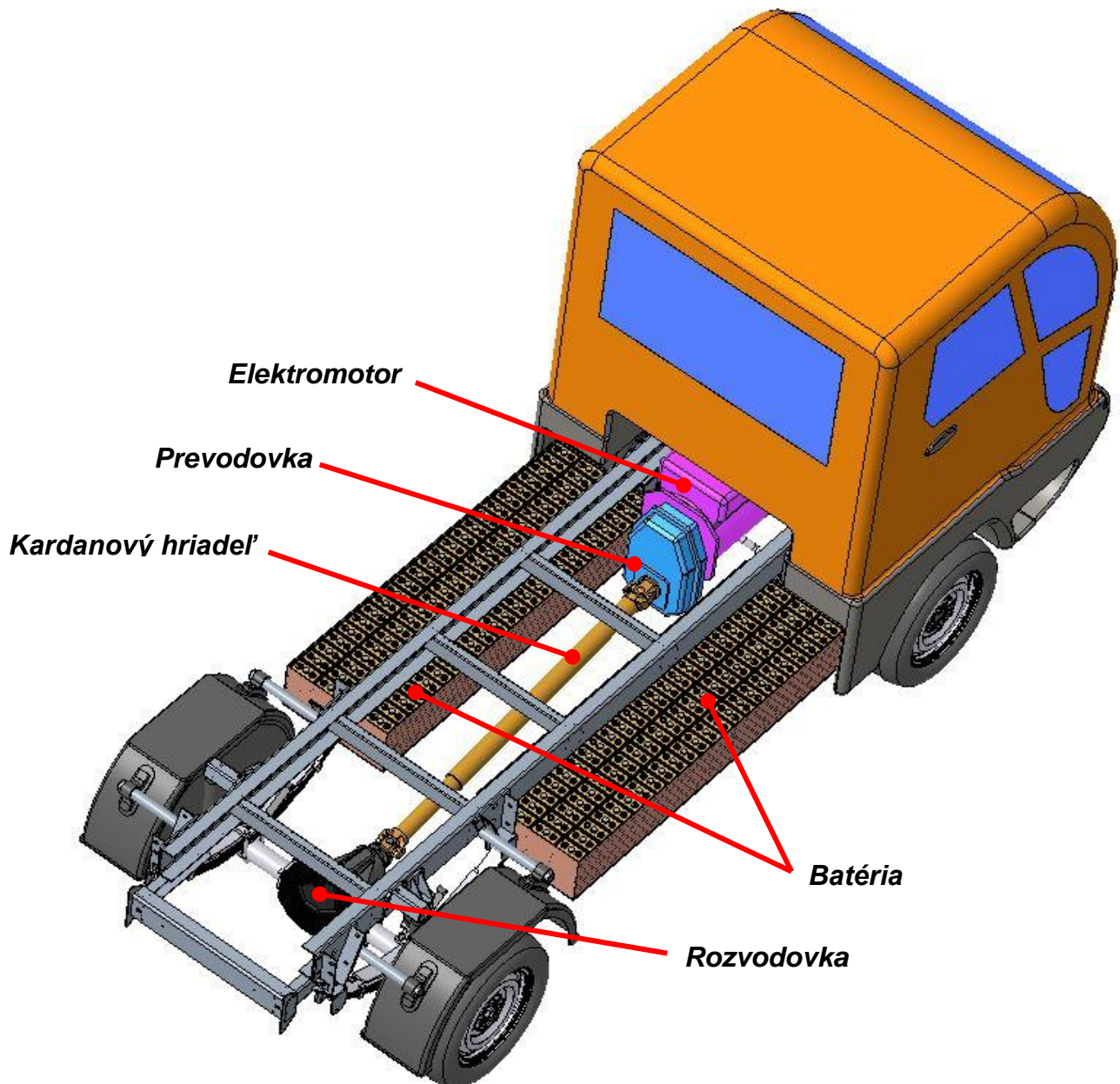
12 Konceptný návrh modelu vozidla

Po celkovej analýze a navrhnutí jednotlivých súčasti elektrického pohonu komunálneho vozidla, bol zostavený 3D model zástavby navrhnutého hnacieho ústrojenstva a batérie. Snahou autora práce bolo vytvoriť návrh, v ktorom bude využitých čo najviac dielov z pôvodnej spaľovacej verzie vozidla.

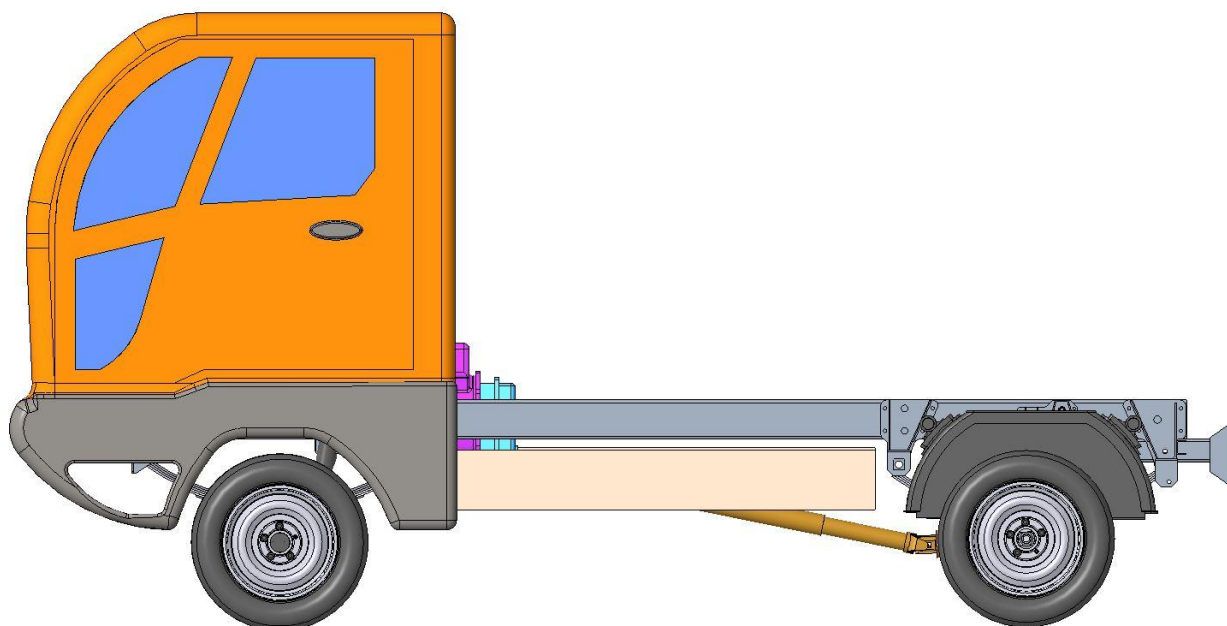
Do pôvodného priestoru spaľovacieho motora a prevodovky bol umiestnený elektromotor *Power MELA-C* s jednostupňovou čelnou prevodovkou. Z prevodovky cez upravený kardanový hriadeľ prechádza tok výkonu do rozvodovky, ktorá je ponechaná z pôvodnej spaľovacej verzie spolu s celou zadnou nápravou komunálneho vozidla. Palivové nádrže umiestnené po stranách vozidla boli nahradené batériou, ktorá bola rozdelená do dvoch častí po 96 článkoch, ktoré boli uložené do štyroch zásobníkov po 24 kusov článkov. Polovičná časť batérie je znázornená na Obr. 12.1. Zástavbové rozmery rozdelenej batérie majú veľkosť (v.š.d) $210 \times 460 \times 1536 \text{ mm}$. Približná hmotnosť 96 článkov je 235 kg. Spomínaný 3D model návrhu vozidla je znázornený na obrázkoch v ďalšej časti tejto kapitoly.



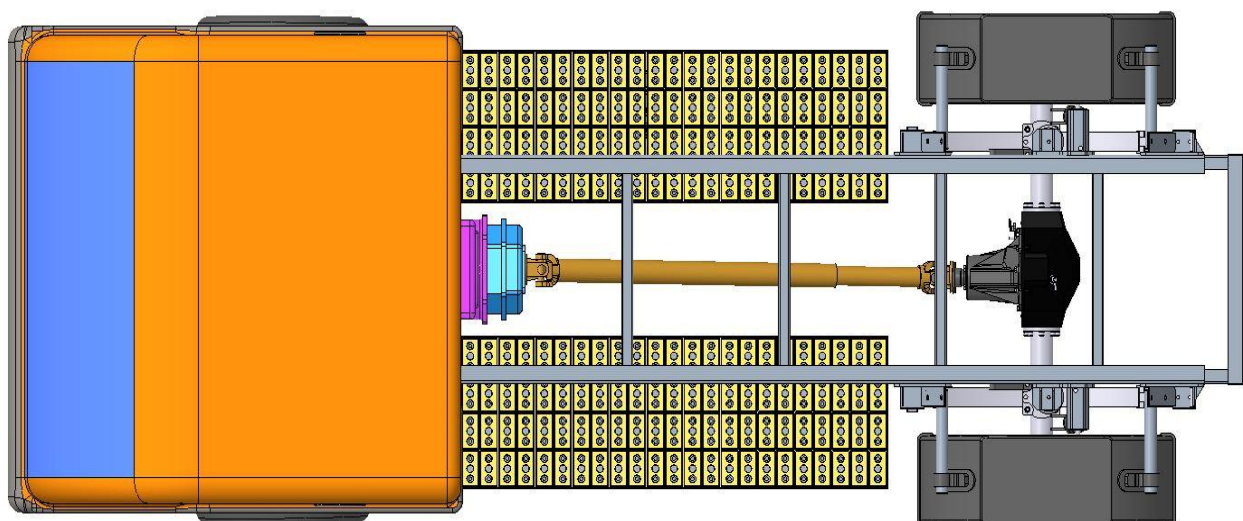
Obr. 12.1 3D model polovice batérie z 96 článkov [18]



Obr. 12.2 3D pohľad koncepčného návrhu vozidla [18]



Obr. 12.3 3D bočný pohľad koncepčného návrhu vozidla [18]



Obr. 12.4 3D pohľad z hora na koncepčný návrh vozidla [18]

13 Analýza citlivosti a zhodnotenie výsledkov

Komunálne vozidla sa obecné pýšia svojou multifunkčnosťou. Merané komunálne vozidlo v tejto diplomovej práci, v svojom pracovnom režime nevyužívalo žiadne ďalšie prídavne technológie. Raz za deň používa vozidlo hydrauliku, k vysypaniu odpadu z korby v spaľovni. K pohonu hydrauliky bolo uvažované elektrické čerpadlo, ktorého spotreba energie mala zanedbateľný vplyv na výslednú spotrebu energie. Práve preto, sa výsledná spotreba energie určovala priamo z jazdných odporov vozidla a v druhej variante v zimnom období uvažovala spotreba energie na topenie. Finálny výpočet spotreby energie z batérie, bol podrobne popísaný v kapitole 12. Výsledná spotrebovaná energia na 1 kilometer dráhy je $0,226 \text{ kWh}$. Táto hodnota spotreby, odpovedá meraniu vozidla v mesiaci júl, keď vykonávalo pracovný cyklus, zberu odpadkových košov na danej trati. V zimných mesiacoch keď sa pri práci používa topenie na vyhrievanie kabíny, vzrástla spotreba energie vozidla o 33,3% čo je približne $0,339 \text{ kWh}$ na 1 kilometer dráhy jazdného cyklu. Elektrické topenie patrí k jednému z najväčších aspektov zvýšeniu spotreby energie u elektrických vozidiel.

Ďalšie veličiny, ktoré pri svojej zmene, ovplyvňujú zmenu energetickej náročnosti a tým pádom aj spotrebu vozidla sú porovnané v Tabuľka 13. Z tabuľky je vidieť, ako sa bude meniť celková spotreba energie v prípade, že sa bude meniť jeden parameter.

| ZMENENÁ VELIČINA | SPOTREBA ENERGIE [kWh/km] | |
|--|----------------------------------|------------------|
| | bez topenia | s topením |
| <i>hmotnosť odpadkového koša 4kg</i> | 0,229 | 0,343 |
| <i>hmotnosť odpadkového koša 6kg</i> | 0,236 | 0,349 |
| <i>hmotnosť odpadkového koša 8kg</i> | 0,261 | 0,374 |
| <i>Súčiniteľ odporu valenia $f= 0,010$</i> | 0,186 | 0,300 |
| <i>Súčiniteľ odporu valenia $f= 0,02$</i> | 0,264 | 0,378 |
| <i>Súčiniteľ odporu valenia $f= 0,03$</i> | 0,344 | 0,457 |
| <i>Súčiniteľ rotačných hmôt $\delta= 1,5$</i> | 0,234 | 0,348 |
| <i>Súčiniteľ rotačných hmôt $\delta= 2$</i> | 0,245 | 0,358 |
| <i>Súčiniteľ rotačných hmôt $\delta= 2,5$</i> | 0,261 | 0,375 |
| <i>Súčiniteľ odporu vzduchu $c_x=0,7$</i> | 0,232 | 0,345 |
| <i>Súčiniteľ odporu vzduchu $c_x=0,8$</i> | 0,238 | 0,351 |
| <i>Súčiniteľ odporu vzduchu $c_x= 0,9$</i> | 0,244 | 0,357 |

Tabuľka 13 Spotreba energie pri zmene jedného parametru

Z porovnávaných zmien parametra vyplýva, že najväčší vplyv na zmenu spotreby má koeficient valivého odporu, takže zmena povrchu vozovky po ktorej sa vozidlo pohybuje. Ďalším dôležitým faktorom spotreby vozidla je jazdný štýl šoféra. To ako plynulé zrýchľuje, výrazne ovplyvňuje spotrebu energie a tak isto spôsob brzdzenia zohráva veľkú úlohu pri rekupracii energie.

Ak by navrhované elektrické komunálne vozidlo používalo prídavne technológie, jeho využitie a jazdný cyklus by sa zmenil, v závislosti na type technológie, a tým pádom sa zmení aj jeho energetická náročnosť. Obecne komunálne vozidla s použitím technológie, majú nižší nájazd kilometrov za zmenu, ale zase vyššiu spotrebu energie z dôvodu pohonu prídavných zariadení. K pohonu prídavných technológií u komunálnych vozidiel, sa prevažne používa hydraulika, ktorá by v elektrickej verzii komunálneho vozidla bola poháňaná elektrickými čerpadlami, so snahou využívať rovnaké príslušenstvo ako verzie so spaľovacím motorom. Druhou variantou by mohla byť možnosť, že jednotlivé prídavné zariadenia budú poháňané vlastným elektrickým pohonom, ktorý bude čerpať energiu z batérie vozidla. To akú variantu pohonu pre danú technológiu zvoliť, by ukázalo ďalšie meranie energetickej náročnosti danej technológie a jazdného cyklu vozidla.

13.1 Predpokladaná cena

Jedným z najdôležitejších faktorov, ktorý zohráva veľkú úlohu pri výbere vozidla, je jeho cena. U vozidiel s elektrickým pohonom je obecné známe, že ich vstupné obstarávacie náklady, sú vyššie ako u vozidiel so spaľovacím pohonom v danej kategórii. Pri návrhu predpokladanej ceny a návratnosti elektrického komunálneho vozidla, boli zistené ceny jednotlivých komponentov:

| | |
|---|--------------------------|
| <i>Bateriové články WB-LYP 60 AH (192ks)</i> | <i>335 200 Kč</i> |
| <i>Battery system + príslušenstvo</i> | <i>50 000 Kč</i> |
| <i>Elektromotor + riadiaca elektronika</i> | <i>110 000 Kč</i> |
| <i>Suma</i> | <i>495 200 Kč</i> |

Tabuľka 14 Ceny komponentov [15] [19]

ceny pohonných hmot a energií pre elektrické komunálne vozidlo :

| | | |
|----------------------------------|----------------|--------------------|
| 1 kWh elektrickej energie | | 4,34 Kč |
| | na 1 km | 0,98 Kč |
| 1 l nafty | | 32,40 Kč |
| | na 1 km | 5,30 Kč |
| Úspora pre el. energiu | | 4,33 Kč /km |

Tabuľka 15 Porovnanie ceny nafty a elektriny pre 1km navrhovaného vozidla [20] [21]

Z tabuľky 14 je zjavné , že najdrahším komponentom elektrického ústrojenstva sú batériové články. Ich cena bola zistená z maloobchodnej ceny predajcu.[15] Pri nákupe väčšieho množstva článkov, pre sériovú výrobu, je možné uvažovať zníženie ceny článkov až v desiatkach percent. Presnú hodnotu percent sa od predajcov neporadilo zistiť, z tohto dôvodu je do výpočtu celkovej obstarávacej ceny elektrického komunálneho vozidla použitá maloobchodná cena článkov. Celková cena elektrického komunálneho vozidla je vyššia o približne 495 200 Kč od pôvodnej verzie so spaľovacím motorom. V tabuľke 15 je porovnanie ceny nafty a elektriny pre jeden kilometer dráhy jazdného cyklu komunálneho vozidla so spaľovacím motorom a komunálneho vozidla s elektrickým pohonom. Pri jazde s elektrickým pohonom je možné ušetriť 4,33 Kč na 1 kilometer dráhy.

Z týchto hodnôt bola dopočítaná návratnosť vyššej investície pri obstarávaní komunálneho vozidla s elektrickým pohonom. Návratnosť investície bola počítaná zo vzťahu 13.1 ktorý popisuje počet potrebných prejdených kilometrov.

$$\frac{\textit{Suma}}{\textit{Úspora}} = \frac{495\,200}{4,33} = 114\,365\textit{ km} \quad (13.1)$$

Z tejto vzdialenosti, je pri priemernom denného cyklu ktorý ma 86 km vypočítaný potrebný počet pracovných dní :

$$\frac{114\,365}{86} \cong 1330\textit{ pracovné dni} \quad (13.2)$$

Čo pri uvažovaní 250 jazdných cyklov do roka, predstavuje obdobie:

$$\frac{1330}{250} \cong 5\textit{ rokov 3 mesiace a 26 dní} \quad (13.3)$$

Pre zaistenie obsluhy, určeného jazdného cyklu vozidla je potreba, aby batéria disponovala najmenej 70% pôvodnej kapacity, čo predstavuje dojazd 90 km v letných mesiacoch. Pri uvažovaní priemernej hĺbky vybitia 70%, je možné na základe doteraz prevedených meraní zvoleného typu článku odhadnúť, že trakčná batéria zníži svoju kapacitu na 70% pôvodnej kapacity za približne 2200-2600 vybíjajúcich cykloch. Možno teda predpokladať, takmer dvojnásobné dlhú dobu životnosti vozidla v danom jazdnom cykle, v ktorej druhej polovici bude mať spomínanú úsporu financií. Jeho životnosť, ani po dosiahnutí 70% pôvodnej kapacity nekončí. Vozidlo bude naďalej schopné vykonávať plnohodnotnú službu na kratších trasách. Bude záležať na prevádzkovateľovi, aký postoj k tomu zaujme. Buď zníži nájazd kilometrov pre pracovný denný cyklus, alebo má možnosť kúpy novej batérie pre elektrické komunálne vozidlo. Ďalšou výhodou, ktorá do výpočtu nebola započítaná, ale kladne pôsobí na zníženie ceny prevádzky elektrického komunálneho vozidla je samotný servis, v porovnaní so spaľovacou verziou vozu, ktorý je výrazne menší.

14 Závěr

Cílem této diplomové práce, bylo navrhnout elektrický pohon pro komunální vozidlo, které pracuje v městském prostředí. Predmetom skúmania a merania, bolo komunálne vozidlo Multicar M27, ktoré sa využíva k zberu malých odpadkových košov, v hlavnom meste Praha. K jeho návrhu bolo v prvom kroku, určenie pracovného jazdného cyklu. V druhom kroku bol dopočítaný výškový profil trate, z ktorého boli vypočítané jazdné odpory vozidla. Z nich, bola následne vypočítaná energetická náročnosť na kolesách, z ktorej boli určené potrebné parametre pre energetickú náročnosť a návrh hnacieho ústrojenstva vozidla. Navrhnutý pohon vyhovuje všetkým potrebným požiadavkám, ktoré komunálne vozidlo požaduje k svojej práci. V ďalšom kroku bol vytvorený 3D model vozidla, s navrhnutou zástavbou elektrického pohonu, do nosného rámu komunálneho vozidla.

V závere práce bola zhodnotená aj ekonomická stránka tohto návrhu, ktorá sa javí ako rentabilná. Avšak pre presnejšiu analýzu návratnosti investície, bude potrebné uskutočniť ďalšiu analýzu v rámci jazd v zimnom období keď sa využíva topenie a menia jazdné odpory, a viac zahrnúť vplyvy na ekonomiku prevádzky.

Zoznam použitých symbolov

| | | |
|--------------------|----------------------|---|
| a | [m/s ²] | Zrýchlenie |
| c_x | [-] | Súčiniteľ odporu vzduchu |
| E_a | [J] | Energia na prekonanie odporu zrýchlenia |
| $E_{Bat_celková}$ | [kWh] | Celková energia v baterkách |
| $E_{celková}$ | [J] | Energia celková jazdného cyklu |
| E_f | [J] | Energia na prekonanie odporu valenia |
| E_{Kol} | [J] | Energia celková na kolesách |
| E_{vz} | [J] | Energia na prekonanie odporu vzduchu |
| E_α | [J] | Energia na prekonanie odporu stúpania |
| f | [-] | Súčiniteľ valivého odporu |
| F_t | [N] | Trakčná sila |
| F_{t_max} | [N] | Trakčná sila maximálna |
| g | [m/s ²] | Tiažové zrýchlenie |
| I | [kg.m ²] | Moment zotrvačnosti |
| I_{Bat} | [A] | Menovitý prúd batérie |
| i_c | [-] | Celkový mechanický prevod |
| m | [kg] | Celková hmotnosť |
| M_K | [Nm] | Krútiaci moment na kolesách |
| M_{K_max} | [Nm] | Krútiaci moment maximálny na kolesách |
| M_M | [Nm] | Krútiaci moment na motore |
| M_{M_max} | [Nm] | Krútiaci moment maximálny na motore |
| m_{max} | [kg] | Maximálna povolená hmotnosť |
| m_n | [kg] | hmotnosť nákladu |
| m_p | [kg] | hmotnosť pohotovostná |
| M_r | [Nm] | Redukovaný moment na kolese |
| n_k | [min ⁻¹] | Otáčky na kolesách |
| O_a | [N] | Odpor zrýchlenia |
| O_f | [N] | Odpor valenia |
| O_{vz} | [N] | Odpor vzduchu |
| O_{zp} | [N] | Odpor zo zrýchlenia posuvných častí |

| | | |
|-----------------|----------------------|------------------------------------|
| O_{zr} | [N] | Odpor zo zrýchlenia rotačných hmôt |
| O_{α} | [N] | Odpor stúpania |
| P_M | [W] | Výkon elektromotora |
| $P_{menič}$ | [W] | Výkon frekvenčného meniča |
| R_{bat} | [Ω] | Vnútorý odpor batérie |
| r_d | [m] | Dynamický polomer kolesa |
| s | [m] | Dráha |
| s_x | [m ²] | Čelná plocha vozu |
| t | [s] | Čas |
| $U_{\check{c}}$ | [V] | Menovité napätie batérového článku |
| U_i | [V] | Menovité napätie celej batérie |
| U_m | [V] | Menovité napätie elektromotora |
| v | [m/s] | Rýchlosť |
| v_1 | [m/s] | Začiatočná rýchlosť |
| v_2 | [m/s] | Koncová rýchlosť |
| α | [°] | Uhol sklonu vozovky |
| δ | [-] | Súčiniteľ rotačných hmôt |
| η_{Bat} | [-] | Účinnosť batérie |
| η_c | [-] | Účinnosť celková |
| η_m | [-] | Účinnosť elektromotoru |
| $\eta_{menič}$ | [-] | Účinnosť frekvenčného meniča |
| η_p | [-] | Účinnosť prevodovky |
| η_r | [-] | Účinnosť rozvodovky |
| π | [-] | Ludolfovo číslo |
| ρ_{vzd} | [kg/m ³] | Hustota vzduchu |
| ω_k | [s ⁻¹] | Uhlová rýchlosť na kolese |
| ω_M | [s ⁻¹] | Uhlová rýchlosť elektromotora |

Zoznam obrázkov

| | |
|---|----|
| <i>Obr. 1.1 Elektromobil postavený Thomasom Parkerom v roku 1884 [1]</i> | 2 |
| <i>Obr. 2.1 Multicar M25 [4]</i> | 5 |
| <i>Obr. 2.2 MEGA e-Worker [5]</i> | 6 |
| <i>Obr. 2.3 Goupil G5 [6]</i> | 6 |
| <i>Obr. 2.4 Street Scooter [7]</i> | 7 |
| <i>Obr. 2.5 Alké ATX [8]</i> | 7 |
| <i>Obr. 2.6 Mapy trasy meraného jazdného cyklu z 11.7.2018 [18]</i> | 9 |
| <i>Obr. 2.7 Základné rozmery vozidla Multicar M27 [13]</i> | 10 |
| <i>Obr. 4.1 Výškový profil trate jazdného cyklu z 11.7.2018 [18]</i> | 13 |
| <i>Obr. 5.1 Priebeh rýchlosti v časti skúmaného úseku jazdného cyklu 11.7.2018 [18]</i> | 18 |
| <i>Obr. 6.1 Rýchlostný profil rozdelený do úsekov [12]</i> | 19 |
| <i>Obr. 7.1 Schéma pohonu elektrického komunálneho vozidla [18]</i> | 23 |
| <i>Obr. 9.1 Elektromotor STW Technic , Power MELA-C 80 kW [19]</i> | 27 |
| <i>Obr. 9.2 Základné rozmery elektromotora Power Mela-C 80 kW [19]</i> | 28 |
| <i>Obr. 9.3 Momentová a výkonová charakteristika elektromotora Power MELA-C 80kW [19]</i> . | 29 |
| <i>Obr. 9.4 Pole účinnosti elektromotora Power MELA-C 80kW [19]</i> | 29 |
| <i>Obr. 10.1 Batériový článok WB-LYP60AHA LiFeYPO4 (3.2V/60Ah)[15]</i> | 31 |
| <i>Obr. 12.1 3D model polovice batérie z 96 článkov [18]</i> | 37 |
| <i>Obr. 12.2 3D pohľad koncepčného návrhu vozidla [18]</i> | 38 |
| <i>Obr. 12.3 3D bočný pohľad koncepčného návrhu vozidla [18]</i> | 39 |
| <i>Obr. 12.4 3D pohľad z hora na koncepčný návrh vozidla [18]</i> | 39 |

Zoznam tabuliek

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabuľka 1 :Základné technické údaje MEGA e-Worker [5].....</i> | <i>6</i> |
| <i>Tabuľka 2: Základné technické údaje Goupil G5 [6]</i> | <i>6</i> |
| <i>Tabuľka 3: Základné technické údaje Street Scooter [7]</i> | <i>7</i> |
| <i>Tabuľka 4: Základné technické údaje Alké ATX [8].....</i> | <i>7</i> |
| <i>Tabuľka 5: Základné technické údaje Multicar M27 C [13][8]</i> | <i>9</i> |
| <i>Tabuľka 6: Ukážka nameraných vstupných veličín jazdného cyklu [18].....</i> | <i>11</i> |
| <i>Tabuľka 7: Hmotnosti časti vozu [18]</i> | <i>17</i> |
| <i>Tabuľka 8: Maximálne vypočítané hodnoty z analýzy cyklov [18]</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabuľka 9 Základné technické parametre elektromotora Power MELA-C 80 kW [19]</i> | <i>27</i> |
| <i>Tabuľka 10 Ukážka priradenia účinnosti elektromotora v jednotlivých časových intervaloch cyklu [18].....</i> | <i>30</i> |
| <i>Tabuľka 11 Základné technické parametre WB-LYP60AHA LiFeYPO4 [15].....</i> | <i>31</i> |
| <i>Tabuľka 12 Energetická náročnosť jednotlivých jazdných cyklov v dané dni [18].....</i> | <i>35</i> |
| <i>Tabuľka 13 Spotreba energie pri zmene jedného parametru.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Tabuľka 14 Ceny komponentov [15] [19]</i> | <i>41</i> |
| <i>Tabuľka 15 Porovnanie ceny nafty a elektriny pre 1km navrhovaného vozidla [20] [21].....</i> | <i>42</i> |

Zoznam zdrojov

- [1] História elektromobilov. EcoAuto.sk [online]. Zvolen: Eco Auto, 2017 [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <https://www.ecoauto.sk/historia-elektromobil>
- [2] VEJBOR, Jan. Stručná historie elektromobilů. Asociace pro elektromobilitu České republiky [online]. 2015 [cit. 2018-11-06]. Dostupné z: <http://www.elektromobily-os.cz/stru%C4%8Dn%C3%A1-historie-elektromobilu>
- [3] HLAVATÝ, Miroslav. Multicar M 25. Valka.cz [online]. 2006 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://www.valka.cz/Multicar-M-25-t47216>
- [4] TOLAR, Martin. Historie IFA Multicar. Autozine [online]. 2015 [cit. 2018-12-12]. Dostupné z: <https://autozine.cz/historie-ifa-multicar/>
- [5] HEJHÁLEK, Jiří. Malý elektricky poháněný nákladní automobil MEGA E-Worker. Stavební technika [online]. 2014 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/maly-elektricky-pohaneny-nakladni-automobil-mega-e-worker>
- [6] HEJHÁLEK, Jiří. Eurogreen CZ rozšiřuje nabídku užitkových elektromobilů. Stavební technika [online]. 2017 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <https://www.stavebni-technika.cz/clanky/eurogreen-cz-rozsiruje-nabidku-uzitkovych-elektromobilu>
- [7] StreetScooter [online]. 2018 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: <https://www.streetscooter.eu/de/modelle/work/>
- [8] Alke' Electric Utility Vehicles. Alké [online]. 2017 [cit. 2019-02-04]. Dostupné z: https://www.alke.com/?gclid=Cj0KCQjw9JzoBRDjARIsAGcdIDX_qf9bR5Q0n2rsS6ZfuXauCWajfOiqzfCIBfJWCV-3e7Ktr5KDaSYaAnknEALw_wcB
- [9] Pražské Služby. Info NOVA [online]. 2018 [cit. 2019-06-06]. Dostupné z: http://www.infonova.cz/onas_ref_prazske-sluzby.php
- [10] ACHTENOVÁ, Gabriela a Vlastislav TŮMA. Vozidla s pohonem všech kol. Praha: BEN-technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-236-7.
- [11] VLK, F.: *Dynamika motorových vozidel*, 1. vyd. Brno: NAKLADATELSTVÍ A VYDAVATESTVÍ VLK, Brno, 2000. 434 str. ISBN 80-238-5273-6

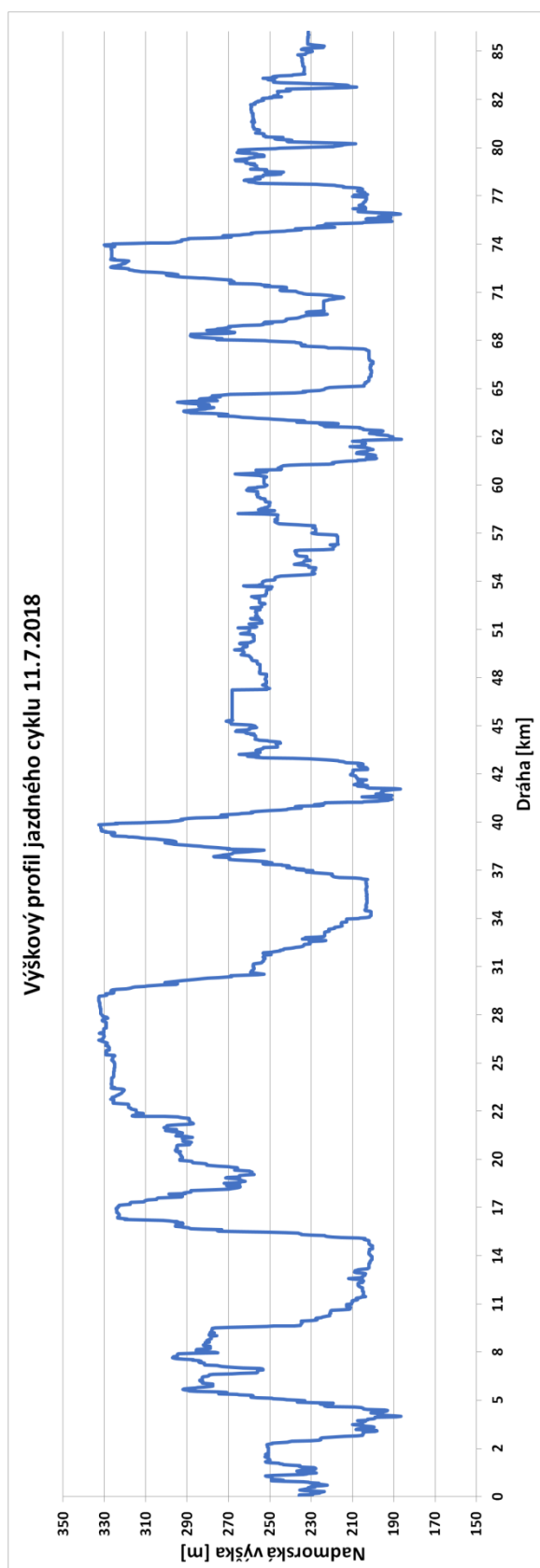
- [12] PRŮCHA, Pavel. *Energetická náročnost jízdy elektrobusu SOR EBN 11 na lince 163*. Praha, 2018. Diplomová práce.
- [13] Multicar M27. Hako Clean ahead [online]. 2013 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <http://www.cms-bitforbit.com/multicar/m27.html>
- [14] IP-Stupeň krytí. Pracovní světla [online]. 2015 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.pracovni-svetla.cz/ip-stupen-kryti/>
- [15] Winston (40-1000 Ah). GVL Power [online]. 2018 [cit. 2019-07-06]. Dostupné z: <https://www.ev-power.eu/Winston-40Ah-200Ah/WB-LYP60AHA-LiFeYPO4-3-2V-60Ah.html#tab1>
- [16] Winston Battery Trading Limited. GVL Power [online]. 2017 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.ev-power.eu/docs/pdf/>
- [17] BALASHOV, Alexandr. *Energetická náročnost jízdy elektrobusu*. Praha, 2017. Diplomová práce.
- [18] Autor práce. Praha, 2018/2019
- [19] PowerMELA-C E-machines. STW Technic [online]. 2017 [cit. 2019-06-28]. Dostupné z: <https://www.stw-technic.com/products/electrification-products/powermela-c-e-machines/>
- [20] Aktuální (průměrná) cena 1 kWh elektřiny. Energie123 [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.energie123.cz/elektrina/ceny-elektricke-energie/cena-1-kwh/>
- [21] Benzín a nafta. Kurzy CZ [online]. [cit. 2019-07-02]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/index.asp?A=6&SEO=&RF=20>

Prílohy

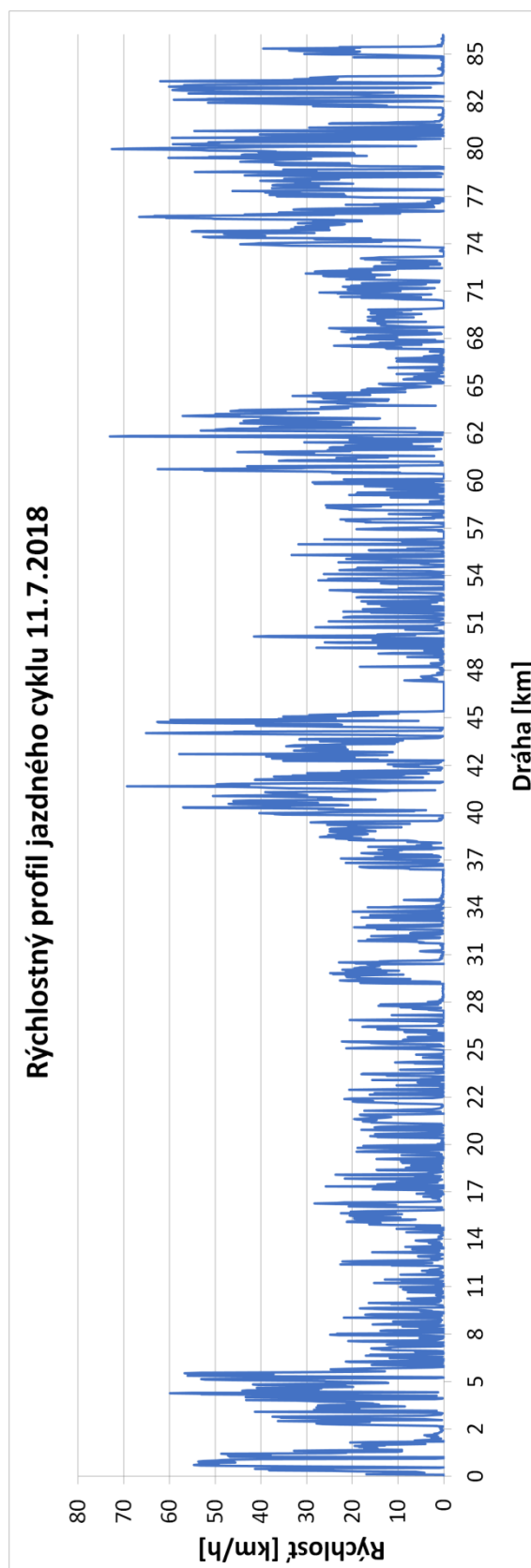
Príloha 1 : účinnosť elektromotora pre výpočtovú funkciu

| | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-----------------------|
| Krútiaci moment [Nm] | 350 | 0,89 | 0,91 | 0,93 | 0,935 | | | | | | |
| | 248 | 0,9 | 0,92 | 0,935 | 0,94 | 0,95 | | | | | |
| | 220 | 0,905 | 0,925 | 0,935 | 0,94 | 0,95 | 0,95 | | | | |
| | 195 | 0,91 | 0,93 | 0,935 | 0,945 | 0,95 | 0,955 | 0,95 | | | |
| | 165 | 0,915 | 0,93 | 0,94 | 0,945 | 0,95 | 0,96 | 0,945 | | | |
| | 140 | 0,92 | 0,935 | 0,94 | 0,945 | 0,945 | 0,96 | 0,945 | 0,94 | 0,935 | |
| | 110 | 0,92 | 0,93 | 0,935 | 0,94 | 0,94 | 0,945 | 0,935 | 0,93 | 0,92 | |
| | 80 | 0,91 | 0,925 | 0,93 | 0,935 | 0,935 | 0,945 | 0,935 | 0,89 | 0,86 | |
| | 55 | 0,88 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,89 | 0,88 | 0,87 | |
| | | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 | 5000 | 5500 | 6000 |
| | | | | | | | | | | | Otáčky [1/min] |

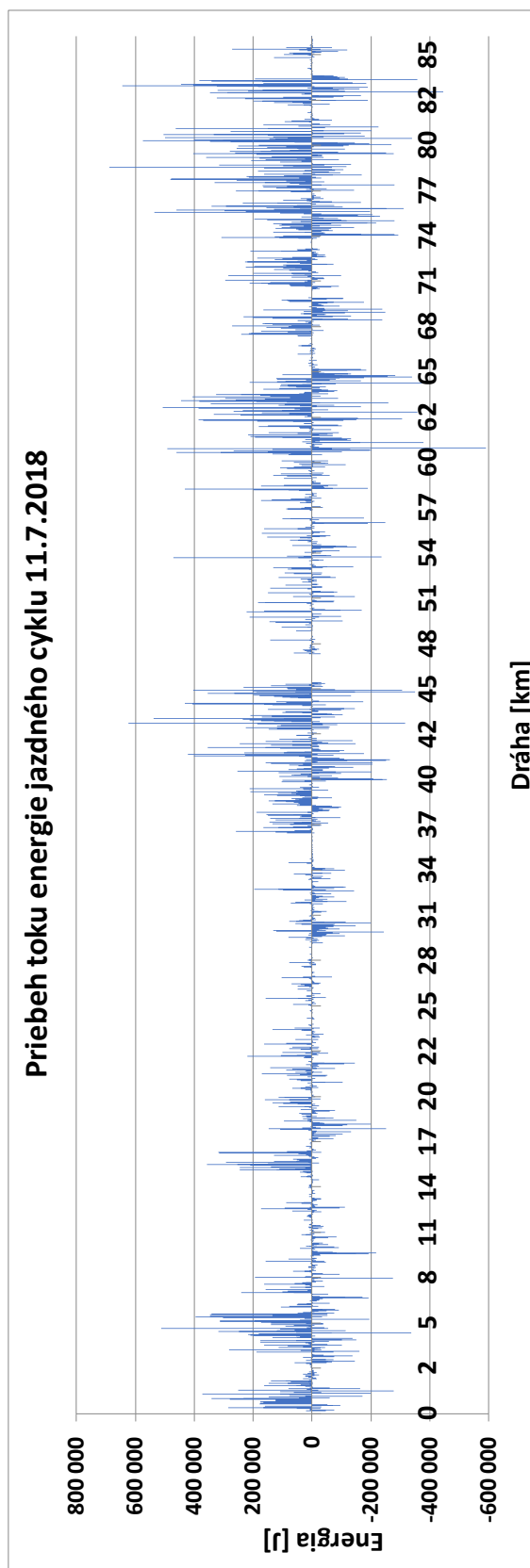
Príloha 2 : Výškový profil jazdného cyklu z 11.7.2018



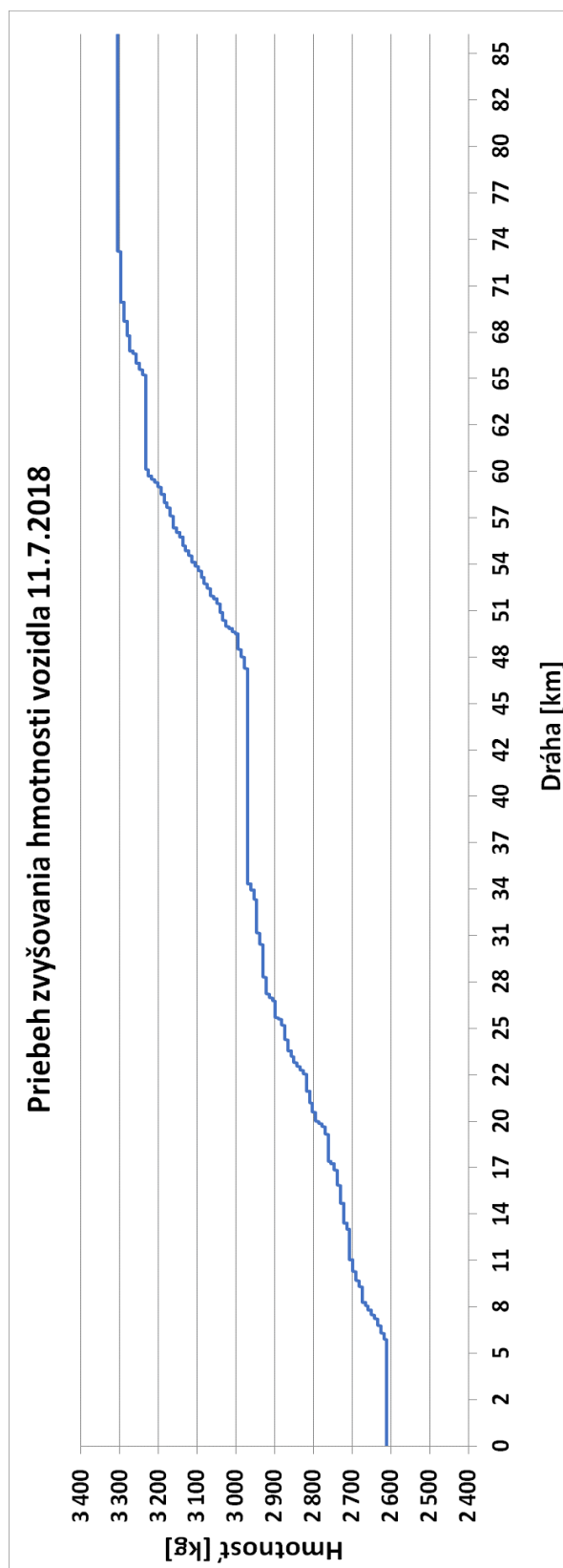
Príloha 3 : Rýchlostný profil jazdného cyklu z 11.7.2018



Príloha 4 : Priebeh toku energie jazdného cyklu z 11.7.2018



Príloha 5 : Priebeh zvyšovania hmotnosti v jazdnom cykle z 11.7.2018



Príloha 6 : Výkonový profil jazdného cyklu z 11.7.2018

