ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Energetická náročnost jízdy elektrobusu SOR EBN 11 na lince 163

Energy demands of the electric bus SOR EBN 11 operated on line 163

Diplomová práce

Studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Dopravní, letadlová a transportní technika

Vedoucí práce: **Ing. Josef Morkus, CSc.**

Bc. Pavel Průcha

Praha 2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Průcha** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **409126**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**

Studijní program: **Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Energetická náročnost jízdy elektrobusu SOR EBN 11 na lince 163

Název diplomové práce anglicky:

Energy demands of the electric bus SOR EBN 11 drive on line No.163

Pokyny pro vypracování:

Stanovte spotřebu energie pro jízdu elektrobusu SOR EBN 11 na pražské lince číslo 163. Elektrobus je během provozu dobíjen na konečné stanici Želivského. Na zvolené lince zjistěte topografii trasy, průběh rychlosti jízdy a zatížení elektrobusu. Měření proveďte opakovaně v různých provozních podmínkách (obsazenost vozidla, hustota okolního provozu). Stanovte jízdní odpory, průběh toku energie k pohonu vozidla a průběžný stav nabití baterie.
Výsledky výpočtů porovnejte s hodnotami spotřeby energie naměřenými DP Praha.

Seznam doporučené literatury:

1.Lukáš Kendík: bachelor thesis: DETERMINING THE ENERGY PERFORMANCE OF CITY BUS ROUTE
2. Alexader Balashov: DP Energetická náročnost jízdy elektrobusu
3. podklady výrobce elektrobusu
4. změřená spotřeba DP v různých časových obdobích

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2017** Termín odevzdání diplomové práce: **05.01.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Josef Morkus, CSc.	doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání Podpis studenta

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá stanovením spotřeby energie elektrobusu SOR EBN 11 na lince 163, jedoucí ze zastávky Želivského na Sídliště Rohožník a zpět. Na základě určení výškového profilu trasy a několika násobného měření rychlostního profilu byl vytvořen výpočet pro stanovení spotřeb. Model počítá i s veličinami, které mohou být proměnné či nejsou jednoznačně určené a zkoumá jaký vliv mohou mít na finální hodnotu spotřeby.

KLÍČOVÁ SLOVA
Elektrobus SOR EBN 11, linka 163, DP Praha

ABSTRACT

The aim of the thesis is to determine numerical calculation of the energy consumption of electrobus SOR EBN 11 operated on line 163. It goes from Želivského station to Sídliště Rohožník and back. The calculation of energy consumption is based on the route height profile and multiple speed characteristic measurements. The model takes into account unknown or variable values and considers their influence on the final result.

KEYWORDS
Electric bus SOR EBN 11, line 163, DP Praha

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji Ing. Josefu Morkusovi, CSc. za odborné vedení mé diplomové práce, Bc. Barboře Zavolokové za pomoc při měření obsazenosti elektrobusu. V neposlední řadě děkuji přátelům a mé rodině, zejména pak svým rodičům, za podstatnou podporu během celého mého studia.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Energetická náročnost jízdy elektrobusu SOR EBN 11 na lince 163“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Josefa Morkuse, CSc. s použitím literatury uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze 3. 1. 2018 Bc. Pavel Průcha

OBSAH

1 Úvod ... 10
2 Historie elektromobility ... 11
2.1 Návrat k elektromobilům ... 12
2.1.1 Elektromobilita v MHD ... 12
3 Linka 163 ... 14
3.1 Trasa linky ... 14
3.2 Elektrobus SOR EBN 11 ... 15
3.2.1 Baterie ... 17
3.3 Podmínky měření ... 19
4 Topografie trasy ... 20
5 Rychlostní profil ... 22
5.1 Semafory ... 22
5.2 Zastávky na znamení ... 22
5.3 Měření rychlostního profilu ... 23
6 Celkové fáze ... 25
7 Obsazenost elektrobusu ... 26
8 Jízdní odpory ... 27
8.1 Valivý odpor ... 27
8.2 Odpor vzduchu ... 28
8.3 Odpor ze zrychlení ... 28
8.4 Odpor ze stoupání ... 30
9 Spotřeba energie na kolech ... 31
9.1 Energie na překonání odporu valení ... 31
9.2 Energie na překonání odporu vzduchu ... 32
9.3 Energie na překonání akcelerace ... 33
9.4 Energie na překonání stoupání ... 34
9.5 Celková bilance energie ... 34
10 Účinnosti ... 35

10.1 Výpočet účinnosti dle prof. Čeřovského ... 36
10.2 Výpočet účinnosti dle prof. Nováka ... 38
10.3 Porovnání metod ... 41
10.4 Účinnost baterie ... 41
10.4.1 Vybíjení baterie ... 42
10.4.2 Nabíjení baterie ... 43
11 Výpočet finální spotřeby energie ... 45
12 Bilance energie na baterii ... 47
13 Porovnání s hodnotami DPP ... 49
13.1 Citlivostní analýza ... 50
14 Závěr ... 51
15 Citovaná literatura ... 52
16 Seznam příloh ... 54
17 Přílohy ... 55

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: První elektromobil, který překonal hranici 100 km/h [1] 11
Obrázek 2: Škoda Perun [21] 12
Obrázek 3:TriHyBus [19] 13
Obrázek 4:Mapa trasy linky 163. [4] 14
Obrázek 5: Rozměry elektrobusu SOR EBN 11 [7] 16
Obrázek 6: DOBUDKA [20] 17
Obrázek 7: SOR EBN 11 [20] 17
Obrázek 8: Uložení baterií [10] 18
Obrázek 9: Rozměry bateriového článku [11] 18
Obrázek 10: Mapa pro odečítání výškového profilu s vyznačenou částí trasy linky 163 20
Obrázek 11: Výškový profil trasy ze Želivského do zastávky Sídliště Rohožník 21
Obrázek 12: Zobrazení a vyhodnocení výsledků jednoho z měření 23
Obrázek 13: Porovnání naměřených rychlostních profilů s modelovým rychlostní profilem 24
Obrázek 14: Průnik rychlostního profilu s profilem výškovým 25
Obrázek 15: Obsazenost elektrobusu ve směru Želivského-Sídliště Rohožník 26
Obrázek 16: Obsazenost elektrobusu ve směru Sídliště Rohožník-Želivského 26
Obrázek 17: Schematizace rychlostního úseku [9] 31
Obrázek 18: Blokové schéma elektrobusu [13] 35
Obrázek 19: Uložení baterií a motoru v elektrobusu [15] 38
Obrázek 20: Závislost napětí na točivém momentu a otáčkách motoru (motorický režim) 39
Obrázek 21: Porovnání výpočtu účinností 41
Obrázek 22: Závislost napětí na stavu vybití při různých vybíjecích proudech [11] 42
Obrázek 23: Závislost napětí baterie na stavu nabití [11] 44
Obrázek 24: Bilance stavu energie na baterii 47
Obrázek 25: Spotřeba elektrobusu naměřená DPP [18] 49

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Zastávky linky 163 Želivského-Sídliště Rohožník 15

Tabulka 2: Technické údaje 16

Tabulka 3: Technické údaje bateriového článku 19

Tabulka 4: Štítkové hodnoty elektromotoru 39

Tabulka 5: Průměr a medián hodnot účinností pro jednotlivé metody 41

Tabulka 6: Vliv na spotřebu v případě změny parametru 50

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

a ..... zrychlení [$m.s^{-2}$]

s ..... dráha [m]

t ..... čas [s]

m_p ..... pohotovostní hmotnost [kg]

$m_{člověk}$ ..... hmotnost člověka [kg]

m ..... celková hmotnost [kg]

g ..... tíhové zrychlení [$m.s^{-2}$]

f ..... součinitel valivého odporu [-]

ρ_{vzd} ..... hustota vzduchu [$kg.m^{-3}$]

S_x ..... čelní plocha vozidla [m^2]

c_x ..... součinitel odporu vzduchu [-]

r_d ..... dynamický poloměr kola [m]

i_c ..... celkový mechanický převod [-]

I_m ..... moment setrvačnosti motoru [$kg.m^2$]

I_{kardan} ..... moment setrvačnosti kardanu s pastorkem [$kg.m^2$]

$I_{přední}$ ..... moment setrvačnosti přední nápravy [$kg.m^2$]

$I_{zadní}$ ..... moment setrvačnosti zadní nápravy [$kg.m^2$]

v_i ..... rychlost [$m.s^{-1}$]

v_p ..... rychlost na počátku fáze [$m.s^{-1}$]

v_k ..... rychlost na konci fáze [$m.s^{-1}$]

O_f ..... odpor valení [N]

O_{vzd} ..... odpor vzduchu [N]

O_z ..... odpor ze zrychlení [N]

O_α ..... odpor ze stoupání [N]

δ ..... součinitel rotačních hmot [-]

E_{fi} ..... energie na překonání odporu valení [J]

E_{vzdi} ..... energie na překonání odporu vzduchu [J]

E_{zi} ..... energie na překonání odporu ze zrychlení [J]

$E_{\alpha i}$ ..... energie na překonání stoupání [J]

E_{wheeli} ..... celková energie na kolech [J]

P_i ..... výkon [W]

ω_i ..... úhlová rychlost kol [s^{-1}]

M_i ..... točivý moment na kolech [Nm]

M_{rel} ..... relativní točivý moment [-]

P_{rel} ..... relativní výkon [-]

ω_{rel} ..... relativní rychlost [-]

η_{mech} ..... účinnost mechanického převodu [-]

η_{mot} ..... účinnost motoru [-]

η_{inv} ..... účinnost AC/DC měniče [-]

η_{gen} ..... účinnost generátoru [-]

U ..... napětí [V]

P_{pn} ..... jmenovitý příkon [W]

U_{nom} ..... nominální napětí motoru [V]

I_{nom} ..... nominální proud motoru [A]

ΔP_n ..... hodnota jmenovitých ztrát [W]

P_{nom} ..... nominální výkon motoru [W]

ΔP_{0n} ..... ztrátový výkon naprázdno [W]

ΔP_{jn} ..... ztrátový výkon nakrátko [W]

ω_{nm} ..... nominální úhlová rychlost motoru [s^{-1}]

ω_m ..... úhlová rychlost motoru [s^{-1}]

M_{nom} ..... nominální točivý moment motoru [Nm]

I_{bat} ..... nominální proud baterie [A]

U_{bat} ..... nominální napětí baterie [V]

R_{int} ..... vnitřní odpor baterie [Ω]

η_{bat_char} ..... účinnost nabíjení baterie [-]

η_{bat_disch} ..... účinnost vybíjení baterie [-]

η_{rek} ..... účinnost rekuperace [-]

ΔP ..... celkové ztráty motoru [W]

E_i ..... energie spotřebovaná z/nabitá do baterie [J]

E_{kWh_km} ..... spotřeba energie na 1 km trasy [kWh/km]

E_{celk} ..... celková energie spotřebovaná během jedné jízdy Želivského – Sídliště Rohožník a zpět [kWh]

1 ÚVOD

V dnešní moderní a uspěchané době, která je zároveň dobou rychlého technologického pokroku a ekonomické vyspělosti, není již pro člověka jako jednotlivce finančně náročné pořídit si vlastní automobil. Přihlédneme-li k rychlému tempu doby, především pak ve velkých městech, zjistíme, že mnoho lidí volí dopravu do práce raději vlastním automobilem, jehož obsazenost je většinou pouze řidič než hromadnými městskými prostředky. Tento trend ve finále znamená, že se během dne Praha potýká s dopravními komplikacemi na mnoha místech.

Ruku v ruce s velkým množstvím aut se zvyšuje produkce emisí, které automobily produkují. Hlavně v zimních měsících je situace alarmující. S tím je spojena i čím dál větší spotřeba ropy, jakožto neobnovitelného paliva a omezené zdroje stále ubývají.

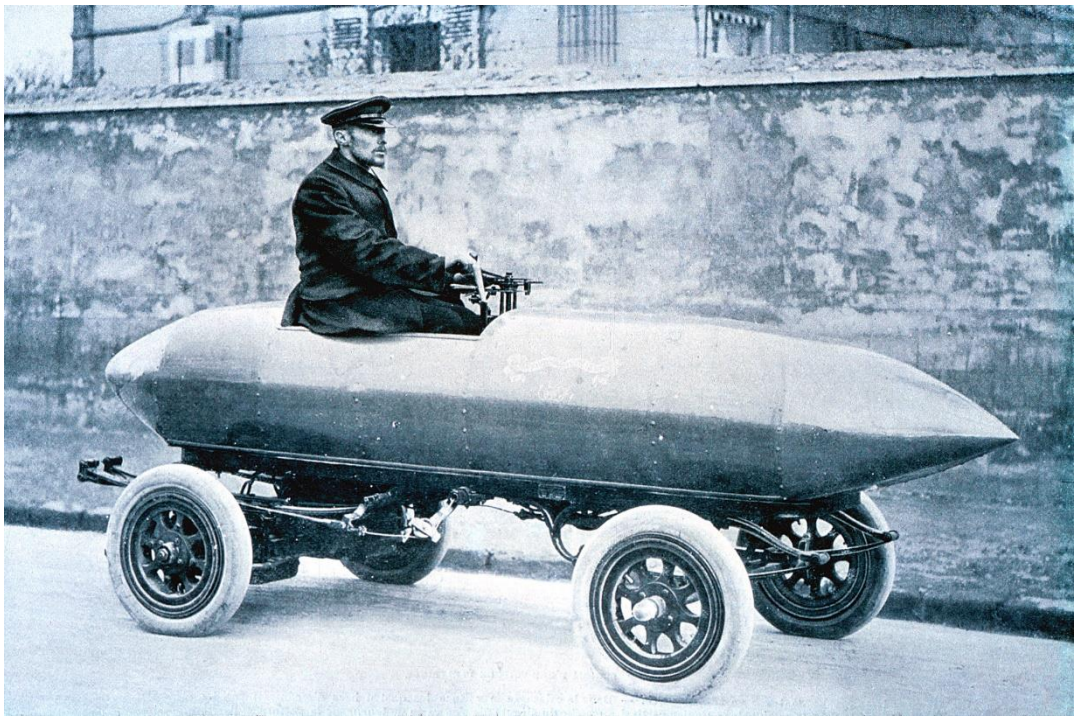
Všechny výše zmíněné faktory dávají možnost vzniku takových projektů, jakým se zabývám ve své diplomové práci i já. Takové projekty můžeme souhrnně označit jako použití alternativních zdrojů energie pro pohon dopravních prostředků. V mém případě se jedná o použití elektrické energie.

Elektrická energie je energie, kterou člověk dokáže bezesporu opakované vyrobit. Existují možnosti výroby elektrické energie, jež jsou zcela bezemisní, například větrná, vodní či sluneční. Tyto varianty jsou z velké části závislé na geologickém a zeměpisném rozložení státu, z čehož plyne, že nejsou použitelné pro všechny státy ve stejné míře. A pak je tu druhá možnost - elektrárny požívající pro svou výrobu nerostné suroviny, které produkcí elektrické energie generují určité množství odpadu a emisí. Především u tepelných elektráren je produkce emisí nezanedbatelná. Jeden benefit však i přesto výroba elektřiny tímto způsobem má a to, že znečištění se vytváří mimo velké město, kde je její použití čisté a tím ulevující.

Tato diplomová práce se zabývá jedním konkrétním použitím elektrické energie. Jedná se o použití pro pohon prostředku městské hromadné dopravy. Projekt elektrobusu v sobě nese ulehčení hned v několika výše zmíněných problémech, se kterými se velká města v současné době potýkají.

2 HISTORIE ELEKTROMOBILITY

Historie elektromobility sahá do ještě vzdálenější historie než vznik automobilu se spalovacím motorem. Přibližně okolo roku 1880 se odehrávalo ve Velké Británii a Francii mnoho experimentů s elektromobily. Jedno z prvních elektrických vozidel byla tramvaj o hmotnosti 8600 kg pro 31 pasažérů. Pohybovala se rychlostí 12 km/h a na jedno nabití byla schopna urazit až 40 km. Již kolem roku 1900 byl sestrojen elektromobil, kterému se podařilo překonat hranici 100 km/h. [1]



Obrázek 1: První elektromobil, který překonal hranici 100 km/h [1]

Ve Spojených státech narůstal počet elektromobilů ještě ve větší míře než v Evropě. Do roku 1915 zde bylo vyrobeno přes 35000 elektromobilů. Tím pádem na začátku 20. století jezdilo v USA více elektromobilů než aut se spalovacím motorem. [1]

Zlom elektromobilismu přineslo několik faktorů. Důležitým z nich byl fakt, že Henry Ford zahájil hromadnou výrobu aut se spalovacím motorem a tím se tato auta stala výrazně dostupnější než elektromobily. V Americe byly také vybudovány dlouhé silnice a od vozidel se začaly vyžadovat delší dojezdové vzdálenosti. Zároveň byla v Texasu objevena ropa, a to výrazně snížilo cenu benzínu. [1]

Na našem území se pak stavbou elektromobilů zabýval Ing. František Křižík. [1]

2.1 NÁVRAT K ELEKTROMOBILŮM

Návrat k elektromobilitě a alternativním palivům všeobecně je zřejmý. Z neustále se zvyšujících objemů těžby ropy, neobnovitelného zdroje, je jasné, že dříve či později dojde. Společně se zvyšující se obtížností těžby narůstá i cena ropy.

2.1.1 Elektromobilita v MHD

Již mnoho firem se zabývá nastolenou problematikou a přichází s řešeními, které určitě stojí za zmínku. Jako první příklad můžu uvést zavedení nízkopodlažního elektrobusu Rampini do provozu ve Vídni v roce 2013. Vozidlo je průběžně napájeno pomocí dvoupólového sběrače z vedení trolejbusového typu. [2] Tento elektrobus byl testován v roce 2014 i Praze, kam byl z Vídně zapůjčen, ale kvůli mrazům testovací jízdy nedokončil. [3]

Dopravní podnik Ostrava má za sebou také zkušenosti s testováním mnoha elektrobusů. Do běžného provozu zde byl nasazen SOR EBN 10,5. Tento vůz se osvědčil a při dalším testování byl brán jako referenční vůči jiným testovaným elektrobusům. Takovými byly elektrobus AMZ CS, který se ukázal jako vhodný pro požadavky nočního provozu a elektrobus BYD, ten se však ukázal pro ostravské podmínky jako nedostatečný. [2]

Dalším příkladem jsou elektrobusy Škoda PERUN, které se dále mohou lišit podle specifikace na verzi s vysokou kapacitou baterie a dojezdem až 150 km nebo na verzi pro průběžné dobíjení ve vzdálenosti do 30 km. Podle toho se také liší elektro výzbroj. Pro dlouhý dojezd jsou použity lithium-polymerové baterie s kapacitou 222kWh, zatímco pro průběžné dobíjení zde jsou lithium-iontové baterie o kapacitě 76 kWh. Jistě stojí za zmínku, že elektrobus je zapojen do evropského unijního projektu ZeEUS (Zero Emision Urban Bus System) – městský autobusový systém s nulovými emisemi a jeho testování probíhá v Plzni. [2]

Obrázek 2: Škoda Perun [21]

Za zmínku stojí i testování elektrobusů s vodíkovými palivovými články. Globální test tohoto typu probíhal v rámci projektu CHIC. Autobusy s palivovými články o různých velikostech a výkonech jezdily během roku 2010–2016 v různých geografických, klimatických i provozních podmínkách právě za účelem zjištění vlivu na provoz elektrobusu. Mezi testovaným městy byly například Bolzano, Oslo, Milán, Londýn nebo kanadský Whistler. Během tohoto testování se vozidla sice potýkala s odstávkami provozu, nikdy však z důvodu palivových článků, ale běžných mechanických závad. [2]

Obrázek 3:TriHyBus [19]

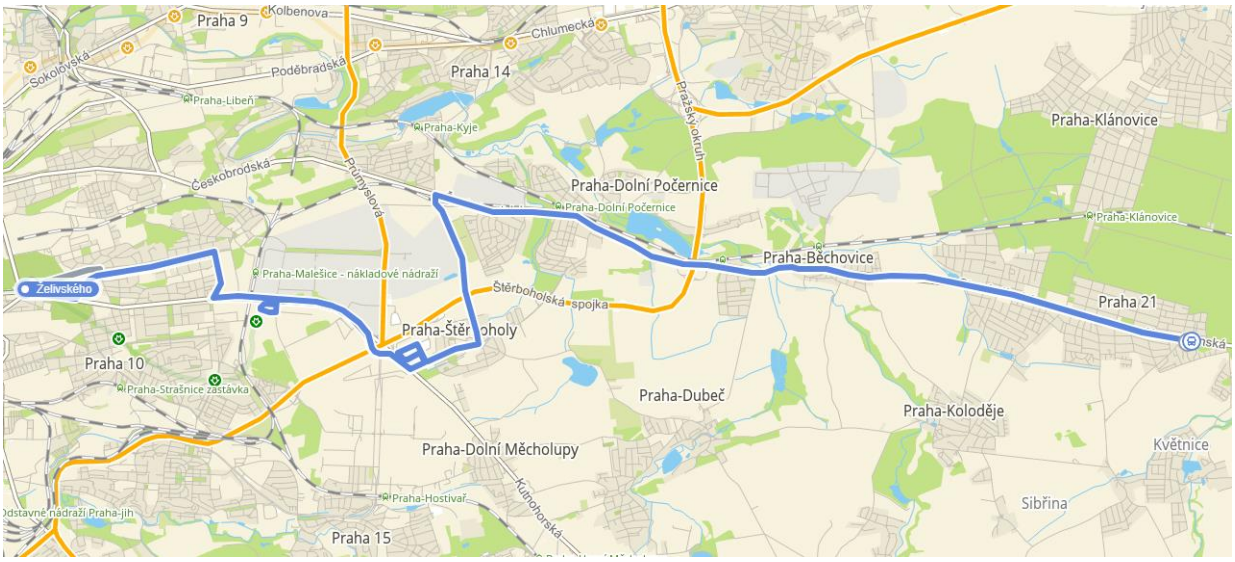
Projekt zahrnující městskou hromadnou dopravu s pohonem palivových článků byl realizován i na území České republiky. Jedná se o projekt TriHyBus koordinovaný ÚJV Řež. Prototyp je založený na karoserii Irisbus Citelis, s palivovými články o výkonu 50 kW, lithium-iontovými akumulátory o kapacitě 26 kWh a superkapacitorem o využitelné energii 1 kWh. Prototyp byl testován na trase Mělník – Kralupy, tento zkušební charakter však plně nereflektoval charakter provozu, a sloužil spíše k demonstračním jízdám, v současné době je mimo provoz. [2]

3 LINKA 163

Objektem zkoumání celé diplomové práce je linka pražské hromadné dopravy číslo 163, na které je nasazen v testovacím režimu od prosince 2015 elektrobus SOR EBN 11 na víkendové lince. Z důvodu technických problémů bylo testování pozastaveno během května a června 2016 a poté opět pokračovalo minimálně do doby měření dat pro tuto diplomovou práci na jaře 2017.

3.1 TRASA LINKY

Trasa linky začíná na autobusové zastávce Želivského, kde se také nachází dobíjecí stanice pro elektrobus a odtud vyjíždí směrem do stanice Sídliště Rohožník, Újezd nad Lesy.



Obrázek 4:Mapa trasy linky 163. [4]

Ve směru do konečné stanice Sídliště Rohožník se na trase nachází 31 zastávek, z toho 18 na znamení viz Tabulka 1. V opačném směru je zastávek 32 a stejný počet zastávek na znamení. Zastávky na znamení jsou důležité zmínit proto, že mohou být proměnnou neznámou, při vytváření modelového rychlostního profilu, více viz kapitola rychlostní profil.

Ve směru ze Sídliště Rohožník do zastávky Želivského se trasa liší v zastávkách Svatoňovická (na znamení) mezi zastávkami Dolní Počernice a Rtyňská a druhou zastávkou Želivského. Je zde též absence zastávky Pod Třebešínem, a to z toho důvodu, že elektrobus jede mírně odlišnou trasu mezi Želivského a Na Palouku.

Délka trasy tam a zpět měřená GPS přístrojem odpovídá 37,5km.

1	Želivského	
2	Pod Třebešínem	x
3	Na Palouku	x
4	Hostýnská	
5	Plaňanská	
6	Sídliště Malešice	
7	Limuzská	
8	Černokostelecká	x
9	Depo Hostivař	x
10	Depo Hostivař	
11	Malešická továrna	x
12	Na Homoli	x
13	Průmyslová	x
14	Ústřední	x
15	Obch. Centrum	
16	Štěrboholy	x
17	Škola Štěrboholy	
18	Drobná	x
19	Novoštěrboholská	x
20	Rtyňská	x
21	Dolní Počernice	
22	Nádraží Běchovice	
23	Běchovice	
24	Na Vaňhově	x
25	Blatov	x
26	Rápošovská	x
27	Újezd nad Lesy	
28	Sudějovická	x
29	Zbyslavská	x
30	Rohožnická	x
31	Sídliště Rohožník	

Tabulka 1: Zastávky linky 163 Želivského-Sídliště Rohožník, x=zastávka na znamení [5]

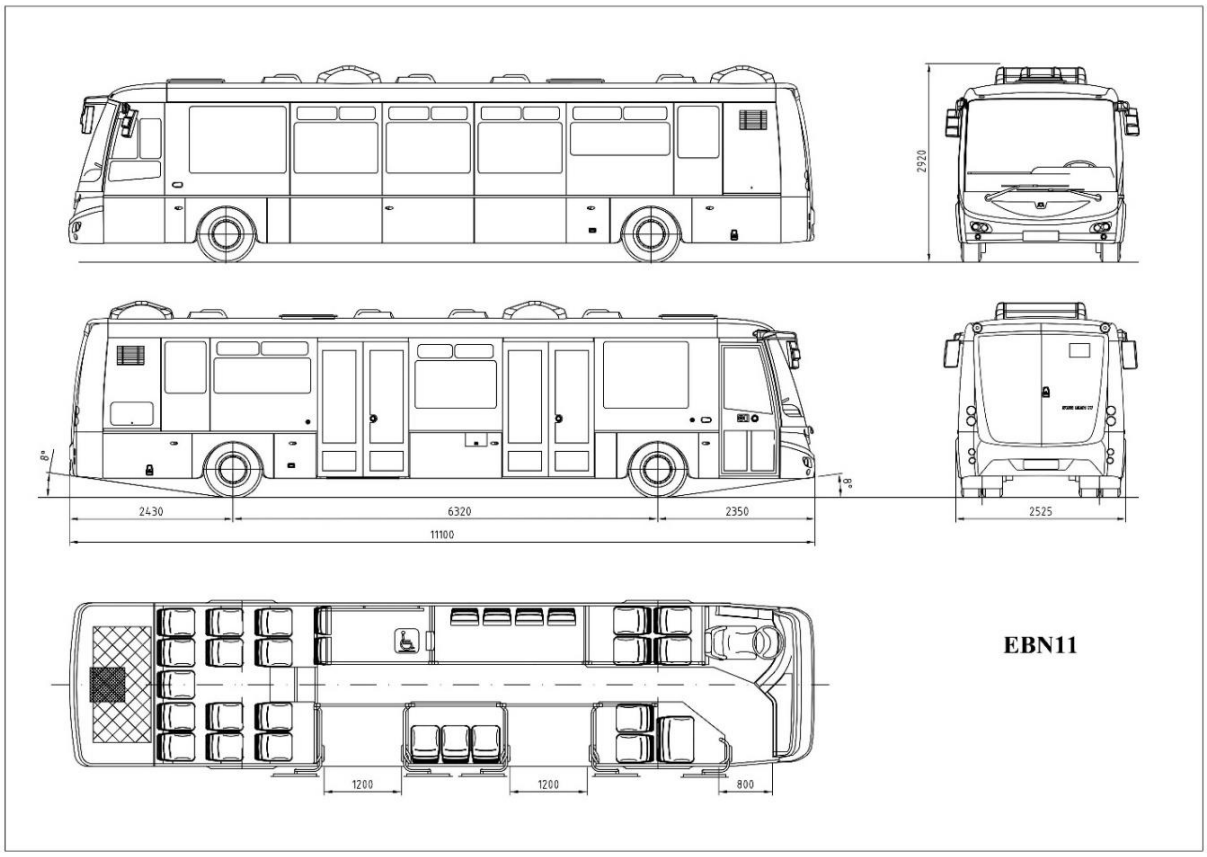
3.2 ELEKTROBUS SOR EBN 11

Nedílnou součástí měření energetické náročnosti je i samotný elektrobus. Konkrétně se jedná o nízkopodlažní elektrobus značku SOR s typovým označením EBN 11. Základní technické údaje jsou vidět v tabulce 2

Motor	asynchronní šestipólový, vodou chlazený
Kroutící moment	976 Nm
Výkon	120 kW
Výrobce akumulátorů	Winston Battery/ Lithium-ion
Kapacita akumulátorů	172kWh
Počet článků v akumulátoru	180
Kola přední	Continental 285/70 R19,5 HSR1
Kola zadní	Continental 285/70 R19,5 HDR
Součinitel odporu vzduchu	c_x=0,55
Čelní plocha vozidla	S_x=6 m2
Moment setrvačnosti motoru	I_m=9,2 kg*m2
Moment setrvačnosti kardanu s pastorkem	I_{kardan}=0,098 kg*m2
Moment setrvačnosti přední nápravy	$I_{přední}$=19,619 kg*m2
Moment setrvačnosti zadní nápravy	$I_{zadní}$=40,094 kg*m2
Celkový převod	i_c=6,5
Dynamický poloměr kol	434,5 mm

Tabulka 2: Technické údaje [6]

Celková obsaditelnost vozidla je 92 lidí a řidič.



Obrázek 5: Rozměry elektrobusu SOR EBN 11 [7]

Pro průběžné rychlonabíjení elektrobusu slouží obratiště Želivského, kde se baterie nabíjí pomocí pantografového sběrače a dvoupólové troleje z tramvajové sítě 600 V DC přes galvanické stacionární zařízení „dobudka“ při maximálním proudu 240 A. Rychlost nabíjení je přibližně 1 – 1,2 %/min, což odpovídá 1,7 – 2,1 kWh/min. [8]

Pomalé noční nabíjení v garážích Hostivař probíhá ze 400 V AC / 32 A. Doba nabíjení a balancování baterie vychází okolo 0,2 % / min, tedy 0,3 kWh / min. [8]

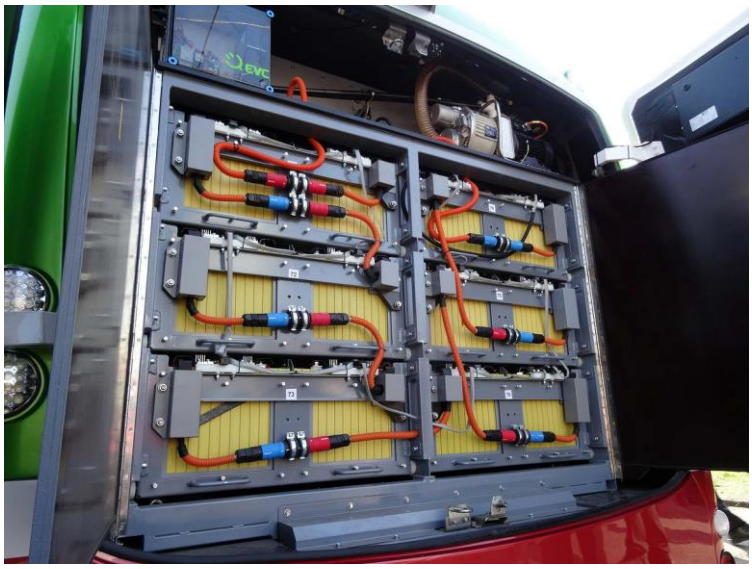
Základní dojezd vozidla je cca 150 km na jeden nabíjecí cyklus, průběžným dobíjením lze prodloužit denní dojezd o 110 km, tedy na celkových 260 km. Reálný dojezd vozidla je samozřejmě silně závislý na profilu trati, počtu cestujících a klimatických podmínkách. Elektrobus je v testovacím provozu denně od 4:30 do 23:00 hodin, v pracovní dny je nasazován na lince 213 a o víkendu na lince 163 [9]

Obrázek 7: SOR EBN 11 [20]

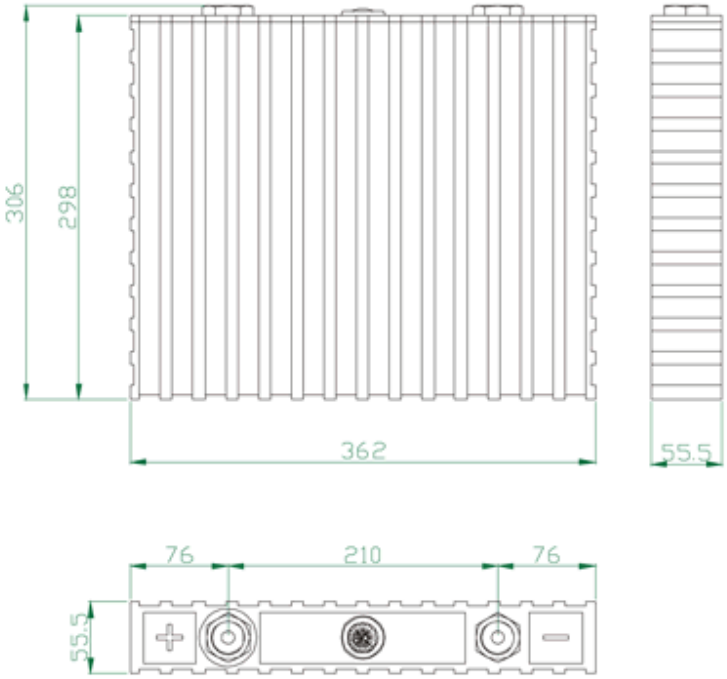
Obrázek 6: DOBUDKA [20]

3.2.1 Baterie

Trakční baterie, ve které je uložena energie pro pohon elektrobusu se skládá ze 180 lithium-iontových článků značky Winston Battery uložených za zadní nápravou. Celková kapacita akumulátoru odpovídá 172kWh/300Ah. Obrázek 8 zobrazuje uložení a přístup k trakční baterii. Tabulka 3 pak ukazuje základní informace a článcích, ze kterých je baterie složena.



Obrázek 8: Uložení baterií [10]



Obrázek 9: Rozměry bateriového článku [11]

Nominální kapacita		300Ah
Operační napětí	Nabíjecí	4,0V
	Vybíjecí	2,8V
Vnitřní odpor		<0,3mΩ
Max. vybíjecí proud	Konstantní proud	<900A
	Impulsní proud	<3000A
Max. nabíjecí proud		900A
Standardní nabíjecí proud		150A
Životnost	80% DOD	5000x
	70% DOD	7000x
Samovybíjení		<1% měsíčně
Hmotnost		9,7kg

Tabulka 3: Technické údaje bateriového článku. DOD = Depth of discharge – hloubka vybití [11]

3.3 PODMÍNKY MĚŘENÍ

Pro zajištění určité vypovídající hodnoty testování, bylo měření provedeno opakovaně vždy v obou směrech v tentýž den. První platné měření bylo provedeno 15.1. 2017 od 15:56. Druhé a třetí měření následovalo 11.3. 2017 od 13:56 a 12.3. od 15:56. Jelikož se jedná o víkendovou linku, nehrozí zde výkyvy v obsazenosti z důvodu lidí cestujících do práce či zpět. Ani nápor lidí z důvodu sezonních událostí, jako například doprava na koupaliště či nákup v obchodním centru Štěrboholy. I dle jízdního řádu linky 163 pro sobotu a neděli nepodléhá linka většímu náporu cestujících, protože intervaly odjezdu autobusu jsou po celý den po 15 min.

Jako neplatné muselo být vyhodnoceno měření z 17. 4. 2016 z důvodu výluky metra linky A tím i pozměnění trasy autobusové linky 163, která běžně zajíždí na točnu Depo Hostivař. V tento den však nikoliv. Z důvodu výluky, také mohlo cestovat více lidí právě linkou 163 a tím vnášet nepřesnost do měření zatížení elektrobusu.

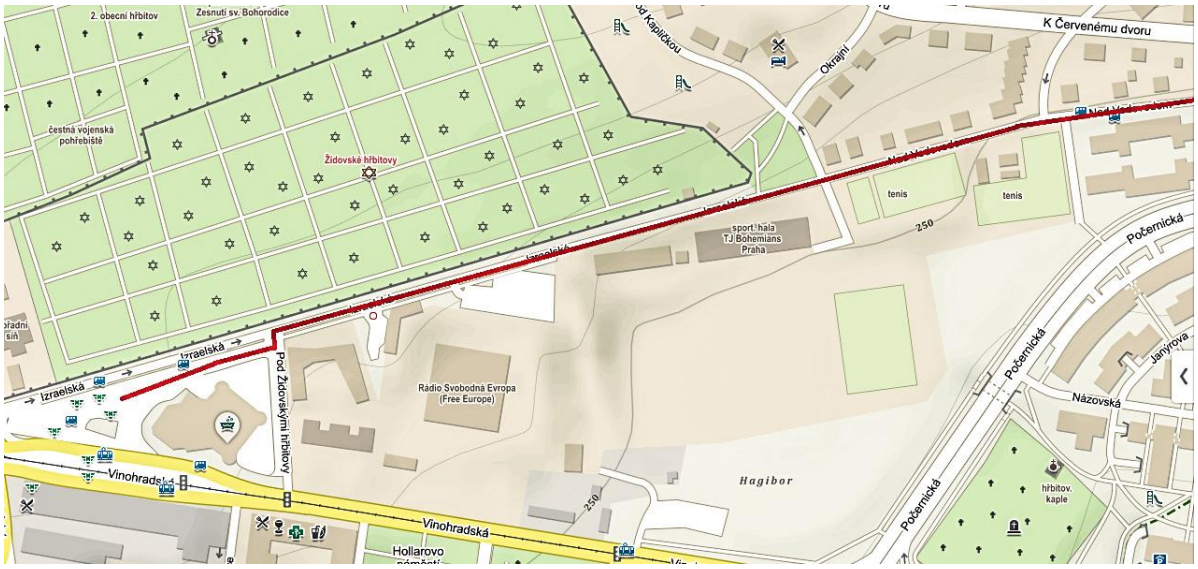
4 TOPOGRAFIE TRASY

První věcí, která je nutná pro vytvoření výpočtu energetické náročnosti, je získat výškový profil trasy, který elektrobus překonává. Jistě existuje mnoho způsobů, jak tento profil získat, já jsem zvolil metodu odečítáním z mapy s vyznačenými vrstevnicemi podél trasy, kterou elektrobus projíždí.

Mapový podklad byl použit z volně dostupných internetových stránek www.mapy.cz s ekvidistancí mezi jednotlivými vrstevnicemi je 5 m.

Jako příklad může posloužit počátek trasy začínající na Želivského a jedoucí směrem na Sídliště Rohožník. Na mapě, obrázek 10, je patrná vrstevnice s označením výšky 250 m n. m. a také další 3 nejbližší vrstevnice naznačující stoupání od této počáteční vrstevnice. Jednoduše z toho plyne, že počáteční stanice je v nadmořské výšce 265 m n. m. Jak se poté elektrobus pohybuje směrem k zastávce Pod Třebešínem, zároveň klesá.

Aby bylo možné vynést kompletní výškový profil v závislosti na dráze, obrázek 11, byla použita i data z GPS přístroje měřícího ujetou vzdálenost, ke které byla následně přiřazena patřičná nadmořská výška. Pro vyhodnocení grafu byl použit program MS Excel.



Obrázek 10: Mapa pro odečítání výškového profilu s vyznačenou částí trasy linky 163

Obrázek 11: Výškový profil trasy ze Želivského do zastávky Sídliště Rohožník

Byť se některé úseky zobrazené v obrázku 11 mohou zdát strmé, je nutné si uvědomit, že nejníže položené místo, kde se vozidlo pohybuje je 230 m n. m. a nejvýše položené 275 m n. m., to znamená, že překonávaný výškový rozdíl je pouhých 45 výškových metrů, a to navíc na vzdálenosti několika kilometrů. Největší stoupání, které musí elektrobus překonat je 5 % a to mezi 4 a 6 km jízdy.

5 RYCHLOSTNÍ PROFIL

Co promlouvá z velké části do energetické náročnosti je sama trať elektrobusu a styl jakým ji řidič projede. Faktory, které je nutné zohlednit, a které se do výsledku promítnou jsou i zastávky na znamení, či fakt, zda elektrobus na určitém semaforu musel stát na červenou nebo křižovatku projel bez toho, aniž by musel přibržďovat. Akcelerace ze stání je právě to, co vyžaduje nejvíce energie. Každý řidič má i jiný řidičský styl a tím opět nastává odlišnost mezi jednotlivými jízdami.

Do modelového rychlostního profilu se nepromítnou tzv. náhodně se vyskytující se jevy. Jako příklad můžu uvést vběhnutí dítěte do silnice, při kterém musí řidič prudce brzdit, či nepozorný řidič blokující jízdní pruh autobusu a podobně. Jednoduše všechny jevy silničního provozu, které jsou nahodile se vyskytující a nelze jim přiřadit žádnou pravidelnost.

5.1 SEMAFORY

Jak již bylo zmíněno výše, do rychlostního profilu se promítá i způsob jakým elektrobus projede křižovatku. Já jsem zvolil metodu měření doby, po kterou svítí ve zkoumaném směru červená vůči zelené. Jelikož se jedná o inteligentně řízené semafory, kde interval červené a zelené nesvítí pokaždé stejnou dobu, ale mění se v závislosti na provozu, bylo nutné změřit cyklus několikrát a výsledek zprůměrovat. Jestliže ve směru jízdy svítila delší dobu zelená, než červená, elektrobus křižovatku projede bez zastavení, v opačném případě se počítá s tím, že autobus vždy na červené zastaví.

Dle této metody vyšlo, že elektrobus buse stavět na semaforu celkem 4x v ulici Počernická, dále na křižovatce ulic Limuzská a Černokostelecká, při výjezdu ze zastávky Depo Hostivař, 2x na ulici Černokostelecká, během zajíždění a vyjíždění k obchodnímu centru Štěrboholy a poté jednou v Dolních Počernicích, Běchovicích a Újezdu nad Lesy. Celkem se jedná o zastavení na 12 semaforech ve směru do zastávky Sídliště Rohožník. V opačném směru je to o dva méně, a to při odbočování do Limuzské ulice z Černokostelecké a poslední semafor v ulici Počernická před odbočováním směrem zastávce Želivského.

5.2 ZASTÁVKY NA ZNAMENÍ

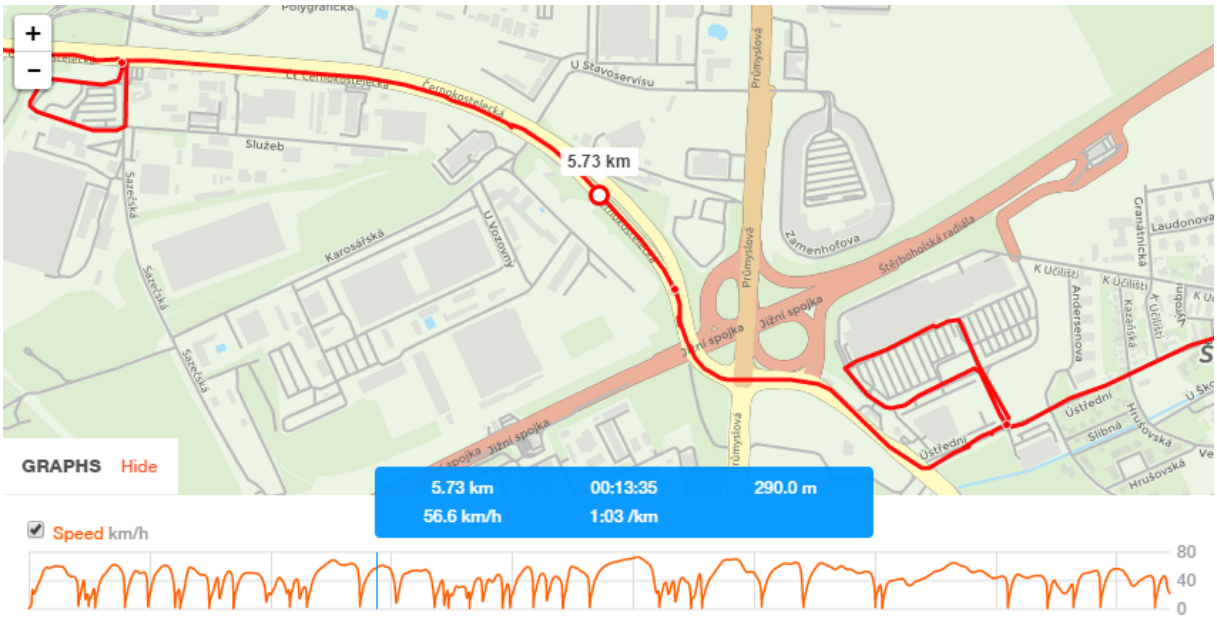
Podobný přístup jako u semaforů byl zvolen i u zastávek na znamení. Jelikož se jedná do jisté míry o náhodný jev, je nutné zvolit přístup vypovídající o výsledku na základě opakovatelnosti. Jinak řečeno, je nutné projet trasu vícekrát a pokud elektrobus na určité zastávce vícekrát nezastavil, než zastavil,

zastávku do rychlostního profilu nepočítám, je-li tomu naopak, zastávku budu počítat, jako když tam zastaví vždy.

Tímto přístupem se eliminovaly dvě zastávky (Malešická továrna a Zbyslavská) ve směru Želivského – Sídliště Rohožník a celkem sedm zastávek v opačném směru (Rápošovská, Na Vaňhově, Svatoňovická, Rtyňská, Novoštěrboholská, Na Homoli, Depo Hostivař). Nerovnoměrnost eliminace zastávek na znamení může být způsobena například denní dobou, ve které probíhalo měření. Převažovala doprava lidí z centra města na jeho okraj spíše než v opačném směru.

5.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTNÍHO PROFILU

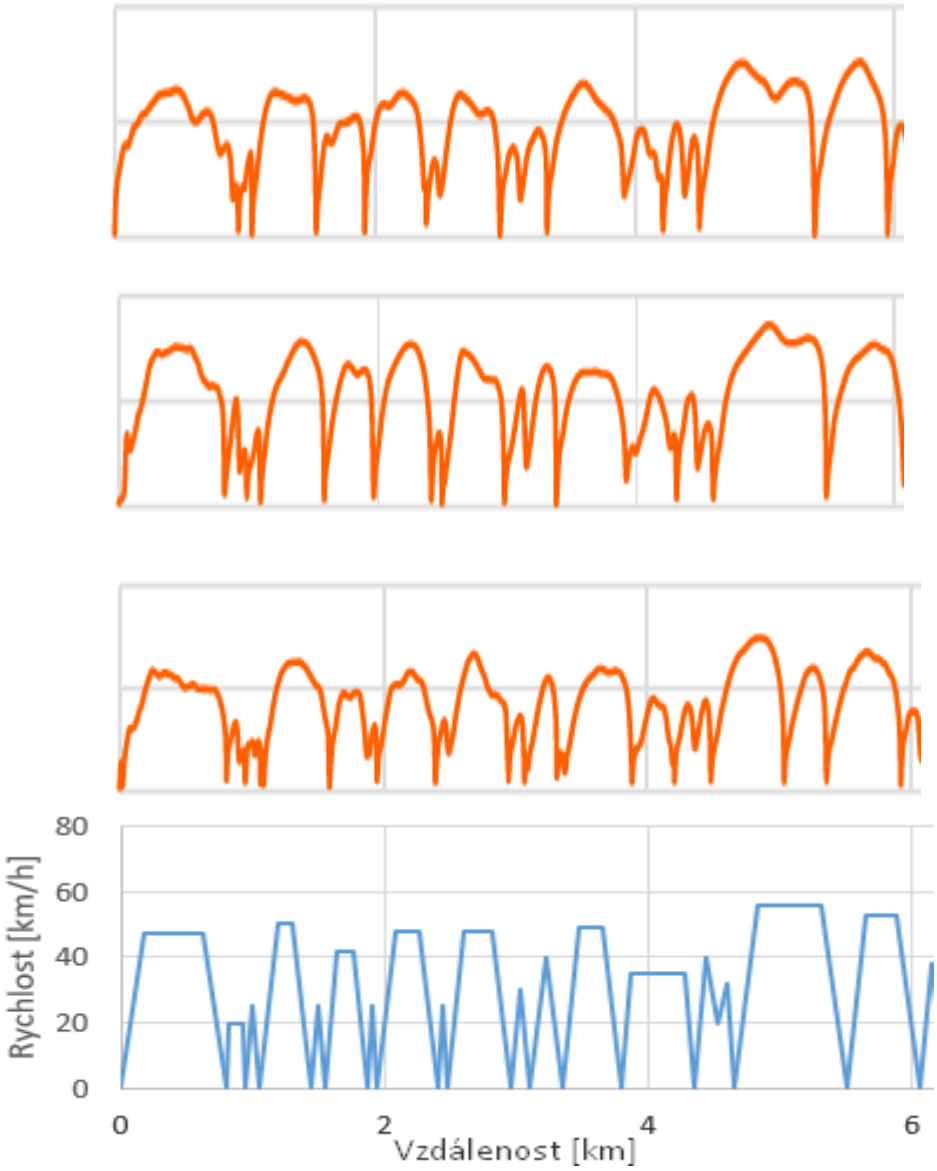
K reálnému měření a vyhodnocení jízdního cyklu byl použit GPS přijímač mobilního telefonu Honor a program Sports Tracker.



Obrázek 12: Zobrazení a vyhodnocení výsledků jednoho z měření

Jak je vidět z obrázku 12 zobrazujícího výsledky měření, program automaticky k průběhu trasy přiřazuje mapový podklad, je tedy jednoduché se orientovat. Současně s mapou vytvoří i rychlostní profil celé měřené jízdy, kde modrá úsečka indikuje místo korespondující s aktuálním místem v mapě. V aktuálním měřeném bodě jsou vždy zobrazeny také hodnoty o ujeté vzdálenosti, času, nadmořské výšce, aktuální rychlosti a také aktuální tempo.

Z takto naměřených hodnot se pak vytváří modelový výpočetní rychlostní profil. Pro tvorbu modelového profilu byla trasa projeta 3x tam a zpět pro sběr dostatečně vypovídajícího množství dat. Modelový profil byl pak vytvořen na základě zprůměrování dosažené rychlosti v každém úseku. Nutné samozřejmě bylo zahrnout také již výše zmíněné semafory a zastávky na znamení.



Obrázek 13: Porovnání naměřených rychlostních profilů s modelovým rychlostní profilem

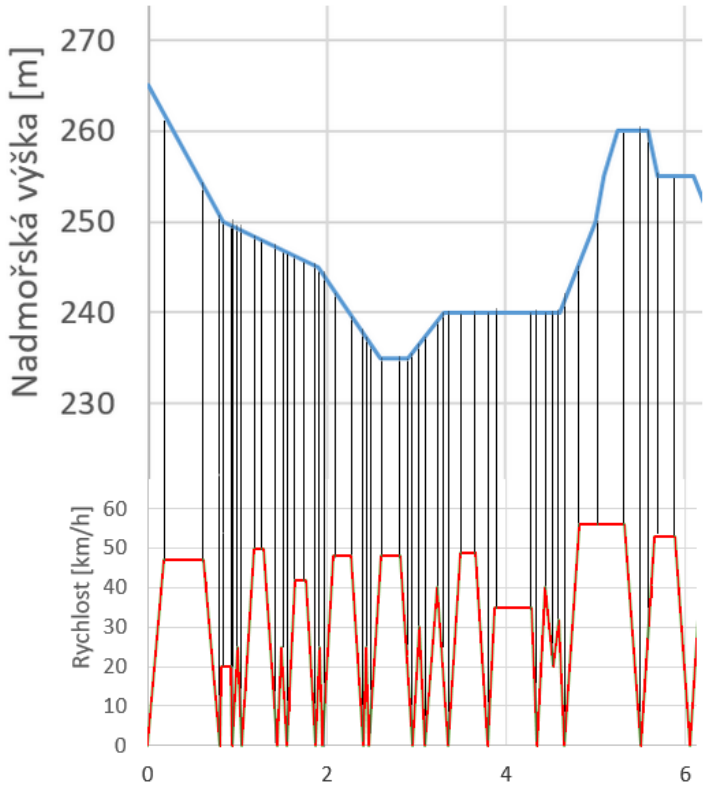
Hodnoty zrychlení a zpomalení se v jednotlivých fázích lišily, ale nikdy nepřekročily hodnotu a=1 m/s^2.

Jak je vidět z obrázku 13 při porovnání rychlostních profilů změřených a profilu vytvořeného, jsou si navzájem podobné, ale pouze do jisté míry. Výpočetní profil je pouze model, a tak nelze dosáhnout podoby na 100 %, ale pokusit se napodobit co nejpravděpodobněji jízdu, která může nastat.

6 CELKOVÉ FÁZE

Celkové fáze neboli zahrnutí rychlostního i výškového profilu a zaznačení každé změny sklonu či zrychlení zároveň lze graficky interpretovat pomocí obrázku 14, který znázorňuje tento postup aplikovaný na prvních šesti kilometrech linky 163 směrem Sídliště Rohožník. Tento rozpad na jednotlivé fáze bude dále přiblížen a popsán ve výpočtu energií pro jízdu, jelikož je pro výpočet zvolenou metodou nutné, aby byly jak sklon trati, tak zrychlení v každé fázi konstantní. Jakmile nastane změna jedné ze zmíněných veličin, nastane i nová fáze, nový výpočetní krok.

Celkový počet fází (výpočetních kroků) ve směru Želivského – Sídliště Rohožník tímto způsobem vzniklo 136, v opačném směru pak 127.



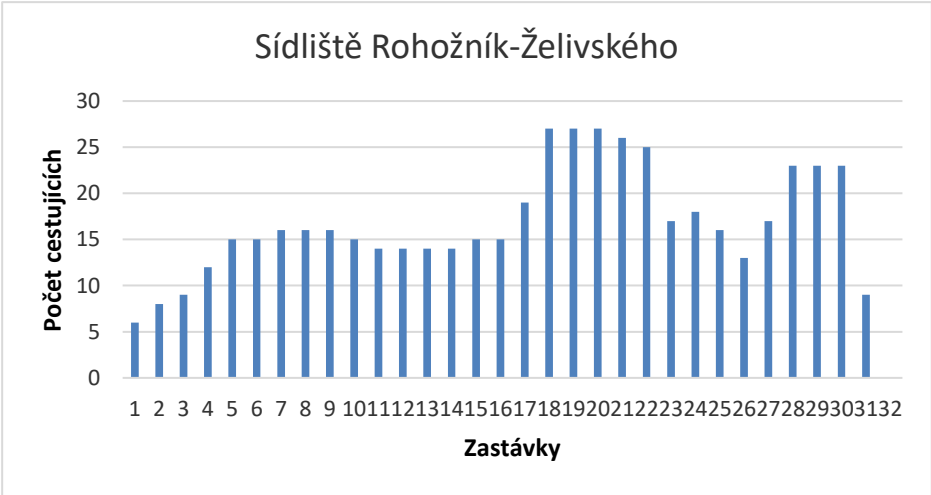
Obrázek 14: Průnik rychlostního profilu s profilem výškovým

7 OBSAZENOST ELEKTROBUSU

Nedílnou součástí výpočtu spotřeby energií je i nutnost zjistit, jaká byla obsazenost vozidla během jízdy. Během všech měřených jízd byla tedy zaznamenávána i obsazenost elektrobusu mezi jednotlivými zastávkami, následně byla hodnota zprůměrována a zaokrouhlena na celé číslo. Vývoj obsazenosti během jízdy je vidět v obrázku 15 a obrázku 16.

Obrázek 15: Obsazenost elektrobusu ve směru Želivského-Sídliště Rohožník

Z obrázku 15 můžeme vyčíst, že velká relativní obsazenost elektrobusu je v prvních čtyřech zastávkách, dalším vrcholem obsazenosti jsou zastávky č 10 a 11 (Depo Hostivař a Malešická továrna). Obsazenost se dostává v počtu lidí přes 20 ještě mezi zastávkami 21, 22, tedy Dolní Počernice, Nádraží Běchovice.



Obrázek 16: Obsazenost elektrobusu ve směru Sídliště Rohožník-Želivského

Ve zpátečním směru výrazně narůstá počet lidí v elektrobusu příjezdem do stanice č 18, Obchodní centrum Štěrboholy.

8 JÍZDNÍ ODPORY

Prvním krokem při vypočítávání energetické náročnosti je výpočet odporů, které na elektrobus během jízdy působí.

Veličinou, která se promítá ve více než jednom z odporů je hmotnost elektrobusu. Pohotovostní hmotnost vozidla je dána výrobcem, 10 500 kg. Ale nutné je i připočíst proměnou hmotnost nastupujících a vystupujících lidí. Pro tyto účely jsem se rozhodl počítat s průměrnou hmotností na jednoho člověka 75 kg. Jak moc bude výsledná spotřeba rozdílná při průměrné hmotnosti 80 kg na jednoho člověka bude diskutováno v kapitole citlivostní analýza.

8.1 VALIVÝ ODPOR

Valivý odpor vzniká při odvalování pneumatiky po vozovce. Kromě samotné tíhy celého vozidla, kterou pneumatiky přenášejí na vozovku, mají na valivý odpor vliv i další veličiny. Například konstrukce pneumatiky: radiální pneumatiky mají menší odpor valení než pneumatiky diagonální, velikost pneumatik, kde se zvyšujícím se průměrem kola klesá odpor a také huštění pneumatiky (čím vyšší tlak tím menší deformaci i odpor). [12]

Výpočet valivého odporu je definován:

$$O_f = m \cdot g \cdot f \cdot \cos\alpha \tag{8.1}$$

přičemž hodnota *m* je součet pohotovostní hmotnosti vozidla a počet lidí *n* vynásoben průměrnou hmotností člověka.

$$m = m_{pohotovostní} + n \cdot m_{člověk} \tag{8.2}$$

tíhové zrychlení *g* je počítáno s hodnotou 9,81m/s^2. Součinitel valivého odporu nebyl ani výrobcem elektrobusu a Dopravním podnikem blíže specifikován. Známé je pouze typové označení pneumatik, na kterých vozidlo jezdí. Jedná se o pneumatiky výrobce Continental, vpředu typ HSR1 a vzadu HDR.

Tabulkové hodnoty součinitele valivého odporu pro jízdu po asfaltu se pohybují mezi hodnotami 0,005 - 0,02. Pro počáteční výpočet bude zvolena hodnota *f*=0,015 s tím, že závislost spotřeby energie na různých hodnotách valivého odporu bude zkoumána v citlivostní analýze.

8.2 ODPOR VZDUCHU

Odpor vzduchu závisí na tvaru vozidla a velikosti jeho čelní plochy. Je také závislý na hustotě vzduchu a rychlosti, kterou se vozidlo pohybuje. Odpor vzduchu je tedy dán:

$$O_{vzd} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot S_x \cdot c_x \cdot v^2 \tag{8.3}$$

Z uvedeného vzorce je patrné, že odpor vzduchu se zvyšuje kvadraticky s rostoucí rychlostí. Rychlost *v* ve vzorci je relativní rychlost vozidla vůči vzduchu, tudíž odpovídá rychlosti vozidla během bezvětří. [12]

Podmínka bezvětří je počáteční podmínka pro modelový výpočet. Hodnota čelní plochy vozidla S_x je 6 m^2 a součinitel odporu vzduchu c_x = 0,55. Hustota vzduchu je proměnlivá v závislosti na teplotě. Pro počáteční výpočet je uvažována hodnota ρ_{vzd} = 1,185 kg/m^3, což odpovídá teplotě 20°C. Jak se bude měnit spotřeba v závislosti na teplotě opět může být předmětem citlivostní analýzy.

8.3 ODPOR ZE ZRYCHLENÍ

Odpor ze zrychlení neboli odpor setrvačnosti je způsoben zrychlováním nebo zpomalováním vozidla a rotačními hmotami ve vozidle včetně kol. Při zrychlování působí odpor proti směru jízdy, ve chvíli kdy vozidlo začne zpomalovat, tedy a < 0, odpor působí ve směru hnací síly. [12]

Odpor ze zrychlení se skládá ze dvou složek. Odpor ze zrychlení posuvné části hmoty a odpor ze zrychlení otáčejících se částí vozidla:

$$O_z = O_{zp} + O_{zr} \tag{8.4}$$

kde odpor ze zrychlení posuvných částí vozidla:

$$O_{zp} = m \cdot a \tag{8.5}$$

a odpor ze zrychlení rotujících částí:

$$O_{zr} = \frac{M_r}{r_d} = \frac{I \cdot \varepsilon}{r_d} = \frac{I \cdot a}{r_d^{\,2}} \tag{8.6}$$

M_r je pak redukovaný moment na kola, I je moment setrvačnosti a ε je úhlové zrychlení.

Po rozepsaní a převedení na konkrétní případ elektrobusu lze výsledný odpor ze zrychlení zapsat ve tvaru:

$$O_z = \left(\left[1 + \frac{\left(I_m + I_{kard}\right) \cdot i_c^2 + I_{pred} + I_{zad}}{m_p \cdot r_d^2} \right] \cdot m_p + m_n \right) \cdot a = \left(\delta \cdot m_p + m_n\right) \cdot a \tag{8.7}$$

Tvar, v jakém je uveden vzorec, odpovídá tomu, že součinitel rotačních hmot δ je vztažen na hmotnost prázdného elektrobusu, hmotnost nákladu, lidí, je počítána jako posuvná složka vozidla.

Moment setrvačnosti motoru je I_m = 9,2 kgm^2, moment setrvačnosti kardanu s pastorkem I_{kard} = 0,098 kgm^2, moment setrvačnosti přední nápravy I_{pred} = 19,619 kgm^2, moment setrvačnosti zadní nápravy I_{zad} = 40,094 kgm^2. Pohotovostní hmotnost elektrobusu je 10 500 kg, dynamický poloměr r_d = 0,4345 m a celkový převod i_c = 6,5. Součinitel rotačních hmot tedy je:

$$\delta = \left(1 + \frac{\left(I_m + I_{kard}\right) \cdot i_c^2 + I_{pred} + I_{zad}}{m_p \cdot r_d^2} \right) \tag{8.8}$$

$$\delta = \left(1 + \frac{\left(9{,}2 + 0{,}098\right) \cdot 6{,}2^2 + 19{,}619 + 40{,}094}{10500 \cdot 0{,}4345^2} \right) = 1{,}228 \tag{8.9}$$

Tato hodnota součinitele rotačních hmot je použita při následujících výpočtech.

8.4 ODPOR ZE STOUPÁNÍ

Odpor vzniká při jízdě vozidla do kopce či z kopce a jeho velikost je sinová složka tíhy vozidla. Tento vztah je definován:

$$O_{\alpha} = \pm m \cdot g \cdot \sin\alpha \tag{8.10}$$

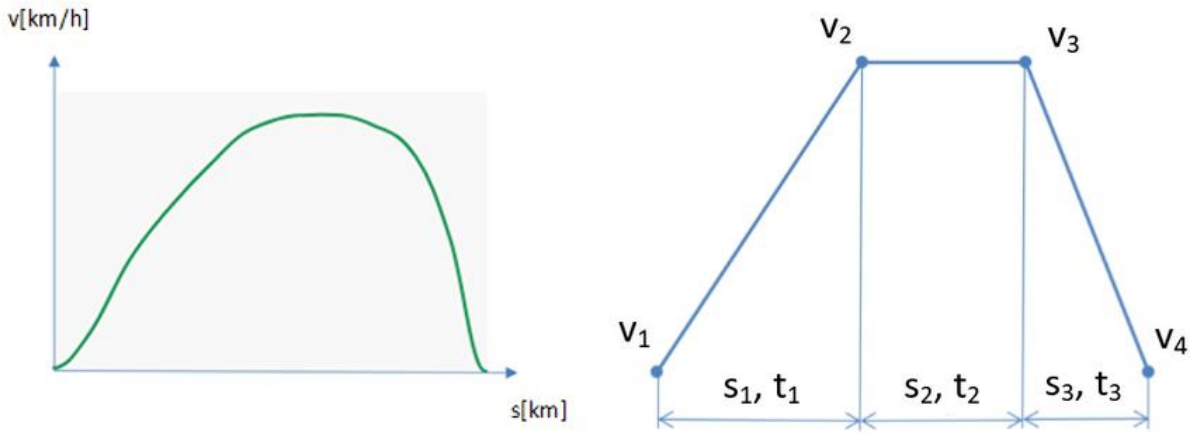
V případě, že vozidlo stoupá do kopce, počítá se odpor se znamínkem + a je to síla, kterou vozidlo musí překonat. V případě, že vozidlo jede z kopce, odpor je se znamínkem – a je to síla, která pomáhá v jízdě. Výpočet odporu ze stoupání je počítán z dat výškového profilu trati.

9 SPOTŘEBA ENERGIE NA KOLECH

Nyní se dostáváme do kapitoly, kde dochází k využití a skloubení téměř všech dat a výpočtu o kterých byla do té doby řeč. Jedná se o výpočet spotřeby energií na kolech, tedy tu část energie, kterou elektrobus potřebuje pro to, aby mohl plnit svoji funkci, a to dopředný pohyb.

Každý obecný úsek se skládá ze 3 fází, fáze akcelerace, jízda konstantní rychlostí a brzdění. Tímto rozdělením se řídí i výpočet energetické náročnosti.

Výpočet energie pro překonání jednotlivých odporů není nic jiného než integrování jednotlivých odporů po ujeté dráze v každé fázi úseku.



Obrázek 17: Schematizace rychlostního úseku [9]

9.1 ENERGIE NA PŘEKONÁNÍ ODPORU VALENÍ

Pro výpočet energie na překonání odporu valení se integruje odpor valení na ujeté vzdálenosti v každé fázi. Matematicky to vypadá takto:

$$E_f = \int_{sj}^{sk} O_f ds = \int_{sj}^{sk} (m \cdot g \cdot f \cdot \cos\alpha) ds = \int_{tj}^{tk} (m \cdot g \cdot f \cdot \cos\alpha) \cdot v dt \qquad (9.1)$$

indexy j,k, jsou celá čísla různá od 0 označující obecně fáze v úseku.

Ve fázi akcelerace a brzdění bude vzorec pro výpočet vypadat následovně:

$$E_{f1,3} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos\alpha \cdot \frac{1}{a}\left[\frac{v_k^2}{2} - \frac{v_p^2}{2}\right] \tag{9.2}$$

Kde *a* je průměrné zrychlení či zpomalení v dané fázi.

Pro výpočet ve fázi s konstantní rychlostí se vzorec během úprav zjednodušil na finální podobu:

$$E_{f2} = m \cdot g \cdot f \cdot \cos\alpha \cdot v \cdot t = m \cdot g \cdot f \cdot \cos\alpha \cdot s \tag{9.3}$$

Hodnoty energie potřebné na překonání valivého odporu jsou v každé fázi úseku nenulová a vždy kladné. To znamená, že energii je vždy nutné dodávat, a to po celou dobu.

Zrychlení je počítáno ze vztahu:

$$a = \frac{1}{2 \cdot s_1} \cdot \left(v_k^2 - v_p^2\right) \tag{9.4}$$

9.2 ENERGIE NA PŘEKONÁNÍ ODPORU VZDUCHU

Princip pro vypočtení spotřeb této energie je totožný jako v kapitole 9.1, tedy vzorec pro výpočet energie bude vypadat následovně:

$$E_{vzd} = \int_{sj}^{sk} O_{vzd}\, ds = \int_{sj}^{sk}\left(\frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot c_x \cdot S_x \cdot v^2\right) ds = \int_{tj}^{tk}\left(\frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot c_x \cdot S_x \cdot v^2\right) \cdot v\, dt \tag{9.5}$$

Po integraci a úpravě dostávám výsledný vzorec:

$$E_{vzd1,3} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot c_x \cdot S_x \cdot \frac{1}{a}\left[\frac{v_k^4}{4} - \frac{v_p^4}{4}\right] \tag{9.6}$$

Pro fázi konstantní jízdy se vzorec během úprav o něco zjednodušil v porovnání se vzorcem pro fázi zrychlení/brzdění. Vypadá následovně:

$$E_{vzd\,2} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot c_x \cdot S_x \cdot v_2^3 \cdot t = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vzd} \cdot c_x \cdot S_x \cdot v_2^2 \cdot s \tag{9.7}$$

I tato energie podobně jako energie na překonání valení nabývá nenulových kladných hodnot v každé fázi úseku.

9.3 ENERGIE NA PŘEKONÁNÍ AKCELERACE

Výpočet energie na překonání odporu se řídí stejným pravidlem jako všechny ostatní výpočty energií a vypadá tedy:

$$E_z = \int_{sj}^{sk} O_z ds = \int_{sj}^{sk} \left(\delta \cdot m_p + m_n\right) \cdot a \cdot ds = \int_{tj}^{tk} \left(\delta \cdot m_p + m_n\right) \cdot a \cdot v dt \tag{9.8}$$

což po integraci vychází pro fázi zrychlení/ brzdění následovně:

$$E_{z1,3} = \left(\delta \cdot m_p + m_n\right) \cdot \left[\frac{v_k^2}{2} - \frac{v_p^2}{2}\right] \tag{9.9}$$

Hodnota této energie může nabývat kladných i záporných hodnot. Při zrychlování je nutné dodat energii na překonání tohoto odporu, tedy hodnotu kladnou. Při brzdění ale naopak odpor pomáhá v dopředném pohybu, je to tedy energie, kterou je možné využít k rekuperaci, tím pádem ve výpočtech má znaménko mínus.

Jelikož se jedná o odpor, který vzniká při překonávání akcelerace, překonávání setrvačné síly, ve fázi udržování konstantní rychlosti tento odpor nevzniká, a proto i energie na jeho překonání je v této fázi nulová.

$$E_{z2} = 0 \tag{9.10}$$

9.4 ENERGIE NA PŘEKONÁNÍ STOUPÁNÍ

Jak už nadpis napovídá, tato energie bude nenulová ve chvíli, kdy se elektrobus pohybuje po trati s nenulovým sklonem. Vypočet vychází z tohoto předpokladu:

$$E_{\alpha} = \int_{sj}^{sk} O_{\alpha} ds = \int_{sj}^{sk} (m \cdot g \cdot \sin\alpha) ds = \int_{tj}^{tk} (m \cdot g \cdot \sin\alpha) v dt \tag{9.11}$$

Po integraci vychází výsledný vzorec pro případ zrychlování či brzdění v určitém sklonu následovně:

$$E_{\alpha 1,3} = m \cdot g \cdot \sin\alpha \cdot \frac{1}{a} \cdot \left[\frac{v_k^2}{2} - \frac{v_p^2}{2} \right] \tag{9.12}$$

Pro stoupaní či klesání za konstantní rychlosti je to vztah:

$$E_{\alpha 2} = m \cdot g \cdot \sin\alpha \cdot s_2 = m \cdot g \cdot \sin\alpha \cdot v_2 \cdot t \tag{9.13}$$

Hodnoty energie mohou nabývat nulových, kladných i záporných hodnot. Nulové hodnoty vycházejí v případě, že se elektrobus pohybuje po rovině. Kladných hodnot v případě, že je nutné energii z baterie dodávat, tzn. vozidlo stoupá a záporných hodnot v případě, že vozidlo sjíždí z kopce dolů, získávám energii, kterou je možné využít k nabití baterie.

9.5 CELKOVÁ BILANCE ENERGIE

To, zda bude v dané fázi tratě docházet ke spotřebě energie či k její rekuperaci je však známo až při vypočtení všech čtyř energií v každé fázi tratě. Zda dochází ke spotřebě energie či nikoliv zjistíme prostým součtem všech jízdních spotřeb.

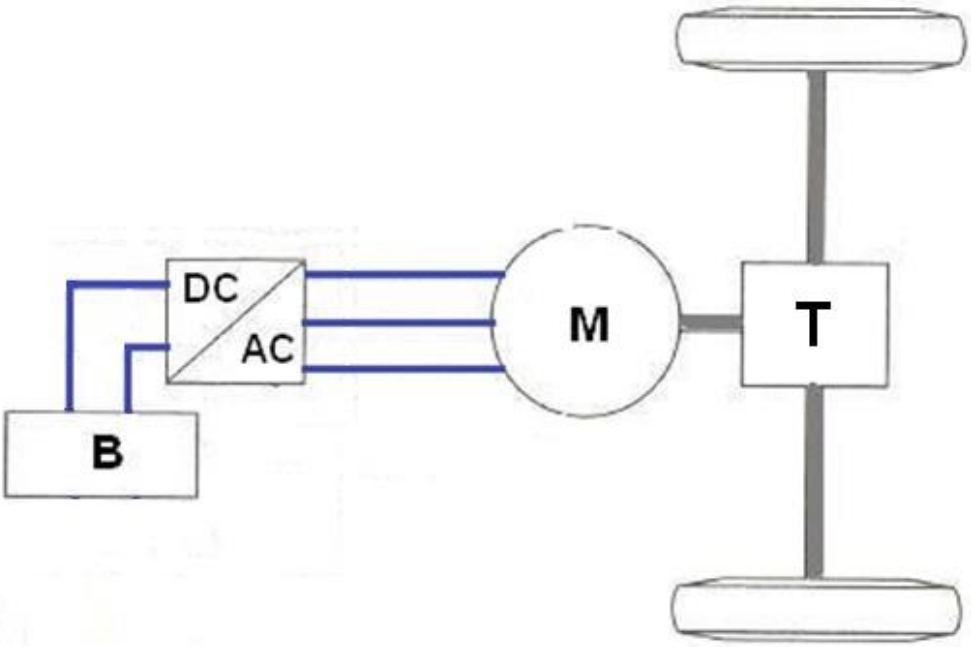
$$E_{wheel} = E_f + E_{vzd} + E_z + E_{\alpha} \tag{9.14}$$

V případě, že $E_{wheel} > 0$, energie se spotřebovává i přesto, že některá hodnota energie může dosahovat záporné hodnoty. Naopak je-li $E_{wheel} < 0$, vzniká na kolech energie, kterou je možné rekuperovat.

10 ÚČINNOSTI

Účinnost je důležitou veličinou při zjišťování, kolik energie z baterie se ve skutečnosti dostane k pohonu kol nebo jak hospodárně elektrobus s energií z baterie nakládá. Bohužel kapitola účinnosti nemá pouze jeden možný výklad, lépe řečeno má mnoho způsobů, jak ji interpretovat a vypočítat. Samotná účinnost dle každé teorie může vycházet odlišně, a to například i z důvodu doby, ve které byla vytvořena. Konkrétně můžeme mluvit přímo o baterii. Víme, že baterie použitá v elektrobusu je Li-ion baterie a na vývoji baterií, nejen těch Li-ion, se neustále pracuje a co platilo před 10 lety již dnes platit nemusí.

Schéma hnacího řetězce elektrobusu si můžeme představit, jak je zobrazeno na obrázku 18. Tudíž komponenty, které vstupují do rovnice jsou: mechanický převod, elektromotor, DC/AC měnič a baterie.



Obrázek 18: Blokové schéma elektrobusu [13]

10.1 Výpočet účinnosti dle prof. Čeřovského

Jednou z možností, jak získat číselné hodnoty účinností v případě, kdy nejsou známy hodnoty všech proměnných, je použít výpočet s empirickými konstantami, jejichž autorem je pan prof. Čeřovský [14]

Výpočet je rozdělen na 3 fáze – akcelerace, konstantní rychlost a brzdění.

Pro fázi akcelerace jsou úvodní výpočty následující:

průměrný výkon na kolech: $P_1 = E_{wheel} / t_1$ (10.1)

průměrná úhlová rychlost na kolech: $\omega_1 = (v_2+v_1) /(2.r_d)$ (10.2)

průměrný kroutící moment na kolech: $M_1 = P_1 / \omega_1$ (10.3)

Pro fázi konstantní rychlosti:

průměrný výkon na kolech: $P_2 = E_{wheel} / t_2$ (10.4)

průměrná úhlová rychlost na kolech: $\omega_2 = v_2 / r_d$ (10.5)

průměrný kroutící moment na kolech: $M_2 = P_2 / \omega_2$ (10.6)

Pro fázi brždění:

průměrný výkon na kolech: $P_3 = E_{wheel} / t_3$ (10.7)

průměrná úhlová rychlost na kolech: $\omega_3 = (v_3+v_4) /(2.r_d)$ (10.8)

průměrný kroutící moment na kolech: $M_3 = P_3 / \omega_3$ (10.9)

Následuje výpočet relativní úhlové rychlosti, výkonu a kroutícího momentu, který je pro všechny shodný. Fáze *ph* = 1, 2 a 4

$$M_{rel_ph} = \frac{M_{ph}}{M_{nom_mot} \cdot i_c} \tag{10.10}$$

$$\omega_{rel_ph} = \frac{\omega_{ph} \cdot i_c}{\omega_{nom_mot}} \tag{10.11}$$

$$P_{rel_ph} = M_{rel_ph} \cdot \omega_{rel_ph} \tag{10.12}$$

Kde i_c je celkový převodový poměr mezi motorem a koly,

r_d dynamický poloměr kola.

M_{nom_mot} je nominální moment motoru

ω_{nom_mot} je nominální úhlová rychlost motoru

Účinnost buzeného motoru je následně možné spočítat:

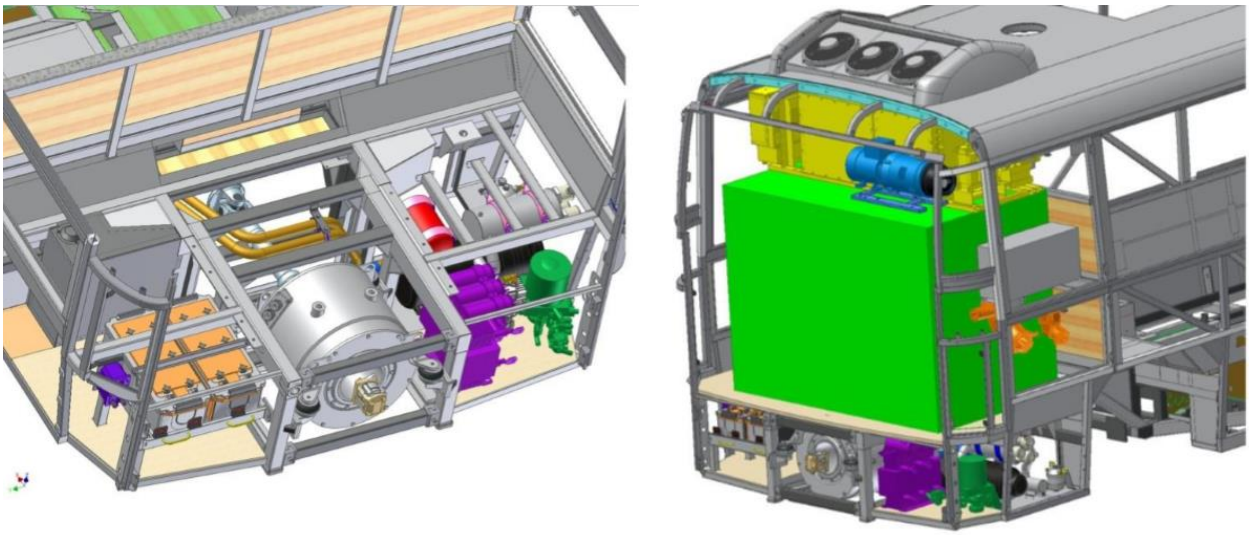
$$\eta_{mot_ph} = \frac{P_{rel_ph}}{P_{rel_ph} + m_1 \cdot M^2_{rel_ph} + m_2 \cdot \omega^{1,8}_{rel_ph}} \tag{10.13}$$

přičemž m_1 ~ 0,0175 a m_2 ~ 0,0525 jsou empirické konstanty.

Účinnost DC/AC měnič je:

$$\eta_{inv_ph} = \frac{P_{rel_ph}}{i_1 \cdot P_{rel_ph} + i_2} \tag{10.14}$$

c_1 ~ 1,025 a c_2 ~ 0,005 jsou empirické konstanty.



Obrázek 19: Uložení baterií a motoru v elektrobusu [15]

Z obrázku 19 je vidět jakým způsobem jsou uložené baterie v elektrobusu, a že motor je postaven podélně, tudíž lze předpokládat mechanický převod v podobě kuželového soukolí, pro které je účinnost celkem jednoznačně daná η_{mech}=0,96.

10.2 Výpočet účinnosti dle prof. Nováka

Výpočet účinnosti podle prof. Nováka se na rozdíl od předchozí kapitoly, zabývá pouze výpočtem účinnosti motoru. Tento výpočet určuje průběh účinností, případně ztrát ze štítkových hodnot motoru a známých hodnot mechanické úhlové rychlosti a momentu. [16] Předpoklady pro výpočet pak vycházejí ze znalosti skalárního řízení asynchronních motorů. Tzn. řízení motoru ve dvou fázích:

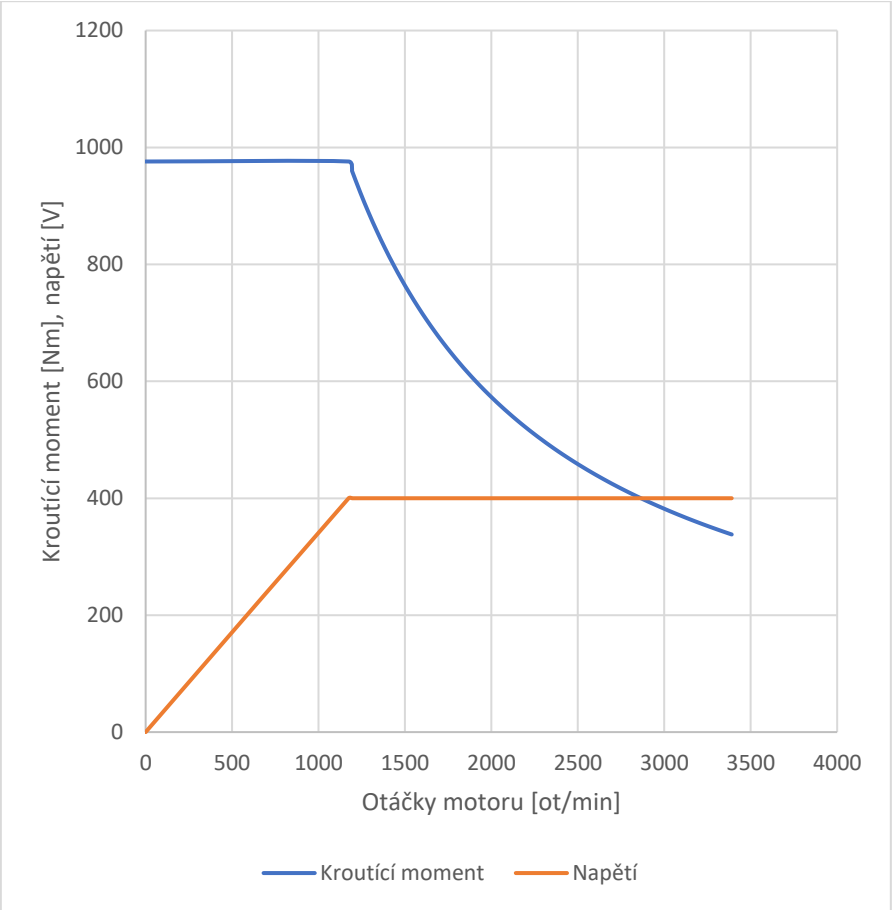
- Řízení ve fázi konstantního magnetického toku
- Řízení ve fázi konstantního výkonu

Napětí a frekvence motoru jsou zvyšovány současně za účelem udržení stále stejného magnetického toku, tzn. konstantního točivého momentu.

$$\psi = \frac{U}{f} = konst. \tag{10.15}$$

Regulace ve fázi konstantního magnetického toku znamená jízdu na hranici max. momentu, který je elektromotor schopen poskytnout. Napětí se zvyšuje až do hodnoty nominálního napětí. To je bod, kdy

se přechází na regulaci za konstantního výkonu, jelikož napětí již nelze dále zvyšovat. Zvyšuje se pouze frekvence a tím klesá hodnota magnetického toku. Tento fenomén dobře vystihuje obrázek 20, kde je jasně vidět, jak taková závislost vypadá.



Obrázek 20: Závislost napětí na točivém momentu a otáčkách motoru (motorický režim)

Nominální napětí	Motor	400 V
	Generátor	666 V
Nominální proud		236,5 A
Nominální moment		976 Nm
Nominální otáčky		1174 ot./min
Nominální výkon		120 kW
Účiník		0,8

Tabulka 4: Štítkové hodnoty elektromotoru

Výpočet začíná tím, že se stanoví nominální příkon motoru

$$P_{pn} = \sqrt{3} \cdot U_{nom} \cdot I_{nom} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 236{,}5 \cdot 0{,}8 = 131081{,}6W \tag{10.16}$$

a nominální ztráty motoru

$$\Delta P_n = P_{pn} - P_{nom} = 131081{,}6 - 120000 = 11081{,}6W \tag{10.17}$$

Tato ztráta se skládá jednak ze ztráty naprázdno:

$$\Delta P_{0n} = 0{,}4 \cdot \Delta P_n = 0{,}4 \cdot 11081{,}6 = 4432{,}6W \tag{10.18}$$

a ztráty na krátko:

$$\Delta P_{jn} = 0{,}6 \cdot \Delta P_n = 0{,}6 * 11081{,}6 = 6648{,}9W \tag{10.19}$$

Závislost napětí na úhlové rychlosti v oblasti konstantního momentu:

$$U = \left(\frac{U_{nom}}{\omega_{nm}} \right) \cdot \omega \tag{10.20}$$

v oblasti konstantního výkonu má hodnotu $U = U_{nom}$ pro tah motoru a $U = U_{nomG}$ pro brzdění motorem.

Ztráty pro jednotlivé hladiny momentu a otáček motoru se spočítají následovně:

$$\Delta P = \Delta P_{0n} \cdot \left(\frac{U}{U_{nom}} \right)^2 \cdot \frac{\omega_{nm}}{\omega_m} + \Delta P_{jn} \cdot \left(\frac{M \cdot \omega_m \cdot U_{nom}}{M_{nom} \cdot \omega_{nm} \cdot U} \right)^2 \tag{10.21}$$

Pro účinnost motoru následně platí:

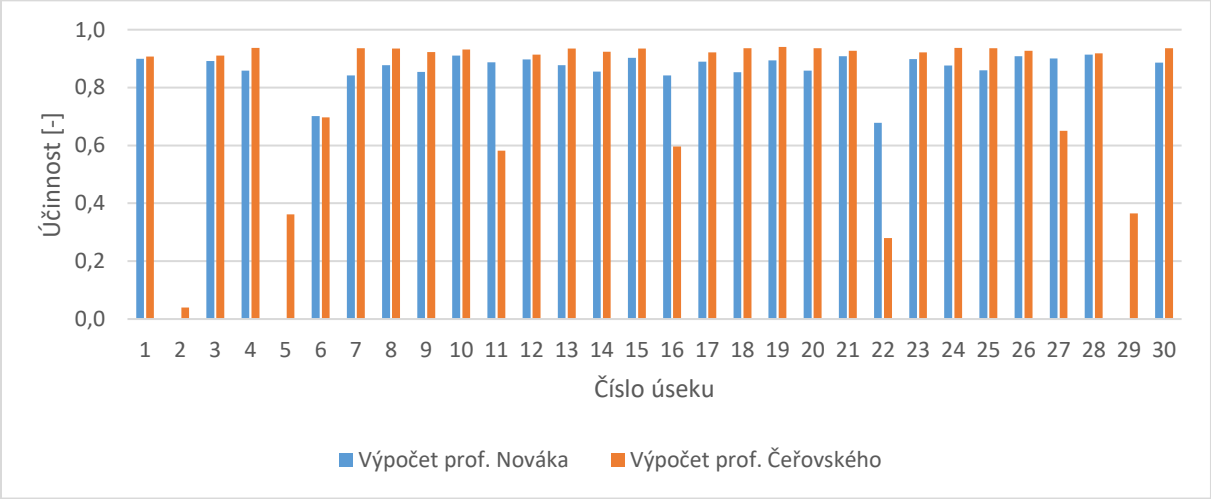
$$\eta_M = \frac{M \cdot \omega_m}{M \cdot \omega_m + \Delta P} \tag{10.22}$$

Účinnost v generátorickém režimu je analogií k motorickému:

$$\eta_{Gen} = \frac{M \cdot \omega_m - \Delta P}{M \cdot \omega_m} \tag{10.23}$$

10.3 Porovnání metod

Při výsledném zkoumání, zda jedna z metod dává optimističtější hodnoty účinnosti než druhá, nelze zjistit pouhým pohledem do grafu. V obrázku 21 je porovnání vypočtené účinnosti motoru pro prvních 30 fází jízdy z celkových 136 ve směru Želivského – Sídliště Rohožník. V některé fázi vychází lépe metodika prof. Čeřovského, jinde zase prof. Nováka.



Obrázek 21: Porovnání výpočtu účinností

Při bližším zkoumání již však je možné zjistit, že největší rozdíl těchto dvou metod vzniká nejčastěji ve fázi udržování konstantní rychlosti, tedy oblasti nízkého vytížení motoru.

Z pohledu statistiky vypadá porovnání metod následovně:

	průměr	medián
metoda Novák	0,86	0,90
metoda Čeřovský	0,83	0,92

Tabulka 5: Průměr a medián hodnot účinností pro jednotlivé metody

10.4 Účinnost baterie

Další neznámou je účinnost baterie. Podobně jako výpočty ostatních elektro součástí, ani zde není jednoznačně dán vztah pro výpočet. Zvolil jsem tedy vypočet na základě publikace [17], kde se touto problematikou zabývali.

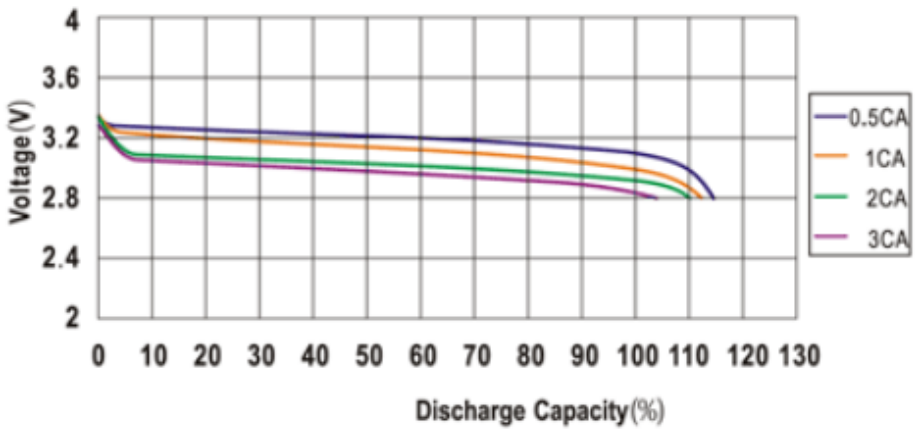
10.4.1 Vybíjení baterie

Pro určování hodnot napětí baterie U_{bat} během jednotlivých fází, byla použita charakteristika vybíjení od výrobce baterií, obrázek 22. Jak je patrné, závislost napětí na vybití baterie je ve velké části lineární a klesá jen s velmi malou směrnicí, proto počítáním napětí baterie jako konstanty není vnášena do výpočtu výrazná chyba. Bylo zvoleno napětí přibližně v polovině lineární oblasti křivky odpovídající proudu 0,5 CA = 150 A. Z grafu toto napětí odhaduji přibližně okolo 55 % vybití - 3,2 V. S touto hodnotou počítám jako s hodnotou napětí článku, dále vycházím z faktu, že články jsou zapojeny sériově, je tedy nutno vynásobit napětí článku počtem článků (180) a získám napětí baterie.

$$U_{bat} = 180 \cdot 3{,}2 = 576V \tag{10.24}$$

Z hodnoty napětí baterie a hodnoty výkonu na kolech můžu dopočítat proud.

$$I_{bat} = \frac{P_{wheel}}{U_{bat} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{inv}} \tag{10.25}$$



Obrázek 22: Závislost napětí na stavu vybití při různých vybíjecích proudech [11]

Hodnota vnitřního odporu je výrobcem udávána jako < 0,3 mΩ. Tato hodnota je použita jakožto teoreticky nejméně příznivá situace pro účinnost bateriového článku, kterou také násobím počtem článků, 180, a získám nejvyšší teoretickou hodnotu vnitřního odporu baterie.

$$R_{int} = 180 * 0{,}0003 = 0{,}054\Omega \tag{10.26}$$

Výpočet pro účinnost je následující:

$$\eta_{bat_disch} = 1 - \frac{I_{bat} \cdot R_{\text{int}} \cdot I_{bat}}{U_{bat} \cdot I_{bat}} \tag{10.27}$$

kde R_{int} je hodnota vnitřního odporu, U_{bat} napětí v baterii a I_{bat} proud v baterii

Výpočtem získávám hodnoty η_{bat_disch} pohybující se v intervalu 0,965 – 0,99

Hodnota účinnosti závisí na mnoha faktorech, jako například teplota baterie, či změna vnitřního odporu a napětí v závislosti na stavu nabití či stáří baterie. Z důvodu omezeného množství informací o konkrétní baterii používám pouze zjednodušený výpočet.

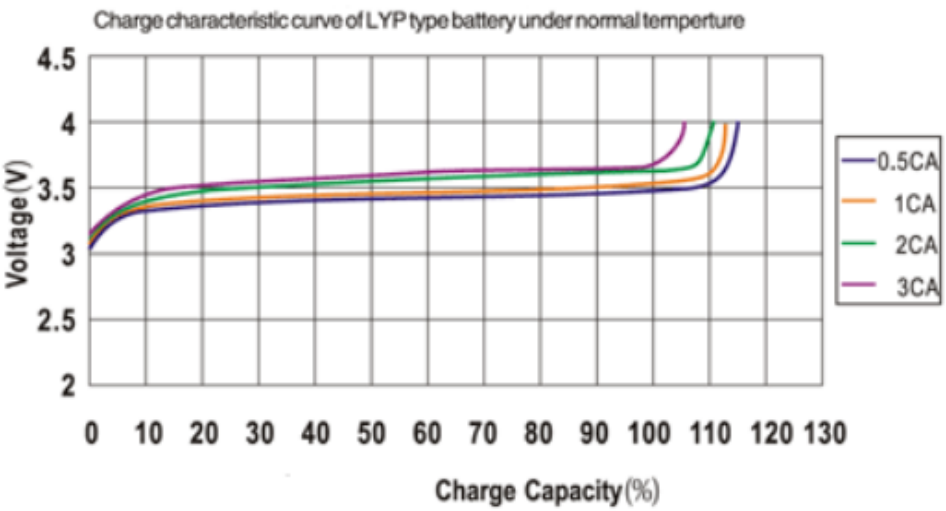
10.4.2 Nabíjení baterie

K výpočtu účinnosti baterie při nabíjení se přistupuje obdobně jen s malými rozdíly. Ve jmenovateli vzorce pro účinnost se počítá s výkonem mechanickým, nikoliv elektrickým. Hodnotu proudu počítám stejně jako v případě vybíjení. Z grafu závislosti napětí na nabití baterie, obrázek 23, odečtu napětí v oblasti lineární závislosti, a to bude považováno za napětí článku pro další výpočet. V tomto konkrétním případě počítám 3,5V. Opět násobím počtem článku a získám napětí baterie.

$$U_{bat} = 180 \cdot 3{,}5 = 630V \tag{10.28}$$

$$I_{bat} = \frac{P_{wheel} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{inv}}{U_{bat}} \tag{10.29}$$

Vnitřní odpor baterie zůstává stejný.



Obrázek 23: Závislost napětí baterie na stavu nabití [11]

$$\eta_{bat_char} = 1 - \frac{\Delta P_{bat}}{P_{mech}} = 1 - \frac{I_{bat} \cdot R_{\text{int}} \cdot I_{bat}}{P_{wheel} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{mot} \cdot \eta_{inv}} \tag{10.30}$$

Hodnoty účinnosti nabíjení se pohybují v intervalu mezi 0,97 a 0,99.

11 VÝPOČET FINÁLNÍ SPOTŘEBY ENERGIE

Ve chvíli, kdy jsou známy spotřeby energie na kolech i energetické účinnosti jednotlivých komponent hnacího řetězce, je možné vypočítat, kolik energie celkem stojí provoz elektrobusu. Výpočet finální spotřeby bude pro přehlednost opět rozdělen na 3 fáze, akcelerace, konstantní rychlost a brždění.

Ve fázi akcelerace mohou nastat 2 stavy a to $E_{wheel1} > 0$ a $E_{wheel1} < 0$. První zmíněná situace je naprosté většině převažující a znamená, že elektrobus musí dodávat energii z baterie na kola, aby vozidlo zrychlovalo. Druhý stav je spíše ojedinělý a může nastat například při zrychlování a zároveň jízdy z kopce dolů. Jestliže svah je dostatečně prudký, může dojít k tomu, že elektrobus energii nemusí dodávat, ale regenerační brzděním vracet část energie zpět do baterie.

Výpočet pro $E_{wheel1} > 0$:

$$E_1 = \frac{E_{wheel1}}{\eta_{mech} \cdot \eta_{mot1} \cdot \eta_{inv1} \cdot \eta_{bat_disch}} \tag{11.1}$$

Situace při $E_{wheel1} < 0$ je následující:

$$E_1 = E_{wheel1} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{mot1} \cdot \eta_{inv1} \cdot \eta_{bat_char} \cdot rec \tag{11.2}$$

Koeficient *rec* pak udává poměr mezi brzděním regenerativním a mechanickým. Jelikož tento součinitel silně závisí na jízdních návycích jednotlivých řidičů, plynulosti provozu a dalších neznámých, je tedy velice obtížnému zjišťování této hodnoty, budu počítat s hodnotou *rec*=1, tzn. veškeré brždění bude regenerativní.

Pro fázi konstantní rychlosti je to obdobné. Hodnoty E_{wheel2} mohou nabývat kladných i záporných hodnot. Záporné hodnoty může E_{wheel2} dosáhnout například ve chvíli, kdy elektrobus jede z kopce a brzděním se udržuje konstantní rychlost.

Pro $E_{wheel2} > 0$ platí:

$$E_2 = \frac{E_{wheel2}}{\eta_{mech} \cdot \eta_{mot2} \cdot \eta_{inv2} \cdot \eta_{bat_disch}} \tag{11.3}$$

pro $E_{wheel2} < 0$ následně:

$$E_2 = E_{wheel2} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{mot2} \cdot \eta_{inv2} \cdot \eta_{bat_char} \cdot rec \tag{11.4}$$

Výpočet pro fázi brždění je stejný jako pro předchozí 2 fáze, tedy i E_{wheel4} může nabývat kladných i záporných hodnot. Zde však na rozdíl od předchozích vycházejí hodnoty většinou záporné. Kladné by mohly vycházet v případě, kdyby elektrobus zpomaloval do kopce a předepsané hodnoty zpomalení byly nižší, než kdyby elektrobus zastavil samovolně. Bylo by tedy nutné použít elektromotor.

Pro výpočet běžného stavu při brždění $E_{wheel4} < 0$ je použit vztah:

$$E_3 = E_{wheel3} \cdot \eta_{mech} \cdot \eta_{mot3} \cdot \eta_{inv3} \cdot \eta_{bat_char} \cdot rec \tag{11.5}$$

pro výjimečný případ $E_{wheel4} > 0$ může být eventuálně použito:

$$E_3 = \frac{E_{wheel3}}{\eta_{mech} \cdot \eta_{mot3} \cdot \eta_{inv3} \cdot \eta_{bat_disch}} \tag{11.6}$$

Nyní již k celkovým hodnotám spotřeby energie. V případě, že pro výpočet účinnosti motoru bude využita metody dle prof. Nováka, vychází spotřeba energie pro jízdu Želivského – Sídliště Rohožník $E_{žsr}$=17,21 kWh a pro jízdu zpět $E_{srž}$=16,24 kWh. Z toho plyne, že spotřeba na trase dlouhé 37,5km je celkem 33,85 kWh, spotřeba na 1 km jízdy tedy odpovídá:

$$E_{kWh/km} = \frac{E_{celk}}{s} = \frac{33{,}45}{37{,}5} = 0{,}892 kWh/km \tag{11.7}$$

V případě výpočtu za použití účinností motoru dle metodiky prof. Čeřovského jsou výsledky mírně vyšší. Celková spotřebovaná energie pro jízdu E_{celk}=37,86 kWh. Spotřeba kWh/km vychází:

$$E_{kWh/km} = \frac{E_{celk}}{s} = \frac{37{,}453}{37{,}5} = 0{,}998 kWh/km \tag{11.8}$$

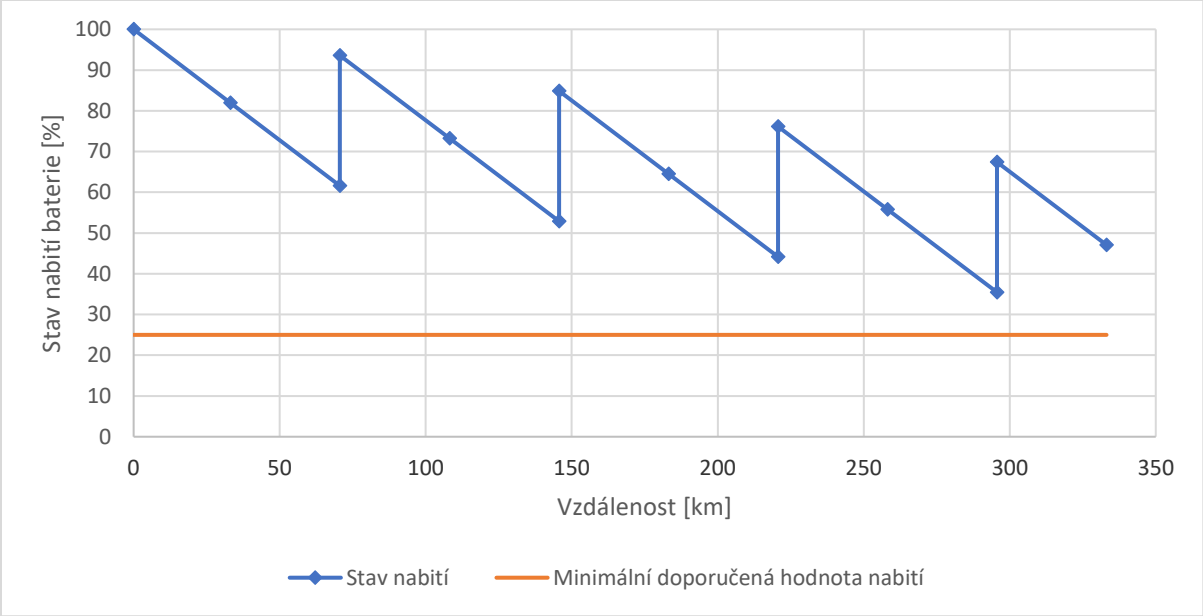
Přičteme-li ke spotřebě 5 % jako hodnotu energie pro vedlejší spotřeby – svícení, otevíraní dveří apod., získáme hodnoty 0,936 a 1,045 kWh/km.

12 BILANCE ENERGIE NA BATERII

Informace neodmyslitelně spjatá s hodnotou spotřeby je, jak daleko elektrobus tímto stylem jízdy dojede. Prvně je nutné zmínit, že spotřeba bude narůstat a klesat v závislosti na stupni dopravy nebo třeba na povětrnostních podmínkách, zda musí řidič topit nebo klimatizovat vnitřní prostory elektrobusu.

Parametry nabíjení jsou promněnné a liší se v tom, zda řidič musí v elektrobuse topit či nikoliv. Během letních měsíců se očekává, že se bude nabíjet až při každém druhém otáčení na obratišti Želivského. V případě, že je nutné topit, či nastaly jiné situace, při kterých se zvyšuje spotřeba, je nutné nabíjet i v ostatních přestávkách. [9]

Za účelem snížení teplotního namáhání baterií a zlepšení jejich parametrů životnosti v zimě a v létě je používán jiný nabíjecí proud. V létě 150 A při 750 V, v zimě 200 A při 750 V. [18]



Obrázek 24: Bilance stavu energie na baterii

Pro výpočet a sestavení závislosti bilance energie na baterii budu předpokládat, že není nutné chlazení ani topení, provoz na trase bude odpovídat přibližně víkendovému provozu v této časti Prahy a budu předpokládat vypočtenou spotřebu E=0,938 kWh/km.

$$P_{nab} = U_{nab} \cdot I_{nab} = 750 \cdot 150 = 112500W \tag{12.1}$$

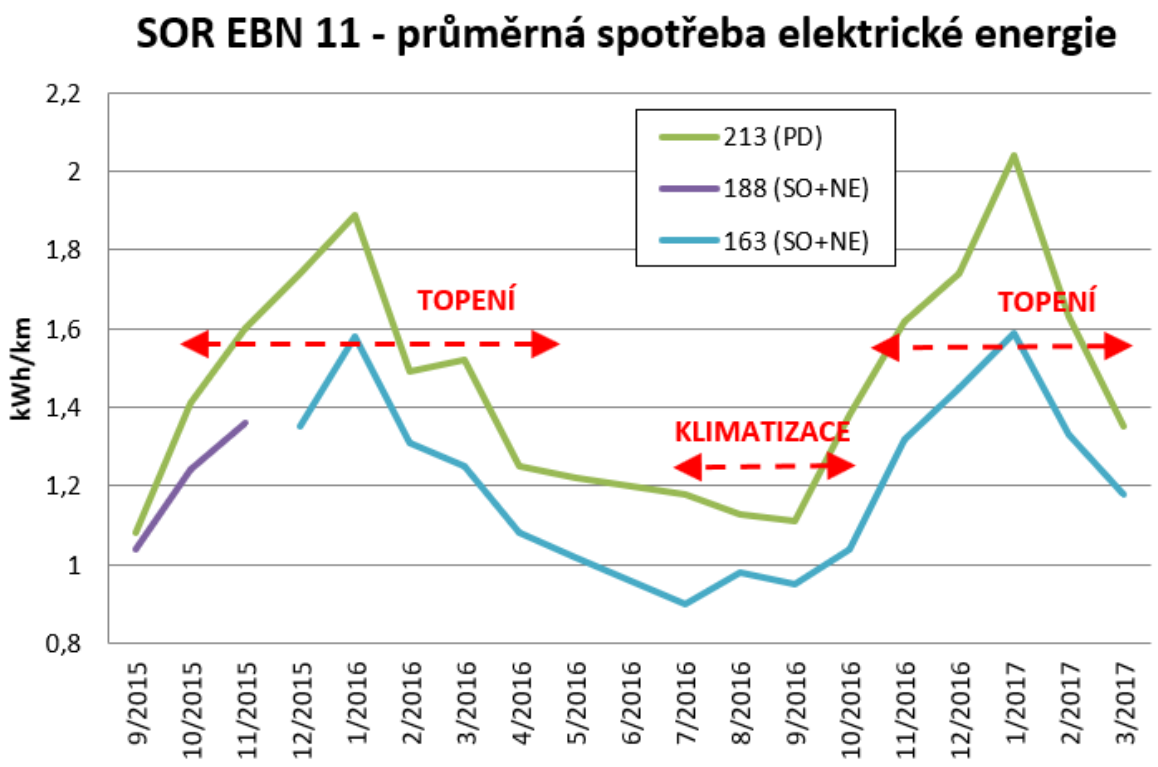
Pro následný výpočet energie nabité do baterie platí:

$$E_{nab} = P_{nab} \cdot t \cdot \eta_{bat_char} \tag{12.2}$$

Modelová bilance stavu nabití, obrázek 24, odpovídá faktu, že elektrobus bude při každé druhé obrátce na obratišti Želivského nabíjet pod napětím 750 V a proudem 150 A. Na první ranní úsek elektrobus vyjíždí přímo z garáže Hostivař, první zastávka Depo Hostivař a poté směřuje směr Sídliště Rohožník. Z tohoto důvodu je počítáno, že při výjezdu na trasu bude baterie nabita na 100 %. Dle jízdního řádu má elektrobus na obratišti Želivského vždy minimálně 34 min času od příjezdu a před odjezdem na pravidelnou linku, kromě první ranní jízdy. V obrázku 24 je vždy počítáno s časem nabíjení 30 min. Tento čas nemusí být pokaždé dosažen dojde-li například ke zdržení elektrobusu na trase. V případě, že by došlo k výraznému poklesu stavu nabití baterie, je možné nabíjet při každé otáčce na Želivského, nicméně stav nabití baterie by neměl poklesnout pod hranici 25 % [5]. Pokles energie pod tuto hranici by mohl znamenat nevratné poškození baterie.

13 Porovnání s hodnotami DPP

Porovnání s naměřenými hodnotami DPP je nasnadě. Jak je vidět v obrázku 25, topení či klimatizace zvyšují spotřebu elektrobusu i o více než 50 %. Proto je důležité se v prvotním hodnocení zaměřit na období, kdy temperovaní vzduchu bylo zapotřebí co nejméně. Tomuto předpokladu nejlépe odpovídá měsíc květen, případně červen 2016. Průměrná spotřeba v těchto měsících vychází přibližně 1 kWh/km.



Obrázek 25: Spotřeba elektrobusu naměřená DPP [18]

Budeme-li tedy počítat s vypočtenou spotřebou 0,938 kWh/km, je rozdíl mezi tímto údajem a skutečně naměřenou spotřebou menší než 10 %. Ve stejný moment je však nutné dodat, že do výpočtu jsou zahrnuty i veličiny, které nebyly explicitně zadané, počítá se tedy pouze s odhadem jejich skutečné hodnoty. Jak se bude celková spotřeba měnit případě, že se změní některá z těchto veličin ukazuje citlivostní analýza.

13.1 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Veličiny, jejichž změnou se bude měnit i celková spotřeba, jsou například průměrná hmotnost člověka, hustota vzduchu, ale také valivý odpor. V tabulce 6 je vidět, jakým způsobem se bude měnit celková spotřeba v případě, že se bude měnit vždy jen jeden parametr. Hodnoty spotřeb jsou již počítány i 5 % hodnotou vedlejších spotřeb.

Změna veličiny	Spotřeba [kWh/km]
Hustota vzduchu ρ=1,24 kg/m3	0,941
Hmotnost člověka $m_{člověk}$=80 kg	0,943
Hmotnost člověka $m_{člověk}$=85 kg	0,947
Valivý odpor f=0,01	0,758
Valivý odpor f=0,02	1,219
Konstantní počet cestujících n=10	0,895
Konstantní počet cestujících n=30	0,991
Konstantní počet cestujících n=60	1,146
Konstantní počet cestujících n=90	1,311

Tabulka 6: Vliv na spotřebu v případě změny parametru

Jak je patrné, vliv změny hustoty vzduchu a průměrné hmotnosti člověka nemá výrazný vliv na celkovou spotřebu. Co ale výrazný vliv má, je koeficient valivého odporu. Rozdíl v hodnotě koeficientu o 0,01 ve výsledku znamená spotřebu vyšší o více jak 0,4 kWh/km. Posledním z parametrů zkoumání je, jaký vliv bude mít na spotřebu obsazenost elektrobusu. Jestliže elektrobus pojede obsazen konstantně 10 lidmi, spotřeba bude 0,895 kWh/km. V případě, že konstantní obsazenost bude 1/3, 2/3 či 3/3 maximální obsazenosti vozidla, nárůst spotřeby bude vždy přibližně o 0,15 kWh/km při zvýšení počtu cestujících o jednu třetinu.

Výpočty všech důležitých veličin jsou uvedeny v přílohách této práce. Kompletní výpočty včetně jednotlivých mezivýpočtů jsou vypáleny na přiloženém CD.

14 ZÁVĚR

Cílem práce bylo stanovit spotřebu elektrobusu SOR EBN 11 na lince 163. Z práce je patrné, že množství informací, které je nutné získat pro vytvoření výpočetního modelu, je poměrně veliké. Ať už se jedná o topografický profil, rychlostní profil, či jednotlivé technické údaje spojené s provozem vozidla, platí, že čím detailnější budou, tím přesnější budou i výsledky.

Průběžné výpočty i citlivostní analýza ukazují, které veličiny mají na spotřebu výrazný vliv. Patří mezi ně valivý odpor nebo počet přepravovaných cestujících. Podle výsledků měření DPP nezanedbatelnou roli hraje i fakt, zda je nutné prostor vozidla vytápět či klimatizovat.

Výsledné hodnoty této práce ukazují, že i přes absenci několika technických dat týkajících se především vozidla samotného, lze docílit výsledů, které se od reálných hodnot liší maximálně ± 10 %. S takovými výsledky lze bezesporu tvrdit, že v případě studie, zda se na danou trasu vyplatí nasadit právě elektrobus, může tato práce sloužit jako metodika pro výpočet prvotní představy, říkajíc, v jakých mezích se bude spotřeba pohybovat. Samozřejmě je nutné počítat se specifiky, která přináší jak různý typ vozidla, tak i trasy.

15 CITOVANÁ LITERATURA

[1] *Historie elektromobilismu* [online]. 2010 [cit. 2017-10-20]. Dostupné z: http://elektromobil.vseznamu.cz/historie-elektromobilismu

[2] E-mobilita v MHD. In: *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-10-18]. Dostupné z: http://www.proelektrotechniky.cz/pdf/Studie2015.pdf

[3] Elektrobus kvůli mrazu v Praze dojezdil dříve, zamrzlo vypružení. *Pražský deník* [online]. 2014, , 1 [cit. 2017-11-24]. Dostupné z: https://prazsky.denik.cz/zpravy_region/elektrobus-kvli-mrazu-v-praze-dojezdil-dve-zamrzlo-vypruen.html

[4] *Mapové podklady - 2GIS* [online]. 2016 [cit. 2016-09-06]. Dostupné z: https://2gis.cz/praha

[5] *Dopravník podnik hl. m. Prahy* [online]. 2015 [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: http://www.dpp.cz/

[6] *Technické listy, SOR Libchavy* [online]. 2016 [cit. 2017-06-01]. Dostupné z: http://www.sor.cz/ebn/

[7] Abmessungen und Layout EBN 11. In: *Tecpond* [online]. 2014 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: http://www.tecpond.at/wp-content/uploads/2014/05/EBN-11-facelift_01.jpg

[8] BARCHÁNEK, Jan. SOR / Cegelec EBN 11 elektrobus s nabíjením z tramvajové sítě. In: *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: http://www.proelektrotechniky.cz/pdf/KonferenceEbusyIV/Barchanek_DPPelektrobus.pdf

[9] BALASHOV, Alexandr. *Energetická náročnost jízdy elektrobusu*. Praha, 2017. Diplomová práce.

[10] PRAŽSKÝ ELEKTROBUS JIŽ BY JIŽ ZVLÁDNUL OBJET ZEMI DVA A PŮLKRÁT. In: *Pravá Praha* [online]. 2017 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: http://pravapraha.cz/wp-content/gallery/elektrobus-sor-ebn-11/elektrobus-sor-ebn-linka-213-008.JPG

[11] *Winston Battery* [online]. 2015 [cit. 2017-09-10]. Dostupné z: http://en.winston-battery.com/

[12] ACHTENOVÁ, Gabriela a Vlastislav TŮMA. *Vozidla s pohonem všech kol*. Praha: BEN - technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-236-7.

[13] MORKUS, Josef. *Přednášky z předmětu Hybridní pohony*. Praha, 2017. ČVUT.

[14] ČEŘOVSKÝ, Zdeněk. *Stanovení účinnosti elektromotoru za pomoci empirických vzorců*. b.r. FEL ČVUT.

[15] ČERNÝ, Jan. Elektrobusy SOR. In: *Proelektrotechniky.cz* [online]. 2014 [cit. 2017-11-28]. Dostupné z: http://www.proelektrotechniky.cz/pdf/SeminarEbusyII/Cerny_SOR_Ebusy.pdf

[16] NOVÁK, Jaroslav, Ladislav MLYNAŘÍK a Tomáš LELEK. *Vybrané problémy implementace simulačních modelů akumulátorových vozidel*. 2015. Univerzita Pardubice.

[17] TREMBLAY, Olivier, Louis-A DESSAINT a Abdel-Illah DEKKICHE. *A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Vehicles*. Quebec, 2007. Ecole de Technologie Superieure.

[18] BARCHÁNEK, Jan. *Podklady Dopravního podniku hl. m. Prahy*. 2017.

[19] TryHyBus. In: *Triple Hybrid Hydrogen Bus* [online]. 2009 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: http://www.h2bus.cz/index.php/cz/

[20] SOR EBN 11. In: *Buspress.eu* [online]. 2017 [cit. 2017-06-13]. Dostupné z: http://www.buspress.eu/100-tisic-kilometru-elektrobusu-v-prazskem-dopravnim-podniku/

[21] Škoda Perun HE. In: *FDrive.cz* [online]. 2016 [cit. 2017-11-25]. Dostupné z: https://fdrive.cz/galerie/skoda-perun-he-5381/clanek-453

16 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Jízdní řád elektrobusu 55

Příloha 2: Rychlostní profil na trase Želivského – Sídliště Rohožník 56

Příloha 3: Rychlostní profil na trase Sídliště Rohožník – Želivského 57

Příloha 4: Průběh toku energie (Želivského – Sídliště Rohožník) 58

Příloha 5: Průběh toku energie (Sídliště Rohožník – Želivského) 59

Příloha 6: Naměřené hodnoty (Ž – SR) 60

Příloha 7: Výpočet energií (Ž – SR) 63

Příloha 8: Výpočet výkonu, úhlové rychlosti, točivého momentu a účinnosti motoru a měniče dle prof. Čeřovského (Ž – SR) 66

Příloha 9: Účinnost motoru dle prof. Nováka, účinnost baterie a celková spotřeba energie oběma metodikami 69

Příloha 10: Naměřené hodnoty (SR – Ž) 72

Příloha 11: Výpočet energií (SR – Ž) 75

Příloha 12: Výpočet výkonu, úhlové rychlosti, točivého momentu a účinnosti motoru a měniče dle prof. Čeřovského (SR – Ž) 78

Příloha 13: Účinnost motoru dle prof. Nováka, účinnost baterie a celková spotřeba energie oběma metodikami (SR – Ž) 81

17 PŘÍLOHY

Příloha 1: Jízdní řád elektrobusu

Dopravní podnik hlavního města Prahy, akciová společnost

Linka: **163** Pořadí: **3** Provozovna: **Hostivař** **Sobota+Neděle** List č. 1/1

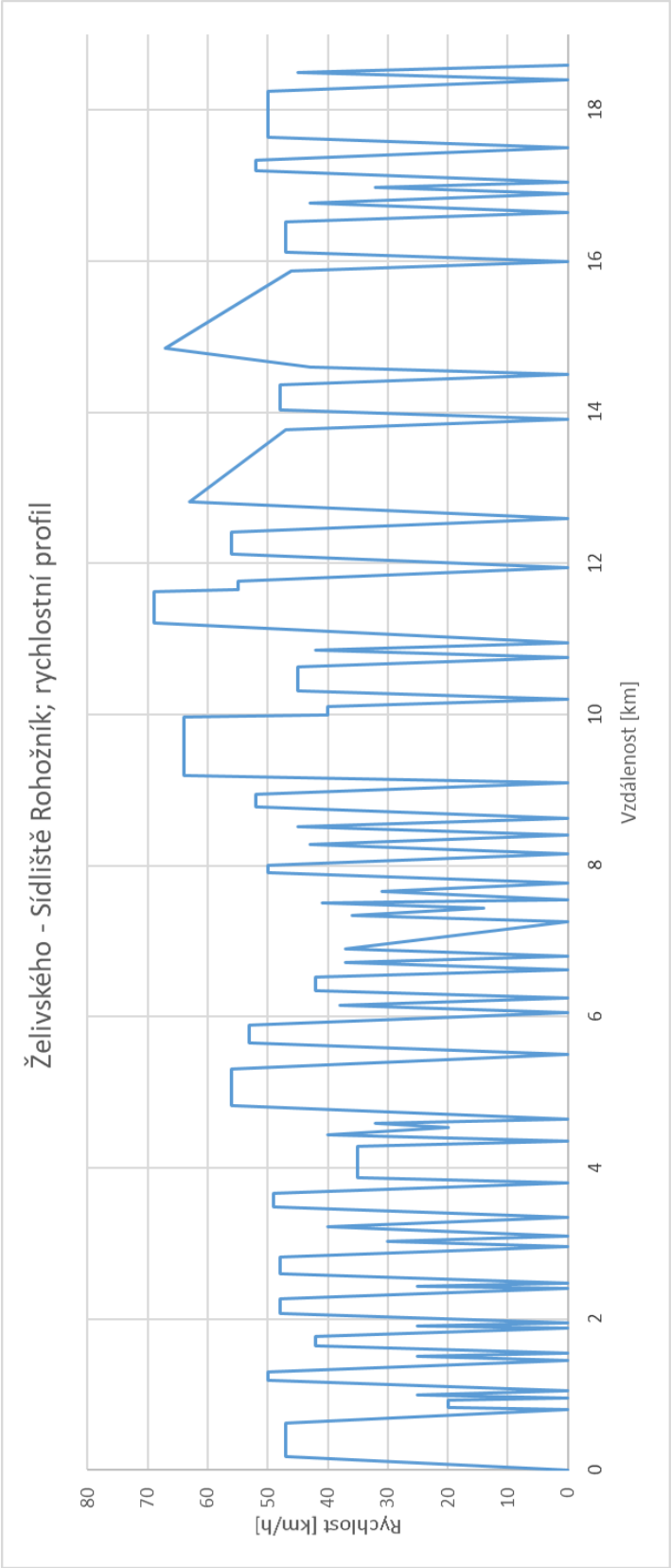
Platí od: 13.12.2015

Želivského		↑ 5:44	↓ **6:03**	↑ 7:14	↓ **7:56**	↑ 9:19	↓ **9:56**	↑ 11:19	↓ **11:56**	↑ 13:19
Želivského		↑ 5:43	--	↑ 7:13	--	↑ 9:18	--	↑ 11:18	--	↑ 13:18
Sídliště Malešice		↑ 5:38	↓ 6:08	↑ 7:08	↓ 8:01	↑ 9:13	↓ 10:01	↑ 11:13	↓ 12:01	↑ 13:13
Depo Hostivař	↓ 4:34	↑ 5:34	↓ 6:13	↑ 7:04	↓ 8:07	↑ 9:08	↓ 10:07	↑ 11:08	↓ 12:07	↑ 13:08
Ústřední	↓ 4:38	↑ 5:29	↓ 6:17	↑ 6:59	↓ 8:12	↑ 9:03	↓ 10:12	↑ 11:03	↓ 12:12	↑ 13:03
Obchodní centrum Štěrboholy	--	--	--	--	↓ 8:14	↑ 9:00	↓ 10:14	↑ 11:00	↓ 12:14	↑ 13:00
Dolní Počernice	↓ 4:44	↑ 5:23	↓ 6:23	↑ 6:53	↓ 8:22	↑ 8:53	↓ 10:22	↑ 10:53	↓ 12:22	↑ 12:53
Běchovice	↓ 4:49	↑ 5:18%	↓ 6:28%	↑ 6:48%	↓ 8:27%	↑ 8:48%	↓ 10:27%	↑ 10:48%	↓ 12:27%	↑ 12:48%
Sídliště Rohožník	↓ 4:58	↑ **5:09**	↓ 6:37	↑ **6:39**	↓ 8:36	↑ **8:39**	↓ 10:36	↑ **10:39**	↓ 12:36	↑ **12:39**
Želivského	↓ **13:56**	↑ 15:19	↓ **15:56**	↑ 17:19	↓ **17:56**	↑ 19:19	↓ **19:56**	↑ 21:18		
Želivského	--	↑ 15:18	--	↑ 17:18	--	↑ 19:18	--	↑ 21:17		
Sídliště Malešice	↓ 14:01	↑ 15:13	↓ 16:01	↑ 17:13	↓ 18:01	↑ 19:13	↓ 20:01	↑ 21:12		
Depo Hostivař	↓ 14:07	↑ 15:08	↓ 16:07	↑ 17:08	↓ 18:07	↑ 19:08	↓ 20:07	↑ 21:08		
Ústřední	↓ 14:12	↑ 15:03	↓ 16:12	↑ 17:03	↓ 18:12	↑ 19:03	↓ 20:12	↑ 21:03		
Obchodní centrum Štěrboholy	↓ 14:14	↑ 15:00	↓ 16:14	↑ 17:00	↓ 18:14	↑ 19:00	↓ 20:14	↑ 21:00		
Dolní Počernice	↓ 14:22	↑ 14:53	↓ 16:22	↑ 16:53	↓ 18:22	↑ 18:53	↓ 20:22	↑ 20:53		
Běchovice	↓ 14:27%	↑ 14:48%	↓ 16:27%	↑ 16:48%	↓ 18:27%	↑ 18:48%	↓ 20:27%	↑ 20:48%		
Sídliště Rohožník	↓ 14:36	↑ **14:39**	↓ 16:36	↑ **16:39**	↓ 18:36	↑ **18:39**	↓ 20:36	↑ **20:39**		

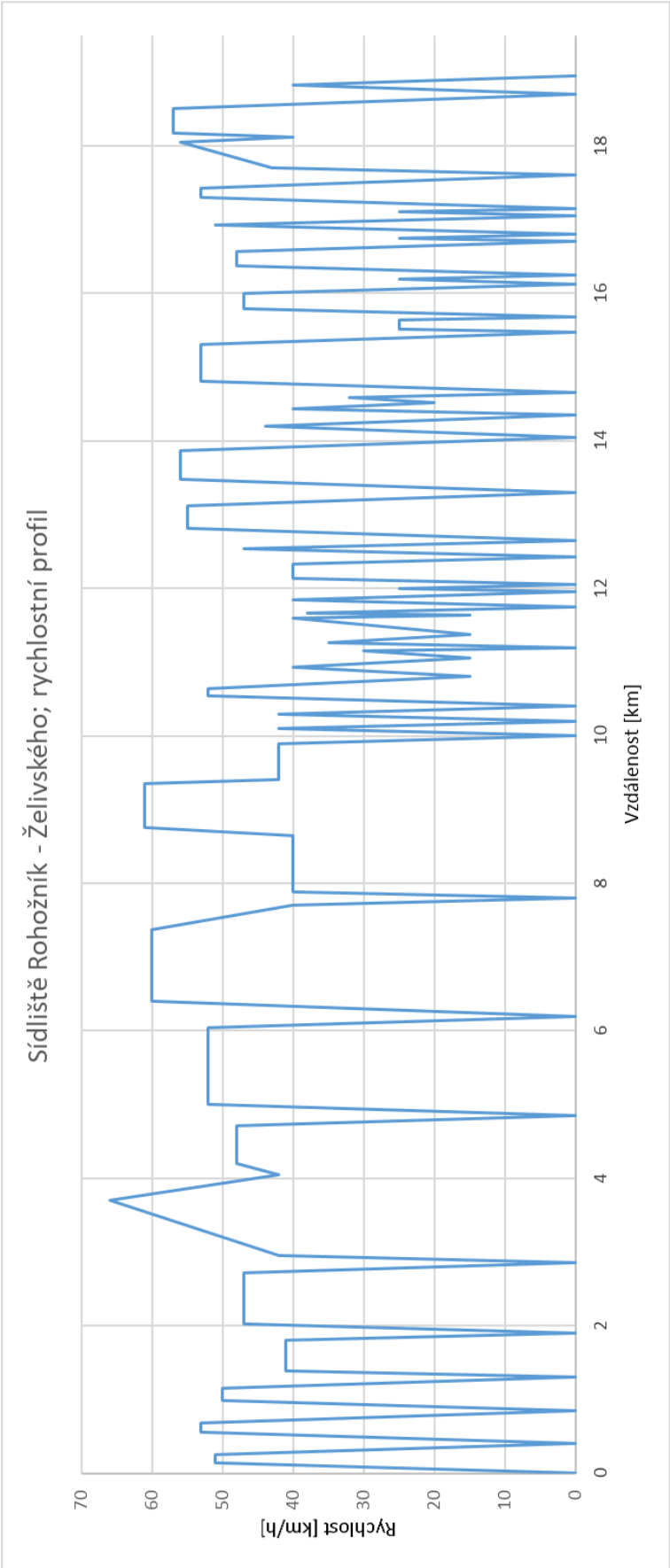
Poznámky:

% = Vzájemný přestup mezi linkami 163 a 261 (max. 3 min)

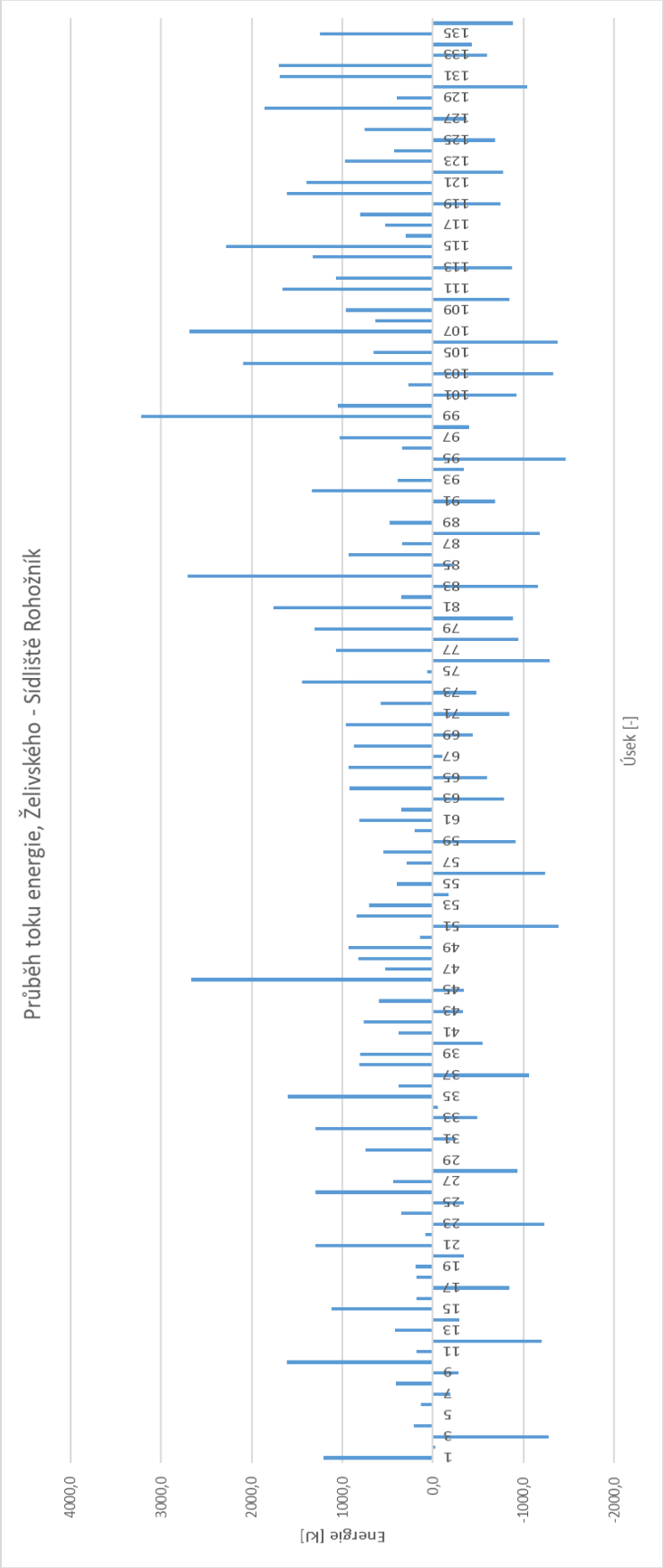
Příloha 2: Rychlostní profil na trase Želivského – Sídliště Rohožník



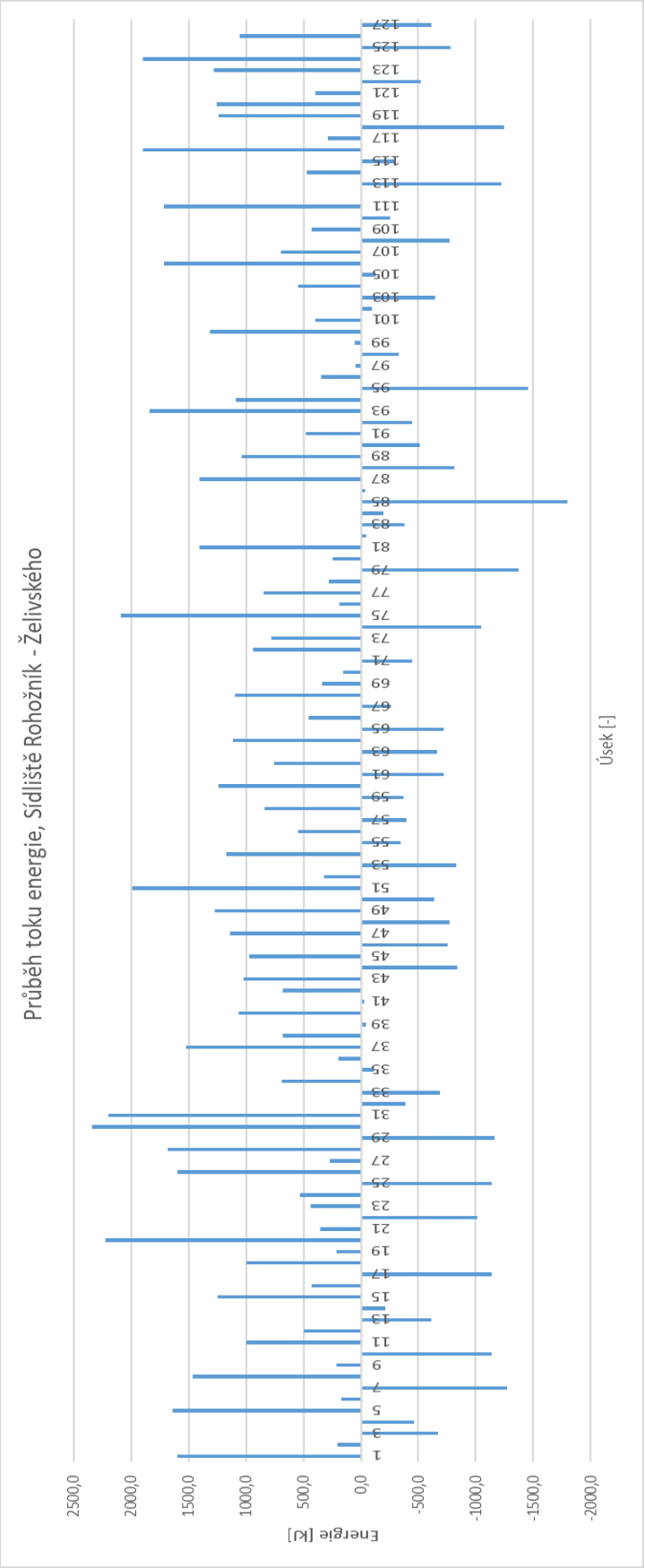
Příloha 3: Rychlostní profil na trase Sídliště Rohožník – Želivského



Příloha 4: Průběh toku energie (Želivského – Sídliště Rohožník)



Příloha 5: Průběh toku energie (Sídliště Rohožník – Želivského)



Příloha 6: Naměřené hodnoty (Ž – SR)

Úsek		vzdálenost [km]	rychlost [m/s]	nadm. v. [m.n.m]	zatížení [lidi]
	start	0,000	0,000	265,0	22
1		0,175	13,056	261,8	22
2		0,625	13,056	253,6	22
3	Pod Třebešínem	0,800	0,000	250,5	21
4		0,822	5,556	250,1	21
5		0,825	5,556	250,0	21
6		0,926	5,556	249,5	21
7	semafor	0,950	0,000	249,4	21
8		1,000	6,944	249,2	21
9	Na Palouku	1,050	0,000	249,0	23
10		1,188	13,889	248,3	23
11		1,302	13,889	247,8	23
12	semafor	1,450	0,000	247,1	23
13		1,500	6,944	246,9	23
14	Hostýnská	1,550	0,000	246,6	21
15		1,647	11,667	246,2	21
16		1,770	11,667	245,6	21
17	semafor	1,875	0,000	245,1	21
18		1,900	4,630	245,0	21
19		1,913	6,944	244,8	21
20	Plaňanská	1,950	0,000	244,3	18
21		2,077	13,333	242,5	18
22		2,263	13,333	239,8	18
23	Sídliště Malešice	2,400	0,000	237,9	18
24		2,438	6,944	237,3	18
25	semafor	2,475	0,000	236,8	18
26		2,602	13,333	235,0	18
27		2,813	13,333	235,0	18
28		2,900	4,875	235,0	18
29	Limuzská	2,950	0,000	235,6	18
30		3,025	8,333	236,6	18
31	semafor	3,100	0,000	237,5	18
32		3,225	11,111	239,1	18
33		3,300	4,444	240,0	18
34	Černokostelecká	3,350	0,000	240,0	21
35		3,482	13,611	240,0	21
36		3,657	13,611	240,0	21
37	Depo Hostivař	3,800	0,000	240,0	21
38		3,868	9,722	240,0	21
39		4,277	9,722	240,0	21
40	Depo Hostivař	4,350	0,000	240,0	22
41		4,400	6,300	240,0	22
42		4,438	11,111	240,6	22
43		4,526	5,556	242,1	22
44		4,589	8,889	243,2	22
45	semafor	4,650	0,000	244,2	22
46		4,875	15,556	247,9	22
47		5,000	15,556	250,0	22
48		5,100	15,556	255,0	22
49		5,250	15,556	260,0	22
50		5,314	15,556	260,0	22
51	Na Homoli	5,500	0,000	260,0	21
52		5,600	9,509	260,0	21

53		5,655	14,722	257,3	21
54		5,700	14,722	255,0	21
55		5,883	14,722	255,0	21
56	Průmyslová	6,050	0,000	255,0	20
57		6,100	5,278	255,0	20
58		6,150	10,556	253,8	20
59	semafor	6,250	0,000	251,3	20
60		6,300	6,000	250,0	20
61		6,347	11,667	250,0	20
62		6,520	11,667	250,0	20
63	semafor	6,625	0,000	250,0	20
64		6,713	10,278	250,0	20
65	Ústřední	6,800	0,000	250,0	18
66		6,898	10,278	250,0	18
67	Obch. Centrum	7,250	0,000	250,0	17
68		7,340	10,000	250,0	17
69		7,430	3,889	250,0	17
70		7,510	11,389	250,0	17
71	odbocovani	7,550	0,000	250,0	17
72		7,663	8,611	248,7	17
73	semfor	7,775	0,000	247,4	17
74		7,913	13,889	245,7	17
75		8,002	13,889	244,7	17
76	Štěrboholy	8,150	0,000	242,9	16
77		8,275	11,944	241,5	16
78	Škola Štěrboholy	8,400	0,000	240,0	15
79		8,513	12,500	240,0	15
80	Drobná	8,625	0,000	240,0	16
81		8,774	14,444	240,0	16
82		8,940	14,444	240,0	16
83	Novoštěrboholská	9,100	0,000	240,0	14
84		9,350	17,778	240,0	14
85		9,500	17,778	235,0	14
86		9,900	17,778	235,0	14
87		9,940	17,778	236,0	14
88		10,000	11,111	237,5	14
89		10,100	11,111	240,0	14
90		10,105	11,111	240,0	14
91	Rtyňská	10,200	0,000	240,0	20
92		10,312	12,500	240,0	20
93		10,500	12,500	240,0	20
94		10,630	12,500	234,8	20
95	semafor	10,750	0,000	230,0	20
96		10,800	5,833	230,0	20
97		10,850	11,667	231,7	20
98	Dolní Počernice	10,950	0,000	235,0	21
99		11,212	19,167	235,0	21
100		11,590	19,167	235,0	21
101		11,650	15,278	235,0	21
102		11,770	15,278	235,0	21
103	semafor	11,950	0,000	235,0	21
104		12,123	15,556	235,0	21
105		12,414	15,556	235,0	21
106	Nádraží Běchovice	12,600	0,000	235,0	22
107		12,819	17,500	235,0	22
108		13,350	15,015	235,0	22

109		13,769	13,056	238,8	22
110	Běchovice	13,900	0,000	240,0	20
111		14,027	13,333	241,2	20
112		14,363	13,333	244,2	20
113	Na Vaňhově	14,500	0,000	245,5	20
114		14,602	11,944	246,4	20
115		14,849	18,611	248,6	20
116		15,000	17,754	250,0	20
117		15,550	14,624	250,0	20
118		15,874	12,778	254,1	20
119	Blatov	16,000	0,000	255,6	17
120		16,122	13,056	257,1	17
121		16,519	13,056	262,1	17
122	Rápošovská	16,650	0,000	263,8	17
123		16,750	9,556	265,0	17
124		16,775	11,944	265,2	17
125	semafor	16,900	0,000	266,0	17
126		16,975	8,889	266,5	17
127	Újezd nad Lesy	17,050	0,000	266,9	15
128		17,199	14,444	267,9	15
129		17,340	14,444	268,8	15
130	Sudějovická	17,500	0,000	269,8	12
131		17,638	13,889	270,7	12
132		18,252	13,889	274,7	12
133		18,300	9,360	275,0	12
134	Rohožnická	18,400	0,000	275,0	10
135		18,500	12,500	275,0	10
136	Sídliště Rohožník	18,600	0,000	275,0	10

Příloha 7: Výpočet energií (Ž – SR)

Úsek	Evz [J]	Ef [J]	Eα [J]	Ez [J]	E_suma [J]
1	29160,9	312826,0	-379183,0	1239494,4	1202298,3
2	149970,4	804409,7	-975042,0	0,0	-20662,0
3	29160,9	312826,0	-379183,0	-1239494,4	-1276690,6
4	665,2	39165,4	-47473,2	223287,0	215644,4
5	178,3	5248,2	-6361,4	0,0	-935,0
6	6110,7	179917,5	-55788,4	0,0	130239,8
7	716,4	42184,6	-13080,5	-223287,0	-193466,5
8	2357,3	88840,9	-27547,6	348886,0	412536,6
9	2357,3	88840,9	-27547,6	-348886,0	-285235,4
10	25984,5	247862,8	-76856,7	1410011,6	1607002,2
11	42932,5	204763,7	-63492,6	0,0	184203,5
12	27983,3	266929,2	-82768,7	-1410011,6	-1197867,8
13	2357,3	89944,5	-27889,8	352502,9	416914,9
14	2357,3	89944,5	-27889,8	-352502,9	-288090,9
15	12936,9	172746,1	-53564,7	984695,8	1116814,2
16	32754,6	218685,2	-67809,4	0,0	183630,4
17	13932,1	186034,3	-57685,0	-984695,8	-842414,5
18	523,8	44420,4	-13773,8	155060,4	186230,9
19	851,3	22208,2	-21090,9	193825,6	195794,1
20	1768,0	66624,6	-63272,7	-348886,0	-343766,1
21	22069,8	221403,3	-210264,3	1266133,3	1299342,2
22	64745,3	324760,2	-308421,3	0,0	81084,3
23	23767,5	238434,3	-226438,4	-1266133,3	-1230370,0
24	1768,0	65383,1	-62093,7	343460,6	348518,1
25	1768,0	65383,1	-62093,7	-343460,6	-338403,2
26	22069,8	221403,3	-210264,3	1266133,3	1299342,2
27	73435,3	368386,4	0,0	0,0	441821,7
28	17093,1	151272,1	0,0	-1096874,6	-928509,4
29	1161,7	87179,6	72649,6	-169258,8	-8267,9
30	5091,8	130769,3	108974,5	494583,3	739418,9
31	5091,8	130769,3	108974,5	-494583,3	-249747,7
32	15086,8	217948,9	181624,1	879259,3	1293919,1
33	10500,4	130769,3	108974,5	-738577,8	-488333,6
34	965,6	87186,4	0,0	-140681,5	-52529,6
35	23967,3	235129,2	0,0	1340280,4	1599376,9
36	63449,0	311231,1	0,0	0,0	374680,1
37	25810,9	253216,0	0,0	-1340280,4	-1061253,5
38	6238,9	119963,9	0,0	683816,6	810019,3
39	75732,0	728104,2	0,0	0,0	803836,2
40	6718,8	129191,9	0,0	-683816,6	-547905,9
41	1940,1	89393,6	0,0	288625,7	379959,4
42	6090,1	68257,6	75841,8	609152,1	759341,6
43	13304,1	157638,8	175154,2	-673333,3	-327236,2
44	6751,7	112360,1	124844,6	350133,3	594089,7
45	4694,8	108649,5	120721,7	-574577,8	-340511,7
46	53226,2	402215,5	446906,1	1759644,4	2661992,2
47	59140,3	223453,0	248281,1	0,0	530874,5
48	47312,2	178564,2	595213,9	0,0	821090,4
49	70968,3	268032,0	595626,7	0,0	934627,0
50	30216,0	114182,7	0,0	0,0	144398,8
51	44032,3	332785,4	0,0	-1759644,4	-1382826,8
52	8840,6	177683,6	0,0	654211,0	840735,2

53	16461,6	97279,3	-324264,5	913822,2	703298,6
54	19148,0	80182,6	-267275,3	0,0	-167944,7
55	77669,4	325647,8	0,0	0,0	403317,2
56	35328,3	296244,8	0,0	-1568033,2	-1236460,1
57	1361,6	88290,0	0,0	200472,0	290123,6
58	6807,9	88262,4	-147104,0	601416,0	549382,3
59	10892,7	176524,8	-294208,1	-801888,0	-908678,5
60	1759,7	88262,4	-147104,0	259092,0	202010,1
61	7945,6	83385,0	0,0	720499,7	811830,3
62	46061,2	305619,2	0,0	0,0	351680,4
63	13932,1	184880,8	0,0	-979591,7	-780778,8
64	9036,1	154507,5	0,0	760238,7	923782,2
65	9036,1	154507,5	0,0	-760238,7	-596695,1
66	10109,1	170695,1	0,0	752316,2	933120,5
67	36362,0	613982,2	0,0	-752316,2	-101971,9
68	8798,6	155942,2	0,0	708450,0	873190,8
69	10129,3	155942,2	0,0	-601307,9	-435236,4
70	11327,2	138615,3	0,0	811765,6	961708,1
71	5072,2	69307,7	0,0	-918907,8	-844527,9
72	8155,4	194914,3	-152873,9	525324,4	575520,1
73	8155,4	194914,3	-152873,9	-525324,4	-475128,7
74	25984,5	238725,1	-187235,4	1366608,8	1444083,0
75	33503,2	153900,6	-120706,3	0,0	66697,4
76	27983,3	257088,6	-201638,1	-1366608,8	-1283175,0
77	17434,7	215192,0	-168778,0	1005393,8	1069242,4
78	17434,7	215192,0	-168778,0	-1005393,8	-941545,1
79	17184,8	192444,6	0,0	1095234,4	1304863,8
80	17184,8	192444,6	0,0	-1095234,4	-885605,0
81	30398,2	256578,2	0,0	1470300,0	1757276,4
82	67505,6	284892,9	0,0	0,0	352398,5
83	32736,5	276315,0	0,0	-1470300,0	-1161248,5
84	77244,4	424895,6	0,0	2203496,3	2705636,4
85	92693,3	254795,9	-566213,0	0,0	-218723,8
86	247182,2	679833,0	0,0	0,0	927015,2
87	24718,2	67962,1	113270,1	0,0	205950,4
88	25780,3	101943,1	169905,2	-1342755,6	-1045127,0
89	24138,9	169905,2	283175,3	0,0	477219,3
90	1215,0	8554,4	0,0	0,0	9769,4
91	11462,0	161403,8	0,0	-860740,7	-687874,9
92	17048,4	197075,9	0,0	1124531,3	1338655,6
93	57555,5	332664,1	0,0	0,0	390219,6
94	39716,0	229370,6	-611654,9	0,0	-342568,3
95	18330,5	211726,7	-564604,5	-1124531,3	-1459078,6
96	1663,3	88290,0	0,0	244897,9	334851,2
97	8316,6	88241,0	196091,1	734693,7	1027342,4
98	13306,6	176482,0	392182,2	-979591,7	-397620,9
99	94239,0	466243,2	0,0	2657674,0	3218156,2
100	271223,0	670932,0	0,0	0,0	942155,0
101	35239,8	106610,2	0,0	-969065,7	-827215,8
102	54972,1	214026,1	0,0	0,0	268998,1
103	40970,4	319024,8	0,0	-1688608,2	-1328613,1
104	40887,1	307107,5	0,0	1750570,4	2098565,0
105	137690,7	517104,9	0,0	0,0	654795,6
106	44032,3	330731,2	0,0	-1750570,4	-1375806,9
107	65493,2	391097,1	0,0	2227050,0	2683640,3
108	276145,2	949807,3	0,0	-587581,0	638371,5

109	162125,4	748884,7	453869,5	-399974,6	964905,1
110	21847,9	234404,5	142063,3	-1239494,4	-841178,7
111	22069,8	224219,3	135890,5	1279466,7	1661646,3
112	116885,3	593750,0	359848,5	0,0	1070483,7
113	23767,5	241466,9	146343,6	-1279466,7	-867888,6
114	14213,7	179939,9	109054,5	1026794,2	1330002,3
115	118286,8	436857,8	264762,3	1466055,6	2285962,5
116	97456,4	266065,8	161252,0	-224415,3	300358,9
117	284465,9	971190,0	0,0	-729309,6	526346,2
118	119605,4	572792,2	477326,8	-364059,1	805665,2
119	20047,0	221755,8	184796,5	-1175065,7	-748466,5
120	20287,4	210935,6	175779,7	1207535,5	1614538,2
121	132353,3	688064,3	573386,9	0,0	1393804,5
122	21847,9	227161,4	189301,2	-1207535,5	-769225,0
123	8926,6	173255,6	144379,7	646876,1	973437,9
124	5718,6	43316,4	18630,7	363867,8	431533,5
125	17434,7	216581,9	93153,5	-1010743,9	-683573,8
126	5793,3	129949,1	55892,1	559763,0	751397,5
127	5793,3	129949,1	55892,1	-559763,0	-368128,4
128	30398,2	254928,2	109646,5	1462475,9	1857448,8
129	57306,9	240296,2	103353,2	0,0	400956,3
130	32736,5	274538,0	118080,9	-1462475,9	-1037120,5
131	25984,5	231133,6	99412,3	1330439,8	1686970,2
132	231517,5	1029680,9	442873,5	0,0	1704071,9
133	13269,0	81165,6	34909,9	-726196,4	-596851,9
134	8564,9	167751,0	0,0	-604243,4	-427927,5
135	15275,4	165543,8	0,0	1065937,5	1246756,6
136	15275,4	165543,8	0,0	-1065937,5	-885118,4

Příloha 8: Výpočet výkonu, úhlové rychlosti, točivého momentu a účinnosti motoru a měniče dle prof. Čeřovského (Ž – SR)

Úsek	P [W]	ω_wheel [s-1]	T [Nm]	η_motor	η_DC/AC
1	44847,6	15,0	2985,1	0,907	0,963
2	-599,5	30,0	19,9	0,040	0,492
3	-47622,6	15,0	3169,8	0,911	0,964
4	27171,2	6,4	4250,1	0,937	0,955
5	-1758,3	12,8	137,5	0,362	0,731
6	7145,6	12,8	558,9	0,697	0,901
7	-22635,6	6,4	3540,6	0,936	0,951
8	28648,4	8,0	3584,9	0,935	0,956
9	-19808,0	8,0	2478,7	0,923	0,947
10	80992,9	16,0	5067,5	0,931	0,969
11	22475,9	32,0	703,1	0,582	0,951
12	-56060,2	16,0	3507,5	0,914	0,965
13	28952,4	8,0	3622,9	0,935	0,956
14	-20006,3	8,0	2503,5	0,923	0,948
15	67008,9	13,4	4991,1	0,935	0,967
16	17406,6	26,9	648,3	0,596	0,944
17	-46934,5	13,4	3495,9	0,921	0,964
18	17243,6	5,3	3236,6	0,935	0,943
19	90645,4	13,3	6805,7	0,940	0,969
20	-31830,2	8,0	3983,0	0,936	0,958
21	68215,5	15,3	4445,9	0,927	0,967
22	5804,3	30,7	189,1	0,280	0,886
23	-59980,5	15,3	3909,2	0,922	0,966
24	32270,2	8,0	4038,1	0,937	0,958
25	-31333,6	8,0	3920,9	0,936	0,958
26	68215,5	15,3	4445,9	0,927	0,967
27	27884,4	30,7	908,7	0,650	0,955
28	-97442,0	21,0	4650,4	0,918	0,970
29	-403,1	5,6	71,8	0,365	0,396
30	41078,8	9,6	4283,6	0,936	0,962
31	-13874,9	9,6	1446,8	0,877	0,936
32	57507,5	12,8	4497,6	0,933	0,966
33	-50642,0	17,9	2829,0	0,893	0,964
34	-2334,6	5,1	456,5	0,794	0,779
35	82253,7	15,7	5251,4	0,933	0,969
36	29115,1	31,3	929,4	0,652	0,956
37	-50680,3	15,7	3235,6	0,910	0,964
38	58321,4	11,2	5212,8	0,938	0,966
39	19071,6	22,4	852,3	0,691	0,946
40	-36631,4	11,2	3274,2	0,924	0,960
41	23937,4	7,2	3301,8	0,934	0,952
42	173124,6	20,0	8640,6	0,941	0,972
43	-30923,8	19,2	1612,3	0,825	0,957
44	68263,3	16,6	4106,8	0,921	0,967
45	-24899,9	10,2	2434,2	0,913	0,953
46	92019,5	17,9	5140,5	0,929	0,969
47	66064,4	35,8	1845,3	0,768	0,967
48	127725,2	35,8	3567,6	0,862	0,971
49	96924,3	35,8	2707,3	0,828	0,970
50	35171,0	35,8	982,4	0,640	0,960
51	-57782,4	17,9	3227,9	0,903	0,966
52	39974,6	10,9	3652,9	0,929	0,961

53	155445,2	27,9	5574,5	0,916	0,972
54	-54722,4	33,9	1615,0	0,752	0,965
55	32398,1	33,9	956,2	0,644	0,958
56	-54590,9	16,9	3222,3	0,906	0,965
57	15312,1	6,1	2521,1	0,930	0,939
58	86985,5	18,2	4774,1	0,925	0,969
59	-47958,0	12,1	3948,1	0,929	0,964
60	12120,6	6,9	1755,4	0,911	0,930
61	151860,0	20,3	7469,7	0,938	0,972
62	23705,9	26,9	882,9	0,668	0,952
63	-43500,5	13,4	3240,1	0,917	0,963
64	54253,9	11,8	4587,2	0,935	0,965
65	-35044,0	11,8	2963,0	0,918	0,959
66	48985,1	11,8	4141,7	0,932	0,964
67	-1488,2	11,8	125,8	0,356	0,699
68	48510,6	11,5	4215,5	0,933	0,964
69	-33583,1	16,0	2101,2	0,874	0,959
70	91829,8	17,6	5223,2	0,930	0,969
71	-120227,9	13,1	9173,5	0,940	0,971
72	22026,1	9,9	2222,8	0,909	0,950
73	-18183,9	9,9	1835,0	0,895	0,945
74	72781,8	16,0	4553,7	0,927	0,968
75	10428,6	32,0	326,2	0,393	0,923
76	-60052,6	16,0	3757,3	0,918	0,966
77	51086,0	13,7	3716,6	0,923	0,964
78	-44984,9	13,7	3272,8	0,917	0,963
79	72492,4	14,4	5039,6	0,934	0,968
80	-49200,3	14,4	3420,3	0,917	0,964
81	85160,3	16,6	5123,3	0,931	0,969
82	30760,9	33,2	925,3	0,640	0,957
83	-52256,2	16,6	3143,8	0,905	0,965
84	96200,4	20,5	4702,3	0,920	0,970
85	-25922,8	40,9	633,6	0,508	0,954
86	41200,7	40,9	1007,0	0,621	0,962
87	91533,5	40,9	2237,1	0,783	0,969
88	-251604,6	33,2	7568,3	0,925	0,973
89	53024,4	25,6	2073,5	0,828	0,965
90	21566,3	25,6	843,3	0,666	0,950
91	-40240,7	12,8	3147,2	0,918	0,962
92	74964,7	14,4	5211,5	0,935	0,968
93	25891,3	28,8	900,0	0,660	0,954
94	-32939,3	28,8	1145,0	0,711	0,958
95	-75993,7	14,4	5283,0	0,935	0,968
96	19533,0	6,7	2909,8	0,932	0,947
97	179784,9	20,1	8927,5	0,941	0,972
98	-23194,6	13,4	1727,6	0,868	0,951
99	117532,7	22,1	5328,7	0,923	0,971
100	47823,1	44,1	1084,1	0,624	0,964
101	-237441,6	39,6	5990,3	0,903	0,973
102	34118,5	35,2	970,3	0,640	0,959
103	-56526,4	17,6	3215,2	0,904	0,966
104	94435,4	17,9	5275,5	0,930	0,970
105	34999,4	35,8	977,6	0,639	0,959
106	-57489,1	17,9	3211,5	0,902	0,966
107	107345,6	20,1	5330,4	0,927	0,970
108	19535,7	37,4	522,1	0,477	0,947

109	32330,2	32,3	1000,9	0,663	0,958
110	-41880,0	15,0	2787,6	0,902	0,962
111	87236,4	15,3	5685,5	0,936	0,969
112	42446,2	30,7	1383,2	0,738	0,962
113	-42309,6	15,3	2757,5	0,900	0,962
114	77944,3	13,7	5670,6	0,937	0,968
115	141160,3	35,2	4014,5	0,876	0,972
116	36243,1	41,8	866,1	0,581	0,960
117	15492,5	37,3	415,8	0,422	0,940
118	34026,0	31,5	1079,1	0,683	0,959
119	-38074,2	14,7	2589,3	0,898	0,961
120	86566,7	15,0	5761,9	0,936	0,969
121	45820,0	30,0	1524,9	0,759	0,963
122	-38297,6	15,0	2549,1	0,895	0,961
123	46508,7	11,0	4229,5	0,934	0,963
124	185559,4	24,7	7499,9	0,934	0,973
125	-32659,6	13,7	2376,1	0,895	0,958
126	44527,3	10,2	4353,0	0,936	0,963
127	-21815,0	10,2	2132,7	0,904	0,950
128	90014,8	16,6	5415,3	0,933	0,969
129	41228,3	33,2	1240,2	0,704	0,962
130	-46670,4	16,6	2807,7	0,897	0,963
131	85023,3	16,0	5319,7	0,933	0,969
132	38557,5	32,0	1206,2	0,704	0,961
133	-143391,4	26,8	5359,6	0,916	0,972
134	-20027,0	10,8	1859,3	0,891	0,948
135	77922,3	14,4	5417,1	0,936	0,968
136	-55319,9	14,4	3845,8	0,923	0,965

Příloha 9: Účinnost motoru dle prof. Nováka, účinnost baterie a celková spotřeba energie oběma metodikami (Ž – SR)

Usek	η_motor_celk	η_bat_celk	Finální výpočet spotřeby energie	
			Čeřovský	Novák
1	0,900	0,991	1446724,20	1458040,89
2	0,000	1,000	-389,72	0,00
3	0,891	0,995	-1069860,78	-1046901,84
4	0,858	0,995	252460,27	275444,27
5	0,000	1,000	-237,54	0,00
6	0,701	0,998	216485,28	215168,08
7	0,842	0,997	-164858,95	-148374,34
8	0,878	0,995	483605,54	515007,59
9	0,854	0,998	-238922,79	-221112,20
10	0,910	0,985	1884468,63	1928023,04
11	0,887	0,993	349055,62	229060,03
12	0,897	0,994	-1008259,12	-989397,08
13	0,878	0,995	488553,78	520437,41
14	0,855	0,998	-241489,64	-223495,40
15	0,902	0,987	1303470,68	1350188,77
16	0,842	0,995	341747,40	241965,88
17	0,890	0,995	-713810,60	-689705,29
18	0,853	0,997	220574,39	241952,75
19	0,894	0,983	227633,25	239438,85
20	0,859	0,996	-294899,38	-270493,95
21	0,909	0,987	1528464,33	1560107,76
22	0,679	0,996	342572,86	141080,62
23	0,898	0,993	-1044371,98	-1017582,52
24	0,876	0,994	407058,03	435161,82
25	0,859	0,996	-290164,13	-266322,16
26	0,909	0,987	1528464,33	1560107,76
27	0,900	0,992	746580,65	539214,06
28	0,914	0,989	-784811,01	-781089,20
29	0,000	1,000	-1145,88	0,00
30	0,886	0,992	862239,32	910716,42
31	0,813	0,999	-196386,21	-182169,48
32	0,901	0,989	1512987,09	1566407,51
33	0,891	0,994	-401266,11	-400561,85
34	0,472	1,000	-31179,84	-18528,71
35	0,909	0,985	1872351,88	1921487,45
36	0,905	0,992	631435,01	454757,37
37	0,893	0,994	-888952,26	-872757,23
38	0,891	0,989	941739,80	990881,31
39	0,830	0,995	1286003,52	1071718,61
40	0,880	0,996	-464854,77	-442599,54
41	0,872	0,995	447026,75	478615,91
42	0,906	0,968	893258,06	927927,04
43	0,844	0,997	-247347,81	-253134,55
44	0,911	0,987	703753,41	711639,16
45	0,864	0,997	-283531,09	-268546,83
46	0,915	0,983	3134200,57	3181558,40
47	0,938	0,985	755730,21	618912,08
48	0,928	0,974	1048609,28	973967,84
49	0,936	0,980	1237816,69	1095553,37
50	0,924	0,990	247388,99	171407,34
51	0,898	0,993	-1149878,34	-1143238,98
52	0,893	0,992	987663,77	1027322,52

53	0,917	0,970	847839,67	847485,05
54	0,930	0,995	-116463,27	-143901,36
55	0,916	0,991	687225,01	482805,08
56	0,896	0,994	-1031219,96	-1019984,75
57	0,861	0,997	346774,22	374757,63
58	0,915	0,984	649112,93	655876,64
59	0,887	0,994	-777008,31	-741527,91
60	0,851	0,998	248857,18	266518,48
61	0,911	0,972	954799,20	982512,35
62	0,875	0,994	580133,78	442530,39
63	0,888	0,995	-658380,68	-637347,64
64	0,897	0,990	1077795,61	1123268,73
65	0,880	0,996	-502236,48	-481461,69
66	0,897	0,991	1092314,00	1134112,34
67	0,000	1,000	-24361,53	0,00
68	0,896	0,991	1020955,89	1062884,46
69	0,867	0,996	-348708,71	-345950,53
70	0,914	0,983	1130864,72	1150325,96
71	0,859	0,986	-729362,14	-666386,57
72	0,875	0,996	697421,45	723957,62
73	0,842	0,998	-384997,28	-362067,93
74	0,910	0,986	1699758,59	1731246,92
75	0,796	0,995	192379,72	94989,22
76	0,899	0,993	-1084895,71	-1062265,50
77	0,903	0,990	1263196,10	1291740,38
78	0,889	0,995	-793782,94	-769875,42
79	0,906	0,986	1525281,99	1572471,69
80	0,892	0,994	-747503,81	-727139,01
81	0,912	0,984	2062979,72	2105491,46
82	0,912	0,991	604573,90	423965,13
83	0,894	0,994	-967565,96	-955994,07
84	0,920	0,982	3218365,59	3218199,21
85	0,909	0,998	-101538,73	-181769,69
86	0,936	0,988	1636200,13	1085664,68
87	0,939	0,980	288554,26	240529,90
88	0,874	0,970	-876938,40	-828157,23
89	0,921	0,989	629160,53	566024,55
90	0,861	0,994	16181,95	12524,19
91	0,885	0,995	-579907,18	-559265,57
92	0,905	0,986	1563448,00	1614133,45
93	0,889	0,993	650580,63	482552,75
94	0,896	0,997	-223455,19	-281695,50
95	0,895	0,991	-1256349,06	-1202775,22
96	0,868	0,996	396495,24	425932,13
97	0,904	0,967	1209323,91	1259191,36
98	0,843	0,997	-314351,25	-305425,99
99	0,920	0,978	3824758,44	3837535,63
100	0,942	0,987	1654141,52	1096070,00
101	0,882	0,973	-678617,46	-662734,47
102	0,921	0,991	460618,43	320210,76
103	0,897	0,994	-1105589,17	-1097457,86
104	0,915	0,982	2468804,54	2509036,35
105	0,923	0,990	1123847,43	777486,88
106	0,897	0,993	-1143556,78	-1137140,47
107	0,919	0,980	3173541,37	3200289,27
108	0,890	0,993	1481866,15	794863,71

109	0,913	0,991	1596889,88	1158900,65
110	0,885	0,995	-697510,93	-684522,24
111	0,907	0,984	1940564,73	2001657,09
112	0,923	0,990	1586083,59	1268988,03
113	0,885	0,995	-718134,48	-706365,49
114	0,901	0,985	1549089,82	1610807,69
115	0,924	0,972	2878447,38	2728673,65
116	0,933	0,989	567641,76	353275,54
117	0,868	0,993	1391749,10	676765,41
118	0,914	0,991	1292124,51	965749,80
119	0,880	0,996	-617134,96	-605159,34
120	0,906	0,984	1884005,55	1947553,08
121	0,924	0,989	2006490,12	1648496,28
122	0,880	0,996	-632508,03	-621730,30
123	0,894	0,991	1137159,38	1188078,95
124	0,906	0,965	512627,16	528531,45
125	0,873	0,996	-560936,32	-546889,70
126	0,890	0,992	876236,45	921481,75
127	0,856	0,998	-302821,80	-286560,70
128	0,912	0,983	2177197,65	2227538,78
129	0,926	0,990	623495,63	473944,44
130	0,889	0,995	-855612,91	-847931,80
131	0,910	0,984	1975562,71	2025519,46
132	0,921	0,990	2647878,67	2025362,69
133	0,912	0,983	-501298,03	-499257,98
134	0,845	0,998	-346057,82	-328432,36
135	0,905	0,985	1454861,24	1504579,18
136	0,895	0,994	-752365,61	-729338,70

Příloha 10: Naměřené hodnoty (SR – Ž)

Úsek		vzdálenost [km]	rychlost [m/s]	nadm. v. [m.n.m]	zatížení [lidi]
	start	0,000	0,00	275,00	6
1		0,143	14,17	275,00	6
2		0,246	14,17	275,00	6
3		0,300	9,18	275,00	6
4	Rohožnická	0,400	0,00	274,35	8
5		0,555	14,72	273,36	8
6		0,683	14,72	272,53	8
7	Zbyslavská	0,850	0,00	271,45	9
8		0,988	13,89	270,56	9
9		1,152	13,89	269,51	9
10	Sudějovická	1,300	0,00	268,55	12
11		1,393	11,39	267,95	12
12		1,800	11,39	265,32	12
13		1,850	5,71	265,00	12
14	Ujezd nad Lesy	1,900	0,00	264,38	15
15		2,022	13,06	262,85	15
16		2,719	13,06	254,14	15
17	Blatov	2,850	0,00	252,50	16
18		2,947	11,67	251,28	16
19		3,050	12,58	250,00	16
20		3,600	17,45	250,00	16
21		3,700	18,33	249,09	16
22		4,050	11,67	245,91	16
23		4,200	13,33	244,55	16
24		4,713	13,33	239,88	16
25	Běchovice	4,850	0,00	238,64	16
26		4,999	14,44	237,28	16
27		5,250	14,44	235,00	16
28		6,040	14,44	235,00	16
29	Nádraží Běchovice	6,200	0,00	235,00	15
30		6,398	16,67	235,00	15
31		7,375	16,67	235,00	15
32		7,705	11,11	235,00	15
33	Dolní Počernice	7,800	0,00	235,00	14
34		7,888	11,11	232,06	14
35		7,950	11,11	230,00	14
36		8,050	11,11	230,00	14
37		8,250	11,11	240,00	14
38		8,600	11,11	240,00	14
39		8,650	11,11	238,75	14
40		8,750	16,94	236,25	14
41		8,800	16,94	235,00	14
42		9,100	16,94	235,00	14
43		9,347	16,94	239,11	14
44		9,400	11,67	240,00	14
45		9,895	11,67	240,00	14
46	Drobná	10,000	0,00	240,00	15
47		10,100	11,67	240,00	15
48	Škola Štěrboholy	10,200	0,00	240,00	15
49		10,300	11,67	241,17	15
50	Štěrboholy	10,400	0,00	242,35	19
51		10,549	14,44	244,10	19
52		10,640	14,44	245,16	19

53		10,800	4,17	247,05	19
54		10,926	11,11	248,52	19
55		11,052	4,17	250,00	19
56		11,147	8,33	250,00	19
57	Obch. Centrum	11,200	0,00	250,00	27
58		11,268	9,72	250,00	27
59		11,372	4,17	250,00	27
60		11,598	11,11	250,00	27
61		11,635	4,17	250,00	27
62		11,664	10,56	250,00	27
63	semafor	11,750	0,00	250,00	27
64		11,850	11,11	250,00	27
65	semafor	11,950	0,00	250,00	27
66		12,000	6,94	250,00	27
67	Ústřední	12,050	0,00	250,00	27
68		12,138	11,11	250,00	27
69		12,300	11,11	250,00	27
70		12,330	11,11	250,75	27
71	semafor	12,425	0,00	253,13	27
72		12,500	8,70	255,00	27
73		12,538	13,06	255,00	27
74	Průmyslová	12,650	0,00	255,00	27
75		12,817	15,28	255,00	27
76		12,900	15,28	255,00	27
77		13,000	15,28	260,00	27
78		13,120	15,28	260,00	27
79	Na Homoli	13,300	0,00	260,00	26
80		13,350	4,50	260,00	26
81		13,473	15,56	255,91	26
82		13,500	15,56	255,00	26
83		13,600	15,56	250,00	26
84		13,864	15,56	243,40	26
85		14,000	4,18	240,00	26
86	semafor	14,050	0,00	240,00	26
87		14,200	12,22	240,00	26
88	Depo Hostivař	14,350	0,00	240,00	17
89		14,438	11,11	240,00	17
90		14,514	5,56	240,00	17
91		14,589	8,89	240,00	17
92	semafor	14,650	0,00	240,00	17
93		14,805	14,72	240,00	17
94		15,308	14,72	240,00	17
95	Černokostelecká	15,475	0,00	237,87	16
96		15,509	6,94	237,43	16
97		15,638	6,94	235,79	16
98	Limuzská	15,675	0,00	235,32	13
99		15,700	2,68	235,00	13
100		15,797	13,06	235,00	13
101		15,994	13,06	235,00	13
102		16,000	12,45	235,00	13
103	semafor	16,125	0,00	236,79	13
104		16,188	6,94	237,68	13
105	Sídliště Malešice	16,250	0,00	238,57	17
106		16,377	13,33	240,39	17
107		16,563	13,33	243,05	17
108	semafor	16,700	0,00	245,00	17

109		16,750	6,94	245,00	17
110	Plaňanská	16,800	0,00	245,00	23
111		16,924	14,17	245,00	23
112		16,926	14,17	245,00	23
113	Hostýnská	17,050	0,00	245,00	23
114		17,113	6,94	245,00	23
115	semafor	17,150	0,00	245,00	23
116		17,305	14,72	245,00	23
117		17,433	14,72	245,00	23
118	Na Palouku	17,600	0,00	245,00	23
119		17,702	11,94	245,00	23
120		18,000	15,04	245,00	23
121		18,050	15,56	246,43	23
122		18,113	11,11	248,21	23
123		18,175	15,83	250,00	23
124		18,507	15,83	259,49	23
125	Želivského	18,700	0,00	265,00	9
126		18,825	11,11	265,00	9
127	Želivského	18,950	0,00	265,00	0

Příloha 11: Výpočet energií (SR – Ž)

Úsek	Evz [J]	Ef [J]	Eα [J]	Ez [J]	E_suma [J]
1	28126,5	230983,9	0,0	1339033,3	1598143,7
2	40130,2	164781,2	0,0	0,0	204911,4
3	15146,4	87622,6	0,0	-777200,1	-674431,1
4	8232,3	161125,9	-69301,5	-561833,2	-461776,4
5	32804,8	252867,4	-108760,2	1462370,6	1639282,7
6	54438,6	209812,7	-90242,0	0,0	174009,3
7	35328,3	272318,8	-117126,4	-1462370,6	-1271849,9
8	25984,5	226571,7	-97450,2	1308738,4	1463844,4
9	61791,0	269393,1	-115868,0	0,0	215316,1
10	27983,3	244000,3	-104946,4	-1308738,4	-1141701,2
11	11748,2	155414,2	-66844,8	894587,7	994905,3
12	103365,5	683701,7	-294065,2	0,0	493001,9
13	7896,7	83495,4	-35912,0	-669928,5	-614448,4
14	1592,2	83868,9	-69890,8	-224659,2	-209088,8
15	20287,4	208248,5	-173540,5	1194752,0	1249747,4
16	232333,6	1192444,7	-993703,9	0,0	431074,3
17	21847,9	224267,7	-186889,7	-1194752,0	-1135526,1
18	12936,9	167370,0	-139475,0	959175,0	1000006,9
19	29569,6	176934,1	-147445,0	155504,0	214562,6
20	248737,6	946910,3	0,0	1030590,5	2226238,4
21	62620,2	172158,4	-104338,4	223305,5	353745,7
22	161579,7	602554,4	-365184,5	-1409400,0	-1010450,4
23	46029,8	258237,6	-156507,6	293625,0	441384,8
24	178405,0	883599,2	-535514,7	0,0	526489,5
25	23767,5	235430,3	-142685,0	-1252800,0	-1136287,2
26	30398,2	256567,6	-155495,5	1470300,0	1601770,3
27	102382,5	432065,9	-261858,1	0,0	272590,3
28	322076,9	1359257,3	0,0	0,0	1681334,1
29	32736,5	276315,0	0,0	-1470300,0	-1161248,5
30	53881,4	339408,5	0,0	1947083,3	2340373,3
31	530409,0	1670568,5	0,0	0,0	2200977,5
32	129457,8	564561,0	0,0	-1081713,0	-387694,1
33	11462,0	162451,9	0,0	-865370,4	-691456,5
34	10643,2	149791,8	-332870,7	860740,7	688305,1
35	14921,8	105004,1	-233342,3	0,0	-113416,5
36	24138,9	169958,3	0,0	0,0	194097,1
37	48277,8	339492,4	1131641,3	0,0	1519411,5
38	84486,1	594853,9	0,0	0,0	679340,0
39	12069,4	84952,6	-141587,6	0,0	-44565,6
40	40138,4	169905,2	-283175,3	1141019,4	1067887,8
41	28069,0	84952,6	-141587,6	0,0	-28566,1
42	168414,0	509874,7	0,0	0,0	678288,8
43	138425,8	419026,9	465585,4	0,0	1023038,1
44	22102,3	90777,1	100863,4	-1052793,5	-839050,7
45	131814,6	841801,8	0,0	0,0	973616,3
46	13932,1	177947,7	0,0	-948966,7	-757086,8
47	13306,6	171061,9	0,0	954070,8	1138439,3
48	13306,6	171061,9	0,0	-954070,8	-769702,4
49	13306,6	171050,1	133902,6	954070,8	1272330,1
50	13306,6	171050,1	133902,6	-954070,8	-635811,6
51	30398,2	261494,4	204704,8	1493772,2	1990369,6
52	36909,5	158753,4	124276,4	0,0	319939,3

53	35460,5	281609,3	220451,4	-1369475,3	-831954,1
54	17319,5	220746,7	172806,5	759592,0	1170464,7
55	17319,5	220746,7	172806,5	-759592,0	-348719,3
56	8059,2	166644,2	0,0	372890,6	547594,0
57	3626,6	93737,4	0,0	-497187,5	-399823,5
58	6238,9	124434,6	0,0	705083,9	835757,4
59	11452,1	192969,3	0,0	-575578,7	-371157,3
60	31088,6	416206,1	0,0	791420,7	1238715,4
61	5107,0	68370,6	0,0	-791420,7	-717943,1
62	3670,7	53735,4	0,0	701630,4	759036,5
63	9335,8	157963,5	0,0	-831135,6	-663836,3
64	12069,4	184305,4	0,0	920925,9	1117300,7
65	12069,4	184305,4	0,0	-920925,9	-724551,1
66	2357,3	92152,7	0,0	359736,7	454246,7
67	2357,3	92152,7	0,0	-359736,7	-265226,7
68	10643,2	162526,8	0,0	920925,9	1094096,0
69	39060,7	298236,7	0,0	0,0	337297,4
70	7249,7	55335,6	92226,0	0,0	154811,2
71	11462,0	174974,2	291623,6	-920925,9	-442866,2
72	5554,5	138185,9	230309,8	565090,4	939140,5
73	9026,0	69114,5	0,0	706363,0	784503,5
74	18746,3	207343,5	0,0	-1271453,4	-1045363,5
75	38043,9	307277,2	0,0	1741125,6	2086446,7
76	38006,2	153486,2	0,0	0,0	191492,4
77	45637,6	184075,4	613584,7	0,0	843297,8
78	54972,1	222002,2	0,0	0,0	276974,3
79	40970,4	330913,9	0,0	-1741125,6	-1369241,3
80	989,8	91600,9	0,0	150295,5	242886,2
81	31490,9	224919,2	-499820,5	1645645,2	1402234,9
82	12850,2	49730,9	-110513,1	0,0	-47932,0
83	47312,2	182973,2	-609910,6	0,0	-379625,2
84	124840,5	483254,6	-805424,3	0,0	-197329,3
85	34528,0	249323,5	-415539,2	-1666349,2	-1798036,9
86	853,5	91600,9	0,0	-129591,5	-37137,2
87	21906,0	274802,6	0,0	1108718,5	1405427,2
88	21906,0	274802,6	0,0	-1108718,5	-812009,9
89	10643,2	152794,6	0,0	874629,6	1038067,5
90	11393,4	130851,0	0,0	-655972,2	-513727,8
91	8112,1	130851,0	0,0	341105,6	480068,6
92	4694,8	105310,8	0,0	-559763,0	-449757,4
93	32804,8	268250,1	0,0	1535521,6	1836576,6
94	213359,2	872335,5	0,0	0,0	1085694,7
95	35328,3	288861,2	-245802,1	-1535521,6	-1457134,2
96	1624,0	59300,4	-50460,8	339843,8	350307,4
97	12112,5	221140,6	-188176,2	0,0	45076,9
98	1749,0	63862,0	-54342,4	-339843,8	-328575,2
99	175,7	42210,2	-35918,1	49838,0	56305,7
100	16801,3	163363,9	0,0	1132130,4	1312295,6
101	65699,8	332877,1	0,0	0,0	398576,9
102	1944,6	10322,9	0,0	-107654,6	-95387,0
103	18932,1	211046,7	200996,9	-1074313,8	-643338,1
104	2946,6	105523,4	100498,5	334418,4	543386,9
105	2946,6	105523,4	100498,5	-334418,4	-125449,9
106	22069,8	220001,8	209525,6	1259466,7	1711063,9
107	64745,3	322704,6	307337,7	0,0	694787,6
108	23767,5	236925,1	225642,9	-1259466,7	-773131,2

109	2357,3	86634,6	0,0	341652,2	430644,1
110	2357,3	86634,6	0,0	-341652,2	-252660,3
111	24306,8	222858,6	0,0	1466976,0	1714141,5
112	874,7	4009,9	0,0	0,0	4884,6
113	24306,8	222858,6	0,0	-1466976,0	-1219810,6
114	2965,7	113157,9	0,0	352502,9	468626,4
115	1749,0	66733,0	0,0	-352502,9	-284020,9
116	32804,8	278501,7	0,0	1584289,0	1895595,5
117	54438,6	231082,3	0,0	0,0	285520,9
118	35328,3	299924,9	0,0	-1584289,0	-1249035,8
119	14213,7	183321,3	0,0	1042844,6	1240379,6
120	107470,1	536242,2	0,0	609884,9	1253597,2
121	22880,5	89908,7	171254,8	115989,0	400033,0
122	22328,5	112385,9	214068,4	-866311,1	-517528,3
123	22861,2	112385,9	214068,4	930043,6	1279359,2
124	162814,0	597278,4	1137673,2	0,0	1897765,6
125	47262,7	346763,4	660501,8	-1832451,0	-777923,1
126	15086,8	205550,2	0,0	837592,6	1058229,6
127	15086,8	205550,2	0,0	-837592,6	-616955,6

Příloha 12: Výpočet výkonu, úhlové rychlosti, točivého momentu a účinnosti motoru a měniče dle prof. Čeřovského (SR – Ž)

Úsek	P [W]	ω [s-1]	T [Nm]	η_motor	η_DC/AC
1	78967,1	16,3	4843,9	0,915	0,968
2	28385,8	32,6	870,6	0,623	0,956
3	-144752,1	26,9	5388,6	0,902	0,972
4	-21187,4	10,6	2006,4	0,885	0,949
5	77943,3	16,9	4600,6	0,911	0,968
6	19942,9	33,9	588,6	0,522	0,948
7	-56153,4	16,9	3314,5	0,894	0,965
8	73777,8	16,0	4616,1	0,913	0,968
9	18253,9	32,0	571,0	0,526	0,945
10	-53431,6	16,0	3343,1	0,897	0,965
11	61150,3	13,1	4665,8	0,919	0,966
12	13775,9	26,2	525,6	0,545	0,936
13	-105523,4	19,7	5363,7	0,913	0,970
14	-11933,4	6,6	1817,0	0,901	0,930
15	67007,7	15,0	4460,1	0,914	0,967
16	8072,9	30,0	268,7	0,357	0,909
17	-56534,7	15,0	3763,0	0,906	0,966
18	60000,4	13,4	4469,1	0,917	0,966
19	25305,8	27,9	907,1	0,659	0,953
20	60765,4	34,6	1758,7	0,755	0,966
21	63287,0	41,2	1537,0	0,704	0,967
22	-43305,0	34,5	1254,4	0,692	0,962
23	36782,1	28,8	1278,5	0,724	0,960
24	13677,3	30,7	445,7	0,474	0,935
25	-55394,0	15,3	3610,2	0,903	0,965
26	77624,3	16,6	4669,9	0,913	0,968
27	15688,8	33,2	471,9	0,472	0,940
28	30760,9	33,2	925,3	0,633	0,957
29	-52256,2	16,6	3143,8	0,891	0,965
30	98295,7	19,2	5125,1	0,912	0,970
31	37562,4	38,4	979,2	0,620	0,961
32	-16315,4	32,0	510,4	0,499	0,942
33	-40450,2	12,8	3163,6	0,904	0,962
34	43363,2	12,8	3391,4	0,907	0,963
35	-20385,8	25,6	797,2	0,646	0,948
36	21566,3	25,6	843,3	0,659	0,950
37	84411,8	25,6	3300,9	0,868	0,969
38	21566,3	25,6	843,3	0,659	0,950
39	-9903,5	25,6	387,3	0,475	0,921
40	149800,9	32,3	4639,9	0,882	0,972
41	-9680,7	39,0	248,2	0,294	0,920
42	38310,8	39,0	982,4	0,617	0,961
43	70300,6	39,0	1802,7	0,742	0,967
44	-224697,8	32,9	6824,6	0,906	0,973
45	22933,3	26,9	854,1	0,653	0,951
46	-42180,6	13,4	3141,8	0,901	0,962
47	66409,0	13,4	4946,4	0,920	0,967
48	-44899,3	13,4	3344,3	0,905	0,963
49	74219,3	13,4	5528,2	0,922	0,968
50	-37089,0	13,4	2762,6	0,894	0,960
51	96456,4	16,6	5802,9	0,920	0,970
52	51078,0	33,2	1536,4	0,737	0,964

53	-48237,3	21,4	2252,3	0,844	0,964
54	71069,5	17,6	4042,4	0,904	0,968
55	-21173,9	17,6	1204,4	0,781	0,949
56	36038,5	14,4	2505,4	0,883	0,960
57	-31186,2	9,6	3252,0	0,914	0,957
58	60174,5	11,2	5378,5	0,924	0,966
59	-24617,6	16,0	1540,2	0,827	0,953
60	41901,7	17,6	2383,3	0,866	0,962
61	-147838,8	17,6	8408,9	0,927	0,972
62	191638,8	16,9	11311,6	0,927	0,973
63	-40878,3	12,1	3365,3	0,909	0,962
64	62072,3	12,8	4854,6	0,920	0,966
65	-40252,8	12,8	3148,1	0,903	0,962
66	31544,9	8,0	3947,3	0,922	0,958
67	-18418,5	8,0	2304,8	0,906	0,945
68	68928,0	12,8	5390,8	0,922	0,967
69	23160,5	25,6	905,7	0,674	0,951
70	57274,0	25,6	2239,7	0,827	0,966
71	-25907,7	12,8	2026,2	0,874	0,954
72	54493,3	10,0	5440,7	0,924	0,965
73	227602,9	25,0	9089,6	0,925	0,973
74	-60656,9	15,0	4037,4	0,910	0,966
75	95597,2	17,6	5437,5	0,917	0,970
76	35130,2	35,2	999,1	0,640	0,959
77	128837,2	35,2	3664,1	0,854	0,971
78	35130,2	35,2	999,1	0,640	0,959
79	-58255,0	17,6	3313,5	0,892	0,966
80	10929,9	5,2	2110,6	0,914	0,926
81	114468,9	23,1	4959,8	0,904	0,971
82	-27451,9	35,8	766,8	0,576	0,955
83	-59052,8	35,8	1649,4	0,739	0,966
84	-11633,1	35,8	324,9	0,368	0,929
85	-130321,8	22,7	5738,7	0,912	0,971
86	-1551,8	4,8	322,7	0,733	0,707
87	57258,1	14,1	4071,0	0,912	0,966
88	-33081,9	14,1	2352,1	0,880	0,959
89	65398,3	12,8	5114,7	0,921	0,967
90	-56688,6	19,2	2955,7	0,878	0,966
91	45911,2	16,6	2762,0	0,882	0,963
92	-32888,5	10,2	3215,2	0,912	0,958
93	87324,0	16,9	5154,3	0,916	0,969
94	31748,2	33,9	937,0	0,632	0,958
95	-64333,9	16,9	3797,3	0,902	0,967
96	35311,0	8,0	4418,6	0,923	0,960
97	2436,9	16,0	152,5	0,343	0,785
98	-30754,6	8,0	3848,5	0,921	0,957
99	3018,9	3,1	978,6	0,898	0,816
100	106724,5	18,1	5893,5	0,919	0,970
101	26395,9	30,0	878,5	0,639	0,954
102	-198953,2	29,3	6779,3	0,910	0,973
103	-32030,0	14,3	2236,2	0,874	0,958
104	30188,2	8,0	3777,6	0,921	0,957
105	-6969,4	8,0	872,1	0,824	0,899
106	89830,9	15,3	5854,6	0,922	0,969
107	49735,0	30,7	1620,7	0,757	0,964
108	-37690,1	15,3	2456,4	0,878	0,961

109	29905,8	8,0	3742,2	0,921	0,957
110	-17545,9	8,0	2195,6	0,903	0,944
111	98008,6	16,3	6011,9	0,921	0,970
112	31043,7	32,6	952,1	0,643	0,957
113	-69744,5	16,3	4278,1	0,910	0,967
114	25867,8	8,0	3236,9	0,918	0,954
115	-26584,4	8,0	3326,6	0,918	0,954
116	90130,2	16,9	5320,0	0,917	0,969
117	32723,0	33,9	965,7	0,639	0,958
118	-55146,1	16,9	3255,0	0,893	0,965
119	72692,0	13,7	5288,5	0,921	0,968
120	56733,4	31,0	1827,2	0,776	0,966
121	122379,7	35,2	3476,2	0,848	0,971
122	-110406,0	30,7	3597,8	0,863	0,970
123	275773,0	31,0	8894,0	0,920	0,974
124	90462,8	36,4	2482,4	0,803	0,969
125	-31935,8	18,2	1752,7	0,830	0,958
126	47032,4	12,8	3678,3	0,911	0,964
127	-27420,3	12,8	2144,5	0,878	0,955

Příloha 13: Účinnost motoru dle prof. Nováka, účinnost baterie a celková spotřeba energie oběma metodikami (SR – Ž)

Úsek	η_motor_celk	η_bat_celk	Finální výpočet spotřeby energie	
			Čeřovský	Novák
1	0,911	0,985	1908331,32	1915524,95
2	0,906	0,992	361635,48	248497,21
3	0,912	0,983	-557931,78	-564021,82
4	0,852	0,998	-371345,77	-357601,10
5	0,913	0,985	1964273,91	1961766,94
6	0,882	0,993	368736,69	218270,37
7	0,897	0,994	-1047036,95	-1050707,38
8	0,910	0,986	1749651,49	1755373,86
9	0,868	0,994	453725,85	275133,42
10	0,895	0,994	-943208,26	-941250,25
11	0,902	0,988	1181358,04	1203459,02
12	0,807	0,995	1012304,67	682989,30
13	0,911	0,988	-516241,92	-514947,19
14	0,825	0,999	-167937,72	-153815,10
15	0,908	0,987	1492284,93	1502106,92
16	0,741	0,996	1389558,61	669255,29
17	0,896	0,994	-947795,39	-937378,15
18	0,903	0,989	1189785,47	1207861,57
19	0,885	0,993	358005,28	266827,44
20	0,936	0,986	3224273,63	2599883,77
21	0,942	0,984	550089,39	411093,89
22	0,924	0,996	-643279,01	-859396,38
23	0,912	0,991	667459,27	529641,88
24	0,829	0,995	1244664,81	710932,64
25	0,896	0,994	-945296,22	-937813,87
26	0,912	0,985	1916663,62	1918165,97
27	0,856	0,994	643785,25	354846,10
28	0,912	0,991	2916135,21	2022975,95
29	0,894	0,994	-952991,06	-956080,92
30	0,918	0,981	2808983,23	2792226,60
31	0,930	0,989	3892817,62	2594914,78
32	0,832	0,999	-174638,65	-291175,02
33	0,885	0,995	-574214,31	-562356,09
34	0,899	0,992	828082,33	836029,11
35	0,830	0,998	-66617,85	-85523,68
36	0,861	0,994	325163,64	248846,13
37	0,928	0,983	1913547,30	1791155,66
38	0,861	0,994	1138072,75	870961,47
39	0,664	0,999	-18696,98	-26157,63
40	0,920	0,970	1337686,49	1281616,49
41	0,773	1,000	-7422,80	-19498,46
42	0,931	0,989	1204059,75	798367,83
43	0,941	0,983	1508730,22	1190636,29
44	0,885	0,974	-691910,98	-675702,10
45	0,872	0,994	1643409,77	1230433,66
46	0,887	0,995	-627330,44	-617162,73
47	0,902	0,987	1350398,39	1376410,81
48	0,889	0,995	-640446,39	-629197,62
49	0,901	0,986	1505744,75	1542109,44
50	0,881	0,996	-521700,89	-514388,22
51	0,911	0,982	2367098,90	2391504,78
52	0,932	0,988	474936,46	375325,72

53	0,897	0,995	-646356,66	-686645,19
54	0,912	0,986	1413537,21	1400249,51
55	0,765	0,998	-247768,48	-242588,27
56	0,891	0,993	677737,25	671750,72
57	0,872	0,996	-334758,29	-319320,60
58	0,891	0,989	986906,39	1023551,12
59	0,832	0,997	-279883,65	-281716,10
60	0,892	0,991	1562584,28	1516028,23
61	0,900	0,983	-609759,28	-591986,32
62	0,884	0,964	909857,58	953716,81
63	0,885	0,995	-554284,02	-539659,84
64	0,900	0,988	1324508,54	1353910,23
65	0,885	0,995	-601500,20	-589135,19
66	0,877	0,994	539368,33	567119,35
67	0,851	0,998	-217525,21	-204344,97
68	0,898	0,987	1294155,84	1328772,95
69	0,868	0,994	551454,73	428153,00
70	0,923	0,988	204506,42	183195,73
71	0,858	0,997	-353265,57	-347053,09
72	0,883	0,990	1108325,96	1160126,83
73	0,893	0,957	949083,69	982468,14
74	0,898	0,993	-875895,90	-864292,37
75	0,914	0,982	2490113,55	2498023,56
76	0,922	0,990	328025,06	227577,67
77	0,928	0,974	1087682,11	1001391,66
78	0,922	0,990	474454,85	329167,93
79	0,891	0,993	-1124965,92	-1124095,67
80	0,849	0,998	299694,81	322769,94
81	0,922	0,978	1702924,03	1669051,39
82	0,902	0,998	-25246,53	-39564,36
83	0,933	0,994	-258611,82	-326676,39
84	0,793	0,999	-64761,57	-139471,86
85	0,912	0,985	-1505091,98	-1505117,08
86	0,263	1,000	-18482,20	-6620,28
87	0,905	0,989	1680671,89	1694416,86
88	0,873	0,996	-654867,85	-649745,79
89	0,899	0,988	1229094,04	1259095,80
90	0,897	0,994	-415695,03	-424339,76
91	0,899	0,991	594070,76	582786,63
92	0,875	0,996	-375983,16	-360824,29
93	0,913	0,983	2191964,44	2199753,80
94	0,915	0,991	1884272,49	1301628,33
95	0,901	0,993	-1210915,25	-1209913,47
96	0,874	0,993	414899,04	438106,74
97	0,394	0,998	174513,75	151993,66
98	0,860	0,996	-277180,26	-258642,09
99	0,774	0,999	80039,05	92902,71
100	0,915	0,980	1565143,42	1572509,11
101	0,895	0,993	685570,91	489955,68
102	0,894	0,977	-79218,85	-77787,26
103	0,869	0,996	-515490,75	-512592,31
104	0,877	0,994	646042,26	678298,68
105	0,713	0,999	-89225,51	-77212,82
106	0,907	0,983	2029612,16	2063504,66
107	0,928	0,988	1002832,97	818538,84
108	0,878	0,996	-623123,10	-623489,54

109	0,877	0,994	512152,24	537565,28
110	0,848	0,998	-206385,67	-193743,47
111	0,909	0,981	2036095,04	2063423,19
112	0,911	0,991	8340,54	5881,06
113	0,902	0,992	-1022099,31	-1013561,56
114	0,878	0,995	560442,27	585965,63
115	0,861	0,997	-238276,44	-223341,69
116	0,913	0,983	2260379,56	2271561,22
117	0,917	0,991	490109,94	341594,87
118	0,896	0,994	-1026823,86	-1030972,49
119	0,903	0,986	1469870,66	1499790,25
120	0,931	0,987	1766466,57	1471050,88
121	0,929	0,975	518947,89	473691,48
122	0,924	0,988	-411087,28	-440263,06
123	0,879	0,948	1570491,02	1642246,63
124	0,937	0,980	2592070,36	2220226,67
125	0,841	0,997	-591538,24	-599771,00
126	0,900	0,991	1267587,10	1282916,72
127	0,863	0,997	-495287,18	-486720,86