

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Projekt elektromobilní dopravy odpadů v městě Plzeň

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub FENCL**
Osobní číslo: **E16N0098P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Projekt elektromobilní dopravy odpadů v městě Plzeň**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte celkovou energetickou bilanci dopravy odpadu v městě Plzeň.
2. Zpracujte energetickou bilanci dopravy odpadu do spalovny Chotíkov.
3. Navrhňte varianty ekologického řešení dopravy včetně napájecích stanic.
4. Porovnejte současný a navržený systém dopravy - technicky a ekonomicky.
5. Zpracujte rešerši současného stavu a vývoje elektromobility nákladní dopravy v ČR a ve světě.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Elektromobilita - články v IEEE
2. Zahraniční podklady IEEE
3. Literatura - časopisy - VISION
4. Odborná firemní literatura - podklady Plzeňská teplárenská

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Zdeněk Vostracký, DrSc., dr. h. c.


Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi využití alternativního pohonu pro popelářská vozidla. Primárně se práce zaměřuje na možnost využití elektrické energie v nákladní automobilové dopravě. Výpočty stanovují energetickou bilanci provozu popelářského vozu na území města Plzně a v jeho okolí. Práce porovnává konvenční řešení pohonu popelářských vozidel s možnostmi alternativních pohonů. Dochází ke zhodnocení nahrazení stávajícího pohonu pohonem elektrickým z energetického, ekonomického a ekologického hlediska. Je popsána problematika dobíjení elektricky poháněných vozidel.

Klíčová slova

Elektromobilita, energetická bilance, spotřeba paliva, popelářský vůz, elektrický pohon, dobíjecí stanice

Abstract

The diploma thesis deals with possibilities of application an alternative propulsion system in refuse truck. Primary is the work aimed to opportunity of application electrical energy in heavy duty transport. The calculations lead to energy balance of refuse truck operation in town Pilsen and it's around. The diploma thesis compares the convetional solution of refuse truck propulsion system with alternative propulsion systems. The main goal of the work is the evaluation of replacment the existing propulsion system with electrical propulsion system from energetical, economical and ecological point of view. There is described a problematic of electric vehicles charging.

Key words

Elektromobility, energy balance, fuel consumption, refuse truck, electric propulsion system, charging station

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.



podpis

V Plzni dne 22.5.2018

Jakub Fencel

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Zdeňku Vostrackému, DrSc, dr. h. c. a konzultantovi Ing. Václavu Mužíkovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	12
ÚVOD	14
1 FYZIKA POHYBU VOZIDLA	15
1.1 VÝPOČET SIL PŮSOBÍCÍCH NA VOZIDLO	15
1.2 VÝKON POHONU VOZIDLA	20
2 VÝVOJ AUTOMOBILOVÉHO PRŮMYSLU	24
2.1 ELEKTROMOBILY	24
2.2 ELEKTROMOBILY V NÁKLADNÍ DOPRAVĚ.....	27
2.2.1 <i>Elektromobilní nákladní vůz BYD třídy 5</i>	28
2.2.2 <i>Elektromobilní popelářský vůz BYD třídy 6</i>	29
2.2.3 <i>Elektromobilní popelářský vůz třídy 8</i>	30
2.2.4 <i>BYD pojezdové vozidlo</i>	31
2.2.5 <i>Vozidlo pro svoz odpadu Motiv</i>	32
2.2.6 <i>Elektricky poháněné vozy firmy Wrightspeed Powertrain</i>	33
2.2.7 <i>Orange EV Class 8 Terminal Truck</i>	34
2.2.8 <i>E-FORCE</i>	36
2.2.9 <i>Nákladní elektromobil Tesla Semi</i>	37
2.3 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ UVEDENÝCH VOZIDEL	39
2.4 ELEKTRICKÁ DÁLNIČE.....	40
2.4.1 <i>První elektrická dálnice na světě – Švédsko</i>	40
2.4.2 <i>Elektrická dálnice v Německu</i>	41
3 DOBÍJENÍ ELEKTRICKÝCH VOZIDEL	43
3.1 DOBÍJENÍ PLUG-IN.....	43
3.2 DOBÍJENÍ POMOCÍ STANICE S VÝSUVNÝM PANTOGRAFEM	43
3.3 DOBÍJENÍ POMOCÍ INTELIGENTNÍCH PANTOGRAFŮ.....	44
4 ENERGETICKÁ BILANCE POPELÁŘSKÉHO VOZU PŘI SVOZU ODPADU	45
4.1 ZÍSKÁNÍ A ÚPRAVA DAT	45
4.2 ENERGETICKÁ BILANCE POPELÁŘSKÉHO VOZIDLA - TRASA Č. 1	46
4.3 ENERGETICKÁ BILANCE POPELÁŘSKÉHO VOZIDLA – TRASA Č.2	57
4.4 ENERGETICKÁ BILANCE POPELÁŘSKÉHO VOZIDLA – TRASA Č.3	66
5 RENTABILITA ALTERNATIVNÍHO POHONU	75
5.1 DOBÍJECÍ STANICE V AREÁLU ČISTÉ PLZNĚ.....	80
5.2 POROVNÁNÍ TRAS.....	82
5.3 EKONOMICKÁ VÝHODNOST PROJEKTU.....	85

ZÁVĚR	87
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	89

Seznam symbolů a zkratek

a	Zrychlení (m/s^2)
c_d	Koeficient odporu vzduchu (–)
f	Koeficient valivého tření (–)
E	Energie ($J;Ws$)
E_j	Energie jízdy ($J;Ws$)
E_Z	Energie zdvihač ($J;Ws$)
E_L	Energie lisu ($J;Ws$)
E_R	Energie rekuperace ($J;Ws$)
E_-	Energie dostupná k rekuperaci ($J;Ws$)
F	Síla (N)
F_A	Odpor vzduchu (N)
F_α	Odpor sklonu vozovky (N)
F_M	Síla motoru vozidla (N)
F_S	Setrvačná síla (N)
F_V	Valivý odpor (N)
g	Gravitační zrychlení (m/s^2)
h	Výška (m)
H	Výhřevnost (J/kg)
m	Hmotnost (kg)
n	Otáčky motoru (ot/min)
N_i	Investiční náklady (CZK)
P	Výkon (W)
pn	Počet nádob (ks)
s	Dráha (m)
S_k	Čelní plocha kabiny vozu (m^2)
t	Čas (s)
v	Rychlost (m/s)
V	Objem (m^3)
W	Práce (J)
α	Úhel sklonu vozovky ($^\circ$)

η_{em}	Účinnost elektrického motoru (%)
η_R	Účinnost rekuperace (%)
Δ	Změna (–)
ρ	Hustota látky (kg/m^3)
\$	Americký dolar
BYD.....	Build Your Dreams
CO_2	Oxid uhličitý
OPEC.....	Organizace zemí vyvážejících ropu
USA	Spojené Státy Americké

Seznam obrázků

OBR. 1.1: SÍLY PŮSOBÍCÍ NA VOZIDLO	15
OBR. 1.2: GRAF ZÁVISLOSTI VALIVÉHO ODPORU NA SKLONU VOZOVKY.....	17
OBR. 1.3: GRAF ZÁVISLOSTI SÍLY PŮSOBÍCÍ PROTI VOZIDLU VLIVEM VĚTRU NA RYCHLOSTI VOZIDLA	18
OBR. 1.4: GRAF ZÁVISLOSTI GRAVITAČNÍ SÍLY PŮSOBÍCÍ PROTI SMĚRU VOZU NA SKLONU VOZOVKY.....	19
OBR. 1.5: ZÁVISLOST SETRVAČNÉ SÍLY V ZÁVISLOSTI NA ZRYCHLENÍ VOZIDLA.....	19
OBR. 1.6: VÝSLEDNÝ SOUČET SIL PŮSOBÍCÍCH PROTI SMĚRU JÍZDY VOZIDLA V ZÁVISLOSTI NA RYCHLOSTI POHYBU VOZIDLA A NA SKLONU VOZOVKY.....	20
OBR. 1.7: VÝKON DIESELOVÉHO MOTORU V ZÁVISLOSTI NA JEHO OTÁČKÁCH (PŘEVZATO Z [5] A UPRAVENO).....	21
OBR. 1.8: TOČIVÝ MOMENT DIESELOVÉHO MOTORU V ZÁVISLOSTI NA JEHO OTÁČKÁCH (PŘEVZATO Z [5] A UPRAVENO).....	22
OBR. 1.9: MAPA ÚČINNOSTI ASYNCHRONNÍHO MOTORU S MĚDĚNOU KLECOVOU KOTVOU (PŘEVZATO Z [44] A UPRAVENO).....	22
OBR. 1.10: MAPA ÚČINNOSTI SYNCHRONNÍHO MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY (PŘEVZATO Z [44] A UPRAVENO).....	23
OBR. 2.1: CAMILLE JENATZY V ELEKTRICKY POHÁNĚNÉM VOZE PO PŘEKONÁNÍ RYCHLOSTI 100 KM/H (PŘEVZATO Z [7]).....	25
OBR. 2.2: ELEKTRICKÉ VOZIDLO ZNAČKY SEBRING VANGUARD Z ROKU 1974 (PŘEVZATO Z [9]).....	26
OBR. 2.3: USPOŘÁDÁNÍ KONSTRUKCE ELEKTRICKY POHÁNĚNÉHO NÁKLADNÍHO VOZIDLA (PŘEVZATO Z [24] A UPRAVENO).....	28
OBR. 2.4: NÁKLADNÍ VOZIDLO TŘÍDY 5 FIRMY BYD (PŘEVZATO Z [29]).....	29
OBR. 2.5: POPELÁŘSKÝ VŮZ TŘÍDY 6 S ELEKTRICKÝM POHONEM (PŘEVZATO Z [13]).....	30
OBR. 2.6: KONSTRUKCE VOZU FIRMY BYD PRO ÚČELY SVOZU ODPADU (PŘEVZATO Z [14]).....	31
OBR. 2.7: POJEZDOVÉ VOZIDLO FIRMY BYD (PŘEVZATO Z [31]).....	32
OBR. 2.8: PLNĚ ELEKTRICKY POHÁNĚNÝ POPELÁŘSKÝ VŮZ FIRMY MOTIV S DATOVÝM LISTEM (PŘEVZATO Z [11]).....	33
OBR. 2.9: POHLED NA UMÍSTĚNÍ BATERIÍ, POHONU, DIESELOVÉHO GENERÁTORU (PŘEVZATO Z [16] A UPRAVENO).....	34
OBR. 2.10: PLNĚ ELEKTRICKÉ TRANSPORTNÍ VOZIDLO FIRMY ORANGE (PŘEVZATO Z [22])..	35
OBR. 2.11: POROVNÁNÍ PROVOZNÍCH NÁKLADŮ VOZIDLA FIRMY ORANGEEV S VOZIDLEM STEJNÉHO TYPU S DIESELOVÝM MOTOREM (PŘEVZATO Z [26]).....	36
OBR. 2.12: RENTABILITA ELEKTRICKÉHO VOZIDLA E-FORCE (PŘEVZATO Z [24] A UPRAVENO).....	37
OBR. 2.13: NÁKLADNÍ ELEKTROMOBIL SEMI ZNAČKY TESLA (PŘEVZATO Z [15]).....	38
OBR. 2.14: POROVNÁNÍ ENERGETICKÉ KAPACITY BATERIÍ NÁKLADNÍCH VOZIDEL.....	39
OBR. 2.15: POROVNÁNÍ DOJEZDOVÉ VZDÁLENOSTI VOZIDEL NA JEDNO NABITÍ.....	39
OBR. 2.16: HYBRIDNÍ NÁKLADNÍ VOZIDLO SCANIA S PANTOGRAFY (PŘEVZATO Z [32]).....	41
OBR. 3.1: PANTOGRAF DOBÍJECÍ STANICE DOSEDAJÍCÍ NA KONTAKTY, KTERÉ JSOU SOUČÁSTÍ ELEKTROBUSU (PŘEVZATO Z [34]).....	44
OBR. 3.2: ZOBRAZENÍ DOBÍJENÍ AUTOBUSU V PRŮBĚHU JÍZDY ZE SÍTĚ MĚSTSKÉ HROMADNÉ DOPRAVY DÍKY PANTOGRAFU (PŘEVZATO Z [34]).....	44
OBR. 4.1: GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ ANALYZOVANÉ TRASY (VYTVOŘENO V [46]).....	46
OBR. 4.2: VÝŠKOVÝ PROFIL TRASY ČISTÁ PLZEŇ – SLOVANY – CHOTÍKOV – ČISTÁ PLZEŇ.....	47
OBR. 4.3: ZNÁZORNĚNÍ SKLONU VOZOVKY NA TRASE VOZIDLA	48
OBR. 4.4: GRAF RYCHLOSTI VOZIDLA V PRŮBĚHU SMĚNY	49

OBR. 4.5: ZMĚNA HMOTNOSTI VOZIDLA NA TRASE	50
OBR. 4.6: PRŮBĚH HODNOT VALIVÉHO ODPORU	50
OBR. 4.7: PŮSOBENÍ ODPORU SKLONU VOZOVKY NA VOZIDLO	51
OBR. 4.8: PRŮBĚH ODPORU VZDUCHU BĚHEM JÍZDY VOZIDLA	51
OBR. 4.9: PRŮBĚH SETRVAČNÉ SÍLY	52
OBR. 4.10: VÝSLEDNÝ PRŮBĚH PŮSOBENÍ SÍLY NA VOZIDLO V PRŮBĚHU JÍZDY.....	53
OBR. 4.11: VÝSLEDNÁ ENERGIE VOZIDLA V PRŮBĚHU JÍZDY	54
OBR. 4.12: ZNÁZORNĚNÍ PODÍLU JEDNOTLIVÝCH ENERGIÍ NA CELKOVÉ ENERGII VOZIDLA...	56
OBR. 4.13: GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ ANALYZOVANÉ TRASY (VYTVOŘENO V [46])	57
OBR. 4.14: VÝŠKOVÝ PROFIL TRASY ČISTÁ PLZEŇ – JIŽNÍ PŘEDMĚSTÍ – CHOTÍKOV – JIŽNÍ PŘEDMĚSTÍ – CHOTÍKOV – ČISTÁ PLZEŇ	58
OBR. 4.15: ZNÁZORNĚNÍ SKLONU VOZOVKY NA TRASE VOZIDLA	59
OBR. 4.16: GRAF RYCHLOSTI VOZIDLA V PRŮBĚHU SMĚNY	59
OBR. 4.17: ZMĚNA HMOTNOSTI VOZIDLA NA TRASE	60
OBR. 4.18: PRŮBĚH HODNOT VALIVÉHO ODPORU	61
OBR. 4.19: PŮSOBENÍ ODPORU SKLONU VOZOVKY NA VOZIDLO	61
OBR. 4.20: PRŮBĚH ODPORU VZDUCHU BĚHEM JÍZDY VOZIDLA	62
OBR. 4.21: PRŮBĚH SETRVAČNÉ SÍLY	62
OBR. 4.22: VÝSLEDNÝ PRŮBĚH PŮSOBENÍ SÍLY NA VOZIDLO V PRŮBĚHU JÍZDY.....	63
OBR. 4.23: VÝSLEDNÁ ENERGIE VOZIDLA V PRŮBĚHU JÍZDY	63
OBR. 4.24: ZNÁZORNĚNÍ PODÍLU JEDNOTLIVÝCH ENERGIÍ NA CELKOVÉ ENERGII VOZIDLA...	65
OBR. 4.25: GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ ANALYZOVANÉ TRASY (VYTVOŘENO V [46])	66
OBR. 4.26: VÝŠKOVÝ PROFIL TRASY ČISTÁ PLZEŇ – SEVERNÍ PŘEDMĚSTÍ – NÝŘANY – ČISTÁ PLZEŇ	67
OBR. 4.27: ZNÁZORNĚNÍ SKLONU VOZOVKY NA TRASE VOZIDLA	68
OBR. 4.28: GRAF RYCHLOSTI VOZIDLA V PRŮBĚHU SMĚNY	68
OBR. 4.29: ZMĚNA HMOTNOSTI VOZIDLA NA TRASE	69
OBR. 4.30: PRŮBĚH HODNOT VALIVÉHO ODPORU	69
OBR. 4.31: PŮSOBENÍ ODPORU SKLONU VOZOVKY NA VOZIDLO	70
OBR. 4.32: PRŮBĚH ODPORU VZDUCHU BĚHEM JÍZDY VOZIDLA	70
OBR. 4.33: PRŮBĚH SETRVAČNÉ SÍLY	71
OBR. 4.34: VÝSLEDNÝ PRŮBĚH PŮSOBENÍ SÍLY NA VOZIDLO V PRŮBĚHU JÍZDY.....	72
OBR. 4.35: VÝSLEDNÁ ENERGIE VOZIDLA V PRŮBĚHU JÍZDY	72
OBR. 4.36: ZNÁZORNĚNÍ PODÍLU JEDNOTLIVÝCH ENERGIÍ NA CELKOVÉ ENERGII VOZIDLA...	74
OBR. 5.1: SYSTÉM PRO NOČNÍ DOBÍJENÍ ELEKTROMOBILŮ SPOLEČNOSTI ABB SE TŘEMI VÝSTUPNÍMI KONEKTORY (PŘEVZATO Z [43])	81
OBR. 5.2: POROVNÁNÍ NÁKLADŮ DIESELOVÉHO POPELÁŘSKÉHO VOZU S ELEKTROMOBILEM SE SOUČASNÝM ROČNÍM NÁJEZDEM KM.....	83
OBR. 5.3: POROVNÁNÍ NÁKLADŮ DIESELOVÉHO POPELÁŘSKÉHO VOZU S ELEKTROMOBILEM S DVOJNÁSOBNÝM ROČNÍM NÁJEZDEM KM	84

Úvod

S neustálým nárůstem počtu obyvatel planety Země rostou požadavky na uspokojení veškerých lidských potřeb. Současnou společnost vyspělých světových států lze označit za konzumní. Jedním z důsledků lidského počínání je růst produkce odpadů. Odpadní materiály je zapotřebí zpracovat, a to pokud možno co nejekologičtěji a co nejekonomičtěji. Nedílnou součástí každodenního života je svoz odpadu za pomoci popelářských vozů. Nevyvratitelným faktem přímo souvisejícím se svozem odpadů je využití ropných produktů, ať se jedná o naftu nebo benzin, jako paliva pro motory popelářských vozidel. Spalováním těchto paliv dochází k uvolňování plynů, které vedou k znečištění ovzduší. Proto je kladen důraz na splnění emisních limitů všech vozidel a s narůstajícím trendem prosazování ohleduplnosti vůči životnímu prostředí je velmi pravděpodobné, že bude docházet v blízké budoucnosti k nahrazování automobilů se spalovacími motory automobily využívající alternativní pohon, které by výrazně omezily, či snad zcela odstranily produkci emisních plynů.

Spalovací motory jsou osvědčené, spolehlivé a ekonomicky dostupné. Na druhou stranu účinnost spalovacích motorů nepřesahuje 50 %, pro jejich provoz je nezbytná složitá údržba související s poměrně vysokým množstvím dílů pohonného soustrojí, a navíc spalovací motory vyžadují údržbu provozních kapalin. Vystává tedy několik otázek: „Existují již alternativní pohony pro nákladní automobily využívané v praxi? Jsou takové pohony energeticky, ekologicky a ekonomicky výhodné?“

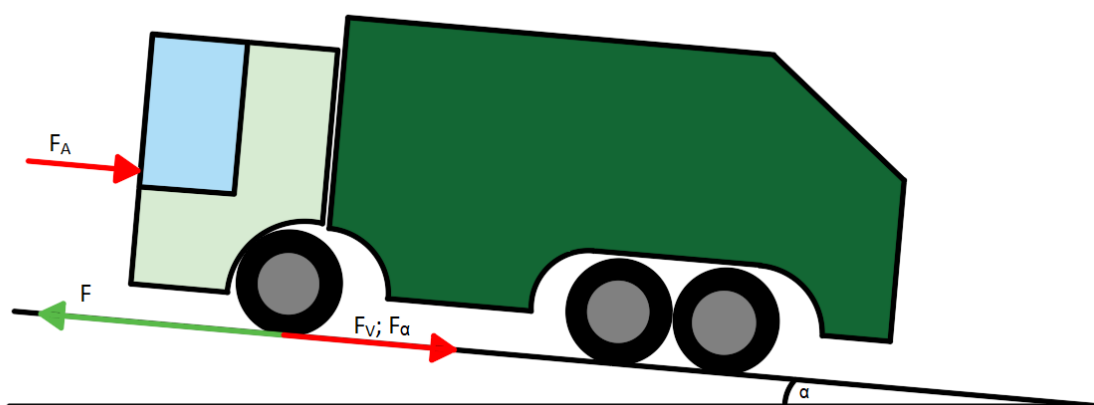
V mé práci dochází k zodpovězení těchto otázek, k popisu stávajícího stavu popelářských vozidel využívaných na území města Plzně. Práce zachycuje současné trendy ve vývoji alternativních pohonů se zaměřením na využití elektrické energie. Práce přibližuje problematiku související s provozem elektricky poháněných vozidel, možnosti akumulace elektrické energie ve vozidlech, způsoby dobíjení baterií vozidel.

Zanalyzováním tras, stylu jízdy a četnosti výjezdů popelářských vozidel na území města Plzně a na trase z Plzně do Chotíkova, kde se nalézá spalovna odpadů, vyhodnocuje práce energetickou náročnost provozu popelářských vozidel. Cílem práce je provést návrh alternativního pohonu pro popelářské vozidlo, který by bylo možné implementovat pro vozidla na území města Plzně. Pro výpočty mi byla poskytnuta data společnosti Čistá Plzeň.

Neopomenutelným faktorem, který vede ke hledání alternativních pohonů automobilů, je nevyhnutelné vyčerpání zásob fosilních paliv. Jedná se o globální problém, se kterým se lidstvo bude muset vypořádat a je pouze otázkou času kdy.

1 Fyzika pohybu vozidla

Pro stanovení energetické bilance pohybujícího se tělesa, v našem případě nákladního automobilu v podobě popelářského vozu, je nutné si uvědomit, jaké síly na vozidlo v průběhu jízdy působí a jejichž účinky musí vůz překonávat nebo naopak využívat ve svůj prospěch. Důležitou roli při výpočtech hraje samotné těleso, automobil. Pro výpočty je nutné znát jeho hmotnost, rozměry a v neposlední řadě typ pohybu, který automobil vykonává. Jak je známo, rozměry popelářského vozu se v průběhu jízdy, na rozdíl od zbylých dvou parametrů, nemění. Jízdu vozu při sběru odpadu dochází k navyšování jeho hmotnosti v závislosti na množství nashromážděného odpadu. Pohyb popelářského vozu je při svozu odpadu značně rozmanitý. V průběhu nakládání odpadu je vozidlo v klidu, tudíž má nulovou rychlost. Při přejezdu mezi jednotlivými sběrnými místy provádí vůz pohyby zrychlené, při navyšování rychlosti s kladným zrychlením a při snižování rychlosti se záporným zrychlením. V určitých fázích se může automobil dostat do pohybu, kdy se jeho rychlost nemění a pohybuje se tak rovnoměrně. Dalším faktorem působícím na energii vozu je sklon trasy, po které se pohybuje. Pro výpočty je tak dobré znát výškový profil trasy, kterou popelářský vůz v průběhu své směny absolvuje. Pro analýzu sil působících na vozidlo slouží Obr. 1.1, na kterém je zjednodušený model popelářského vozu spolu s vektory působících sil.



Obr. 1.1: Síly působící na vozidlo

1.1 Výpočet sil působících na vozidlo

Při výpočtu sil působících na vozidlo je využito modelu na Obr. 1.1. Provedením řady zjednodušení dojde k eliminaci sil potřebných pro výpočet. Výpočty zahrnují následující síly: *valivý odpor, odpor sklonu vozovky, odpor vzduchu a setrvačnou sílu.*

Při výpočtu bylo použito hodnot jednotlivých veličin uvedených v Tab. 1.1.

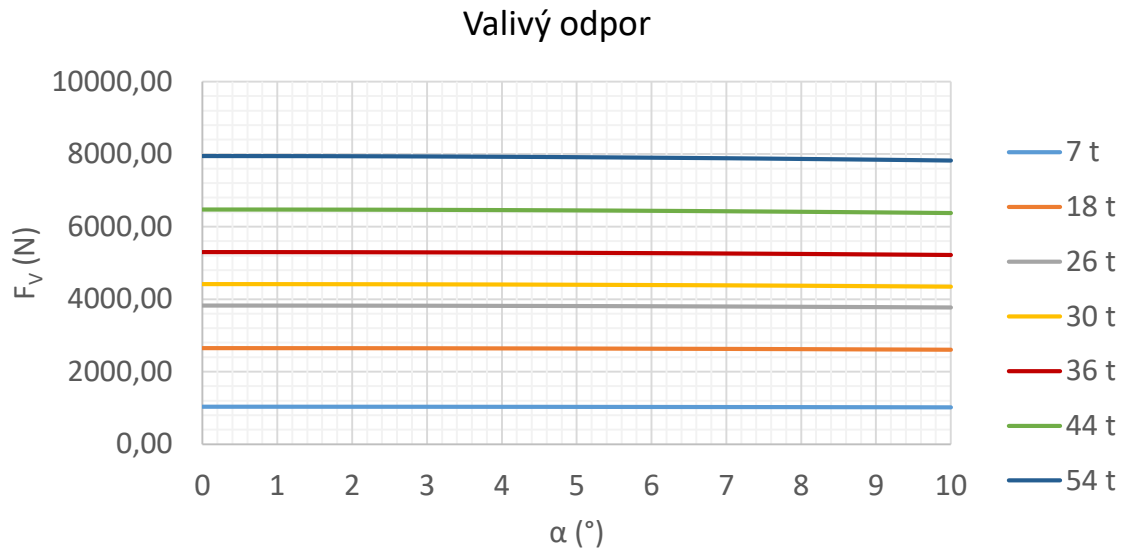
Tab. 1.1: Hodnoty pro výpočet sil působících na vozidlo

Veličina	Označení	Hodnota	Jednotka
Koeficient odporu vzduchu	c_d	1	-
Koeficient valivého tření	f	0,015	-
Gravitační zrychlení	g	9,81	m/s^2
Hmotnost vozidla 1	m_1	7	t
Hmotnost vozidla 2	m_2	18	t
Hmotnost vozidla 3	m_3	26	t
Hmotnost vozidla 4	m_4	30	t
Hmotnost vozidla 5	m_5	36	t
Hmotnost vozidla 6	m_6	44	t
Hmotnost vozidla 7	m_7	54	t
Čelní plocha kabiny vozu	S_k	6,3	m^2
Rychlost	v	0÷28	m/s
Úhel sklonu vozovky	α	0÷10	°
Hustota vzduchu	ρ	1,28	kg/m^3

Valivý odpor působí proti směru pohybu vozidla. Je způsoben kontaktem pneumatiky s povrchem vozovky a vychází ze vztahu:

$$F_V = f \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \quad (1.1)$$

f je koeficient valivého tření, jehož uvedená hodnota v Tab. 1.1 platí pro kontakt pneumatiky nákladního vozu s asfaltem vozovky [4], m je celková hmotnost vozidla. Ve výpočtech byly použity čtyři rozdílné hmotnosti pro znázornění závislosti působících sil vlivem změny zatížení vozidla. Gravitační zrychlení g je pro zeměpisné souřadnice České republiky dáno tabulkově [2]. Sklon vozovky znázorňuje α (°), při výpočtech byla použita reálná možná převýšení vyskytující se na území města Plzně. Z grafického znázornění výpočtu na Obr. 1.2 je patrné, že hlavní roli pro velikost třecí síly působící proti pohybu vozidla hraje hmotnost vozidla. Oproti tomu změna úhlu sklonu vozovky nevyvolává rapidní změnu třecí síly.

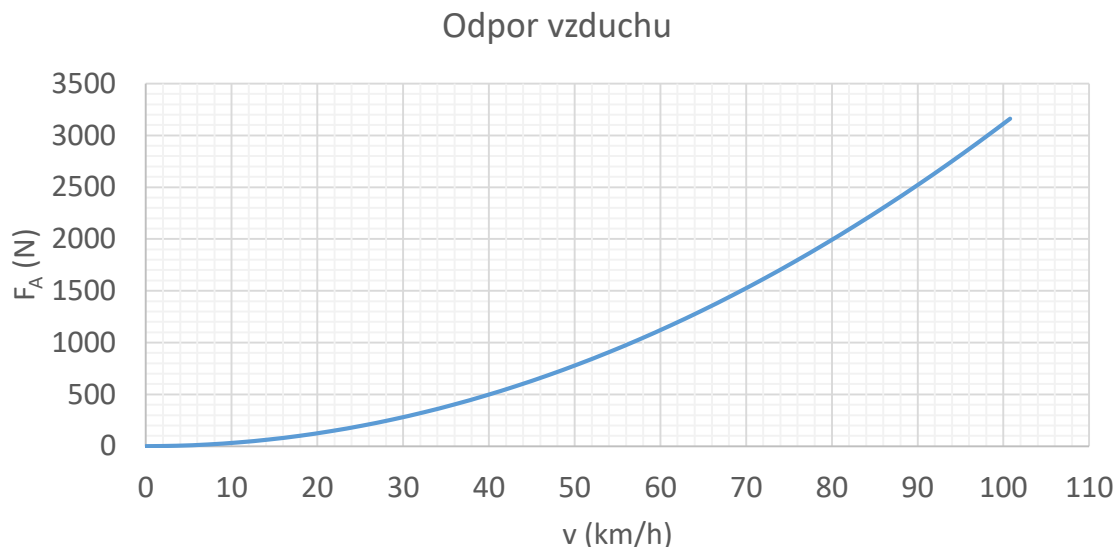


Obr. 1.2: Graf závislosti valivého odporu na sklonu vozovky

Další síla působící proti směru jízdy reprezentuje odpor vzduchu vznikající při pohybu. Velikost této síly se může spočítat ze vztahu:

$$F_A = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_d \cdot S_k \cdot v^2 \quad (1.2)$$

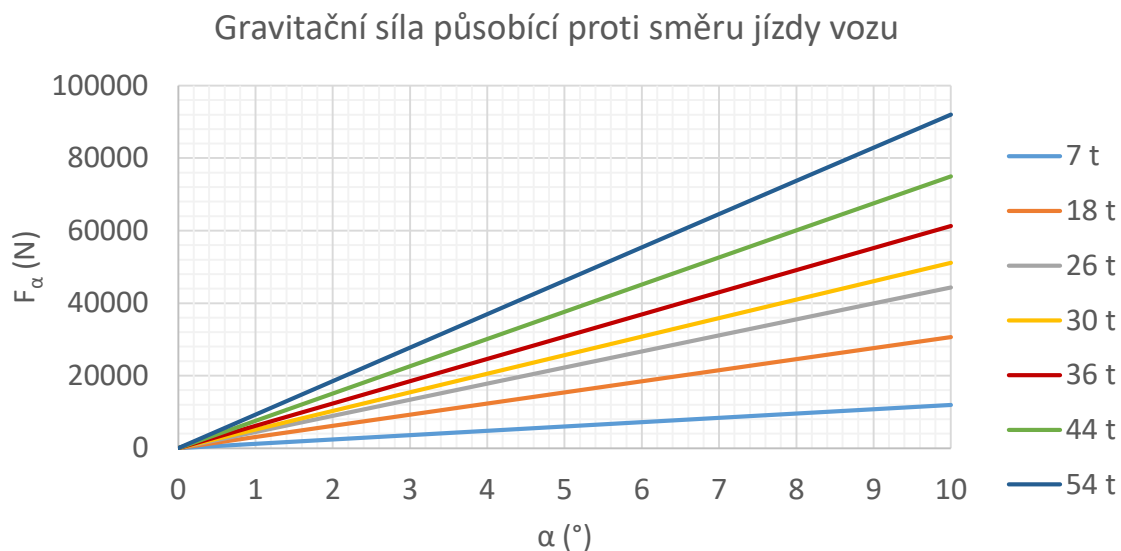
V rovnici (1.2) je ρ hustota vzduchu, c_d je koeficient odporu vzduchu, který závisí na tvaru předmětu, v tomto případě popelářského vozu, přesněji řečeno na tvaru plochy, na kterou vzduch působí [2]. Pro popelářský vůz tato plocha odpovídá obdélníku. S_k znázorňuje čelní plochu kabiny vozidla, jejíž hodnotu lze spočítat díky rozměrům kabiny uváděných výrobcem [3]. Rychlost, kterou se vozidlo pohybuje, je v . Při výpočtu se bere v potaz panující bezvětří. V momentě, kdy by se povětrnostní podmínky změnily, došlo by k připočtení rychlosti proudění větru k rychlosti jízdy vozidla za předpokladu, že by směr působení větru byl proti směru jízdy vozu. Jedinou proměnnou v rovnici je v tomto případě rychlost vozidla, případně rychlost proudícího větru. Jelikož se tato veličina v rovnici vyskytuje v kvadrátu, je výslednou křivkou síly reprezentující odpor vzduchu exponenciála, jak je vidět na Obr. 1.3.



Obr. 1.3: Graf závislosti síly působící proti vozidlu vlivem větru na rychlosti vozidla

Nesmí být opomenuta jedna ze základních sil působících na Zemi, kterou je gravitační síla. Gravitační síla působí mezi dvěma tělesy, v tomto případě se jedná o popelářský vůz a Zemi. Tato síla působí v těžišti těles. Provedením rozkladu této síly do složek byla využita pro výpočet pouze ta část, která působí proti směru pohybu vozidla. V tomto případě jede vozidlo do kopce. V opačném případě by síla působila ve směru pohybu vozidla. Znázorněním výsledného působení gravitační síly na vozidlo jedoucí do kopce na Obr. 1.4 je patrné, že se zde opět projevuje výrazně změna hmotnosti vozidla stejně tak jako v případě třecí síly. Rozdíl nastává ve výrazné změně velikosti působící síly v závislosti na změně sklonu vozovky. Změna sklonu vozovky tak ve výsledku pro působení gravitační síly není zanedbatelná.

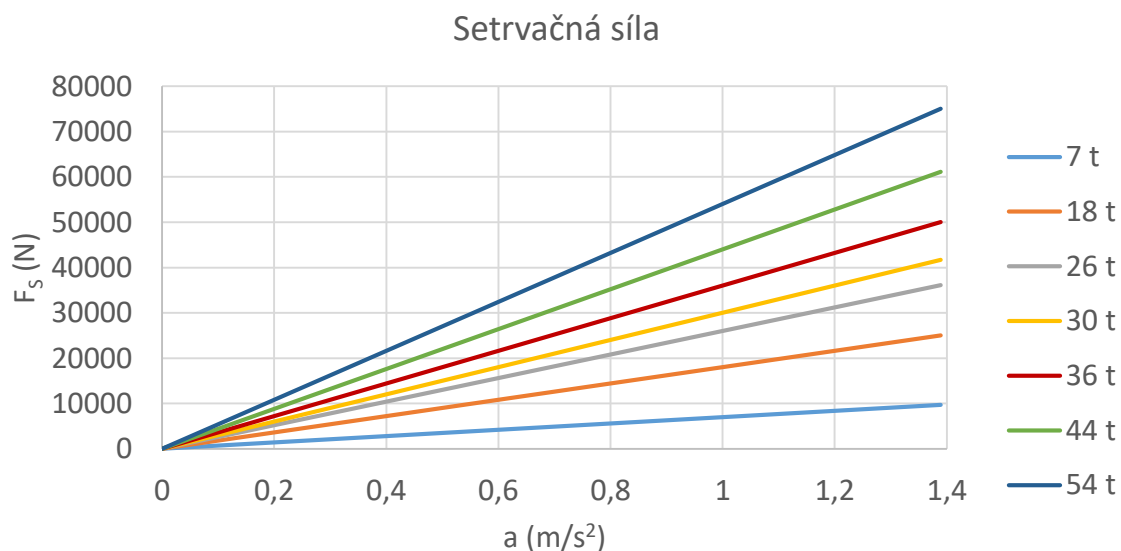
$$F_{\alpha} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (1.3)$$



Obr. 1.4: Graf závislosti gravitační síly působící proti směru vozu na sklonu vozovky

Pro respektování změny rychlosti vozidla, tedy pro stav kdy vozidlo zrychluje či zpomaluje, se zavedla setrvačná síla, kterou lze vyjádřit vztahem:

$$F_S = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (1.4)$$



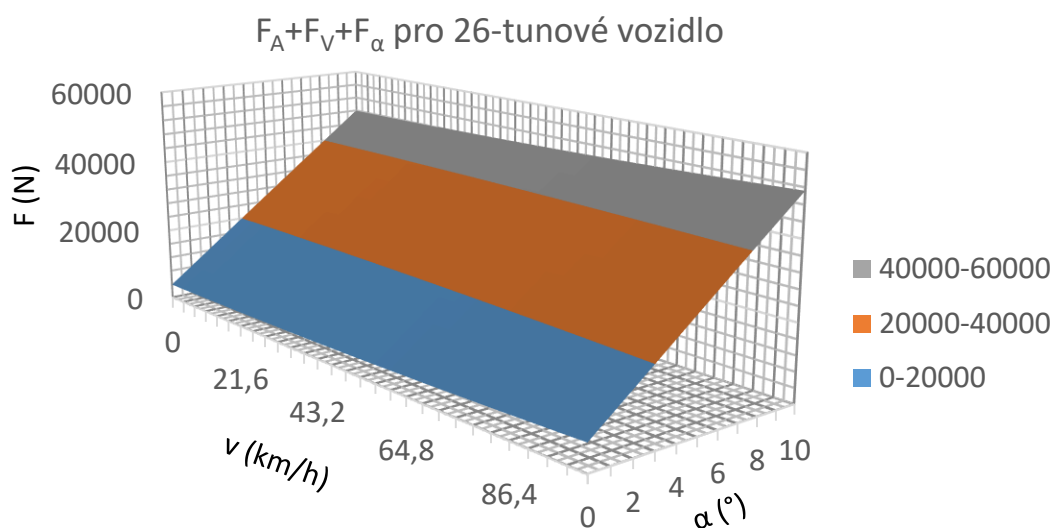
Obr. 1.5: Závislost setrvačné síly v závislosti na zrychlení vozidla

Rovnice (1.4) může být pro rovnoměrný pohyb vozidla zanedbána. Rovnoměrný pohyb je prováděn v průběhu jízdy zřídka, a proto je síla zanedbána pouze ve vzorovém výpočtu a v reálném výpočtu je uvažována. Díky rovnicím (1.1)-(1.4) lze spočítat, jakou potřebnou sílu

musí dodávat motor vozidla, aby se mohl vůz pohybovat potřebným směrem. Výsledná rovnice má tvar:

$$F = F_V + F_A + F_\alpha + F_S \quad (1.5)$$

Pro vzorový výpočet velikosti síly dodávané motorem pro pohyb vozidla je uvažován rovnoměrný pohyb vozidla. Výsledné síly jsou počítány pro vozidlo o hmotnosti 26 t. Na Obr. 1.6 jsou znázorněny výsledné síly, které působí proti směru jízdy vozidla. Jak je z grafu patrné, změna rychlosti vozidla vyvolá mírnou změnu výsledné síly. Oproti tomu změna hmotnosti vozidla, jeho vyšší zatížení, vede k výraznému nárůstu sil působících proti směru pohybu vozidla. [1]

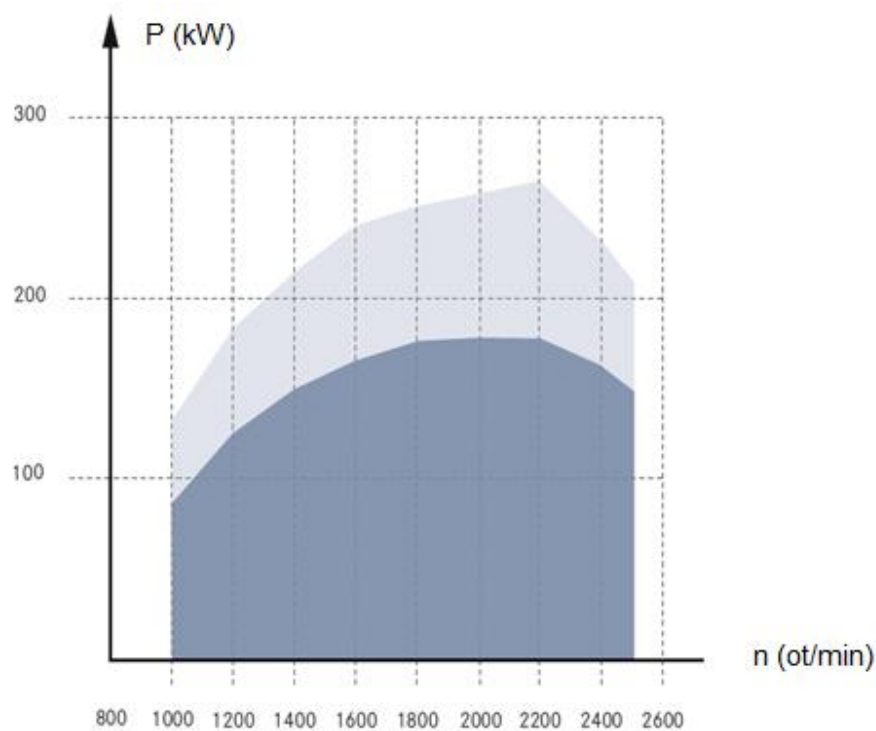


Obr. 1.6: Výsledný součet sil působících proti směru jízdy vozidla v závislosti na rychlosti pohybu vozidla a na sklonu vozovky

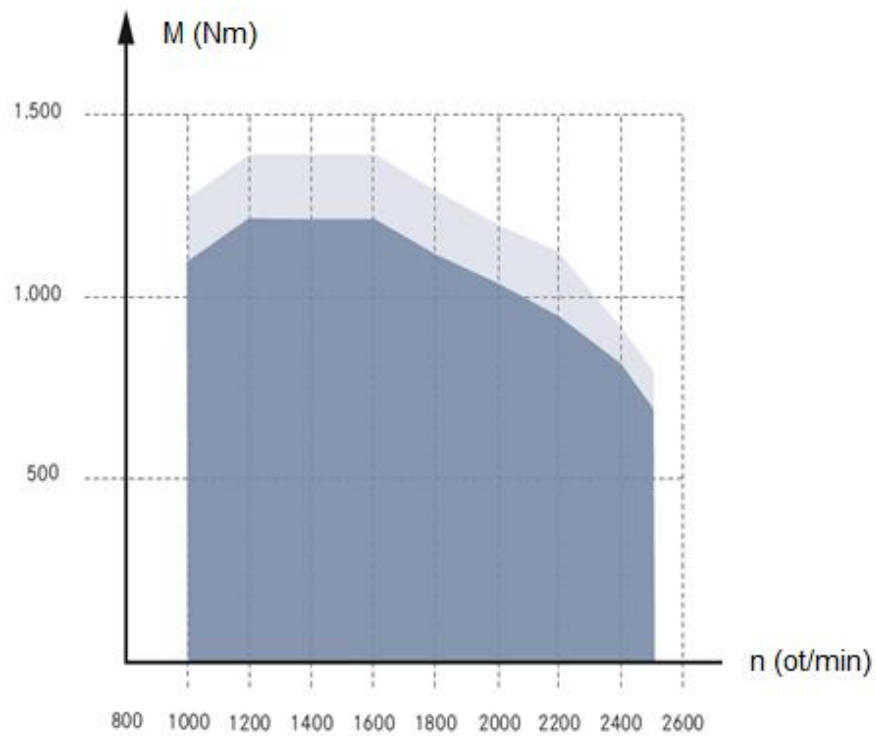
1.2 Výkon pohonu vozidla

V části 1.1 využitím zjednodušeného modelu došlo k výpočtu sil, které musí vozidlo překonat, aby vykonalo požadovaný pohyb. Výsledná síla, kterou je vozidlo poháněno vpřed, musí mít vyšší hodnotu, než síly působící proti směru pohybu vozu. Pohon automobilu zajišťuje jeho motor. Výrobci automobilů uvádějí parametry motorů a lze z nich tak vyčíst informace týkající se výkonu a točivého momentu motoru. Pro náš případ je využito parametrů automobilu Mercedes-Benz Econic, který se využívá pro svoz odpadu. Z manuálu dostupného pro Mercedes-Benz Econic lze zjistit maximální výkon a točivý moment automobilu. Z charakteristiky na Obr. 1.7 vyplývá maximální výkon motoru, který

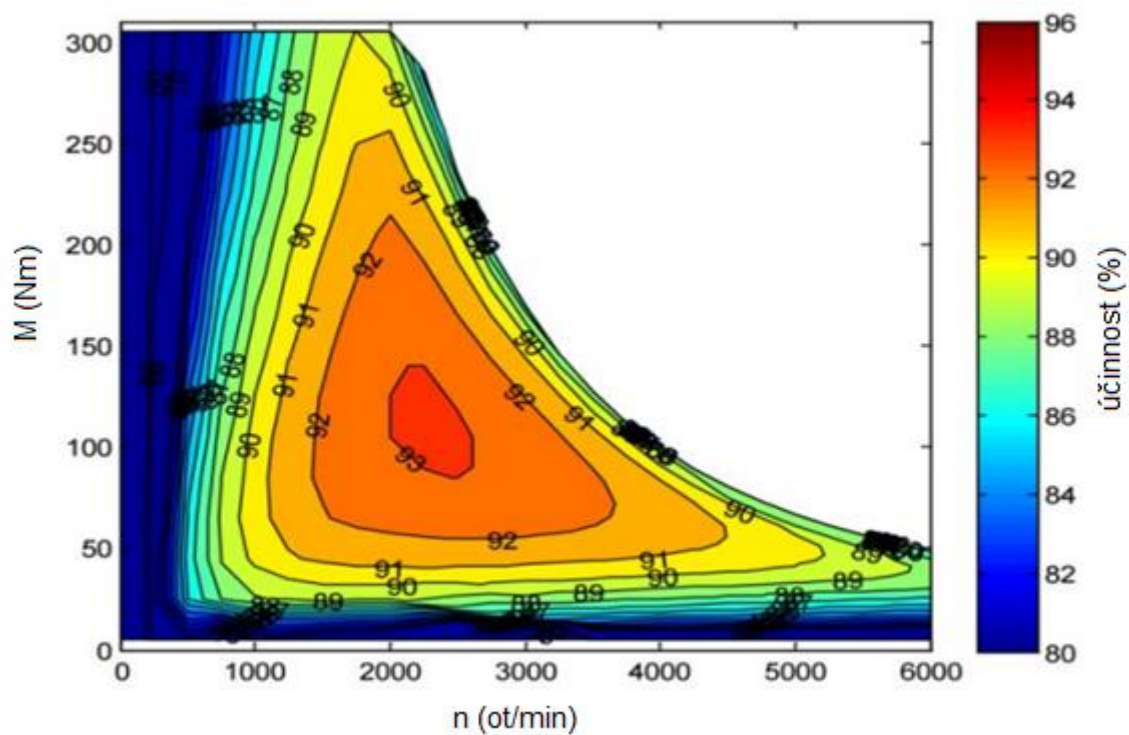
je 220 kW pro nižší výkonovou třídu a 260 kW pro vyšší výkonovou třídu. Maximální hodnoty výkonu motoru je dosaženo při 2200 otáčkách za minutu. Ze závislosti znázorněné na Obr. 1.8 lze vyčíst maximální dosažitelný točivý moment motoru, jehož hodnota je 1200 Nm pro nižší výkonovou třídu a 1400 Nm pro vyšší výkonovou třídu. Do těchto hodnot se motor dostane při otáčkách v rozmezí od 1200 do 1600 otáček za minutu. Maximálního výkonu a maximálního točivého momentu je tak dosaženo při rozdílných otáčkách.[5]



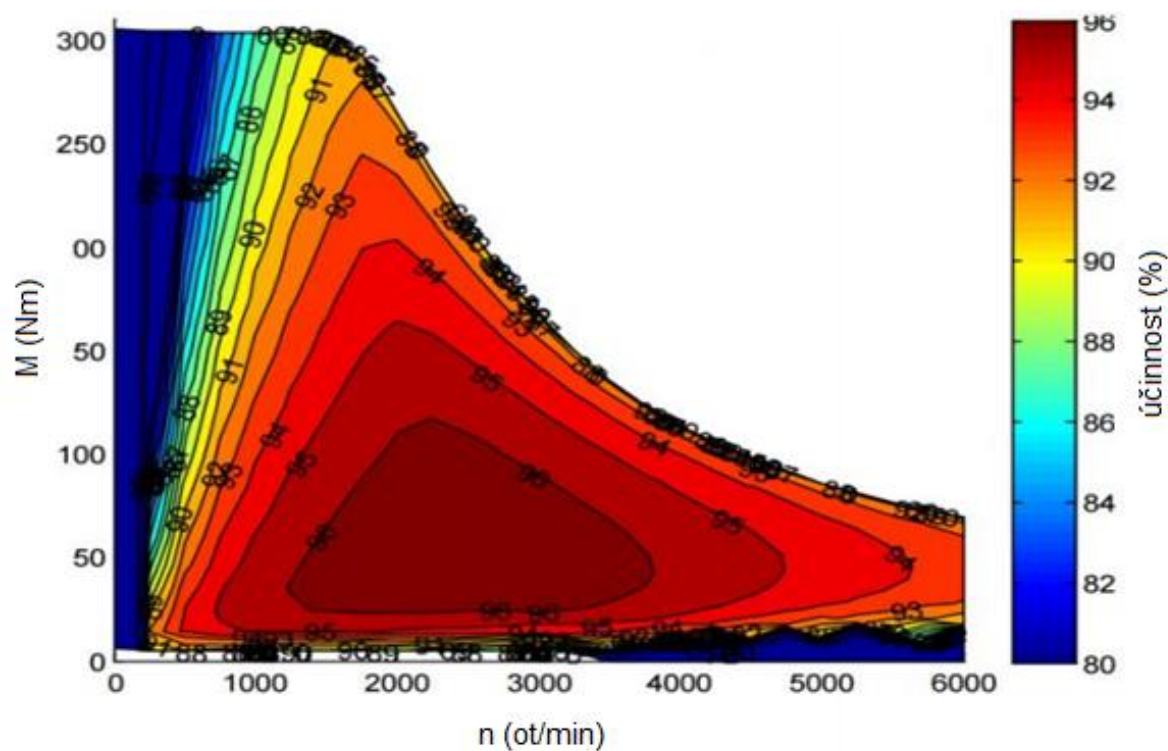
Obr. 1.7: Výkon diesellového motoru v závislosti na jeho otáčkách (převzato z [5] a upraveno)



Obr. 1.8: Točivý moment dieselového motoru v závislosti na jeho otáčkách (převzato z [5] a upraveno)



Obr. 1.9: Mapa účinnosti asynchronního motoru s měděnou klecovou kotvou (převzato z [44] a upraveno)



Obr. 1.10: Mapa účinnosti synchronního motoru s permanentními magnety (převzato z [44] a upraveno)

Nespornou výhodou elektrického pohonu je kromě vyšší účinnosti také nulová produkce emisí CO₂. Dle tvrzení firmy BYD může být životní prostřednímu prostředí odlehčeno až o 636 tun CO₂ ročně. Tato hodnota odpovídá hodnotě vyprodukované jedním vozidlem při denním používání. [14] Při respektování četnosti jízdy vozidla pro svoz odpadu se eliminace produkce emisí CO₂ vyšplhá na hodnotu 91 tun ročně.

2 Vývoj automobilového průmyslu

Počátek automobilů poháněných elektřinou musíme hledat u samého zrodu automobilového průmyslu. Za vynálezce automobilu je považován Karl Benz, jenž roku 1879 vyvinul benzinový motor jakožto pohon pro svůj vůz. Výkon motoru byl 0,55 kW. První konstrukce vozu byla dokončena o šest let později, v roce 1885. V lednu následujícího roku podal Karl Benz žádost o patentování vynálezu „automobil poháněný benzinovým motorem“ a toto datum se tak dá označit za zrození automobilu. Toto je ovšem automobil, jaký s trochou nadsázky známe dnes. Pojdme se poohlédnout, co všechno tomuto objevu předcházelo v dobách minulých. [6]

2.1 Elektromobily

Na startu 20. století se situace kolem automobilového průmyslu ve Spojených Státech Amerických měla následovně: 40 % procent vozidel bylo poháněno parou, 38 % vozidel poháněla elektřina a 22 % vozidel jezdilo na benzin. Porovnáním těchto tří typů pohonů automobilů se dochází k závěru, že se elektricky poháněný vůz, který byl tichý, s minimálními nároky na údržbu a okamžitým nastartováním, jevil jako nejlepší volba. Parní vozy byly velmi náročné na spotřebu vody potřebnou pro výrobu páry. Benzinové vozy byly nespolehlivé, hlučné a značně nepohodlné.

Základem pro uskutečnění projektu automobilu poháněného elektrickou energií bylo vynalezení akumulátorů elektrické energie. O to se zasloužil francouzský vynálezce Gaston Platné. Jeho vynález poté zdokonalil další Francouz Camille Faure a v roce 1881 byla vyrobena první elektricky poháněná tříkolka v Paříži. První automobil se zdrojem energie z baterií se podařilo zkonstruovat v roce 1890 Američanu Williamu Morrisonovi. Jeho vozidlo dosahovalo rychlosti 23 km/h. Byl to právě elektrický vůz, který jako první pokořil rychlost 100 km/h. Stalo se tomu tak v roce 1899 a zasloužil se o to belgický motoristický nadšenec Camille Jenatzy ve Francii.



Obr. 2.1: Camille Jenatton v elektricky poháněném voze po překonání rychlosti 100 km/h (převzato z [7])

Elektricky poháněná vozidla narážela na počátku 20. století na zásadní problém, kterým byla nedostatečná elektrifikace území. Tento fakt vedl k problematice s nabitím baterií, což mělo za následek úpadek elektromobilů ve smyslu globálního rozšíření a zaujetí primárního postavení na poli automobilového průmyslu. Dalším negativním faktorem byla nízká dojezdová vzdálenost na jedno nabití, která se pohybovala okolo 60 km a doba pro znovu nabití baterií. Ani rychlost elektromobilů, s výjimkou sportovních prototypů, nebyla příliš impozantní. Běžné elektromobily dosahovaly maximální rychlosti kolem 30 km/h.

V roce 1970 schválila vláda Spojených Států Amerických zákon nesoucí název „*Clean Air Act*“ (převzato z [8]), který se zabývá kvalitou ovzduší a stanovuje hodnoty emisí stacionárních zdrojů a vozidel. Tento zákon má za úkol chránit zdraví občanů a omezit znečištění ovzduší na přípustnou hranici. Událost, která výrazně ovlivnila USA z hlediska náhledu na pohon vozidel, respektive na nutnost hledat alternativní zdroje pro pohon vozů, nastala v roce 1973. Jednalo se o ropný šok, kdy se státy těžící ropu ve sdružení OPEC rozhodly pro snížení množství vytěžené ropy za účelem regulace ceny ve svůj prospěch. Součástí tohoto aktu bylo i ropné embargo, které OPEC uvalilo na státy podporující během Jomkipurské války Izrael. Právě nejvíce se embargo dotklo USA. Nárůst ceny ropy a nejistoty v dodávkách tohoto produktu vedl zástupce USA k nastartování výzkumu

a vývoji hybridních a elektrických automobilů. Výsledky na sebe nenechaly dlouho čekat. Mezi roky 1974 a 1976 bylo ve Spojených Státech vyrobeno na 2600 kusů plně elektrických automobilů. Jednalo se převážně o dvoumístná vozidla určená do města, jejichž zdrojem energie byly olověné baterie, které dodávaly energii elektrickým motorům o výkonu 2,6 kW. Běžná provozní rychlost jízdy těchto vozidel byla 61 km/h a dojezdová vzdálenost na jedno nabití činila až 96 km. Cena těchto vozidel se pohyboval v rozmezí od 4000 \$ do 4500 \$.



Obr. 2.2: Elektrické vozidlo značky Sebring Vanguard z roku 1974 (převzato z [9])

Doposud byl zmiňován vývoj elektromobilů v USA, ale i evropské značky se začaly zabývat možností výroby automobilů s elektrickým pohonem. V roce 1972 německá firma BMW představila svůj elektromobil, jehož maximální rychlost jízdy dosahovala hodnoty 99 km/h a na jedno nabití dokázal tento vůz urazit vzdálenost 60 km. Malá dojezdová vzdálenost na jedno nabití a nízká rychlost elektrických vozidel vedla k tomu, že přes značný rozvoj v 70. letech minulého století nebyla vozidla příliš prodávána a v 80. letech došlo k poklesu popularity těchto vozidel.

Netrvalo ovšem dlouho a se změnou zákona „Clean Air Act“ v USA opět došlo k znovuoživení vývoje elektromobilů. V roce 1996 americká firma GM vyprodukovala 1117 elektromobilů s označením EV₁. Došlo k navýšení dojezdové vzdálenosti na 160 km na jedno nabití. Následujícího roku představila japonská firma Toyota svůj koncept eco-friendly vozu v podobě hybridně poháněného modelu Prius. Toyota Prius se stala

prvním masově prodávaným vozidlem s hybridním pohonem. Za první rok od uvedení na trh prodala firma 50 tisíc kusů tohoto vozidla. V roce 2017 je evidováno více než 6 milionů prodaných kusů Toyoty Prius. Celkově firma Toyota prodala více než 10 milionů hybridně poháněných vozidel. V roce 2010 vstoupila na trh s elektromobily automobilka Nissan, která se svým modelem Leaf, který je plně elektricky poháněn, drží k prosinci roku 2016 rekord v počtu prodaných kusů. Do tohoto data bylo prodáno více než 250 tisíc vozidel Nissan Leaf. V roce 2011 se na trhu objevila nová značka zabývající se vývojem a produkcí elektromobilů. Jedná se o vozidla značky Tesla. V současné době patrně nenajdeme automobilový koncern, který by se nezabýval výrobou nebo alespoň vývojem hybridně či plně elektricky poháněných vozidel. [9]

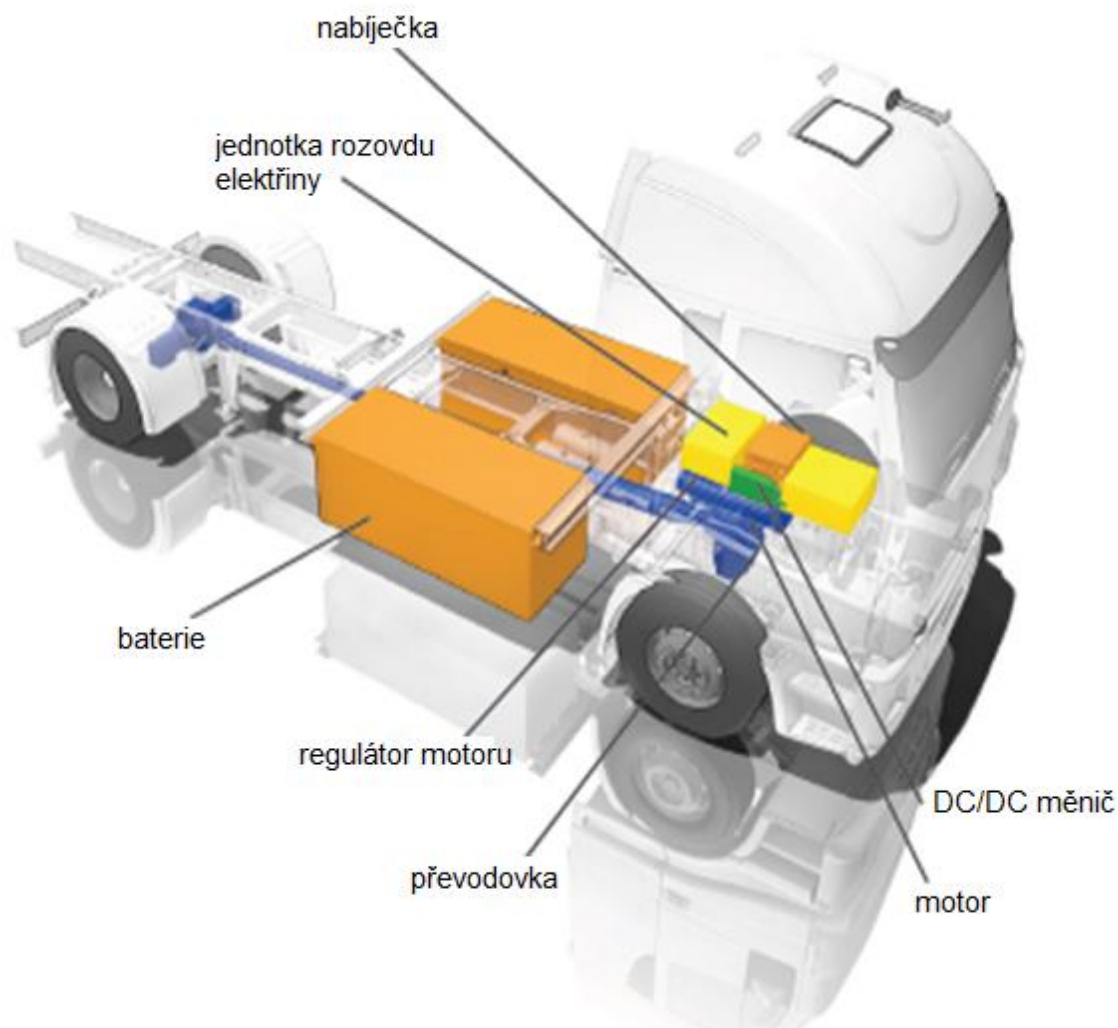
2.2 Elektromobily v nákladní dopravě

Jelikož je diplomová práce zaměřená na svoz odpadu, přecházím k problematice elektromobility v nákladní dopravě. Rozebírám současnou situaci využitelnosti elektricky poháněných nákladních automobilů pro svoz odpadu i k jiným účelům ve světě.

Popelářské vozy jsou jedny z vozidel, která mají nejnižší účinnost při svém provozu. Konvenční vozidla jsou poháněna spalovacím dieselovým motorem. Vzhledem ke svému specifickému provozu, dle dat získaných na území USA, mají popelářské vozy průměrnou spotřebu přibližně 78 l / 100 km. Taková spotřeba vede k ročním výdajům za palivo ve výši 42 000 \$. Dalším výrazně negativním faktorem je produkce emisí skleníkového plynu CO₂, která je u popelářských vozů přibližně dvacetinásobně vyšší než je průměrná produkce domácnosti ve Spojených státech. Tyto faktory evokují myšlenku nutnosti hledání přívětivějšího zdroje energie pro tento typ vozidel. Přichází tak na řadu alternativní pohon s využitím elektrické energie. Mezi klady elektrické energie, jakožto zdroje energie pro pohyb vozidla, bezesporu patří možnost využití přeměny kinetické energie vozidla při procesu brzdění na elektrickou energii, kterou je poté možno akumulovat v bateriích a tímto procesem dochází k částečnému samodobíjení vozidla. Možnost rekuperace se jeví vzhledem k častému zastavování popelářských vozů při svozu odpadu v městských oblastech jako velmi příznivý jev. Z vyjádření firmy Wrightspeed plyne, že odstraněním konvenčního dieselového motoru a jeho nahrazením motorem elektrickým lze omezit výdaje na provoz popelářských vozů na 50 %. Tento fakt je výrazně pozitivní, ovšem redukce provozních nákladů je vykoupena značnou počáteční investicí, kdy vozidlo poháněné elektrickou energií stojí téměř dvojnásobek ceny vozidla se spalovacím motorem. Wrightspeed uvádí změnu z původní pořizovací ceny popelářského vozu 150 000 \$

na pořizovací cenu 230 000 \$. Fakt navýšení počáteční investice do popelářského vozu poháněného elektrickou energií nastoluje otázku rentability toho produktu. [17]

Využití elektrického pohonu popelářských vozidel nese i další výhody. Mezi tyto výhody elektricky poháněných vozidel patří omezení produkce emisních plynů, snížení hluku při provozu a omezení vibrací přenášených do okolí.



Obr. 2.3: Uspořádání konstrukce elektricky poháněného nákladního vozidla (převzato z [24] a upraveno)

2.2.1 Elektromobilní nákladní vůz BYD třídy 5

Střední nákladní vozidlo firmy BYD třídy 5 se svou konstrukcí s maximální hmotností 7,26 tuny řadí mezi možné alternativy pro využití svozu odpadu. Vozidlo je poháněno synchronním motorem s permanentními magnety o výkonu 150 kW. Díky tomuto motoru a své hmotnosti dosahuje vozidlo maximální rychlosti 96 km/h. Vozidlo zahrnuje baterie o energetické kapacitě 145 kWh. Na tuto hodnotu se baterie nabíjí při nabíjecím

výkonu 100 kW za dobu 1,5 hodiny. Výrobce uvádí, že při šestidenním provozu v průběhu týdne s denním nájezdem 160 km ušetří provozovatel za výdaje za palivo 6 000 \$. Úsporu 4 000 \$ ušetří provozovatel za náklady spojené s údržbou vozidla v průběhu provozu v porovnání s vozidlem stejné kategorie využívající diesellový motor. [29]



Obr. 2.4: Nákladní vozidlo třídy 5 firmy BYD (převzato z [29])

2.2.2 Elektromobilní popelářský vůz BYD třídy 6

V lednu roku 2017 spustilo americké město Los Angeles pilotní projekt, ve kterém se rozhodlo testovat popelářský vůz třídy 6 poháněný elektrickou energií. Vozidlo sestrojila firma BYD ve spolupráci s Wayne Engineering. V průběhu čtyřměsíčního zkušebního provozu se vozidlo vydávalo na trasy, které absolvují konvenční popelářské vozy. Při tomto projektu vozidlo překonalo více než 83700 km s průměrným denním nájezdem 160 km. Denně vůz přepravil až 4 tuny odpadu na skládku, a to na jedno nabití. [12] Vozidlo je konstruováno na celkovou maximální hmotnost 10,7 tuny. Vůz disponuje elektrickým synchronním motorem s permanentními magnety o výkonu 150 kW. Při jízdě je vozidlo schopno vyvinout maximální rychlost 90 km/h. Vozidlo je vybaveno bateriemi o celkové energii 175 kWh. Doba nabití baterií na maximální hodnotu činí 1,75 hodiny. K dobíjení vozidla se využívá dobíjecí stanice s výkonem 100 kW a vozidlo je na jedno nabití schopné urazit vzdálenost 200 km. Výrobce uvádí, že při pravidelném nájezdu 160 km šest dní v týdnu, úspora paliva činí 8 200 \$. Dále za náklady investované do údržby vozidla očekává

výrobce úsporu 4 600 \$. Budou-li tyto informace pravdivé a v praxi fungující, pak v porovnání s dieselem pohaněným obdobným nákladním vozidlem, se prokáže úspora provozu elektrického vozidla firmy BYD třídy 6 ve výši 12800 \$. [28]



Obr. 2.5: Popelářský vůz třídy 6 s elektrickým pohonem (převzato z [13])

2.2.3 Elektromobilní popelářský vůz třídy 8

V květnu 2017 představila firma BYD nový plně elektrický prototyp vozu pro svoz odpadu na území Severní Ameriky. Vozidlo zahrnuje kabinu, podvozek s bateriemi, vysokonapěťový řídicí systém, systém elektrického pohonu a elektrický systém pro zajištění manipulace hydraulickým systémem pro práci s nástavbou popelářského vozu. Popelářské vozidlo BYD třídy 6 je konstruováno pro maximální celkovou hmotnost 54 tun. Vozidlo je vybaveno dvěma synchronními motory s permanentními magnety, kdy každý z motorů disponuje výkonem 180 kW. Při maximálním využití výkonu motorů je vozidlo schopné pohybu rychlostí až 90 km/h. Energie pro pohon motorů je uložena v bateriích o energetické kapacitě 188 kWh. Na plnou hodnotu jsou baterie nabity za 2,5 hodiny při nabíjecím výkonu 80 kW. Při plně nabitých bateriích je vozidlo schopno urazit vzdálenost 146 km. Při každodenním provozu s nájezdem 120 km výrobce uvádí úsporu 9 600 \$ za výdaje za palivo ve srovnání se spalovacím motorem. Dalších 4 500 \$ provozovatel uspoří za výdaje spojené s udržením vozidla v provozuschopném stavu. [14] [27] [30]



Obr. 2.6: Konstrukce vozu firmy BYD pro účely svozu odpadu (převzato z [14])

2.2.4 BYD pojezdové vozidlo

Specifickou skupinou nákladních vozidel jsou vozidla využívaná ve skladech, na letištích, překladištích a podobných místech. Jedná se o pojezdová vozidla sloužící k přepravě nákladu především na krátké vzdálenosti. Do této skupiny patří vozidlo BYD s označením Terminal Tractor. Vozidlo disponuje konstrukcí, která je navržena tak, aby dokázala udržet celkovou hmotnost vozidla až 46 tun. Vozidlo je vybaveno synchronním motorem s permanentními magnety o výkonu 180 kW. Maximální dosažitelná rychlost vozidla se zastaví na hodnotě 53 km/h. Baterie s energetickou kapacitou 209 kWh zajišťují až 15-ti hodinový nepřetržitý provoz. Baterie mohou být nabíjeny výkonem 100 kW, pak doba nabití do plné kapacity baterií činí 2 hodiny nebo výkonem 200 kW, pak je dobíjecí čas poloviční, tedy 1 hodina. BYD uvádí úsporu 19 100 \$ při každodenním provozu vozidla a to 16 hodin denně. Dále ve srovnání s podobným vozidlem, které disponuje dieselovým pohonem, provozovatel ušetří 8 800 \$ za výdaje spojené s údržbou vozidla. [31]



Obr. 2.7: Pojezdové vozidlo firmy BYD (převzato z [31])

2.2.5 Vozidlo pro svoz odpadu Motiv

Prvním plně elektromobilním nákladním vozidlem třídy 8 využívaným pro svoz odpadu se mohou pochlubit v USA ve státě Kalifornie. Ve městě Sacramento byl v červnu roku 2017 představen popelářský vůz, který je zcela poháněn elektrickou energií. Americká firma Motiv představila vozidlo s maximální hmotností 30 tun, kdy 10 tun váží konstrukce vozidla a 20 tun zbývá na náklad. Vůz pohání elektrický motor o výkonu 280 kW, se dokáže pohybovat maximální rychlostí 80 km/h. Vozidlo je nabízeno ve dvou variantách. První varianta nabízí vůz s bateriemi o celkové energetické kapacitě 170 kWh. Druhá varianta nabízí baterie s energetickou kapacitou 212 kWh. Základem vozidla je konstrukce Crane Carrier COE2. Doba trvání nabití baterií na plnou hodnotu je 8 hodin. Výrobce uvádí, že plně elektricky poháněným popelářským vozem dojde ke snížením provozních nákladů o 85%, může za to převážně předpoklad úspory 22,7 tisíce litrů paliva za rok. [10][11]

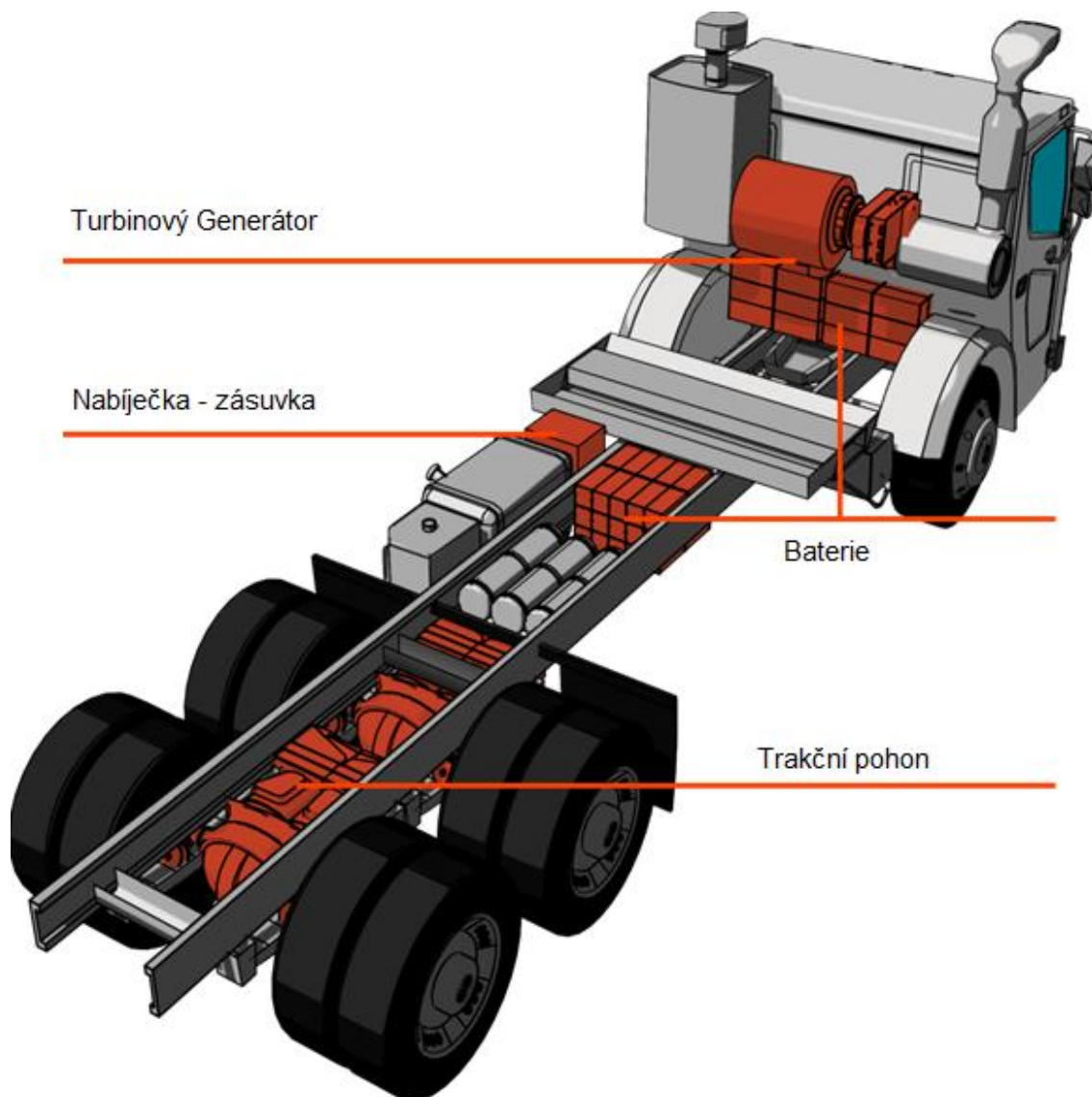


Obr. 2.8: Plně elektricky poháněný popelářský vůz firmy Motiv s datovým listem (převzato z [11])

2.2.6 Elektricky poháněné vozy firmy Wrightspeed Powertrain

Návrh elektrického pohonu firmy Wrightspeed Powertrain umožňuje nahradit stávající pohon nákladního automobilu elektrickým motorem. Zadní nápravy jsou poháněny elektrickou energií. Systém využívá možnosti rekuperace energie zpět do baterií při brzdění vozidla. V momentě poklesu energie baterií na úroveň, kdy by baterie nebyly schopny zajistit provoz vozidla, přichází na řadu funkce turbosoustrojí, které přeměňuje diesel nebo přírodní zkapalněné plyny na energii, kterou dobíjí baterie. Díky této kombinaci není dojezdová vzdálenost vozidla plně závislá na aktuálním stavu baterií. Při odmyšlení funkce turbosoustrojí je vozidlo schopno urazit vzdálenost 38,8 km na jedno nabití. Kombinací elektricky poháněného motoru energií získanou z baterií, případně z přeměny nafty nebo plynů na elektrickou energii, dochází k úspoře paliva až 70 % a k redukci emisí až 63 % v porovnání s konvenčním dieslovým spalovacím motorem. S nahrazením spalovacího motoru elektrickým dochází ke značné úspoře na součástech vozidla, které vyžadují údržbu, což vede k dalším ekonomickým úsporám až 25 000 \$. Konstrukční povolená hmotnost vozidla činí maximálně 30 t. Maximální dovolená rychlost závisí na nastavení vozidla a vozidlo může dosahovat rychlosti až 115 km/h. [16] Návrh elektrického pohonu firmy Wrightspeed Powertrain našel uplatnění ve spolupráci s firmou Mack Truck, která v roce 2016 předvedla svůj elektricky poháněný nákladní automobil pro svoz odpadu s označením

Mack LR Model. [18] Specifikem firmy Wrightspeed jsou baterie pro pohon vozidla. Firma využívá lithium-titanových baterií, které mohou být nabíjeny i při nízkých teplotách a to až -30°C , nepotřebují tepelnou cirkulaci a jsou vysoce odolné vůči vznícení. [23]



Obr. 2.9: Pohled na umístění baterií, pohonu, dieselového generátoru (převzato z [16] a upraveno)

2.2.7 Orange EV Class 8 Terminal Truck

V severoamerickém státě New York byl firmou Orange představen koncem roku 2017 plně elektrický pojzdový vůz. Tento vůz byl již v průběhu roku 2017 provozován v Chicagu. Takový typ vozidla je využíván na letištích, překladištích, ve skladech a podobných prostorách. Z pohledu pracovníků je užití tohoto vozidla v uzavřených prostorách výhodné z důvodu nulové produkce emisí. Styl jízdy pojzdového vozidla se velmi podobá jízdě popelářského vozu svým častým zastavováním a rozjížděním, proto je pro aplikaci elektrického pohonu ideální. Navíc vozidlo není nuceno vyvíjet vysoké

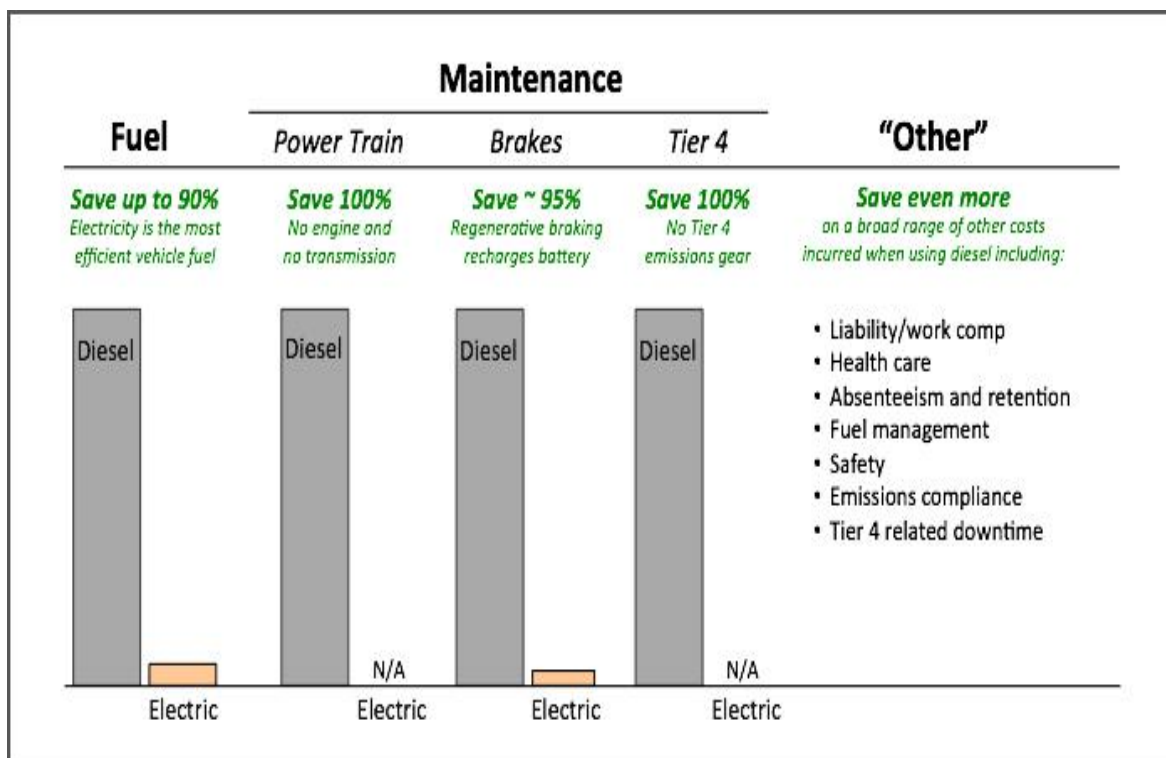
rychlosti. Tento vůz byl vyvinut a představen jako součást rozsáhlého projektu Chautauqua County 20/20. Newyorský státní program podporuje nákup a provoz elektrických vozidel a slibuje si od svého záměru snížení nákladů na provoz nákladních automobilů a především snížení produkce nežádoucích emisí. První den po uvedení do provozu se ukázal potenciál v úspoře paliva plně elektrického vozu oproti vozu se spalovacím motorem až 90 %. Navíc jsou pro elektromobil značně nižší náklady na pravidelnou údržbu. [21]



Obr. 2.10: Plně elektrické transportní vozidlo firmy Orange (převzato z [22])

Tento typ vozidla provozovaný v Chicagu je vybaven bateriemi s celkovou energetickou hodnotou 160 kWh. Vozidlo se vyrábí v provedení, kdy je možné baterie nabíjet přímo, ty jsou i v průběhu nabíjení připevněny ke konstrukci vozidla nebo lze baterie vyjmout a nabíjet je mimo vozidlo. Dle statistiky *Rail Management Services* při běžném provozu vyprodukuje transportní vůz se spalovacím motorem ročně 160 tun emisí CO₂, 1,7 tun NO_x, 1,6 tun CO a 80 kg znečišťujících pevných částic. [23]

Celková maximální hmotnost vozidla spolu s nákladem dosahuje 36,7 tun. Vozidlo je schopno vyvinout maximální rychlost 40 km/h. V porovnání se stejným vozidlem využívajícím dieselový motor dle výrobců lze ušetřit při běžném provozu 10 000 – 30 000 \$, při nadměrném užívání se může úspora vyšplhat až na hodnotu 30 000 - 60 000 \$. [25][26]

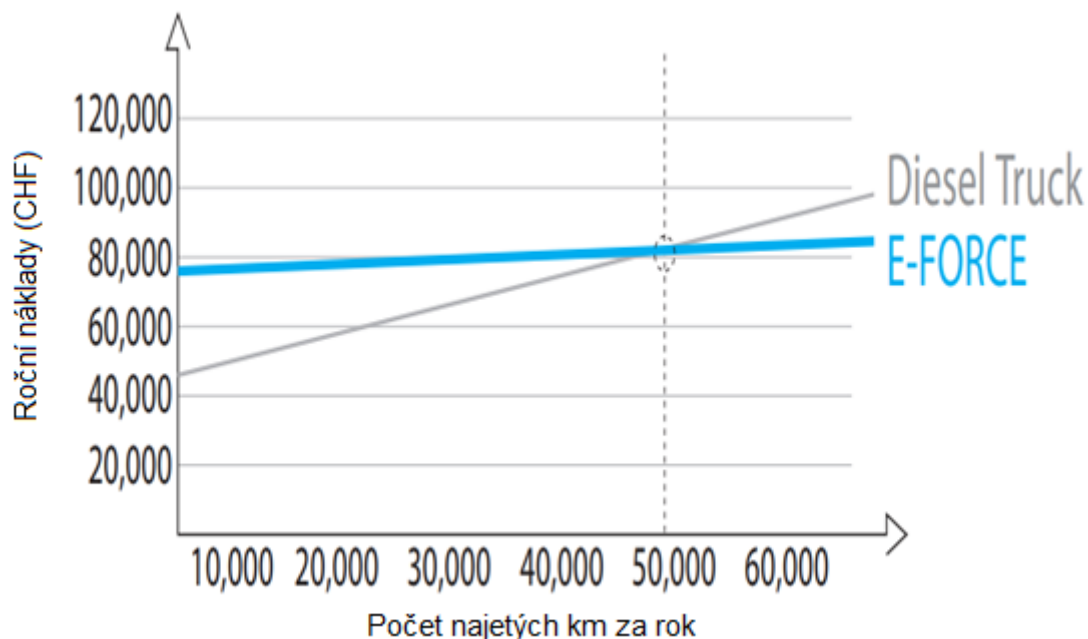


Obr. 2.11: Porovnání provozních nákladů vozidla firmy OrangeEV s vozidlem stejného typu s dieselovým motorem (převzato z [26])

2.2.8 E-FORCE

E-FORCE je švýcarskou firmou zabývající se výrobou nákladních automobilů poháněných elektrickou energií. K příkladu posloužilo 18-ti tunové nákladní vozidlo. Tento typ vozidla je poháněn dvěma synchronními, vodou chlazenými motory. Výkon jednotlivých motorů je 150 kW. Díky tomuto pohonu je vozidlo schopno dosáhnout rychlosti až 87 km/h s účinností dosahující hodnoty 97 %. Jako úložiště elektrické energie využívá vůz lithiové trakční baterie v počtu dvou kusů, kdy každá z baterií má energetickou kapacitu 120 kWh, jmenovité napětí 400 V a hmotnost 1 300 kg. Dobití baterií trvá 6 hodin při nabíjecím výkonu 44 kW. Chce-li provozovatel ušetřit čas, je možno vybité baterie vyjmout a nahradit bateriemi nabitými. Výměna trvá cca 5 minut. Spotřeba vozidla ve městě se pohybuje v rozmezí 60 – 90 kWh/100 km a mimo město 80 – 100 kWh/100 km. Z této spotřeby a kapacity baterií vyplývá, že ve městě dokáže vozidlo urazit více než 300 km a mimo město více než 200 km. Hmotnost samotného šasi vozidla je 8 tun a konstrukce je od firmy IVECO. Vůz je schopen pojmout náklad o hmotnosti 10 tun. Díky plně elektrickému pohonu potřebuje vozidlo pro svůj provoz třetinovou energii v porovnání s dieselovým nákladním vozidlem. Stejně tak jako ostatní plně elektrické vozy ani tento neprodukuje nežádoucí emise a díky snížení hluku při provozu je vhodný k dopravě ve městech. Výrazným snížením

provozních nákladů se vůz začne z ekonomického hlediska vyplácet provozovatelům, kteří ročně najedí více jak 50 000 km. To je patrné z Obr. 2.12. [24]



Obr. 2.12: Rentabilita elektrického vozidla E-FORCE (převzato z [24] a upraveno)

2.2.9 Nákladní elektromobil Tesla Semi

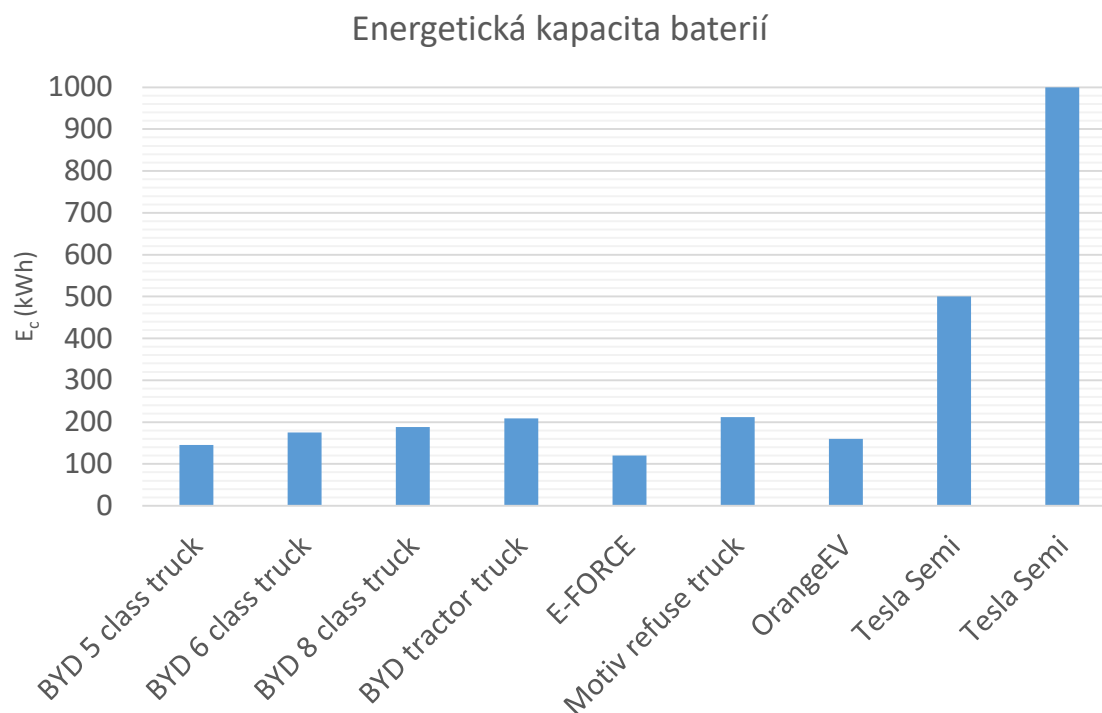
Firma Tesla, mezi jejíž přední činnosti patří vývoj a výroba elektromobilů, představila v listopadu 2017 nekonvenční elektricky poháněný nákladní vůz nesoucí označení Semi. Vozidlo je futuristickým řešením vozidla pro přepravu nákladu po pozemních komunikacích. Spuštění sériové výroby Tesla Semi se plánuje na rok 2019. Tesla Semi je unikátní svým aerodynamickým tvarem, díky kterému snižuje koeficient odporu vzduchu na hodnotu $c_p = 0,36$. Pro představu v současné době využívané dieselem poháněné nákladní automobily mají koeficient odporu vzduchu $c_p = 0,65 \div 0,8$. Předností elektrických vozidel je zrychlení. Nejinak je tomu i v případě Tesla Semi. Samotné vozidlo bez přívěsu dokáže zrychlit z 0 na 97 km/h za 5 s a při připojení přívěsu, což vede k navýšení hmotnosti až na maximální hodnotu 36 t, za 20 s. Nejen v nákladní automobilové dopravě, ale i v ostatních průmyslových odvětvích, hraje významnou roli spolehlivost výrobků. V tomto aspektu se Tesla nebojí tvrzení, že k poruše vozidla nedojde dříve než po ujetí vzdálenosti 1,6 milionu km. Dobití baterií na dojezdovou vzdálenost 643 km trvá pouhých 30 minut. Toto vede k výrazné časové úspoře a v nákladní dopravě čas znamená peníze. Výrobce uvádí spotřebu automobilu nižší než 1,25 kWh/km, což by mělo vést k úspoře více než 200 000 \$ za investice vložené do paliva po dobu provozu vozidla. Vozidlo pohání čtyři nezávislé

motory umístěné na zadní nápravě. Vůz se prodává ve dvou provedeních podle dojezdové vzdálenosti na jedno nabití. Cena varianty vozidla s dojezdovou vzdáleností 482 km (300 mil) by se měla pohybovat okolo 150 000 \$. Varianta s dojezdovou vzdáleností 804 km (500 mil) by pak měla vyjít na 180 000 \$. [15]



Obr. 2.13: Nákladní elektromobil Semi značky Tesla (převzato z [15])

2.3 Porovnání parametrů uvedených vozidel



Obr. 2.14: Porovnání energetické kapacity baterií nákladních vozidel



Obr. 2.15: Porovnání dojezdové vzdálenosti vozidel na jedno nabití

2.4 Elektrická dálnice

Projekt elektrické dálnice spojuje prvky ekonomicky a ekologicky výhodného provozu v podání kolejové dopravy s možností nezávislosti na změně trasy umožněné automobilovou dopravou. Jeden jízdní pruh, ten nejbližší krajnici vozovky v obou směrech, disponuje vedením, které se nachází nad ním. Je tak patrné, že pro efektivní využití elektrické energie při pohybu na dálnici musí být nákladní automobil vybaven nejen elektrickým materiálem, ale taktéž speciálními pantografy, které zajistí dodávku elektrické energie z vedení do motoru vozidla a při rekuperaci opačným směrem. Iniciátoři a provozovatelé si od projektu slibují zvýšení účinnosti nákladní přepravy díky využití elektrických motorů, které mají výrazně vyšší účinnost než spalovací motory. S využitím elektrického pohonu dojde k úspoře provozních nákladů vozidla a snížení negativního ekologického dopadu na okolí vlivem omezení produkce emisí.

2.4.1 První elektrická dálnice na světě – Švédsko

22. červa 2016 byla ve Švédsku spuštěna první elektrická dálnice na světě. Jednalo se o 2 km dlouhý úsek dálnice E16. Výsledkem spolupráce firmy Scania, která poskytla speciálně upravené hybridní nákladní automobily, s firmou Siemens, která vyvinula systém vedení pro napájení vozidel, bylo realizováno spuštění elektrické dálnice. Finální podoba byla financována 77 miliony švédských korun ze státního rozpočtu a 48 miliony švédských korun ze soukromých sektorů operujících v regionu. Elektrická dálnice má být jedním z významných milníků na cestě za odstraněním vozidel pohaněných fosilními palivy ze švédských silnic. Švédské ambice se tímto směrem upínají k roku 2030.

Za účelem využitelnosti elektrické dálnice vyvinula Scania nákladní vůz typu G 360 4x2 o hmotnosti 9 tun. Vozidlo disponuje paralelním hybridním pohonem. Provoz bez dodávky elektrické energie zajišťuje motor na biopalivo o výkonu 238,5 kW. Pro provoz využívající elektrický zdroj energie je vůz vybaven elektrickým motorem s výkonem 130 kW. Vůz též zahrnuje baterie pro akumulaci elektrické energie o energetické kapacitě 5 kWh. Tyto baterie umožňují provoz elektromotoru až na vzdálenost 3 km. [32]



Obr. 2.16: Hybridní nákladní vozidlo Scania s pantografy (převzato z [32])

2.4.2 Elektrická dálnice v Německu

Společnost SIEMENS v Německu v roce 2017 vybudovala 10 km dlouhý úsek dálnice, který disponuje elektrickým vedením nad vozovkou. To slouží jako zdroj elektrické energie pro hybridně poháněná nákladní vozidla. Tak jako u plně elektrických vozidel, tak i u vozidel s hybridním pohonem si slibují vědci úsporu paliva a omezení produkce emisí. Na rozdíl od čistě elektricky poháněných vozidel, hybridní vozidla produkují emise, pouze v případě, když je pohyb automobilu zajišťován spalovacím motorem. SIEMENS uvádí, že vozidlo pohybující se po elektrické dálnici bude provozováno s dvojnásobnou účinností v porovnání s nákladním vozidlem disponujícím pouze spalovacím motorem. V praxi by to mohlo znamenat, že 40 t vážící nákladní automobil využívající elektrického napájení na dálnici by při ujeté vzdálenosti 100 000 km ušetřil za náklady na palivo 20 000 € (při cenách pohonných hmot a elektrické energie z roku 2014). Základem pro provedení projektu je zdroj elektrické energie, nákladní automobil s hybridním pohonem a možnost připojit se k vedení, které ho bude při jízdě na dálnici napájet. Zdroje elektrické energie vycházejí z konceptu napájení kolejových vozidel. Spolehlivý provoz nákladních vozidel zajistí dvojitě trolejové vedení. Napájení zajišťuje rozvaděč středního napětí, výkonový transformátor a usměrňovače. Součástí systému jsou řízené střídače, které jsou v činnosti při rekuperaci. Pro spojení nákladního automobilu s elektrickým vedením slouží nově vyvinuté

inteligentní pantografy. Tyto pantografy jsou umístěny na střeše kabiny nákladního automobilu a při najetí na dálnice se vysunou, aby mohlo dojít k dotyku kontaktů pantografu s elektrickým vedením. Výrobci uvádějí účinnost přenosu elektrické energie mezi vedením a pantografy vyšší než 80%. Pro propojení kamionu a vedení není nutné zastavovat a ručně nastavovat pantografy. Proto nesou označení inteligentní a jsou schopny samy propojit své kontaktní plochy s vedením a to až do rychlosti pohybu vozidla 90 km/h. Zároveň si hlídají nepřetržitý kontakt i při jízdách manévrech řidiče. Zde platí jistá tolerance pohybu v jízdním pruhu, který je speciálně určen pro tento typ vozidel. V případě potřeby předjetí či jiné nutnosti změny jízdního pruhu dojde k odpojení pantografů od vedení a vozidlo může změnit jízdni pruh. Dojde-li k návratu vozidla do jízdního pruhu pokrytého vedením, pantografy se opětovně kontaktují s vedením. Výhodou hybridního pohonu a propojení s elektrizační sítí sloužící pro pohon vozidla je možnost rekuperace kinetické energie. Při brzdění dochází k maření kinetické energie, která se v brzděném systému přeměňuje na teplo a sálá do okolí bez dalšího využití. Rekuperace umožňuje přeměnit kinetickou energii z brzdění na elektrickou energii. Tu pak vozidlo může uchovat v bateriích či jiných zásobnících elektrické energie pro další jízdy nebo může tuto elektrickou energii díky pantografům dodávat zpět do elektrické sítě, kde ji může využít jiné vozidlo napojené na tuto síť pro svůj pohyb. [19] [20]

3 Dobíjení elektrických vozidel

Každé vozidlo, ať nákladní či osobní, využívající elektrický motor pro svůj pohyb potřebuje transportovat elektrickou energii z elektrizační soustavy do svých zásobníků elektrické energie. K tomu, aby mohla elektricky poháněná vozidla urazit požadovanou vzdálenost, je potřeba vybudovat dobíjecí stanice. Pro vybudování sítě dobíjecích stanic pro popelářská vozidla je důležité znát profil trasy a vzdálenost, kterou vozidlo při svozu odpadu urazí, aby nedošlo k vybití baterií dřív, než vozidlo dokončí prováděný úkon. Dobíjecí stanice musí být schopny přenést dostatečný výkon, aby dobití baterií vozidel bylo rychlé a zároveň bezpečné. Zároveň musí být stanice navrženy tak, aby nedošlo k negativnímu ovlivnění elektrizační soustavy při odběru.

Výjimkou pro získání energie k pohonu motoru mohou být vozidla využívající přímého napojení na elektrizační síť. Tento způsob je uveden v kapitole 2.4. Část elektrické energie si jsou vozidla schopna vyrobit sama díky rekuperaci. Při rekuperaci dochází k přeměně kinetické energie na elektrickou vlivem brzdění vozidla. Takto vytvořená elektrická energie ovšem nestačí pro pokrytí energetických požadavků celého vozidla.

3.1 Dobíjení Plug-in

Tento dobíjecí systém lze přirovnat například k nabíjení mobilního telefonu. Základem je nabíjecí stanice, kabel a konektor. Trhem nabízené výkony se pohybují v rozsahu od 20 kW do 150 kW. Stejnoseměrné nabíjecí stanice jsou spolehlivé. Samozřejmostí je propojení dobíjecí stanice s centrálním řídicím systémem vozidla. Toto propojení zajišťuje zobrazení stavu baterií na panelu vozidla a vede k automatickému ukončení dobíjení při dosažení plné kapacity baterií. [33]

3.2 Dobíjení pomocí stanice s výsuvným pantografem

Tento typ nabíjení vozidla je vhodný pro intervalový průběh jízdy, kdy vozidlo střídá pohyb se zastávkami. Tento typ nabíjení se jeví jako vhodná varianta pro dobíjení popelářských vozidel v průběhu jízdy. Je ovšem nutné rozmístit dobíjecí stanice do míst, kde je možno ponechat vozidlo stojící delší dobu, například při naložení odpadu z více nádob. Zařízení zahrnuje dobíjecí stanici a čtyřpólový pantograf. Vozidlo musí být vybaveno kontakty pro možnost přenosu elektrické energie mezi stanicí a bateriemi vozidla. Firma SIEMENS nabízí toto řešení v provedení výkonů 150; 300; 450; 600 kW při střídavém napětí 400 V, které je transformováno z napětí 20 kV, se síťovou frekvencí 50 Hz (60 Hz v USA). [33]



Obr. 3.1: Pantograf dobíjecí stanice dosedající na kontakty, které jsou součástí elektrobusu (převzato z [34])

3.3 Dobíjení pomocí inteligentních pantografů

Při tomto typu dobíjení je vozidlo vybaveno pantografem a přijímá elektrickou energii ze stejnosměrné sítě. Jedná se o možnosti nabíjení, jaké jsou známy z trakčních pohonů, a proto lze tento typ aplikovat především ve městech, kde je rozvinuta stejnosměrná síť. Mezi taková města může být jednoznačně zařazena Plzeň. Ta disponuje sítí trolejí, které zásobují elektrickou energií vozidla městské hromadné dopravy. Vozidlo v případě potřeby vysune pantograf a ten dosedne na vedení. Při kontaktu dochází k přenosu elektrické energie mezi sítí a vozidlem. Dochází k nabíjení baterií díky 750 V stejnosměrným při přenášeném výkonu 60 nebo 120 kW. Vozidlo se takto může pohybovat po zasíťovaných úsecích trasy a být zároveň dobíjeno. Když je nuceno uskutečnit odchýlení od sítě pantograf jednoduše zasune a může pokračovat ze zásob elektrické energie nahromaděné v bateriích.



Obr. 3.2: Zobrazení dobíjení autobusu v průběhu jízdy ze sítě městské hromadné dopravy díky pantografu (převzato z [34])

4 Energetická bilance popelářského vozu při svozu odpadu

Pro zjištění energetické bilance je nutné znát hodnoty sil působících na vozidlo v průběhu jízdy. Hodnoty jsem vypočetl dosazením parametrů do rovnic (1.1) - (1.4). Pro analýzu energetické bilance svozu odpadu byly vybrány tři trasy. Dvě ze tří tras zahrnují sběr komunálního odpadu na území města Plzně a svoz odpadu do spalovny odpadů v obci Chotíkov. Třetí trasa zahrnuje sběr tříděného odpadu na území města Plzně s následným svozem odpadu na skládku v obci Nýřany.

4.1 Získání a úprava dat

Nezbytnými údaji umožňující výpočet energetické bilance vozidla při svozu odpadu jsou rychlost a hmotnost vozidla, profil absolvované trasy, počet obslužených nádob a s tím související hmotnost odpadu, doba trvání celého cyklu svozu odpadu.

Pro zjištění trasy vozidla pro daný den svozu odpadu mi byl umožněn přístup do databáze společnosti Čistá Plzeň, kde bylo možné zjistit čas výjezdu vozidla z místa společnosti Čisté Plzně a čas návratu do tohoto počátečního bodu, délku trasy vozidla s jednotlivými zastávkami. Dále jsem z databáze zjistil počet obslužených nádob a celkovou hmotnost odpadu pro daný cyklus. Z mapy zobrazující pohyb vozidla v čase jsem byl schopen stanovit trasu vozidla. Ručním převedením zobrazené trasy do analýzy výškopisu dostupné na webové stránce ags.cuzk.cz [46] webového portálu geoportal.cuzk.cz jsem získal potřebné údaje profilu trasy. Výstupem této akce byla data vypovídající o výškovém profilu dané trasy. Údaj o nadmořské výšce bodů trasy mi posloužil pro výpočet sklonu vozovky v jednotlivých úsecích. Společnost Čistá Plzeň mi dále poskytla data obsahující rychlost vozidla v čase na daných trasách, typy vozidel s údaji o jejich průměrných měsíčních spotřebách paliva a investicích na měsíční údržbu vozidel. Pro synchronizaci údajů o rychlosti vozidla s daty výškového profilu bylo nutné trasu rozdělit na úseky. Délka jednotlivých úseků odpovídala vygenerovaným údajům o vzdálenosti mezi jednotlivými výškovými body. Pro tyto úseky jsem pak vypočetl průměrnou hodnotu rychlosti vozidla ze získaných rychlostních dat. Všechny veličiny byly převedeny na základní jednotky. Rychlost vozidla byla převedena z km/h na m/s dle vztahu:

$$1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h} \quad (4.1)$$

Délka úseků byla vyjádřena v metrech a čas projetí jednotlivých úseků v sekundách.

Uváděné hodnoty budou dále konkretizovány pro jednotlivé trasy a povedou k výpočtu sil působících na vozidlo.

Pro stanovení parametrů vozidla nutných pro výpočet jako je pohotovostní hmotnost jsem využil údajů uvedených v datových listech pro vozidlo typu Arocs [47] a pro vozidlo typu Antos [48].

Pro ověření správnosti výpočtu energetické bilance je nutné porovnat vypočtené hodnoty se skutečnými. Pro znalost skutečných hodnot je potřebné znát údaje o spotřebě vozidla, výhřevnost paliva, účinnost diesellového motoru, energetickou náročnost zdvihače nádob a energetickou spotřebu hydraulického lisu, který je součástí nástavby popelářského vozu. Jelikož současné popelářské vozy pracující na území Plzně využívají jako pohon diesellový motor, je nutné zjistit výhřevnost motorové nafty. Energetická náročnost lisovacího zařízení je závislá na množství odpadu a době provozu vozidla. V průměru zastává spotřeba lisu 40% z celkové spotřeby paliva vozidla. [35]

Tab. 4.1: Parametry motorové nafty potřebné pro výpočet (převzato z [36] [37])

výhřevnost H (MJ/kg)	42,61
hustota ρ (kg/m ³)	840

4.2 Energetická bilance popelářského vozidla - trasa č. 1



Obr. 4.1: Grafické zobrazení analyzované trasy (vytvoreno v [46])

První z analyzovaných tras byla trasa popelářského vozidla svážející komunální odpad v plzeňské čtvrti Slovany s následným svozem odpadu do spalovny odpadů v Chotíkově. Vozidlo svážející odpad na této trase bylo Mercedes Benz Antos. Technické parametry vozidla nutné pro výpočet jsou uvedeny v Tab. 4.2.

Tab. 4.2: Technické parametry vozidla Mercedes Benz Antos s nástavbou Zoeller

pohotovostní hmotnost (kg)	6 400
hmotnost nástavby (kg)	6 354
hmotnost zdvihače (kg)	610
hmotnost posádky (kg)	240
celková hmotnost vozidla (kg)	13 604
průměrná spotřeba vozidla (l/100km)	89,5
výkon zdvihače (W)	50 000
doba vykládky jedné nádoby (s)	9

Vozidlo na své trase po městské části Slovany a na trase ze Slovan do Chotíkova a zpět do sídla firmy Čistá Plzeň urazilo vzdálenost 50,13 km. Při zjišťování výškového profilu došlo vlivem mých nepřesností při zanášení trasy ke snížení celkové dráhy jízdy vozidla na 49,21 km. Jde tak o vložení nepřesnosti s odchylkou 1,84 %. Výsledný výškový profil je zobrazen na Obr. 4.2. Nejnižší bod trasy měl nadmořskou výšku 304,57 m.n.m. Nejvyšší bod trasy se nacházel v nadmořské výšce 457,43 m.n.m. Výškový profil trasy je důležitý pro zjištění sklonu vozovky v jednotlivých úsecích jízdy.



Obr. 4.2: Výškový profil trasy Čistá Plzeň – Slovany – Chotíkov – Čistá Plzeň

Sklon vozovky má vliv na síly působící na vozidlo. Pro stoupání je výsledný sklon

vozovky kladný, pro klesání je výsledný sklon vozovky záporný. Znaménka sklonu jsou volena záměrně s ohledem na výpočet sil působících na vozidlo. Hodnotu sklonu jsem vypočetl z vyexportovaných údajů o nadmořské výšce a délce jednotlivých úseků ze vztahu:

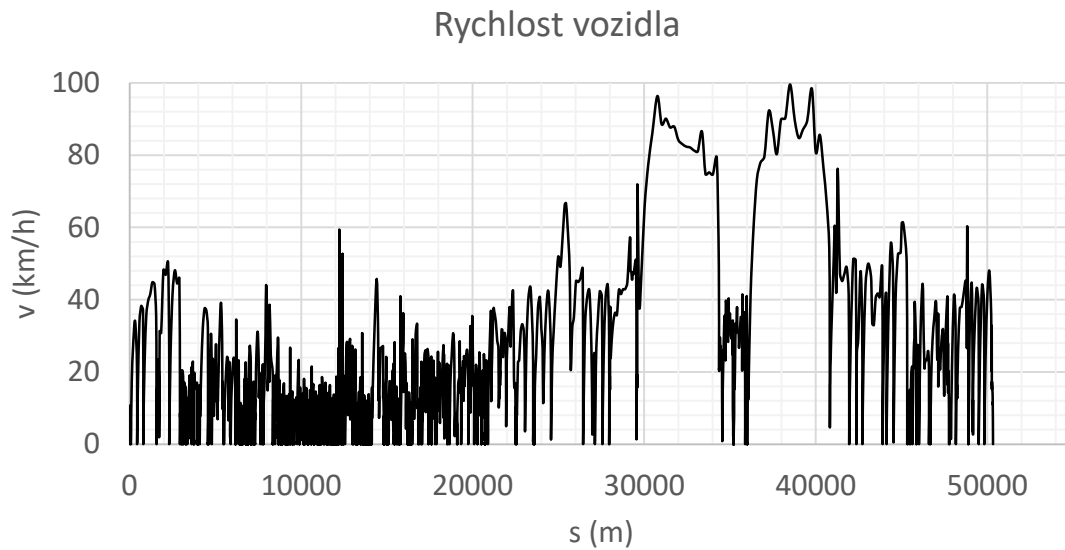
$$\alpha = \arctg\left(\frac{\Delta h}{s_{ii}} \cdot 100\right) = \arctg\left(\frac{h_2-h_1}{s_2-s_1} \cdot 100\right) \quad (4.2)$$

kde α je sklon vozovky, Δh je výškový rozdíl bodů úseku a s_{ii} délka úseku mezi výškovými body.



Obr. 4.3: Znázornění sklonu vozovky na trase vozidla

Vozidlo svou směnu vykonalo za celkový čas 7 hodin a 18 minut. Po provedení analýzy záznamu rychlosti jsem došel k faktu, že vozidlo strávilo v pohybu 3 hodiny a 8 minut. Na Obr. 4.4 je patrné, kdy se vozidlo pohybovalo na území města Plzně. Při pohybu ve městě rychlost nepřekračovala hodnotu 50 km/h a je zde vidět vysoká četnost zastávek. Zastávky slouží k nákladu odpadu nebo jsou způsobeny zastavením vozidla na křižovatkách. Dále je vidět úsek, kdy se vozidlo pohybovalo mezi obcemi, respektive mezi Plzní a Chotíkovem, kde se rychlost vozidla pohybovala v rozmezí od 70 do 100 km/h.

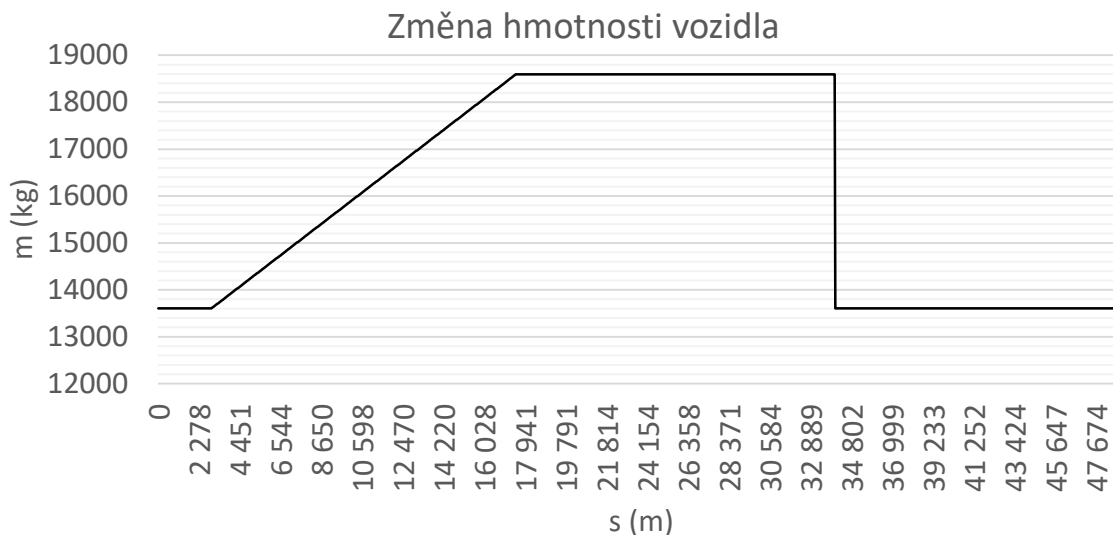


Obr. 4.4: Graf rychlosti vozidla v průběhu směny

Za směnu vozidlo obsloužilo 374 odpadních nádob a nashromáždilo tak odpadní materiál o hmotnosti 5 tun. Pro výpočet je zavedená shodná hmotnost jednotlivých nádob, kterou získám ze vztahu:

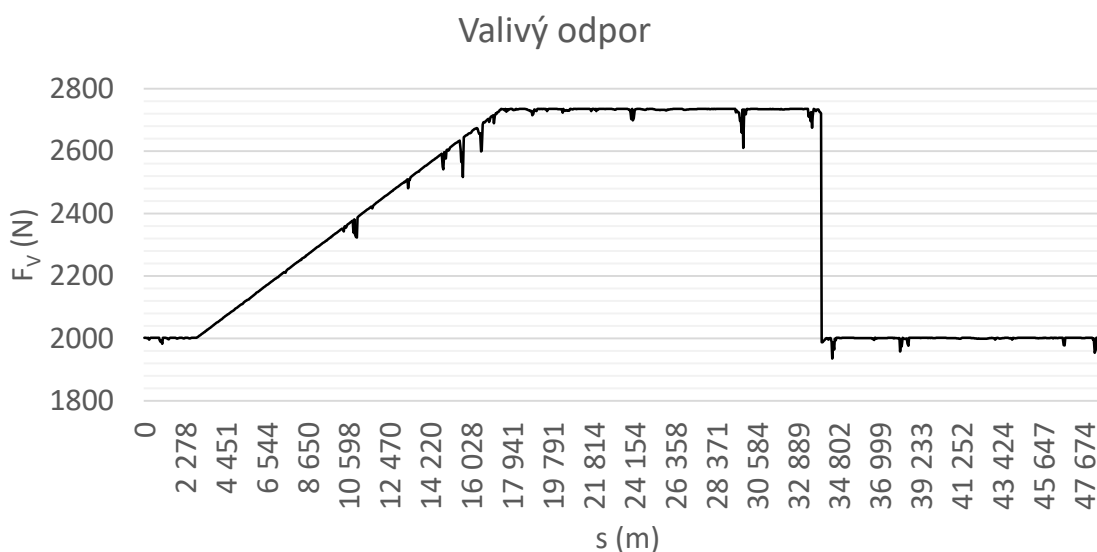
$$m_1 = \frac{m_c}{pn} = \frac{5000}{374} = 13,37 \text{ kg} \quad (4.3)$$

kde m_1 je hmotnost odpadu v jedné nádobě, m_c je celková hmotnost odpadu a pn je počet obslužených nádob. Hmotnost obsahu jednotlivých nádob je přičítána k celkové hmotnosti vozidla. Pro zjednodušení je hmotnost přičítána lineárně. Hmotnost vozidla se tak dostala na maximální hodnotu o velikosti 18 604 kg. Tato hodnota nepřesahuje maximální přípustnou provozní hmotnost vozidla, která činí 26 000 kg. Na Obr. 4.5 je znázorněna změna hmotnosti vozidla s narůstající ujetou vzdáleností. Je patrné, že v městské zástavbě při nakládání odpadu hmotnost vozidla rostla. Poté při přepravě odpadu byla hmotnost vozidla konstantní. Ve spalovně ZEVO Chotíkov se hmotnost automobilu skokově změnila z důvodu vyložení odpadu a vozidlo tak zpět do sídla společnosti Čistá Plzeň pokračovalo s konstantní hmotností, která odpovídala hmotnosti nezátíženého vozidla.



Obr. 4.5: Změna hmotnosti vozidla na trase

V tento moment znám všechny potřebné proměnné a parametry pro výpočet sil působících na vozidlo v jednotlivých úsecích jízdy dle rovnic (1.1) - (1.4). Pro valivý odpor jsem dostal výsledné hodnoty, ze kterých je patrná závislost velikosti působení valivého odporu proti směru jízdy vozidla na jeho hmotnosti. Výsledný graf valivého odporu připomíná svým průběhem Obr. 4.5, což je způsobeno právě primární závislostí valivého odporu na hmotnosti vozidla. Odchytky hodnot patrné na Obr. 4.6 jsou způsobeny výrazným sklonem vozovky.



Obr. 4.6: Průběh hodnot valivého odporu

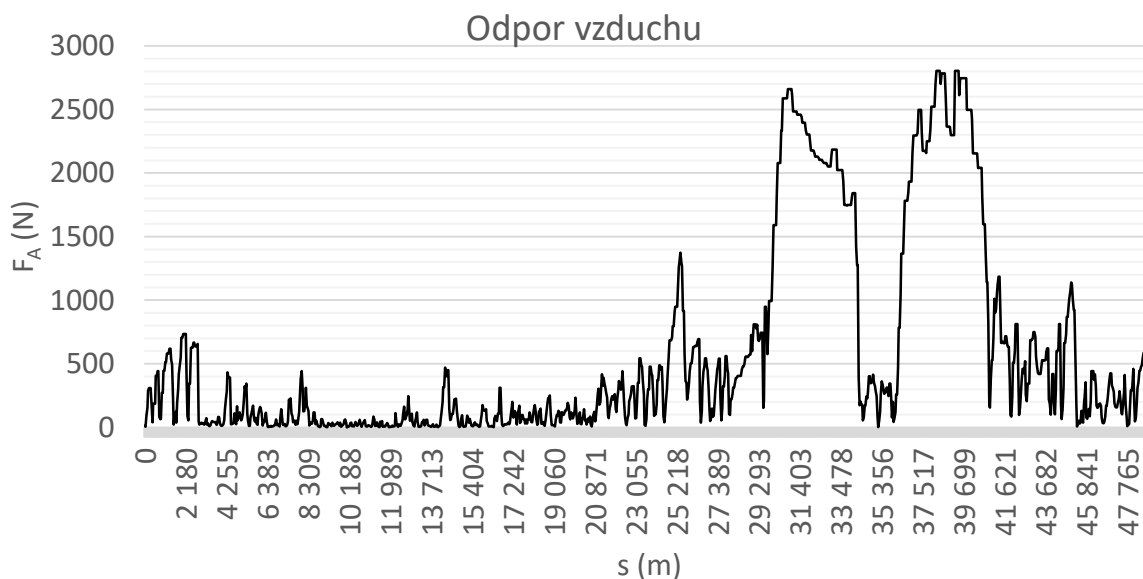
Obr. 4.7 znázorňuje působení odporu sklonu vozovky na vozidlo. Průběh hodnoty

svým tvarem kopíruje hodnoty sklonu vozovky na Obr. 4.3. Je tak patrné, že velikost síly působící v závislosti na sklonu vozovky může nabývat kladných i záporných. Pro kladné hodnoty působí síly proti směru jízdy vozidla, vozidlo jede do kopce. Při záporných hodnotách působící síly vozidlo klesá a je naopak gravitační silou urychlováno.



Obr. 4.7: Působení odporu sklonu vozovky na vozidlo

Odpor vzduchu reprezentující sílu působící proti směru jízdy vozidla vlivem působení větru je znázorněn na Obr. 4.8. Z průběhu hodnot je patrné, že velikost síly působící proti směru jízdy vozidla je primárně závislá na velikosti rychlosti vozidla, případně na působení větru. Pro můj výpočet jsem uvažoval panující bezvětří.



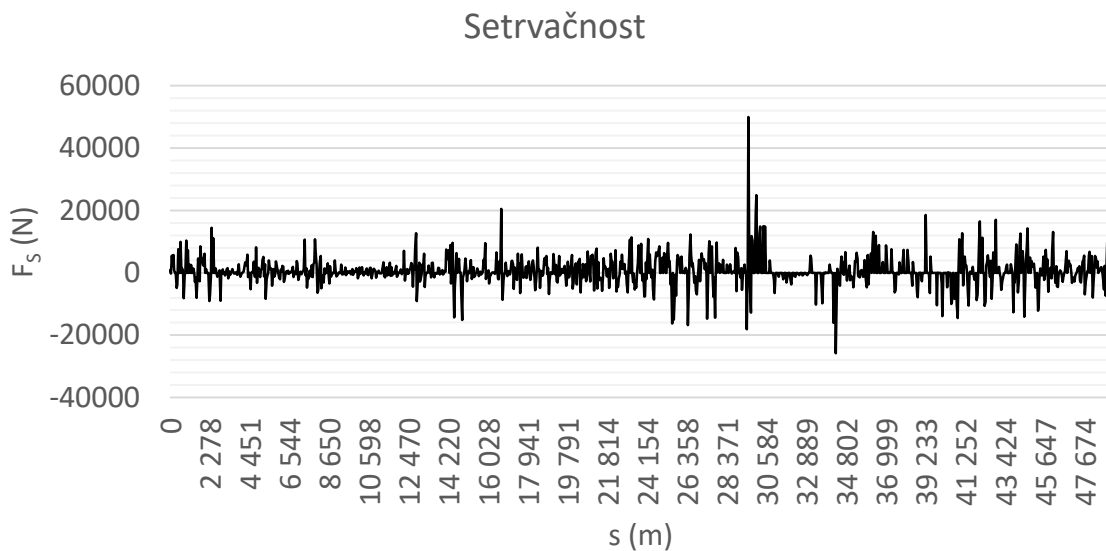
Obr. 4.8: Průběh odporu vzduchu během jízdy vozidla

Setrvačná síla závisí na hmotnosti a změně rychlosti vozidla v čase neboli

na zrychlení. Zrychlení pro daný úsek jsem vypočetl ze známých hodnot rychlostí a doby, za kterou vozidlo daný úsek urazilo. Pro výpočet změny rychlosti vozidla jsem využil vzorce:

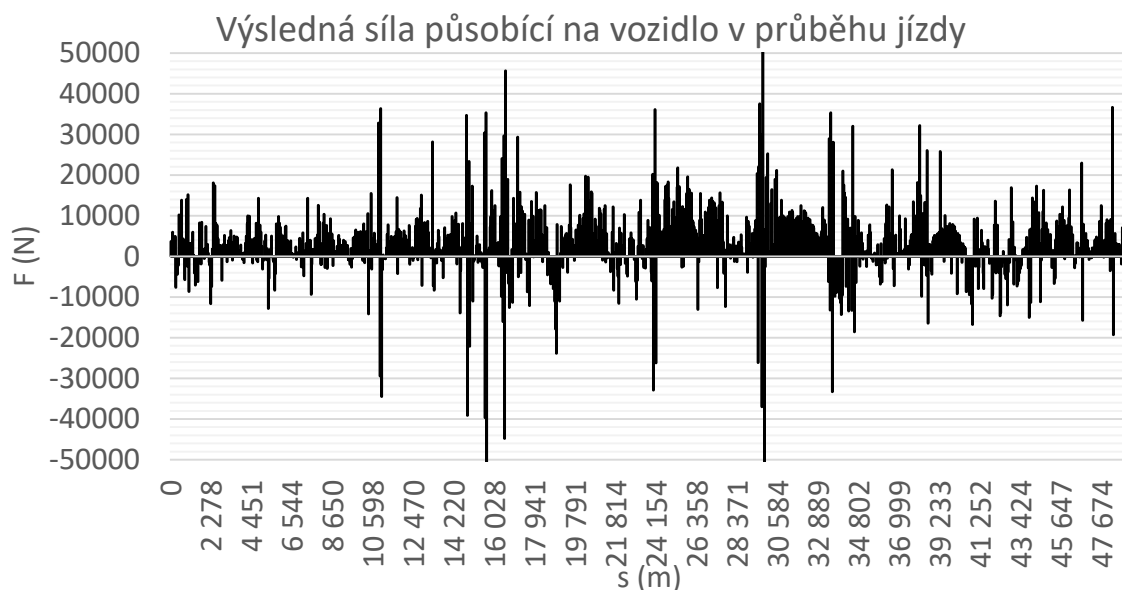
$$a = \frac{\Delta v}{t} = \frac{v_2 - v_1}{t} \quad (m/s^2) \quad (4.4)$$

kde a je zrychlení, Δv je rozdíl rychlostí a t je doba, za kterou vůz projede daným úsekem. Výsledné kladné hodnoty znamenají, že v daném úseku vozidlo zvyšovalo svou rychlost a záporné hodnoty znamenají, že v daném úseku vozidlo svou rychlost snižovalo. Dá se tak uvažovat, že při brzdění by byla možná rekuperace brzděné energie.



Obr. 4.9: Průběh setrvačné síly

Podle rovnice (1.5) jsem provedl součet dílčích sil a získal tak hodnoty výsledných sil působících na vozidlo v jednotlivých dílčích úsecích trasy v průběhu celé jízdy. Průběh výsledných hodnot sil je znázorněn na Obr. 4.10.



Obr. 4.10: Výsledný průběh působení síly na vozidlo v průběhu jízdy

Pro výpočet energetické bilance vozidla je nutné přepočítat výsledné síly na energii. Toho jsem dosáhl součinem výsledné síly v jednotlivých úsecích trati s délkou těchto úseků. Výsledkem je tak energie jízdy vozidla:

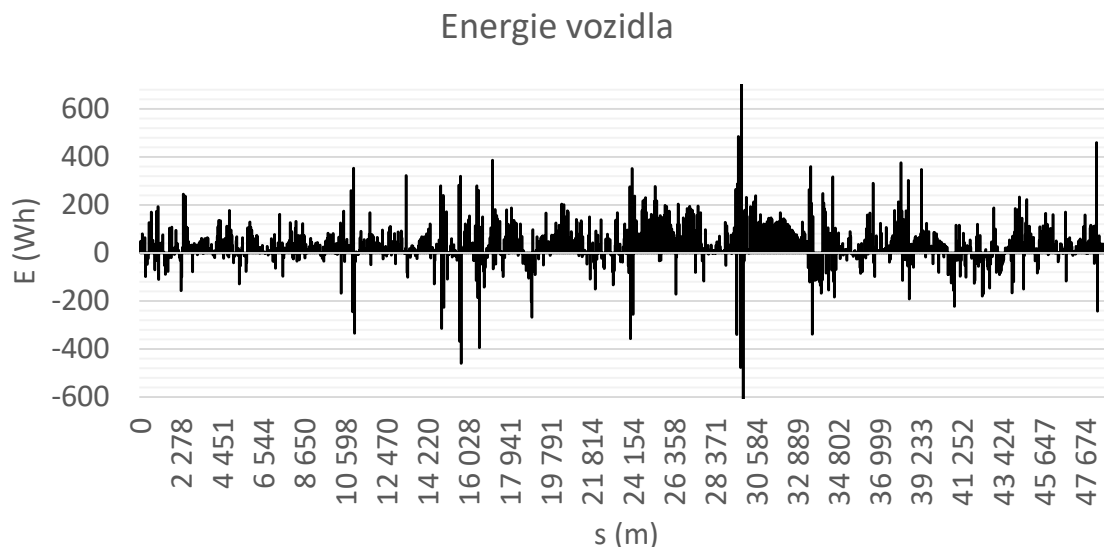
$$E_j = F \cdot s \text{ (Nm; J)} \quad (4.5)$$

Pro přepočet energie z jednotky Joule (J) na jednotku kWh jsem využil vztahu:

$$1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J} \quad (4.6)$$

Výsledný průběh energie vozidla v po dobu jízdy je znázorněn na Obr. 4.11. Kladné hodnoty znázorňují energii, kterou muselo vozidlo pro překonání daného úseku vynaložit. Záporné hodnoty znázorňují energetický potenciál pro rekuperaci. Kladné hodnoty energie dosáhly velikosti 67,83 kWh. Záporné hodnoty představují energii o velikosti 19,29 kWh. Tato hodnota je částečně k dispozici pro eventuální rekuperaci energie.

Takto vypočtené hodnoty znázorňují však pouze minimální energii nutnou pro pohyb vozidla v daném úseku. Pro celkovou energetickou bilanci vozidla je nutné zohlednit spotřebu hydraulického zdvihače nádob a spotřebu lisu, který je součástí nástavby popelářského vozu.



Obr. 4.11: Výsledná energie vozidla v průběhu jízdy

Pro výpočet energetické spotřeby zdvihače nádob jsem vyšel z údajů uvedených v Tab. 4.2 a výpočet provedl podle vzorce:

$$E_z = P \cdot t = 50 \cdot 0,935 = 46,75 \text{ kWh} \quad (4.7)$$

Zdvihač tedy za dobu směny spotřeboval energii o hodnotě 41,56 kWh při obslužení 374 odpadních nádob.

Pro výpočet energie lisu jsem musel nejdříve stanovit celkovou energetickou spotřebu vozidla. Toho jsem docílil díky informacím o spotřebě vozidla uvedených v Tab. 4.2, kdy uvedený údaj byl průměrnou spotřebou daného vozidla v březnu roku 2017. Dále jsem využil chemických vlastností motorové nafty uvedených v Tab. 4.1. Ze znalosti spotřeby vozidla a délky trasy jsem vypočetl množství paliva potřebného pro vybranou trasu.

$$V = \frac{s \cdot \varnothing_{\text{spotřeba}}}{100} = \frac{50,13 \cdot 89,5}{100} = 44,87 \text{ l} = 0,04487 \text{ m}^3 \quad (4.8)$$

Z parametru hustoty motorové nafty a objemu paliva spotřebovaného při ujetí trasy jsem vypočetl hmotnost využitého paliva.

$$m = \rho \cdot V = 840 \cdot 0,04487 = 37,69 \text{ kg} \quad (4.9)$$

Z hmotnosti spálené motorové nafty spolu s údajem o její výhřevnosti jsem dopočtl energii vzniklou při provozu vozidla.

$$E_{nafty} = m \cdot H = 37,69 \cdot 42,61 \cdot 10^6 = 1\,605,87 \text{ MJ} = 446,08 \text{ kWh} \quad (4.10)$$

Údaj o energetické hodnotě v této podobě dle rovnice (4.10) by platil při 100 % účinnosti spalovacího motoru. Skutečnost je ovšem odlišná, a tak je nezbytné energetickou hodnotu přepočítat na skutečnou účinnost spalovacího motoru. Pro reálný spalovací motor jsem zvolil účinnost 40 %.

$$E_{nafty40\%} = \eta \cdot m \cdot H = 0,4 \cdot 37,69 \cdot 42,61 \cdot 10^6 = 642,35 \text{ MJ} \quad (4.11)$$

$$E_{nafty40\%} = 178,43 \text{ kWh}$$

Z rovnice (4.11) jsem získal reálný údaj o celkové spotřebované energii vozidla v provozu pro danou trasu. Z této hodnoty jsem mohl vypočítat energetickou spotřebu lisu, která činí 40 % celkové spotřeby vozidla po dobu provozu.

$$E_L = 0,4 \cdot E_{nafty40\%} = 0,4 \cdot 178,43 = 71,37 \text{ kWh} \quad (4.12)$$

Nyní jsem byl schopen spočítat celkovou energetickou bilanci a porovnat ji s energetickou bilancí skutečně spáleného paliva.

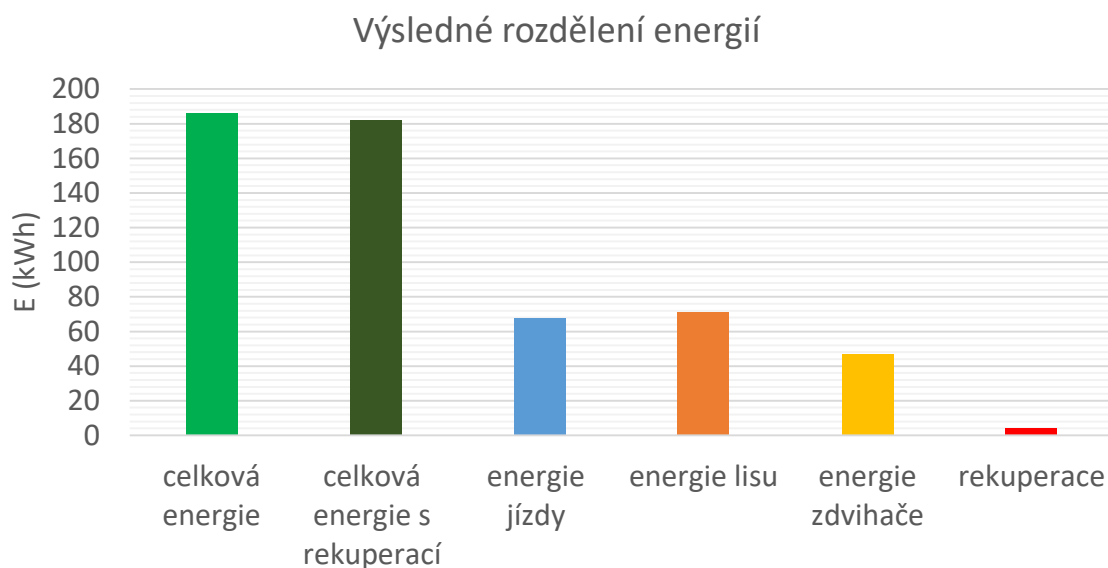
$$E_C = E_j + E_Z + E_L = 67,83 + 46,75 + 71,37 = 185,95 \text{ kWh} \quad (4.13)$$

Energie 185,95 kWh by byla potřebná pro provoz vozidla bez respektování schopnosti rekuperace. Pro výpočet rekuperované energie vozidla jsem předpokládal účinnost regenerativního brzdového systému 20 %. Za tohoto předpokladu jsem spočetl energii, kterou je vozidlo schopné za dobu jízdy rekuperovat z hodnoty energie a účinnosti regenerativního brzdového systému. Tato energie vyšla se záporným znaménkem, též ji lze označit jako energii brzdovou.

$$E_R = \eta_R \cdot E_- = 0,2 \cdot 19,29 = 3,86 \text{ kWh} \quad (4.14)$$

Výslednou energii jsem pak získal ze vztahu:

$$E = E_C - E_R = 185,95 - 3,86 = 182,1 \text{ kWh} \quad (4.15)$$



Obr. 4.12: Znázornění podílu jednotlivých energií na celkové energii vozidla

Celková vypočtená energie pro absolvování trasy vozidla je 182,1 kWh při započítání schopnosti rekuperace vozidla. Vypočtená energie bez rekuperace se liší od energie vypočtené z výhřevnosti paliva o 4,22 %. Při výpočtech byla provedena řada zjednodušení, kdy jsem například nepředpokládal změnu deformace pneumatik při změně zatížení vozidla, vliv účinnosti převodového soustrojí, vliv klimatických podmínek a s tím související zapnutí příslušenství vozidla ovlivňující spotřebu, jako je vytápění nebo v opačném případě spuštění klimatizace. Při výpočtech jsem vycházel z průměrné měsíční spotřeby vozidla, to ovšem během svého měsíčního cyklu mění trasy, a tak došlo k pravděpodobnému zkreslení výsledné energie vypočtené z výhřevnosti paliva. Tato nepřesnost ovlivnila i energii, kterou po dobu jízdy potřebuje pro svou práci lis.

Pokud bych chtěl pro tuto trasu nahradit stávající automobil s dieselovým pohonem vozidlem s elektrickým pohonem, potřebuji znát velikost kapacity baterií, které by posloužily jako zásobník elektrické energie pro motor. Pro stanovení kapacity baterií jsem vyšel ze znalosti potřebné celkové energie se zohledněním schopnosti rekuperace a účinnosti elektrického motoru. Účinnost synchronního motoru s permanentními magnety, který se využívá jako pohon elektrických automobilů, je 95 %.

$$E_{baterií} = \frac{E}{\eta_{em}} = \frac{182,1}{0,95} = 191,68 \text{ kWh} \quad (4.16)$$

Pro pokrytí energetické náročnosti trasy by tak bylo potřeba vozidla s energetickou

kapacitou baterií alespoň 192 kWh.

4.3 Energetická bilance popelářského vozidla – trasa č.2



Obr. 4.13: Grafické zobrazení analyzované trasy (vytvořeno v [46])

Druhou z analyzovaných tras byla trasa popelářského vozidla svážejícího komunální odpad v plzeňské části Jižní Předměstí s následným svozem odpadu do spalovny odpadů v Chotíkově a to ve dvou fůrách. Vozidlo pracující na této trase je Mercedes Benz Antos s nástavbou Zoeller.

Tab. 4.3: Technické parametry vozidla Mercedes Benz Antos s nástavbou Zoeller

pohotovostní hmotnost (kg)	6 400
hmotnost nástavby (kg)	6 354
hmotnost zdvihače (kg)	610
hmotnost posádky (kg)	240
celková hmotnost vozidla (kg)	13 604
průměrná spotřeba vozidla (l/100km)	82,9
výkon zdvihače (W)	50 000
doba vykládky jedné nádoby (s)	9

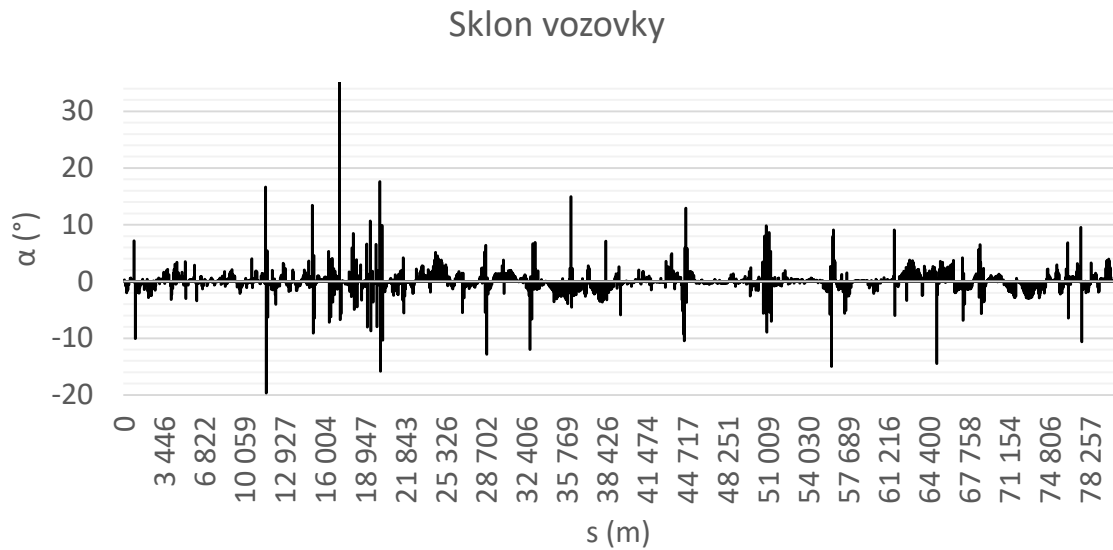
Vozidlo při svém pracovním cyklu absolvovalo trasu o vzdálenosti 83,52 km a

obsloužilo 661 nádob na odpad. Při analýze výškového profilu trasy jsem zanesl při zadávání bodů trasy odchylku 4,15 %, jelikož mnou zadaná trasa do portálu pro analýzu výškopisu měla v celkovém součtu délku 80,06 km. Výsledný výškový profil trasy je zobrazen na Obr. 4.14. Nejnižší bod trasy se nachází v nadmořské výšce 304,55 m.n.m. Trasa dosahuje svého vrcholu ve výšce 447,87 m.n.m.

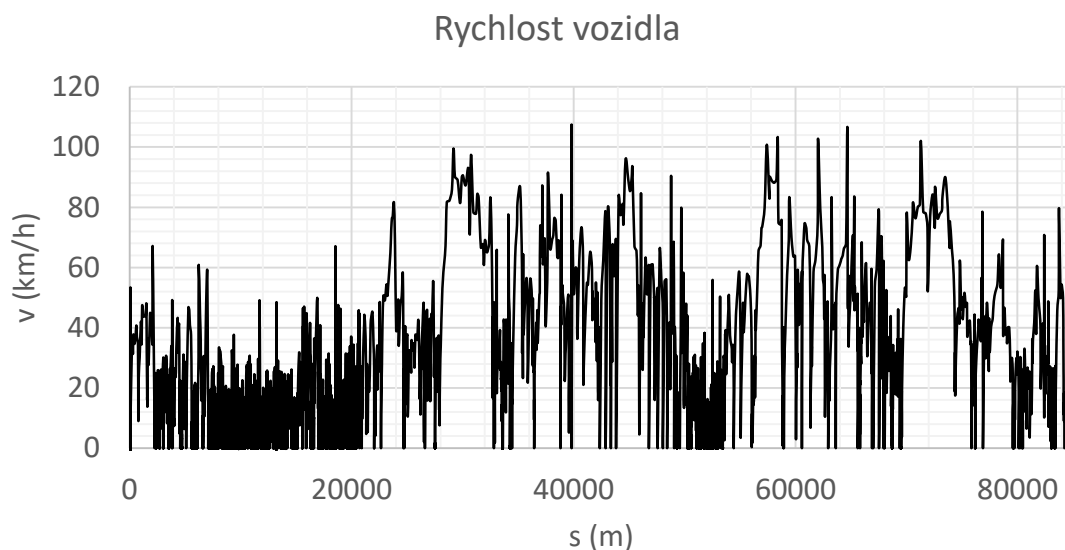


Obr. 4.14: Výškový profil trasy Čistá Plzeň – Jižní Předměstí – Chotíkov – Jižní Předměstí – Chotíkov – Čistá Plzeň

Údaje o výškovém profilu trasy jsem využil pro analýzu sklonu vozovky, jak je uvedeno v rovnici (4.2). Výsledkem analýzy sklonu vozovky je Obr. 4.15. Z tohoto obrázku je patrné, jaký vliv má volená cesta do Chotíkova na sklon vozovky. Vozidlo provedlo svoz odpadu do spalovny v Chotíkově po dvou různých cestách, jak je taktéž patrné z Obr. 4.14. Celkové provedení svozu odpadu trvalo 9 hodin a 35 minut. Z celkového času provozu na trase strávilo vozidlo v pohybu 3 hodiny a 46 minut. Z Obr. 4.16 je patrné, že první fáze nakládání odpadu probíhala od 3. do 20. km trasy a druhá fáze sběru odpadu probíhala od 50. do 52. km trasy.



Obr. 4.15: Znázornění sklonu vozovky na trase vozidla



Obr. 4.16: Graf rychlosti vozidla v průběhu směny

První fůra obsahovala odpad z 603 nádob. Celková hmotnost první fůry činila 3,82 tuny. Opět jsem pro výpočet provedl zjednodušení v podobě shodné hmotnosti odpadu v každé nádobě, která je 6,33 kg ze vztahu (4.17).

$$m_1 = \frac{m_c}{pn} = \frac{3820}{603} = 6,33 \text{ kg} \quad (4.17)$$

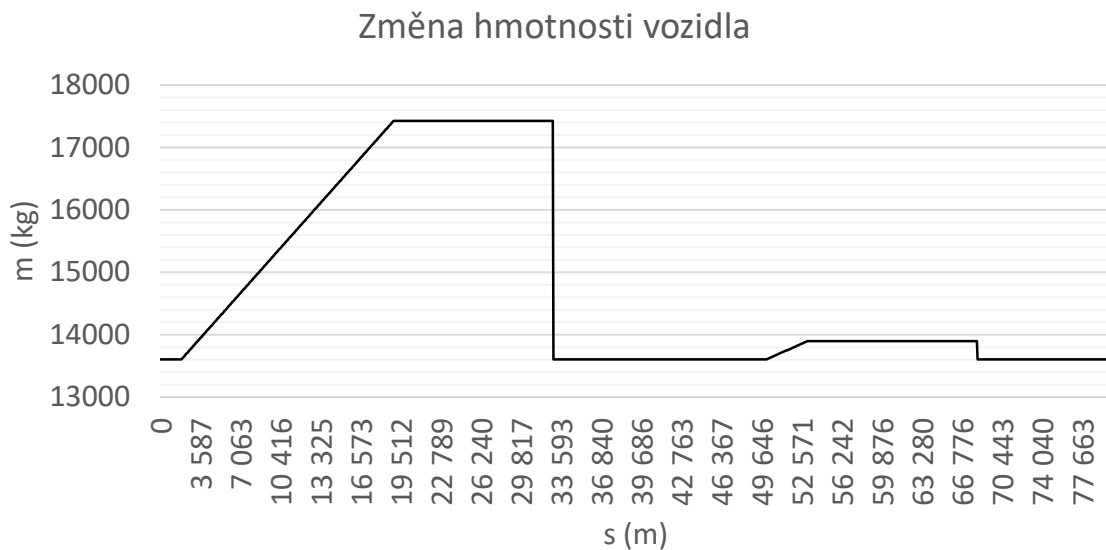
Vzhledem k hustotě rozmístění odpadních nádob na stanovištích jsem při výpočtu předpokládal vyprázdnění dvou nádob současně. Z toho vyplývá, že změna hmotnosti po obslužení stanoviště je 12,66 kg. V první fázi svozu odpadu hmotnost vozidla narostla na

maximální hodnotu 17 424 kg.

Druhá fůra zajišťovala obsluhu 58 nádob s celkovou hmotností odpadu 290 kg. Výpočtem z rovnice (4.18) jsem stanovil množství odpadu v jedné nádobě na 5 kg.

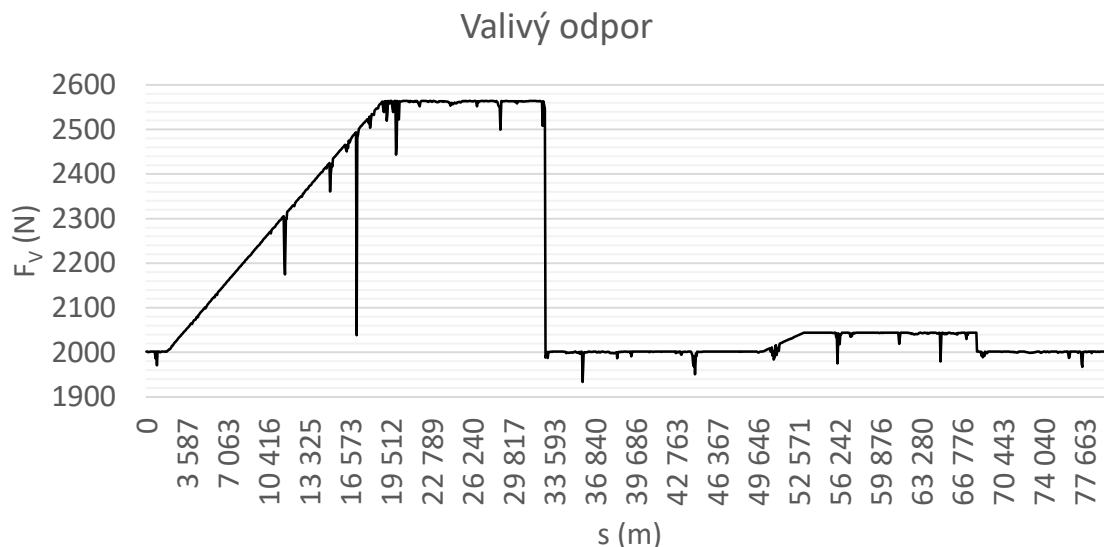
$$m_1 = \frac{m_c}{pn} = \frac{290}{58} = 5 \text{ kg} \quad (4.18)$$

Vozidlo tak během druhé fáze svozu odpadu navýšilo svou celkovou hmotnost na maximální hodnotu 13 894 kg. Celková změna hmotnosti vozidla na trase je znázorněna na Obr. 4.17.



Obr. 4.17: Změna hmotnosti vozidla na trase

Nyní znám všechny hodnoty potřebné pro výpočet sil působících na vozidlo dle rovnic (1.1) - (1.4). Na Obr. 4.18 je znázorněn průběh valivého odporu v jízdě vozidla trasou. Je možné si všimnout výrazného snížení hodnoty valivého odporu, a to ve vzdálenosti 17 km od počátku jízdy, což bylo způsobeno výrazným sklonem vozovky ve zkoumaném úseku. Sklon vozovky byl v tomto úseku 35,23 °.



Obr. 4.18: Průběh hodnot valivého odporu

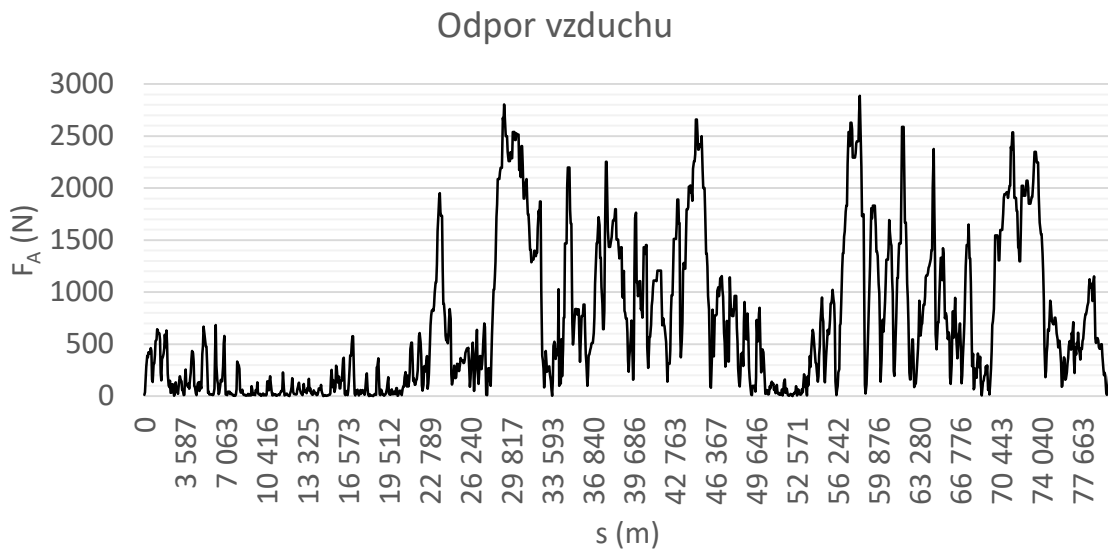
Při působení odporu sklonu vozovky, který je znázorněn na Obr. 4.19, je působení tohoto úseku s výrazně vyšším sklonem vozovky stejně dobře znatelné jako na Obr. 4.18. Hodnota odporu sklonu vozovky v tomto úseku výrazně převyšovala ostatní hodnoty a to více než dvojnásobně. V tomto úseku stoupání muselo vozidlo překonat největší sílu působící proti jeho pohybu vlivem sklonu vozovky na celé trase 95 990 N.



Obr. 4.19: Působení odporu sklonu vozovky na vozidlo

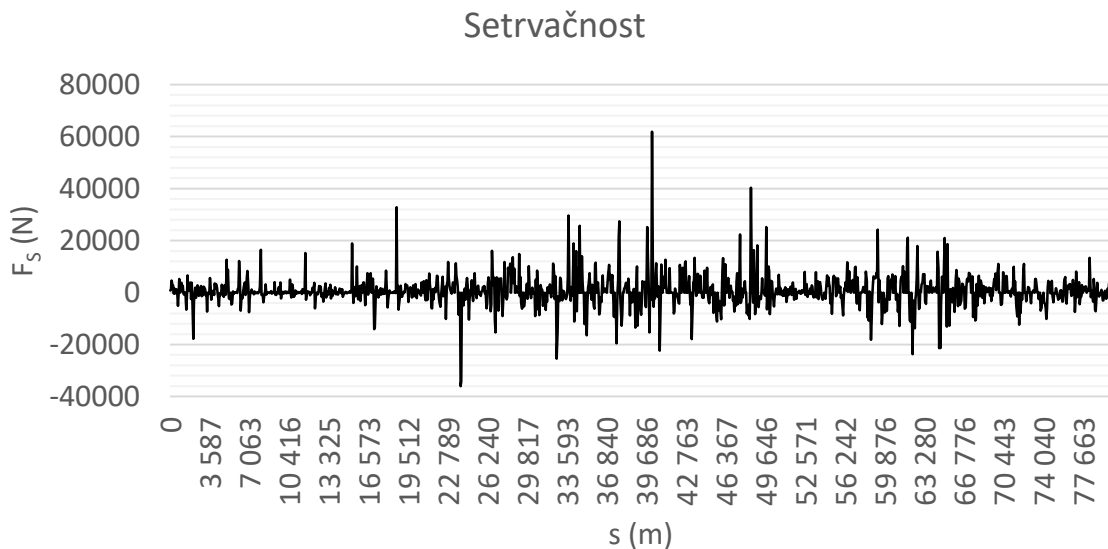
Průběh odporu vzduchu působícího proti pohybu vozidla, jehož hodnota je nejvíce ovlivněna rychlostí jízdy vozu, ukazuje pohyb vozidla, kdy se střídal pohyb na území města a mimo něj. Z Obr. 4.20 je patrné, kdy vozidlo sbíralo první a druhou řadu a naopak, kdy

odváželo odpad do spalovny v Chotíkově, respektive kdy se pohybovalo mimo město.



Obr. 4.20: Průběh odporu vzduchu během jízdy vozidla

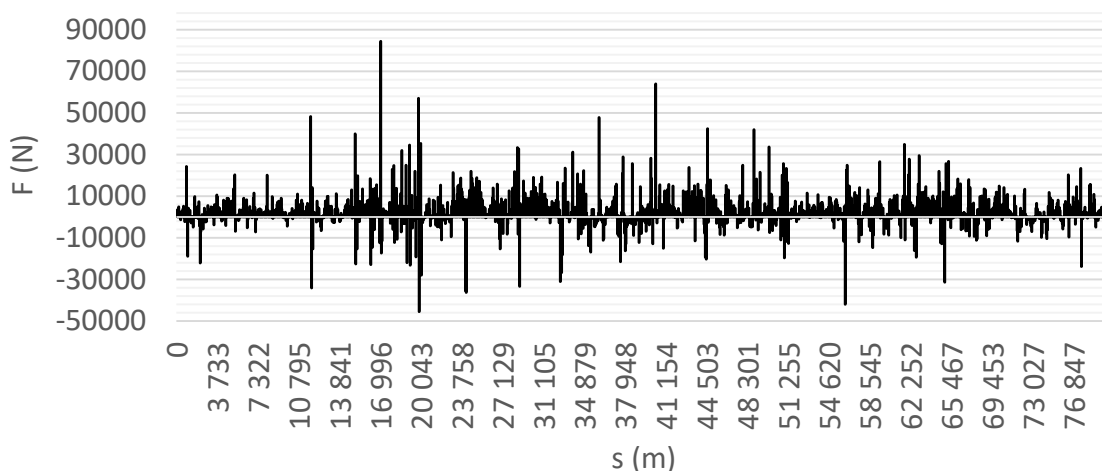
Stejně jako z hodnot odporu vzduchu, tak i z hodnot setrvačné síly lze odvodit, kdy se vozidlo pohybovalo mezi městskou zástavbou a mimo obec. Hodnoty setrvačnosti v obci prakticky nepřesahují hodnotu 10 kN ať již znázorňující zrychlení nebo brždění. Naopak při pohybu mimo obec muselo vozidlo překonat sílu místy vyšší než 60 kN. Výsledný průběh setrvačnosti je znázorněn na Obr. 4.21.



Obr. 4.21: Průběh setrvačné síly

Dosazením dílčích hodnot sil do rovnice (1.5) jsem získal hodnoty výsledných sil v jednotlivých úsecích trasy. Výsledné působení sil je zobrazeno na Obr. 4.22

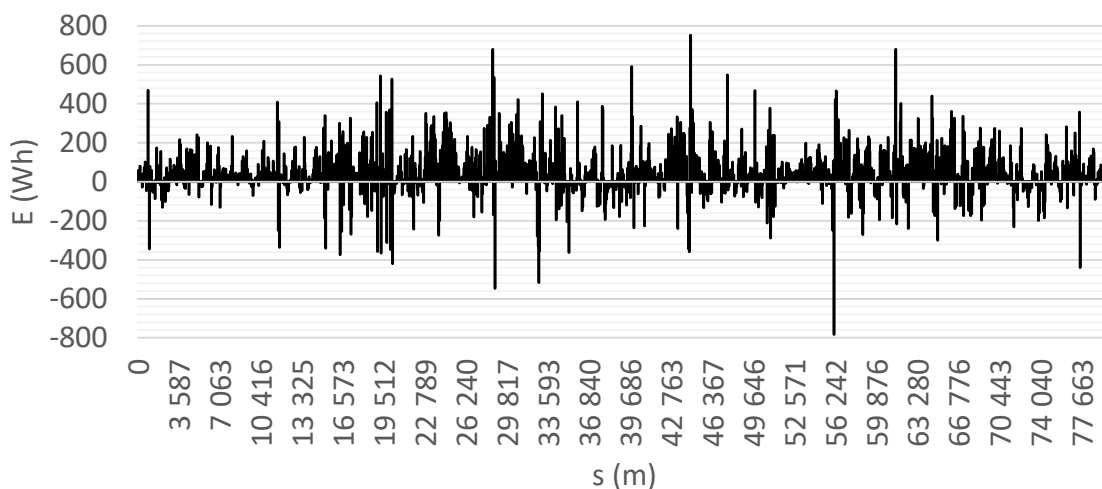
Výsledné síly působící na vozidlo v průběhu jízdy



Obr. 4.22: Výsledný průběh působení síly na vozidlo v průběhu jízdy

Přepočtem výsledného průběhu síly dle rovnice (4.5) jsem dosáhl výpočtu energie, kterou se vyznačovalo vozidlo v průběhu jízdy po své trase. Výslednou hodnotu síly jsem přepočítal dle vztahu (4.6) na jednotku kWh. Energie, kterou muselo vozidlo vynaložit, aby překonalo síly působící proti směru jeho pohybu, je 106,75 kWh. Síly, které naopak napomáhaly k pohybu vozidla a jsou tak využitelné pro rekuperaci, poskytovaly na této trase energii o velikosti 31,04 kWh. Toto jsou opět pouze hodnoty energie jízdy vozidla. Pro stanovení celkové energetické bilance vozidla na této trase je nutné spočítat energii, kterou spotřeboval hydraulický zdvihač a lis v nástavbě vozidla. Výsledná energetická bilance je zobrazena na Obr. 4.23.

Energie vozidla



Obr. 4.23: Výsledná energie vozidla v průběhu jízdy

Energetickou náročnost zdvihače nádob jsem vypočítal z údajů uvedených v Tab. 4.3.

$$E_z = P \cdot t = 50 \cdot 1,6525 = 82,625 \text{ kWh} \quad (4.19)$$

Zdvihač byl po dobu směny v provozu 1 hodinu 37 minut a 30 sekund. Celkem zdvihl 661 odpadních nádob a spotřeboval energii o velikosti 82,625 kWh.

Pro výpočet energetické spotřeby lisu popelářského vozidla jsem vycházel z tvrzení, že spotřeba provozu lisu v průběhu jízdy odpovídá 40 % z celkové spotřeby popelářského vozidla. V Tab. 4.3 je uvedena hodnota o průměrné spotřebě vozidla za měsíc březen v roce 2017. Díky vzdálenosti, kterou vozidlo za danou směnu urazilo, jsem byl schopný stanovit hodnotu množství spotřebovaného paliva.

$$V = \frac{s \cdot \varnothing_{\text{spotřeba}}}{100} = \frac{83,52 \cdot 82,9}{100} = 69,24 \text{ l} = 0,06924 \text{ m}^3 \quad (4.20)$$

V Tab. 4.1 jsou uvedené chemické a fyzikální vlastnosti nafty potřebné pro výpočet hmotnosti spáleného paliva na trase.

$$m = \rho \cdot V = 840 \cdot 0,06924 = 58,16 \text{ kg} \quad (4.21)$$

Z hmotnosti využití motorové nafty na trase a údaji o její výhřevnosti jsem stanovil energii nafty, kterou lze získat jejím spálením.

$$E_{\text{nafty}} = m \cdot H = 58,16 \cdot 42,61 \cdot 10^6 = 2478,2 \text{ MJ} = 688,39 \text{ kWh} \quad (4.22)$$

Energie o hodnotě 688,39 kWh by byla z nafty získána přeměnou se 100 % účinností. Pro reálný výpočet jsem ovšem musel zohlednit skutečnou účinnost dieselového motoru, který pracuje s účinností 40 %.

$$E_{\text{nafty}40\%} = \eta \cdot m \cdot H = 0,4 \cdot 58,16 \cdot 42,61 \cdot 10^6 = 991,28 \text{ MJ} \quad (4.23)$$

$$E_{\text{nafty}40\%} = 275,36 \text{ kWh}$$

Skutečná získaná energie ze spotřebované nafty pro pohyb vozidla činila 275,36 kWh. Z této hodnoty jsem stanovil energetickou spotřebu lisu:

$$E_L = 0,4 \cdot E_{\text{nafty}40\%} = 0,4 \cdot 275,36 = 110,14 \text{ kWh} \quad (4.24)$$

Z výsledků jednotlivých energií jsem byl schopen vypočítat celkovou energii vozidla, kterou vozidlo muselo vyvinout pro absolvování trasy.

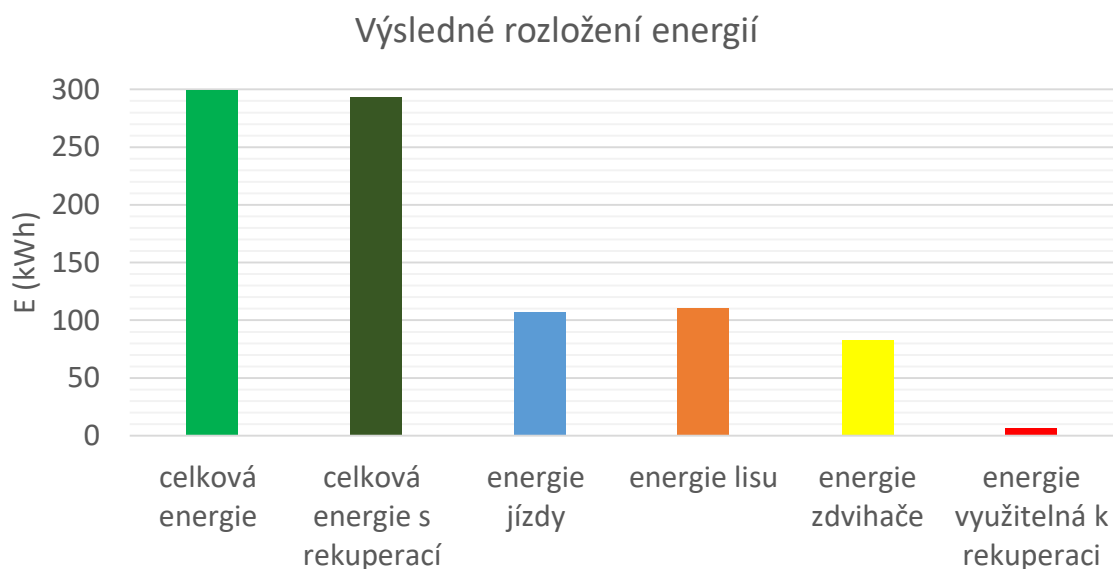
$$E_C = E_j + E_Z + E_L = 106,75 + 82,625 + 110,14 = 299,51 \text{ kWh} \quad (4.25)$$

Energie 299,51 kWh by byla potřebná pro překonání trasy bez započítání možnosti rekuperace energie. Pro výpočet rekuperované energie jsem předpokládal účinnost regenerativního brzdného systému 20 %. Využil jsem hodnotu energie jízdy, která vyšla se záporným znaménkem. Tuto energii lze využít pro rekuperaci.

$$E_R = \eta_R \cdot E_- = 0,2 \cdot 31,04 = 6,21 \text{ kWh} \quad (4.26)$$

S respektováním možnosti rekuperace jsem pak stanovil výslednou energii vozidla pro tuto trasu:

$$E = E_C - E_R = 299,51 - 6,21 = 293,3 \text{ kWh} \quad (4.27)$$



Obr. 4.24: Znázornění podílu jednotlivých energií na celkové energii vozidla

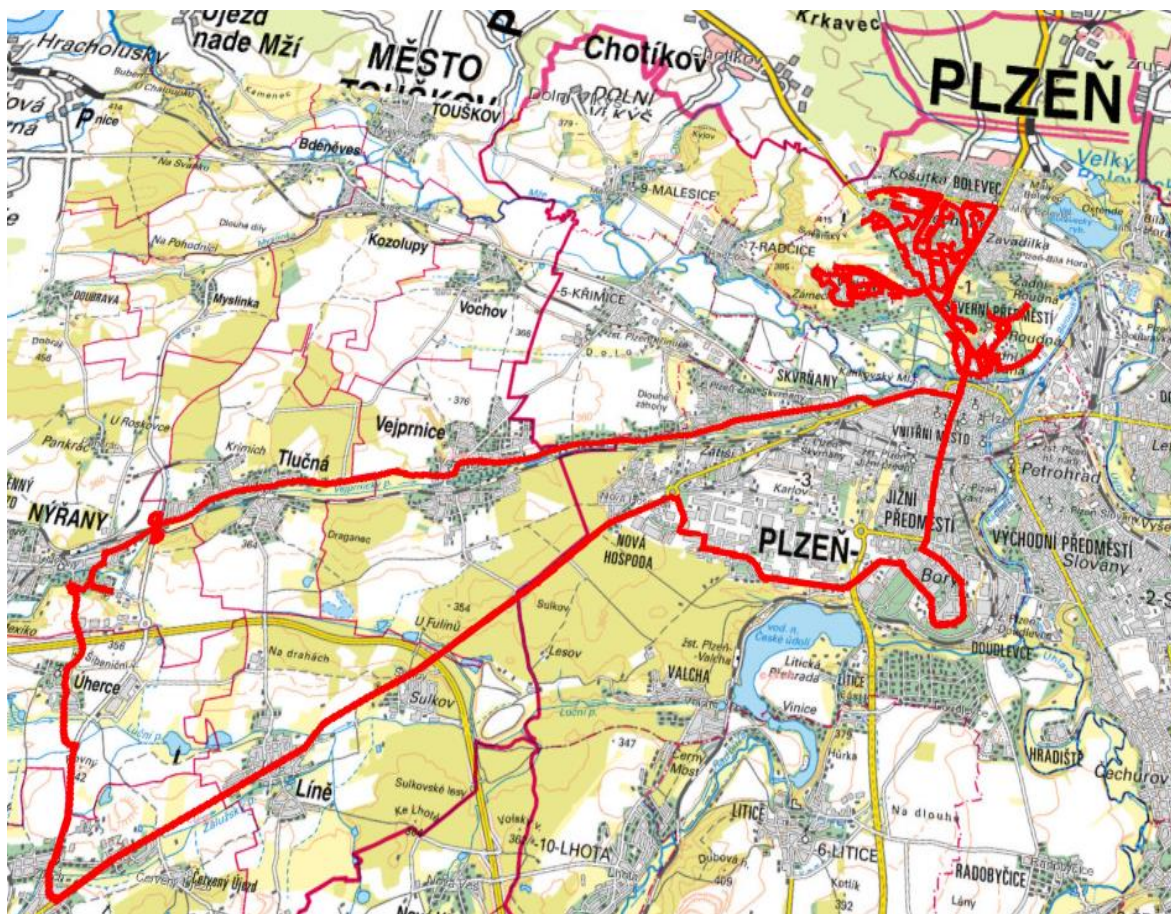
Celková energie nutná pro absolvování této trasy s vozidlem schopným rekuperace je 293,3 kWh. Vypočítaná energie bez rekuperace se od energie vypočítané ze spotřebované motorové nafty liší o 8,77 %. Velikost odchylky způsobilo velké množství obslužených odpadních nádob, což při lineárním nárůstu hmotnosti i časovém intervalu práce zdvihače nádob vedlo k nepřesnosti při výpočtech. Platila stejná zjednodušení pro výpočet, jaká byla uvedena v kapitole 4.2.

Při návrhu vozidla s alternativním pohonným systémem využívajícím elektrický motor je nutné znát velikost, přesněji řečeno energetickou kapacitu, zásobníků pro energii. Předpokládal jsem, že zásobníkem budou baterie. Díky znalosti celkové energie potřebné pro absolvování trasy vozidla schopného rekuperace a účinnosti synchronního motoru s permanentními magnety, která činí 95 %, jsem byl schopen stanovit celkovou minimální kapacitu baterií potřebnou pro trasu č.2.

$$E_{baterií} = \frac{E}{\eta_{em}} = \frac{293,3}{0,95} = 308,74 \text{ kWh} \quad (4.28)$$

Pro pokrytí energetické spotřeby vozidla na této trase by bylo nutné mít vozidlo disponující kapacitou baterií alespoň 309 kWh.

4.4 Energetická bilance popelářského vozidla – trasa č.3



Obr. 4.25: Grafické zobrazení analyzované trasy (vytvořeno v [46])

Třetí analyzovanou trasou byla trasa popelářského vozidla svážející odpad v plzeňské čtvrti Severní Předměstí s vykládkou odpadu na skládce v obci Nýřany. Na této trase vykonalo svoz odpadu vozidlo Mercedes Benz Arocs. Parametry vozidla potřebné pro

uskutečnění výpočtu jsou uvedeny v Tab. 4.4.

Tab. 4.4: Technické parametry vozidla Mercedes Benz Arocs s nástavbou Zoeller

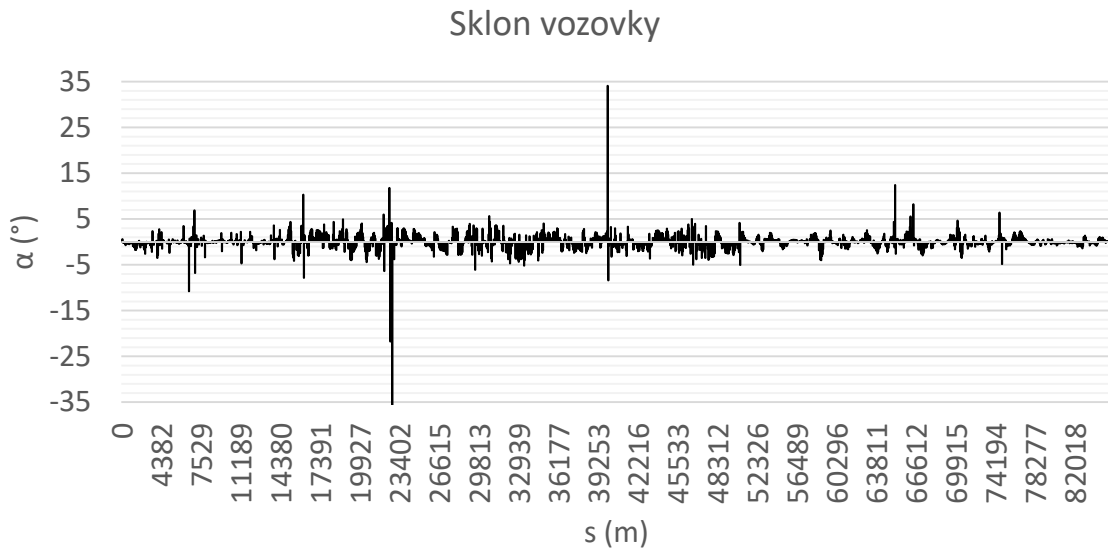
pohotovostní hmotnost (kg)	9 250
hmotnost nástavby (kg)	6 800
hmotnost zdvihače (kg)	690
Hmotnost posádky (kg)	240
celková hmotnost vozidla (kg)	16 980
průměrná spotřeba vozidla (l/100km)	66,9
výkon zdvihače (W)	50 000
doba vykládky jedné nádoby (s)	8

Vozidlo na své trase svozu odpadu z centrály Čisté Plzně přes Severní Předměstí na skládku odpadu v Nýřanech a zpět do Čisté Plzně urazilo vzdálenost 86,1 km. Při zadávání trasy do portálu pro analýzu výškopisu jsem zadal body trasy a výsledná délka trasy byla 85,18 km. Odchylka vozidla v délce analyzovaných tras činila 1,07 %. Výškový profil analyzované trasy je znázorněn na Obr. 4.26. Vozidlo projelo trasou s nejnižším bodem ve výšce 303,28 m. n. m. a s nejvyšším bodem v 411,55 m. n. m.

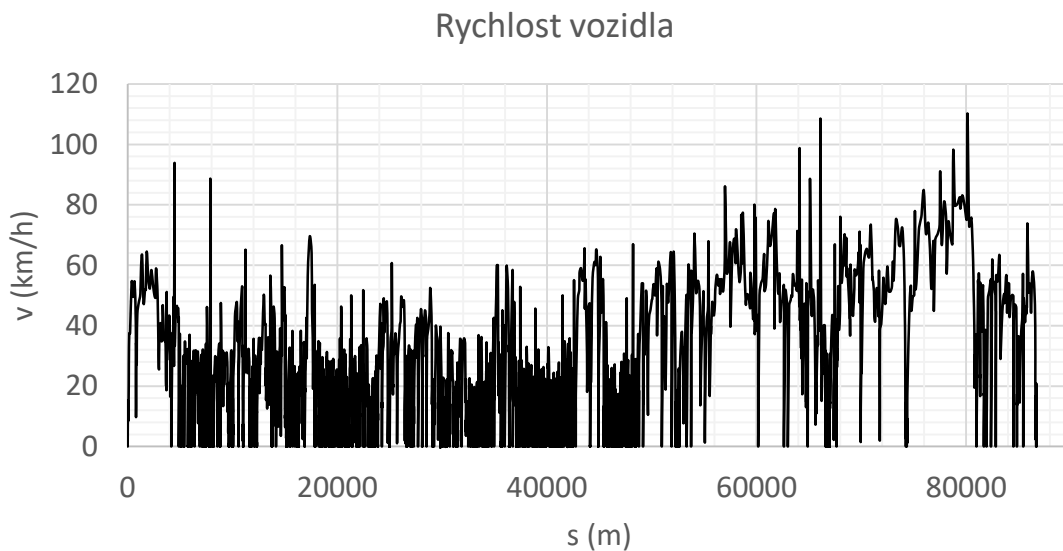


Obr. 4.26: Výškový profil trasy Čistá Plzeň – Severní Předměstí – Nýřany – Čistá Plzeň

Výsledky údajů o výškovém profilu jsem použil pro výpočet sklonu vozovky v jednotlivých úsecích dráhy podle vztahu (4.2). Hodnoty sklonu vozky trasy jsou zachyceny na Obr. 4.27. Vozidlo provedlo svoz dopadu za 8 hodin a 5 minut. Z tohoto celkového času strávilo vozidlo v pohybu 3 hodiny 40 minut.



Obr. 4.27: Znázornění sklonu vozovky na trase vozidla

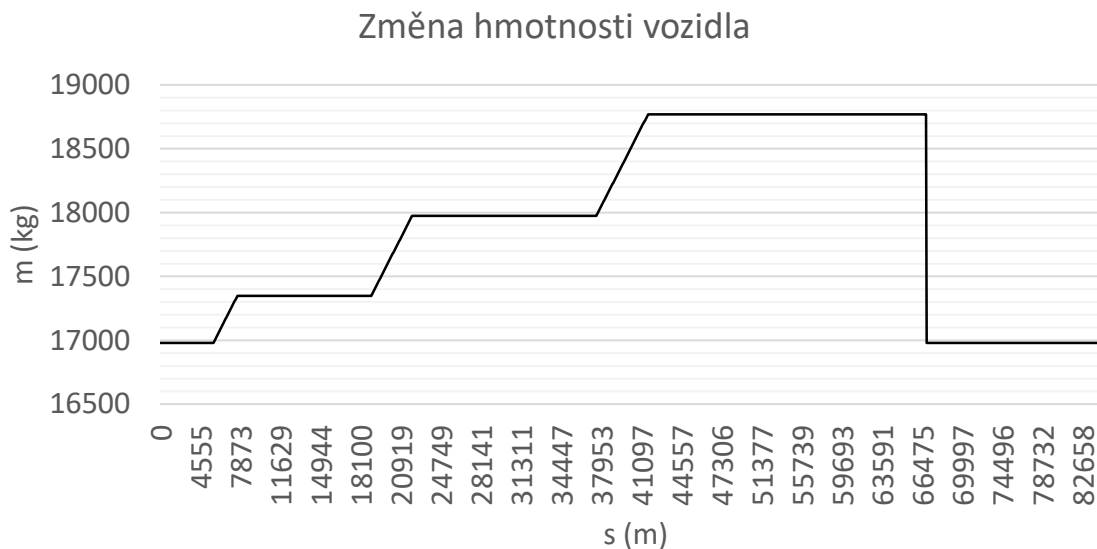


Obr. 4.28: Graf rychlosti vozidla v průběhu směny

Při sběru odpadu obsloužilo vozidlo 180 nádob a nashromáždilo tak odpad o celkové hmotnosti 1,79 tuny. Pro rozložení celkové hmotnosti rovnoměrně mezi jednotlivé nádoby jsem získal hmotnost odpadu v jedné nádobě 9,94 kg dle výpočtu ze vztahu:

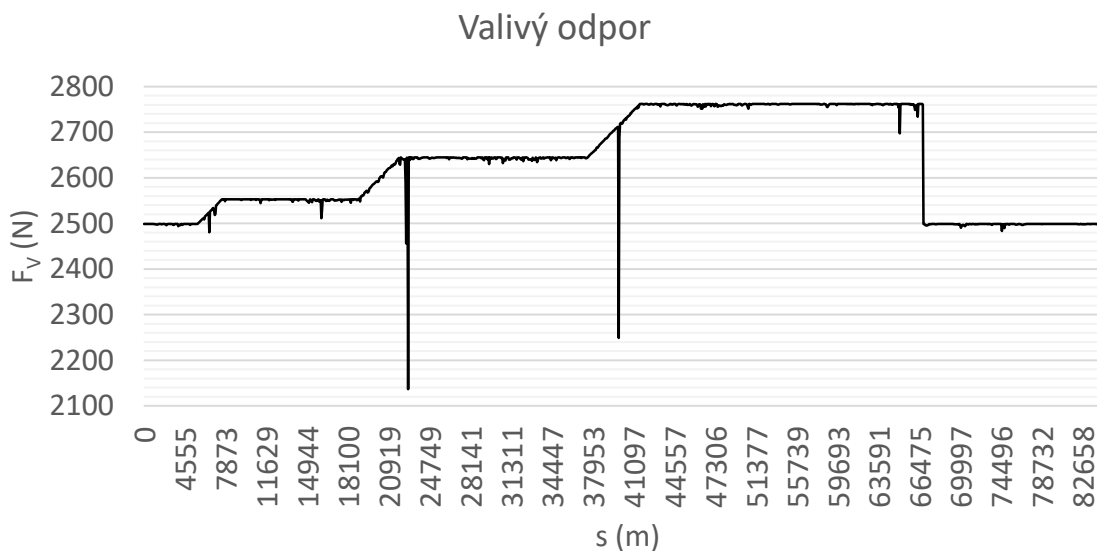
$$m_1 = \frac{m_c}{pn} = \frac{1790}{180} = 9,94 \text{ kg} \quad (4.29)$$

Průběh změny hmotnosti jízdy je zachycen na Obr. 4.28



Obr. 4.29: Změna hmotnosti vozidla na trase

Po určení všech potřebných veličin pro výpočet působících sil jsem byl schopen dosadit hodnoty do rovnic (1.1) - (1.4). Z rovnice (1.1) jsem dosazením dat vypočetl hodnotu valivého odporu jízdy v jednotlivých úsecích trasy. Hodnoty valivého odporu jsou znázorněny na Obr. 4.30. Výrazné snížení hodnot valivého odporu, které jsou na Obr. 4.30 patrné, jsou způsobeny vysokým sklonem vozovky. Nejnižší hodnoty síly působící na vozidlo vlivem valivého odporu byly vypočteny pro hodnoty sklonu $21,8^\circ$, $36,1^\circ$ a $34,1^\circ$.



Obr. 4.30: Průběh hodnot valivého odporu

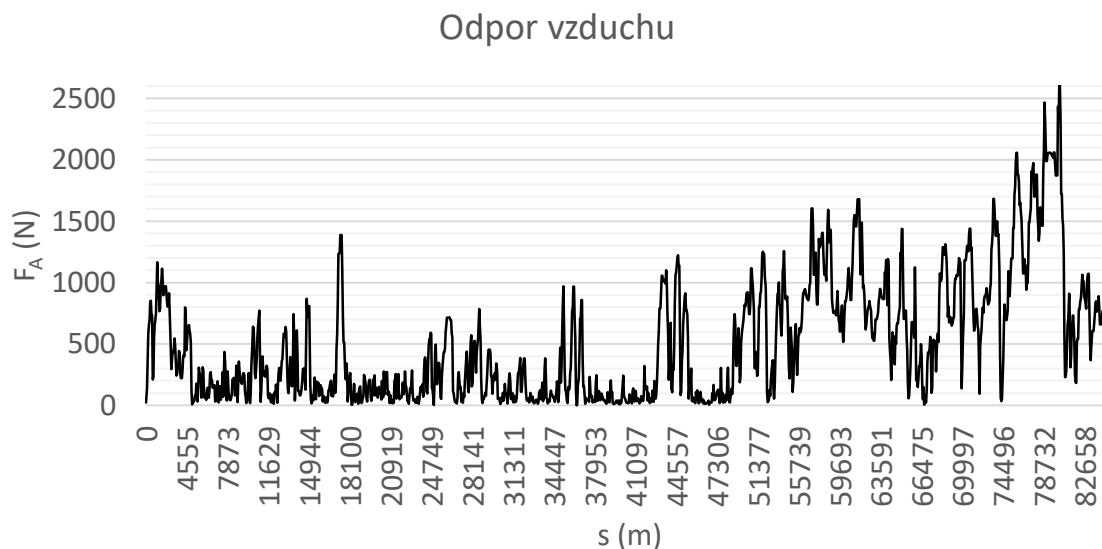
Vysoké hodnoty sklonu vozovky působí i znatelně vyšší hodnoty síly působící na vozidlo vlivem odporu sklonu vozovky. Průběh hodnot odporu sklonu vozovky je

znázorněn na Obr. 4.31.



Obr. 4.31: Působení odporu sklonu vozovky na vozidlo

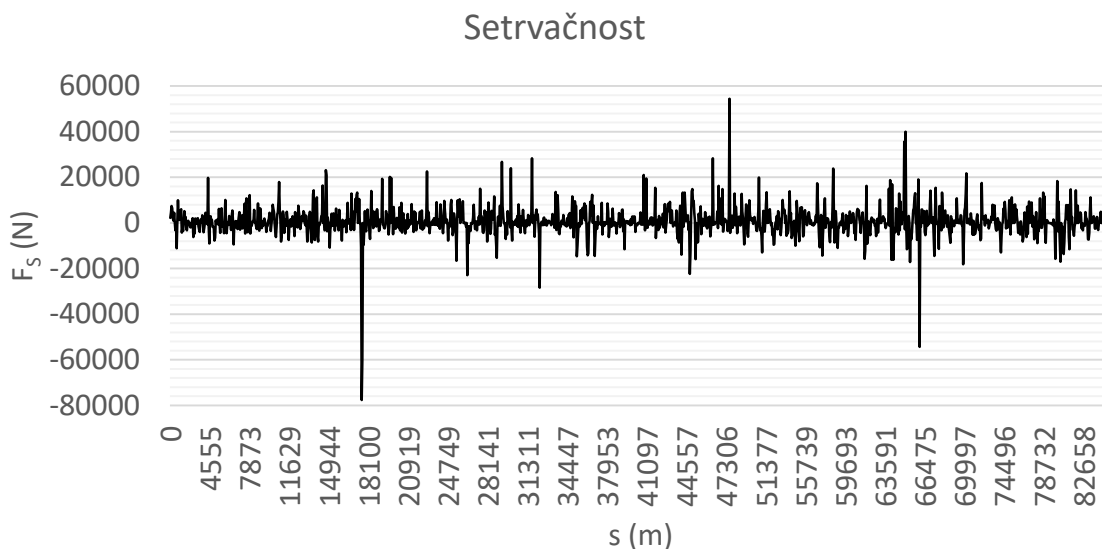
Hlavním určujícím faktorem pro stanovení odporu vzduchu působícího na vozidlo v průběhu jízdy je rychlost, kterou se vozidlo pohybuje. Obr. 4.32 znázorňující průběh odporu vzduchu je tak tvarem odpovídající Obr. 4.28, který zachycuje rychlost vozidla.



Obr. 4.32: Průběh odporu vzduchu během jízdy vozidla

Změny rychlosti a hmotnost vozidla jsou dva faktory, které ovlivnily velikost setrvačnosti vozidla. Průběh setrvačné síly je znázorněn na Obr. 4.33. Nejvýraznější výkyvy velikosti setrvačnosti jsou způsobeny razantní změnou rychlosti vozidla. Nejvýraznější změna rychlosti vozidla nastala při brzdění, kdy vozidlo svou rychlost za zkoumaný úsek

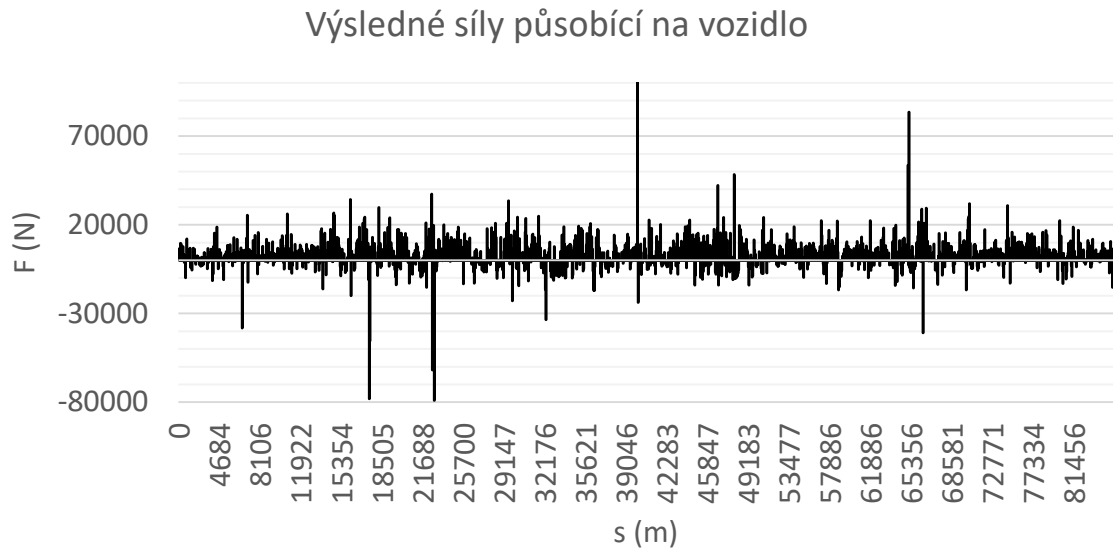
snížilo se zrychlením $-4,475 \text{ m/s}^2$.



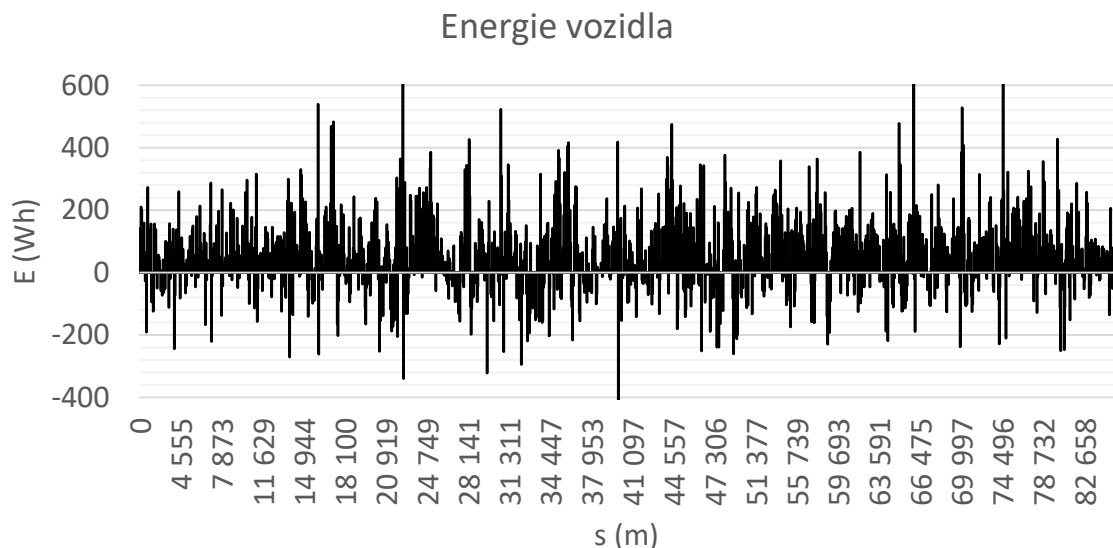
Obr. 4.33: Průběh setrvačné síly

Součtem dílčích hodnot působících sil dle rovnice (1.5) jsem vypočetl hodnoty výsledných sil, které na vozidlo působily v jednotlivých úsecích trasy. Výsledné působení sil na vozidlo v průběhu jízdy je zachyceno na Obr. 4.34.

Ze vztahu (4.5) jsem vypočetl energetickou bilanci vozidla v jednotlivých úsecích jízdy. Výsledek jsem upravil díky vztahu (4.6) na odpovídající jednotku. Pro absolvování trasy svozu odpadu muselo vozidlo vynaložit energii 119,95 kWh. Síly napomáhající vozidlu v jeho pohybu v sobě měly energetický potenciál o hodnotě 31,79 kWh. Teď je opět nezbytné připočítat k hodnotě energie jízdy vozidla energii spotřebovanou zdvihacím zařízením a lisem nástavby vozu. Výsledný průběh energetické bilance vozidla je znázorněn na Obr. 4.35.



Obr. 4.34: Výsledný průběh působení síly na vozidlo v průběhu jízdy



Obr. 4.35: Výsledná energie vozidla v průběhu jízdy

Z údajů uvedených v Tab. 4.4 jsem stanovil energetickou náročnost zdvihače pro uvedenou trasu.

$$E_z = P \cdot t = 50 \cdot 0,4 = 20 \text{ kWh} \quad (4.30)$$

Zdvihač za směnu obsloužil 180 nádob a spotřeboval energii o velikosti 20 kWh.

Pro stanovení energetické bilance lisu vozidla jsem vycházel z tvrzení, že spotřeba lisu zabírá 40 % spotřeby celého vozidla. Údaj o průměrné spotřebě vozidla v měsíci březnu je uveden v Tab. 4.4. Z absolvované vzdálenosti vozidlem jsem stanovil hodnotu množství spotřebovaného paliva.

$$V = \frac{s \cdot \emptyset \text{spotřeba}}{100} = \frac{86,1 \cdot 66,9}{100} = 57,6 = 0,0576 \text{ m}^3 \quad (4.31)$$

Z hodnot uvedených v Tab. 4.1 jsem vypočetl hmotnost paliva spáleného při provozu na 3. trase.

$$m = \rho \cdot V = 840 \cdot 0,0576 = 48,38 \text{ kg} \quad (4.32)$$

Díky hmotnosti a známosti výhřevnosti motorové nafty jsem byl chopen vypočítat energetický potenciál spáleného paliva.

$$E_{nafty} = m \cdot H = 48,38 \cdot 42,61 \cdot 10^6 = 2\,061,67 \text{ MJ} \quad (4.33)$$

$$E_{nafty} = 572,69 \text{ kWh}$$

Při výpočtu skutečně využitě energie paliva jsem musel zohlednit účinnost spalovacího motoru, která je 40 %.

$$E_{nafty40\%} = \eta \cdot m \cdot H = 0,4 \cdot 48,38 \cdot 42,61 \cdot 10^6 = 824,67 \text{ MJ} \quad (4.34)$$

$$E_{nafty40\%} = 229,07 \text{ kWh}$$

Skutečně využitá energie získaná ze spotřebované nafty na trase činila 229,07 kWh. Z této hodnoty energie jsem byl schopen stanovit energetickou náročnost lisu:

$$E_L = 0,4 \cdot E_{nafty40\%} = 0,4 \cdot 229,07 = 91,63 \text{ kWh} \quad (4.35)$$

Součtem průběžných hodnot energií jsem vypočítal celkovou energii, kterou vozidlo muselo vyvinout pro absolvování trasy.

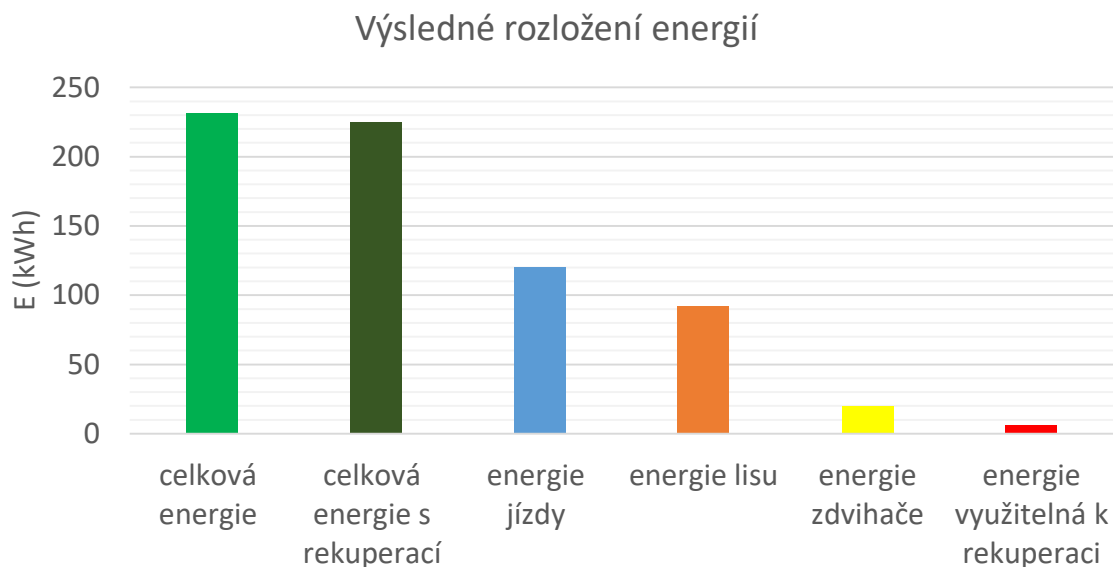
$$E_C = E_j + E_Z + E_L = 119,95 + 20 + 91,63 = 231,58 \text{ kWh} \quad (4.36)$$

Výsledná energie E_C nezahrnuje energii, kterou je vozidlo schopno v průběhu jízdy nashromáždit díky rekuperaci. Díky regenerativnímu brzděmu systému by vozidlo mohlo za trasu rekuperovat energii o velikosti 6,36 kWh.

$$E_R = \eta_R \cdot E_- = 0,2 \cdot 31,79 = 6,36 \text{ kWh} \quad (4.37)$$

S respektováním rekuperace vyšla výsledná energie vozidla pro třetí trasu 225,23 kWh.

$$E = E_C - E_R = 231,58 - 6,36 = 225,23 \text{ kWh} \quad (4.38)$$



Obr. 4.36: Znárodnění podílu jednotlivých energií na celkové energii vozidla

Vypočtená výsledná energie vozidla bez rekuperace z působení sil na vozidlo se od hodnoty energie vypočtené z údajů o spotřebě a vlastností motorové nafty liší o 1,1 %. Výpočet pro tuto trasu byl tak ze všech tří tras nejpřesnější.

Pro případ, že by na této trase bylo nasazeno vozidlo s využitím alternativního pohonu v podobě elektrického motoru, by muselo vozidlo mít k dispozici zásobníky elektrické energie o velikosti minimálně 238 kWh. Taková kapacita by pro vozidlo byla postačující při stanovení účinnosti elektrického motoru 95 %.

$$E_{baterií} = \frac{E}{\eta_{em}} = \frac{225,23}{0,95} = 237,08 \text{ kWh} \quad (4.39)$$

5 Rentabilita alternativního pohonu

Pro možnost nahrazení diesellového spalovacího motoru jiným typem motoru je jedním z nejdůležitějších aspektů cena. Vozidlo využívající diesellový motor má výrazně nižší investiční náklady v porovnání s vozidlem využívající elektrický motor jako zdroj energie pohybu. Naopak provozní náklady jsou výrazně nižší u vozidla využívajícího elektrický motor. Pro porovnání nákladů jsem vybral stávající vozidla, která využívá společnost Čistá Plzeň, vozidlo firmy BYD třídy 8 a popelářský vůz firmy Motiv. Uvedené údaje o investičních nákladech za vozidlo se mohou od skutečných částek lišit, jelikož se mi nepodařilo získat od výrobců konkrétní cenovou nabídku jednotlivých vozidel a hodnoty jsem získal z internetových zdrojů. Výpočet celkových nákladů jsem definoval pro vozidla, která absolvovala trasy uvedené v kapitole 4.

Celkové náklady spojené s popelářskými vozy se skládají ze dvou složek. První složkou jsou investiční náklady. Za investiční náklady se považují náklady spojené s počáteční investicí, tedy koupí vozidla. Druhou složkou jsou náklady provozní. Do provozních nákladů spadají náklady spojené s výdaji za pohonné hmoty, potažmo elektřinu. Dále sem patří výdaje za udržování vozidla v provozu schopném stavu, jako je například výměna oleje, drobné opravy. Při porovnávání provozních nákladů vozidla s diesellovým motorem a vozidla s elektrickým motorem jsem nezapočítal výdaje za pneumatiky, neboť typ pohonu nemá vliv na opotřebení pneumatik, a proto jsou výdaje za pneumatiky v obou případech shodné.

Pořizovací ceny popelářských vozidel jsou uvedeny v Tab. 5.1. Hodnoty v tabulce je nutné ovšem brát jako orientační, protože se mi nepodařilo získat informace od prodejců, ale pouze zprostředkovaně. [38] [39] [40]

Tab. 5.1: Investiční náklady na pořízení popelářského vozidla

Cena popelářského vozu (CZK)	
Mercedes Antos	4 690 000
Mercedes Arocs	4 325 000
BYD 8 class truck	8 006 720
Motiv refuse truck	13 704 180

Pro přepočítání ze zahraničních měn na českou korunu jsem volil kurzy ČNB ze dne 19.4.2018. Kurzy měn jsou uvedeny v Tab. 5.2. Pro výpočet ceny elektricky poháněného popelářského vozidla firmy BYD jsem musel udanou cenu šasi doplnit o odhadovanou cenu nástavby a zdvihače. Cenu nástavby a zdvihače jsem stanovil na 1 870 520 CZK. Tuto

hodnotu jsem zvolil jako rozdíl investičních nákladů za Mercedes Arocs a BYD 8 class truck. Cena vozu firmy BYD je uváděna pro dieselový ekvivalent elektricky poháněného vozidla stejné firmy. [38]

$$N_{inz} = N_{iArocs} - N_{iBYD} = 4\,325\,000 - 2\,454\,480 = 1\,870\,520 \text{ CZK} \quad (5.1)$$

Tab. 5.2: Hodnoty kurzů měn dle ČNB

1 EUR	25,325	CZK
1 USD	20,454	CZK
1 GBP	29,116	CZK

Finanční hodnota paliva, které vozidlo spotřebuje v průběhu analyzované trasy za jednu směnu, je vypsána v Tab. 5.3. Cena motorové nafty je uvedena ze dne 18.4.2018, kdy cena za 1 l motorové nafty byla 30,03 CZK. [41] Náklady na palivo se tak v průběhu roku mění s ohledem na vývoj ceny motorové nafty. Pro výpočet výdajů při užití elektrického motoru jsem použil speciální cenový tarif pro elektromobilitu C27d od společnosti ČEZ. Tento tarif zvýhodňuje provozovatele elektromobilů a nabízí jim odběr při nízkém tarifu 1,5854 CZK / 1 kWh. [42]

Tab. 5.3: Palivové náklady analyzovaných tras za jednu jízdu

	Dieselový motor	Elektrický motor bez rekuperace	Elektrický motor s rekuperací
	náklady (CZK)	náklady (CZK)	náklady (CZK)
Svoz Slovany	1 347,34	310,33	303,89
1 km Slovany	26,88	6,19	6,06
Svoz Jižní Předměstí	2 079,22	499,84	489,48
1 km Jižní Předměstí	24,89	5,98	5,86
Svoz Severní Předměstí	1 729,76	386,48	375,87
1 km Severní Předměstí	20,09	4,49	4,37

Při pohledu do Tab. 5.3 je patrné, jak výrazná úspora za palivo nastane při využití elektrické energie. Výdaje spojené s ujetím 1 km trasy jsou u všech tří tras sníženy o více než 75 %. Nahrazením dieselového motoru elektrickým, by došlo k ročním úsporám na trasách v hodnotě 264 364 CZK pro první trasu zahrnující svoz odpadu pro čtvrť Slovany, 260 994 CZK pro druhou trasu svážející odpad na území městské části Plzeň Jižní Předměstí. Obě tyto analyzované trasy zahrnovaly odvoz odpadu do spalovny v Chotíkově. Pro třetí trasu vedoucí na skládku v Nýřanech se svozem odpadu ve čtvrti Severní Předměstí by byla úspora nákladů nejvyšší a to v hodnotě 311 731 CZK. Údaje, ze kterých jsem vyšel pro

určení roční úspory, jsou uvedeny v Tab. 5.4 - Tab. 5.6. Roční úsporu jsem vypočetl jako součet měsíčních úspor.

Tab. 5.4: Měsíční výdaje za palivo na trase Slovany

měsíc/rok	počet km	spotřeba (l/100km)	Slovany		
			výdaje za naftu (CZK)	výdaje za elektřinu (CZK)	měsíční úspora (CZK)
11/16	1 448	81,5	35 446,51	7 994,85	27 451,66
12/16	1 010	82,5	25 016,49	5 642,39	19 374,10
1/17	971	76,7	22 372,35	5 046,01	17 326,34
2/17	836	71,9	18 060,64	4 073,52	13 987,12
3/17	681	89,5	18 294,28	4 126,22	14 168,06
4/17	1 001	82,5	24 805,98	5 594,91	19 211,07
5/17	943	78,4	22 208,99	5 009,17	17 199,82
6/17	1 120	70,2	23 616,19	5 326,56	18 289,64
7/17	882	76,2	20 173,85	4 550,15	15 623,71
8/17	1 690	67,8	34 384,95	7 755,42	26 629,53
9/17	1 567	75,5	35 510,48	8 009,27	27 501,20
10/17	1 250	76,6	28 739,01	6 481,99	22 257,02
11/17	1 402	77,7	32 703,57	7 376,19	25 327,38

Tab. 5.5: Měsíční výdaje za palivo na trase Jižní Předměstí

měsíc/rok	počet km	spotřeba (l/100km)	Jižní Předměstí		
			výdaje za naftu (CZK)	výdaje za elektřinu (CZK)	měsíční úspora (CZK)
11/16	666	92,5	18 495,18	4 171,53	14 323,65
12/16	1 425	84,4	36 107,17	8 143,86	27 963,31
1/17	1 051	81,4	25 701,18	5 796,82	19 904,36
2/17	694	66,7	13 892,48	3 133,40	10 759,07
3/17	882	82,9	21 945,02	4 949,63	16 995,39
4/17	977	63,1	18 498,48	4 172,27	14 326,21
5/17	1 167	107,3	37 609,87	8 482,79	29 127,09
6/17	1 031	79,9	24 741,72	5 580,42	19 161,30
7/17	940	92,7	26 158,23	5 899,91	20 258,33
8/17	934	84,0	23 568,14	5 315,72	18 252,42
9/17	1 079	67,5	21 871,45	4 933,04	16 938,41
10/17	1 238	94,7	35 195,16	7 938,16	27 257,00
11/17	1 241	89,1	33 220,39	7 492,75	25 727,63

Tab. 5.6: Měsíční výdaje za palivo na trase Severní předměstí

měsíc/rok	počet km	spotřeba (l/100km)	Severní předměstí		
			výdaje za naftu (CZK)	výdaje za elektřinu (CZK)	měsíční úspora (CZK)
11/16	1 057	72,5	23 002,98	4 998,44	18 004,54
12/16	1 645	69,7	34 414,38	7 478,09	26 936,29
1/17	1 518	65,1	29 655,23	6 443,94	23 211,28
2/17	1 550	75,9	35 315,28	7 673,85	27 641,43
3/17	1 201	66,9	24 144,12	5 246,41	18 897,71
4/17	1 477	67,5	29 939,91	6 505,81	23 434,10
5/17	1 642	71,3	35 135,40	7 634,76	27 500,64
6/17	1 766	60,5	32 072,34	6 969,17	25 103,17
7/17	1 464	73,1	32 132,70	6 982,29	25 150,41
8/17	966	70,7	20 510,49	4 456,84	16 053,65
9/17	1 707	63,5	32 552,82	7 073,58	25 479,24
10/17	1 635	64,9	31 861,83	6 923,43	24 938,40
11/17	1 829	68,3	37 537,80	8 156,79	29 381,01

Pro výpočet nákladů ovšem nepostačovala informace o nákladech za palivo. Do nákladu spojených s provozem vozidla bylo nutné zahrnout náklady spojené s běžnou údržbou vozů, náklady za palivo a v neposlední řadě také investiční náklady. Reálnou hodnotu vynaloženou za údržbu vozidel provozovaných v současnosti na analyzovaných trasách jsem získal díky společnosti Čistá Plzeň. Částku za roční údržbu vozidel jsem pro vozidlo značky BYD stanovil z údajů uvedených v datovém listu. Tam společnost BYD uvádí, že vozidlo ročně ušetří provozovateli 92 043 CZK za náklady spojené s údržbou vozidla. [30] Společnost Motiv ve svých materiálech neuvádí přesnou částku, kterou provozovatel ušetří díky provozování jejich vozidla, ale tvrdí, že využitím jejich vozidla dojde k úspoře za údržbu 66 % oproti dieselovému vozidlu. [11] Součtem ročních nákladů za palivo a údržbu jsem získal roční provozní náklady za jedno vozidlo. Hodnoty uvedené v Tab. 5.7 a Tab. 5.8 udávají investiční náklady a provozní náklady za jeden rok.

Tab. 5.7: Rozdělení nákladů pro jednotlivé trasy a vozidla s ohledem na skutečný roční nájezd km

	Investiční náklady (CZK)	Roční náklady za palivo (CZK)	Roční údržba (CZK)	Provozní náklady (CZK)
Mercedes Antos - Severní Předměstí	4 690 000	398 275	139 464	537 739
Mercedes Arocs - Slovany	4 325 000	341 333	189 324	530 657
Mercedes Arocs - Jižní Předměstí	4 325 000	337 004	206 580	543 584
BYD - Severní Předměstí	8 686 308	865 43	47 421	192 861
BYD - Slovany	8 686 308	76 987	97 281	241 096
BYD - Jižní Předměstí	8 686 308	76 010	114 537	259 891
Motiv - Severní Předměstí	14 383 768	86 543	47 418	133 961
Motiv - Slovany	14 383 768	76 987	64 370	141 357
Motiv - Jižní Předměstí	14 383 768	76 010	70 237	146 247

Tab. 5.8: Rozdělení nákladů pro jednotlivé trasy a vozidla při dvojnásobném ročním nájezdu km

	Investiční náklady (CZK)	Roční náklady za palivo (CZK)	Roční údržba (CZK)	Provozní náklady (CZK)
Mercedes Antos - Severní Předměstí	4 690 000	796 551	278 928	1 075 479
Mercedes Arocs - Slovany	4 325 000	682 667	378 648	961 595
Mercedes Arocs - Jižní Předměstí	4 325 000	674 009	413 160	952 937
BYD - Severní Předměstí	8 686 308	173 087	94 842	452 015
BYD - Slovany	8 686 308	153 973	194 562	432 901
BYD - Jižní Předměstí	8 686 308	152 021	229 074	430 949
Motiv - Severní Předměstí	14 383 768	173 087	94 836	452 015
Motiv - Slovany	14 383 768	153 973	128 740	432 901
Motiv - Jižní Předměstí	14 383 768	152 021	140 474	430 949

Pro výpočet stanovení dlouhodobých nákladů z pohledu provozu popelářských vozidel jsem uvažoval roční provozní náklady konstantní. Stanovený interval pro sledování výhodnosti provozu jednotlivých typů vozidel na trasách byl 14 let. 14 let z důvodu životnosti baterií. BYD uvádí životnosti baterií právě na toto období, pokud se s vozem bude jezdit každý den, aniž by celková kapacita baterií klesla pod 80 %. [30] Výpočet jsem provedl podle vztahu (5.2) s dosazením hodnot z Tab. 5.7 pro porovnání při současném nájezdu kilometrů a z Tab. 5.8 pro dvojnásobný roční nájezd a s tím související dvojnásobné provozní výdaje.

$$N_t = N_i + t \cdot N_{pr} \quad (5.2)$$

Tab. 5.9: Výše nákladů v čase uvedené v milionech CZK pro skutečný roční nájezd km – zeleně vyznačena doba ekonomické návratnosti projektu

t (roky)	2. mil. (CZK)	4. mil. (CZK)	6. mil. (CZK)	8. mil. (CZK)	10. mil. (CZK)	12. mil. (CZK)	14. mil. (CZK)
Mercedes Antos - Severní Předměstí	5,77	6,84	7,92	8,99	10,07	11,14	12,22
Mercedes Arocs - Slovany	5,39	6,45	7,51	8,57	9,63	10,69	11,75
Mercedes Arocs - Jižní Předměstí	5,41	6,50	7,59	8,67	9,76	10,85	11,94
BYD - Severní Předměstí	8,27	8,54	8,81	9,08	9,35	9,61	9,88
BYD - Slovany	8,36	8,70	9,05	9,40	9,75	10,10	10,45
BYD - Jižní Předměstí	8,39	8,77	9,15	9,53	9,91	10,29	10,67
Motiv - Severní Předměstí	13,97	14,24	14,51	14,78	15,04	15,31	15,58
Motiv - Slovany	13,99	14,27	14,55	14,84	15,12	15,40	15,68
Motiv - Jižní Předměstí	14,00	14,29	14,58	14,87	15,17	15,46	15,75

Tab. 5.10: Výše nákladů v čase uvedené v milionech CZK pro dvojnásobný roční nájezd km – zeleně vyznačena doba ekonomické návratnosti projektu

t (roky)	2. mil. (CZK)	4. mil. (CZK)	6. mil. (CZK)	8. mil. (CZK)	10. mil. (CZK)	12. mil. (CZK)	14. mil. (CZK)
Mercedes Antos - Severní Předměstí	6,84	8,99	11,14	13,29	15,44	17,60	19,75
Mercedes Arocs - Slovany	6,45	8,57	10,69	12,82	14,94	17,06	19,18
Mercedes Arocs - Jižní Předměstí	6,50	8,67	10,85	13,02	15,20	17,37	19,55
BYD - Severní Předměstí	8,54	9,08	9,61	10,15	10,69	11,22	11,76
BYD - Slovany	8,70	9,40	10,10	10,80	11,49	12,19	12,89
BYD - Jižní Předměstí	8,77	9,53	10,29	11,06	11,82	12,58	13,34
Motiv - Severní Předměstí	14,24	14,78	15,31	15,85	16,38	16,92	17,46
Motiv - Slovany	14,27	14,84	15,40	15,97	16,53	17,10	17,66
Motiv - Jižní Předměstí	14,29	14,87	15,46	16,04	16,63	17,21	17,80

Vypočtené náklady zohledňující investici do vozidla, nabíjecí stanice a provozní náklady jsou graficky znázorněny na Obr. 5.2 pro skutečný roční nájezd kilometrů a na Obr. 5.3 pro dvojnásobný roční nájezd kilometrů. Pro nabití ať již baterií, elektrických článků nebo superkapacitorů slouží dobíjecí stanice.

5.1 Dobíjecí stanice v areálu Čisté Plzně

Při výběru dobíjecích stanic jsem se snažil najít takovou stanici, kterou mohou vozidla využívat především přes noc, kdy by měla společnost k dispozici výhodný tarif pro odběr elektřiny. Jako ideální řešení se tak jeví dobíjecí systém společnosti ABB, který je navržen pro noční dobíjení autobusů a nákladních automobilů. Tento dobíjecí systém

disponuje třemi variantami provedení z hlediska výkonu. Systém je k dispozici s výkonem 50 kW, 100 kW nebo 150 kW. Dobíjecí systém pracuje se střídavým napětím 400 V o síťové frekvenci 50 / 60 Hz. Toto napětí je systémem usměrněno a výstupem je stejnosměrné napětí, které se může pohybovat v rozmezí 150 – 920 V. Maximálním výstupním proudem pro 150 kW variantu je proud o hodnotě 200 A. Systém je navržen tak, že může být umístěn jak pro vnitřní, tak pro venkovní stání. Systém je odolný vůči vnějším vlivům a je dimenzován tak, aby dokázal pracovat i při nízkých teplotách a to až do $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. V opačném případě je limitující teplotní hranicí pro práci systému $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. [43] U zmiňovaných vozidel jsou odlišné parametry, jelikož vozidla jsou provozována na území USA. Vozidlo typu BYD má dobíjecí výkon 80 kW při 480 V střídavých, třífázově. [14] Vozidlo typu Motiv je vyrobena na dobíjení o výkonu 25 kW při 208 V. [11]



Obr. 5.1: Systém pro noční dobíjení elektromobilů společnosti ABB se třemi výstupními konektory (převzato z [43])

Informace o ceně dobíjecí stanice firmy ABB mi nebyly poskytnuty, jelikož dle sdělení ABB se náklady liší v závislosti na realizovaném projektu a musel bych udat konkrétní poptávku. Pro výpočet jsem použil dostupné ceny, kdy jsem vybral dobíjecí stanici Pulce QC50, která nabízí nabíjecí výkon 50 kW. Nabíjecí stanice poskytuje maximální nabíjecí stejnosměrný proud 125 A. Cena výrobku začíná na částce 679 588 CZK. [45]

Při plánování vybudování více dobíjecích stanic koncentrovaných na malé ploše, v tomto případě v areálu společnosti Čistá Plzeň, je nutné brát v potaz výkonovou rezervu areálu. Pro instalaci takto vysokých odběrů (150 kW) není vůbec zaručeno, že areál disponuje dostatečnou výkonovou rezervou. Přesné údaje o výkonové rezervě areálu mi

nejsou známé. Zůstává tak otázkou, jestli by výstavba nabíjecích stanic s požadovaným výkonem byla uskutečnitelná, aby bylo možné dobíjet vozidla v noci, při využití výhodného tarifu. Jako možné východisko se jeví vyvedení odbočky z transformátoru v transformační stanici Plzeň – Jih. V tomto případě by ovšem byly potřebné značné práce pro posílení přípojky a další přestavby. To představuje překážku nejen z ekonomického hlediska, ale také z časového hlediska. Nebylo by tak možné nasadit elektrické popelářské vozy v krátkém časovém horizontu.

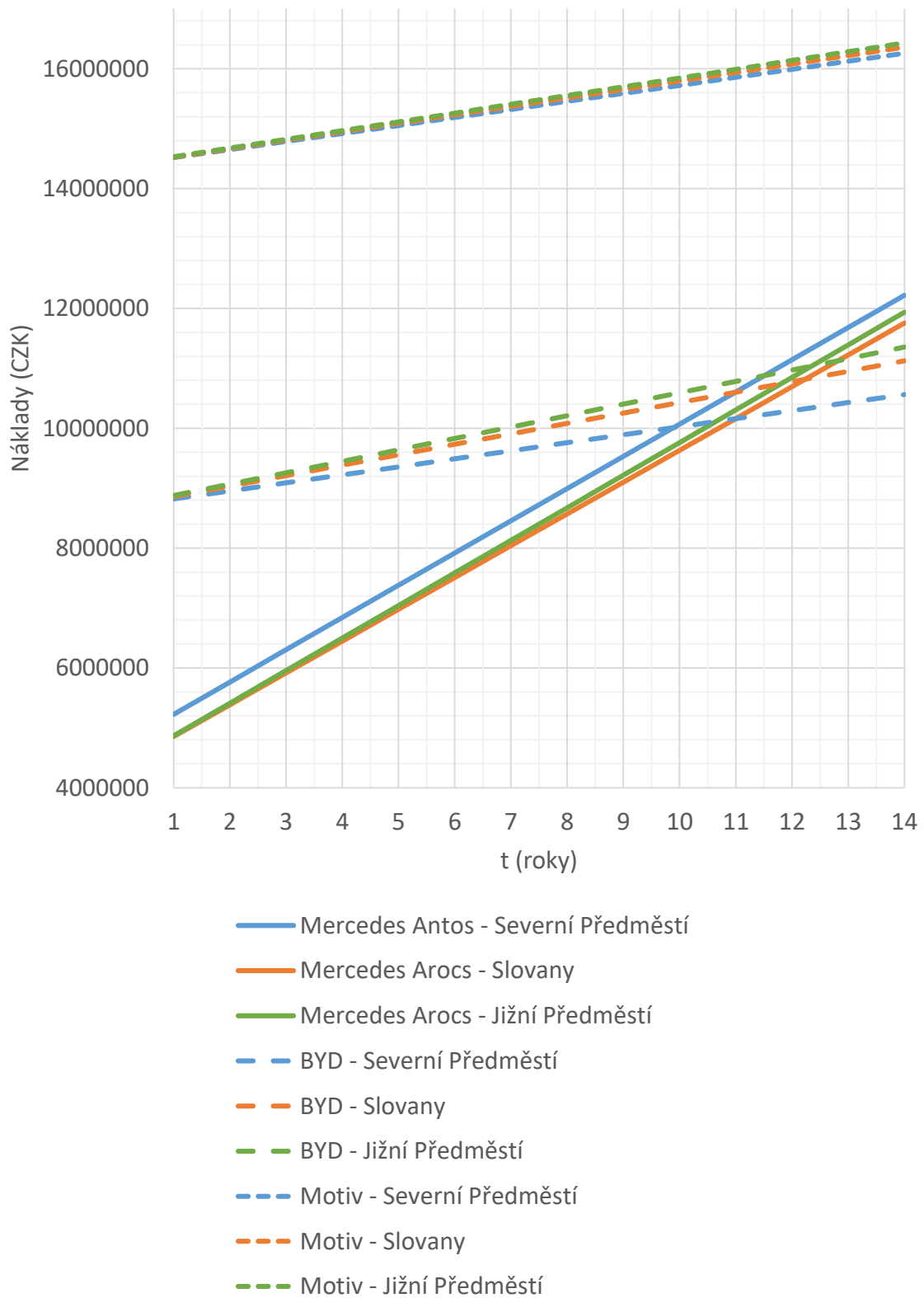
5.2 Porovnání tras

Všechny tři vybrané trasy byly odlišné. První dvě se shodovaly v odvozu odpadu do spalovny v Chotíkově. Druhá a třetí si byly podobné svou délkou. Všechny se lišily množstvím obslužených nádob a množstvím nashromážděného odpadu. Vliv počtu obslužených nádob nejvíce ovlivnil odchylku vypočtené energie ze sil působících na vozidlo při porovnání s energií vypočítanou z množství využití motorové nafty.

Tab. 5.11: Porovnání analyzovaných tras

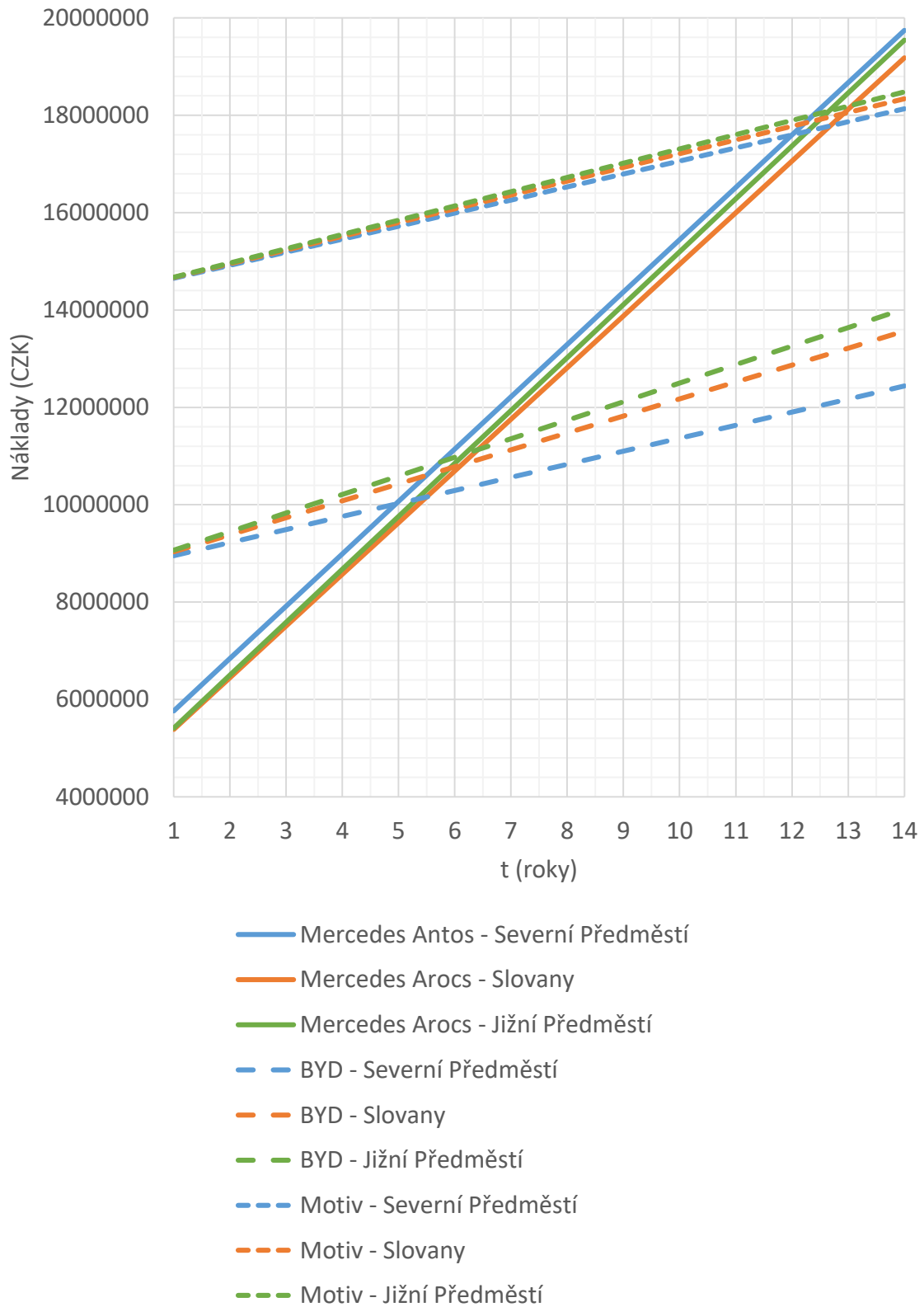
	Trasa č.1	Trasa č.2	Trasa č.3
délka trasy (km)	50,13	83,52	86,1
počet obslužených nádob (ks)	374	661	180
množství odpadu (t)	5	4,01	1,79
spotřebovaná energie vypočtená (kWh)	185,95	29,51	231,58
spotřebovaná energie z nafty (kWh)	178,43	275,36	229,07
náklady na absolvování trasy - diesellový motor (CZK)	1348	2080	1730
náklady na absolvování trasy - elektrický motor (CZK)	304	490	376
potřebná kapacita baterií (kWh)	192	309	238

Náklady spojené s provozem popelářského vozidla s
respektováním skutečného ročního nájezdu



Obr. 5.2: Porovnání nákladů dieselového popelářského vozu s elektromobilem se současným ročním nájezdem km

Náklady spojené s provozem popelářského vozidla s dvojnásobným ročním nájezdem



Obr. 5.3: Porovnání nákladů diesellového popelářského vozu s elektromobilem s dvojnásobným ročním nájezdem km

5.3 Ekonomická výhodnost projektu

Při ekonomickém porovnání investičních nákladů pro realizaci projektu elektricky poháněných popelářských vozidel se mi nepodařilo získat údaje o pořizovacích nákladech na dobíjecí stanici uvedenou v podkapitole 5.1 z důvodu omezeného přístupu k těmto údajům. Proto jsem využil hodnot dostupných [45]. Do výpočtu jsem zahrnul vybudování pouze jednoho dobíjecího místa.

Při respektování současného ročního nájezdu kilometrů jednotlivých uvedených vozidel jsem došel k závěru, že zavedení elektricky poháněných vozidel namísto dieselových by bylo ekonomicky výhodné, pokud by vozidlo na trase č. 3 provádělo svoz odpadu po dobu delší než 10 let. Na zbylých dvou trasách by se projekt stal výhodným, pokud by vozidla na trasách sloužila déle než 12,5 roku. Výhodnost se ovšem týká pouze při nasazení elektrického popelářského vozidla od firmy BYD. U vozidla značky Motiv jsou počáteční investiční náklady natolik vysoké, že návratnost projektu není v časovém horizontu životnosti vozidla či baterií možná.

Pokud by vozidla zdvojnásobila svou četnost jízd, potom by úspory za provoz elektricky poháněných vozidel převážily vyšší investiční náklady v kratším časovém úseku. V tomto případě by se stalo nasazení elektrických vozidel firmy BYD rentabilním po 5 letech působení na trase č. 3 a po 6,5 letech na zbylých dvou trasách. S vyšším ročním nájezdem by se stal ekonomicky výhodným i projekt při nasazení vozidel Motiv. Zde je ovšem návratnost projektu na hranici životnosti baterií, tj. po 12 letech na trase č. 3 a po 13 letech na zbylých trasách.

Hodnoty návratnosti projektu jsou značně ovlivněny počátečními investičními náklady. Tato částka by mohla být výrazně nižší, pokud by došlo k čerpání dotací. Jako možný zdroj dotací se jeví připravovaný dotační program, který by měl být spuštěn v září roku 2018 s názvem Nízkouhlíkové technologie. Tento dotační program je součástí Operačního programu Podnikání a inovace pro konkurenceschopnost OPPIK. Tento program poskytuje dotaci až ve výši 75 % na pořízení elektromobilů. [49]

Jako největší problém se jeví kapacita baterií. Uvedené vozidlo firmy BYD disponuje energetickou kapacitou baterií 188 kWh. Takové množství energie by ovšem nestačilo na absolvování ani jedné z analyzovaných tras bez zastávky na částečné dobití. Vozidlo Motiv může mít provedení s kapacitou baterií 212 kWh. Tato kapacita by stačila na pokrytí energetické náročnosti provozu vozidla pouze na trase č. 1. Zůstává tak otázkou, jak by se změnila počáteční investice, pokud by byla vozidla dodána s požadovanou kapacitou

baterií pro pokrytí energetických výdajů na všech třech analyzovaných trasách. Možností, jak využít vozidla s uvedenými kapacitami baterií, je nasadit vozidla na takové trasy, které mají absolvovanou vzdálenost podobnou délce trasy č. 1 s nižším počtem obslužených nádob, jako je tomu u trasy č. 3. Možností, jak překonat nutnost dobíjení baterií vozidla v průběhu svozu odpadu, je instalace inteligentních pantografů na kabinu vozů a využití trolejového vedení na území města Plzně. Zůstává ovšem otázkou, jestli by rozmístění trolejového vedení vzhledem k trajektorii absolvované trasy pokrylo dostatečný úsek, aby došlo k přenesení potřebného množství energie. Zároveň by instalace inteligentních pantografů přinesla další investiční výdaje a cena za elektrickou energii při napojení se na trolejovou síť by patrně byla také odlišnější než výhodný tarif pro noční nabíjení elektromobilů.

Závěr

Nasazení elektricky poháněných vozidel pro svoz odpadu přináší řadu pozitivních zjištění. Při provozování vozidel s elektrickým motorem nedochází k úniku nežádoucích emisí. Jejich provoz je tak naprosto ekologicky. Při nahrazení stávajícího popelářského vozidla vozidlem s elektrickým pohonem by došlo k omezení produkce emisí CO₂ o 91 tun ročně. Tento aspekt je ovšem vykoupěn znečištěním, které vzniká při výrobě elektrické energie především v uhelných elektrárnách. Díky vlastnostem elektrického motoru se výrazně snižuje hluk způsobený prací tohoto pohonu. Tento efekt je zvláště u popelářských vozidel pohybujících se v městské zástavbě vítán. Snižování hluku je zároveň doprovázeno snížením vibrací, což je dalším kladným znakem provozu elektrických vozidel. Snižování hluku dochází ale k navýšení nároků na pozornost řidiče, neboť může dojít snadno k přehlednutí vozidla chodcem, který reaguje často na přítomnost vozidla ve své blízkosti díky sluchovým vjemům.

Jak jsem stanovil výpočtem, náklady za výdaje na elektrickou energii pro zajištění pohybu elektrických popelářských vozidel jsou v porovnání s konvenčním řešením popelářských vozů využívajících diesellový pohon čtvrtinové. Stanovení ve výpočtech úspory za palivo vyšší než 75 % je hodnota, která si blíží tvrzení výrobců elektrických vozidel. Ti jsou ve svých prohlášeních ještě optimističtější a tvrdí, že provozní úspora je až 85 %. Další úsporu získají provozovatelé elektricky poháněných popelářských vozidel na nákladech za údržbu vozidla. Výrazná redukce nákladů spočívá v úspoře výdajů za oleje, opravy a údržbu převodového soustrojí. V případě údržby jsou úspory výrobců stanoveny na hodnotu 66 % oproti dieselem poháněným vozidlům. Všechny tyto žádoucí vlastnosti elektrických popelářských vozidel jsou ovšem vykoupeny výrazně vyšší počáteční investicí. U vozidla značky BYD vychází pořizovací cena vozidla s elektrickým pohonem na 2,5 násobek pořizovací ceny shodného typu s naftovým motorem. Při porovnání investičních nákladů vozidel využívaných v současné době společností Čistá Plzeň pro svoz odpadu s vozidlem firmy BYD jsem dospěl k závěru, že počáteční investice do elektrického vozu by byla 1,85 krát vyšší. Tento fakt je ovšem ovlivněn pouze odhadem ceny nástavby a lisu, který není součástí vozidla BYD, pro které jsem našel pořizovací cenu. Dalším faktorem, který hraje roli v porovnání investičních nákladů, je aktuální kurz měn. Srovnáním pořizovací částky vozidla firmy Motiv jsem došel k závěru, že vozidlo je oproti stávajícímu vozidlu více než 3 krát dražší. Další navýšení počátečních investic je spojeno s nutností vybudovat fungující nabíjecí infrastrukturu. Výdaje za výstavbu dobíjecích míst se můžou oproti

uvedeným údajům lišit. Při výpočtech jsem počítal pouze investici do nabíjecí stanice, nikoliv další výdaje spojené s úpravou míst a případnými vícepracemi.

Z dostupných údajů a výpočtů mohu konstatovat, že projekt elektromobilní dopravy odpadů v městě Plzeň by byl z hlediska ekonomického výhodný, pokud by vozidla zvýšila svou četnost jízd na dvojnásobek a byla schopna pracovat na analyzovaných trasách déle než 7 let. Limitujícím faktorem, který se ukazuje ovšem jako zásadní, je kapacita baterií. Pro analyzované trasy by bylo nutné navýšení kapacit baterií oproti údajům u uváděných vozidel na hodnotu 192 kWh pro 1. trasu, 309 kWh pro 2. trasu a 238 kWh pro 3. trasu. Jako možné překonání tohoto problému přichází v úvahu instalace inteligentních pantografů na kabinu vozidla a propojení s trolejovou sítí města Plzeň. Vozidlo by pak mohlo při průjezdu zasíťovaným úsekem získávat energii z trolejového vedení, což by vedlo k úspoře energie využitě z baterií.

Pro nasazení elektricky poháněných popelářských vozidel na současné trasy by byla vhodná detailní analýza všech absolvovaných tras. Z prozkoumání tras by bylo možné vybrat trasy splňující nároky na energetickou bilanci provozu elektricky poháněného vozidla. Na tyto trasy by pak mohla být nasazena vozidla s uváděnou kapacitou baterií. Další možností, jak překonat omezení způsobená kapacitou baterií, je najít dodavatele, který by byl schopný implementovat do vozidla baterie s vyšší energetickou kapacitou. To by s největší pravděpodobností přinášelo nárůst investičních nákladů.

Využití elektrické energie pro pohon popelářských vozidel se jeví jako adekvátní dostupná alternativa za stávající konvenční provedení s využitím diesellového motoru. S ohledem na náklady spojené s investicí a provozem se projekt jeví jako ekonomicky rentabilní v časovém horizontu životnosti vozidla. Nesporným kladem využití elektricky poháněných popelářských vozidel je omezení negativního dopadu na životní prostředí i zlepšení komfortu obyvatel žijících v místech, kde popelářská vozidla vykonávají svou práci.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] FARSHID, Naseri, EBRAHIM Farjah, TEYMOOR. *An Efficient Regenerative Braking System Based on Battery/Supercapacitor for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles With BLDC Motor* [online]. [cit. 2018-02-24]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7572053/>
- [2] The Engineering ToolBox. *The drag coefficient* [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/drag-coefficient-d_627.html
- [3] Mercedes-Benz. *Kabiny* [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: http://www.mercedes-benz.cz/content/czechia/mpc/mpc_czechia_website/czng/home_mpc/trucks_/home/distribution/neweonic/cab_variations.html
- [4] The Engineering ToolBox. *Rolling Resistance* [online]. [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html
- [5] Mercedes-Benz. *The new Econic* [online]. [cit. 2018-02-22]. Dostupné z: <http://tools.mercedes-benz.co.uk/current/trucks/brochures/products/new-eonic.pdf>
- [6] DAIMLER. *Company History* [online]. [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: <https://www.daimler.com/company/tradition/company-history/1885-1886.html>
- [7] CROMER, George C., Orville C. CROMER, Christopher G. FOSTER a Ken W. PURDY. *Automobile* [online]. [cit. 2018-01-30]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/automobile>
- [8] EPA. *Summary of the Clean Air Act* [online]. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-clean-air-act>
- [9] THOMPSON, Cadie. *The fascinating evolution of the electric car* [online]. [cit. 2018-02-02]. Dostupné z: <http://www.businessinsider.com/electric-car-history-2017-2/#the-electric-car-burst-onto-the-scene-in-the-late-1800s-and-early-1900s-1>
- [10] LAMBERT, Fred. *First all-electric garbage truck in California* [online]. [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <https://electrek.co/2017/06/14/all-electric-garbage-truck-california/>
- [11] MOTIV. *MOTIV-POWERED ALL-ELECTRIC REFUSE TRUCK* [online]. [cit. 2018-02-07]. Dostupné z: https://motivps.com/wp-content/uploads/2016/06/Cumberland_1Sheet_vF.pdf

- [12] Government Fleet. *Los Angeles Completes Battery-Electric Refuse Truck Demo* [online]. [cit. 2018-02-05]. Dostupné z: <http://www.government-fleet.com/news/story/2017/06/los-angeles-completes-battery-electric-refuse-truck-demo.aspx>
- [13] BYD. *BYD AND WAYNE ENGINEERING UNVEIL FIRST ALL-ELECTRIC REFUSE TRUCK* [online]. [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.wayneusa.com/byd-and-wayne-engineering-unveil-first-all-electric-refuse-truck/>
- [14] BYD. *BYD INTRODUCES CLASS 8 BATTERY-ELECTRIC REFUSE TRUCK FOR NORHT AMERICAN MARKET* [online]. [cit. 2018-02-06]. Dostupné z: <http://www.byd.com/news/news-396.html>
- [15] TESLA. *Tesla Semi* [online]. [cit. 2018-03-28]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/semi?redirect=no>
- [16] WHRIGHTSPEED. *THE ROUTE POWERTRAIN* [online]. [cit. 2018-02-10]. Dostupné z: <https://www.wrightspeed.com/the-route-powertrain>
- [17] COREN, Michael J. *The economics of electric garbage trucks are awesome* [online]. [cit. 2018-02-12]. Dostupné z: <https://qz.com/749622/the-economics-of-electric-garbage-trucks-are-awesome/>
- [18] *Mack Trucks to Evaluate Wrightspeed Route Powertrain in Mack LR Model* [online]. [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <https://www.macktrucks.com/community/mack-news/2016/mack-trucks-to-evaluate-wrightspeed-route-powertrain-in-mack-lr-model/>
- [19] SIEMENS. *EHighway - Electrification of road freight transport* [online]. [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/home/products/mobility/road-solutions/electromobility/ehighway.html>
- [20] WILLIAMS, Diarmaid. *Siemens to build 'electric highway' in Germany* [online]. [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <http://www.powerengineeringint.com/articles/2017/08/siemens-to-build-electric-highway-in-germany.html>
- [21] AYRE, James. *Chautauqua County (New York) Deploys All-Electric Orange EV Class 8 Terminal Truck* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2017/12/12/chautauqua-county-new-york-deploys-electric-orange-ev-class-8-terminal-truck/>

- [22] AYRE, James. *Rail Management Services Orders 9 More Orange EV T-Series All-Electric Yard Trucks* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2017/03/07/rail-management-services-orders-9-orange-ev-t-series-electric-yard-trucks/>
- [23] AYRE, James. *Electric Semi Trucks & Heavy-Duty Trucks – Available Models & Planned Models* [online]. [cit. 2018-02-27]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2017/12/16/electric-semi-trucks-heavy-duty-trucks-available-models-planned-models/>
- [24] *EFORCE* [online]. [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <http://eforce.ch/downloads.html>
- [25] *ORANGEEV* [online]. [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <https://orangeev.com/t-series-new/>
- [26] *Reduce Costs* [online]. [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <https://orangeev.com/cost-savings/>
- [27] KANE, Mark. *BYD Debuts Electric Garbage Truck With 76 Miles Range, Saves \$13,000 Per Year In Service* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://insideevs.com/byd-reveals-electric-garbage-truck/>
- [28] BYD. *BYD ELECTRIC TOUGH* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.byd.com/usa/wp-content/uploads/2016/08/T7-final.pdf>
- [29] BYD. *BYD ELECTRIC TOUGH* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.byd.com/usa/wp-content/uploads/2016/08/T5-final.pdf>
- [30] BYD. *BYD ELECTRIC TOUGH* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.byd.com/usa/wp-content/uploads/2016/08/T9-final.pdf>
- [31] BYD. *BYD ELECTRIC TOUGH* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.byd.com/usa/wp-content/uploads/2016/08/Q1M-final.pdf>
- [32] SCANIA. *World's first electric road opens in Sweden* [online]. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://www.scania.com/group/en/worlds-first-electric-road-opens-in-sweden/>
- [33] SIEMENS. *Charging systems for euses* [online]. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/home/products/mobility/road-solutions/electromobility/ebus-charging.html>
- [34] SIEMENS. *eBus Charging Infrastructure* [online]. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/press/pool/de/events/2015/mobility/2015-06-uitp/presentation-ebus-e.pdf>

- [35] WASTETECH. *Hybrid Dualpower Rotopress* [online]. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <https://www.wastech.com.au/products/garbage-trucks-sweepers/hybrid-dualpower-rotapress/>
- [36] NOVÁK, Jan. *Výhřevnost paliv* [online]. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <https://vytapani.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/11-vyhrevnosti-paliv>
- [37] EG energie. *Motorová nafta* [online]. [cit. 2018-03-13]. Dostupné z: <http://www.egenergie.com/ropne-produkty/motorova-nafta/>
- [38] NEW YORK STATE. *NYSEV-VIF "All-Electric" Vehicle Eligibility List* [online]. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://truck-vip.ny.gov/NYSEV-VIF-vehicle-list.php>
- [39] Interní materiály společnosti Čistá Plzeň
- [40] CASEY, Tina. *Bet Your EV Can't Do This: Electric Garbage Truck Hauls 9 Tons Of Trash* [online]. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2014/09/16/first-electric-garbage-truck-in-us-hauls-9-tons-of-chicago-trash/>
- [41] *Vývoj ceny benzínu, nafty, aktuální cena a podrobný graf* [online]. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.kurzy.cz/komodity/benzin-nafta-cena/>
- [42] ČEZ Prodej, a.s. *ELEKTRINA V AKCI* [online]. [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/produkty-a-sluzby/obcane-a-domacnosti/elektrina2017/web_cenik_elektrina_v_akci_na_jeden_rok_mop_2017_8_cezdi-4.pdf
- [43] ABB. *ABB EVI Product Leaflet Overnight Charging-Web* [online]. [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <http://new.abb.com/ev-charging/documents>
- [44] KOŠÍK, Michal a Pavel SKAROLEK. *Trakční vlastnosti elektromobilu – výkony a účinnosti* [online]. [cit. 2018-04-21]. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/B1M14EPT/EPT_%C3%BAloha5_2017_18_elektromobil.pdf
- [45] SMARTEV. *Pulse QC50* [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://www.smartev.cz/produkt/schneider_electric_pulse-qc50/
- [46] *Analýzy výškopisu* [online]. [cit. 2018-02-03]. Dostupné z: <http://ags.cuzk.cz/dmr/>
- [47] DAILER. *The new construction vehicle family from Mercedes-Benz: Arocs – the new force in construction* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/The-new-construction->

vehicle-family-from-Mercedes-Benz-Arocs--the-new-force-in-construction.xhtml?oid=9904350

- [48] DAIMLER. *Mercedes-Benz Antos: the world premiere of the first truck specialised for the short-radius distribution* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/print/2192709-14-Trucks-endoc.xhtml?oid=9256173&ls=L2VuL2luc3RhbmNIL2tvLnhodG1sP3JlbElkPTEwMDEmcmVzdWx0SW5mb1R5cGVJZD0xNzUmb2lkPTk5MDM4NzgmZnJvbU9pZD05OTAzODc4JmJvcnRlcnM9dHJ1ZSZ2aWV3VHlwZT10aHVtYnMmc29ydERlZmluaXRpb249bWFudWFsc29ydC0xJnRodW1iU2NhbGVJbmRleD0wJnJvd0NvdW50c0luZGV4PTU!&rs=1>
- [49] PŘEHLED DOTACÍ. *Nízkouhlikové technologie* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.prehleddotaci.cz/operacni-program/oppik/dotace-elektromobily/>